

**AVANT PROPOS**

**A ma Famille  
A ma Mère  
A mon Frère  
A Laure**

## REMERCIEMENTS

Une thèse est à la fois une démarche très personnelle et un travail d'équipe. Au terme de ces trois années, je tiens à exprimer ma reconnaissance et à adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, d'une manière ou d'une autre, au bon déroulement et à l'aboutissement de cette épreuve.

Le travail présenté dans cette thèse CIFFRE a été effectué au sein du groupe Conception d'Imageurs Matriciels Intégrés (CIMI) de l'École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace (SUPAERO) à Toulouse, et à THOMSON CSF dpt. CCD, St Egreve, Isère.

Tout d'abord, je voudrais remercier Monsieur Jacques KERBRAT, Directeur de SUPAERO, qui m'a accueilli et ainsi fourni le cadre nécessaire à la réalisation de cette thèse.

J'exprime ma vive gratitude aux membres du Jury qui ont accepté d'apporter leur caution scientifique au travail exposé :

- à Monsieur Augustin Gérard REY, professeur à l'INSA, Directeur Adjoint du LAAS, et président du jury,
- à Monsieur Daniel BLOYET, professeur à l'université de Caen, Responsable du Diplôme d'Études Approfondies (DEA) Mesures, Capteurs, Images, et rapporteur de cette thèse,
- à Monsieur Gilles LECOY, professeur à l'université de Montpellier II, Responsable du DEA d'électronique, et rapporteur de cette thèse,
- à Monsieur Gilles BOUCHARLAT, Responsable R&D à Thomson CSF-TCS dépt. CCD, St Egrève, Isère,
- à Monsieur Pierre MAGNAN, professeur Agrégé en Génie Électrique à L'Université Paul Sabatier,
- à Monsieur Jean FARRÉ, professeur à SUPAERO, Chef du groupe CIMI et du département EOP à SUPAERO et directeur de cette thèse.

Je voudrais remercier Jean FARRÉ, qui a dirigé mes travaux tout en m'accordant une grande autonomie. Ses compétences et les nombreuses discussions m'ont aidé à progresser dans mon travail.

Je remercie tout particulièrement et exprime ma profonde reconnaissance à Pierre MAGNAN pour sa collaboration et son aide remarquable qu'il m'a apporté durant ces années de recherche, qu'il soit assuré de toute ma gratitude.

Une partie de ce travail a pu être effectuée grâce à l'étude préalable de Monsieur Johannes SOLHUSVIK (thésard du groupe CIMI) sur les APS, à qui j'ai pris ensuite le flambeau. Je n'oublierais pas les stagiaires de DEA qui nous ont été d'une aide déterminante : Cedric BELLITO et Nicolas VERDIER.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Olivier TICO (Ingénieur CNAM), qui grâce à son expérience à pu réaliser des cartes pour qualifier les matrices APS développées pour cette thèse. Sa bonne humeur naturelle et son dynamisme m'ont été contagieux et d'un grand soutien au quotidien !

Je tiens à remercier aussi Olivier St PE, Robert DAVANCENS Ingénieurs à MATRA MARCONI SPACE, qui sont persuadés des potentialités des matrices APS. Leur aide a complété de nombreuses mesures exposées dans ce manuscrit et ont soulevé de nombreuses questions pertinentes.

Je n'oublierais pas tout ceux qui m'ont aidé à obtenir une compétence sur le CCD appliqué à l'Imagerie Astronomique, expérience nécessaire pour réaliser mes mesures sur les capteurs APS, je pense notamment à Christian BUIL (Ingénieur CNES), Henri et Laurent PINNAT, Alain MAURY (Ingénieurs CNRS).

Je remercie également Jean-Louis COUTURES (Ingénieur Thomson-CSF), G BORE et tout les autres ingénieurs de TCS pour leur collaboration et l'aide efficace qu'ils m'ont apporté lors de mes séjours à Thomson-TCS.

