



HAL
open science

L'optique pour les pixels des capteurs d'images CMOS

Jérôme Vaillant

► **To cite this version:**

Jérôme Vaillant. L'optique pour les pixels des capteurs d'images CMOS. Optique [physics.optics]. UGA (Université Grenoble Alpes), 2017. tel-02119299

HAL Id: tel-02119299

<https://cea.hal.science/tel-02119299>

Submitted on 3 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Manuscrit d'Habilitation à Diriger des Recherches
L'optique pour les pixels des capteurs d'images CMOS

Jérôme Vaillant

17 janvier 2017

Table des matières

1	Curriculum Vitæ	1
2	Contexte général des recherches	7
2.1	Parcours professionnel	7
3	Capteurs d'images en technologie CMOS	9
3.1	Introduction aux capteurs d'images CMOS	9
3.1.1	Historique de l'imagerie numérique	9
3.1.2	Principe de fonctionnement d'un capteur CMOS	11
3.2	Caractérisation électro-optique	17
3.3	Simulations optiques	21
3.3.1	Tracé de rayons	21
3.3.2	Simulations électromagnétiques	26
3.4	Colorimétrie et qualité des images	36
3.4.1	Caractérisation hors d'axe du rendement quantique	39
3.4.2	Modélisation du bruit sur image	40
3.4.3	Recherche de gabarits de filtres optimaux	41
4	Travaux en cours et perspectives	45
4.1	L'électronique organique	45
4.1.1	Introduction à l'électronique organique	45
4.1.2	Caractérisation électro-optique	45
4.1.3	Modélisation physique de la photodiode organique	47
4.2	Contexte de l'imagerie visible aujourd'hui	48
4.2.1	Imagerie grand public	49
4.2.2	Capteurs pour l'automobile	50
4.2.3	Applications médicales	51
4.3	Développements actuels et futurs	52
4.3.1	Imagerie 3D	52
4.3.2	Imagerie en couleur sous faible éclairement	60
4.3.3	Imagerie proche infrarouge	62
4.3.4	Interférométrie d'intensité	63
4.3.5	Conclusion	65

Chapitre 1

Curriculum Vitæ

Jérôme Vaillant

CEA/LETI - Laboratoire d'Imagerie Visible

CEA/LETI/DOPT/SLIR/LIV
17 rue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9
☎ 04.38.78.64.26
✉ jerome.vaillant@cea.fr

Formation

- 1997–2000 **Doctorat « Astrophysique et milieux dilués »**, Université Claude Bernard, Lyon, Mention très honorable.
- 1996–1997 **Diplôme d'Études Approfondies « Astrophysique et milieux dilués »**, Université Joseph Fourier, Grenoble / École Normale Supérieure, Lyon, Mention Bien (2ème/12).
- 1993–1996 **Diplôme d'ingénieur**, ENSPM (Centrale Marseille), Marseille, Spécialité optique.
- 1991–1993 **Classes préparatoires mathématiques supérieures et spéciales M**, Nantes.
- 1991 **Baccalauréat série C**, Nantes.

Expérience Professionnelle

- Depuis oct. 2013 **Ingénieur-Chercheur**, CEA/LETI/DOPT – Laboratoire d'Imagerie Visible.
Développement de solutions optiques pour les pixels CMOS : simulation optique des pixels CMOS, traitement et reconstruction d'images, caractérisation électro-optique.
Expert CEA pour les domaines : capteur d'images, optique et instrumentation,
Gestion de projets dans le cadre du programme bilatéral LETI/STMicroelectronics (2014) et d'action exploratoire dans le cadre de l'Institut Carnot LETI (2015),
1 thèse co-encadrée (2014-2015), 2 sujets de thèse ouverts (2017-2020), encadrement d'un post-doc
Enseignements à l'IOGS (SupOptique St Etienne),
1 publication, 2 brevets déposés, 2 propositions de brevets.
- Mai 2011–oct. 2013 **Ingénieur-Chercheur**, CEA/LITEN/DTNM – Laboratoire des Composants Imprimés.
Développement de la caractérisation électro-optique des photodiodes organiques dans le cadre du laboratoire commun CEA/Isorg.
1 thèse co-encadrée,
3 publications, 3 brevets déposés.
- Juin 2010–mai 2011 **Ingénieur**, STMicroelectronics – Imaging Business Unit, Grenoble.
Expert en systèmes optiques pour les pixels, chargé de la simulation et de la caractérisation optique des imageurs SPAD pour l'imagerie 3D, en collaboration avec le site d'Edinburgh (UK), notamment dans le cadre du projet européen SPADNet.
4 brevets déposés.
- Oct. 2000–juin 2010 **Ingénieur**, STMicroelectronics – Centre de R&D, Crolles.
Responsable de l'activité de simulation optique des pixels CMOS, chargé du développement des moyens de caractérisation optique des capteurs d'images CMOS.
3 thèses co-encadrées,
13 publications, 8 brevets déposés.
- Oct. 1997–sept. 2000 **Doctorant**, Centre de Recherche Astronomique de Lyon – Observatoire de Lyon.
Démonstration de la faisabilité de la « Mesure de tilt atmosphérique à partir de sa variation chromatique pour l'étoile laser polychromatique ».
5 publications.

Encadrement et enseignement

Post-doctorat

- 2015 Meera Mohan Kumar Sreelathan, dans le cadre du projet d'action exploratoire financé par l'Institut Carnot LETI, en collaboration avec l'INAC et l'IOGS (St Etienne)

Thèses

- 2014–2015 Bruno Willems, « Développement d'un pixel pour capteur d'image tridimensionnelle passif », au sein du Laboratoire d'Imagerie Visible (CEA/LETI)
Directeur de thèse : Frédéric Devernay (INRIA, Montbonnot),
École doctorale : Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique,
Co-encadrement à hauteur de 50%.

- 2011–2014 Benjamin Bouthinon, « *Impact des états de gap sur les performances des photodiodes organiques* », au sein du Laboratoire de Fiabilité et Vieillesse des Composants (CEA/LITEN)
 Directeur de thèse : Pr. Raphaël Clerc (IOGS, St Étienne),
 École doctorale : Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal, Université Grenoble Alpes,
 Co-encadrement à hauteur de 25%,
 Benjamin Bouthinon est actuellement en CDI au sein de la société Isorg (startup issue du CEA développant des photodétecteurs en électronique organique).
- 2008–2011 Clémence Mornet, « *Reconstruction des images couleurs sous faible éclairage* », au sein du centre de R&D de STMicroelectronics à Crolles
 Directrice de thèse : Pr. Isabelle Schanen (INP Grenoble),
 École doctorale : Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal, Université Grenoble Alpes,
 Co-encadrement à hauteur de 80%,
 Clémence Mornet est embauchée en CDI à STMicroelectronics pour poursuivre les développements en colorimétrie et caractérisation optique des pixels
- 2006–2009 Axel Crocherie, « *Simulation de la diffraction dans les capteurs d'images CMOS* », au sein du centre de R&D de STMicroelectronics à Crolles
 Directrice de thèse : Pr. Isabelle Schanen (INP Grenoble),
 École doctorale : Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du Signal, Université Grenoble Alpes,
 Co-encadrement à hauteur de 80%,
 Axel Crocherie est embauché en CDI à STMicroelectronics pour poursuivre les développements en simulation et caractérisation optique des pixels
- 2002–2005 Flavien Hirigoyen, « *Optimisation de la collection des photons pour les capteurs d'images en technologie CMOS* », au sein du centre de R&D de STMicroelectronics à Crolles
 Directrice de thèse : Pr. Mireille Commandré (Institut Fresnel, Marseille),
 École doctorale : Optique, image et signal, Université Marseille III,
 Co-encadrement à hauteur de 80%,
 Flavien Hirigoyen est embauché en CDI à STMicroelectronics pour poursuivre les développements en simulation et caractérisation optique des pixels

Jury de thèse

- 2011 Ibrahima Djité « *Analyse et modélisation de la collection de charges dans les capteurs d'images CCD et CMOS : application à l'évaluation de la fonction de transfert de modulation et de l'efficacité de collection* » - Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace

Projets de fin d'études et Master II

- 2012 Anthony Dal Gobbo, « Caractérisation électro-optique de photodiodes organiques », PHELMA Grenoble, filière Biomedical Engineering.
 Sébastien Schaller, « Pilotage et automatisation d'un banc de caractérisation électro-optique pour les photodiodes organiques », IUT Mesure Physique de Grenoble.
- 2008 Staffan Ronnås, « A new balance between color fidelity and noise in CMOS image sensors », ENSIMAG Grenoble / KTH Royal Institut of Technology de Stockholm.
- 2007 Clémence Mornet « Conception de filtres interférentiels couleur et infrarouge et mesure de la FTM d'un pixel pour capteurs d'images CMOS », PHELMA Grenoble, filière Physique des composants.
- 2005 Elsa Cicerale, « Simulation optique pour l'optimisation de la collection de la lumière dans les capteurs d'images CMOS », ENSICAEN Caen, filière Instrumentation lumière.
- 2001 Thomas Decroux, « Mise en place de la mesure de réponse spectrale de capteurs d'images CMOS », ENSPG Grenoble, filière Instrumentation.
 Maude Balégant, « Étude et simulation de la résolution spatiales des capteurs d'images CMOS », ENSERG Grenoble, option codage et « Déconvolution des mesures de réponse spatiale des capteurs d'images CMOS », ENSERG Grenoble, DEA Signal Image Parole Télécoms.

Enseignement

- Depuis 2014 « Capteurs CMOS pour l'imagerie », Institut d'Optique Graduate School (IOGS), Saint Étienne, dans le cadre du cycle « Optique du futur »

Publications et communications

Journaux internationaux à comité de lecture

B. Bouthinon, R. Clerc, J. Vaillant, J.-M. Verilhac, J. Faure-Vincent, D. Djurado, I. Ionica, G. Man, A. Gras, G. Pananakakis, R. Gwoziecki, and A. Kahn. Impact of blend morphology on interface state recombination in bulk heterojunction organic solar cells. *Advanced Functional Materials*, 25(7) :1090–1101, February 2015.

A. Daami, J. Vaillant, R. Gwoziecki, and C. Serbutoviez. A complete SPICE subcircuit-based model library for organic photodiodes. *Solid-State Electronics*, 75 :81–85, September 2012.

B. Mortini, C. Aumont, J. P. Reynard, E. Mortini, A. Crocherie, F. Hirigoyen, and J. Vaillant. High index spin-on photosensitive material and process optimization for image sensor devices. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 22(6) :707–711, 2009.

J. Vaillant. Wavefront sensor architectures fully embedded in an image sensor. *Appl. Opt.*, 46(29) :7110–7116, Oct 2007.

J. Vaillant, A. Crocherie, F. Hirigoyen, A. Cadien, and J. Pond. Uniform illumination and rigorous electromagnetic simulations applied to cmos image sensors. *Opt. Express*, 15(9) :5494–5503, Apr 2007.

R. Foy, M. Tallon, I. Tallon-Bosc, E. Thiebaut, J. Vaillant, F.-C. Foy, D. Robert, H. Friedman, F. Biraben, G. Grynberg, J.-P. Gex, A. Mens, A. Migus, J.-M. Weulersse, and D. J. Butler. Photometric observations of a polychromatic laser guide star. *J. Opt. Soc. Am. A*, 17(12) :2236–2242, Dec 2000.

Conférences internationales avec actes

R. Clerc *et al.* Current Status and Challenges of the Modeling of Organic Photodiodes and Solar Cells. In *IEDM proceedings*. IEEE, December 2016.

J. Vaillant *et al.* Characterization of pixel crosstalk and impact of bayer patterning by quantum efficiency measurement. In *Proc. SPIE*, volume 7876, pages 787613–787613–10, 2011.

C. Mornet *et al.* An image quality evaluation tool simulating image sensors including quantum efficiency off-axis effect. In *Proc. SPIE*, volume 7876, pages 78760M–78760M–13, 2011.

C. Mornet *et al.* Toward a quantitative visual noise evaluation of sensors and image processing pipes. In *Proc. SPIE*, volume 7876, pages 78760Q–78760Q–12, 2011.

C. Mornet *et al.* Evaluation of color error and noise on simulated images. In *Proc. SPIE*, volume 7537, pages 75370Y–75370Y–12, 2010.

F. Hirigoyen *et al.* Finite-difference time domain based electro-optical methodologies to improve cmos image sensor pixels performances. In *Proc. SPIE*, volume 7723, pages 772318–772318–11, 2010.

S. Audran *et al.* Grayscale lithography process study applied to zero-gap microlenses for sub-2 μm cmos image sensors. In *Proc. SPIE*, volume 7639, pages 763910–763910–11, 2010.

A. Crocherie *et al.* From photons to electrons : a complete 3d simulation flow for CMOS image sensor. In *IEEE 2009 International Image Sensor Workshop IISW*, 2009.

J. Vaillant *et al.* Versatile method for optical performances characterization of off-axis cmos pixels with microlens radial shift. In *Proc. SPIE*, volume 6817, pages 681707–681707–11, 2008.

A. Crocherie *et al.* Three-dimensional broadband fdtd optical simulations of cmos image sensor. In *Proc. SPIE*, volume 7100, pages 71002J–71002J–12, 2008.

F. Hirigoyen *et al.* Fdtd-based optical simulations methodology for cmos image sensors pixels architecture and process optimization. In *Proc. SPIE*, volume 6816, pages 681609–681609–12, 2008.

M. Cohen *et al.* Fully optimized cu based process with dedicated cavity etch for 1.75 μm and 1.45 μm pixel pitch CMOS image sensors. In *IEEE International Electron Devices Meeting*, pages 812–815, 2006.

J. Vaillant and F. Hirigoyen. Optical simulation for cmos imager microlens optimization. In *Proc. SPIE*, volume 5459, pages 200–210, 2004.

R. Foy *et al.* Polychromatic guide star : feasibility study. In *Proc. SPIE*, volume 4065, pages 312–323, 2000.

J. Vaillant *et al.* Elpoa : data processing of chromatic differences of the tilt measured with a polychromatic laser guide star. In *Proc. SPIE*, volume 4007, pages 308–315, 2000.

M. Schoeck *et al.* Elp-oa : measuring the wavefront tilt without a natural guide star. In *Proc. SPIE*, volume 4125, pages 41–52, 2000.

R. Foy *et al.* Polychromatic guide star : feasibility study. In *Proc. SPIE*, volume 4065, pages 312–323, 2000.

R. Foy *et al.* Elpoa : toward the tilt measurement from a polychromatic laser guide star. In *Proc. SPIE*, volume 4007, pages 284–295, 2000.

Présentations orateur invité

2016 OMNT International Symposium on Hybrid organic - inorganic Photonics : Boosting Lighting, Energy, Imagers, Sensors by organic materials - Grenoble - « *Organic layers and devices in advanced CMOS imagers* »

2015 Journée de l'Imagerie Optique Non-Conventionnelle - 10^{ème} édition - Paris - « *15 ans de développement de l'imagerie CMOS, du téléphone portable à l'imagerie non-conventionnelle* »
Journée Dautreppe 2015 Photonique - Grenoble - « *Imagerie CMOS* »

2014 Journée Optique Non-Conventionnelle du Pôle Optique Rhône-Alpes - Lyon - « *Les imageurs CMOS avancés : état de l'art et perspectives pour l'imagerie non conventionnelle* »

Brevets

2016 2 propositions de brevet en cours

2014 1 brevet : FR3026227, 1 brevet déposé

2013 2 brevets : US2015355784, FR3001063

2012 1 brevet : US2015220211

2010 6 brevets : US2012162391, US2012162410, US2012147230, US2012092459, US2011073976, US2012161269

2009 1 brevet : US2010289101

2008 2 brevets : EP2180513 (US2010102206), US2009244347

2005 2 brevets : US2006152616, EP1626442 (US2006033008)

2003 1 brevet FR2862426 (US2006278906)

Comités de lecture de journaux internationaux

2016 Applied Optics (1 articles), JOSA A (1 article), EuroPhysics Letters (1 article)

2015 Applied Optics (2 articles), Optics Express (1 article)

2013 Applied Optics (3 articles)

2012 Optics Letters (1 article), Applied Optics (1 article)

2011 Optics Express (1 article)

2010 Applied Optics (1 article)

2008 Applied Optics (2 articles), Optics Express (1 article)

Chapitre 2

Contexte général des recherches

2.1 Parcours professionnel

Après un diplôme d'ingénieur avec une spécialisation en optique (École Centrale Marseille), j'ai choisi de m'initier à la recherche fondamentale et d'approfondir mes connaissances dans le domaine de l'astrophysique avec un DEA « Astrophysique et milieux dilués », à la suite duquel j'ai réalisé une thèse associant les deux domaines (optique et astrophysique), préliminaire à une carrière dans la recherche technologique. Cette thèse, centrée sur la démonstration de la faisabilité d'un principe d'étoile laser pour les systèmes d'optique adaptative des grands télescopes, m'a montré la nécessité de coupler simulation, expérimentation et caractérisation fine. Cette expérience acquise, j'ai intégré en octobre 2000 le centre de recherche et développement de STMicroelectronics à Crolles. J'ai eu initialement la charge du développement des bancs optiques pour la caractérisation des pixels, mais il m'est rapidement apparu que la simulation optique des pixels, alors inexistante, était fondamentale pour l'optimisation des performances. Ce travail s'est déroulé pendant dix ans, au cours desquels la taille des pixels est passée de $5,6\mu m$ à $1,4\mu m$. Ceci a nécessité plusieurs innovations importantes, dans la structure même du pixel, rendues possibles grâce au couplage constant entre la caractérisation des pixels et la modélisation des phénomènes optiques en jeu. Ces résultats n'ont été obtenus que grâce à une forte interaction avec les différentes équipes (conception, procédé de fabrication, matériaux, etc) et avec l'appui des étudiants, qui sont intervenus au cours de stages et de projets de fin d'études, pour les points ayant un périmètre bien borné, mais également en thèse pour les sujets plus volumineux et plus ouverts. L'expertise ainsi acquise m'a conduit à travailler ensuite à la division Imaging de STMicroelectronics à Grenoble, notamment sur les dispositifs de type SPAD (*Single Photon Avalanche Diode*). Souhaitant me recentrer sur l'activité de recherche et développement, j'ai rejoint le CEA de Grenoble en 2011 au sein du Laboratoire des Composants Imprimés du CEA-LITEN[†], pour travailler sur les dispositifs photodétecteurs en électronique organique. Dans ce cadre, j'ai développé les moyens de caractérisation électro-optique, notamment grâce à la collaboration de deux étudiants en projet de fin d'études (ingénieur et technicien). Je me suis aussi intéressé aux propriétés physiques des semiconducteurs organiques et à leur modélisation au travers du co-encadrement d'une thèse au CEA-LITEN. J'ai retrouvé les capteurs d'images CMOS[‡] fin 2013 en intégrant le Laboratoire d'Imagerie Visible du CEA-LETI[§]. L'objectif actuel est de développer l'optique au niveau du pixel, que ce soit sur les aspects de restitution de la couleur[¶] ou d'ajout de fonctionnalités comme pour la détection de la distance.

†. Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Energies Nouvelles et les nanomatériaux

‡. Complementary Metal Oxide Semiconductor

§. Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Information

¶. Par exemple en modifiant la disposition des filtres colorés (mosaïque couleur) ou les corrections appliquées sur l'image

Le lecteur trouvera tout d'abord une introduction aux capteurs d'images CMOS (§ 3.1) qui reprend pour l'essentiel les présentations faites en 2015 aux JIONC (*Journées Imagerie Optique Non-Conventionnelle*) et à la conférence Dautreppe Photonique. Sur la base de cette introduction, je présente les travaux de recherche et d'encadrement de doctorants sur les thèmes de la simulation optique des pixels de taille micrométrique (§ 3.3.1 et § 3.3.2) et de la colorimétrie (§ 3.4). Ce manuscrit conclut avec une présentation des travaux que je mène au CEA, tout d'abord au LITEN et à présent au sein du Laboratoire d'Imagerie Visible, et les perspectives de travail à moyen terme pour le développement de nouveaux capteurs d'images et de nouvelles fonctionnalités (§ 4).

Chapitre 3

Capteurs d'images en technologie CMOS

3.1 Introduction aux capteurs d'images CMOS

Les capteurs d'images ont littéralement envahi notre quotidien : ils sont présents dans tous les dispositifs électroniques et informatiques grand public, en premier lieu les smartphones et autres appareils photos. On estime à mille milliards le nombre de photos prises en 2015 ! Les capteurs d'images sont également présents dans de nombreux dispositifs d'interface sans contact (p. ex. Kinect de microsoft), mais on les retrouve aussi dans les domaines de l'imagerie médicale et industrielle. Enfin, ce sont des capteurs clef pour le développement des voitures autonomes, pour lesquelles différentes modalités d'imagerie sont envisagées : imagerie visible, proche infrarouge, mesure de distance. Le marché est donc extrêmement important. Deux technologies (CCD et CMOS) ont été développées pour réaliser des imageurs, nous verrons tout d'abord comment s'est développée chaque technologie (§ 3.1.1) et les raisons de la domination actuelle des capteurs CMOS. Pour ceux-ci, nous présenterons les principes de base du fonctionnement d'un pixel et d'un circuit (§ 3.1.2), afin de bien appréhender les contraintes qui ont pesé sur les travaux présentés dans la suite du mémoire.

3.1.1 Historique de l'imagerie numérique

La technologie CCD (*Charge Coupled Device*), inventée en 1970 au Bell Laboratory, fut mise à l'honneur en 2009 par l'attribution du prix Nobel à Willard Boyle et George Smith. Elle domina le marché de l'imagerie numérique très rapidement, remplaçant les caméras à tubes. Cette nouvelle technologie permettait de fabriquer des capteurs monolithiques beaucoup moins encombrants et fonctionnant à des tensions bien plus basses (quelques dizaines de volts contre des centaines de volts pour les tubes). Comme montré sur la figure 3.1, le principe de fonctionnement des capteurs CCD est basé sur la création d'une zone de déplétion dans un semi-conducteur photosensible, le silicium, à l'aide d'une capacité MOS (*Metal Oxide Semiconductor*). Cette zone de déplétion crée un puits de potentiel où s'accumulent les charges photo-générées proportionnellement au flux lumineux incident. Ce sont les pixels du capteur d'images. Les charges accumulées à t_0 sont transférées dans un puits adjacent créé à t_1 . Puis, le puits initial est supprimé à t_2 . L'opération est répétée de proche en proche en pilotant les phases 1/2/3. La lecture de la matrice (figure 3.2) se fait alors en décalant les charges de ligne à ligne vers un registre à décalage qui lit séquentiellement les colonnes de chaque ligne. Les dispositifs ainsi développés ont montré rapidement de très bonnes performances, permettant par exemple d'être utilisés pour la première fois lors de la mission Galileo, dont la conception a démarré dès 1977, soit seulement 7 ans après l'invention du CCD.

Bien que l'invention des capteurs CCD et celle des capteurs CMOS soient concomitantes, ces derniers sont longtemps restés moins performants et surtout cantonnés à des curiosités de laboratoire ou à des capteurs aux performances dégradées : dans des objets de faible valeur, tels que les

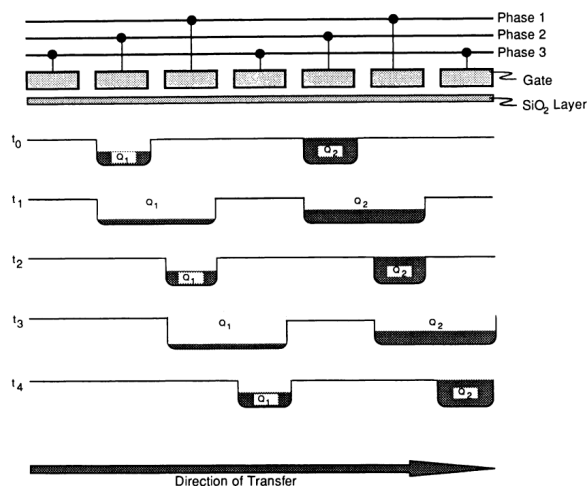


FIGURE 3.1 – Principe de transfert des charges dans un CCD [1].

jouets. Toutefois au cours des années 1999-2000, les possibilités d'intégrer un certain nombre de fonctions numériques à ces imageurs, la faible consommation d'énergie et le marché croissant des téléphones portables ont poussé plusieurs grands fabricants de semi-conducteurs à investir dans le développement des capteurs CMOS. L'accès aux technologies de pointe et les lourds investissements des sociétés ont permis aux capteurs CMOS de rivaliser très rapidement avec les capteurs CCD.

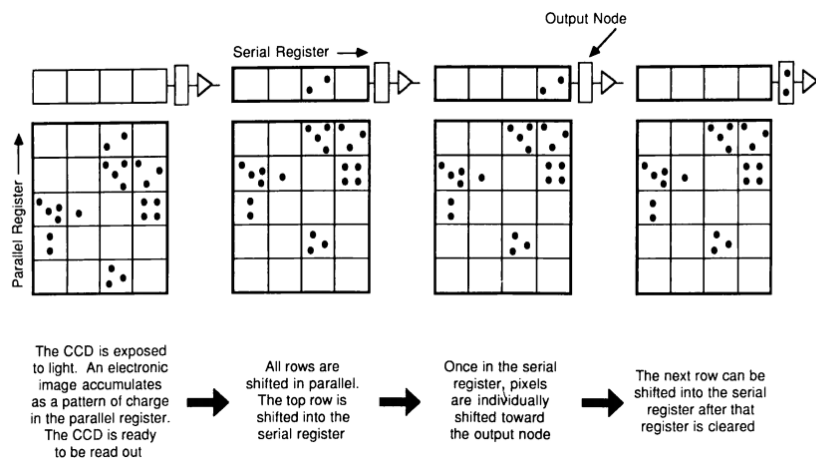


FIGURE 3.2 – Principe de lecture d'une matrice de pixels CCD [1].

Initialement d'une taille de $5,6\mu m$ en 2000, avec des performances légèrement en retrait par rapport aux CCD, les pixels CMOS ont rattrapé, puis dépassé ceux-là, avec une taille actuelle de $1,1\mu m$ (et $0,9\mu m$ en développement), voir figure 3.3. Malgré le fait que l'objet final puisse apparaître simple et d'une valeur assez faible, c'est bien le marché de la téléphonie mobile qui a imposé l'évolution fulgurante des pixels. Ceci a conduit à utiliser des technologies issues des capteurs CCD de hautes performances (comme l'éclairage face arrière ou *backside illumination*) et à développer de nouvelles technologies. Maintenant disponible pour d'autres applications, notamment scientifiques, le pixel peut être intégré au processus de co-design pour des capteurs d'images non-conventionnels.

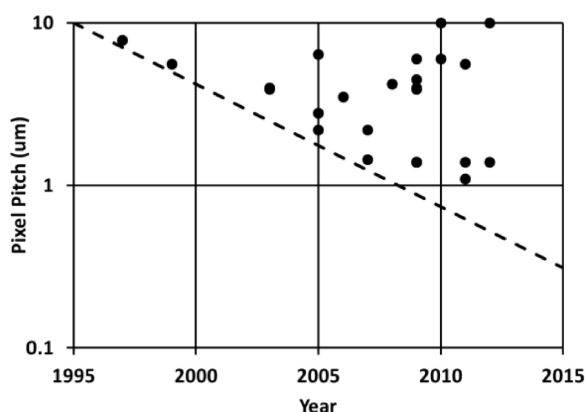


FIGURE 3.3 – Évolution de la taille des pixels aux cours des deux dernières décennies sur la base des articles publiés, la courbe en pointillé montre la tendance de réduction du pas[2].

3.1.2 Principe de fonctionnement d'un capteur CMOS

Le but de cette partie est de faire ressortir les contraintes et les paramètres principaux pour le développement de nouveaux capteurs. La description n'est donc pas exhaustive.

3.1.2.1 Caméra miniature, contraintes et dimensionnement



FIGURE 3.4 – Évolution de la taille des caméras miniatures : (a) pour un capteur de définition VGA (0.3Mpixel) entre 2000 et 2006, (b) pour un capteur 2Mpixels entre les générations de pixel $3\mu\text{m}$ et $1,75\mu\text{m}$, source STMicroelectronics.

Les développements considérables effectués, depuis les années 2000, par tous les fabricants de capteurs CMOS ont été pilotés par le marché des caméras et appareils photos miniatures pour les téléphones portables. Or, la réalisation de mini caméras est très contrainte, en premier lieu par le volume disponible. En effet dans une recherche continue d'objets de plus en plus fins, la taille typique d'une caméra est inférieure à $5 \times 5 \times 5\text{mm}^3$ (voir figure 3.4).

Les deux conséquences principales sont :

- une distance faible entre la lentille frontale et le capteur induisant la conception d'optiques compactes et spécifiques. Comme on peut le voir sur la figure 3.5, les angles du rayon principal* en fonction de la position dans l'image varient fortement et de façon non linéaire,
- une surface disponible pour le plan image réduite ($< 5 \times 5\text{mm}^2$), d'où la nécessité de développer des pixels de plus en plus petits, au fur et à mesure que la définition des images augmente. Ainsi la taille des pixels est passée de $5,6\mu\text{m}$ en 2000 à $1\mu\text{m}$ actuellement, alors

*. rayon passant par le centre de la pupille de sortie de l'objectif et par le centre du pixel d'intérêt

que la définition des images est passée d'un format VGA (640×480 pixels soit $0,3Mpix$) à des formats de plusieurs millions de pixels.

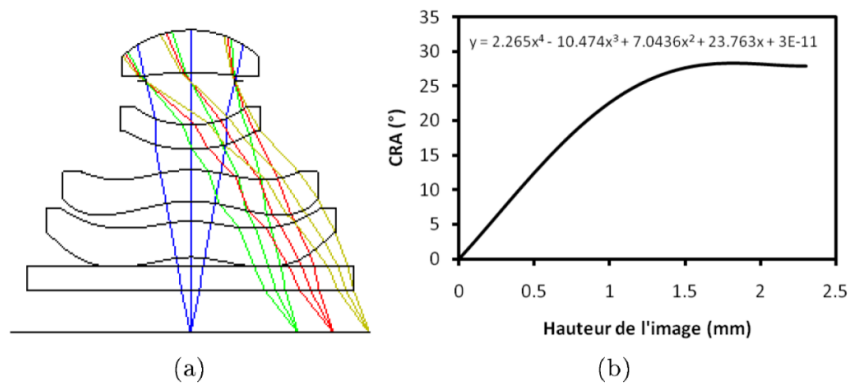
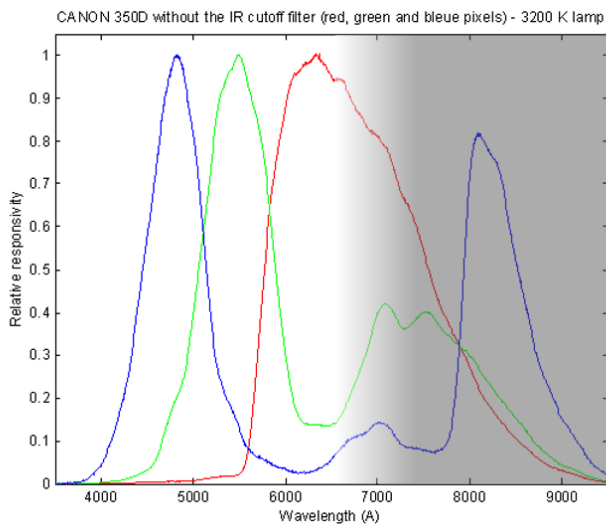
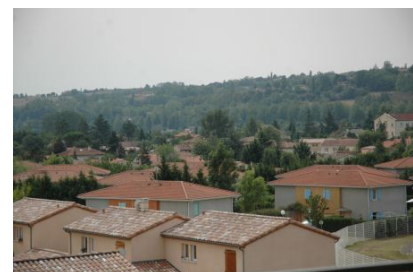


FIGURE 3.5 – *Modèle d'un objectif de caméra miniature et variation de l'angle de rayon principal en fonction de la position dans le plan image, source STMicroelectronics.*

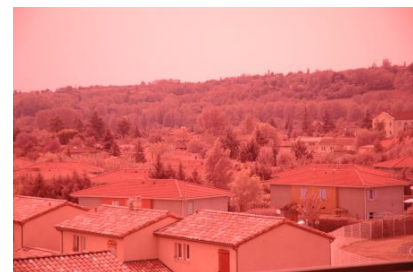
Dans le cadre de la photographie et de la vidéo, la détection d'images en couleur se fait généralement grâce à utilisation d'un réseau de filtres colorés rouge, vert et bleu suivant le motif Bayer. Ces filtres sont typiquement réalisés avec des résines pigmentées présentant une bonne sélectivité dans le visible, mais transparentes dans l'infrarouge. Or, le spectre de détection du silicium s'étend jusqu'à $1,1\mu m$. En conséquence, le capteur est capable de détecter des signaux invisibles à l'œil. Le rayonnement infrarouge doit être supprimé en interposant un filtre infrarouge afin d'obtenir une bonne réjection au-delà de $650nm$. Compte tenu des contraintes d'espace disponible qui pèsent sur le design optique de l'objectif, le substrat de verre du filtre infrarouge doit être pris en compte [3–5].



(a)



(b) *Image avec filtre infrarouge*



(c) *Image sans filtre infrarouge*

FIGURE 3.6 – (a) *Rendements quantiques des pixels rouges, verts et bleus d'un capteur commercial, sans filtre infrarouge et normalisés à leur maximum respectif, la zone grisée correspond à la partie du spectre coupée par le filtre infrarouge, (b) image obtenue avec le capteur équipé de son filtre infrarouge, (c) image obtenue en l'absence de filtre infrarouge, source C. Buil [6]*

3.1.2.2 Fonctionnement d'un pixel

Tout comme les capteurs CCD, les pixels en technologie CMOS reposent sur l'effet photoélectrique dans le silicium et la dissociation des paires électron-trou grâce au champ interne de la photodiode. Cependant, ces pixels incluent des éléments actifs (transistors) réalisant non seulement l'adressage et la ré-initialisation du pixel, mais aussi la conversion charge-tension. Enfin cette technologie permet d'intégrer sur le même circuit des fonctions électroniques telles que les circuits de pilotage, de lecture, d'échantillonnage, de conversion analogique-numérique et de génération des conditions de fonctionnement (alimentations et chronogrammes). On parle alors de « *System on Chip* » (SoC). La présentation de toutes ces fonctions dépasse le cadre de ce manuscrit, aussi je ne détaillerai dans la suite que les pixels. Toutefois, le lecteur pourra se reporter aux références suivantes [7–9] pour plus de détails sur le fonctionnement des circuits.

