

INTRODUCTION GENERALE

Page sans texte

1. INTRODUCTION

1.1 Un bref historique de la photographie

La possibilité d'enregistrer "en instantané" des images ne date pas de l'invention de l'électronique ; les premières images photographiques connues comme étant des héliographes, ont été réalisées dès 1827 par le physicien français Joseph Nicéphore Niépce. En 1831, un peintre français Louis Jacques Mandé Daguerre réalisa les premières photographies sur des plaques d'argent enduites d'une couche photosensible d'iodure d'argent. Après avoir exposé la plaque pendant plusieurs minutes pour enregistrer des scènes à lumière ambiante, elles étaient développées à l'aide de vapeurs de mercure. Ces photographies n'étaient pas permanentes et les plaques noircissaient progressivement aboutissant à la disparition de l'image.

Un procédé de fixation permanent de l'image a été ensuite découvert par Daguerre et un inventeur britannique William Henry Fox Talbot, évitant l'altération progressive des images. Cependant cette image étant unique et non reproductible, Talbot a ensuite développé une méthode photographique qui implique l'usage d'une plaque négative en papier à partir duquel un nombre illimité d'empreintes pouvait être réalisé. En 1839, la méthode de Talbot-Daguerre, appelée le procédé "calotype", nécessita des temps d'exposition de 30 secondes pour produire une image négative convenable. En moins de trois années, le temps d'exposition se réduisit à quelques secondes. Frederick Scott Archer introduisit l'usage de plaques de verre utilisant le collodion plutôt que de l'albumine. A l'époque ces plaques devaient être exposées et développées tout en étant humides, les photographes devaient avoir dans un même endroit à la fois le laboratoire de traitement et le sujet à photographier. Une équipe des premiers journalistes de campagnes de guerre pendant la guerre de sécession américaine (1861-1865) ont dû travailler ainsi pour réaliser des centaines d'images de cette période de l'histoire.

L'usage de cette méthode était encore limité à des photographes professionnels. Puis de nombreux expérimentateurs ont tenté de perfectionner la méthode vers un négatif exposé à sec et ne nécessitant pas un développement immédiat. Cet objectif fut atteint en 1874 par Richard Kennett et en 1878 par Charles Bennett qui inventèrent une plaque de verre enduite d'une émulsion de gélatine et de bromure d'argent, qui était similaire aux plaques modernes. Alors que des efforts importants ont été ensuite entrepris pour améliorer la finesse et la sensibilité des négatifs noir et blanc, en 1861 la première image couleur a été réalisée par James Clerk Maxwell.

Enfin en 1889, un américain, George Eastman inventa un système encore utilisé de nos jours: le film, grâce à une longue bande de nitrate de cellulose produisant un support translucide et flexible enduit d'une émulsion sensible. L'invention de film en rouleau marque la naissance de la photographie accessible au public, et rendit ainsi possible la naissance du cinéma. Cela fait maintenant un centenaire que des images instantanées sont réalisables. La fixation pour "l'éternité" des scènes appartenant aussi bien à l'histoire humaine que celles de la vie quotidienne des hommes est désormais accessible.

1.2 Vers les capteurs d'images numériques

Depuis les années 30, tous les formats de négatif (35 mm, 6x6, plaques ..) ont pris naissance, et sont encore largement utilisés de nos jours. Les recherches entreprises depuis cette époque sur les émulsions photographiques se sont effectuées en vue d'une réduction du grain (augmentation de la résolution spatiale), de l'augmentation de la sensibilité, de l'amélioration du rendu des couleurs des scènes naturelles et d'une solidité accrue du support film (support Estar).

Cependant, il n'est réellement pas possible de parler d'avancées révolutionnaires dans ce domaine: le plan focal est toujours constitué d'une émulsion chimique de bromure d'argent échantillonnant aléatoirement l'image sur un pas variant 1 à 30 μ m, l'image finale n'est obtenue qu'après un traitement humide et un tirage papier. Ce procédé nécessite plusieurs dizaines de minutes pour l'obtention de l'image finale et requiert un matériel encombrant (bains, cuvettes...).

De plus, le problème de la photographie réside dans sa faible sensibilité. Cette faiblesse est exacerbée lors d'applications à faibles flux, par exemple en imagerie astronomique et en imagerie nocturne (surveillance, usage militaire) où le rendement quantique vis à vis de la lumière incidente ne peut excéder 1 à 2% voire 4% pour des films décaféinés de toute leur humidité dans un vide poussé et traités à l'hydrogène pur. Enfin, l'émulsion photographique souffre de l'effet de non-réciprocité (dit de Schwarzschild) qui rendent inefficace les longues poses (au delà de la minute) par des effets de pertes et de recombinaisons dues au faible flux de photons incidents. En fait, il existe un seuil d'éclairement en dessous duquel rien n'est enregistré, et ce quelle que soit la durée d'exposition.