Une mention spéciale à tout les autres thésards du groupe CIMI pour leur aide (et pour m'avoir supporté pendant ces années !) : Anne GAUTRAND, Yavuz DEGERLI, Jean François BECHE.

Tout au long de ce séjour à SUPAERO, j'espère avoir su témoigner ma reconnaissance à tous ceux, ingénieurs, techniciens, stagiaires qui, par leurs conseils, leur expérience, leur enthousiasme et leur gentillesse, ont favorisé ce travail, et ce, dans une ambiance toujours sympathique.

Je voudrais en particulier remercier Vincent CALMETTES (ingénieur à SUPAERO), Jean-Marc CHERON (stagiaire CNAM), Francis FROIN, Jean-Claude ORTEGA, Francisco FRANCHETTI, Etienne PERIN (Techniciens), Christian REAU (Ingénieur Système), Thierry SOULET (Technicien), Christian TAKALI (Technicien). A tous, je tiens ici à exprimer mes remerciements pour l'accueil qui m'a été réservé.

**Page sans texte**

## RESUME DE LA THESE

Le CCD (Charge Coupled Device) est devenu le capteur d'images le plus utilisé dans de nombreux domaines d'applications d'imagerie grâce à des performances proches de la perfection. Cependant, la diminution de la lithographie CMOS rend possible la réalisation de capteurs d'images CMOS-APS (Active Pixel Sensor). Le capteur APS offre des solutions aux inconvénients du CCD, en intégrant dans son pixel, le système de détection des photons, de conversion et de lecture. De plus, l'accès au pixel d'un capteur APS est aléatoire. Les structures de pixels des APS se divisent en deux familles : les pixels photodiodes (PD) en mode précharge et les pixels photoMOS (PM).

Des simulations théoriques du rendement quantique, du bruit et de la détectivité de ces pixels, avec les paramètres technologiques (CMOS $0.7\mu\text{m}$ ) ont été effectuées. Les résultats montrent que le pixel PD, bien qu'ayant un rendement quantique et un taux de remplissage du pixel bien plus important, est moins sensible que le pixel PM. Ce dernier possède un bruit de lecture faible (utilisation du CDS et facteur de conversion élevé).

Le pixel PM est mieux adapté à des applications faibles flux, et le pixel PD vers des applications grand public (image couleur).

L'amplification du signal, produit par le pixel APS, est réalisée par un circuit dont le dimensionnement fixe ses performances (vitesse, de bruit, linéarité...) : trois circuits de lecture ont été simulés et ont minimisé ces contraintes.

Dans le cadre de cette thèse, 5 matrices APS ont été réalisées, elles possèdent des pixels PD et PM ( $50\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$ ) dessinés avec des technologies CMOS ( $1.2\mu\text{m}$ ,  $0.7\mu\text{m}$  et  $0.35\mu\text{m}$ ). La taille de ces matrices varie de  $32 \times 32$  pixels à  $160 \times 512$  pixels.

Deux bancs de test et de qualification ont été développés, aussi bien la partie de la carte lecture des APS, le banc optique, le logiciel d'acquisition et de traitement des données.

Les performances de ces matrices ont été mesurées à l'aide de ces moyens et ont montré que les pixels PD présentent un bruit de lecture entre  $100$  et  $500e^-$  et une non-uniformité élevée de courant thermique. Ceci les destine à des applications peu demandantes. Par contre, les matrices à base de pixels PM ont des performances aussi bonnes que celles de CCD interlignes : bruit de  $15e^-$  à  $100\text{Kpx/s}$ , dynamique de  $100\text{Ke}^-$ , rendement quantique de  $20\%$ .

Les mesures (celles non dépendantes de la qualité "cosmétique" de la technologie) sont conformes à nos simulations. Ensuite, dans le but d'optimiser les performances des futurs capteurs APS, une matrice de test comprenant 16 structures de pixels PM et PD a été réalisée.