Architecture d'un pixel en technologie CMOS La structure initiale d'un pixel CMOS est dite « 3T », car le pixel inclut trois transistors et une photodiode (voir figure 3.7). On y trouve un

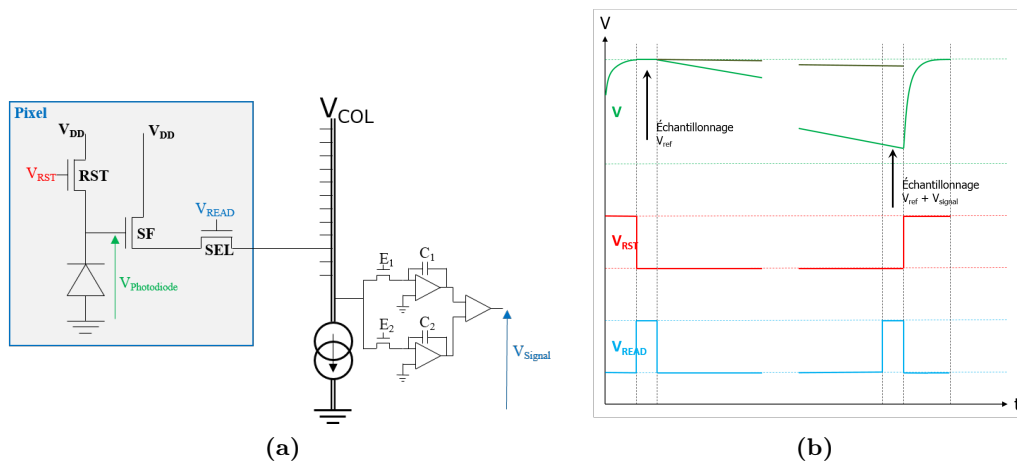


FIGURE 3.7 – Pixel « 3T » à trois transistors (a) schéma de principe, (b) chronogramme d'intégration et de lecture du signal.

transistor permettant la ré-initialisation de la photodiode (RST), un transistor pour la sélection du pixel (SEL) et un transistor utilisé en source-suiveuse (SF : *Source Follower*), qui duplique la tension appliquée sur sa grille ($V_{photodiode}$) au niveau de la source et donc de la colonne lorsque le transistor SEL est passant. On s'affranchit ainsi de l'importante différence de capacité entre la photodiode (d'autant plus faible que le pixel est petit) et celle de la colonne de la matrice (d'autant plus élevée que le nombre de pixels est important). Ce type de pixel permet d'intégrer, durant le temps d'exposition, le flux lumineux incident de la façon suivante :

1. ré-initialisation de la photodiode : le transistor RST est rendu passant et la tension V_{DD} (typiquement $+3,3V$ ou $+2,8V$) est appliquée sur la cathode de la photodiode,
2. lecture du niveau de référence : une fois la tension stabilisée aux bornes de la photodiode ($V_{photodiode} = V_{ref} \simeq V_{DD}$), le transistor RST est rendu bloquant et le transistor SEL activé. Ainsi on retrouve au niveau de la colonne, via le transistor SF, la tension $V_{photodiode}$, il est alors possible d'échantillonner cette tension de référence (V_{ref}) en bas de la colonne sur la capacité C_1 de stockage d'un étage différentiel par activation du signal E_1 ,
3. intégration du photo-courant : la tension aux bornes de la photodiode décroît sous l'effet des électrons photo-générés qui s'accumulent dans la capacité équivalente de la photodiode. La chute de tension est proportionnelle au flux lumineux et au temps d'intégration,

échantillonnage corrélé au niveau de la colonne. Le passage de l'architecture 3T à celle 4T a permis un gain significatif sur le bruit de lecture des pixels : pour un pixel ayant une capacité de stockage de $C_{pix} = 2fF$, l'écart type du bruit Josephson est $\sigma = \frac{1}{q} \sqrt{2k_B T C_{pix}} \simeq 25e^-$, avec k_B la constante de Boltzmann et T la température du circuit. Ce résultat représente environ dix fois l'écart type de l'ensemble des autres bruits introduit par la chaîne de lecture du pixel : typiquement entre $0,5e^-$ et $2e^-$ [10–13]. Toutefois, l'insertion d'un transistor supplémentaire limite la place disponible pour la photodiode, réduisant d'autant la sensibilité du pixel. Une première possibilité pour maximiser la place faite à la photodiode est de mettre en commun des transistors entre plusieurs pixels. La photodiode étant isolée du nœud de lecture par la grille de transfert, il est en effet possible de partager ce nœud de lecture et les transistors RST, SEL et SF. On obtient alors des architectures dites partagées : 2T5 pour un partage entre deux pixels (figure 3.9a) et 1T75 pour un partage entre quatre pixels* (figure 3.9b). Il est possible de regrouper plus de pixels, mais il devient alors difficile

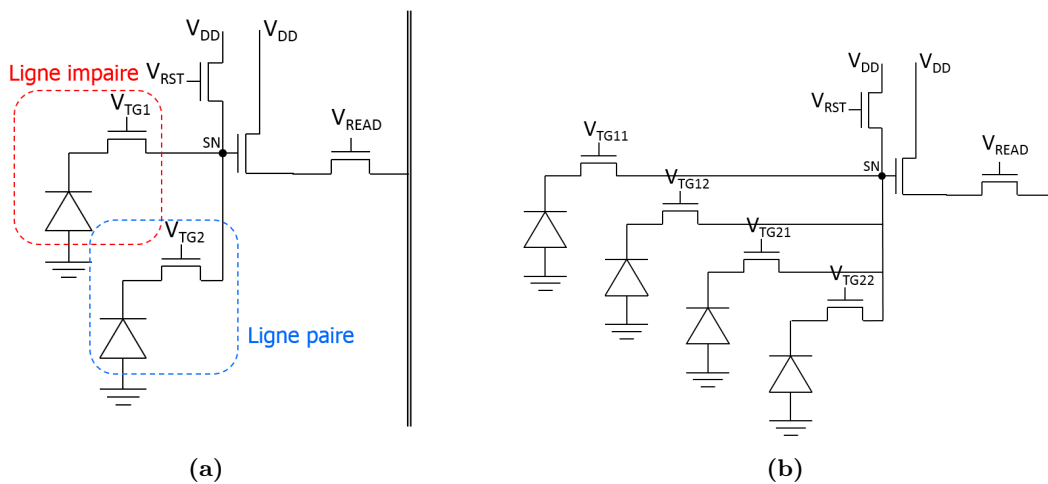


FIGURE 3.9 – Architecture de pixel à partage de transistors : (a) 2T5 soit cinq transistors pour deux pixels, (b) 1T75 soit sept transistors pour quatre pixels

de réaliser un nœud de lecture avec une capacité similaire à celle des photodiodes et la connexion au nœud de lecture devient problématique. Aussi, dans la pratique, l'architecture 1T75 correspond à la limite supérieure acceptable pour le partage de transistors.

La seconde voie pour améliorer la sensibilité du pixel passe par l'emploi d'optique et par l'optimisation de la structure du pixel lui-même, favorisant la transmission et la concentration de la lumière jusqu'à la photodiode. C'est l'objet de mes travaux de recherche depuis 2000.

Procédé de fabrication CMOS Nous venons de voir l'architecture du pixel en termes de composants (photodiode et transistors). Nous allons présenter succinctement le procédé de fabrication CMOS dans son ensemble, afin de mettre en évidence les points particuliers qui nécessitent une optimisation pour l'imagerie. La réalisation de capteurs d'images en technologie CMOS donne l'accès aux fonctionnalités électroniques analogiques et numériques (contrairement aux CCD). En contrepartie, le capteur doit respecter les contraintes de ce procédé de fabrication : les modifications utiles pour l'imagerie ne sont acceptables qu'à la condition de ne pas dégrader les performances des composants standards utilisés en masse dans l'ensemble des composants électroniques. Ceci est une contrainte forte à prendre en compte pour toute optimisation.

*. La notation fait référence au nombre de transistor par pixel : 2T5 correspond à cinq transistors pour deux pixels soit 2,5 transistors par pixel et 1T75 correspond à sept transistors pour quatre pixels soit 1,75 transistor par pixel

Le procédé de fabrication CMOS sur plaquette de silicium (ou wafer) est généralement découpé en deux parties (voir figure 3.10) :

- le *Front-End Of Line* (FEOL), regroupant les étapes jusqu'à la fabrication de la grille des transistors,
- le *Back-End Of Line* (BEOL), regroupant les étapes suivantes de réalisation des interconnexions jusqu'au wafer fonctionnel.

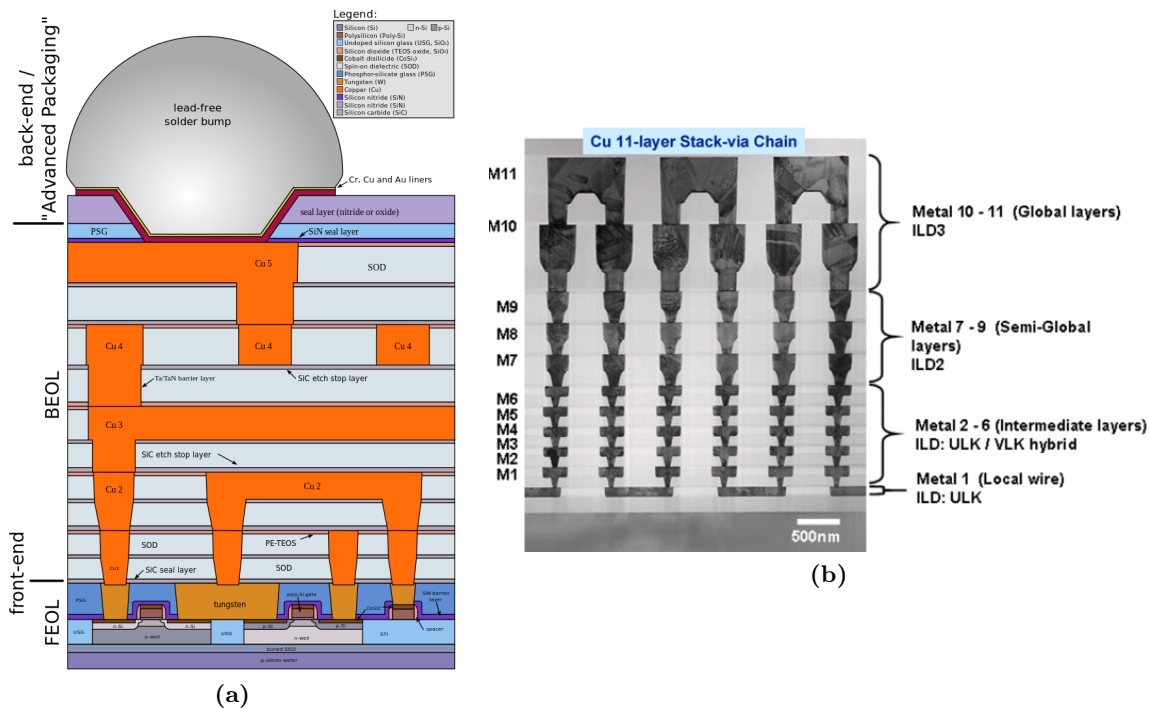


FIGURE 3.10 – (a) Coupe schématique d'un circuit CMOS. FEOL désigne le Front-End Of Line et BEOL le Back-End Of Line, (b) coupe MEB d'un procédé CMOS cuivre à onze niveaux d'interconnexion (source Fujitsu).

La réalisation d'un wafer complet nécessite de très nombreuses étapes (plusieurs centaines) de différents types et utilise plusieurs dizaines de masques de photolithographie, dont le coût est particulièrement élevé pour les technologies avancées*. Le développement d'une filière est donc une opération longue et coûteuse qui se justifie si le retour sur investissement est suffisant : les fonctionnalités numériques se sont développées car leur marché annuel se situait autour de 350 milliards de dollars en 2015. Pour l'imagerie, dont le marché annuel représente 10 milliards de dollars en 2015, la stratégie suivie par les fabricants est de se baser sur une technologie numérique existante et de l'adapter. Or, les optimisations nécessaires aux capteurs d'images sont souvent antagonistes avec celles réalisées pour le numérique. On comprend alors le besoin d'anticipation et de validation de ces innovations avant leur fabrication et leur utilisation dans des produits. Ceci passe donc par des étapes de simulation et de caractérisation fine, qui ont été au cœur de mon travail depuis 2000, mais aussi par une interaction forte avec les différentes équipes chargées de la conception des pixels, du développement, de la validation et de la qualification des procédés.

Avant de détailler les travaux menés dans le cadre des thèses que j'ai encadrées, je vais présenter quelques développements pour la caractérisation électro-optique des capteurs d'images : la conception et la réalisation de bancs optiques dédiés, mais aussi la définition de méthodologies de caractérisation. Ces outils et méthodes sont en effet indispensables au travail de développement des pixels et ont été

*. Le lecteur intéressé pourra se reporter au chapitre 7 du livre CMOS : *Circuit Design, Layout, and Simulation*[14]

utilisés activement par les doctorants, afin de confronter les résultats de simulations aux données expérimentales mesurées.

3.2 Caractérisation électro-optique

Au commencement de l'activité sur les capteurs d'images à Crolles en 2000, l'un des points critiques était le courant d'obscurité. Aussi, la caractérisation des imageurs se faisait sur plaque de silicium et dans le noir. La sensibilité était testée principalement sur les produits assemblés en boîtiers sur le site d'Édimbourg. Ma première mission a été de mettre en place des moyens de caractérisation électro-optique fins, afin de mesurer les performances au plus tôt, et ainsi fournir un retour rapide aux équipes de développement des procédés présentes à Crolles. Nous utilisions des « véhicules de test », c'est à dire des circuits élémentaires contenant simplement une matrice de pixels et son électronique d'adressage. On accède ainsi directement au signal analogique délivré par le pixel, sans étage de correction ni de numérisation des signaux. Grâce aux compétences en électronique et en informatique de l'équipe, j'ai pu me concentrer sur la conception et la réalisation de cinq bancs optiques spécifiques (voir figure 3.12) :

- éclairage uniforme en lumière blanche sous incidence normale, avec contrôle de l'intensité lumineuse,
- éclairage uniforme monochromatique, sous incidence normale et oblique,
- éclairage uniforme en lumière blanche modulaire : mesure sous incidence oblique, éclairage collimaté, mesure de la FTM (Fonction de Transfert de Modulation),
- sur-éclairage localisé, afin d'étudier les effets de vieillissement,
- éclairage contrôlé en température de couleur d'une scène de référence pour la colorimétrie.

Enfin, tous les bancs ont été automatisés afin de garantir la qualité et la traçabilité des mesures.

Pour chacun de ces bancs, une attention particulière a été portée à la mesure du flux lumineux et à la distribution angulaire des faisceaux lumineux au niveau du capteur. On distingue notamment deux cas de figure. Soit on cherche à caractériser le pixel avec un éclairage collimaté (faisceaux parallèles), soit on cherche à reproduire les conditions d'éclairage correspondant à un capteur placé derrière un objectif photographique. Dans ce cas, si la scène visée est uniforme, les faisceaux lumineux sont distribués à l'intérieur d'un cône dont la base est définie par la pupille de sortie de l'objectif et dont le sommet est le centre du pixel considéré (voir figure 3.11). L'ouverture du cône

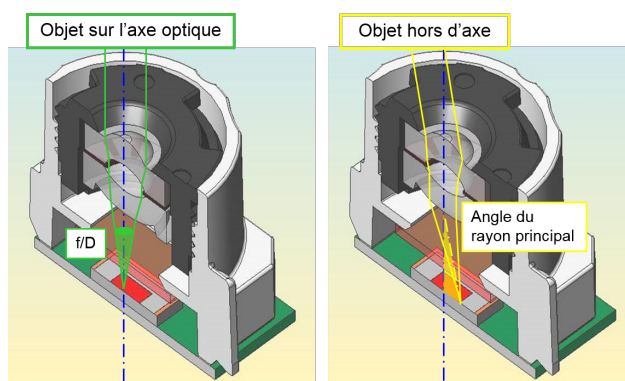


FIGURE 3.11 – Distribution de faisceaux lumineux dans une caméra

est définie par le rapport entre la focale effective et le diamètre de la pupille de sortie : f/D . Les pixels situés au centre du capteur sont éclairés sous incidence normale. En dehors de l'axe optique, un second paramètre est à prendre en compte pour l'éclairage : l'angle du rayon principal par rapport à la normale. Le rayon principal passe par le centre de la pupille de sortie de l'objectif et

le centre du pixel d'intérêt. L'éclairage collimaté est réalisé de manière classique en utilisant un diaphragme ($\varnothing = 1\text{mm}$) au foyer objet d'une lentille de grande focale ($f = 200\text{mm}$). L'éclairage diffus est réalisé en plaçant un diffuseur de diamètre donné D_{diff} à une distance $d = \frac{f}{D} \times D_{diff}$. Afin de garantir une distribution uniforme de faisceaux à l'intérieur du cône, il faut que leur densité soit uniforme sur toute la surface du diffuseur. Celui-ci doit donc être éclairé uniformément, d'où l'utilisation d'un autre diffuseur en amont.

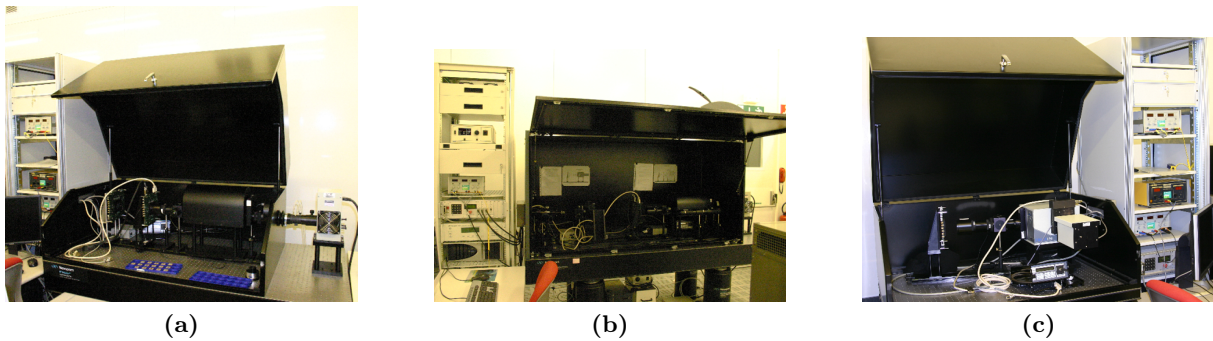


FIGURE 3.12 – Bancs optiques développés pour la caractérisation des images (a) en lumière blanche (b) sous incidence oblique (c) du rendement quantique.

Afin de mettre en place la caractérisation de la réponse spectrale, j'ai encadré en 2001 le projet de fin d'études d'ingénieur de l'ENSPG (École Nationale Supérieure de Physique de Grenoble, à présent PHELMA*) de Thomas DECROUX†. Le but de ce projet était de dimensionner le banc pour extraire le maximum de flux du monochromateur et éliminer les ordres de diffraction parasites. Il a également pris en charge le pilotage des différents composants (monochromateur, radiomètre, roue à filtres) dans le logiciel de caractérisation en cours de développement. En parallèle, nous avons créé un modèle de réponse du pixel, prenant en compte sa réponse spectrale, l'illuminant et la réflectance de la scène, prémices à la thèse réalisée en 2009 sur la colorimétrie des images sous faible éclairage (§ 3.4).

En parallèle, j'ai encadré le projet de fin d'études d'ingénieur de l'ENSPG de Maude BALÉGANT‡ dédié à la mesure de la FTM (Fonction de Transfert de Modulation). Nous avons retenu la mesure par bord de plage (*knife-edge*). La première partie du projet consistait à définir le banc optique et les composants nécessaires. La deuxième partie était basée sur des simulations. Elle a confirmé la nécessité de déconvoluer les données de la PSF (Point Spread Function) de l'optique de projection et de définir les tolérances sur la qualité de l'objectif utilisé. Nous avons alors pu mettre en place cette mesure dans les années suivantes.

La mesure de la FTM sera également étudiée au cours du projet de fin d'étude de l'ENSPG de Clémence MORNET§ en 2007, qui a testé une méthode alternative au bord de plage. En utilisant une mire constituée de fentes d'Young placées devant un diffuseur, on génère une distribution spatiale d'intensité pseudo-aléatoire sur le capteur. Le spectre spatial de cet éclairage présente uniquement deux pics : la composante continue et la composante à la fréquence spatiale $\frac{4e}{\lambda Z}$, e étant l'écartement des fentes, Z la distance entre la mire et le capteur et λ la longueur d'onde du laser éclairant la mire (voir figure 3.13). La FTM à une fréquence donnée est alors directement obtenue en mesurant l'amplitude de ce pic secondaire (de valeur maximale 1/2). La fréquence spatiale est facilement

*. École nationale supérieure de physique, électronique, matériaux

†. Après une année complémentaire en informatique à l'ENSIMAG, il a rejoint l'équipe pour développer le logiciel de caractérisation.

‡. Elle est restée dans le domaine de la caractérisation des imageurs en intégrant la société E2V en tant qu'ingénieur en caractérisation électro-optique.

§. Après une année passée en tant qu'ingénieur à Sagem, elle nous a rejoint pour une thèse sur la colorimétrie et travaille depuis à STMicroelectronics sur la simulation et la caractérisation des imageurs

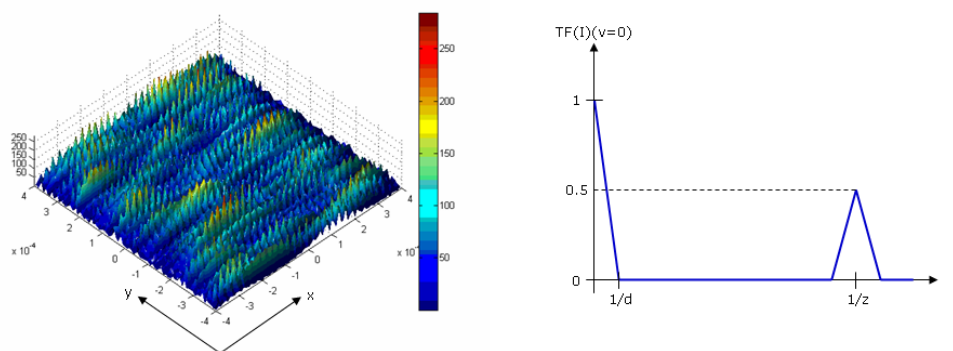


FIGURE 3.13 – Modulation pseudo-aléatoire d'intensité générée par des fentes d'Young placées devant un diffuseur

modulée en déplaçant le capteur pour modifier Z . L'avantage principal de cette méthode est de ne pas utiliser d'optique de projection, par contre l'extraction de l'amplitude du pic dans l'espace de Fourier n'est pas triviale. Les résultats obtenus étaient bruités, mais en accord avec ceux produits par la méthode de bord de plage (voir figure 3.14). Toutefois, nous avons continué à utiliser la

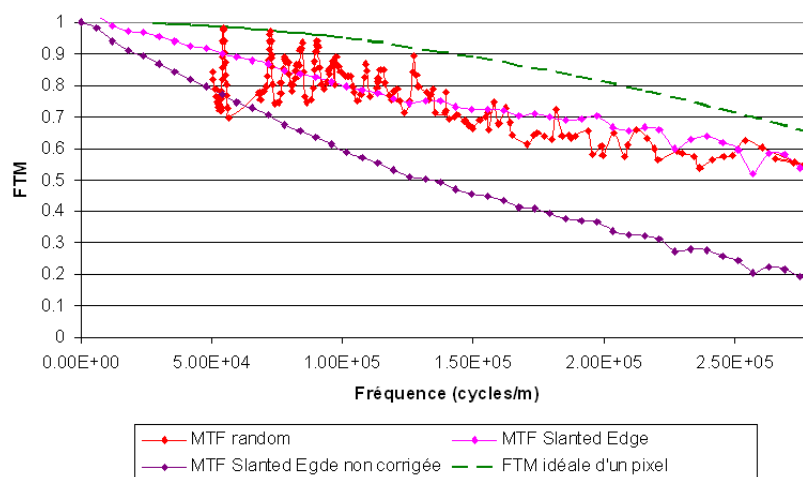


FIGURE 3.14 – Comparaison entre les mesures par bord de plage (brute en violet, corrigée de l'optique en magenta) et la mesure par mire pseudo-aléatoire (rouge)

méthode de bord de plage, car bien que nécessitant une optique de projection, elle permet de mesurer facilement la FTM à différentes longueurs d'onde. De plus cette méthode est normalisée (ISO 12233) et documentée. Elle reste donc la référence pour ces mesures, même si de nouvelles méthodes sont proposées, comme l'utilisation de l'effet Talbot [15].

J'ai également développé d'autres méthodes de caractérisation avec, comme objectif, de déterminer les performances des pixels dans les conditions les plus proches possible des applications finales. Comme décrit précédemment (§ 3.1.2), l'angle d'incidence des rayons lumineux varie fortement entre le centre et le bord de l'image (figure 3.5). Il est donc nécessaire de caractériser les pixels en incidence normale, c'est à dire correspondant au comportement sur l'axe optique une fois placé derrière l'objectif photographique, mais aussi en incidence oblique correspondant aux pixels hors d'axe. L'objectif photographique n'est pas toujours défini lorsque le développement d'une nouvelle génération de pixel commence. De plus, un même type de pixel peut-être placé derrière différents objectifs. Il est alors important d'être en mesure d'émuler cette incidence oblique en caractérisation. Ceci se fait en inclinant le capteur. La plupart des caractérisations s'effectuant en éclairage diffus, seuls les

pixels au voisinage immédiat de l'axe de rotation reçoivent un éclairage indépendant de l'angle et pourront donc être utilisés en caractérisation (voir figure 3.15). Comme nous le verrons plus loin

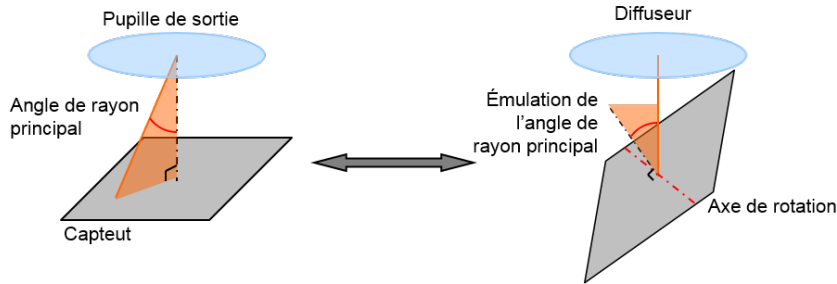


FIGURE 3.15 – Angle de rayon principal, (a) tel que vu par un pixel dans une caméra, (b) tel qu'émulé sur le banc de caractérisation

(§ 3.3), les microlentilles et les filtres colorés placés sur les pixels doivent être positionnés en fonction de l'angle du rayon principal. En caractérisation, il n'est pas possible d'émuler tous les angles de façon continue. On choisit donc une dizaine d'angles répartis entre l'incidence normale et l'angle maximum (typiquement 30°) que l'on peut trouver dans le produit final, et ce dans les directions horizontale, verticale et selon les diagonales de l'image. Pour chacun de ces angles, un positionnement de microlentille et de filtre est estimé par simulation. De plus, pour garantir la fiabilité des mesures, il est nécessaire de moyenner la réponse de plusieurs pixels. Aussi des blocs de 32×40 pixels ont servi de motifs de bases (figure 3.16b). Chaque bloc est placé (figure 3.16c) sur le capteur

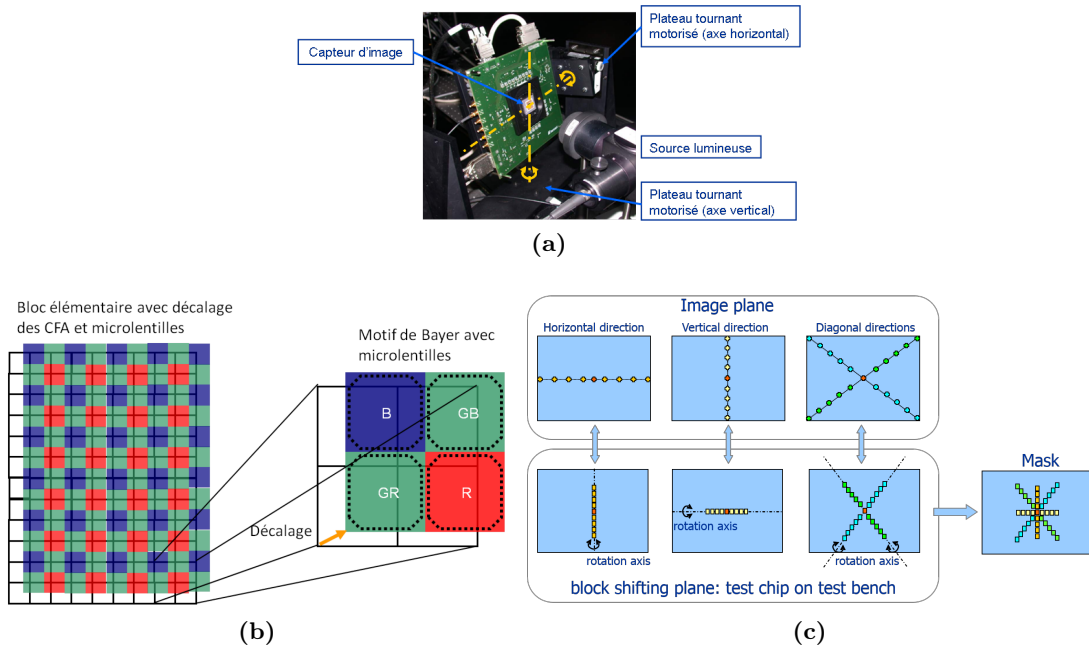


FIGURE 3.16 – (a) Banc de caractérisation en éclairage hors d'axe, (b) bloc ayant un décalage élémentaire (c) positionnement des blocs dans le plan image

d'images de manière à être sur l'axe de rotation (figures 3.15 et 3.16a). Grâce à cette méthode, il a été possible de confronter les résultats de simulation et de mesure. Nous avons alors recherché un optimum satisfaisant d'une part le critère de vignettage (assombrissement centre/bord que l'on cherche à limiter en décalant les microlentilles), et d'autre part l'appariement des signaux délivrés par les pixels verts. La réponse de ces derniers dépend de étant différente suivant s'ils sont sur la

même ligne qu'un pixel bleu, ou qu'un pixel rouge (notamment pour les architectures du type *2T5* et *1T75*). Cet appariement est difficile à simuler avec précision, car il fait intervenir des phénomènes optiques, mais également électriques comme la dérive-diffusion des électrons photogénérés dans la structure du pixel. Les résultats de caractérisation ont ainsi permis d'améliorer les performances des pixels. Les simulations, quant à elles, ont permis l'identification du problème et la compréhension des phénomènes en jeu : le désappariement était lié à une fuite des charges photogénérées entre les pixels au niveau du transistor de transfert. L'ensemble de cette méthode a fait l'objet d'une présentation orale à la conférence Electronic Imaging SPIE en 2008 [16] et d'un brevet.

3.3 Simulations optiques

3.3.1 Tracé de rayons

Au début des années 2000, il n'existait pas de réels moyens de simulation adaptés aux pixels. Hormis quelques publications [17–19], peu de groupes travaillaient sur le sujet. Aussi, dès 2001, j'ai voulu démontrer l'apport de la simulation optique. Ce fut possible grâce au stage de DEA de Maude BALÉGANT, réalisé en complément de son projet de fin d'études (§ 4.1.2). Nous avons alors montré qu'il était possible d'améliorer la forme et la position de la microlentille. Aucun outil spécifique n'existait et afin de démontrer l'intérêt des simulations optiques, nous avons développé un code de tracé de rayons simplifié sous Matlab. Celui-ci nous a permis de démontrer qu'une partie de la lumière était perdue par réflexion sur les interconnexions métalliques et que la sensibilité du pixel pouvait être améliorée en recentrant la microlentille sur la zone photosensible. Sur la base de ces résultats, le financement pour une thèse CIFRE au sein de STMicroelectronics a été obtenu. Ainsi de 2002 à 2005, Flavien HIRIGOYEN a développé une méthodologie de simulation en tracé de rayons dans le cadre de sa thèse intitulée « *l'optimisation de la collection des photons pour les capteurs d'images en technologie CMOS* ». La stratégie retenue a été d'utiliser un logiciel commercial performant (Zemax) et de l'adapter aux besoins de notre problématique.

En premier lieu, la méthode de simulation utilisée est dite *non-séquentielle**, puisqu'un rayon lancé doit pouvoir se réfléchir de façon multiple sur un même élément du modèle. Le pixel est décrit sous forme de volumes à trois dimensions ayant des propriétés de réfraction (définies par le matériau constituant le volume) ou de réflexion à sa surface. Le modèle est donc généré en deux phases : la première consiste à reproduire l'empilement de diélectriques situés au-dessus du silicium (voir § 3.10), la seconde est le positionnement des transistors et des interconnexions dans cet empilement.

