



HAL
open science

Imagerie numérique ultrarapide

Pierre Slangen, Nicolas Long, Pascal Picart

► **To cite this version:**

Pierre Slangen, Nicolas Long, Pascal Picart. Imagerie numérique ultrarapide. Techniques de l'Ingénieur - Mesures - Analyses Mesures mécaniques et dimensionnelles - Métrologie par imagerie et microscopie, , pp.Réf: R6733 v1, 2016. hal-02096839

HAL Id: hal-02096839

<https://hal.science/hal-02096839>

Submitted on 7 Dec 2020

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.

Imagerie numérique ultrarapide

Ultra High Speed Digital Imaging

par **Pierre SLANGEN**

Professeur

École des mines d'Alès, Laboratoire du Génie de l'Environnement Industriel - Institut des Sciences des Risques,
6 avenue de Clavières, 30319 Alès Cedex France

Nicolas LONG

Ingénieur expert en imagerie rapide et traitements d'images associés

Les Prés 30450 Concoules France

Pascal PICART

Professeur

ENSIM - École Nationale Supérieure d'Ingénieurs du Mans, LAUM - Laboratoire d'Acoustique de l'Université du
Maine, rue Aristote 72085 LE MANS Cedex 9 France

Résumé:

L'acquisition ultrarapide d'images assiste utilement l'œil humain et permet d'analyser le phénomène en laboratoire et dans l'industrie. Depuis l'avènement des caméras numériques à mémoire embarquée, des vitesses de 25000 images/s sont aujourd'hui atteintes au format mégapixel ; et même 10^6 images/s en décimant la résolution. Ces cadences folles sont permises en pleine résolution en utilisant des sites de stockage proches de l'image active, mais seulement pour quelques centaines d'images. La réponse des capteurs à une sollicitation lumineuse doit être très élevée et autorise ainsi des temps d'obturation très courts. Les progrès réalisés, en architecture des capteurs et en gestion de la mémoire de stockage, optimisent la bande passante pour le transfert de l'information... à pleine vitesse.

Abstract

High-speed imaging records images at much higher rate than human eye. This allows rendering the phenomenon and analyzing it in the laboratory/industry, where snapping the event is priority. Since the advent of digital onboard memory cameras (CCD and CMOS), record rates up to 25000 FPS are today reached for megapixel format. Decimating resolution leads to one million frames per second. These crazy cadences are permitted at full resolution using close storage sites of the active image, but only for a few hundreds of images. The response of the sensors to light solicitation must be very high and thus yields to very short shutter time. The progress, made in architecture of the sensors and storage management, optimize bandwidth for the transfer of information. ... in full speed.

Mots-clés / *Keywords* :

	français	anglais
Technologies impliquées	<i>CCD, CMOS, semiconducteurs</i>	CCD, CMOS, semiconductor
Domaines d'application	<i>Ralenti, Analyse du mouvement</i>	Slow motion, motion analysis
Description du contenu	<i>Capteurs d'images, Imagerie, temps résolu</i>	Image sensors, Imaging, time resolved

Table des matières

1	Points-clés historiques	4
2	Préambule	4
3	Imagerie rapide	4
4	Capteurs électroniques photosensibles	6
4.1	Effet photoélectrique	6
4.2	Architecture de la matrice	6
4.3	Matrices CCD	7
4.3.1	Fonctionnement du CCD	8
4.3.2	Transfert interligne	9
4.4	Matrices CMOS	10
4.5	Architectures complexes	13
4.6	Matrices CCD ultra-rapides à stockage in-situ	13
4.7	Technologies hybrides et derniers développements	15
5	Taille des capteurs	16
6	Bruit des capteurs	16
6.1	Courant d'obscurité	17
6.2	Bruit de photons	17
6.3	Bruit de quantification	17
6.4	Couverture de capteur : Référence au noir (Shading)	18
6.5	Éblouissement (blooming)	18
6.6	Dynamique extrême à double pente	19
6.7	Efficacité du transfert de charge (CCD)	19
6.8	Conversion en sortie (CCD)	20
7	Gestion de la mémoire	20
7.1	Mémoire externe	21
7.2	Mémoire embarquée	21
7.2.1	Mémoire tournante	21
7.2.2	Déclenchements	22
7.2.3	Synchronisation	22
8	Derniers développements	23
9	Applications	24
10	Bilan et attentes	26
	Glossaire - Définitions	27

Introduction

Le but des capteurs d'images est de retranscrire, le plus fidèlement possible, l'image d'un objet éclairé, ou d'une source lumineuse, formée par un système optique adéquat. Dans le cadre précis de l'imagerie numérique ultrarapide, la contrainte supplémentaire est d'effectuer cette opération de numérisation de l'image reçue en des temps très courts. La priorité est donc de disposer de capteurs électroniques très « sensibles », afin d'atteindre un rapport signal sur bruit satisfaisant en des temps d'exposition courts, et de pouvoir « rafraichir » l'image le plus rapidement possible pour accueillir la vue suivante sur le capteur d'images. Pour des temps d'exposition extrêmement courts, de l'ordre de la nanoseconde, il est encore requis de placer des amplificateurs de lumière devant le capteur semiconducteur. Ceci entraîne souvent une

chute de la résolution spatiale des images, directement liée au gain temporel réalisé. Le capteur rapide est donc principalement caractérisé par sa fréquence (ou vitesse) d'acquisition en images/s (ou frame/s).