L'utilisation de technologies sub-microniques SM ( $<0.25\mu\text{m}$ ) est, à priori, favorable aux APS. Cependant, ces technologies ont subi des changements physiques importants, et peuvent fortement dégrader les performances en détection des pixels de matrices APS. Des précautions ou des modifications sur ces technologies SM devront être prises en compte.

Enfin, l'aspect intégration d'une caméra complète sur une puce est un argument important en faveur de l'APS : un système complet permet de réunir sur la même puce qu'un APS, des éléments comme un DSP, de la mémoire, un CAN, une chaîne de lecture performante.

Les matrices APS peuvent s'utiliser dans toutes les applications, sauf dans le domaine scientifique, où encore, le CCD répond mieux à cette demande. Comme le marché des

applications scientifiques est assez restreint, cela donne aux matrices APS, au regard des performances décrites dans cette thèse, un domaine d'application vaste et à grand volume.

LEXIQUE
---------

LUT	: Look Up Table	<i>(Table de conversion binaire)</i>
DDS	: Delta Double Sampling	<i>(Double échantillonnage différentiel)</i>
CDS	: Correlated Double Sampling	<i>(Double échantillonnage corrélé)</i>
APS	: Active Pixels Sensors	<i>(Imageurs à Pixels Actifs)</i>
EPP	: Enhanced Parallel Port	<i>(Port Parallèle Amélioré)</i>
DSP	: Digital Signal Processor	<i>(Processeur de signaux numériques)</i>
PD	: Pixel photoDiode	
PM	: Pixel PhotoMos	
CVF	: ConVersion Factor	<i>(Facteur de conversion)</i>
QE	: Quantum efficiency	<i>(Efficacité quantique)</i>
PRNU	: Photonic Response Non Uniformity	<i>(Non uniformité de réponse photonique)</i>
DSNU	: Dark Signal Non Uniformity	<i>(Non uniformité de signal d'obscurité)</i>
FPN	: Fixed Pattern Noise	<i>(Bruit spatial fixe)</i>
FTM	: Fonction de Transfert de Modulation	
FFT	: Fast Fourier Transform	<i>(Transformée de Fourier Rapide)</i>
CCD	: Charge Coupled Devices	<i>(Dispositif à Transfert de Charges)</i>
BCCD	: Buried Charge Coupled Devices	<i>(Dispositif à Transfert de Charges en Volume)</i>
SCCD	: Surface Charge Coupled Devices	<i>(Dispositif à Transfert de Charges en Surface)</i>
MPP	: Multi Pinned Phase	<i>(Phases bloquantes multiples)</i>
CTE	: Charge Transfer Efficiency	<i>(Efficacité de Transfert de charges)</i>
CTI	: Charge Transfer Inefficiency	<i>(Inefficacité de transfert de charges)</i>
CID	: Charge Injection Device	<i>(Dispositif à Injection de Charges)</i>
CAN	: Convertisseur analogique numérique	
CNA	: Convertisseur numérique analogique	
FF	: Fill Factor	<i>(Facteur ou taux de remplissage)</i>
USB	: Universal Serial Bus	<i>(Bus série universel)</i>
SCSI	: Small Computer System Interface	
PCI	: Peripheral Component Interconnect	
LSB	: Low Significant Bit	<i>(Bit de poids faible)</i>
ADU	: Analog to Digital Unit	<i>(Unité Analogique-Numérique)</i>
ADC	: Analog to Digital Converter	<i>(voir CAN)</i>
DAC	: Digital to Analog Converter	<i>(voir CNA)</i>
RISC	: Reduced Instruction Set Computer	<i>(Ordinateur à jeux d'instructions réduit)</i>
CIMI	: Conception d'Imageurs Matriciels Intégrés	
DRC	: Design Check Rule	<i>(Contrôle des règles de dessin)</i>