La construction de l'empilement optique impose de connaître avec précision le procédé de fabrication notamment des différents matériaux utilisés et les épaisseurs nominales déposées. En complément de la collecte de ces informations auprès des équipes développant les procédés de fabrication, nous avons créé une base de données contenant les indices de réfraction mesurés pour chacun de ces matériaux sur la gamme spectrale d'intérêt (300 – 800nm). Ces données n'étant pas toujours connues[†], des caractérisations spécifiques ont été demandées au service de métrologie (voir figure 3.17a). Une fois la structure créée, les volumes correspondant aux transistors et les interconnexions métalliques sont insérés. Ces volumes sont générés à partir des fichiers de conception (description 2D hiérarchique au format GDS-II). Nous avons donc développé un flot d'extraction qui identifie les différents niveaux et génère les volumes basés sur les fonctions disponibles dans le logiciel Zemax. Le modèle généré inclut plusieurs pixels, en premier lieu pour simuler un groupe de 2×2 pixels et ainsi étudier simultanément les quatre pixels du motif Bayer. D'autre part, il n'y a pas de conditions aux

*. Contrairement au mode, dit *séquentiel*, généralement utilisé en conception optique et pour lequel un rayon se propage de dioptré en dioptré suivant l'ordre décrit

†. La métrologie d'épaisseur se faisant par ellipsométrie, les matériaux sont usuellement caractérisés aux longueurs d'onde de contrôle (typiquement 632,8nm)

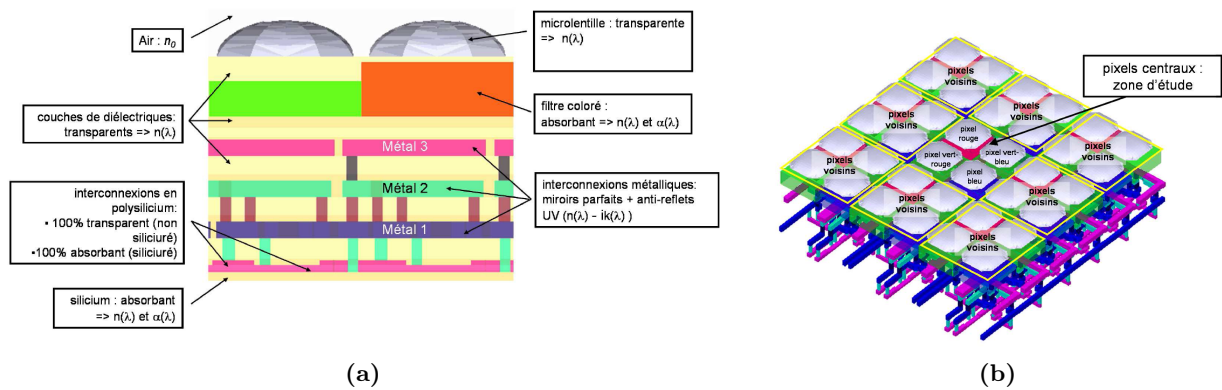


FIGURE 3.17 – Modèle des pixels sous le logiciel Zemax, (a) vue en coupe et propriétés optiques des différents éléments, (b) modèle pour la simulation d'un motif Bayer avec les pixels environnants

limites périodiques sous Zemax, mais uniquement absorbantes. On reproduit donc la périodicité de la matrice en entourant les pixels d'intérêt par d'autres pixels, afin de prendre en compte les effets d'échange de lumière entre pixels voisins. Nous avons validé au cours de cette thèse que les effets étudiés restaient localisés aux deux rangés de pixels autour du groupe d'intérêt. Pour un motif Bayer la génération d'une matrice de 6×6 pixels suffit (voir figure 3.17).

Une fois ce modèle optique créé, la génération des rayons doit reproduire les conditions d'éclairage variées, obtenues soit en caractérisation, soit dans le produit final. En effet, il est nécessaire de confronter les simulations aux différents résultats de caractérisation qui permettent de sonder précisément le comportement du pixel, mais aussi d'évaluer au plus tôt les performances que l'on peut atteindre dans les conditions d'utilisation. Nous avons utilisé la fonctionnalité disponible sous Zemax de définir nos propres sources paramétrables sous forme de fichiers DLL. La source génère de façon aléatoire des rayons avec des distributions contrôlées : spatialement sur une surface rectangulaire adaptée à l'étude des pixels, et angulairement à l'intérieur d'un cône défini par l'ouverture (f/D) de l'optique placée en amont du capteur, ainsi que par l'angle du rayon principal pour le pixel considéré. La direction de chaque rayon issu de la source est défini par deux points (voir figure 3.18) :

- P_1 dans la pupille de sortie de l'optique à simuler. Cette pupille est considérée comme circulaire.
- P_2 dans le plan où la source est définie.

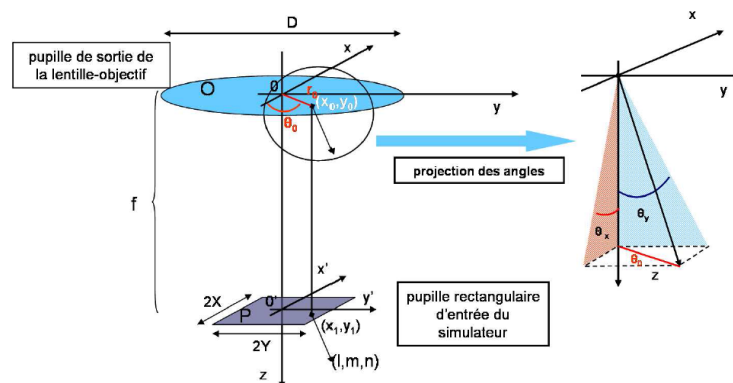


FIGURE 3.18 – Source utilisée pour le tracé de rayon sous Zemax permettant la simulation en éclairage diffus ou collimaté

Dans Zemax, chaque rayon est donc défini par son point d'émergence P_2 et par les cosinus directeurs

du vecteur $\overrightarrow{P_1P_2}$. Ceci permet de contrôler le type d'éclairement utilisé pour la simulation et on peut facilement passer d'un éclairement en faisceaux parallèles (utilisé par exemple en caractérisation) à un éclairement diffus représentatif de l'éclairement d'un petit groupe de pixels enregistrant l'image d'une zone uniforme de la scène imagée.

Le modèle étant à présent complet, les simulations s'effectuent en lançant un nombre important de rayons (typiquement un million) pour chaque configuration de la source. On enregistre les points d'intersection des rayons avec une surface située à $0,5\mu m$ sous la surface du silicium puis on calcule la densité de rayons arrivant sur cette surface. La profondeur de $0,5\mu m$ correspond à la zone de charge d'espace des photodiodes utilisées. La surface d'intégration de la densité de rayon se base sur la géométrie de la photodiode définie dans le fichier de design au format GDS. Seulement, une photodiode étant définie par plusieurs implantations (typiquement P+/N/P dans le cas d'un pixel à quatre transistors § 3.1.2.2), la géométrie n'est pas simple à définir. Nous avons alors utilisé une hypothèse simplificatrice, mais qui s'est avérée valide : trois surfaces (voir figure 3.19) suffisent pour définir la photodiode. Il s'agit de :

- la zone centrale de la photodiode, définie par l'implantation N (surface 1),
- une zone intermédiaire définie par les tranchées d'isolation (surface 2),
- une zone étendue, dont la limite est à mi-chemin entre la zone intermédiaire et les implantations définissant les transistors (surface 3).

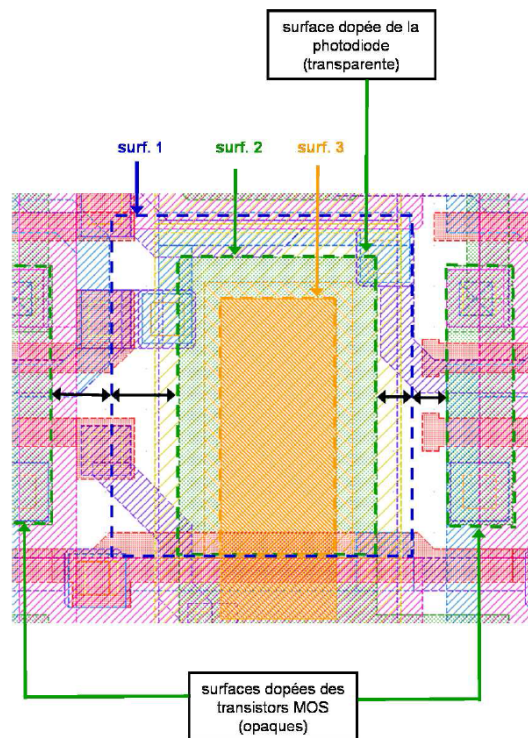


FIGURE 3.19 – Exemple de définition des surfaces de comptabilisation des rayons à partir du layout d'un pixel

Ces trois surfaces permettent alors de définir une fonction de probabilité de collection des électrons photogénérés, en attribuant une probabilité uniforme sur chaque surface. On considère que dans la partie centrale tous les électrons seront collectés, car le champ électrique est suffisamment important. De même, en dehors de la zone étendue, on considère que les électrons photogénérés seront collectés par les transistors et non par la photodiode. La question qui se pose alors est de définir les probabilités de collection pour les régions comprises à l'intérieur de la surface 3, mais à l'extérieur

de la surface 1. Pour cela nous avons confronté les simulations de quelques pixels particuliers à la caractérisation de la réponse angulaire en éclairement collimaté de ces mêmes pixels. Par ajustement, au sens des moindres carrés, entre les mesures et les simulations, nous avons pu déterminer les poids respectifs des différentes surfaces pour une technologie donnée. Le modèle étant linéaire par rapport aux paramètres (les poids de chacune des surfaces), l'unicité de cet ajustement est garanti et les poids optimaux sont les solutions d'un système linéaire d'équations (voir figure 3.20).

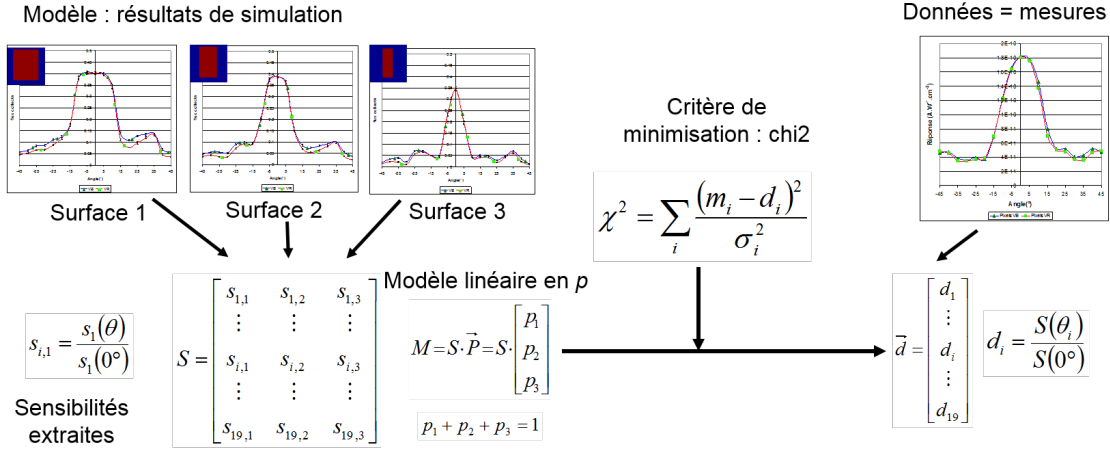


FIGURE 3.20 – Principe de détermination des poids des surfaces de détection

La méthodologie ainsi mise en place a fait l'objet d'une publication et d'une présentation orale lors du congrès Electronic Imaging SPIE en 2004 [20]. Sur cette base solide, nous avons pu nous intéresser à l'optimisation des performances optiques pour des tailles de pixel de $4\mu m$, $3,6\mu m$ et $3\mu m$.

3.3.1.1 Gain des microlentilles

En premier lieu, nous avons étudié l'apport des microlentilles en définissant leurs paramètres optimaux (rayon de courbure, forme de l'embase), mais aussi en évaluant l'impact de défauts de forme et de positionnement sur la concentration de la lumière au niveau du silicium. Ceci nous a permis de fournir le support nécessaire aux équipes travaillant sur le développement et la fabrication des microlentilles. Ces dernières étant formées par fluage, les paramètres procédé (épaisseur de résine initiale, température et temps de recuit, etc.) sont critiques et l'identification du point de fonctionnement se fait de manière itérative. Les simulations ont donc permis d'évaluer des performances de microlentilles réalisées sur plaque de test, en se basant sur leurs formes (caractérisées par AFM) sans utiliser pour chaque essai une plaque de silicium fonctionnelle. Nous nous sommes également intéressés au positionnement de la microlentille par rapport au pixel. Ceci était particulièrement crucial, car les pixels développés alors utilisaient des architectures partagées de type 2T5 (voir § 3.1.2) présentant une symétrie verticale. Il peut donc y avoir une différence de signal suivant la parité de la ligne dans l'image : les pixels verts sont présents sur chaque ligne, contrairement aux pixels bleus et rouges qui n'occupent qu'une ligne sur deux. Il était donc nécessaire d'optimiser le positionnement des microlentilles pour appareiller au mieux les réponses des deux catégories de pixels verts. Le problème se pose au centre de l'image (pour un angle de rayon principal nul), mais aussi hors-d'axe. Nous avons simulé les différentes architectures de pixel proposées pour des angles du rayon principal correspondant aux configurations extrêmes rencontrées en bord d'image (voir figure 3.21).

Nous avons ainsi pu estimer le placement optimal des microlentilles sur l'ensemble du plan

image*. Ce placement a servi de base pour la caractérisation fine présentée précédemment.

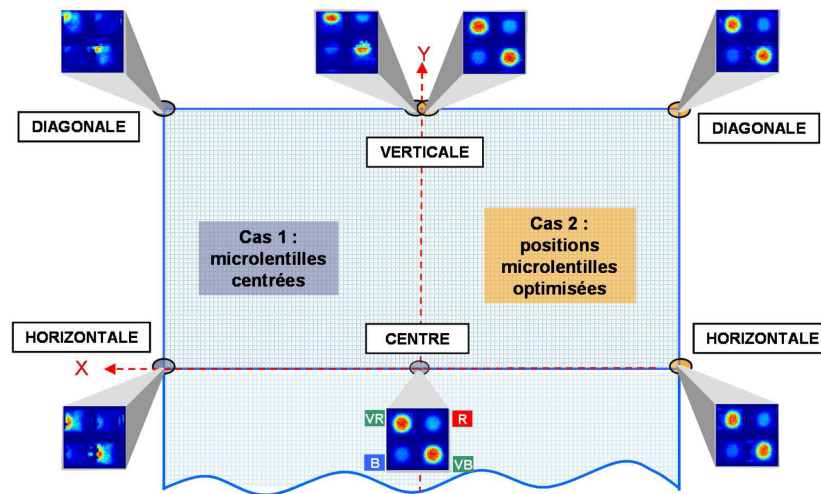


FIGURE 3.21 – Simulation des pixels sur l'axe optique et hors d'axe, pour des micro-lentilles uniformément réparties (cas 1), ou pour des micro-lentilles dont le placement est optimisé suivant la position dans le champ de l'image

3.3.1.2 Optimisation de l'empilement diélectrique

En interaction avec les personnes en charge du design des pixels, nous avons également étudié en avance de phase les différentes implémentations proposées conjointement. Ce qui nous a permis d'orienter le choix des pixels retenus avant leur réalisation. Dans ce cadre, nous nous sommes principalement intéressés à l'impact des lignes métalliques d'interconnexions et à leur utilisation à des fins de masquage pour limiter le crosstalk[†]. Au cours de ces études, il nous est apparu que l'empilement diélectrique lui-même pouvait être optimisé : il doit être le plus fin possible, afin de permettre une meilleure concentration de la lumière (en condition d'éclairage diffus). Nous avons démontré aussi que les lignes d'interconnexion métalliques devaient être les plus proches possibles du silicium, pour limiter les phénomènes d'ombrage en bord d'image, qui interviennent même lorsque le placement de la micro-lentille est optimisé. L'apport de la simulation est ici particulièrement important. En effet, la modification de l'empilement n'est pas du tout anodine : cela modifie directement les paramètres électriques des composants CMOS, impliquant la re-qualification de l'ensemble des composants de référence et la validation des bibliothèques associées. C'est uniquement sur la base de solides arguments que cette modification a pu se faire. Nous avons montré, par simulation, que la réduction de l'épaisseur de l'empilement permettait effectivement de mieux focaliser la lumière et donc d'améliorer la sensibilité du pixel (voir figure 3.22a). Toutefois, lorsque l'on considère les pixels en bord d'image, l'ombrage dû aux lignes métalliques est d'autant plus important que le métal est proche de la micro-lentille (voir figure 3.22b). Aussi, la suppression des niveaux d'interconnexions inutilisés ne suffit pas, il est nécessaire d'amincir les lignes métalliques et de les rapprocher du silicium. Ce qui correspond généralement à l'utilisation de technologies plus avancées.

Grâce à la méthodologie ainsi développée, nous avons accompagné le développement des pixels, passant d'un pas de $5,6\mu\text{m}$ à $2,2\mu\text{m}$ et évalué les solutions publiées par les concurrents. Par exemple la solution d'insertion d'un guide d'onde à l'intérieur du pixel entre la micro-lentille et le silicium,

*. À noter que les motifs définissant les micro-lentilles peuvent être positionnés avec une résolution de 5nm , fixée par la technologie de lithographie utilisée

†. signal parasite d'origine optique ou électrique passant d'un pixel vers un autre

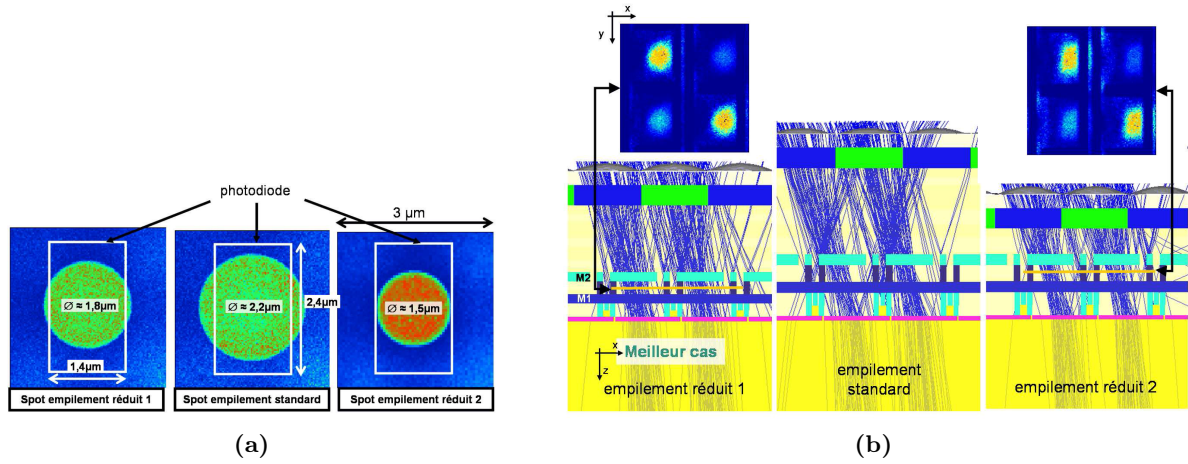


FIGURE 3.22 – Exemple d'optimisation de l'empilement diélectrique.

mise en application par Sony, permet de conserver un empilement complet, compatible avec les technologies CMOS numériques standards.

Toutefois, pour des pixels inférieurs à $3\mu m$, des écarts significatifs sont apparus entre les simulations et les résultats de caractérisation. Ceci était évidemment attendu, car les simulations en tracé de rayons ne tiennent pas compte des effets liés à la nature ondulatoire de la lumière, tels que la diffraction. Nous avons donc anticipé cette limitation en recherchant des solutions basées sur la simulation électromagnétique, présentées dans la prochaine partie.

Au terme de sa thèse Flavien HIRIGOYEN a été embauché au sein de notre équipe pour poursuivre le travail de support au développement des pixels grâce aux simulations optiques.

3.3.2 Simulations électromagnétiques

L'utilisation d'un simulateur basé sur la résolution des équations de Maxwell permet de traiter correctement les effets liés à la nature ondulatoire de la lumière, mais également le couplage entre l'onde électromagnétique et la matière. L'objectif étant de disposer d'un outil performant de simulation des pixels, j'ai choisi d'utiliser un logiciel commercial de résolution des équations de Maxwell. En effet, le développement de ce type de simulateur aurait fait l'objet d'une thèse à lui seul. Plusieurs solutions existent pour résoudre ces équations différentielles, on peut en citer deux principales : RCWA (*Rigorous Complex Wave Analysis*[21]) et FDTD (*Finite Difference Time Domain*[22]). Après une analyse de ces deux méthodes, il nous est apparu que la FDTD était mieux adaptée à la problématique de la simulation des pixels, notamment de part leur taille, leur géométrie complexe et le large spectre à simuler. Le principe de la FDTD est la résolution, par l'algorithme initialement proposé par Yee[23], des équations de Maxwell sous leur forme différentielle :

$$\operatorname{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div}\vec{H} = 0 \quad (3.2)$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\mu\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{J} + \epsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

Tout d'abord les champs sont discrétisés temporellement avec un pas uniforme Δt : $\vec{E}(t) = \vec{E}(n\Delta t)$, calculé au n-ième pas de temps et $\vec{H}(t) = \vec{H}((n + \frac{1}{2})\Delta t)$, calculé à l'instant $\frac{1}{2}\Delta t$ après le calcul

de \vec{E} . On notera par la suite \vec{E}^n et $\vec{H}^{(n+\frac{1}{2})}$ ces champs discrétisés temporellement. En l'absence de charges ρ et de courants \vec{J} , les équations de Maxwell sont alors approximées par les relations de récurrence suivantes :

$$\vec{E}^{n+1} = \vec{E}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon} \text{rot} \vec{H}^{n+\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

$$\vec{H}^{n+\frac{3}{2}} = \vec{H}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{\mu} \text{rot} \vec{E}^{n+1} \quad (3.6)$$

De même, les rotationnels sont estimés par différences finies : il faut donc discrétiser l'espace. Comme pour la discrétisation temporelle, les champs \vec{E} et \vec{H} sont calculés sur des maillages décalés d'un demi pas (voir figure 3.23). L'erreur sur les champs est alors proportionnelle à Δt^2 et $\Delta x^2 \times \Delta y^2 \times \Delta z^2$.

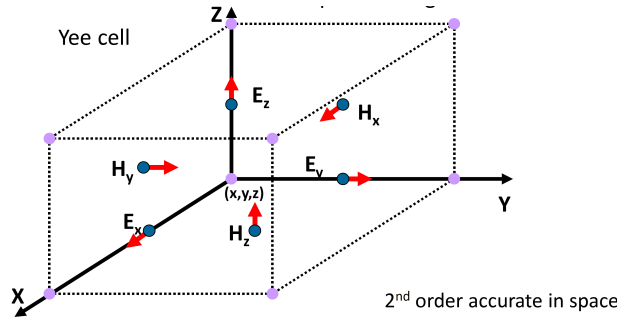


FIGURE 3.23 – Discrétisation spatiale des champs \vec{E} et \vec{H} suivant l'algorithme de Yee

On voit donc qu'il sera nécessaire de mailler finement l'espace et le temps afin d'obtenir des résultats fiables. Typiquement, la taille de la maille spatiale est de l'ordre de $\frac{\lambda}{10}$ et le pas de temps de l'ordre de $\frac{1}{10} \frac{\lambda}{c}$. En 2006, le logiciel Lumerical de FDTD-Solution était le seul à proposer des conditions aux limites particulières : les conditions de Bloch* qui permettent de gérer correctement les structures périodiques éclairées par des ondes planes obliques. Or, compte tenu du volume des pixels à simuler par rapport à la longueur d'onde, l'utilisation de conditions aux limites périodiques est indispensable. Pour la simulation des pixels, la technique FDTD présente un autre avantage : le système est résolu en envoyant une impulsion lumineuse brève, typiquement quelques femtosecondes. De ce fait, le contenu spectral de cette impulsion est grand et permet donc d'extraire le comportement, en régime stationnaire, du système à différentes longueurs d'ondes à partir d'une seule simulation. La transformée de Fourier des champs enregistrés dans le domaine temporel $\vec{E}(t)$ décompose le signal sur les composantes fréquentielles :

$$\vec{E}(\omega) = \int_0^{t_{simul}} \vec{E}(t) \times e^{i\omega t} dt \quad (3.7)$$

Celles-ci sont alors normalisées par le spectre de la source $S(\omega)$ pour fournir la réponse du système en mode continu à différentes longueurs d'onde.

$$\vec{E}_{norm}(\omega) = \frac{1}{S(\omega)} \int_0^{t_{simul}} \vec{E}(t) \times e^{i\omega t} dt \quad (3.8)$$

Cette propriété permet donc d'étudier le comportement d'un pixel sur tout le spectre visible (400 → 700nm).

Comme pour le tracé de rayons, une fois le logiciel identifié, la problématique de développement d'une méthodologie et d'adaptation à notre problématique s'est posée. J'ai donc choisi d'aborder

*. Basées sur le théorème de Bloch qui permet d'écrire les champs sous forme périodiques, en incluant un terme de phase, défini comme le produit scalaire entre le vecteur d'onde et le vecteur de maille

ce nouveau sujet au travers d'une thèse confiée à Axel CROCHERIE. La première partie du sujet consistait à créer un système automatisé de génération du modèle sur la base des designs de pixels et des données correspondant aux procédés de fabrication des circuits (voir figure 3.24). Il devait être validé

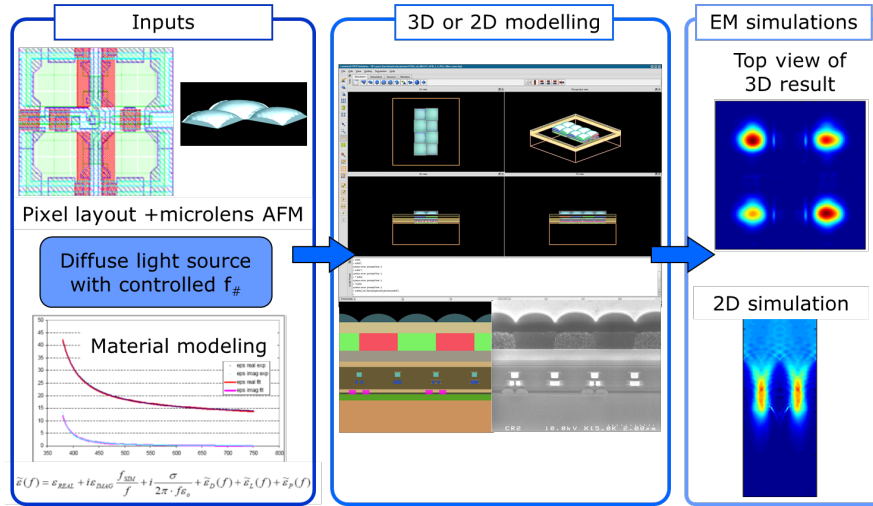


FIGURE 3.24 – Génération d'un modèle de pixel et simulation électromagnétique

par confrontation aux résultats de caractérisation. Cette partie s'est appuyée sur l'expérience acquise lors de la thèse précédente et sur une interaction forte avec la société Lumerical. Ainsi, nous avons travaillé conjointement au développement de nouvelles fonctionnalités : par exemple la génération du modèle 3D à partir des structures dessinées au format GDS-II. Cette fonctionnalité permettait également à Lumerical de se positionner favorablement dans le domaine de la photonique et de la microélectronique. En complément de l'importation de fichiers GDS-II, nous avons aussi travaillé avec Lumerical sur l'importation de fichiers issus d'analyse AFM utilisée pour obtenir le profil des microlentilles. Ceci permet alors de prendre en compte la topographie réelle et non un modèle basé sur des formes géométriques génériques.

3.3.2.1 Éclairement uniforme

Toujours en partenariat avec Lumerical, nous avons travaillé sur la modélisation d'un éclairage uniforme, similaire à celui développé pour le tracé de rayons. Les sources électromagnétiques, initialement disponibles dans le simulateur, étaient les dipôles, les ondes planes et les faisceaux gaussiens. Pour reproduire l'éclairement uniforme issu d'une lentille, il fallait superposer, de façon incohérente, des faisceaux gaussiens. Ceci permettait de contrôler l'ouverture (f/D) de l'illumination via la divergence du faisceau. Toutefois, une telle source n'est pas périodisable, ce qui imposait de travailler avec des conditions aux limites absorbantes, augmentant significativement le volume à simuler. Il était donc nécessaire d'utiliser des ondes planes, compatibles avec les conditions périodiques de type Bloch. Pour reproduire l'éclairement des pixels dans un système complet, les vecteurs d'ondes sont distribués uniformément dans le cône défini par l'ouverture (f/D) de l'objectif simulé et l'angle du rayon principal pour les pixels considérés. Nous avons alors démontré l'équivalence de la superposition, au niveau des pixels, d'ondes planes uniformément distribuées dans le cône d'illumination et la superposition de sources incohérentes dans l'espace objet. Grâce à cette équivalence, il est possible d'utiliser les conditions périodiques de type Bloch et donc de maîtriser le temps de calcul pour un groupe de pixels. Ceci a fait l'objet d'une publication conjointe avec la société Lumerical dans la revue *Optics Express*[24].

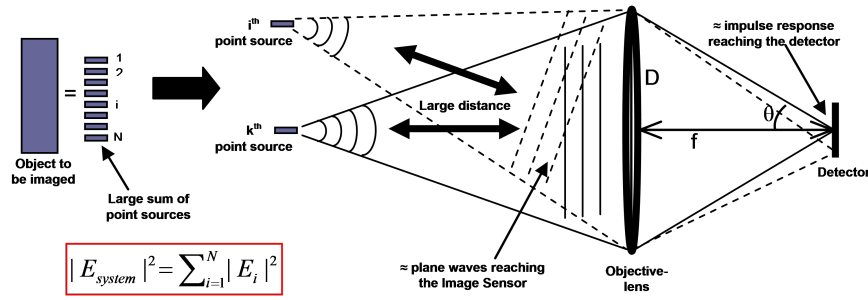


FIGURE 3.25 – Représentation schématique du système optique éclairant le groupe de pixels étudiés.

3.3.2.2 Modèles polynomiaux des indices de réfraction

La dernière fonctionnalité, développée conjointement avec l'éditeur du logiciel dans le cadre de la thèse, est la modélisation des indices optiques sous forme polynomiale. En effet, dans le domaine fréquentiel, on écrit :

$$\vec{D}(\omega) = \epsilon(\omega) \vec{E}(\omega) \quad (3.9)$$

qui se traduit dans le domaine temporel par la convolution du champ électrique :

$$\vec{D}(t) = \epsilon(t) \star \vec{E}(t) = \int_0^t \vec{E}(\tau) \epsilon(t - \tau) d\tau \quad (3.10)$$

La formulation de $\epsilon(\omega)$ doit donc permettre le calcul, en un temps raisonnable, du produit de convolution dans le domaine temporel. Naturellement, $\epsilon(\omega)$ doit satisfaire les relations de Kramers-Kronig, afin de garantir la causalité du système. C'est pourquoi, les matériaux simulés doivent être modélisés avant le calcul FDTD : il est impossible d'utiliser des données tabulées. Les modèles couramment utilisés en électromagnétisme[22] sont les formes de Debye, de Drude, de Lorentz et des conducteurs. Le problème se pose pour la modélisation, sur le spectre visible, des filtres colorés : leurs parties réelle et imaginaire présentent des variations très importantes, non modélisables avec les modèles cités précédemment (voir figure 3.26). La solution consistait alors à développer un modèle

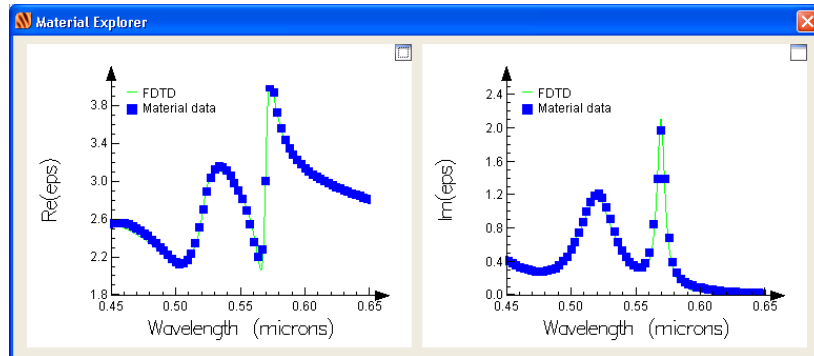


FIGURE 3.26 – Modélisation sous Lumerical des indices de réfraction et d'extinction d'un filtre rouge typiquement utilisé sur les capteurs d'images CMOS

polynomial pour chaque composante, sous la contrainte de satisfaire les relations de Kramers-Kronig. Nous avons validé cette fonctionnalité, grâce aux matériaux que nous avons à traiter, notamment les filtres colorés de différentes générations.

3.3.2.3 Validation de la méthodologie

Une fois les premiers modèles créés, nous avons vérifié que les mesures de réponses angulaires des pixels pouvaient être correctement simulées grâce à la FDTD, contrairement au tracé de rayons (voir figure 3.27). Les différentes courbes correspondent à des régions d'intégrations (carrées) de

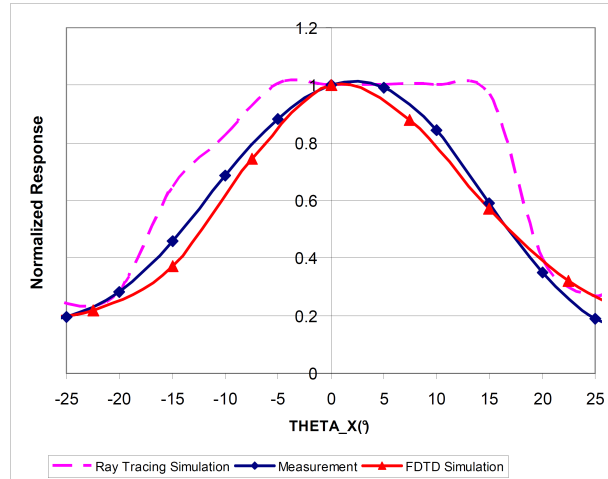


FIGURE 3.27 – Réponse angulaire d'un pixel de $1,75\mu\text{m}$, mesurée (courbe bleue) et simulée en FDTD (courbe rouge) et en tracé de rayons (courbe magenta)

l'irradiance au niveau du silicium. On peut noter que les simulations en tracé de rayons présentent un profil trop abrupte par rapport aux mesures (plateau pour les angles inférieurs à 10° , puis décroissance rapide) et des oscillations pour les angles supérieurs à 20° . Alors qu'avec les simulations électromagnétiques le comportement du pixel est bien reproduit.