Parmi les principaux types de semiconducteurs utilisés, nous nous attacherons principalement à décrire les deux grandes familles de capteurs opto-électroniques utilisés de nos jours : les capteurs CCD et les capteurs CMOS, et leurs variantes:

- CCD (« Charge Coupled Device »), qui réalise les opérations de Collection, Transfert et Conversion de la charge électrique générée par les photons incidents.
- CMOS (« Complimentary Metal Oxyde Semiconductor), qui réalise les opérations de Collection et Conversion sur le site de collection de la charge générée par les photons incidents.

Dépasser les limites de l'acquisition rapide d'images (sensibilité, compromis résolution-fréquence et nombre total d'images acquises) est le défi constant pour les concepteurs, qui doivent rivaliser d'astuces technologiques pour augmenter les performances atteintes. Deux grandes catégories de caméras rapides émergent depuis 15 ans : caméras CMOS et caméras CCD à stockage sur site. Si les premières sont de pures avancées technologiques des capteurs CMOS standards couplées à des techniques de transferts rapides à bord d'une mémoire interne à large bande passante, les secondes sont en progrès constants et permettent d'acquérir et de transférer très rapidement une image vers un site de stockage géographiquement très proche, au sens du chip électronique, de son lieu de collection (l'image active). Ainsi, des techniques hybrides utilisant des processus proches du fonctionnement du CMOS sont mises en œuvre à bord d'une technologie CCD. La seule limite réside en la vitesse de déplacement des électrons à bord des sites de collection et de stockage.

Ces caméras doivent répondre à un ensemble précis de spécifications techniques, actuellement définies par les utilisateurs et les fabricants. Elles sont notamment décrites par la European Machine Vision Association, sous l'appellation EMVA1288. Nous aborderons différents points relatifs à ces descripteurs, parmi lesquels la sensibilité, la linéarité, la fonction de transfert de modulation ainsi que quelques défauts régulièrement rencontrés. La comparaison des caméras numériques avec les caméras à film a également entraîné la définition du standard de sensibilité équivalente ISO 12232 pour les caméras numériques, avec quelques difficultés liées à la bonne volonté des fabricants dans sa mise en application.

L'utilisation des caméras rapides est fortement croissante, pour des applications qui privilégient le besoin de ralenti ou décomposition temporelle. Il n'est pas toujours nécessaire de courir à la plus haute fréquence d'acquisition, sachant que la contrainte budgétaire et les compromis techniques incontournables sont souvent des arguments supplémentaires. Le dernier cri en acquisition rapide se négocie au-delà des 100k€! Il est souvent obligatoire de réaliser un compromis vitesse/résolution/capacité lors de l'achat du système d'acquisition rapide.

Les systèmes d'analyse de mouvement sont en plein essor et permettent une décomposition fine, notamment dans le domaine sportif. La sécurité automobile fait couramment appel à l'acquisition rapide d'images, que ce soit en cas de crash test de véhicules à quelques milliers d'images par seconde, ou pour aider à la conduite en suivant des motifs à quelques centaines d'images par seconde. L'industrie de la défense en fait un usage intensif pour des raisons évidentes.

Mais le domaine de prédilection de l'imagerie rapide est la mécanique. En mécanique des solides, et notamment en mécanique de la rupture, où sont désormais atteints des niveaux de ralenti et de décomposition inégalés jusqu'alors, ou en mécanique des fluides, où l'on peut distinguer et suivre des particules dans des écoulements supersoniques. Tous ces moyens donnent aux scientifiques et aux ingénieurs la possibilité d'étudier finement les matériaux et les systèmes du futur.

1 Points-clés historiques

- 1970 : CCD (Bell Labs)
- 1974: Capteur CCD 100 * 100 pixels (Fairchild)
Sensibilité: IR et Visible
- 1993: Premier capteur CMOS (NASA JPL)
- 1999: Premier capteur CMOS rapide, 1000fr/s pour 0.25Mpx (Vision Research - Phantom)
- 2000: Capteur CCD 7186 * 9216 pixels (Philips)
Sensibilité: IR, Visible, X
- 2005: Capteur CCD InSitu, 100Mfps, 16images, 64 * 64 pixels (Dalsa)
- 2005: Premier capteur CMOS rapide 2 Mpixels (Vision Research - Phantom)
- 2007: Capteur CCD 9216 * 9216 pixels (Fairchild)
- 2007: Capteur CMOS SA1: 5400 fr/s pour 1Mpixel (Photron)
- 2008: Caméra CMOS v710 : 7500 fr/s pour 1 Mpixel, en couleurs et en noir et blanc (Vision Research – Phantom), straddle time 280 ns
- 2009: Capteur Dalsa pour Mamiya : 22Mpixels pour 36x48mm
- 2010: Capteur CCD In Situ Image Storage, 16Mfr/s 117images, 400 * 400 pixels (ISIS)
- 2012: Caméra CMOS v1610 : 16000 fr/s pour 1 Mpixel
- 2013: Capteur CMOS SAZ : 20000fr/s 1Mpixel, straddle time 158ns (Photron)
- 2013: Capteur CCD In situ : 2Mfr/s 180images, 924 * 768 pixels (Kirana)
- 2015: Caméra CMOS v2511: 26000fr/s pour 1Mpixel (Vision Research - Phantom)