ECR	: Electrical Check Rules	<i>(Contrôle des règles électriques)</i>
LVS	: Layout Versus Schematic	<i>(Contrôle Dessin-Schéma)</i>
SNR	: Signal to Noise Ratio	<i>(Rapport signal à bruit)</i>
UV	: Ultra-Violet	
ESD	: Electro Static Discharge	<i>(Décharge électrostatique)</i>
SHR	: Sample and Hold Reference	<i>(Echantillonnage du signal de référence)</i>
SHS	: Sample and Hold Signal	<i>(Echantillonnage du signal)</i>
SLP	: Single Layer Polysilicon	<i>(une seule couche de polysilicium)</i>
DLP	: Double Layer Polysilicon	<i>(deux couches de polysilicium)</i>
DLM	: Double Layer Metal	<i>(deux couches de métal)</i>
TLM	: Triple Layer Metal	<i>(trois couches de métal)</i>
RMS	: Root Mean Square	<i>(Ecart type)</i>
ASIC	: Application Specific Integrated Circuit	<i>(Circuit intégré pour applications spécifiques)</i>
VHDL	: Very High Description Language	<i>(Langage de description de haut niveau)</i>
INL	: Integral Non Linearity	<i>(Non Linéarité Intégrale)</i>
DNL	: Differential Non Linearity	<i>(Non Linéarité Différentielle)</i>



<b>q</b>	: Charge de l'électron (C)
<b>C<sub>vf</sub></b>	: Facteur de conversion ( $\mu\text{V}/e^-$ )
<b>kT</b>	: Produit T (température) par k constante de Boltzman
<b><math>\mu_n</math></b>	: Mobilité des électrons ( $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )
<b><math>\mu_p</math></b>	: Mobilité des trous ( $\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )
<b>T<sub>ox</sub></b>	: Epaisseur de l'oxyde mince de grille ( $\mu\text{m}$ ou $\text{Å}$ )
<b><math>\epsilon_{\text{si}}</math></b>	: Permittivité du silicium (F/m)
<b><math>\epsilon_{\text{ox}}</math></b>	: Permittivité de l'oxyde mince (F/m)
<b>C<sub>ox</sub></b>	: Capacité par unité de surface de la couche d'oxyde mince $\text{F}/\text{m}^2$ ( $= \epsilon_{\text{ox}}/T_{\text{ox}}$ )
<b>N<sub>A</sub></b>	: Dopage des accepteurs P (atomes/ $\text{cm}^3$ ).
<b>N<sub>d</sub></b>	: Dopage des donneurs N (atomes/ $\text{cm}^3$ ).
<b>n<sub>i</sub></b>	: Dopage du silicium intrinsèque (atomes/ $\text{cm}^3$ ).
<b>W</b>	: Largeur de canal d'un transistor ( $\mu\text{m}$ )
<b>L</b>	: Longueur de grille ou de canal d'un transistor ( $\mu\text{m}$ )
<b>X<sub>dep</sub></b>	: Profondeur de la zone dépeuplée ( $\mu\text{m}$ )
<b><math>\lambda</math></b>	: Longueur d'onde de la lumière (m)
<b><math>\alpha(\lambda)</math></b>	: Coefficient d'absorption du silicium intrinsèque ( $\text{cm}^{-1}$ ).
<b>n(<math>\lambda</math>)</b>	: Indice de réfraction en fonction de $\lambda$
<b>ff<sub>géo</sub></b>	: Taux de remplissage géométrique du pixel (%)
<b>Qe(<math>\lambda</math>)</b>	: Rendement quantique en fonction de la longueur d'onde
<b><math>\eta(\lambda)</math></b>	: Rendement quantique en fonction de la longueur d'onde
<b>hc</b>	: Produit constante de Plank par la vitesse de la lumière
<b>p</b>	: pas du pixel ( $\mu\text{m}$ )
<b>V<sub>g</sub></b>	: Tension de bande interdite du Silicium (V)
<b>Kf</b>	: Coefficient de bruit de scintillation en 1/f
<b>g<sub>m</sub></b>	: Transconductance ( $\Omega^{-1}$ )

**Page sans texte**