L'arrivée de l'électronique a été mise à profit pour réaliser des images télévision dans les années 50 grâce à des tubes électroniques. L'image est formée sur une couche photoémissive ou photoconductrice. Les photoélectrons créés sont lus par balayage d'un faisceau d'électrons qu'ils modulent. Cette modulation donne une ligne de l'image qui est par la suite traitée analogiquement. La finesse de ces images reste cependant mauvaise comparée à celle obtenue par le film argentique. Le seul avantage de ce système est de réaliser des images "en direct" sans les délais dus au développement inhérent à la photographie. Les tubes

Vidicons ont été optimisés pour un usage scientifique et ont même participé à l'imagerie des planètes lointaines lors des missions Voyager (1974). En mode vidéo, il subsiste dans cette technique un bruit élevé (2000 e-/pix/Hz) qui en limite l'usage pour des flux importants.

Les années 70 ont vu l'invention du premier capteur d'image optronique capable de réaliser des images de bonne qualité : le CCD (Charge Coupled Device). Ces capteurs existent depuis plus de 25 ans [CCDS] et ont acquis une maturité certaine. Les capteurs d'images sont de plus en plus utilisés dans le grand public (comescopes) et dans le monde professionnel. Les plus grands fabricants de circuits électroniques produisent par millions d'unités ce genre de capteurs. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications : surveillance, télévision, imagerie médicale...etc, leur utilisation s'étend de manière exponentielle avec l'usage des micro-ordinateurs où le grand public peut via des scanners, manipuler des images, et à travers des caméras de visioconférence converser avec l'image de l'interlocuteur à l'autre bout du monde. Ces systèmes offrent la possibilité d'acquérir et de mémoriser des images numériques, capables d'être reproduites à l'infini sans dégradation et dont la limitation de leur traitement ne tient qu'à celle de l'imagination humaine.

Des appareils photographiques numériques (où le film est remplacé par un détecteur matriciel électronique) commencent à apparaître sur le marché public et sont près de rivaliser avec la photographie argentique. Ils ont l'avantage de montrer l'image prise par l'opérateur de manière quasi immédiate à l'aide d'un petit écran, permettant le tri et l'élimination d'images jugées non satisfaisante.

Cet accroissement du nombre de capteurs d'images est dû en particulier au progrès constant de la micro-électronique, qui permet de concevoir des capteurs sans cesse plus petits, plus performants et toujours moins coûteux. Cette évolution est dépendante de la technologie de fabrication des circuits intégrés en silicium qui ne cesse de progresser, notamment par l'augmentation du nombre de couches métalliques employées et par la réduction de taille de la lithographie. Il y a trente ans, Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, avait prédit que le nombre de transistors implantés sur une puce doublerait tous les dix-huit mois. C'est exactement ce qui s'est passé, en particulier grâce à l'amélioration constante de la finesse de gravure. Aujourd'hui les puces les plus avancées sont fabriquées en technologie 0,25 μm , et on se prépare à passer en 0,15 μm dès l'an 2000 [DELB-95].

1.3 Les performances des capteurs électroniques

Les capteurs d'images utilisés de nos jours sont très performants en termes de sensibilité et de dynamique dans une large gamme de longueurs d'ondes, aussi bien dans le domaine rayons X et UV, visible (0,4-0,8 μm) que dans le proche infra rouge (0,8 μm à 2,5 μm) et l'infrarouge thermique (8 μm à 15 μm). Cette sensibilité dans une large bande spectrale a permis de créer des capteurs sensibles aux rayons X pour l'imagerie médicale, qui nécessitent quelques ordres de grandeur en moins en flux de rayons X par rapport à la photographie.

La diminution de la dose de rayons X, nécessaire pour réaliser une image correcte, permet sans risque, d'augmenter le nombre de prises de vues du patient. Dans le domaine UV, les capteurs d'images électroniques ouvrent la voie à l'imagerie par fluorescence, très utilisée également dans le domaine médical.

Il est impossible d'entreprendre ici une liste exhaustive du nombre d'applications potentielles dans le domaine visible de ces capteurs.