2 Préambule

Cet article est une contribution aux articles déjà présents dans la base des Techniques de l'Ingénieurs et en particulier pour l'imagerie rapide "*Cinématographie ultra-rapide: Caméras mécano-optiques à haute résolution*" [R6730] (1993) "*Cinématographie ultrarapide: Caméras électroniques*" [R6732] (2006). Certains points sur les capteurs CCD et leurs propriétés ont également avantageusement été décrits pour les capteurs CCD dans "*Analyseurs d'images*" [E5520] (1997)". Quant aux notions d'optique relatives aux systèmes de lentilles utilisés pour la formation de l'image sur le capteur rapide, elles ont été récemment publiées dans "*Vision pour la robotique* [S7797] (2014)". Trois ouvrages de référence incontournables ont également été compulsés et constituent les piliers des travaux en acquisition rapide d'images [1][2][3]. Ces notions ont été compilées et assemblées en tenant compte des problèmes expérimentaux liés à l'application de l'imagerie ultrarapide et rencontrés par les auteurs au gré de leurs pérégrinations dans ce milieu qui ne peut pas rater ce qui est trop rapide pour être vu mais qui doit néanmoins être enregistré...

Les principales familles de capteurs sont décrites et les spécificités de chacune critiquées. Des applications dans des domaines variés avec leurs contraintes sont détaillées et les perspectives futures sont évoquées.

3 Imagerie rapide

Depuis une dizaine d'années, les progrès en acquisition rapide d'images sont impressionnants. Le passage des caméras à bobines de film photographique aux caméras numériques a supprimé de nombreux problèmes mécaniques liés à l'entraînement du film mais permet

surtout d'obtenir directement les images sans passer par un long et fastidieux processus de développement. Les caméras électroniques ont également fortement gagné en sensibilité, et donc en temps d'exposition, condition absolue au passage à de très hautes fréquences d'acquisition. La profondeur de numérisation des enregistrements est couramment de 10 ou 12 bits, ce qui permet un échantillonnage très fin des niveaux d'intensité lumineuse reçue (éclairage). Ces progrès sont directement liés à de nouvelles cartographies microélectroniques, qui permettent notamment de fabriquer des matrices de stockage d'image très proches géographiquement de l'image active. Cette proximité, couplée à des propriétés d'isolement électrique pour éviter d'éventuelles saturations par débordement, permet de transférer les images quasiment à la vitesse des électrons dans la matière. Le prix à payer pour ce genre de stockage in-situ rencontré sur certains capteurs CCD est par contre le nombre limité d'images stockées (quelques dizaines au plus), pour des cadences de l'ordre de 100Mfr/s. L'autre grande famille de caméras ultrarapides fait appel à la technologie CMOS, qui permet de convertir voire de numériser directement la charge créée par effet photoélectrique sur le pixel éclairé, et ainsi évite de nombreux cycles d'horloge liés aux transferts de la charge comme dans les CCDs. Notons également que l'augmentation des vitesses de transfert de l'image active est souvent réalisée au détriment de l'architecture et du taux de remplissage de l'image (surface réellement sensible, fill factor), du fait de l'espace occupé en surface par l'électronique de lecture, de transfert et de stockage. Des caméras rapides munies de petits capteurs CMOS peuvent couramment acquérir des images mégapixel à 500fr/s. On en retrouve d'ailleurs jusqu'à dans les appareils photographiques familiaux, voire même dans les smartphones, avec des pixels de $1.5\mu\text{m}$ dont la taille approche les limites de diffraction. Du point de vue des applications industrielles et scientifiques, ces architectures CMOS ont été récemment poussées jusqu'à des fréquences de 25000fr/s pour une image mégapixel. Lorsque l'image est décimée, cette cadence peut être augmentée proportionnellement à la bande passante du système de transfert (de l'image active à la mémoire de la caméra). Pour des imagerie, on peut donc également atteindre le Mfr/s avec des capteurs CMOS. Ceci requiert une sensibilité du capteur élevée (1Mfr/s impose au moins $1\mu\text{s}$ de temps d'exposition) et donc des pixels de taille importante (entre 20 et $28\mu\text{m}$). En effet, tout comme en photographie classique avec les grains d'argent, une sensibilité plus importante est obtenue au détriment de la résolution spatiale afin d'augmenter la section efficace. L'acquisition d'images en couleurs est un processus semblable à la photographie classique, où la capture de la couleur est soit réalisée via des filtres de couleur placés sur un capteur monochrome (avec une perte de résolution spatiale), soit obtenue par séparation chromatique par des prismes ou des réseaux, et une acquisition par autant de capteurs identiques que de séparations effectuées (avec une augmentation significative de l'encombrement et du budget). Citons encore que les progrès réalisés en acquisition rapide d'image sont également liés principalement à deux événements externes: la réalisation d'optiques rapides et corrigées des aberrations grâce à l'avènement de composants asphériques et/ou diffractifs mais aussi l'apparition de sources lumineuses continues ou pulsées intenses et non cohérentes comme les LEDs superluminescentes ou les lasers à supercontinuum. Les superLEDs permettent notamment d'oublier les projecteurs munis de lampes à décharge, qui avaient plutôt tendance à surchauffer l'objet plus qu'à l'éclairer, au vu de leur faible rendement lumineux par rapport au flux thermique émis. Par contre, les lasers permettent d'émettre des pulses lumineux très courts (de la nanoseconde, 10^{-9}s , à la femtoseconde, 10^{-15}s) avec des taux de répétitions très élevés ($\sim 10\text{kpulse/s}$). Pour un budget de quelques milliers d'euros, il est actuellement possible de se doter d'une caméra rapide capable de capturer des images d'un mégapixel à environ 1kHz en pleine résolution couplée à un système d'éclairage réalisé avec des LEDs superluminescentes. A contrario, l'acquisition pulsée en temps résolu de phénomènes hyper brefs nécessite des caméras dont le budget avoisine les 200k€ et des sources laser pulsées dont le budget est quasiment équivalent si les surfaces investiguées sont de quelques dizaines de centimètres carrés.