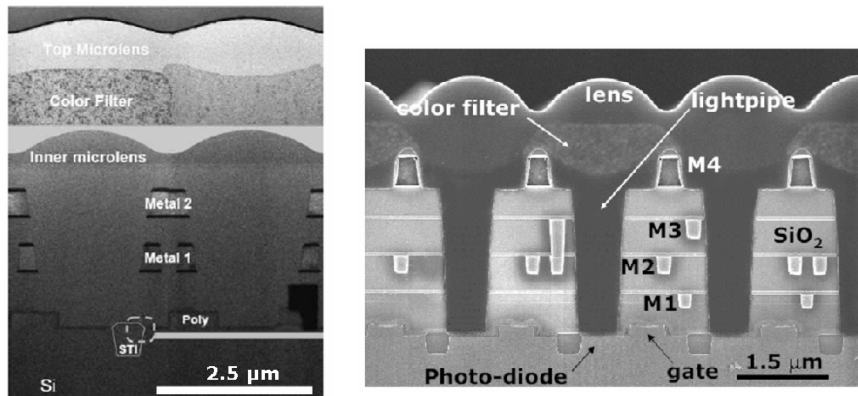


FIGURE 3.28 – Coupe d'un pixel de $2,5\mu\text{m}$ avec une lentille interne, source Sony [25] (à gauche), et d'un pixel de $2,2\mu\text{m}$ avec guide d'onde, source IBM [26] (à droite)

Sur cette base, nous avons réévalué les solutions présentes dans les capteurs d'images d'autres fabricants (guide d'onde, double lentilles, voir figure 3.28). Il est apparu que ces solutions présentaient un léger avantage dans quelques cas spécifiques. Sur la figure 3.29, on considère un pixel fortement asymétrique qui présente des grilles de transistors (rectangles rouges verticaux sur le layout du pixel) empiétant sur les photodiodes. On remarque principalement l'effet de diffraction et de guidage de la lumière au niveau de la grille du transistor de transfert. En permettant un meilleur confinement de la lumière, cet effet est limité avec les solutions à base de guide d'onde ou de double microlentilles.

Toutefois, nous n'avons pas implémenté ces solutions qui nécessitaient des développements technologiques importants. De plus, grâce aux résultats de simulation que nous avons pu fournir, le design du pixel avait été amélioré pour limiter ce problème.

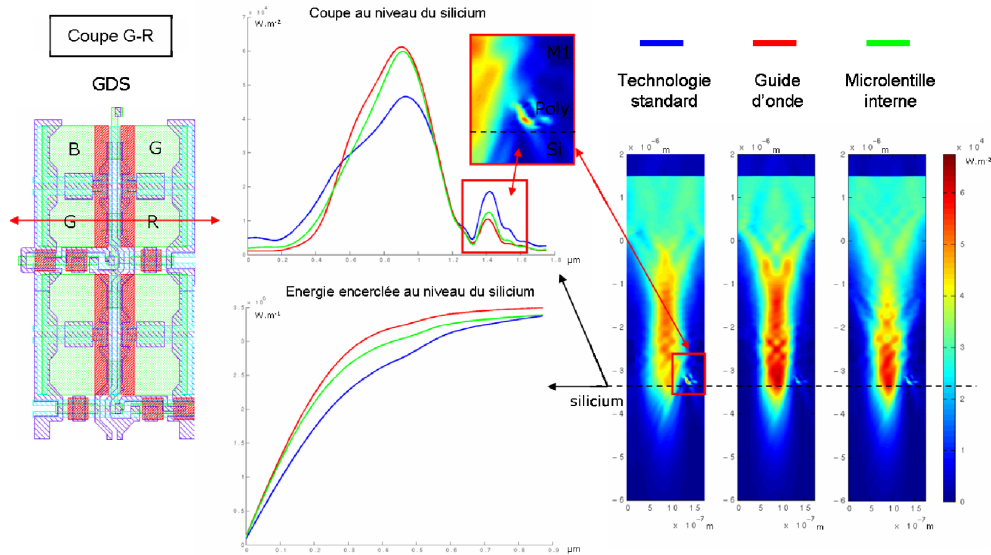


FIGURE 3.29 – Comparaison des solutions standard, avec guide d'onde et avec microlentille interne dans le cas d'un pixel fortement asymétrique

3.3.2.4 Optimisation de l'empilement diélectrique

Dans les générations de pixels suivantes, nous avons poursuivi notre effort de réduction de l'empilement diélectrique entre la microlentille et le silicium. Cette voie va à l'encontre des tendances naturelles du monde de la microélectronique : c'est à dire une intégration de plus en plus poussée avec une densité d'interconnexions grandissante. Au cours des trois années de la thèse d'Axel CROCHERIE, quatre générations de pixels ont été développées. Comme on peut le voir sur la figure 3.30,

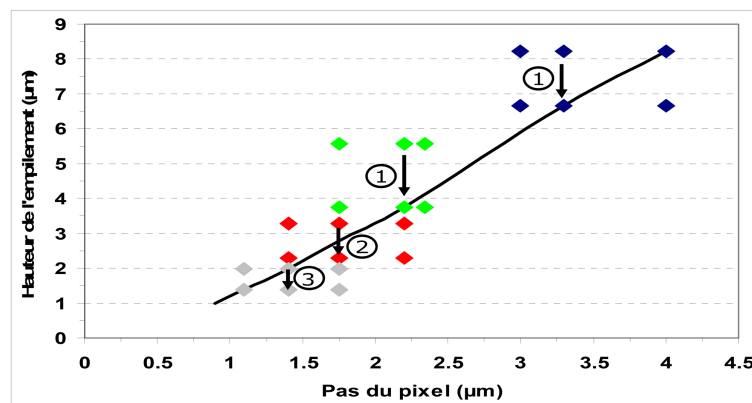


FIGURE 3.30 – Évolution de l'épaisseur de l'empilement diélectrique pour différentes tailles de pixel en fonction des générations.

les générations correspondant à des pixels dont la taille varie entre $4\mu\text{m}$ et $1,75\mu\text{m}$ (indiquées en bleu et vert sur la figure) présentaient initialement des épaisseurs d'empilement élevées (respectivement $8\mu\text{m}$ et $6\mu\text{m}$), presque trois fois supérieures au pas du plus petit pixel considéré pour ces

technologies. Il avait déjà été démontré, par les simulations en tracé de rayons, que cette épaisseur devait être réduite. Nous avons alors proposé l'évolution indiquée ① sur la figure 3.30 qui correspond à la création d'une cavité au-dessus de la matrice de pixels. En effet, il est possible de concevoir le pixel en n'utilisant que deux niveaux d'interconnexions métalliques. Par contre il est intéressant d'utiliser tous les niveaux disponibles pour les fonctions en périphérie de la matrice de pixels. En fin de procédé, une fois toutes les interconnexions réalisées, il est alors possible de graver le diélectrique inutile au-dessus des pixels (voir figure 3.33a). Cette gravure s'effectue avant l'étape de passivation,

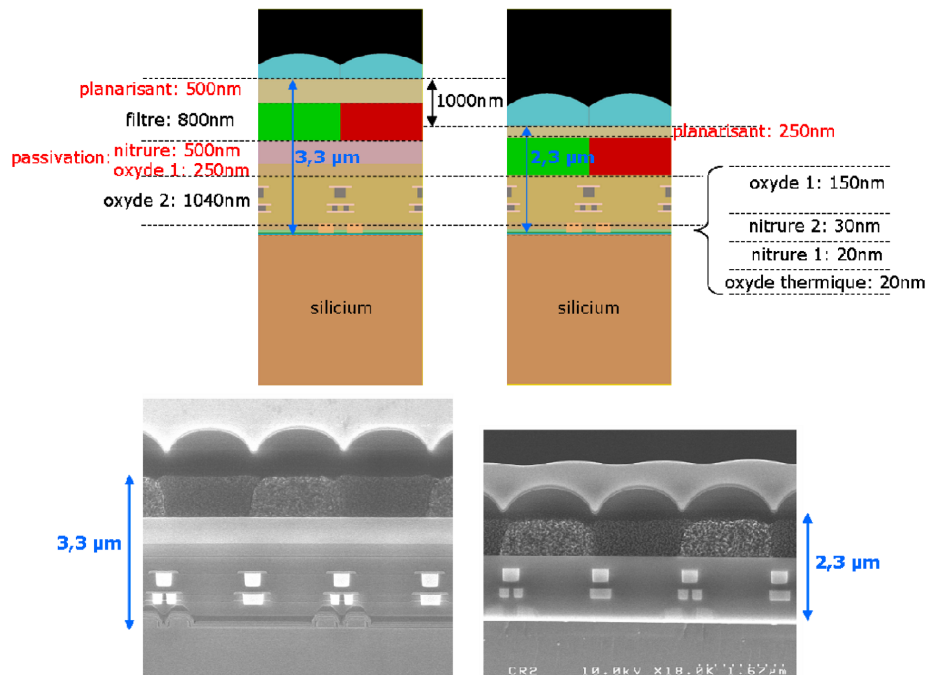


FIGURE 3.31 – Évolution de l'empilement optique du capteur : de $3,3\mu\text{m}$ d'épaisseur à $2,3\mu\text{m}$ (pixel de $1,75\mu\text{m}$). Représentation schématique (en haut), et coupe au MEB (en bas)

qui consiste en un dépôt d'oxyde de silicium et de nitrure de silicium puis en un recuit, afin de guérir ou de « passiver » les défauts induits par les différentes étapes de fabrication du circuit. Toutefois cette solution, intégrée de façon nominale dans la première génération de pixels de $1,4\mu\text{m}$ (en rouge sur la figure 3.30) n'était pas suffisante pour garantir des performances suffisamment élevées. Nous avons donc proposé d'effectuer la gravure de la cavité après l'étape de passivation (évolution ②), supprimant ainsi les couches d'oxyde et de nitrure de silicium associées, pour réduire encore l'épaisseur (figure 3.31). Ce changement était lourd de conséquences, car la gravure, réalisée après l'étape de passivation, aurait pu introduire des défauts et dégrader le fonctionnement du circuit. Cependant, les résultats de simulations ont démontré l'apport positif de cette solution en termes de sensibilité et de réduction du crosstalk entre les pixels, la lumière étant mieux confinée au niveau des photodiodes (figure 3.32). Il s'en est suivi une qualification de ce nouveau procédé avant son introduction en production.

Pour la génération de pixels suivante, au pas $1,1\mu\text{m}$, j'ai proposé une solution plus radicale (évolution ③ de la figure 3.30). Les interconnexions métalliques étant réalisées en cuivre, elles sont encapsulées par des couches de nitrure de silicium, afin de bloquer la diffusion du cuivre fortement contaminant pour le silicium. Ces couches de nitrure créent des interférences et absorbent la lumière dans la partie bleue du spectre. Elles sont donc retirées au niveau des pixels. La solution utilisée précédemment consistait à graver chaque couche de nitrure de silicium, là où il était possible de le faire, juste après son dépôt. Nous avons alors proposé de faire la gravure de l'ensemble de ces

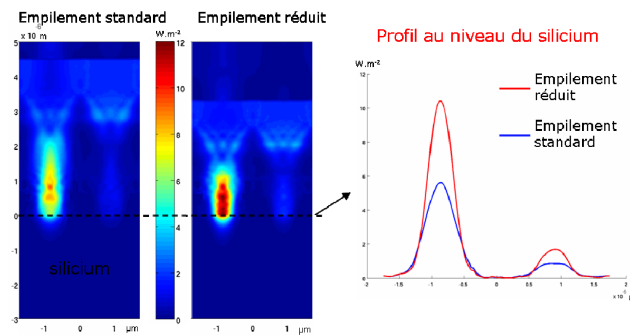


FIGURE 3.32 – Résultats de simulation électromagnétique 3D en source diffuse ($f/D=2,8$) dans le bleu ($450 \pm 20\text{nm}$) pour l'empilement standard et l'empilement réduit d'un pixel de pas $1,75\mu\text{m}$

couches en fin de procédé, comme pour la cavité à l'échelle de la matrice, mais cette fois-ci à l'échelle de chaque pixel, créant des *micro-cavités*. Deux possibilités se présentaient : soit remplir les micro-cavités d'oxyde de silicium pour disposer d'un empilement proche de la solution initiale, soit réaliser le dépôt des filtres colorés directement après la gravure des micro-cavités (voir figure 3.33b). Cette dernière solution permet de rapprocher encore la microlentille de la photodiode, mais aussi d'augmenter légèrement l'épaisseur du filtre, assurant ainsi un meilleur filtrage spectral.

Pour chaque modification de l'épaisseur de l'empilement diélectrique proposée, le processus de validation a été le suivant :

1. après concertation sur la faisabilité de la solution avec les équipes chargées du développement des procédés de fabrication, une phase de simulations optiques poussées est réalisée afin de valider l'intérêt,
2. vient ensuite la phase importante de développement de procédés de fabrication pour introduire la modification dans le flot de fabrication,
3. finalement, la validation de la solution est conclue, d'une part au niveau des performances optiques, mais surtout au niveau de la fiabilité et de la non dégradation des performances électriques des composants.

Ainsi toutes ces solutions ont fait l'objet de brevets et ont été implémentées dans les produits commercialisés par STMicroelectronics, vendus à des dizaines de millions d'unités.

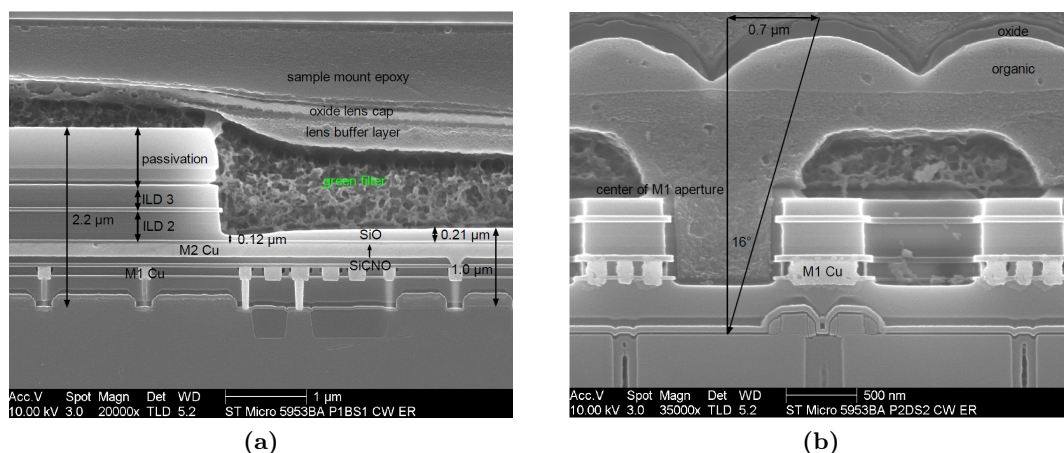


FIGURE 3.33 – Coupes MEB d'un circuit avec une cavité (a) visible à la périphérie de la matrice de pixels et (b) d'un circuit avec une microcavité remplie par les filtres colorés, source Chipworks[27]

3.3.2.5 Simulations opto-électriques couplées

En complément de ces études utilisant uniquement l'aspect optique, nous avons cherché à pousser plus loin le flot de simulations, afin d'obtenir des grandeurs directement comparables aux résultats de caractérisation. La simulation électromagnétique fournissant les champs \vec{E} , \vec{H} et \vec{P} dans la structure, il est alors possible de calculer le taux de paires électron-trou photo-générés dans le silicium. Cette génération optique est liée à la divergence du vecteur de Poynting \vec{P} , à l'énergie du photon considéré ($\frac{hc}{\lambda}$) :

$$G_{optique} = \frac{-\frac{1}{2}Re(div\vec{P})}{\frac{hc}{\lambda}} \quad (3.11)$$

Il est alors possible d'injecter ce résultat en tant que source de courant dans un outil de simulation électrique. Ce fut l'objet du couplage optique-électrique qui a été réalisé à la fin de la thèse d'Axel CROCHERIE.

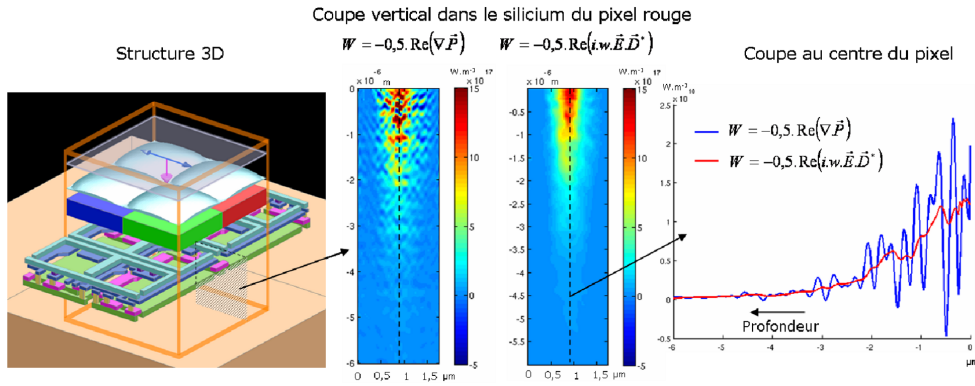


FIGURE 3.34 – Comparaison de la génération optique calculée suivant les formules 3.11 et 3.13

Tout d'abord, l'extraction de la génération optique $G_{optique}$ se fait, non pas en calculant directement la divergence du vecteur de Poynting, mais à partir du champ \vec{E} . En effet, le calcul de la divergence conduit à des instabilités numériques, car dans la méthode FDTD les champs \vec{E} et \vec{H} sont calculés sur des grilles entrelacées. Le vecteur de Poynting étant le produit vectoriel des deux champs, il implique l'interpolation d'un des champs sur la grille de l'autre. Le calcul de la divergence par différences finies est alors bruité. Il est nécessaire de calculer la divergence du vecteur de Poynting d'une autre manière. Sachant que le vecteur de Poynting est défini par $\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{H}^*$ et en considérant que l'on travaille en régime d'ondes planes harmoniques *, on peut réécrire :

$$\begin{aligned} div(\vec{P}) &= div(\vec{E} \wedge \vec{H}^*) \\ &= \vec{rot}(\vec{E}) \cdot \vec{H}^* - \vec{E} \cdot \vec{rot}(\vec{H}^*) \\ &= -\mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \cdot \vec{H}^* - \vec{E} \cdot \epsilon \frac{\partial \vec{E}^*}{\partial t} \\ &= -\mu \cdot i\omega \cdot \vec{H} \cdot \vec{H}^* + i\omega \cdot \epsilon \vec{E} \cdot \vec{E}^* \\ &= -\mu \cdot i\omega \cdot \left| \vec{H} \right|^2 + i\omega \cdot \epsilon \left| \vec{E} \right|^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

Puisque l'on ne considère que des milieux pour lesquels $\mu = \mu_0$, seule la permittivité électrique $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 + i\sigma$ peut être complexe si le matériau considéré présente une conductivité non nulle. Aussi,

*. hypothèse valide puisque l'on travaille en régime stationnaire car $E(\omega)$ est extrait par transformée de Fourier du champ $E(t)$

comme seule la partie réelle de la divergence du vecteur de Poynting intervient dans le calcul de la génération optique et que le terme $\mu i \omega \left| \vec{H} \right|^2$ est un imaginaire pur, on obtient :

$$G_{optique} = +\frac{1}{2} \omega \sigma \frac{\lambda}{hc} \left| \vec{E} \right|^2 \quad (3.13)$$

Cette formulation ne nécessite plus d'interpolation. Elle peut être calculée sur les nœuds de la grille du champ \vec{E} . Il n'y a alors plus d'instabilité numérique, comme nous avons pu le valider en comparant les deux méthodes sur une simulation (voir figure 3.34). On note toutefois que pour des volumes grands devant la longueur d'onde, le bruit introduit par le calcul direct de la divergence du vecteur de Poynting possède une intégrale nulle (ou très faible en pratique). Ceci a été confirmé sur la même simulation en utilisant le théorème d'Ostrogradski :

$$\oiint_{\Sigma} \vec{P} \cdot \vec{n} ds = \iiint_V \text{div}(\vec{P}) \cdot d\vec{v} \quad (3.14)$$

Nous avons vérifié que l'intégrale de la divergence du vecteur \vec{P} dans un volume V , fermé par la surface Σ , était numériquement comparable au flux de \vec{P} à travers Σ .

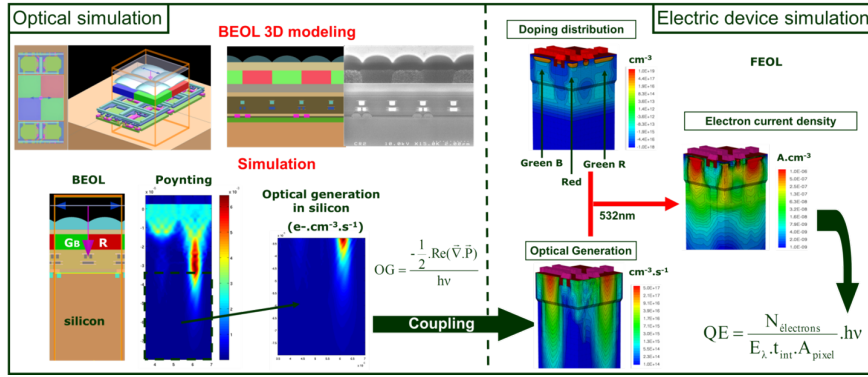


FIGURE 3.35 – Flot de simulations optiques-électriques couplées permettant la simulation du rendement quantique.

Une fois le taux de génération optique obtenu (en $e^- \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$) sur la grille de calcul du champ \vec{E} , il fallait transférer ces données dans l'outil de simulation électrique utilisé à STMicroelectronics : Synopsys. Cet outil permet tout d'abord de calculer la distribution et les concentrations des dopants dans le silicium. Le champ électrique est calculé à partir de ces profils de dopages et des tensions appliquées sur les contacts, au niveau du silicium ou des grilles des transistors. Connaissant le champ électrique, les courants de dérive-diffusion des trous et des électrons dans le silicium sont déduits. En intégrant le courant dans le volume de la zone de charge d'espace, on obtient le taux d'électrons collectés par seconde dans la photodiode de chaque pixel. Enfin, connaissant le flux de photons incidents (donné par la simulation optique), il est possible de calculer un rendement quantique comparable aux mesures sur les bancs de caractérisation (voir 4.1.2). Pour permettre l'interfaçage des données entre les deux logiciels de simulation, nous avons développé un décodage de la grille utilisée par Synopsys et une interpolation de la génération optique issue de Lumerical sur les nœuds de cette grille. La simulation électrique est basée sur les techniques de résolution des équations différentielles par éléments finis et utilise donc des grilles adaptatives triangulaires. Celles-ci diffèrent significativement de la grille rectangulaire utilisée par la FDTD. Le flot complet de simulation est présenté figure 3.35. Nous avons montré un bon accord entre les simulations et les mesures pour différents types de pixels, ainsi que la capacité à simuler correctement l'effet des filtres colorés (voir figure 3.36). Ces travaux ont fait l'objet de deux présentations orales à des conférences internationales SPIE [28, 29].

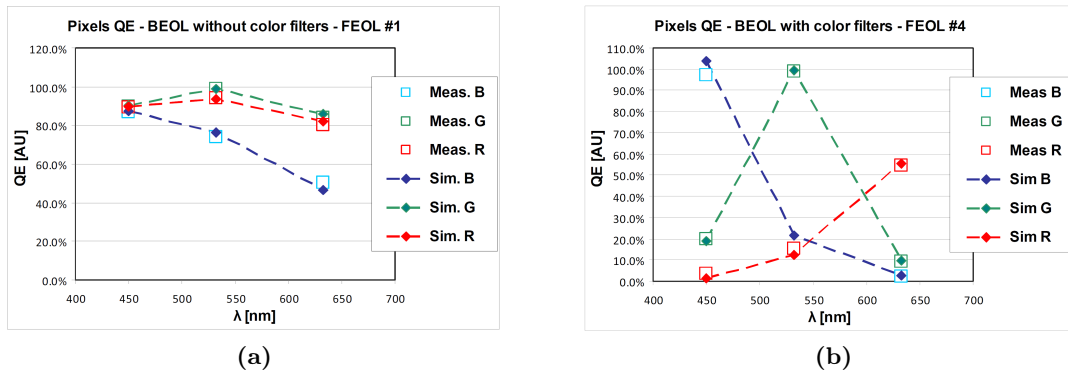


FIGURE 3.36 – Comparaison entre simulation opto-électrique et les mesures de rendement quantique pour des pixels sans filtres colorés (a) et avec filtres colorés (b)

Au terme de la thèse d'Axel CROCHERIE nous disposons donc de deux outils performants nous permettant de simuler la propagation de la lumière dans les pixels : le tracé de rayon pour les pixels les plus grands (typiquement au-dessus de $3\mu\text{m}$) et la simulation électromagnétique pour les tailles inférieures. Ces deux outils ont été développés pour nos besoins spécifiques et validés par comparaison directe avec des résultats de caractérisation pour plusieurs versions de pixels. Ainsi, Axel CROCHERIE a intégré notre équipe et nous avons pu continuer à étudier et à améliorer la collection de la lumière dans les pixels de très petite taille. Les technologies sur lesquelles se sont appuyés ces développements sont dites *frontside illumination*, la lumière arrivant par la face avant du wafer de silicium et traversant les différentes couches de l'empilement diélectrique. Pour des pixels de très petite taille ($1,4\mu\text{m}$ et en dessous), il devient très difficile d'amincir encore cet empilement et de laisser suffisamment de place à la lumière entre les interconnexions. C'est pour ces raisons que la technologie *backside illumination* a été appliquée aux capteurs CMOS. Déjà développée et utilisée pour les capteurs CCD haut de gamme, il s'agit d'amincir le wafer, une fois terminé, afin de ne laisser que quelques microns (typiquement 3 à $5\mu\text{m}$) de silicium. La lumière arrive par l'arrière du wafer et ne traverse plus l'empilement diélectrique. En apparence, cela résout beaucoup de problèmes. Toutefois, un certain nombre de paramètres sont à optimiser, par exemple :

- le développement d'une couche antireflet sur la face arrière. Ce traitement d'antireflet est présent en *frontside illumination* de par la présence des oxydes et nitrures de silicium, dont nous avons auparavant optimisé les épaisseurs pour limiter les réflexions,
- l'épaisseur du silicium : une couche fine améliore le crosstalk pour les longueurs d'onde courtes, mais dégrade significativement la sensibilité dans le rouge,
- la gestion des réflexions parasites, notamment pour les plus grandes longueurs d'onde : n'étant pas totalement absorbées par les quelques microns de silicium, elles se réfléchissent sur les interconnexions métalliques et peuvent être ré-absorbées dans le silicium à un endroit éloigné du pixel d'origine.

De façon plus générale, les simulations sont à présent un outil important d'optimisation des pixels au sein de STMicroelectronics.

3.4 Colorimétrie et qualité des images

Les performances intrinsèques des pixels ont pu être améliorées à chaque nouvelle génération ; pas uniquement au niveau de la collection de la lumière, mais aussi sur des aspects électriques, comme le courant d'obscurité, l'homogénéité spatiale du capteur, le bruit de lecture ou encore la linéarité à très faible niveau de signal (typiquement quelques électrons). Toutefois, les études effectuées à

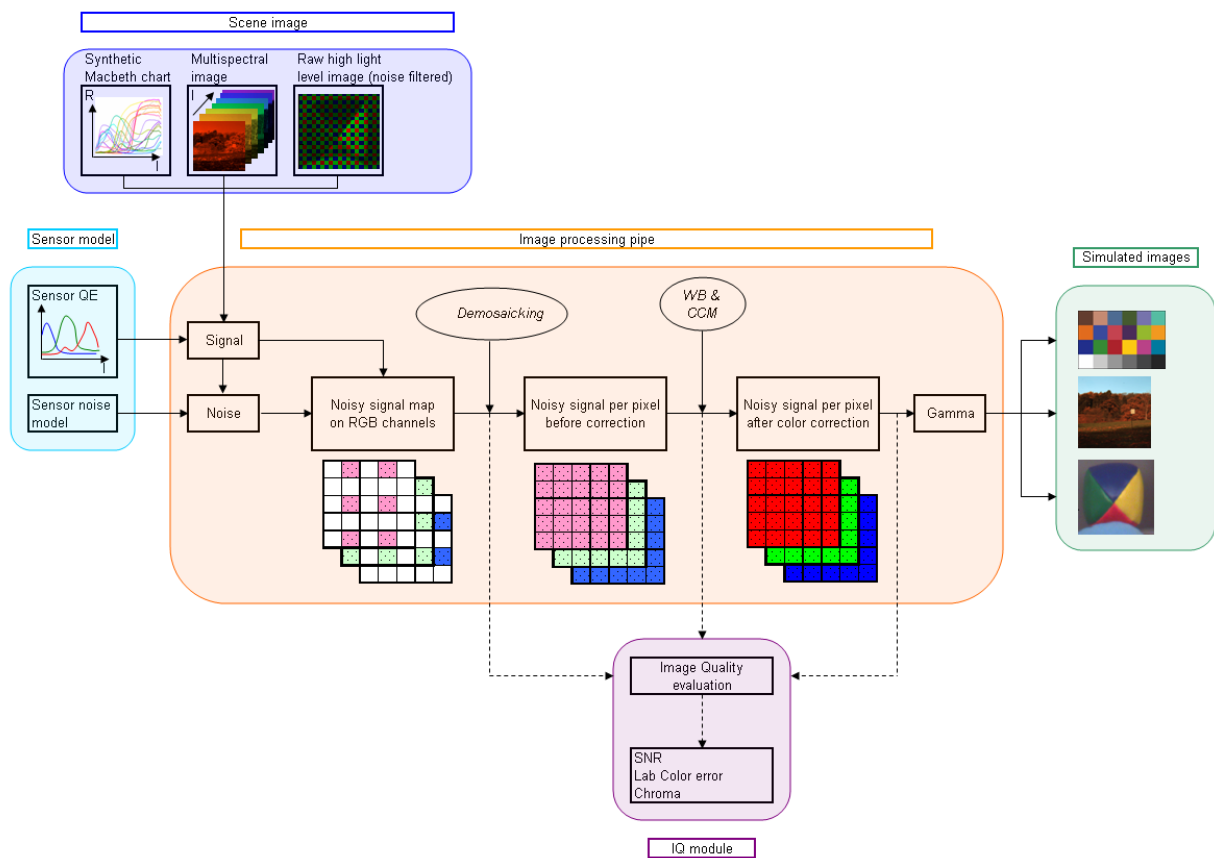


FIGURE 3.37 – Flot de génération d'images cibles à partir de résultats de caractérisation ou de courbes simulées.

l'échelle d'un pixel ne prenaient pas en compte les opérations réalisées sur l'image brute délivrée par le capteur, dont la reconstruction de la couleur. Deux conséquences en découlaient : d'une part les améliorations mesurées en caractérisation n'étaient pas aisément quantifiables sur l'image finale, et d'autre part, la spécification et le choix des filtres colorés se faisait par essais et validation sur image, avec des temps de cycle relativement longs. D'où l'idée d'étudier ce domaine, qui vivait à l'époque une compétition féroce portant sur les performances à faible niveau d'éclairément, notamment sous la pression du principal fabricant de téléphones du moment : Nokia [30]. Une étude préliminaire, menée sur les estimateurs de bruit visuel, avait montré qu'il était difficile d'extraire un unique indicateur de la qualité de l'image finale à partir des performances mesurées ou simulées à l'échelle des pixels. J'ai donc décidé de proposer un sujet de thèse pour faire le lien entre les caractéristiques des pixels et l'image en couleur finale, en se basant sur le développement d'un outil de simulation d'images. Clémence MORNET s'est donc concentrée sur la « *reconstruction couleur sous faible éclairément pour des capteurs d'images en technologie CMOS* ». Nous avons développé un outil permettant de générer des images pour différentes réponses spectrales de pixels et pour différentes conditions d'éclairément. De tels outils était également en cours de développement, notamment à Stanford [31–34], mais nous souhaitions maîtriser l'ensemble de la chaîne de simulation et d'évaluation de la qualité des images. Ces dernières permettaient alors d'évaluer, sur la base des résultats de caractérisations, les performances :

- qualitativement par le rendu visuel d'images de références jugées par plusieurs observateurs,
- quantitativement via le calcul d'indicateurs de qualité d'image.

L'outil, développé sous Matlab, est décrit figure 3.37. Il utilise en entrée les caractéristiques du pixel (sous forme de courbes de réponses spectrales et d'un modèle de bruit) et des images de référence, soit sous forme d'images acquises avec un rapport signal sur bruit élevé, soit sous forme de données spectrales synthétisées par la suite sous forme d'images. Le signal de sortie du capteur est alors simulé en tenant compte de la matrice de filtres colorés utilisée. Les étapes de dématricage (*demosaiçing*), voir figure 3.38a, puis de correction colorimétrique (figure 3.38b) sont ensuite implémentées. La qualité de l'image, ou plus précisément la dégradation du rapport signal sur bruit, est alors estimée après chacune de ces étapes. Finalement, une image en couleur simulée est délivrée.