Dans le cas de l'imagerie infrarouge, basée sur l'émission « corps noir » des objets à température ambiante ou inférieure, les capteurs électroniques en technologie HgCdTe, InSb et Pt-Si sont utilisés pour la prise d'images météo la nuit par les satellites (impossible à réaliser en visible), pour la vision de nuit, la mesure de température sur une scène, la détection des départs de feux... etc. Ces capteurs infra rouges sont actuellement largement utilisés dans des applications militaires.

La résolution spatiale des capteurs d'images électroniques dépend de deux facteurs: la taille du pixel (ou point élémentaire d'échantillonnage de l'image) et du nombre de ces pixels dans les directions X et Y. On a vu précédemment que la photographie offre un grain (des pixels) de moins de 10 μm en moyenne, ce qui donne sur une image 24x36mm, plus de 2400x3600 points. Le problème de la résolution spatiale est encore plus critique dans le cas des capteurs infrarouge: les meilleurs capteurs infrarouges thermiques ont 256x256 points de résolution pour un prix avoisinant plusieurs MF. Cependant, nous ne traiterons pas ici ce type de capteurs.

Il existe des capteurs d'images électroniques dans le visible qui peuvent atteindre une grande résolution, mais ces capteurs sont excessivement coûteux, se lisent lentement, nécessitent une électronique externe importante, comportent de nombreux pixels défectueux et requièrent un système de lecture très gourmand en puissance. En bref, les exigences d'autonomie et de faible encombrement empêche une large diffusion dans le public d'un tel système pour le remplacement intégral de la photographie argentique. Actuellement, des efforts importants sont entrepris pour résoudre ces problèmes et un des objectifs de cette thèse est d'étudier un nouveau type de capteurs d'images basés sur la technologie CMOS.

1.4 Du CCD vers les capteurs CMOS APS

Il est clair qu'à l'heure actuelle le capteur CCD détient la réponse à la demande pour des applications en imagerie du domaine visible, UV, X et proche infra rouge [OPTING]. Le capteur CCD est suffisamment versatile pour se décliner pour des applications non scientifiques et scientifiques [MCLEAN]. Cependant, le CCD possède un grand nombre d'inconvénients comme par exemple, l'usage d'une technologie qui lui est spécifique : ceci sera examiné plus en détail dans le chapitre I.

L'arrivée pendant la décennie 90 de technologies ayant des lithographies sur silicium inférieures au micron, ouvre l'opportunité de la réalisation d'un concept plus ancien que celui du CCD : le capteur d'image MOS. Nous faisons allusion à un nouveau concept de capteur d'images, nommé APS (pour "Active Pixel Sensor", en anglais, ou "Capteur à Pixels Actifs", en français) apparu ces dernières années. Le concept APS consiste à intégrer des éléments actifs, tels que des transistors d'amplification dans les pixels afin de conserver la sensibilité du CCD, sans en avoir les inconvénients.

L'APS permet, en effet, d'obtenir une sensibilité similaire à celles des capteurs CCD, sans introduire de limites au niveau du nombre de pixels, car elle ne nécessite pas de nombreux transferts de charges comme c'est le cas pour le CCD [FOSS-93]. De plus, la technologie APS offre de nombreux autres avantages par rapport à la technologie CCD, notamment au niveau de la souplesse de lecture, des possibilités d'intégrer d'autres fonctions de traitements analogiques ou numériques sur le même circuit, et de diminuer sensiblement les coûts de fabrication. La technologie CMOS utilisée pour réaliser les APS s'intègre à 100% dans le monde de la VLSI (Very Large Scale Integration), dont elle permet d'utiliser toutes les bibliothèques (portes logiques, mémoires, processeurs) et bénéficie de faible temps de développement, puisqu'elle utilise des éléments déjà développés et qualifiés [SPIE-94].

1.5 L'étude réalisée dans cette thèse

Le groupe CIMI (Conception d'Imageurs Matriciels Intégrés) a commencé dès 1994 à entreprendre des études sur les capteurs d'images APS. Initialement (1988), les membres de cette équipe ont permis au groupe d'acquérir une grande expérience dans le développement de systèmes de camera CCD faible bruit - faible flux. La seconde partie du travail de thèse de J.Solhusvik [SOLH-96] portant sur les matrices APS, a permis d'initialiser ma propre thèse sur ce sujet, et au groupe CIMI de se tourner entièrement vers le développement de matrices APS. Notre étude poursuivant celle de J.Solhusvik est volontairement limitée aux APS réalisables en technologie CMOS bien que des APS soient réalisables avec d'autres technologies (BiCMOS, SOI...).