4 Capteurs électroniques photosensibles

Une charge électrique est créée en un pixel (pixel est la contraction de « picture element » : le plus petit morceau d'image) proportionnellement au niveau de lumière incidente en ce site. La complexité des capteurs d'images ultrarapides provient de la manière dont sont associés les pixels afin d'obtenir un résultat optimum en résolution spatiale et en résolution temporelle de la matrice finale.

4.1 Effet photoélectrique

Le capteur électronique photosensible le plus simple est une porte sensible à la lumière, appelée jonction semiconductrice (silicium, germanium) polarisée électriquement (capacité MOS, Metal Oxyde Semiconductor) afin de pouvoir conserver la paire électron-trou obtenue par effet photoélectrique lors de son éclairage par une source lumineuse qui émet dans la bande d'absorption spectrale de son substrat. L'effet photoélectrique est obtenu lorsque l'énergie du photon incident, directement proportionnelle à sa fréquence ν , est supérieure à la largeur de la bande interdite (*gap*) du semiconducteur (Figure 1).

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad [\text{éq.1}]$$

où E est l'énergie du photon, h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière dans le vide, et λ la longueur d'onde de la lumière incidente. E peut s'exprimer en Joule (J) ou en électron Volt (eV).

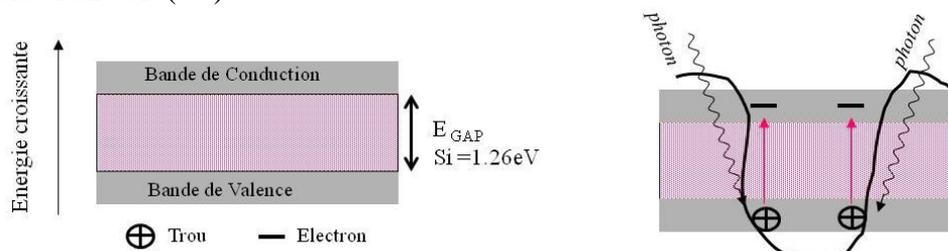


Figure 1 - Bandes d'énergie dans une photodiode au silicium et Effet photoélectrique

Chaque photon a une probabilité QE d'être converti en photoélectron. Cette probabilité est l'efficacité quantique du détecteur (QE : quantum efficiency). Le nombre d'électrons par seconde généré par un flux lumineux Φ (Watts) fourni un photocourant i_{ph} donné par la relation suivante :

$$i_{ph} = QE \frac{q\lambda\Phi}{hc} \quad [\text{éq.2}]$$

où q est la charge de l'électron.

4.2 Architecture de la matrice

La structure de la matrice est directement liée à son application. Les systèmes à transfert de bloc (frame « fr ») complet ou partiel, tendent à être utilisés pour les applications scientifiques. Les systèmes à transfert interligne sont utilisés pour les caméscopes grand-public et les systèmes de télévision professionnels. Les capteurs linéaires, à balayage progressif et ceux avec retard temporel et intégration (TDI) sont utilisés pour des applications industrielles. Le balayage progressif signifie simplement que l'image est balayée séquentiellement ligne par ligne (non entrelacée). Ceci est important pour la vision artificielle car il fournit un chronométrage précis et il possède un format simple. C'est bien sûr indispensable pour l'imagerie rapide. Toute application qui requiert de la numérisation et une interface avec un ordinateur fonctionnera probablement mieux avec de l'imagerie balayée progressivement. Toutefois, peu de moniteurs peuvent directement afficher ce type d'imagerie et une interface est requise. Les cartes de capture peuvent fournir cette interface. La limite ultime est de dédier une interface de lecture par pixel. Cette lecture directe sur le lieu de collection est obtenue dans le cas du capteur CMOS (Complimentary Metal Oxyde Semiconductor).

CMOS et CCD utilisent des photodiodes pour générer une charge électrique à partir de lumière. Leur différence réside dans la lecture directe sur le site de création pour le CMOS, tandis que la lecture ne s'effectue qu'après transfert sur un site de lecture pour le CCD.

Des grandes matrices de pixels peuvent augmenter leur vitesse de lecture via des sous-matrices grâce à des ports parallèles multiples affectés aux sous-matrices. Un compromis existe entre la vitesse de transfert de bloc et le nombre de ports parallèles (complexité du CCD) et de l'interfaçage avec l'électronique en aval. Comme chaque sous-matrice est traitée par des amplificateurs différents, que ce soit sur le chip ou en dehors, l'image peut présenter des variations locales en contraste et en niveau. Ceci est provoqué par des différences d'ajustement des niveaux et des gains de chacun des amplificateurs. Le paroxysme est atteint pour les capteurs CMOS, où chaque pixel possède son propre amplificateur. Actuellement, les grandes matrices peuvent être encore associées afin d'obtenir des réseaux de matrices pour plan focal (« Focal Plane Array »). Ceci est principalement utilisé pour des images très étendues et plus particulièrement pour des applications en astronomie.