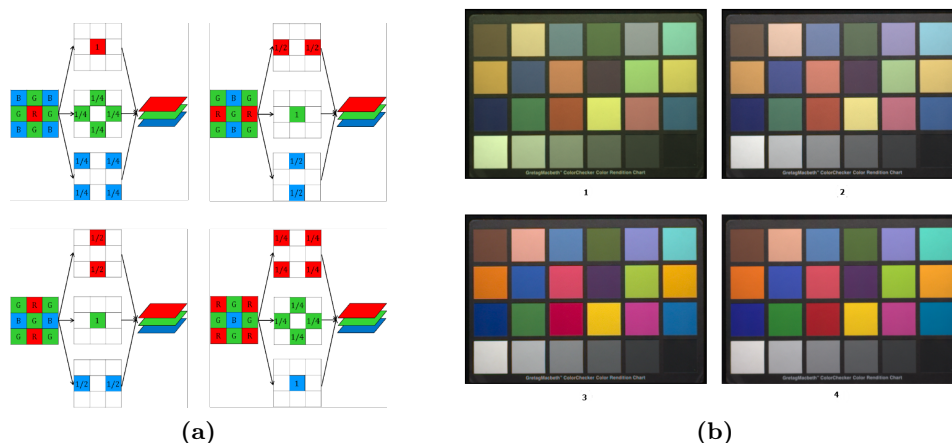


FIGURE 3.38 – (a) Interpolation bilinéaire des composantes couleurs en fonction de la position du pixel, (b) flot de correction couleur : (b-1) image brute, (b-2) après balance des blancs, (b-3) après application de la matrice de correction couleur et (b-4) image idéale.

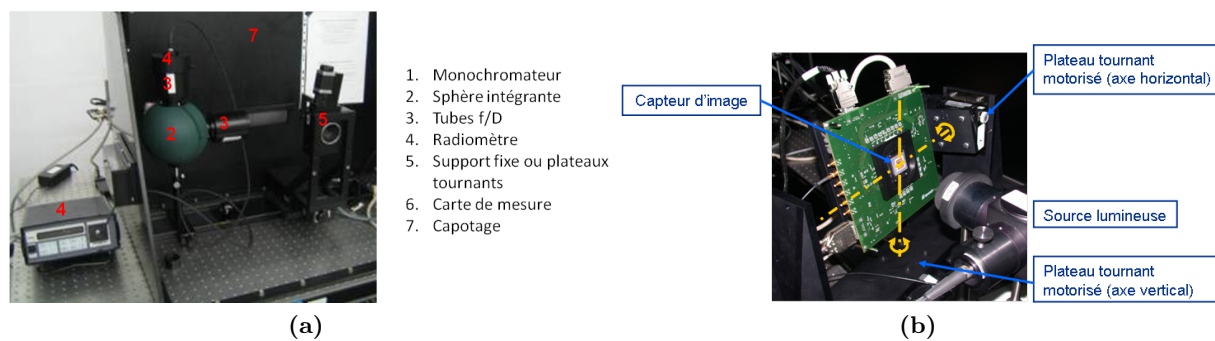


FIGURE 3.39 – Banc de caractérisation du rendement quantique avec un angle de rayon principal arbitraire (a), capteur monté sur les platines de rotation afin d’émuler l’angle de rayon principal (b)

3.4.1 Caractérisation hors d’axe du rendement quantique

En premier lieu, il est nécessaire de caractériser le rendement quantique pour différentes versions de pixels et pour différents angles de rayon principal. Sur la base de bancs optiques que j’avais conçus et mis en place, nous avons développé la caractérisation, en incidence oblique, du rendement quantique [16], voir figure 3.39. Les courbes de rendement quantique mesurées pour différents angles de rayon principal sont présentées figure 3.40. Nous disposons donc des données nécessaires pour

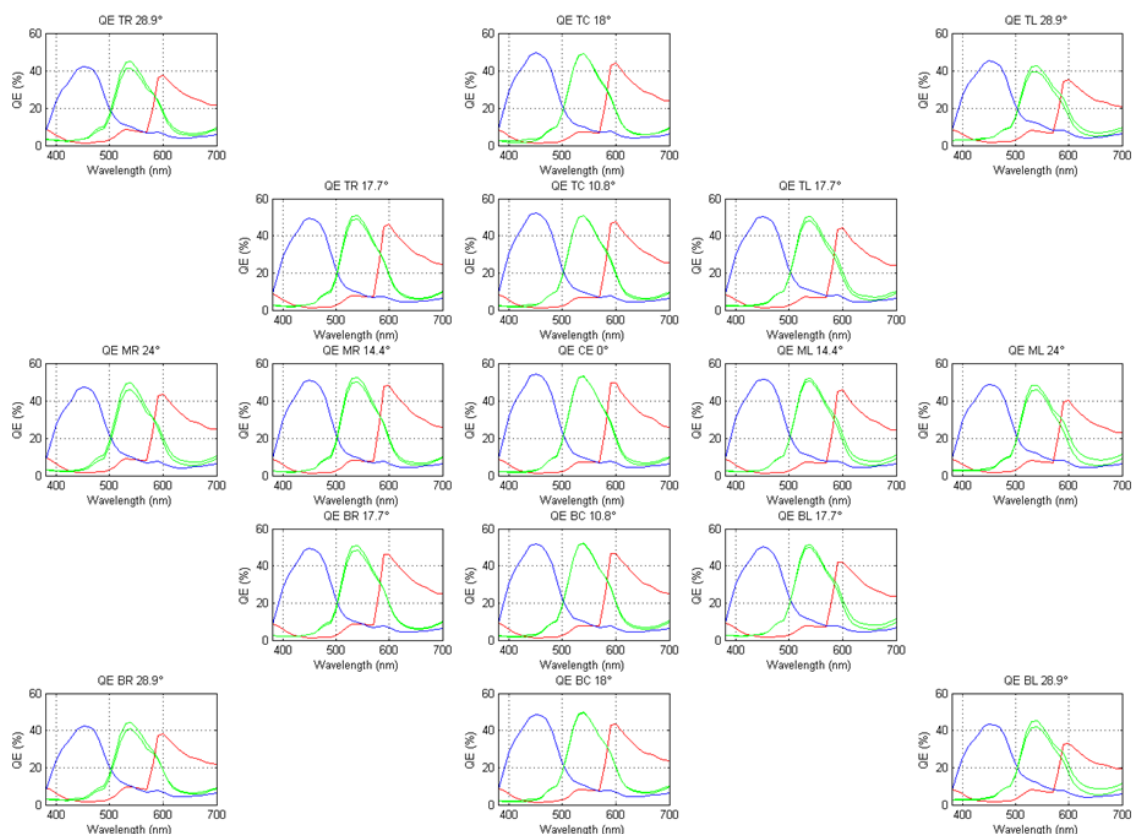


FIGURE 3.40 – Courbes de rendement quantique pour différentes orientations et valeurs de l’angle de rayon principal.

calculer la réponse d’un pixel à un éclairage donné, caractérisé par son spectre et son angle d’incidence. Des bases de données d’images de réflectances hyperspectrales fournissent le spectre reçu par chaque pixel en fonction de l’illuminant considéré. Ainsi, à partir de la caractérisation d’une

version de pixel, une image synthétique est générée, reproduisant le comportement d'un capteur placé derrière une optique donnée et pour différentes scènes de référence. Il est important de noter que même pour des différences faibles de rendement quantique, l'impact sur le rendu de l'image peut être important : les croisements de courbes et les taux de réjection des filtres sont particulièrement critiques.

3.4.2 Modélisation du bruit sur image

Afin d'évaluer la performance du capteur, il est nécessaire de prendre en compte le bruit présent dans toute image réelle. Pour cela, un modèle de bruit en fonction du signal (figure 3.41) est utilisé, dont les paramètres sont issus des résultats de caractérisation. On considère que le bruit est la somme de bruits indépendants, dont les écarts-types sont notés de la façon suivante :

1. $\sigma_{readout}$: le bruit de lecture, indépendant du niveau de signal, lié à l'électronique de lecture du signal dans le pixel. Il est supposé gaussien de moyenne nulle,
2. σ_{DSNU} : la non-uniformité du courant d'obscurité de pixel à pixel (*Dark Signal Non-Uniformity*). Indépendant du signal, ce bruit est supposé gaussien de moyenne nulle,
3. σ_{DCSN} : le bruit de grenaille du courant d'obscurité (*Dark Current Shot Noise*). Indépendant du signal, mais proportionnel au temps d'intégration, ce bruit est supposé poissonien de moyenne égale au courant d'obscurité du pixel,
4. σ_{PRNU} : le bruit lié à la non-uniformité de réponse de pixel à pixel (*Photon Response Non-Uniformity*). Ce bruit est supposé gaussien de moyenne nulle et d'écart type proportionnel au niveau de signal lumineux.
5. σ_{PSN} : le bruit de grenaille du flux lumineux (*Photon Shot Noise*). Ce bruit est supposé poissonien de moyenne égale au niveau signal, exprimé en électrons.
6. σ_{quanta} : le bruit lié à la quantification du signal lors du passage du signal analogique au signal numérique. Ce bruit est supposé uniforme entre $-\frac{1}{2}$ et $+\frac{1}{2}$, l'unité correspondant au niveau de quantification (LSB, *Less Significant Bit*).

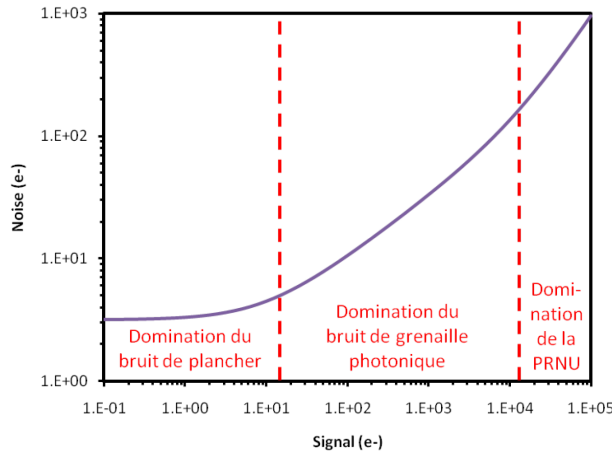


FIGURE 3.41 – Écart type du bruit en fonction du niveau de signal

Au final, pour chaque pixel dont le signal est S , le bruit sera caractérisé par sa variance, somme des variances des différents bruits :

$$\sigma^2 = \underbrace{\sigma_{readout}^2 + \sigma_{DSNU}^2 + \sigma_{DCSN}^2 + \sigma_{quanta}^2}_{\text{bruit de plancher}} + \underbrace{\sigma_{PSN}}_{\propto S} + \underbrace{\sigma_{PRNU}}_{\propto S^2} \quad (3.15)$$

La variation de l'écart type du bruit σ est présentée figure 3.41. À faible niveau de signal, le bruit de plancher domine ($\sigma = cste$), puis le bruit photonique proportionnel à la racine carrée du signal prend le relais ($\sigma \propto \sqrt{S}$), enfin à fort niveau de signal (proche de la saturation), le bruit de PRNU prime ($\sigma \propto S$).

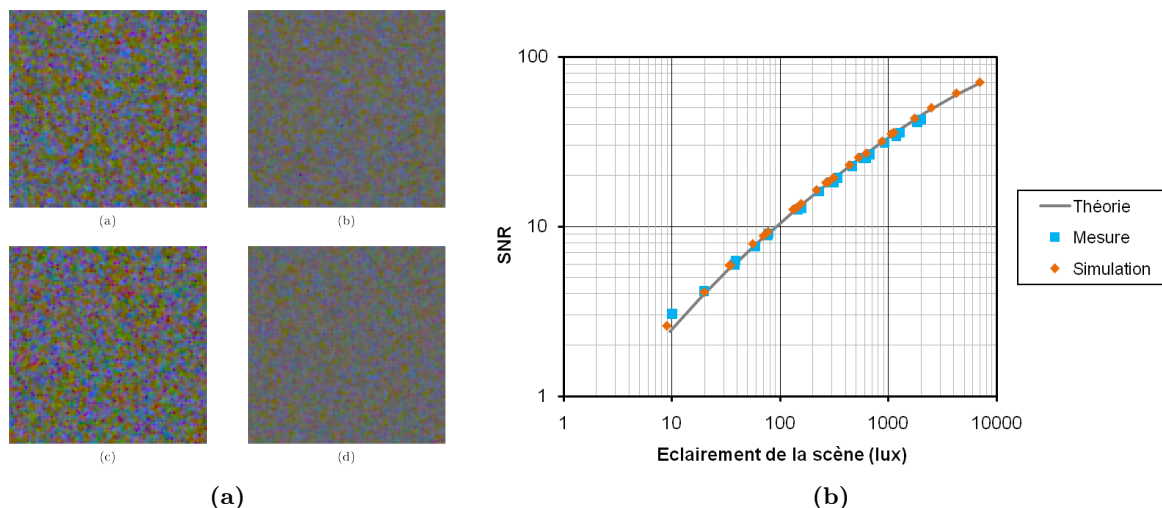


FIGURE 3.42 – (a) Comparaison d’images mesurées (en haut) et réelles (en bas) sous un éclairement de 15lux (à gauche) et de 62lux (à droite), (b) rapport signal sur bruit du canal de luminance

La validation de ce modèle de bruit a été établie par comparaison entre les simulations d’images sur lesquelles sont appliqués les différents modèles de bruit et les images réellement obtenues avec les capteurs. Une validation qualitative est présentée figure 3.42a. Une validation quantitative est obtenue en extrayant, sur les deux types d’images, le rapport signal sur bruit de la luminance, pour différents niveaux de signal (figure 3.42b). Sur cette même figure, la courbe théorique est calculée suivant l’équation 3.15, en prenant en compte les étapes d’interpolation des plans couleurs et de correction colorimétrique. Grâce à cet outil, nous avons pu nous concentrer sur l’optimisation du processus de reconstruction et de correction colorimétrique des images. Nous avons choisi de travailler sur deux points : les filtres colorés et la matrice de correction colorimétrique. Ces travaux ont fait l’objet de plusieurs publications [35–37].

3.4.3 Recherche de gabarits de filtres optimaux

Il est assez aisé de modéliser les courbes de transmission des filtres colorés, par des fonctions à quelques paramètres (gaussiennes, courbe spline, etc.). Toutefois, la transmission du filtre seul ne permet pas de simuler la courbe de rendement quantique du pixel : il faut prendre en compte le crosstalk (c’est à dire l’échange de signal entre pixels voisins), qui va modifier la réponse de chaque pixel en fonction de son environnement. La caractérisation du crosstalk n’est pas triviale. Idéalement, il faut éclairer uniformément un seul pixel et mesurer le signal collecté par ses voisins. Pour des pixels de très petites taille ($2\mu m$, $1,75\mu m$ et $1,4\mu m$), réaliser un éclairage localisé n’est pas possible. Aussi, nous avons proposé une méthode dérivée[38], basée sur la réalisation de motifs colorés particuliers : un filtre d’une couleur donnée est placé au-dessus d’un pixel et il est entouré de filtres d’une seule autre couleur. Suivant les longueurs d’ondes considérées, soit le pixel central recevra de la lumière et les pixels voisins collecteront le signal parasite, soit ce sont les pixels voisins qui enverront du signal vers le pixel central (voir figure 3.43). Par combinaison des trois couleurs de filtres disponibles (rouge, vert, bleu), il est possible d’extraire la courbe de crosstalk en fonction de la longueur d’onde (figure 3.44a) et des directions principales(figure 3.44b). Connaissant ces courbes de crosstalk pour une architecture de pixel donnée, il est alors possible de générer des courbes de

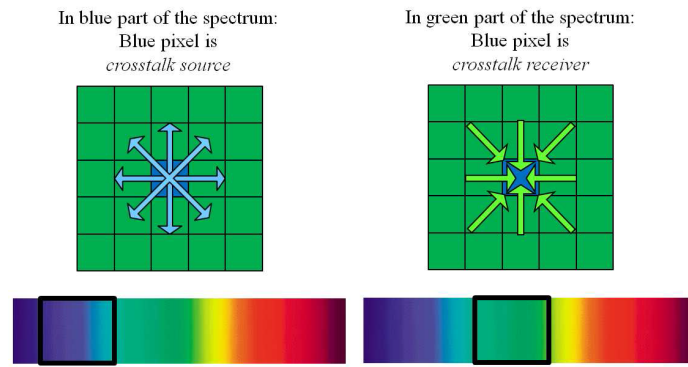


FIGURE 3.43 – Motif de filtres colorés permettant la mesure du crosstalk

rendement quantique très proches de la réalité. A partir de celles-ci, nous pouvons estimer l'erreur colorimétrique obtenue après application d'une matrice de correction colorimétrique, ainsi que la dégradation du rapport signal sur bruit associé. L'erreur colorimétrique est bien définie et suit des normes définies par la CIE*. Par contre le rapport signal sur bruit est plus difficile à normaliser

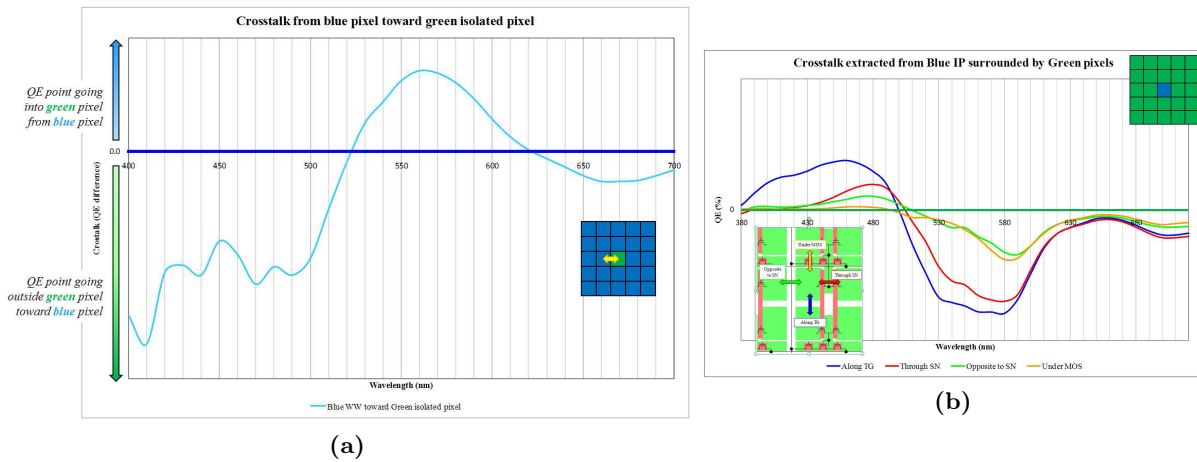


FIGURE 3.44 – Courbe de crosstalk (a) entre le pixel vert et son voisin de gauche, (b) pour les quatre directions principales en regard du layout.

et il dépend évidemment du signal. Aussi, nous avons montré, au cours du projet de fin d'études de Staffan RONNAS, que la dégradation du rapport signal sur bruit de la luminance était constante sur une plage importante de la dynamique du capteur (là où le bruit photonique domine). Puisque estimée sur une zone grise, cette dégradation ne dépendait que des coefficients de la balance des blancs. Nous avons donc utilisé comme indicateur le rapport des SNR avant et après balance des blancs, dénoté SEF (*Snr Evolution Factor*). La figure 3.45 montre l'évolution des deux paramètres (erreur de couleur et SEF) en fonction de la longueur d'onde centrale des filtres et de leur largeur spectrale. Ici, les filtres sont modélisés par des gaussiennes. Les flèches indiquent l'écart entre le point de départ (magenta), correspondant aux résines colorées utilisées en standard, et le point d'arrivée (cyan) qui est l'optimum pour chacun des critères. Cette étude confirme que la qualité colorimétrique et le rapport signal sur bruit n'ont pas d'optimum commun, notamment pour les filtres rouge et vert. Toutefois, pour le filtre bleu les deux critères peuvent être améliorés en limitant la largeur du filtre, initialement de $\pm 50nm$, à $\pm 25nm$.

La même démarche a été utilisée pour la matrice de correction colorimétrique. Dans ce cas

*. Commission Internationale de l'Éclairage

également, la fidélité des couleurs et le rapport signal sur bruit tendent vers des optima différents. Aussi, nous avons mis en place une recherche multi-objectifs. Ce type d'optimisation ne fournit pas un résultat unique, mais une surface de Pareto, correspondant aux meilleurs compromis entre les différents objectifs, compte tenu du poids relatif de chacun d'eux. C'est donc à l'utilisateur de choisir au final le point qu'il considère optimal. Ceci nous renvoie donc à l'étude menée sur les estimateurs de bruits visuels[36] et sur la difficulté de définir la qualité d'une image en incluant différents aspects. Notamment, la prise en compte du système visuel humain nous est apparue comme un point important dans l'évaluation des images. Dans le cadre de la thèse, il n'a pas été possible de traiter en profondeur ce point, qui reste un sujet d'actualité [39, 40].

À l'issu de sa thèse, Clémence MORNET a été embauchée au sein de l'équipe pour poursuivre les travaux de caractérisation et de colorimétrie.

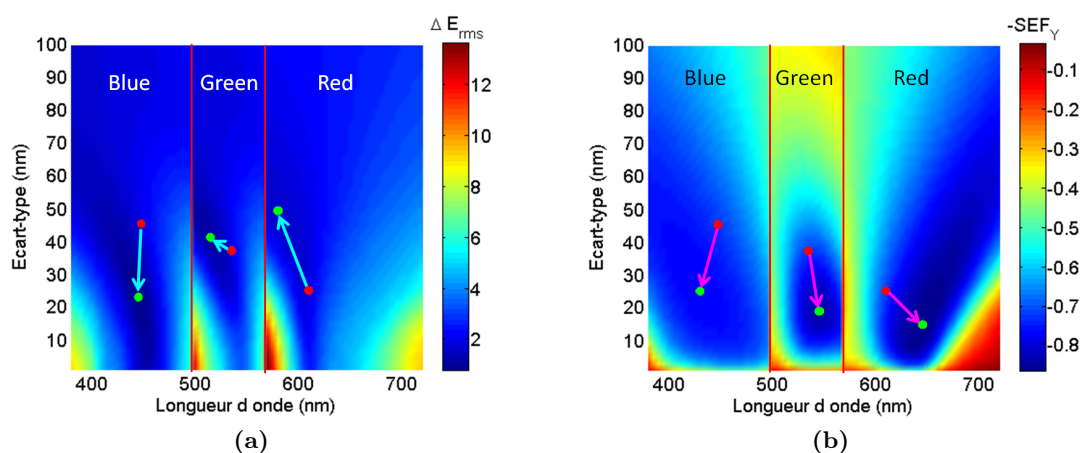


FIGURE 3.45 – Variation (a) de l'erreur colorimétrique, (b) du SEF en fonction de la longueur d'onde pic des filtres colorés et de leur largeur.

Chapitre 4

Travaux en cours et perspectives

4.1 L'électronique organique

Cette thématique marque une parenthèse personnelle dans le développement des capteurs CMOS. Elle m'a permis de mettre à profit mes compétences en caractérisation électro-optique et de développer mes connaissances dans la physique des semiconducteurs, notamment organiques. Ces derniers offrent des perspectives intéressantes pour compléter les fonctionnalités actuelles des capteurs CMOS (voir § 4).

4.1.1 Introduction à l'électronique organique

J'ai intégré le Laboratoire des Composants Imprimés du CEA/LITEN en 2011. Dans le cadre du laboratoire commun avec la société Isorg, j'ai pris en charge le développement des moyens de caractérisation électro-optique des photodiodes organiques. Les dispositifs électroniques et les procédés de fabrication, développés au sein de ce laboratoire, utilisent comme semiconducteurs des matériaux organiques polymères. Ceux-ci constituent une alternative aux matériaux inorganiques cristallins, comme le silicium. De plus, les semiconducteurs organiques peuvent être déposés à la demande (sous vide ou par voie liquide) sur un substrat quelconque [41–43]. Les applications visent, entre autres, des dispositifs et des circuits qui nécessitent une grande surface ou l'utilisation d'un substrat souple. Le développement et la fiabilisation des photodiodes organiques demandaient une bonne compréhension physique de ces dispositifs et la maîtrise des moyens de caractérisation, afin de mesurer finement et précisément les dispositifs en cours de développement. En effet, la recherche dans le domaine de l'électronique organique étant assez récente, la modélisation physique des phénomènes électriques dans les photodiodes est en plein essor. De plus, la majeure partie des études existantes portaient sur des cellules solaires qui, bien qu'également basées sur l'effet photo-électrique, ne nécessitent pas les mêmes optimisations.

4.1.2 Caractérisation électro-optique

Tout d'abord, il a été nécessaire de mettre en place un banc de caractérisation électro-optique permettant de mesurer les paramètres classiques des photodiodes : courant d'obscurité, linéarité, rendement quantique, cartographie de sensibilité, temps de réponse. Dans le cadre des développements menés au laboratoire, les matériaux semiconducteurs organiques peuvent avoir une gamme spectrale de détection étendue, du visible à l'infrarouge. Le banc devait être capable de réaliser ces mesures de façon continue de $400nm$ à $1,6\mu m$. Ensuite, les photodiodes sont réalisées sur des feuillets plastiques de $320 \times 380mm$, ce qui nécessite de couvrir l'ensemble du feuillet par balayage de la tête optique de mesure. J'ai donc conçu et réalisé un banc, constitué d'une tête optique permettant d'éclairer une photodiode de manière uniforme (sur $20mm$ de diamètre) ou ponctuellement avec des tailles de

spots allant de $500\mu\text{m}$ à $50\mu\text{m}$ (figure 4.1c) et pouvant se déplacer à la demande sur l'ensemble du feuillet (figure 4.1b). La tête optique réalise également la mesure du flux en temps réel sur toute la gamme spectrale. Afin de mesurer correctement le courant d'obscurité, l'ensemble est placé dans un

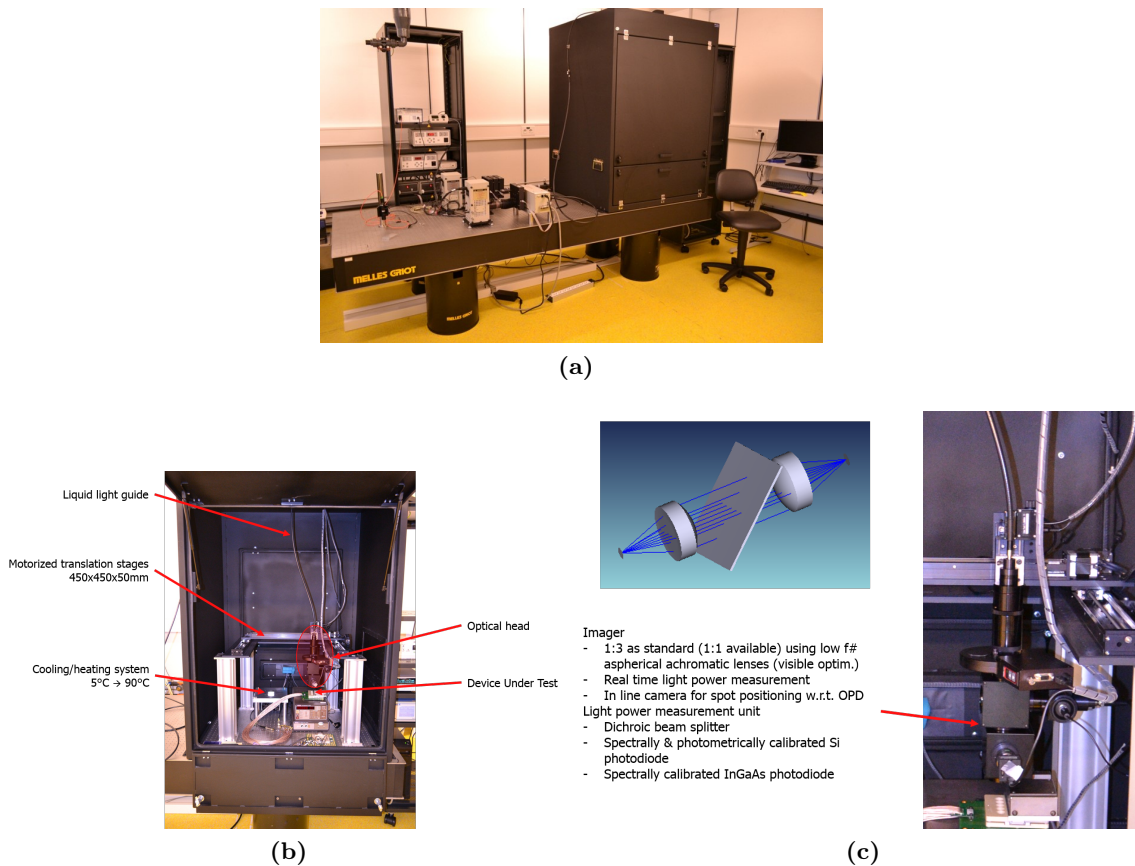


FIGURE 4.1 – Ensemble du banc optique développé au LITEN (a), tête optique (c) montée sur le système de translation (b)

capotage assurant un niveau de noir poussé (figure 4.1a). Les sources lumineuses sont déportées à l'extérieur et la lumière est transportée par des guides optiques liquides. Trois sources (figure 4.2) ont été mises en oeuvre :

- un monochromateur permettant de couvrir l'ensemble de la gamme spectrale,
- une source blanche (lampe halogène) avec une atténuation du flux par densités neutres sur 9 décades,
- une source à LED permettant un éclairage pulsé à plusieurs longueurs d'onde (530nm , 650nm , 850nm et 940nm) sélectionnables simultanément ou séparément grâce à un mélangeur de faisceaux conçu spécifiquement.

Le fonctionnement du banc a été automatisé, pour permettre de réaliser simplement et de manière répétable les différentes caractérisations souhaitées. Ceci inclut le pilotage des équipements, l'acquisition des données, leurs traitements, la mise en forme et l'archivage des résultats et des données brutes. J'ai donc choisi de développer, sous LabView, un logiciel réalisant toutes ces actions. Le travail étant important, je l'ai effectué avec l'aide d'Anthony DAL GOBBO élève ingénieur dans le cadre de son projet de fin d'études de l'école PHELMA (École nationale supérieure de physique, électronique, matériaux de Grenoble). Nous avons travaillé sur l'architecture logicielle, le codage de la structure du logiciel et la validation de celui-ci. J'ai confié le développement des premiers modules de caractérisation (courant d'obscurité, sensibilité) à Sébastien SCHALLER dans le cadre de son projet de fin d'études de l'IUT Mesures Physiques de Grenoble. Ceci a permis d'aboutir à un

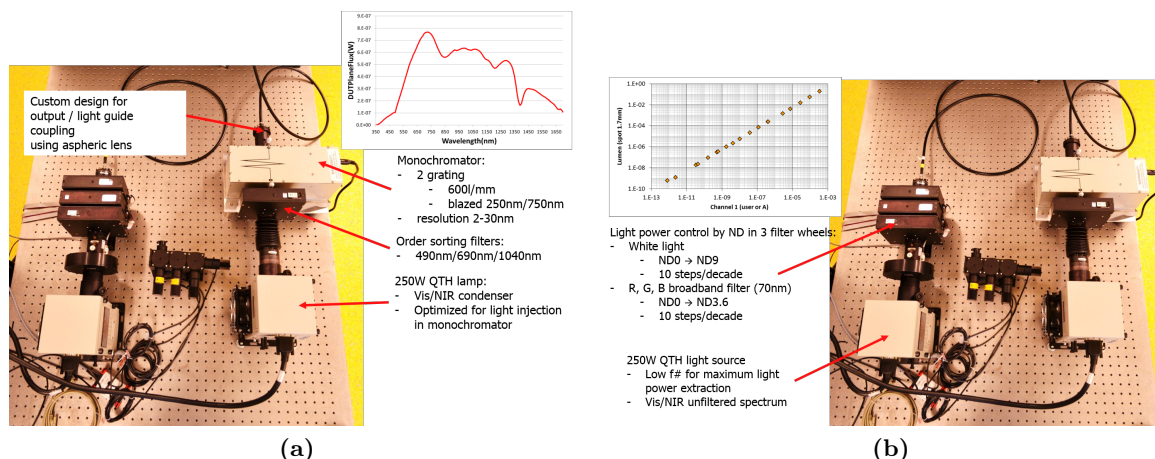


FIGURE 4.2 – Sources monochromatique (a), blanche (b) et LED au milieu

outil utilisable par les différentes personnes du laboratoire après six mois de développement. Par la suite, j'ai encadré un jeune technicien pour l'écriture et le test des modules de caractérisations complémentaires. Actuellement, cet outil, mis en place en 2012, est toujours utilisé au laboratoire et sert de référence.

4.1.3 Modélisation physique de la photodiode organique

En complément de ce travail sur la caractérisation électro-optique, j'ai encadré en partie * la thèse de Benjamin BOUTHINON : « Impact des états de gap dans les semi-conducteurs organiques sur les performances des photodiodes », en partenariat avec le laboratoire IMEP-LHAC de l'INP Grenoble et l'Institut d'Optique de Saint-Étienne. Ce doctorat, focalisé sur les phénomènes limitant les performances des photodiodes organiques, a montré l'importance des états de gap (pièges) présents dans ces matériaux. Pour cela, un fort couplage entre la modélisation électrique et la caractérisation a été nécessaire.