Notre travail a consisté en premier lieu, en une étude sur les types de pixels utilisables pour des structures APS, aux circuits nécessaires à la lecture de l'APS, aux méthodes d'adressages des pixels. Ce travail s'est poursuivi par la recherche d'une architecture la plus viable pour ces matrices. Ces travaux s'appuient sur la conception de plusieurs matrices APS en technologie CMOS, et de mise en œuvre des logiciels à Supaero pour effectuer les simulations et les dessins des matrices.

Ces matrices APS (cinq au total) ont bénéficié successivement :

- √ d'une caractérisation opto-électronique la plus vaste possible (en tenant compte des moyens matériels dont nous disposons).
- √ des améliorations issues de la caractérisation des matrices précédentes.
- √ d'une meilleure compréhension de certains paramètres, permettant leur optimisation (bruit, rendement quantique etc..)
- √ d'un plus grand nombre de pixels (sauf la dernière qui est une matrice comportant des pixels test)

Ces cinq conceptions ont toutes débouchées sur des "run" et sur des circuits opérationnels. Afin de qualifier et de caractériser les circuits APS que nous avons conçus, j'ai entrepris la réalisation d'un système de mesure de paramètres optoélectroniques des matrices. Ceci consiste tant en la partie optique (banc de mesure), qu'électronique (développement des cartes d'acquisition avec l'équipe CIMI) et qu'informatique (développement d'un logiciel PC pour les mesures de caractérisation).

De plus, des études théoriques ont été entreprises pour permettre :

- √ de comprendre les mécanismes dans le CMOS qui affectent la performance en rendement quantique des APS.
- √ d'évaluer les performances en termes de dynamique en fonction du pas du pixel et du type du pixel
- √ de cerner les paramètres qui influencent le niveau de bruit des circuits de lecture de l'APS.

1.6 présentation du plan de thèse

Le travail exposé dans ce mémoire comporte quatre chapitres. Pour une meilleure clarté de ce manuscrit, l'ordre des chapitres ne tient pas nécessairement lieu d'ordre chronologique du déroulement de ce travail.

Le **CHAPITRE I** traite de l'évolution des capteurs d'images et leur contexte, et de l'opportunité d'étudier et de réaliser les APS alors que les capteurs CCD ont envahi tous les domaines d'applications en capteur d'images.

Le **CHAPITRE II** comprend une investigation sur les différentes structures de pixels, à la recherche de ceux qui sont le plus aptes à être utilisés dans la conception de matrices APS. Les différents circuits de lecture seront étudiés et simulés, ainsi que les structures d'adressages. Enfin, quelques considérations seront prises en compte pour la réalisation de grandes matrices APS.

Le **CHAPITRE III** commence avec trois études théoriques sur les paramètres clés déterminant les performances des matrices APS. Une description des matrices APS de tests

réalisées est ensuite effectuée, ainsi que les moyens mis en œuvre pour les caractériser. Tous les résultats des mesures optoélectroniques sont décrits avec une comparaison aux performances des CCD. Le résultat de ces mesures sont confrontés à la théorie.

Le **CHAPITRE IV**, dernier chapitre, évoque les perspectives des matrices APS concevables dans le futur proche (optimisation du pixel, usage de nouvelles technologies sub-microniques et l'intégration de fonctions dans le périmètre de la puce de l'APS). Il donne quelques axes de recherche sur une suite que l'on pourrait donner à ce travail.

Les **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES** ont été placées à la fin de chaque chapitre, afin de faciliter leur accès.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE L'INTRODUCTION

- [MCLEAN] MCLEAN « *Electronic Imaging in Astronomy* » Ed. Praxis-Wiley
- [FOSS-93] FOSSUM, « *Active Pixel Sensors : Are CCD's Dinosaurs ?* », SPIE, Vol 1900, Feb 1993.
- [DELB-95] DELBECQ, "*Au-delà du Pentium Pro*", Enquête PC Expert, pg. 90-110, décembre 1995.
- [SOLH-96] SOLHUSVIK, « *Etude et conception de capteur d'images à Pixels Actifs et de l'électronique de traitement associée en vue d'application faible flux* », Mémoire de thèse, Supaero, 1996
- [SPIE-94] FOSSUM, « *Assessment of image sensor technology for future NASA missions*», SPIE vol. 2172 p38
- [OPTING] JANESICK, ELLIOTT, COLLINS, et al. "Scientific charge-coupled devices" Opt. Eng. vol. 26, no. 8, pg. 692-714, Aug. 1987
- [CCDS] HOWES & MORGAN "*Charge Coupled Devices and Systems*" Willey & Sons 1979