La résolution spatiale est souvent présentée comme le nombre de pixels dans une matrice. La perception commune veut que "le plus grand est le mieux", tant en terme de taille qu'en profondeur de numérisation. Des matrices peuvent atteindre 9216×9216 avec une profondeur de 16 bits. Cette matrice requiert $9216 \times 9216 \times 16$ soit 1,36Gbits de stockage par image. La compression de ce type d'image peut s'avérer nécessaire si l'espace disque est limité. Pour perdre le moins de résolution possible, d'énormes progrès des algorithmes de compression ont été et sont encore réalisés. En imagerie rapide, ces algorithmes sont poussés à leur limite pour arriver à des algorithmes propriétaires qui permettent le transfert et le stockage d'images au format brut (RAW) sans perte d'information. Pour augmenter la résolution temporelle de la séquence d'images, on tend vers une accélération de la fréquence d'acquisition et de la vitesse de transfert des images. Toutefois, l'utilisateur de ce type d'acquisition devra décider quelles images sont significatives et via des algorithmes de réduction de données, enregistrer celles qui ont de la "valeur" et déterminer des critères de pertinence. À défaut, il risque d'être submergé par des montagnes de données à traiter... et à stocker.

4.3 Matrices CCD

Les capteurs CCD (Charge Coupled Device : systèmes à transfert de charges) font référence à une architecture semiconductrice dans laquelle la charge est transférée via une aire de stockage. La plupart des détecteurs opérant dans la région du visible utilise une architecture CCD pour déplacer le paquet de charge, ils sont communément appelés matrices CCD. Leur architecture a trois fonctions de base, outre la création de la charge:

- collection de la charge,
- transfert de la charge,
- conversion de la charge en une tension mesurable.

Comme les matrices opérant dans le visible sont des systèmes monolithiques, la génération de la charge est souvent considérée comme la fonction initiale du CCD. L'effet d'agrégation de tous les pixels produit une représentation échantillonnée de la scène continue. Les paquets de charge sont transférés séquentiellement de capacité à capacité jusqu'à ce qu'ils soient mesurés au nœud de détection. Pour certains systèmes, et notamment les systèmes à transfert interligne, des photodiodes créent la charge. Après la génération de la charge, le transfert vers le nœud de conversion (où la charge est convertie en tension) se produit dans des capacités MOS pour tous les systèmes.

Bien que les matrices CCD soient du domaine public, leur fabrication reste complexe. Le nombre d'étapes nécessaire à leur réalisation peut varier entre une dizaine et une centaine suivant le degré de complexité de leur architecture.

Les systèmes peuvent être décrits fonctionnellement d'après leur architecture (transfert de bloc ("frame"), transfert interligne, ...) ou d'après leur application. Pour minimiser les coûts, la

complexité de la matrice, et le traitement électronique, l'architecture est typiquement choisie pour une application spécifique (« ASIC : Application Specific Integrated Circuit »). Par exemple, les caméras astronomiques utilisent classiquement des matrices à bloc complet ("full frame"), tandis que les systèmes vidéo utilisent généralement le transfert interligne. Enfin, la séparation entre la télévision professionnelle, les utilisateurs de caméscopes, la vision artificielle, et les applications scientifiques ou militaires devient de plus en plus ténue avec les progrès de la technologie.

4.3.1 Fonctionnement du CCD

Après génération de la paire électron-trou par une porte MOS, l'électron reste dans la zone de déplétion tandis que le trou se dirigera vers l'électrode de terre. La quantité de charge négative (électrons) qui peut être collectée est proportionnelle au voltage appliqué, à l'épaisseur d'oxyde et à la surface de l'électrode de porte. Le nombre total d'électrons qui peut être stocké est appelé contenance du puits (FWC, "full well capacity"). Cette contenance sera ensuite discrétisée en niveaux de gris. Elle contribue notamment à la dynamique du capteur. Quand la longueur d'onde augmente, les photons sont absorbés à une profondeur croissante. Ceci limite notamment la réponse aux longueurs d'onde courtes. Il existe actuellement des capteurs pouvant fonctionner de l'infrarouge lointain aux rayons X.

Le registre CCD consiste en une série de portes. La manipulation de la tension de porte, d'une manière systématique et séquentielle, transfère les électrons d'une porte à l'autre à la manière d'un convoyeur. Pour le transfert de charge, les zones de déplétion doivent se chevaucher. Les zones de déplétion sont en gradient et les gradients doivent se chevaucher pour que le transfert de charge se produise.

Chaque porte a sa propre tension de contrôle qui varie en fonction du temps. La tension est un signal carré et est appelé horloge, ou signal d'horloge. Lorsque la tension de porte est basse, elle agit comme une barrière tandis que lorsque la tension est élevée, la charge peut être stockée.

Un pixel peut être constitué de plusieurs portes (de 2 à 4, voire plus), encore parfois appelées phases du système (Figure 2).