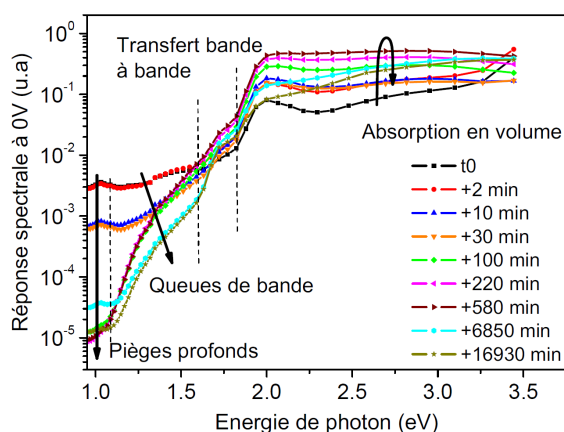


FIGURE 4.3 – Identification des pièges profonds et évolution de leur densité en fonction du recuit par analyse du rendement quantique sub-bandgap

Les photodiodes organiques utilisent un mélange de polymère π -conjugué (semiconducteur de type donneur d'électrons) et de fullerène (de type accepteur d'électrons). Lorsqu'un photon est absorbé dans l'un des matériaux, il crée un exciton : paire électron-trou fortement liée (quelques

*. Encadrement sur la période 2011-2013, avant de rejoindre le laboratoire d'imagerie visible du LETI

centaines de meV). Celui-ci étant neutre, il ne subit pas les effets du champ électrique et n'est donc soumis qu'à la diffusion. Cet exciton va se dissocier à l'interface entre les deux matériaux, chaque particule allant alors dans le matériau présentant le plus bas niveau d'énergie : le fullerène pour l'électron et le polymère pour le trou. Les particules chargées, alors dissociées, dérivent sous l'effet du champ vers les électrodes de la diode. Or, le temps de vie d'un exciton étant très court, il ne diffuse que sur une distance de 10 à 20nm. Ce qui implique que les domaines de polymère et de fullerène doivent être interpénétrés à l'échelle de la dizaine de nanomètres pour obtenir un taux de dissociation suffisant. La morphologie du mélange est donc critique. C'est en s'intéressant à cette morphologie que Benjamin BOUTHINON a aussi identifié l'impact des queues de bandes (états d'énergies de part et d'autre des bandes de valence et de conduction). La présence de ces états, l'évolution de leur densité et leur origine ont pu être étudiées par des caractérisations physiques poussées (AFM, XRD, UPS) et par les moyens de caractérisation développés précédemment (§ 4.1.2). Ils ont permis d'analyser le rendement quantique des photodiodes pour des énergies inférieures au gap optique du matériau (voir figure 4.3). Cette étude a fait l'objet d'une publication en 2015 [44].

A l'issue de sa thèse, Benjamin BOUTHINON a intégré la société Isorg au sein de laquelle il assure le développement des procédés de fabrication, pour les différentes générations de matériaux semiconducteurs.

4.2 Contexte de l'imagerie visible aujourd'hui

Depuis fin 2013, ayant rejoint le Laboratoire d'Imagerie Visible du CEA-LETI, je travaille à nouveau sur les capteurs d'images CMOS. Dans ce chapitre, un tour d'horizon du marché actuel et des perspectives sera tout d'abord effectué, afin de situer le contexte des développements en cours au sein du laboratoire et plus particulièrement ceux que je souhaite conduire :

- l'imagerie de distance par les méthodes d'illumination active (§ 4.3.1.1)
- l'imagerie de distance sans illumination spécifique, dite imagerie de distance passive (§ 4.3.1.2)
- le rendu d'image en couleur en bas niveau de lumière (§ 4.3.2)
- l'imagerie dans le proche infrarouge, typiquement entre $1\mu m$ et $1,5\mu m$ (§ 4.3.3)

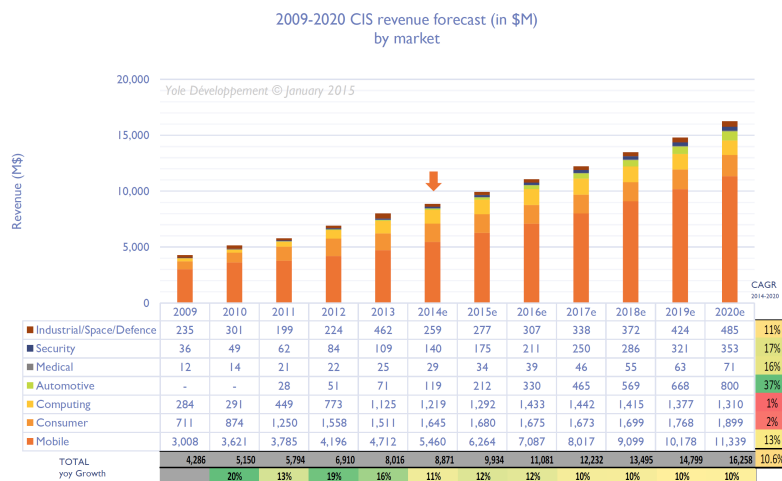


FIGURE 4.4 – Évolution du marché des capteurs d'images en technologie CMOS de 2000 à 2020.
Source Yole Développement

De nos jours, plus d'un milliard de milliards de photographies sont prises en un an. Pour l'immense majorité, ces images sont acquises avec des capteurs CMOS et pour 80% d'entre elles, avec un téléphone portable. En effet depuis l'an 2000, la très forte croissance de ce domaine a répandu

l'imagerie dans notre vie quotidienne avec plus de trois milliards de capteurs vendus par an (voir figure 4.4). Les hypothèses raisonnables pour les années à venir indiquent un taux de croissance de 10% par an pour l'ensemble du marché. Il est donc intéressant d'analyser les grandes tendances, en fonction des domaines d'applications, afin d'identifier des axes principaux de développement au sein du laboratoire et les travaux futurs. Je ne ferai pas une liste exhaustive, mais je me limiterai aux trois principaux champs : l'imagerie « grand public », pour le domaine automobile et pour le domaine médical.

4.2.1 Imagerie grand public

L'imagerie grand public a été le stimulateur principal des développements pour les capteurs CMOS depuis le début des années 2000. De nos jours, elle reste le principal domaine d'applications en intégrant les fonctions de photographie et de vidéo dans les téléphones portables et les tablettes. En effet, les appareils photos (compact, bridge, reflex) sont en stagnation ou en régression, sans réelle perspective de croissance (voir figure 4.5).

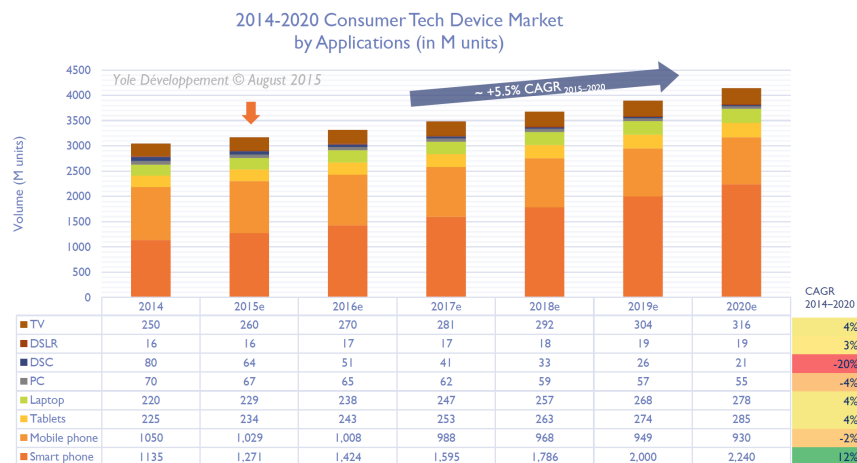


FIGURE 4.5 – Évolution du marché des capteurs d'images en technologie CMOS de 2000 à 2020 pour les applications grand public

Si la première décennie a été marquée par la course aux « mégapixels » et par une réduction drastique de la taille des pixels, la demande évolue vers une meilleure qualité d'image en termes de résolution, de rapport signal sur bruit et de fidélité des couleurs. Les perspectives vont vers une stabilisation de la taille minimale du pixel autour de $1\mu\text{m}$ et l'utilisation de pixels de $2\mu\text{m}$ à $4\mu\text{m}$ pour les produits privilégiant la qualité image. Les pixels et les capteurs montreront des performances plus élevées ou intégreront des fonctionnalités supplémentaires. Les besoins d'amélioration dans le domaine concernent principalement :

- le bruit, et par conséquent la qualité des images lorsque l'éclairage est faible,
- la dynamique (voire la haute dynamique ou HDR), permettant d'enregistrer correctement des scènes fortement contrastées,
- la distorsion des images en cas de mouvement.

Pour ce dernier point nous dégagerons deux causes : le mouvement du photographe pendant la prise de vue, problème pouvant être résolu par une combinaison de stabilisation à la prise de vue et par du traitement d'images [45, 46] ; et l'acquisition en mode *rolling shutter* classiquement présent sur les capteurs CMOS [47], nécessitant de développer des architectures *global shutter* intégrant plus d'électronique au sein du pixel [48, 49]. Ceci fait l'objet de plusieurs développements au sein du laboratoire, pour lesquels l'optimisation de la microlentille a été étudiée.

Il y a d'une part des développements sur les pixels eux-mêmes, mais aussi sur les traitements des images. L'objet de la co-conception est d'optimiser ces deux aspects conjointement : l'intégration de l'optique et du traitement d'images offre des degrés de liberté supplémentaires. De plus, les images acquises ne sont plus nécessairement destinées à être visualisées telles que, mais devraient de plus en plus être intégrées aux dispositifs de réalité augmentée et de réalité virtuelle.

4.2.2 Capteurs pour l'automobile

Toujours dans le cadre des applications grand public, le domaine de l'automobile est celui qui devrait présenter la plus forte croissance dans les prochaines années. Il existe déjà un certain nombre de dispositifs en place, mais la quantité de capteurs augmentera fortement dans le cadre de l'ADAS*.

À titre d'exemple, pour les capteurs d'images, on trouve :

- le franchissement de la ligne blanche et le changement involontaire de voie,
- la suppression d'angle mort,
- l'alerte de somnolence du conducteur,
- l'activation des airbags en fonction des personnes dans l'habitacle,
- l'identification de panneaux de signalisation,

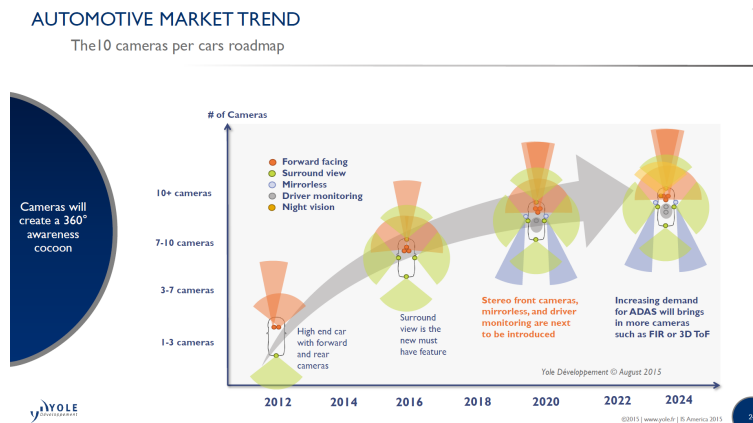


FIGURE 4.6 – Évolution du nombre de caméras embarquées dans les véhicules pour les années à venir (source Yole Développement)

Ces applications nécessitent des capteurs à grande dynamique pour s'adapter au fort contraste des scènes, notamment dans le cas de la conduite de nuit[†]. Il y a également de nombreux développements dans l'analyse d'images, pour extraire les informations par segmentation et par catégorisation des images.

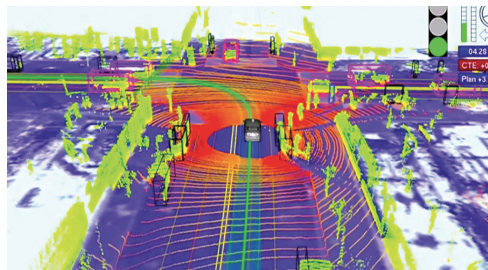


FIGURE 4.7 – Cartographie obtenue avec un système lidar (source Velodyne)

*. Advanced Driver Assistance Systems, c'est à dire les systèmes de sécurité active pour le conducteur

†. Impliquant, par exemple, un fort contraste entre les phares des véhicules croisés et les abords de la route

Mais les développements les plus importants sont actuellement portés par les projets de voitures autonomes. Sur de tels véhicules, l'environnement doit être mesuré et analysé avec précision. Ceci est rendu possible grâce à l'utilisation de plusieurs types de capteurs (voir figure 4.6) et à la fusion des informations. Les radars sont actuellement utilisés pour appréhender l'environnement, mais la technologie qui les remplacera ou les complétera sera le LIDAR (*Light Detection And Ranging*). En effet, il est possible d'atteindre une résolution spatiale plus élevée permettant une meilleure discrimination des objets. À titre d'exemple, une cartographie obtenue avec ce type de capteur est présentée figure 4.7. On sort ici du cadre de l'imagerie conventionnelle : le lidar utilise la mesure du temps de vol aller-retour (*ToF Time of Flight*) d'une impulsion lumineuse pour calculer la distance de la cible. Il s'agit d'un système à illumination active pour lequel l'émetteur et le récepteur sont actuellement en cours de développement.

4.2.3 Applications médicales

L'imagerie est présente depuis longtemps dans le domaine médical, mais de nouveaux usages apparaissent pour les capteurs CMOS. D'une part, les pixels de taille micrométrique autorisent la fabrication de caméras miniatures pour les besoins de contrôle et d'opération le moins invasif possible tels que la microchirurgie ou l'endoscopie (voir figure 4.8). Ici les besoins sont assez proches

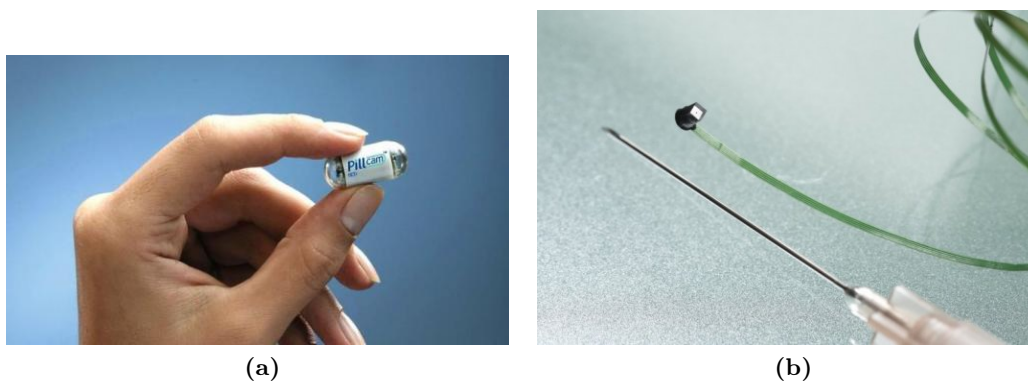


FIGURE 4.8 – Exemple de capteurs miniatures pour les applications médicales : (a) capsule PilCam pour l'imagerie gastrique, (b) caméra miniature Awaiba pour la chirurgie micro-invasive

de ceux du marché des smartphones : encombrement réduit, donc des pixels de petite taille, et une qualité d'image la plus élevée possible dans des conditions de faible éclairage. A ceci s'ajoute le développement de capteurs multispectraux, voire hyperspectraux, permettant de mieux identifier les tissus et les lésions. C'est un domaine pour lequel il est nécessaire d'avoir une forte interaction avec le traitement des images, celui-ci étant spécifique aux besoins médicaux. Toujours dans le domaine visible et proche infrarouge, l'imagerie polarimétrique est de plus en plus utilisée pour la détection de tumeurs au niveau des tissus.

Enfin, l'imagerie X bénéficie également des performances des capteurs CMOS, principalement pour des capteurs de petite surface, comme dans le cas de l'imagerie dentaire intra-oral, mais aussi pour de grandes surfaces avec des capteurs $20 \times 20\text{cm}$ tels que ceux développés par Canon (voir figure 4.9). L'utilisation de capteurs CMOS, à la place de matrices à base de transistors TFT en silicium amorphe ou polycristallin*, améliore la détectivité et permet donc de réduire les doses de radiations.

*. matrices semblables à celles utilisées pour les écrans.



FIGURE 4.9 – Capteur 120Mpix de $20 \times 20\text{cm}^2$ développé par Canon, comparé à un appareil reflex

4.3 Développements actuels et futurs

Je travaille actuellement sur plusieurs sujets en lien avec les demandes du marché identifiées précédemment. L'objectif n'est pas de couvrir toutes les attentes, mais de cibler celles qui présentent un fort potentiel de transfert technologique vers les industriels fabriquant ou concevant des capteurs d'images : principalement les acteurs français et européens du domaine. Les thématiques sont donc à présent : l'imagerie 3D (§ 4.3.1), l'imagerie couleur, dans les conditions de faible éclairage (§ 4.3.2) et l'imagerie en proche infrarouge, dans le domaine de détection du silicium et au-delà (§ 4.3.3).

4.3.1 Imagerie 3D

Au sens large, l'imagerie 3D couvre beaucoup de domaines [50]. Dans notre contexte, il s'agit plus précisément d'imagerie 2D+Z : c'est à dire la capacité de fournir une carte de profondeur d'une scène visée en plus, ou en complément, de l'image classique de cette même scène. Cette information supplémentaire est intéressante pour les applications dites « grand public » ou les applications automobiles. Les techniques disponibles pour l'acquisition de cartes de profondeur peuvent être séparées en deux catégories :

1. l'imagerie active : dans cette catégorie, on ajoute de l'information à la scène visée, typiquement en éclairant la scène, de préférence avec une illumination non visible par l'utilisateur. Les principales méthodes sont soit basées sur la lumière structurée (projection d'un motif lumineux, ceci incluant les techniques de balayage), soit sur la mesure du temps d'aller-retour de la lumière entre la source et le capteur (*ToF* : *Time of Flight*).
2. l'imagerie passive : au contraire des méthodes précédentes, le système utilise uniquement l'information disponible dans la scène, sans éclairage supplémentaire. On retrouve ici les techniques de stéréovision et plus généralement d'enregistrement du champ de lumière (*Light Field Imaging*) : par exemple avec des systèmes à codage de pupille ou plénoptique.

4.3.1.1 Imagerie active

L'imagerie active de profondeur présente un certain nombre d'avantages, notamment une robustesse et une fiabilité liées au fait que l'on projette de l'information sur la scène. Pour la même raison, ce sont également des dispositifs bien adaptés aux systèmes ayant besoin d'un temps de réponse court. On retrouve ceux-ci dans les interfaces homme-machine, dans le domaine du grand public avec des dispositifs tels que la Kinect de Microsoft, mais aussi pour les applications automobiles avec des systèmes LIDAR. Il est intéressant de remarquer que les solutions à base de temps de vol sont de plus en plus répandues au détriment des solutions à base de lumière structurée. Cette dernière est moins robuste vis à vis de l'orientation des objets et de leur coefficient de réflexion.

Au sein des méthodes de temps de vol (ToF *Time of Flight*) [51], on peut distinguer :

- les mesures directes : elles consistent à émettre une impulsion lumineuse de courte durée (typiquement quelques picosecondes) permettant de mesurer directement le temps d’aller-retour de la lumière. Pour effectuer cette mesure, il faut disposer de pixels capables de dater l’arrivée des photons réfléchis. L’un des dispositifs les mieux adaptés est le pixel à base de SPAD (*Single Photon Avalanche Diode*), qui sera détaillé ci-dessous.
- les mesures indirectes : elles consistent à émettre un signal périodique (sinusoïdal ou carré) et à mesurer le déphasage entre le signal émis et son écho. Il faut donc disposer d’un système de démodulation de la lumière au sein du pixel. Plusieurs solutions existent pour cela [52–55], dont une développée au sein du laboratoire. Dans ce cas, la photodiode ne représente qu’une partie limitée de la surface du pixel. Il est donc nécessaire de définir l’optique de collimation adaptée. Ceci fait l’objet d’une étude dans le cadre du contrat bilatéral avec STMicroelectronics pour l’année 2017.

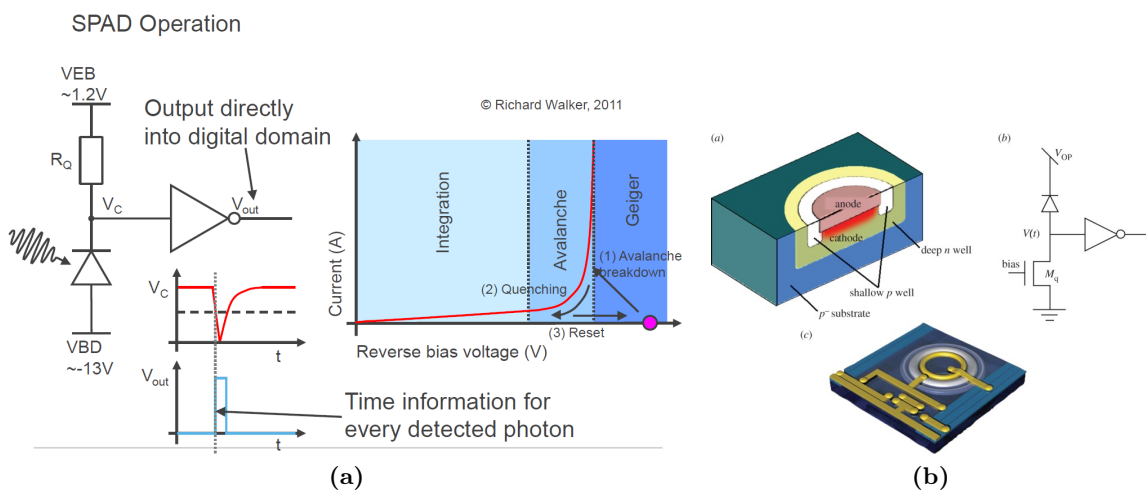


FIGURE 4.10 – (a) Principe de fonctionnement d’un pixel SPAD, source R. Walker, (b) structure et layout d’un SPAD [56]

Les capteurs à base de SPAD sont actuellement en plein développement [57–61]. Comme pour les pixels CMOS, leur invention date des années 1960 [62]. Ces pixels sont constitués d’une photodiode polarisée en inverse au delà de son seuil d’avalanche : $V_{BD} + V_{EB}$, avec V_{BD} tension d’avalanche (*BreakDown*) et V_{EB} la tension supplémentaire (*Excess Bias*), voir figure 4.10a. Lorsqu’un électron traverse la jonction de la diode, par phénomène d’avalanche, un fort courant est généré. Ce courant induit une chute de tension aux bornes de la photodiode. Si elle est reliée à un inverseur, on obtient en sortie un signal digital dont le passage d’un niveau bas vers un niveau haut pourra être daté avec précision. L’intégration du circuit de datation de type TDC (*Time to Digital Converter*) dans le pixel occupe une surface importante comme on peut le constater sur l’image du circuit réalisé dans le cadre du projet européen MegaFrame (voir insert en haut à droite de la figure 4.11). La surface disponible pour la zone photosensible ne représente alors que quelques pourcents de la surface totale du pixel (1% dans le cas des pixels du circuit MegaFrame). Il est donc particulièrement important de concentrer la lumière sur la photodiode. Classiquement, on utilise pour cela des microlentilles (voir insert en bas à gauche de la figure 4.11). La taille des pixels étant généralement grande ($50\mu m$ dans le circuit présenté), ces microlentilles ne sont pas fabriquées sur le wafer de silicium : il s’agit d’un réseau de microlentilles externes rapporté sur la puce [64, 65]. De tels capteurs peuvent être utilisés pour des applications de type ToF avec des longueurs d’ondes d’éclairage dans le proche infrarouge ($850 - 950nm$), mais aussi de type FLIM (*Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy*) [66–68] avec des longueurs d’ondes d’éclairage dans le visible (typiquement $400nm - 500nm$). D’où l’intérêt

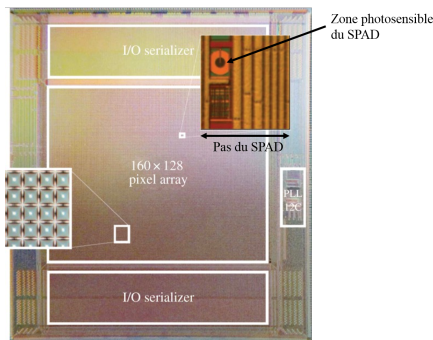


FIGURE 4.11 – Circuit réalisé dans le cadre du programme européen MegaFrame [63]

d'utiliser des microlentilles réfractives classiques.

Les développements en cours au laboratoire, dans le cadre de projets nationaux (bilatéraux) et européens (ENIAC), visent à améliorer les performances des SPAD pour des applications pour lesquelles les distances à mesurer sont typiquement comprises entre 10cm et 10m. Dans ce cas, le laser d'illumination émet à 940nm. À cette longueur d'onde, la transmission de l'atmosphère est minimale (voir figure 4.12) : l'éclairement ambiant lié au soleil est atténué, alors que le signal émis est peu absorbé, car utilisé sur des distances de l'ordre de quelques mètres. Comme le système utilise

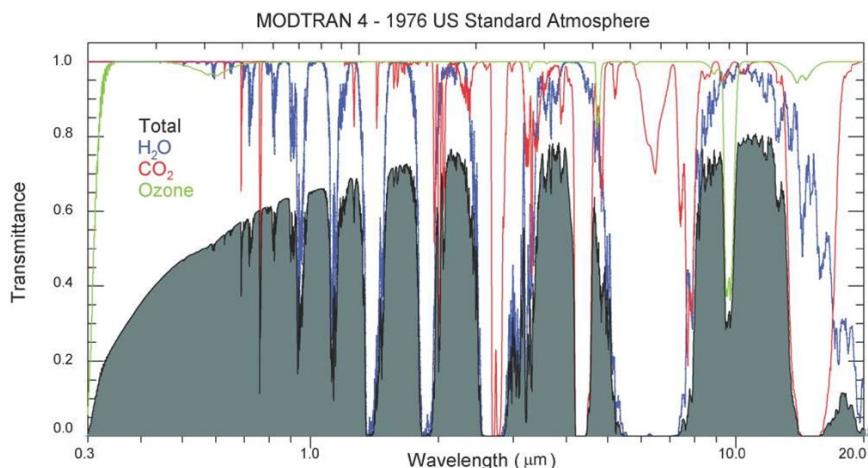


FIGURE 4.12 – Modèle de transmission de l'atmosphère terrestre, à noter la forte raie d'absorption de l'eau à 940nm.

un laser, il est intéressant de considérer des optiques adaptées à des illuminations monochromatiques. Aussi, nous développons actuellement une solution de microlentille binaire diffractive [69], réalisée directement sur le wafer du circuit, éliminant la problématique de report et d'alignement du réseau de microlentilles *a posteriori*. La taille des pixels ($16\mu m$ ici) étant plus grande que l'épaisseur de l'empilement diélectrique (environ $6\mu m$), nous avons développé un dépôt épais d'oxyde sur le silicium servant de piédestal à la structure diffractive, placée alors à une distance d'environ $16\mu m$ de la photodiode. Il faut ensuite réaliser la microlentille sur cet empilement. Afin de faciliter la fabrication, il est intéressant d'utiliser un matériau d'indice le plus élevé possible, car on cherche à créer un déphasage d'une longueur d'onde entre les différentes zones. L'épaisseur utile est alors de $\frac{\lambda}{n-1}$. Nous avons donc retenu le silicium amorphe en tenant compte du fait qu'à 940nm, son indice de réfraction est de $n = 3,82$ et son coefficient d'extinction $k < 0.001$. Ce qui donne une épaisseur à déposer d'environ 330nm, permettant ainsi de réaliser des gravures fines avec des résolutions de 100nm. Ces étapes de dépôt et de gravure ont été validées sur un motif de test (voir figure 4.13).

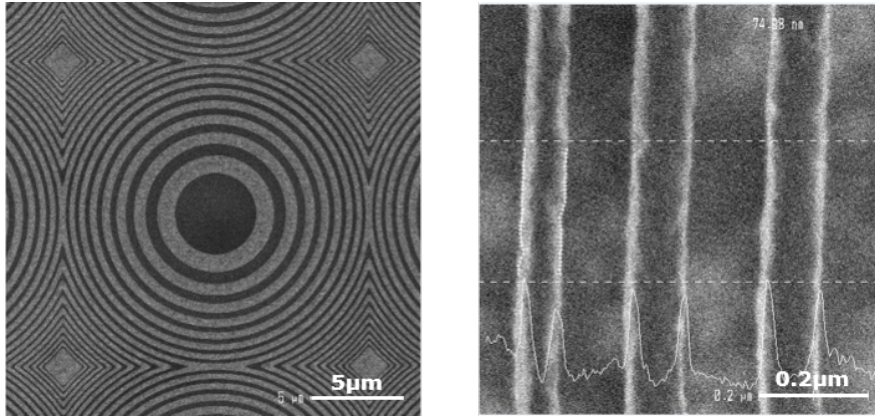


FIGURE 4.13 – Vues MEB des motifs morphologiques gravés dans une couche de silicium amorphe sur un dépôt d'oxyde.

En parallèle de ces développements de procédés de fabrication, différentes formes de microlentilles binaires sont en cours d'évaluation par simulation FDTD (voir § 3.3.2). La particularité des pixels développés est d'être groupés par bloc de 2×2 éléments. Les lentilles doivent donc avoir leurs axes optiques centrés sur les zones de détection et non pas sur le carré définissant un pixel. Le motif unitaire est alors décentré comme montré sur la figure 4.15a.

Tout d'abord, une lentille a été calculée sur la base d'une lentille réfractive hémisphérique, dont on détermine le profil équivalent en lentille de Fresnel, pour générer la courbe d'indice de réfraction effectif correspondant et enfin la binarisation de ce profil [70–72] (voir figure 4.14). Une évaluation

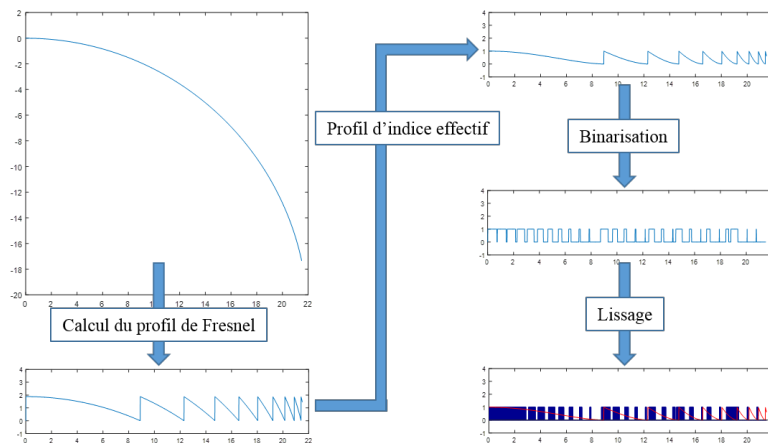


FIGURE 4.14 – Flot de génération de la lentille binaire.

préliminaire de l'efficacité de cette lentille avec le logiciel FDTD-Solution de Lumerical montre un gain obtenu de $g = 3,3$. Sachant que le facteur de remplissage de la photodiode par rapport au pas du pixel est de 9%, cette forme de lentille n'est donc pas optimale, puisque le gain maximal que l'on pourrait attendre est de $g_{max} = 11,1$. Aussi deux autres voies sont étudiées, le calcul de motifs correspondant à des *Fresnel Zone Plate*[73], et l'optimisation par métamodélisation de la forme sur

la base d'anneaux.

Concernant l'optimisation, j'ai collaboré avec un autre laboratoire du DOPT au LETI, qui développe des solutions de métamodélisation particulièrement intéressantes dans le cas de modèles coûteux en temps de calcul. Ce qui est notre cas avec des volumes de simulation importants ($32 \times 32 \times 22 \mu\text{m}^3$), qui peuvent être réduits au quart grâce aux symétries présentes dans la structure de 2×2 SPAD. En utilisant 20 cœurs à 3GHz sur la ferme de calcul, le temps de simulation est d'environ 20min . La paramétrisation du modèle défini précédemment conduit à 24 paramètres (12 anneaux définis par leurs rayons interne et externe). Il nous est alors apparu que l'optimisation

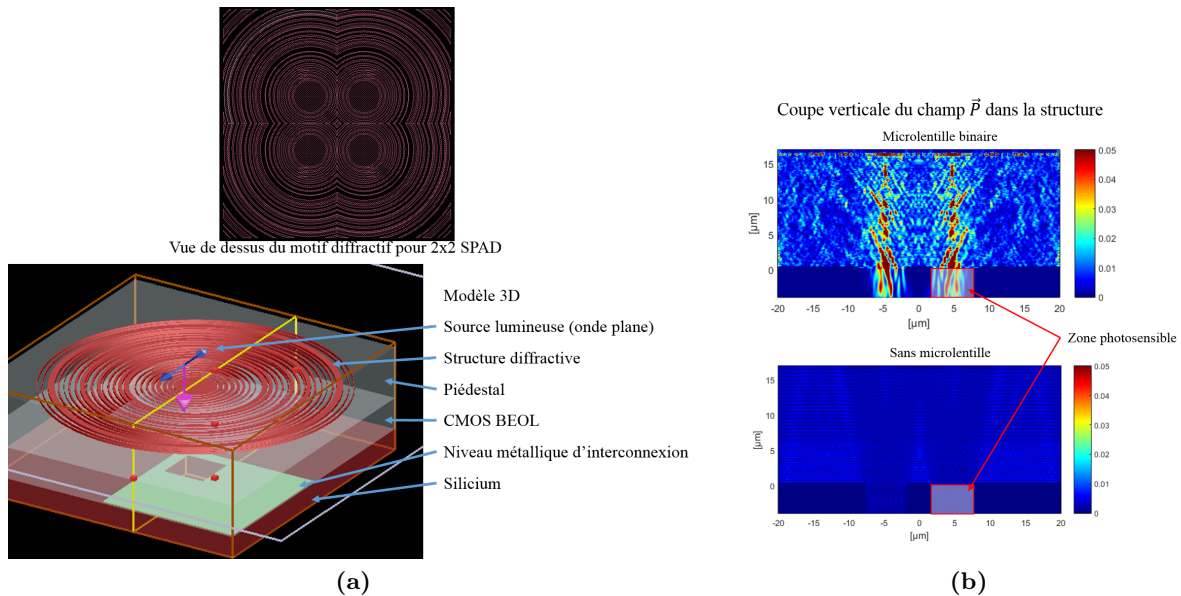


FIGURE 4.15 – (a) Layout d'un groupe de 2×2 lentilles binaires pour les SPAD et modèle 3D simplifié; (b) vue en coupe du champ \vec{P} dans la structure avec micro-lentille binaire (en haut) et sans lentille (en bas).

de ce modèle complexe serait trop longue. Aussi, nous avons cherché à optimiser, en deux dimensions, des configurations présentant moins d'anneaux. Au terme de cette étude, le nombre de cinq a été retenu, car l'ajout d'anneaux supplémentaires n'améliorait pas significativement les résultats aux vues du nombre de paramètres supplémentaires introduits. Sur cette base nous avons utilisé la métamodélisation et la recherche de minimum associée, selon le schéma suivant :

1. échantillonnage de l'espace des paramètres de façon la moins dense, mais la plus homogène possible, basé sur une répartition des points pour former une structure de type hypercube latin,
2. évaluation du modèle pour ces différents points,
3. estimation de métamodèles suivant un *a priori* gaussien. Ceci permet de générer d'une part une hypersurface d'interpolation du modèle entre les points calculés, et d'autre part d'évaluer l'erreur associée à cette interpolation en tout point de l'espace des paramètres (c'est sur l'évaluation de cette erreur que porte l'*a priori* gaussien).
4. recherche du minimum du métamodèle : l'estimation issue de ce métamodèle est affinée par calcul de points supplémentaires, au voisinage du minimum supposé, mais aussi aux endroits où l'erreur d'interpolation est suffisamment importante pour que la présence d'un minimum soit vraisemblable.