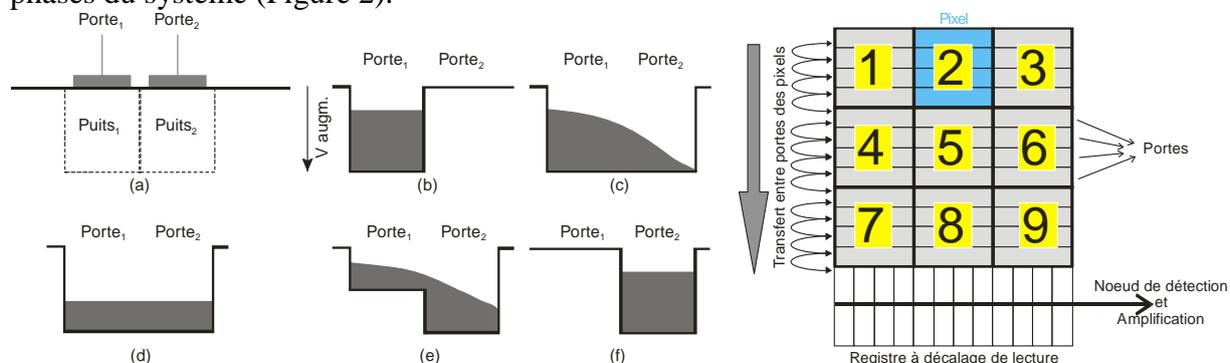


Figure 2 – Transfert de charge entre deux portes adjacentes

Principe du transfert de charge pour un capteur 3x3 pixels à quatre phases par pixel (encadré pour le pixel numéro 2) : Schéma général

Au départ, une tension est appliquée à la porte 1 et les photoélectrons sont collectés dans le puits 1 (b). Quand une tension est appliquée à la porte 2, les électrons se déplacent vers le puits 2 à la manière d'une cascade (c). Ce processus est rapide et la charge s'équilibre rapidement dans les deux puits (d). Lorsque la tension est réduite à la porte 1, le puits de potentiel décroît et les électrons s'écoulent à nouveau en cascade dans le puits 2 (e). Finalement, lorsque la tension de la porte 1 approche de zéro, tous les électrons sont dans le puits 2 (f). Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à ce que la charge soit transférée à travers tout le registre à décalage.

La matrice CCD est une série de registres en colonnes. Après l'exposition et génération de charge par effet photoélectrique pour chaque pixel, la charge est conservée dans les lignes ou dans les colonnes par des canaux ou des blocs d'arrêt et les régions de déplétion ne se

chevauchent que dans une seule direction (descendante pour les colonnes, et horizontale pour la ligne de lecture). Le transfert de charges s'effectue d'abord de ligne à ligne par les sauts des portes intra puis inter-pixels (Figure 3). À la fin de chaque colonne se trouve un registre horizontal de pixels. Ce registre collecte une ligne à la fois puis transporte les paquets de charge en mode série vers un amplificateur de sortie. L'entièreté du registre série horizontal doit être synchronisé avec le nœud de détection avant que la ligne suivante n'entre dans le registre série (Figure 3). Pour cela des horloges verticales et horizontales séparées sont requises pour toutes les matrices.

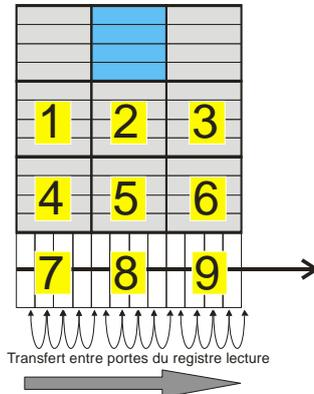


Figure 3 - Principe du transfert de charge pour un capteur 3x3 pixels à quatre phases : Transfert d'une ligne complète et arrivée au point de conversion

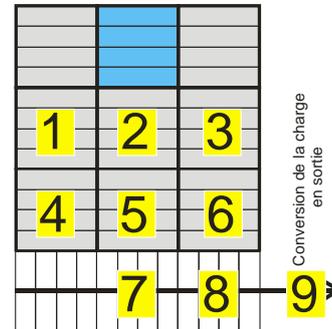


Figure 4 - Principe du transfert de charge pour un capteur 3x3 pixels à quatre phases : Transfert du registre de lecture et conversion du pixel 9

L'interaction entre plusieurs milliers de transferts réduit le signal de sortie. La capacité à transférer la charge est spécifiée par l'efficacité de transfert de charge (*charge transfer efficiency*, CTE). Bien qu'un nombre quelconque de sites de transfert (portes) peut être utilisé par pixel à la surface du détecteur, généralement deux à quatre portes suffisent, voire même un système à phase virtuelle qui ne demande qu'une seule horloge.

Pour chaque système mentionné, l'étape finale du processus est de convertir le paquet de charge en une tension mesurable (Figure 4). Ceci est réalisé par une diode flottante ou une diffusion flottante. La diode, agissant comme un condensateur, génère une tension proportionnelle au nombre d'électrons, n_e . Le signal peut ensuite être amplifié, traité et encodé numériquement par des processeurs électroniques indépendants du détecteur CCD.

Avec plusieurs matrices, il est possible de déplacer plus d'une ligne de charge dans le registre série. Similairement, il est possible de déplacer plus d'un élément du registre série dans une porte de sommation juste avant le nœud de sortie. Ceci est appelé groupement de charge, «binning», «super pixeling», ou encore «agrégation de charges». Le binning augmente le signal de sortie et la dynamique du signal, mais au détriment de la résolution spatiale du capteur. Parce qu'il augmente le rapport signal sur bruit, le binning est intéressant pour des applications à faible niveau lumineux dans des cas où la résolution est peu importante. Les registres série et le nœud de sortie demandent des puits d'une contenance de charge plus élevée pour le binning. Si le condensateur de sortie n'est pas rafraîchi après chaque pixel, alors il peut accumuler la charge. Le binning est présent sur certains types de caméras rapides. Il faut également vérifier les données constructeur qui peuvent parfois se targuer d'excellentes cadences d'acquisition...mais seulement à binning élevé, et donc à résolution moindre.

4.3.2 Transfert interligne

L'arrangement le plus simple est la matrice linéaire ou simple ligne de photoportes.

Les matrices linéaires sont utilisées dans des applications où soit la caméra, soit l'objet, se déplace dans une direction perpendiculaire à l'alignement des capteurs. Elles sont utilisées lorsqu'un contrôle sévère est imposé sur le mouvement comme, par exemple, lors d'un scanner de document.

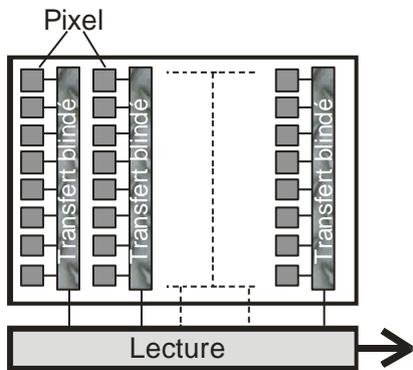


Figure 5 – Architecture d'un capteur à transfert interligne

Le registre à décalage du CCD se trouve juste à côté de chaque détecteur. Le registre est également par nature sensible à la lumière et est donc couvert, ou blindé, par un écran opaque métallique. La taille totale du pixel est limitée par la taille de la porte. La résolution est inversement proportionnelle à l'écart entre chaque détecteur (« pixel pitch »). S'il existe également des matrices à transfert de bloc, nous nous limiterons aux matrices à transfert interligne (« Interline Transfer ») qui sont constituées d'une série de photodiodes séparées par des registres verticaux de transfert recouverts par un blindage optique métallique (Figure 5).

Après intégration, la charge générée par les photodiodes est transférée vers les registres CCD verticaux en 1µs environ. Le principal avantage du transfert interligne est que le transfert des pixels sensibles aux pixels de stockage est rapide. Il n'y a donc pas besoin d'obturer la lumière incidente. Ceci est communément appelé "obturation électronique". Le désavantage est qu'il laisse moins de place à la partie active du pixel. Le blindage agit comme un store vénitien qui obscurcit la moitié de l'information présente dans la scène. Le facteur de remplissage surfacique ("area fill factor") peut être aussi bas que 20%. Toutefois, on peut y remédier en apposant des microlentilles juste devant la surface du capteur, et ce afin de rediriger la lumière vers les cellules sensibles (Figure 6).

Le facteur de remplissage optique n'atteindra toutefois pas 100% à cause de légers désalignements ou d'imperfections du système de microlentilles, d'aires blindées non symétriques, et de pertes en transmission. Comme la tension de sortie de la caméra dépend de la taille effective du capteur, augmenter le facteur de remplissage avec des microlentilles augmente la taille effective du détecteur et ainsi la tension de sortie.

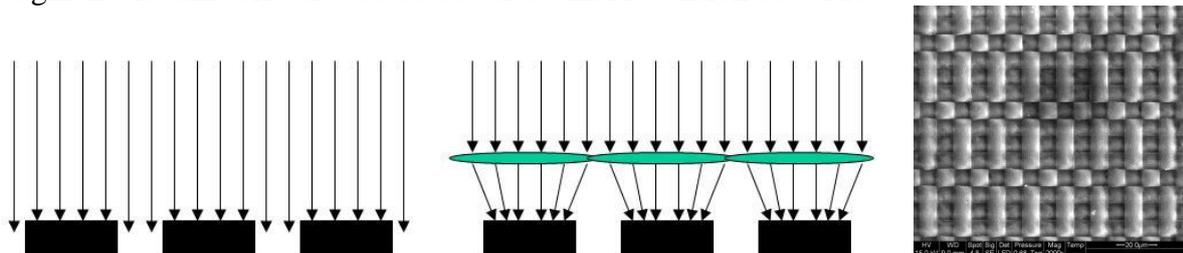


Figure 6 – Effet des microlentilles pour un capteur à transfert interligne, et vue au MEB pour un capteur réel (source EMA)

4.4 Matrices CMOS

Les capteurs CMOS sont apparus au début des années 1990. Les CMOS peuvent être considérés comme une évolution finale du CCD qui optimise la vitesse de lecture en permettant notamment une conversion de la charge sur le site de génération via à un amplificateur de charge sur le photosite de génération (*active pixel sensor*). Cette particularité permet également de supprimer de nombreux transferts et d'accroître la vitesse globale de lecture. Leurs principaux avantages sont issus de leur fabrication:

- Fabrication identique (90%) aux chips informatiques (et plus particulièrement la DRAM Dynamical Random Access Memory),
- Production de masse à bas coût,
- Conversion directe de la charge sans transfert : pas de blooming ni de smearing,

- Chaque pixel a son propre ampli, pas de shift register : Active Pixel Sensor,
- Chaque pixel est adressable individuellement, lecture partielle autorisée,
- Pas d'horloges compliquées,
- Faible consommation électrique (100 fois moins que CCD),
- Cadence de lecture élevée.

Leur émergence par rapport aux capteurs CCD depuis quelques années est directement liée à leur utilisation en téléphonie mobile comme caméra ou comme appareil photo embarqué. Ceci est une conséquence directe de leur fabrication à bas coût et de leur faible consommation.

Pour les applications scientifiques, c'est leur vitesse de fonctionnement (cadence image), liée à la conversion de la charge sur le site de création, qui privilégie leur utilisation aux CCDs.