La première étape nécessite un nombre de points de l'ordre de $10 \times N_{param}$. Dans notre cas à cinq anneaux, si on laisse également libre l'épaisseur de silicium amorphe, on a $N_{param} = 11$. Il faut

donc effectuer 110 estimations, soit deux jours de calcul. La recherche du minimum ne prend en général que quelques dizaines d'itérations. Le coût total de cette recherche est donc relativement faible par rapport aux autres techniques de recherche de minimum : elle présente l'intérêt d'être globale et de ne pas dépendre du point de départ. De plus, le coût de la recherche est plus faible que pour les techniques du type gradients conjugués qui nécessitent, pour chaque pas, $2 \times N_{param}$ évaluations du modèle afin de calculer le gradient et la courbure au point courant. L'utilisation de la métamodélisation a donc un coût en temps de calcul comparable aux premiers pas de recherche pour les techniques classiques. Par cette méthode, nous avons obtenu un premier design de lentille présentant une performance plus élevée que celle issue de la lentille de Fresnel, avec un facteur de gain de $g = 5.6$ et avec une structure plus simple à réaliser puisque constituée de seulement trois anneaux : bien que le modèle contienne cinq anneaux, la convergence de métamodélisation conduit à une solution où plusieurs anneaux sont fusionnés. Ceci peut s'expliquer par le fait que la simulation en $3D$ contient une symétrie de révolution qui n'est pas présente dans le cas de la simulation $2D$.

Enfin, la solution *FZP*[74, 75], conduit à 33 anneaux, en considérant que la lentille est posée sur l'empilement d'oxyde de silicium. Les rayons r_k des différentes limites entre les zones de Fresnel sont données par :

$$r_k^2 = \frac{k\lambda}{n_{SiO_2}} \left(\frac{k\lambda}{4n_{SiO_2}} + f \right) \quad (4.1)$$

Avec $\lambda = 940nm$ dans notre cas et donc $n_{SiO_2}(940nm) = 1.45$ et f la distance focale. Dans ces conditions, on obtient un gain de $g = 3, 8$. Ceci pourra être optimisé par métamodélisation avec cette fois l'avantage de n'avoir que deux paramètres pour définir le modèle de FZP : l'épaisseur des anneaux en silicium amorphe et la focale de la lentille, tous les autres paramètres étant fixés dans l'étude.

Les différentes optimisations de forme de lentilles binaires vont se poursuivre en 2017 dans le cadre du contrat bilatéral avec STMicroelectronics. Une fois définies, ces lentilles seront implémentées sur un masque et réalisées sur un wafer de test pour validation. Tout d'abord, les formes obtenues après fabrication seront caractérisées physiquement (analyses aux microscopes électronique et à force atomique), puis ces mêmes lentilles seront fabriquées sur un circuit contenant des SPAD afin de caractériser électro-optiquement le gain apporté par ces structures. Une publication est en cours de rédaction sur la conception et la simulation des lentilles. Un autre article est prévu après la caractérisation électro-optique des structures sur circuit.

A plus long terme, l'optimisation de la forme de la lentille par métamodélisation tendra à maximiser les performances à la longueur d'onde d'illumination, tout en réduisant la quantité de lumière arrivant sur la photodiode aux autres longueurs d'onde, pour ainsi limiter l'impact de l'éclairage ambiant.

4.3.1.2 Imagerie passive

En complément des solutions d'imagerie active, la cartographie de profondeur par imagerie passive présente quelques intérêts :

- du fait de l'absence de source, la consommation du système est généralement plus faible,
- il est possible d'intégrer sur le même capteur les pixels réalisant la mesure de profondeur et ceux réalisant une image en couleur. On dispose alors d'un capteur unique délivrant deux informations d'une même scène, depuis le même point de vue,
- les systèmes passifs sont d'autant plus performants que l'éclairage ambiant est important. C'est l'inverse pour les systèmes actifs pour lesquels l'éclairage ambiant est limitant.

Il existe de nombreuses solutions, dont celles basées sur la stéréovision. Pour ma part, j'ai choisi de m'orienter vers la solution plenoptique [76, 77] qui présente l'intérêt de n'utiliser qu'un seul capteur, pour lequel des voies d'optimisation existent. Le principe présenté figure 4.16 consiste à enregistrer

pour chaque pixel de l’image finale, non seulement le flux lumineux comme dans un imageur classique, mais également la distribution angulaire des rayons. Connaissant cette distribution, il est alors possible de reconstruire (par tracé de rayon inverse) le chemin suivi par les rayons lumineux et donc d’obtenir la profondeur dans la scène visée [78]. Afin d’enregistrer la distribution angulaire

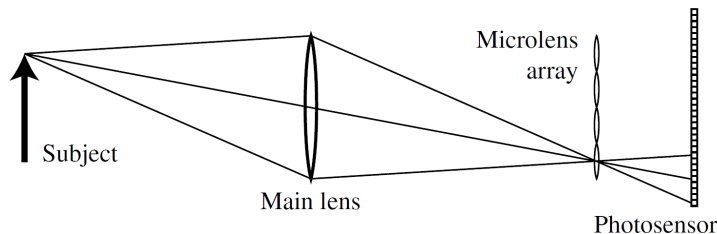


FIGURE 4.16 – Schéma de principe d’une caméra plénoptique [79]

des rayons lumineux, on place devant un capteur d’images un réseau de microlentilles. Chaque microlentille formera un pixel de l’image finale. Au foyer de chaque microlentille, le groupe de pixels (du capteur d’images) enregistrera une partie de la radiance. C’est l’utilisation de l’information fournie par tous les pixels de l’imageur qui permet de reconstruire un cube de données dans l’espace objet. Le nombre de microlentilles définit l’échantillonnage spatial de l’information (donc la définition de l’image finale), tandis que le nombre de pixels sous une microlentille impose l’échantillonnage angulaire de la radiance.

Plusieurs caméras sont actuellement disponibles sur le marché. La première solution a été commercialisée en 2011 par la société Lytro, fondée par Ren Ng à la suite de son doctorat sur le sujet à Stanford [79–81]. Le point mis en avant par Ng est la possibilité de réaliser la mise au point où l’on veut dans l’image en post-traitement. L’architecture proposée est celle décrite dans la figure 4.16. Elle présente l’inconvénient d’un nombre limité de pixels dans l’image finale, d’autant plus réduit que l’on veut obtenir une précision élevée sur la distribution des rayons. Cette caméra fournit donc des images au format 328×328 pixels, alors que le capteur utilisé contient $11M$ pixels puisqu’il utilise des blocs de 10×10 pixels par microlentille. Afin d’améliorer la résolution de l’image finale, on peut soit utiliser des capteurs avec plus de pixels (ce qui a été fait pour la deuxième version de la caméra Lytro), soit redéfinir le compromis entre échantillonnage spatial et échantillonnage angulaire. C’est notamment ce qui a été proposé avec les travaux de Todor Georgiev [82–85]. Le capteur d’images n’est plus positionné au foyer des microlentilles (voir figure 4.17). Dans ce cas, le plan image dans lequel se fait l’échantillonnage spatial est un plan en amont du réseau de microlentilles. Ceci permet notamment de choisir au moment du post-traitement le compromis entre les résolutions spatiale et angulaire. La société Raytrix propose, également depuis 2011, des caméras sur ce principe.

Toutefois, ces différentes implémentations de caméra plénoptique présentent l’inconvénient d’utiliser un réseau de microlentilles rapporté lors de l’assemblage de la caméra et un capteur d’images standard. Le premier point conduit à des erreurs d’alignement entre les deux composants, nécessitant des étapes de calibration de chaque caméra : recherche des centres optiques de chaque microlentille, estimation des décalages et de l’orientation du réseau de microlentilles par rapport à la matrice de pixels, ré-échantillonnage des données sur une grille rectilinéaire correspondant aux pixels de l’image finale [86]. L’utilisation d’un capteur couleur, classiquement pourvu d’un motif de Bayer, conduit à des artefacts lors de la reconstruction de la couleur si l’interpolation du motif Bayer est réalisée en amont du traitement plénoptique. Ceci peut être résolu [87] en réalisant l’étape d’interpolation après le traitement plénoptique, mais au prix d’une complexité plus élevée dans le cas des caméras commerciales, du fait de l’imperfection de l’alignement mentionné précédemment. Il est donc particulièrement intéressant de développer un capteur dédié pour les caméras plénoptiques, en réa-

Lumsdaine&Georgiev, 2008

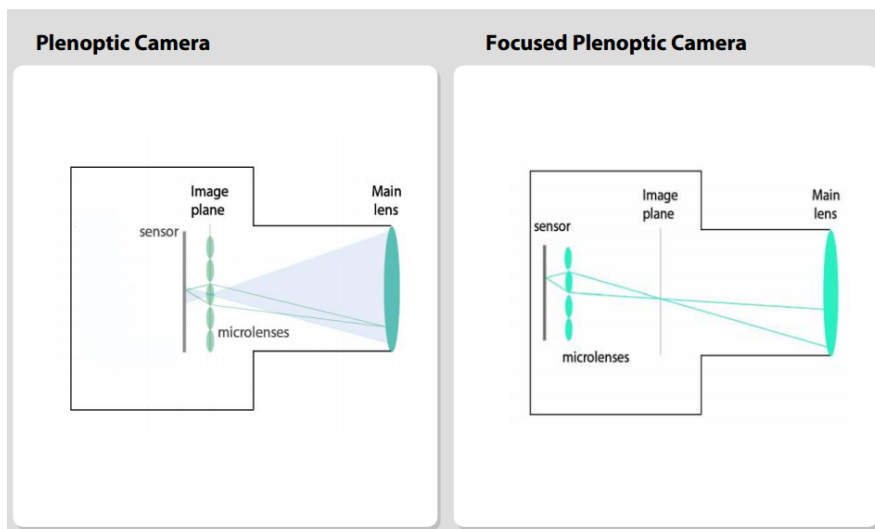


FIGURE 4.17 – Schéma de principe d'une caméra plénoptique version 2.0 [84]

lisant directement le réseau de microlentilles sur le capteur à l'échelle d'un wafer, tout en profitant des très bonnes performances d'alignement des procédés de microélectronique, et en optimisant le positionnement des filtres colorés. J'ai donc proposé un sujet de thèse qui a démarré fin 2014 en collaboration avec Frédéric Devernay de l'INRIA, spécialiste de la reconstruction de champs de lumière. Les objectifs initiaux étaient d'analyser la précision en profondeur en fonction des paramètres de la caméra et l'impact des bruits du capteur d'images sur cette même précision. Toutefois, le candidat n'a pas réussi à appréhender le sujet et aucun résultat n'a été obtenu au bout d'un an. Aussi nous avons décidé d'un commun accord d'arrêter la thèse fin 2015 *. La thématique étant toujours d'actualité, nous avons décidé de proposer à nouveau, pour la période 2017-2020, une thèse financée par le CEA-LETI dont le sujet a été redéfini. Il s'agit dans un premier temps d'analyser l'impact du bruit du capteur sur les performances de la caméra plénoptique, principalement sur l'erreur de distance induite, pour dimensionner la taille du pixel [78, 88]. Ensuite, l'objectif est de concevoir un groupe de pixels et une optique basée sur des microlentilles, réalisant la fonction de sous caméra du système plénoptique. Bien évidemment, ce travail s'appuiera sur des simulations optiques [89], mais également électriques au niveau du pixel. Il faudra aboutir à mi-thèse à un design de matrice de pixels spécifiquement adapté à la plénoptique. Ce design sera implémenté dans un démonstrateur qui sera alors testé et caractérisé, pour valider la conception et les simulations.

En parallèle de ce sujet sur la plénoptique, j'avais choisi d'étudier les pixels sensibles à l'angle, en utilisant des propriétés de l'effet Talbot [90, 91]. Le financement d'une thèse sur le sujet pour la période 2016-2019 a été obtenu. Malheureusement aucun candidat répondant aux critères de sélection n'a été trouvé. L'objectif de la thèse était de développer une architecture de pixel sensible à l'angle, permettant la capture et la restitution d'images en couleur. Le point de départ était l'utilisation de l'effet Talbot, en se concentrant sur l'impact du chromatisme et l'utilisation de celui-ci pour détecter la couleur. Après une analyse des performances actuelles des dispositifs publiés, il s'agissait de simuler (simulations électromagnétiques) des structures implémentées dans un pixel CMOS favorisant le chromatisme et permettant une bonne sélectivité en angle. L'implémentation, dans un démonstrateur, d'une solution retenue en amont par simulation aurait pu permettre la caractérisation électro-optique du dispositif et la mesure des performances clés : sensibilité à la lumière,

*. Le doctorant a trouvé un emploi de concepteur optique dans une société de service dans les mois qui ont suivi l'arrêt de la thèse

sélectivité angulaire et spectrale. Pendant le temps de fabrication du démonstrateur, le doctorant se serait penché sur les aspects de reconstruction d'image, à partir de l'information fréquentielle délivrée par le capteur, notamment, les aspects de colorimétrie, de résolution et de qualité d'image en fonction du niveau d'éclairement.

Ce sujet n'ayant pu être traité dans le cadre d'une thèse, il reste néanmoins très intéressant, car de tels pixels peuvent être utilisés avantageusement dans un capteur plénoptique [92]. J'y travaille donc actuellement avec une technicienne du laboratoire. Nous avons pu analyser la solution basée sur l'effet Talbot. Elle présente des limitations, notamment lorsque l'on cherche à l'intégrer dans un procédé de fabrication de capteur d'images, car la sélectivité en angle est réduite. Nous poursuivrons dorénavant l'étude sur des structures de pixels et des fonctions optiques plus standards, à base de microlentilles.

4.3.2 Imagerie en couleur sous faible éclaircissement

La restitution d'images en couleur sous faible éclaircissement est toujours un sujet d'actualité, pour les capteurs à destination du grand public, mais aussi pour des applications plus industrielles ou de vidéo surveillance. Dans les deux cas, le flux de photons arrivant sur un pixel est faible, car la scène visée est peu éclairée ou car le pixel est petit. Dans le cadre des petits pixels, il est intéressant de

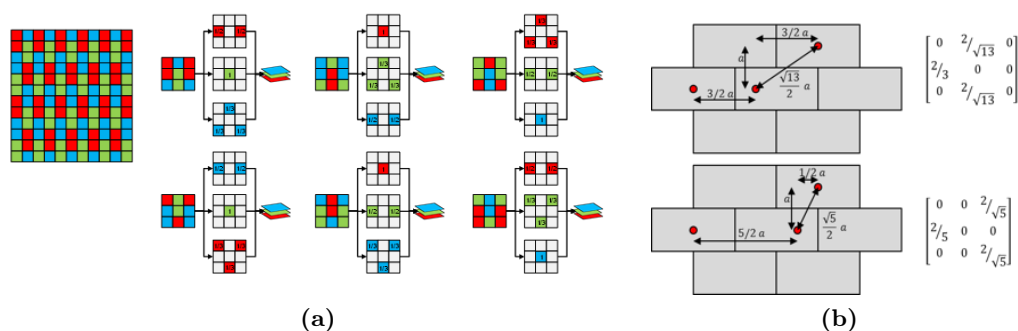


FIGURE 4.18 – (a) Exemple de motifs couleur rectangulaires et le mode d'interpolation à fort niveau de signal; (b) mode d'interpolation proposé à faible niveau de signal

considérer la résolution finale de l'image. Aussi, en partenariat avec STMicroelectronics, j'ai étudié à mon arrivée dans le laboratoire, l'utilisation de motifs de filtres colorés couvrant deux pixels et arrangés en quinconce (voir figure 4.18). L'idée était alors d'avoir deux modes de fonctionnement, l'un à fort niveau de signal, pour lequel on reconstruit l'image en utilisant l'ensemble de pixels, et un autre mode à bas niveau de signal, pour lequel on somme les charges issues de deux pixels adjacents et de même couleur avant leur lecture.

L'étude a montré que, dans ce dernier cas, on dégrade évidemment la résolution spatiale, mais on améliore légèrement le rapport signal sur bruit. Toutefois, le gain était trop faible pour que cette solution ait un intérêt pour les capteurs, même sur des pixels de $1,1\mu m$ ou $0,9\mu m$ (voir figure 4.19).

Une autre approche consiste à considérer des pixels panchromatiques [93, 94], c'est-à-dire sans filtre coloré en complément des trois couleurs du motif Bayer. Ceux-ci sont plus sensibles, car captant la lumière sur l'ensemble du spectre visible, donc ils sont moins bruités. Ceci complète l'information chromatique, fournie par les pixels colorés, en utilisant des stratégies d'interpolation dédiées [95]. Toutefois, ce genre de capteur n'utilise que le spectre visible, car le rendu coloré impose l'utilisation d'un filtre infrarouge (voir figure 3.6). Dans le cas où le critère de fidélité des couleurs peut être relâché, on envisage de supprimer le filtre infrarouge. Ainsi les pixels non filtrés, sensibles à l'ensemble du spectre détecté par le silicium, délivrent un signal significativement plus élevé donc moins bruité.

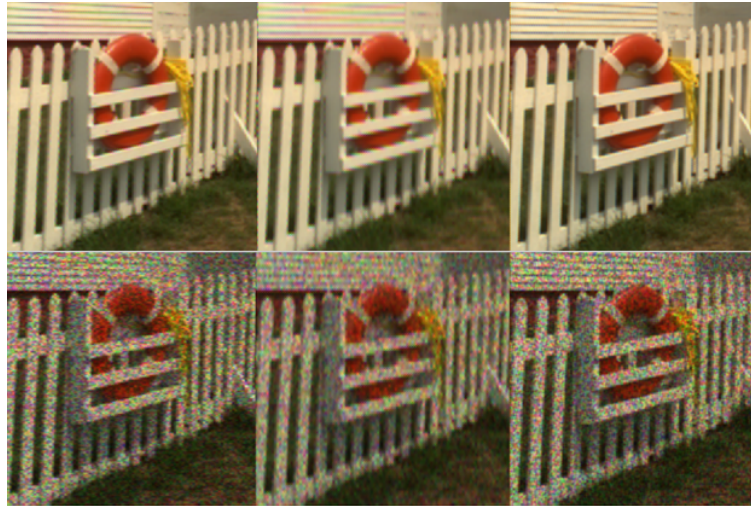


FIGURE 4.19 – Images simulées : ligne supérieure dans le cas de fort signal, ligne inférieure dans le cas de faible signal. Respectivement de gauche à droite : motif en quinconce et interpolation donnée figure 4.18a, motif en quinconce et interpolation donnée figure 4.18b et pour un motif Bayer avec une interpolation bilinéaire.

En contrepartie, le signal des pixels colorés est erroné à cause de la composante infra-rouge [96]. Nous avons commencé à étudier le sujet dans le cadre d'un partenariat avec E2V sur la base d'un de leur capteur, comprenant majoritairement des pixels sans filtre et un motif Bayer disséminé (voir figure 4.20). J'ai choisi d'approfondir le sujet, tout d'abord avec un stage au sein de notre

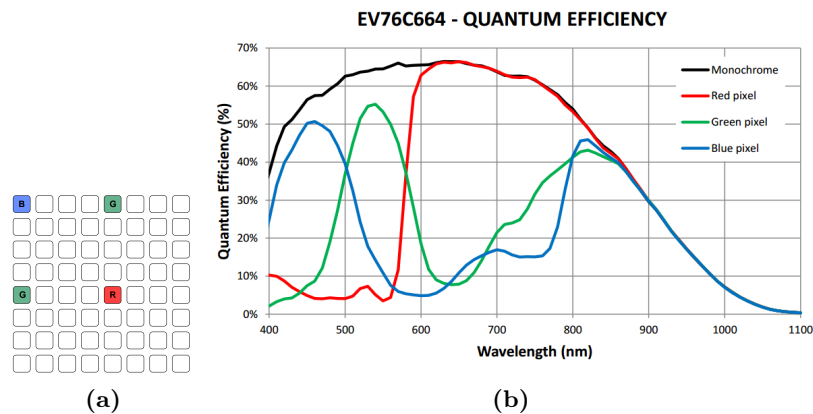


FIGURE 4.20 – (a) Disposition des filtres colorés sur le capteur *Onyx Sparse*, (b) rendement quantique des différents pixels. Source E2V, EV76C664 Datasheet

laboratoire, pouvant potentiellement se poursuivre dans le cadre d'une thèse CIFRE avec E2V. L'objectif de ce stage est de constituer une base d'images hyperspectrales. Celles-ci permettent de simuler le signal délivré par le capteur, suivant une méthodologie proche de celle développée au cours de la thèse de Clémence MORNET (§ 3.4). Il existe quelques images hyperspectrales sur la gamme visible et proche infrarouge, mais leur nombre est assez limité. Sur la base de ces images, le futur doctorant recherchera des gabarits de filtres optimaux pour atteindre les objectifs de fidélité de couleur et de rapport signal sur bruit. Cette étape inclut le développement des algorithmes de correction colorimétrique. Il faudra prendre en compte la faisabilité des filtres, en utilisant soit des résines colorées disponibles, soit des filtres interférentiels du type métal-diélectrique développés au

laboratoire [97, 98]. Dans un deuxième temps, la disposition des filtres sur le capteur sera étudiée pour définir le motif le plus adapté à l'application de vision à faible niveau de lumière. Il s'agit ici de trouver le bon compromis en termes de résolution spatiale et de développer les algorithmes de fusion des images panchromatiques et en couleur. Les solutions identifiées seront finalement implémentées sur des circuits existants, afin de valider les résultats.

4.3.3 Imagerie proche infrarouge

Les deux sujets précédents, imagerie 3D et imagerie à bas niveau de lumière, font appel au proche infrarouge pour améliorer la photodétection. Toutefois, l'utilisation du silicium comme matériau photodétecteur ne permet pas d'utiliser des longueurs d'onde supérieures à $1050nm$. Aussi plusieurs travaux sont en cours pour hybrider d'autres matériaux sur ces capteurs CMOS. Une option consiste à utiliser des semiconducteurs du type III-V (InGaAs) ou VI-II (HgCdTe). Plusieurs difficultés existent : ces matériaux sont relativement coûteux à produire et les tailles de wafers disponibles sont très petites (typiquement $50mm$) par rapport aux standards de la microélectronique sur silicium ($200mm$ à $300mm$). De plus, leur assemblage sur un circuit de lecture, réalisé sur wafer de silicium en technologie CMOS, est complexe. Une autre option est donc de chercher des semiconducteurs qui puissent être déposés aisément sur un wafer CMOS. Les matériaux organiques présentent cet intérêt et sont d'ailleurs étudiés, même pour la photodétection dans le visible, par Samsung ou par la collaboration entre FujiFilm et Panasonic [99–105].

L'une des principales difficultés est d'étendre la sensibilité dans l'infrarouge au delà de la limite du silicium. Pour cela, plusieurs approches ont été menées : il est possible d'utiliser des nanoparticules (*quantum dots*) de PbS ou de CdSe, insérées dans un semiconducteur de type polymère [106]. On crée alors un pic de résonance dans le spectre correspondant au diamètre de ces derniers : l'une des difficultés de ce procédé réside dans l'utilisation de ligands pour augmenter la solubilité et donc limiter l'agglomération des *quantum dots*, ce qui peut créer une barrière à l'extraction des électrons générés dans les nanoparticules. Une autre limitation est l'utilisation de plomb [107] ou de cadmium. Une autre approche, toujours avec des semiconducteurs à base de polymères, consiste à synthétiser des matériaux dont le gap est réduit [42, 43]. On est alors confronté à un courant d'obscurité qui augmente lorsque le gap diminue. Ceci s'accompagne d'une moindre stabilité des matériaux à l'oxygène et à l'eau : les phénomènes de vieillissement sont souvent un point limitant des semiconducteurs organiques [108], qui nécessitent donc l'utilisation d'encapsulation formant une barrière efficace. Dans le cadre d'un projet Carnot LETI, en collaboration avec l'INAC* et l'IOGS†, nous avons exploré l'utilisation d'un oxyde métallique (MoO_3) associé à une molécule organique [109–111]. La co-évaporation de ces matériaux sur un wafer forme une couche semiconductrice présentant un complexe à transfert de charge [109–116]. Nous avons pu démontrer la signature d'une photodétection de quelques pourcents à $1,3\mu m$ (voir figure 4.21). Toutefois, nous n'avons pas obtenu un dispositif satisfaisant, car le courant de fuite en inverse de la photodiode reste beaucoup trop élevé. L'origine de cette fuite est clairement identifiée, grâce aux travaux de simulation réalisés par Raphaël Clerc [117] à l'IOGS : il s'agit d'un mauvais alignement des travaux de sortie des électrodes avec les niveaux de valence et de conduction du semiconducteur. Une recherche plus approfondie serait à poursuivre, incluant une étude portant sur la molécule organique associée au MoO_3 , sur le choix des matériaux pour les électrodes et des paramètres du procédé de fabrication de la couche. Dans les années futures, je souhaite poursuivre sur ce sujet qui est un point clef, pour étendre le domaine de photodétection des circuits CMOS.

Pour être exhaustif, une autre difficulté dans l'utilisation d'un semiconducteur rapporté sur le circuit CMOS, organique ou non, est que la structure de pixel $4T$ n'est pas réalisable dans d'autres

*. Institut Nanosciences et Cryogénie

†. Institut d'Optique Graduate School

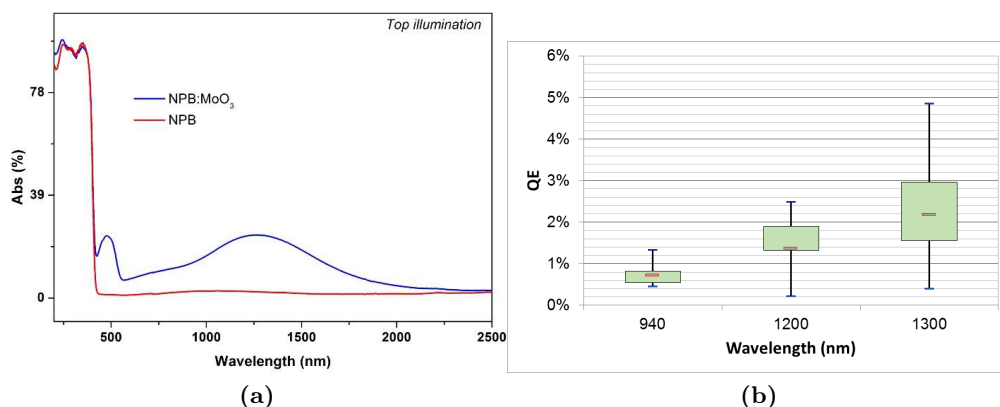


FIGURE 4.21 – (a) Absorption de la couche déposée (b) rendements quantiques mesurés sur les dispositifs réalisés dans le cadre du projet FIPO à différentes longueurs d’onde.

semiconducteurs que le silicium*. Toutes les solutions proposées sont donc basées sur une architecture de pixel à trois transistors, présentant du bruit de reset (voir § 3.1.2.2). Deux stratégies sont alors envisagées :

- Utiliser une mémoire de trame stockant, pour chaque pixel, la valeur numérique du niveau de reset en début d’intégration. À la fin de l’intégration, le niveau de signal est lu, numérisé et on lui soustrait numériquement le niveau stocké dans la mémoire. Cette solution présente deux inconvénients majeurs : il est nécessaire de lire et de numériser la valeur du pixel deux fois par image, on doit donc utiliser un convertisseur analogique-numérique plus rapide, et la mémoire de trame occupe une surface significative de silicium avec un coût associé plus élevé.
- Insérer une boucle de contre réaction entre la tension lue au niveau de la colonne et la tension appliquée sur la source du transistor de reset [89, 118–120], voir figure 4.22.

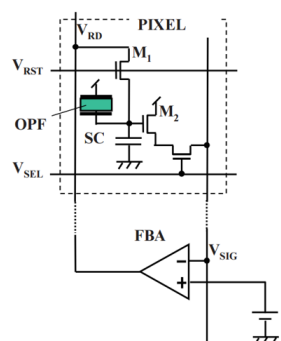


Fig. 2 Schematic of noise canceller.

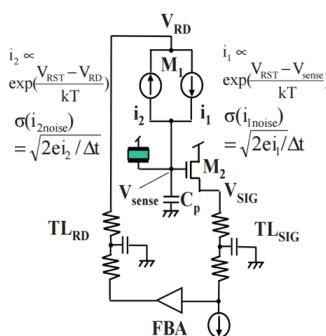


Fig. 3 Equivalent circuit of noise canceller.

FIGURE 4.22 – Schéma de principe de la contre-réaction permettant de limiter le bruit de reset [120]

4.3.4 Interférométrie d’intensité

Pour stimuler le développement des capteurs, il est intéressant de collaborer sur des thématiques scientifiques avec des programmes exigeants en termes de performances d’imagerie. Dans cette perspective, Etienne Le Coarer et moi-même avons soumis un projet au Labex FOCUS, sur l’utilisation de matrice de SPAD pour l’interférométrie d’intensité. La faisabilité de cette technique a été démontrée initialement pour la mesure de diamètre d’étoiles dès 1956 [121] et l’intérêt a été ré-évalué

*. La structure 4T nécessite l’utilisation d’une photodiode *pinned* et d’un étage de transfert de charge

récemment notamment en prenant en compte les nouveaux modes de détection à comptage de photons [122]. L'interférométrie d'intensité se base sur la mesure de la fonction de corrélation temporelle du deuxième ordre $G^2(\tau)$, ce qui permet notamment de sonder la nature de l'émetteur de photon. Hanbury Brown & Twiss ont montré que dans le cas d'un corps noir, $G^2(\tau \rightarrow 0) = 2$, alors que dans le cas d'un laser $G^2(\tau \rightarrow 0) = 1$ et que dans le cas de photons issus d'une fluorescence anti-corrélée $G^2(\tau \rightarrow 0) = 0$ (voir figure 4.23). Sur la base du dernier workshop dédié à l'interférométrie Hanbury Brown & Twiss (*Workshop on Hanbury Brown & Twiss Interferometry : Prospects for astrophysics and quantum optics, 2014*), on compte actuellement quelques expériences dédiées dans le monde [123–125], mais aucune en France. Les diodes à avalanche (APD) unitaires en HgCdTe, développées dans le cadre du Labex FOCUS, sont de bonnes candidates pour l'aspect photodétection, toutefois il est intéressant de se pencher sur l'intégration de SPAD en matrice, notamment pour contourner le temps mort lié à la recharge après la détection d'un photon.

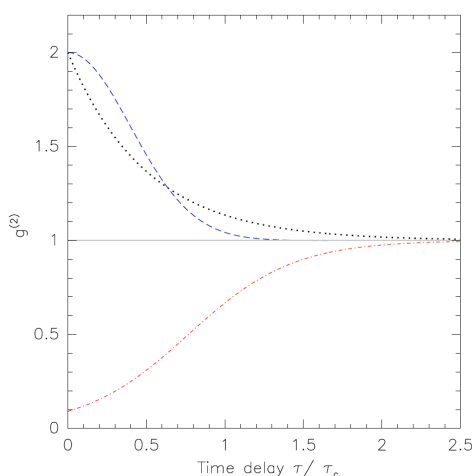


FIGURE 4.23 – $G^2(\tau)$ pour des sources de type corps noir (courbes bleue et noire), laser (gris) et anti-corrélée (rouge) [122]

Le projet s'appuyait sur la mise en place d'une expérience de validation sur le télescope de 193cm de l'Observatoire de Haute Provence. Pour cela, nous avons proposé l'implication d'étudiants de Master 2 « Astrophysics, Plasmas and Planets » au travers d'un TP et d'un cours introductif à la statistique de $G^2(\tau)$. Les travaux pratiques s'effectuent en deux phases, la première en laboratoire avec la mesure de sources thermique (lampe à arc) et non thermique (laser), la deuxième sur le ciel à l'OHP. Pour notre expérience, la mesure de $G^2(\tau)$ revient à faire la statistique du nombre de photons doubles simultanément détectés dans une fenêtre temporelle $\Delta E \times \Delta t \simeq \hbar$: il faut pouvoir détecter deux photons dans une fenêtre de 100ps, derrière un filtre spectral de 13pm à 600nm.

Malheureusement, ce projet n'a pas été retenu lors de l'appel à projets FOCUS de 2015. Nous sommes actuellement en cours de réflexion pour continuer à pousser ce sujet original en redéfinissant son périmètre pour rendre plus clair le partitionnement entre la partie pédagogique, les besoins de développement technologique* et l'apport astrophysique : suivant les résultats obtenus, cette démonstration permettrait de proposer un instrument comme QuantEye [126, 127] pour l'actuel E-ELT (*European Extremely Large Telescope*) qui avait été écarté à cause du changement de diamètre de 100m à 40m. Des projets d'interférométrie de type Hanbury Brown & Twiss par couplage de télescopes [128], ou l'observation de sources non thermiques pourraient également voir le jour.

*. Notamment en tenant compte des progrès en cours sur l'augmentation de sensibilité des dispositifs SPAD, grâce aux structures optiques en développement au laboratoire

4.3.5 Conclusion

Les trois thématiques présentées précédemment (imagerie 3D, imagerie à bas niveau de lumière et imagerie proche infrarouge) offrent beaucoup de perspectives au niveau du développement des pixels et des optiques associés. C'est le cœur de métier du laboratoire et il permet de répondre aux attentes des fabricants de circuits, avec lesquels nous collaborons. Rappelons que la mission du CEA-LETI est la recherche technologique et le transfert, vers les industriels, de solutions innovantes à un degré de maturité permettant une mise en production rapide. Cette démarche ne peut se développer qu'en ayant une activité de recherche en amont sur les différents sujets. Dans une perspective à moyen et à long terme, je souhaite développer l'interaction entre le développement de capteurs et le traitement d'images. Cette compétence est actuellement relativement restreinte dans le laboratoire. Il faudra donc la développer en interne et en externe, via des collaborations avec d'autres laboratoires plus spécialisés dans le domaine. Ceci passe, par exemple, par la participation au groupement de recherche GDR ISIS, qui regroupe justement les différents domaines de l'électronique à la vision.

De manière plus générale, je souhaite aller vers une meilleure prise en compte du pixel en tant que degré de liberté dans une approche de co-design intégrant l'optique, des pixels spécifiques et le traitement de l'information car il n'y a pas, à ma connaissance, de développements significatifs en co-design intégrant ces trois niveaux.

Enfin, pour mener à bien ces développements, il me semble particulièrement important de toujours associer et confronter simulations et caractérisations fines. En effet, les premières permettent une analyse des phénomènes physiques impliqués dans la photodétection et les secondes sont indispensables pour valider les hypothèses formulées et modéliser le système. C'est par un aller-retour régulier entre ces deux moyens d'analyse que des solutions nouvelles pourront être identifiées.

Bibliographie

- [1] R. S. AIKENS et al. « Solid-State Imagers for Microscopy ». In : *Methods in Cell Biology* 29 (1989), p. 291–313. ISSN : 0091-679X. pmid : 2643764.
- [2] E. R. FOSSUM et D. B. HONDONGWA. « A Review of the Pinned Photodiode for CCD and CMOS Image Sensors ». In : *IEEE Journal of the Electron Devices Society* 2.3 (mai 2014), p. 33–43. ISSN : 2168-6734. DOI : 10.1109/JEDS.2014.2306412.
- [3] T. STEINICH et V. BLAHNIK. « Optical Design of Camera Optics for Mobile Phones ». In : *Advanced Optical Technologies* 1 (1-2 2012), p. 51–58. ISSN : 2192-8584. DOI : 10.1515/aot-2012-0002.
- [4] « Optical Imaging Lens Assembly ». US2012194920. H.-H. HUANG. 2 août 2012.
- [5] Y. MA et V. N. BOROVYTSKY. « Design of a 16.5 Megapixel Camera Lens for a Mobile Phone ». In : *Open Access Library* 02 (03 2015), p. 1–9. ISSN : 2333-9721, 2333-9705. DOI : 10.4236/oalib.1101310.
- [6] C. BUIL. *Canon EOS 350d - Filter Removal Operation and Performances*. 2010.
- [7] A. E. GAMAL et H. ELTOUKHY. « CMOS Image Sensors ». In : *IEEE Circuits and Devices Magazine* 21.3 (mai 2005), p. 6–20. ISSN : 8755-3996. DOI : 10.1109/MCD.2005.1438751.
- [8] O. YADID-PECHT et R. ETIENNE-CUMMINGS, édés. *CMOS Imagers*. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN : 978-1-4020-7961-0.
- [9] M. SARKAR et A. THEUWISSEN. *A Biologically Inspired CMOS Image Sensor*. T. 461. Studies in Computational Intelligence. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN : 978-3-642-34900-3 978-3-642-34901-0.
- [10] J. C. LIU et al. « Advanced 1.1 μ m Pixel CMOS Image Sensor with 3D Stacked Architecture ». In : *2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers*. 2014 Symposium on VLSI Technology (VLSI-Technology): Digest of Technical Papers. Juin 2014, p. 1–2. DOI : 10.1109/VLSIT.2014.6894429.
- [11] N. DUTTON. « Noise in Single-Photon-Counting Image Sensors ». In : *2016 IEEE INTERNATIONAL SOLID-STATE CIRCUITS CONFERENCE*. ISSC. 2016.
- [12] A. BOUKHAYMA et al. « A Sub-0.5 Electron Read Noise VGA Image Sensor in a Standard CMOS Process ». In : *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 51.9 (sept. 2016), p. 2180–2191. ISSN : 0018-9200. DOI : 10.1109/JSSC.2016.2579643.
- [13] KAWABATA. « A 1.8e- Temporal Noise Over 90dB Dynamic Range 4k2k Super 35mm Format Seamless Global Shutter CMOS Image Sensor with Multiple-Accumulation Shutter Technology ». In : *2016 IEEE International Electron Devices Meeting*. IEDM. 2016.
- [14] R. J. BAKER. *CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation*. 3rd. Wiley-IEEE Press, 2010. 1208 p. ISBN : 978-0-470-88132-3.

- [15] C. KETCHAZO et al. « A New Technique of Characterization of Intrapixel Response Dedicated to Astronomical Detectors ». In : *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. New Developments in Photodetection NDIP14 787 (1^{er} juil. 2015), p. 265–269. ISSN : 0168-9002. DOI : 10.1016/j.nima.2014.12.048.
- [16] J. VAILLANT et al. « Versatile Method for Optical Performances Characterization of off-Axis CMOS Pixels with Microlens Radial Shift ». In : *Proceedings of SPIE*. T. 6817. 2008.
- [17] H. MUTOH. « Simulation for 3-D optical and electrical analysis of CCD ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 44.10 (oct. 1997), p. 1604–1610. ISSN : 0018-9383. DOI : 10.1109/16.628811.
- [18] H. MUTOH. « 3-D Optical and Electrical Simulation for CMOS Image Sensors ». In : *IEEE Transaction on Electron Devices* (2003).
- [19] P. B. CATRYSSSE et al. « QE Reduction due to Pixel Vignetting in CMOS Image Sensors ». In : *Proceedings of SPIE*. Sous la dir. de M. M. BLOUKE et al. 15 mai 2000, p. 420–430. DOI : 10.1117/12.385460.
- [20] J. VAILLANT et F. HIRIGOYEN. « Optical Simulation for CMOS Imager Microlens Optimization ». In : *Proceedings of SPIE*. Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2004, p. 200–210.
- [21] M. G. MOHARAM et T. K. GAYLORD. « Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction ». In : *J. Opt. Soc. Am.* 71.7 (juil. 1981), p. 811–818. DOI : 10.1364/JOSA.71.000811. URL : <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=josa-71-7-811>.
- [22] A. TAFLOVE et S. C. HAGNESS. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, Third Edition*. 3rd. Artech House, 2004, p. 1038. ISBN : 978-1-58053-832-9.
- [23] K. YEE. « Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media ». In : *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 14.3 (mai 1966), p. 302–307. ISSN : 0018-926X. DOI : 10.1109/TAP.1966.1138693.
- [24] J. VAILLANT et al. « Uniform Illumination and Rigorous Electromagnetic Simulations Applied to CMOS Image Sensors ». In : *Optics Express* 15.9 (30 avr. 2007), p. 5494–5503. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.15.005494.
- [25] H. SUMI. « Low-noise imaging system with CMOS image sensor for high-quality imaging ». In : *IEEE Electron Devices Meeting (IEDM)*. Sous la dir. d'IEEE. 2008.
- [26] J. GAMBINO. « CMOS Imager with copper wiring and lightpipe ». In : *IEEE Electron Devices Meeting (IEDM)*. Sous la dir. d'IEEE. 2006.
- [27] CHIPWORKS. *STMICROELECTRONICS 5 Mp 1.4 Mm Pixel Pitch CMOS Image Sensor - Imager Process Review*. 2010.
- [28] A. CROCHERIE et al. « From Photons to Electrons: A Complete 3D Simulation Flow for CMOS Image Sensor ». In : *International Image Sensor Workshop (IISW)*. 2009.
- [29] F. HIRIGOYEN et al. « Finite-Difference Time Domain Based Electro-Optical Methodologies to Improve CMOS Image Sensor Pixels Performances ». In : *Proceedings of SPIE*. T. 7723. 2010.
- [30] J. ALAKARHU. « Image Sensors and Image Quality in Mobile Phones.pdf ». In : IISW. 2007.
- [31] M. PARMAR et S. J. REEVES. « Selection of Optimal Spectral Sensitivity Functions for Color Filter Arrays ». In : *2006 International Conference on Image Processing*. 2006 International Conference on Image Processing. Oct. 2006, p. 1005–1008. DOI : 10.1109/ICIP.2006.312669.

-
- [32] J. FARRELL et al. « Sensor Calibration and Simulation ». In : t. 6817. 2008, 68170R–68170R–9. DOI : 10.1117/12.767901.
- [33] J. E. FARRELL et B. A. WANDELL. « Image Systems Simulation ». In : *SID Symposium Digest of Technical Papers* 46.1 (1^{er} juin 2015), p. 180–183. ISSN : 2168-0159. DOI : 10.1002/sdtp.10297.
- [34] J. E. FARRELL et al. « Digital Camera Simulation ». In : *Applied Optics* 51.4 (1^{er} fév. 2012), A80. ISSN : 0003-6935, 1539-4522. DOI : 10.1364/AO.51.000A80.
- [35] C. MORNET et al. « Evaluation of Color Error and Noise on Simulated Images ». In : *Proceedings of SPIE*. Digital Photography VI. T. 7537. 2010, 75370Y–75370Y–12. DOI : 10.1117/12.853669.
- [36] C. MORNET et al. « Toward a Quantitative Visual Noise Evaluation of Sensors and Image Processing Pipes ». In : *Proceedings of SPIE*. T. 7876. 2011, 78760Q–78760Q–12. DOI : 10.1117/12.870828.
- [37] C. MORNET et al. « An Image Quality Evaluation Tool Simulating Image Sensors Including Quantum Efficiency off-Axis Effect ». In : *Proceedings of SPIE*. Digital Photography VII. Sous la dir. de F. H. IMAI et F. XIAO. 23 jan. 2011, p. 78760M. DOI : 10.1117/12.871344.
- [38] J. VAILLANT et al. « Characterization of Pixel Crosstalk and Impact of Bayer Patterning by Quantum Efficiency Measurement ». In : *Proceedings of SPIE*. Digital Photography VII. T. 7876. 2011, p. 787613–787613–10. DOI : 10.1117/12.879603.
- [39] M.-C. LARABI et al. « Quality Assessment of Still Images ». In : *Advanced Color Image Processing and Analysis*. Sous la dir. de C. FERNANDEZ-MALOIGNE. Springer New York, 2013, p. 423–447. ISBN : 978-1-4419-6189-1 978-1-4419-6190-7. DOI : 10.1007/978-1-4419-6190-7_13.
- [40] M. SHOHARA et K. KOTANI. « The Visual Perception Sensitivity for Achromatic Noise and Chromatic Noise ». In : *2013 IEEE International Conference on Image Processing*. 2013 IEEE International Conference on Image Processing. Sept. 2013, p. 127–131. DOI : 10.1109/ICIP.2013.6738027.
- [41] K.-J. BAEG et al. « Organic Light Detectors: Photodiodes and Phototransistors ». In : *Advanced Materials* 25.31 (21 août 2013), p. 4267–4295. ISSN : 09359648. DOI : 10.1002/adma.201204979.
- [42] F. ARCA et al. « Near-Infrared Organic Photodiodes ». In : *IEEE Journal of Quantum Electronics* 49.12 (déc. 2013), p. 1016–1025. ISSN : 0018-9197, 1558-1713. DOI : 10.1109/JQE.2013.2285158.
- [43] L. DOU et al. « Low-Bandgap Near-IR Conjugated Polymers/Molecules for Organic Electronics ». In : *Chemical Reviews* 115.23 (9 déc. 2015), p. 12633–12665. ISSN : 1520-6890. DOI : 10.1021/acs.chemrev.5b00165. pmid : 26287387.
- [44] B. BOUTHINON et al. « Impact of Blend Morphology on Interface State Recombination in Bulk Heterojunction Organic Solar Cells ». In : *Advanced Functional Materials* 25.7 (1^{er} fév. 2015), p. 1090–1101. ISSN : 1616-3028. DOI : 10.1002/adfm.201401633.
- [45] M. DELBRACIO et G. SAPIRO. « Removing Camera Shake via Weighted Fourier Burst Accumulation ». In : *IEEE Transactions on Image Processing* 24.11 (nov. 2015), p. 3293–3307. ISSN : 1057-7149. DOI : 10.1109/TIP.2015.2442914.
- [46] Y. TENDERO et J.-M. MOREL. « A Theory of Optimal Flutter Shutter For Probabilistic Velocity Models ». In : *SIAM journal on Imaging Sciences (SIIMS)*, in press (2015), p. 1–31.
-

- [47] S. SU et W. HEIDRICH. « Rolling Shutter Motion Deblurring ». In : *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Juin 2015, p. 1529–1537. DOI : 10.1109/CVPR.2015.7298760.
- [48] G. MEYNANTS. « Global Shutter Imagers for Industrial Applications ». In : t. 9141. 2014, p. 914108–914108–9. DOI : 10.1117/12.2060072.
- [49] A. THEUWISSEN. « CMOS Image Sensors ». In : *Smart Sensor Systems*. Sous la dir. de G. MEIJER et al. John Wiley & Sons, Ltd, 2014, p. 173–189. ISBN : 978-1-118-70150-8.
- [50] N. PEARS. *3D Imaging, Analysis and Applications*. Springer, 2012.
- [51] F. REMONDINO et D. STOPPA. *TOF Range-Imaging Cameras / Fabio Remondino / Springer*. Springer, 2013.
- [52] R. LANGE et P. SEITZ. « Solid-State Time-of-Flight Range Camera ». In : *IEEE Journal of Quantum Electronics* 37.3 (mar. 2001), p. 390–397. ISSN : 0018-9197. DOI : 10.1109/3.910448.
- [53] A. PAYNE et al. « A 512x424 CMOS 3D Time-of-Flight Image Sensor with Multi-Frequency Photo-Demodulation up to 130MHz and 2GS/S ADC ». In : *2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC)*. 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC). Fév. 2014, p. 134–135. DOI : 10.1109/ISSCC.2014.6757370.
- [54] S. J. KIM et al. « A Three-Dimensional Time-of-Flight CMOS Image Sensor With Pinned-Photodiode Pixel Structure ». In : *IEEE Electron Device Letters* 31.11 (nov. 2010), p. 1272–1274. ISSN : 0741-3106. DOI : 10.1109/LED.2010.2066254.
- [55] A. SPICKERMANN et al. « CMOS 3D Image Sensor Based on Pulse Modulated Time-of-Flight Principle and Intrinsic Lateral Drift-Field Photodiode Pixels ». In : *ESSCIRC (ESSCIRC), 2011 Proceedings of the*. ESSCIRC (ESSCIRC), 2011 Proceedings of the. Sept. 2011, p. 111–114. DOI : 10.1109/ESSCIRC.2011.6044927.
- [56] E. CHARBON. « Single-Photon Imaging in Complementary Metal Oxide Semiconductor Processes ». In : *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 372.2012 (28 mar. 2014). ISSN : 1364-503X. DOI : 10.1098/rsta.2013.0100. pmid : 24567470.
- [57] A. ROCHAS et al. « Single Photon Detector Fabricated in a Complementary Metal Oxide Semiconductor High-Voltage Technology ». In : *Review of Scientific Instruments* 74.7 (1^{er} juil. 2003), p. 3263–3270. ISSN : 0034-6748, 1089-7623. DOI : 10.1063/1.1584083.
- [58] C. NICLASS et E. CHARBON. « A Single Photon Detector Array with 64x64 Resolution and Millimetric Depth Accuracy for 3D Imaging ». In : *Digest of Technical Papers - IEEE ISSCC* 48 (2005), p. 364–365.
- [59] E. CHARBON. « Single Photon Imagers ». In : *CLEO: 2014 (2014), Paper STu3G.5*. CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 8 juin 2014, STu3G.5. DOI : 10.1364/CLEO_SI.2014.STu3G.5.
- [60] M.-J. LEE et al. « A First Single-Photon Avalanche Diode Fabricated in Standard SOI CMOS Technology with a Full Characterization of the Device ». In : *Optics Express* 23.10 (18 mai 2015), p. 13200–13209. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.23.013200.
- [61] G. GARIEPY et al. « Single-Photon Sensitive Light-in-Fight Imaging ». In : *Nature Communications* 6 (27 jan. 2015), p. 6021. ISSN : 2041-1723. DOI : 10.1038/ncomms7021.
- [62] R. H. HAITZ. « Model for the Electrical Behavior of a Microplasma ». In : *Journal of Applied Physics* 35.5 (1964), p. 1370–1376.

-
- [63] C. VEERAPPAN et al. « A 160x128 Single-Photon Image Sensor with on-Pixel 55ps 10b Time-to-Digital Converter ». In : *2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Fév. 2011, p. 312–314. DOI : 10.1109/ISSCC.2011.5746333.
- [64] J. M. PAVIA et al. « Measurement and Modeling of Microlenses Fabricated on Single-Photon Avalanche Diode Arrays for Fill Factor Recovery ». In : *Optics Express* 22.4 (24 fév. 2014), p. 4202–4213. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.22.004202.
- [65] G. INTERMITE et al. « Enhancing the Fill-Factor of CMOS SPAD Arrays Using Microlens Integration ». In : *Proceedings of SPIE*. Photon Counting Applications. T. 9504. SPIE, 2015. DOI : 10.1117/12.2178950.
- [66] M. GERSBACH et al. « High Frame-Rate TCSPC-FLIM Using a Novel SPAD-Based Image Sensor ». In : t. 7780. 2010, 77801H–77801H–13. DOI : 10.1117/12.860769.
- [67] D. D.-U. LI et al. « Video-Rate Fluorescence Lifetime Imaging Camera with CMOS Single-Photon Avalanche Diode Arrays and High-Speed Imaging Algorithm ». In : *Journal of Biomedical Optics* 16.9 (sept. 2011), p. 096012. ISSN : 1560-2281. DOI : 10.1117/1.3625288. PMID : 21950926.
- [68] D. STOPPA et al. « Single-Photon Avalanche Diode CMOS Sensor for Time-Resolved Fluorescence Measurements ». In : *IEEE Sensors Journal* 9.9 (sept. 2009), p. 1084–1090. ISSN : 1530-437X. DOI : 10.1109/JSEN.2009.2025581.
- [69] K. ONOZAWA et al. « A MOS Image Sensor With a Digital-Microlens ». In : *IEEE Transactions on Electron Devices* 55.4 (avr. 2008), p. 986–991. ISSN : 0018-9383. DOI : 10.1109/TED.2008.917331.
- [70] J. N. MAIT et al. « Binary Subwavelength Diffractive-Lens Design ». In : *Optics Letters* 23.17 (1^{er} sept. 1998), p. 1343. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : 10.1364/OL.23.001343.
- [71] J. N. MAIT et al. « Diffractive Lens Fabricated with Binary Features Less than 60 Nm ». In : *Optics Letters* 25.6 (15 mar. 2000), p. 381. ISSN : 0146-9592, 1539-4794. DOI : 10.1364/OL.25.000381.
- [72] J. ALDA et al. « Design of Fresnel Lenses and Binary-Staircase Kinoforms of Low Value of the Aperture Number ». In : *Optics Communications* 260.2 (avr. 2006), p. 454–461. ISSN : 00304018. DOI : 10.1016/j.optcom.2005.10.080.
- [73] B. E. A. SALEH et M. C. TEICH. *Fundamentals of Photonics, 2nd Edition*. 2nd. Wiley-IEEE Press, 2007. 1200 p.
- [74] V. ROCHUS et al. « Pixel Performance Enhancement by Integrated Diffractive Optics ». In : *International Image Sensor Workshop*. 2015.
- [75] H. ALAIBAKHSH et M. A. KARAMI. « Numerical Study of a Fresnel Zone Plate Based Lens for a 2 Mm X 2 Mm CMOS Image Sensor Pixel ». In : *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* 127.17 (sept. 2016), p. 6867–6873. ISSN : 0030-4026. DOI : 10.1016/j.ijleo.2016.04.143.
- [76] G. LIPPMANN. « Épreuves Réversibles Donnant La Sensation Du Relief ». In : *J. Phys. Theor. Appl.* 7.1 (1908), p. 821–825. DOI : 10.1051/jphysap:019080070082100.
- [77] E. H. ADELSON et J. Y. A. WANG. « Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera ». In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 2 (1992), p. 99–106.
- [78] V. DRAZIC et al. « Optimal Design and Critical Analysis of a High Resolution Video Plenoptic Demonstrator ». In : *Proceedings of SPIE*. Sous la dir. d’A. J. WOODS et al. 10 fév. 2011, p. 786318. DOI : 10.1117/12.872852.
-

- [79] R. NG et al. « Light Field Photography with a Hand-Held Plenoptic Camera ». In : *Computer Science Technical Report CSTR 2.11* (2005), p. 1–11.
- [80] R. NG. « Fourier Slice Photography ». In : *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*. SIGGRAPH '05. New York, NY, USA : ACM, 2005, p. 735–744. DOI : 10.1145/1186822.1073256.
- [81] R. NG. « Digital Light Field Photography ». AAI3219345. Stanford, CA, USA : Stanford University, 2006.
- [82] T. GEORGEIV et al. « Spatio-Angular Resolution Tradeoffs in Integral Photography ». In : *Proceedings of the 17th Eurographics Conference on Rendering Techniques*. EGSR '06. Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland : Eurographics Association, 2006, p. 263–272. ISBN : 978-3-905673-35-7. DOI : 10.2312/EGWR/EGSR06/263-272.
- [83] T. G. GEORGIEV et A. LUMSDAINE. « Superresolution with Plenoptic 2.0 Cameras ». In : *Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest (2009), Paper STuA6*. Signal Recovery and Synthesis. Optical Society of America, 13 oct. 2009, STuA6. DOI : 10.1364/SRS.2009.STuA6.
- [84] A. LUMSDAINE et T. GEORGIEV. « The Focused Plenoptic Camera ». In : *In Proc. IEEE ICCP*. 2009, p. 1–8.
- [85] T. GEORGIEV et A. LUMSDAINE. « The Multifocus Plenoptic Camera ». In : t. 8299. 2012, p. 829908–829908–11. DOI : 10.1117/12.908667.
- [86] D. G. DANSEREAU et al. « Decoding, Calibration and Rectification for Lenselet-Based Plenoptic Cameras ». In : IEEE, juin 2013, p. 1027–1034. ISBN : 978-0-7695-4989-7. DOI : 10.1109/CVPR.2013.137.
- [87] M. SEIFI et al. « Disparity-Guided Demosaicking of Light Field Images ». In : *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Oct. 2014, p. 5482–5486. DOI : 10.1109/ICIP.2014.7026109.
- [88] V. DRAZIC. « Optimal Depth Resolution in Plenoptic Imaging ». In : *2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME). Juil. 2010, p. 1588–1593. DOI : 10.1109/ICME.2010.5583211.
- [89] M. KOBAYASHI et al. « A Low Noise and High Sensitivity Image Sensor with Imaging and Phase-Difference Detection AF in All Pixels ». In : *ITE Transactions on Media Technology and Applications* 4.2 (2016), p. 123–128.
- [90] A. WANG et al. « Light Field Image Sensors Based on the Talbot Effect ». In : *Applied Optics* 48.31 (1^{er} nov. 2009), p. 5897–5905. ISSN : 1539-4522. DOI : 10.1364/AO.48.005897.
- [91] A. WANG et al. « An Angle-Sensitive CMOS Imager for Single-Sensor 3D Photography ». In : *2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference*. 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference. Fév. 2011, p. 412–414. DOI : 10.1109/ISSCC.2011.5746375.
- [92] S. SIVARAMAKRISHNAN et al. « Enhanced Angle Sensitive Pixels for Light Field Imaging ». In : *Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International*. Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International. Déc. 2011, p. 8.6.1–8.6.4. DOI : 10.1109/IEDM.2011.6131516.
- [93] « Image Sensor with Improved Light Sensitivity ». US20070024031A1. J. COMPTON et J. HAMILTON. 2005.
- [94] W. JUE et al. « New Color Filter Arrays of High Light Sensitivity and High Demosaicking Performance ». In : *2011 18th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 2011)* (2011), p. 3153–3156. DOI : 10.1109/icip.2011.6116336.

-
- [95] M. RAFINAZARI et E. DUBOIS. « Demosaicking Algorithm for the Kodak-RGBW Color Filter Array ». In : t. 9395. 2015, p. 939503–939503–6. DOI : 10.1117/12.2083667.
- [96] H. TERANAKA et al. « Single-Sensor RGB and NIR Image Acquisition: Toward Optimal Performance by Taking Account of CFA Pattern, Demosaicking, and Color Correction ». In : *IS&T Electronic Imaging. Digital Photography and Mobile Imaging XII*. 2016.
- [97] L. FREY et al. « Color Filters Including Infrared Cut-off Integrated on CMOS Image Sensor ». In : *Optics Express* 19.14 (4 juil. 2011), p. 13073–13080. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.19.013073.
- [98] L. FREY et al. « Multispectral Interference Filter Arrays with Compensation of Angular Dependence or Extended Spectral Range ». In : *Optics Express* 23.9 (4 mai 2015), p. 11799–11812. ISSN : 1094-4087. DOI : 10.1364/OE.23.011799.
- [99] R. D. JANSEN-VAN VUUREN et al. « Organic Photodiodes: The Future of Full Color Detection and Image Sensing ». In : *Advanced Materials* 28.24 (1^{er} juin 2016), p. 4766–4802. ISSN : 1521-4095. DOI : 10.1002/adma.201505405.
- [100] M. MORI et al. « Thin Organic Photoconductive Film Image Sensors with Extremely High Saturation of 8500 Electrons/ μm^2 ». In : *2013 Symposium on VLSI Technology (VLSIT)*. 2013 Symposium on VLSI Technology (VLSIT). Juin 2013, T22–T23.
- [101] S. SHISHIDO et al. « 210ke- Saturation Signal 3um-Pixel Variable-Sensitivity Global-Shutter Organic Photoconductive Image Sensor for Motion Capture ». In : *2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). Jan. 2016, p. 112–113. DOI : 10.1109/ISSCC.2016.7417932.
- [102] M. TAKASE et al. « First Demonstration of 0.9 Mm Pixel Global Shutter Operation by Novel Charge Control in Organic Photoconductive Film ». In : *2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). Déc. 2015, p. 30.2.1–30.2.4. DOI : 10.1109/IEDM.2015.7409799.
- [103] K. NISHIMURA et al. « An over 120dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6e-Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor ». In : *2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). Jan. 2016, p. 110–111. DOI : 10.1109/ISSCC.2016.7417931.
- [104] S.-J. LIM et al. « Organic-on-Silicon Complementary Metal-oxide-semiconductor Colour Image Sensors ». In : *Scientific Reports* 5 (12 jan. 2015), p. 7708. ISSN : 2045-2322. DOI : 10.1038/srep07708.
- [105] M. G. HAN et al. « Narrow-Band Organic Photodiodes for High-Resolution Imaging ». In : *ACS Applied Materials & Interfaces* (13 sept. 2016). ISSN : 1944-8244. DOI : 10.1021/acsami.6b07735.
- [106] I. J. KRAMER et E. H. SARGENT. « The Architecture of Colloidal Quantum Dot Solar Cells: Materials to Devices ». In : *Chemical Reviews* 114.1 (8 jan. 2014), p. 863–882. ISSN : 0009-2665, 1520-6890. DOI : 10.1021/cr400299t.
- [107] T. RAUCH et al. « Near-Infrared Imaging with Quantum-Dot-Sensitized Organic Photodiodes ». In : *Nature Photonics* 3.6 (juin 2009), p. 332–336. ISSN : 1749-4885. DOI : 10.1038/nphoton.2009.72.
- [108] J. HERRBACH et al. « P-Doped Organic Semiconductor: Potential Replacement for PEDOT:PSS in Organic Photodetectors ». In : *Applied Physics Letters* 109.7 (15 août 2016), p. 073301. ISSN : 0003-6951, 1077-3118. DOI : 10.1063/1.4961444.
-

- [109] S. H. WU et al. « Simple near-Infrared Photodetector Based on Charge Transfer Complexes Formed in Molybdenum Oxide Doped N,N'-Di(naphthalene-1-Yl)-N,N'-Diphenyl-Benzidine ». In : *physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters* 6.3 (1^{er} mar. 2012), p. 129–131. ISSN : 1862-6270. DOI : 10.1002/pssr.201105596.
- [110] T.-W. NG et al. « Near-Infrared Electric Power Generation Through Sub-Energy-Gap Absorption in an Organic–Inorganic Composite ». In : *Advanced Functional Materials* 22.14 (24 juil. 2012), p. 3035–3042. ISSN : 1616-3028. DOI : 10.1002/adfm.201200058.
- [111] T.-W. NG et al. « Charge-Transfer Complexes and Their Role in Exciplex Emission and Near-Infrared Photovoltaics ». In : *Advanced Materials* 26.31 (1^{er} août 2014), p. 5569–5574. ISSN : 1521-4095. DOI : 10.1002/adma.201400563.
- [112] S. P. WU et al. « Formation of Charge-Transfer-Complex in Organic:metal Oxides Systems ». In : *Applied Physics Letters* 102.16 (22 avr. 2013), p. 163304. ISSN : 0003-6951, 1077-3118. DOI : 10.1063/1.4802923.
- [113] H.-W. MO et al. « Infrared Organic Photovoltaic Device Based on Charge Transfer Interaction between Organic Materials ». In : *Organic Electronics* 14.1 (jan. 2013), p. 291–294. ISSN : 1566-1199. DOI : 10.1016/j.orgel.2012.09.044.
- [114] M. KRÖGER et al. « P-Type Doping of Organic Wide Band Gap Materials by Transition Metal Oxides: A Case-Study on Molybdenum Trioxide ». In : *Organic Electronics* 10.5 (août 2009), p. 932–938. ISSN : 1566-1199. DOI : 10.1016/j.orgel.2009.05.007.
- [115] X. QIAO et al. « Observation of Hole Hopping via Dopant in MoOx-Doped Organic Semiconductors: Mechanism Analysis and Application for High Performance Organic Light-Emitting Devices ». In : *Journal of Applied Physics* 107.10 (15 mai 2010), p. 104505. ISSN : 0021-8979, 1089-7550. DOI : 10.1063/1.3428374.
- [116] T. MATSUSHIMA et al. « Interfacial Charge Transfer and Charge Generation in Organic Electronic Devices ». In : *Organic Electronics* 12.3 (mar. 2011), p. 520–528. ISSN : 1566-1199. DOI : 10.1016/j.orgel.2011.01.001.
- [117] R. CLERC et al. « Current Status and Challenges of the Modeling of Organic Photodiodes and Solar Cells ». In : *IEDM Proceedings*. 62nd International Electron Devices Meeting. IEEE, 2016.
- [118] « 3T Pixel for CMOS Image Sensors with Low Reset Noise and Low Dark Current Generation Utilizing Parametric Reset ». US20060203111 A1. J. HYNCEK. U.S. Classification 348/294, 348/E03.029, 348/E03.021; International Classification H04N5/335; Cooperative Classification H04N5/363, H04N5/361, H01L27/1461; European Classification H04N5/361, H04N5/363. 14 sept. 2006.
- [119] « Image Sensors with Noise Reduction ». US2016037099 A1. E. MANDELLI et al. 2016.
- [120] M. ISHII et al. « An Ultra-Low Noise Photoconductive Film Image Sensor with a High-Speed Column Feedback Amplifier Noise Canceller ». In : *2013 Symposium on VLSI Circuits*. 2013 Symposium on VLSI Circuits. Juin 2013, p. C8–C9.
- [121] R. HANBURY BROWN et R. Q. TWISS. « A Test of a New Type of Stellar Interferometer on Sirius ». In : *Nature* 178.4541 (10 nov. 1956), p. 1046–1048. ISSN : 0028-0836. DOI : 10.1038/1781046a0.
- [122] C. FOELLM. « Intensity Interferometry and the Second-Order Correlation Function g_2 in Astrophysics ». In : *Astronomy & Astrophysics* 507.3 (1^{er} déc. 2009), p. 1719–1727. ISSN : 0004-6361, 1432-0746. DOI : 10.1051/0004-6361/200911739.

- [123] G. PILYAVSKY et al. « Intensity Interferometry with Single Photon Avalanche Photodiodes ». In : Workshop on Hanbury Brown & Twiss Interferometry : Prospects for astrophysics and quantum optics. 2014.
- [124] T. PENG KIAN et al. « Measuring Temporal Photon Bunching from a Blackbody ». In : Workshop on Hanbury Brown & Twiss Interferometry : Prospects for astrophysics and quantum optics. 2014.
- [125] E. HORCH. « Intensity Interferometry with SPAD Detectors at SCS University ». In : 2014.
- [126] C. BARBIERI et al. « QuantEYE, the Quantum Optics Instrument for OWL ». In : *The Scientific Requirements for Extremely Large Telescopes*. Sous la dir. de P. WHITELOCK et al. T. 232. IAU Symposium. 2006, p. 506–507. DOI : 10.1017/S1743921306001220.
- [127] A. F. MOORWOOD. *Science with the VLT in the ELT Era*. Springer, 2009.
- [128] D. DRAVINS et al. « Long-Baseline Optical Intensity Interferometry - Laboratory Demonstration of Diffraction-Limited Imaging ». In : *Astronomy & Astrophysics* 580 (1^{er} août 2015), A99. ISSN : 0004-6361, 1432-0746. DOI : 10.1051/0004-6361/201526334.