D'autre part, la possibilité de piloter (en manuel ou en automatique) chaque pixel indépendamment des autres favorise leur utilisation en vision pour des scènes fortement contrastées. Le biais introduit par leur fonctionnement peut toutefois générer de fortes différences entre les images perçues par l'œil humain et l'image brute issue d'un capteur CMOS. En effet, en mode complètement libre, les amplificateurs de chaque pixel peuvent ainsi limiter ou augmenter le signal et induire une image avec un contraste très faible.

C'est dans ce contexte et pour ces raisons que s'est développé l'usage massif du CMOS en imagerie rapide [4].

La taille des pixels des capteurs CMOS est voisine de celle des CCD et peut approcher le micromètre dans certains cas. Un autre problème apporté par la technologie CMOS est une perte de résolution spatiale par la présence de l'amplificateur A sur le photosite (un peu comme le nerf optique sur la rétine pour l'œil humain...). Ceci est illustré à la Figure 7 (surface sensible en gris et amplificateur A). Au début, un seul transistor était utilisé pour l'amplification. À présent, ces amplificateurs peuvent comporter de 3 à 5 transistors (*3T et 5T CMOS*) et le facteur de remplissage peut fortement diminuer.

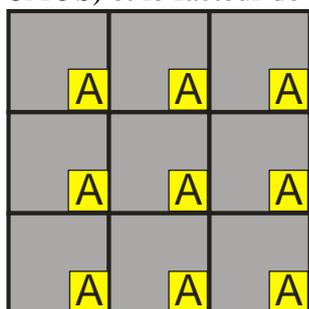


Figure 7 – Principe du capteur CMOS

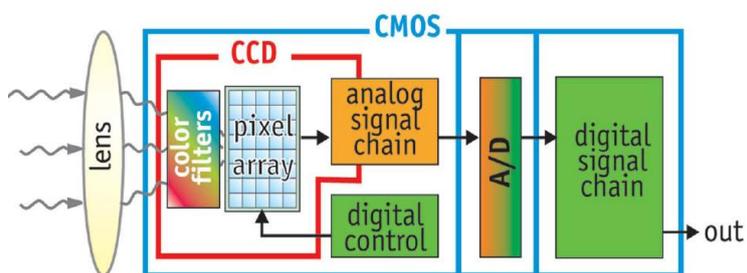


Figure 8 – Évolution du capteur CMOS vers la "smart caméra" (source DALSA)

Cette perte peut néanmoins être compensée par l'utilisation de microlentilles, tout comme pour les CCD à transfert de ligne. Le facteur de remplissage est toujours plus élevé pour des Full Frame CCD que pour des capteurs 3T CMOS. Pour certains modèles de CMOS, on peut également noter que même si la quantité d'information transférée est élevée, les performances en termes de rapport signal à bruit peuvent être inférieures à celles des CCD.

Toutefois, leur utilisation est grandissante en photographie numérique et de nombreux fabricants les incluent à leur boîtier numérique. Depuis 2007, on avoisine et on dépasse le format 24×36mm cher à la photographie, par des capteurs CMOS de plus de 12,4Mpixels effectifs. Plus récemment, on associe le CMOS à un convertisseur analogique/numérique par colonne, ce qui améliore la vitesse d'acquisition numérique jusqu'à près de 10im/seconde ... pour 12,4Mpixels. Enfin, on tend vers des caméras intelligentes (*smart cam*), où grâce à la rapidité de transfert du CMOS couplée à du traitement embarqué, une image interprétée est directement disponible en sortie.

La Figure 8 présente le schéma comparatif des différentes possibilités d'acquisition d'une image. L'avènement de ces caméras intelligentes, y compris et en particulier celles équipées d'une électronique de traitement de type FPGA, permet d'imaginer l'application en temps réel

d'opérateurs de type détection de contours ou de formes. Ces opérateurs ne sont en rien des gadgets. Ils permettent d'une part de faciliter et d'optimiser la prise de vue, par exemple en permettant de régler, en « live », la mise au point par contraste maximal. D'autre part, en analyse du mouvement, les caméras rapides "intelligentes" sont utilisées à des cadences proches de 5000fr/s pour le mégapixel. Les corps dont le mouvement est à identifier portent des marqueurs collaboratifs qui réfléchissent spécifiquement l'éclairage synchronisé à la capture d'image. Le signal de sortie, après post-traitement par le logiciel de la caméra, ne comprend que les points lumineux et permet ainsi de tirer le meilleur parti de la bande passante du système.

La technologie des capteurs CMOS évolue également spatialement. Dans une des dernières générations (Sony IMX021), le changement de disposition des photodiodes, qui pivotent de 45°, permet de gagner en résolution, jusqu'à 1,4 fois la résolution d'un capteur CMOS conventionnel de mêmes caractéristiques. Cette nouvelle structure permet d'obtenir des images de haute qualité avec un bruit réduit.

Quant aux capteurs Sony Exmor R, leurs photodiodes ne sont pas à la même place que sur les capteurs classiques. Ce type de capteur, dit « illuminé par l'arrière », correspond à un capteur « retourné » et aminci (Figure 9). La surface photo-sensible se trouve alors juste en dessous du filtre de couleur, ce qui permet d'augmenter la sensibilité et de beaucoup diminuer le bruit. Leur sensibilité est dès lors également renforcée pour les longueurs d'ondes courtes (Figure 9). En effet, l'efficacité quantique (« QE ») mesure la qualité de transformation lumière/charge pour un capteur. Elle est de l'ordre de 40% pour les CCD illuminés de face, soit 40 photons détectés pour 100 photons incidents (les films photographiques et l'œil humain ont une efficacité quantique maximale de ...10%).

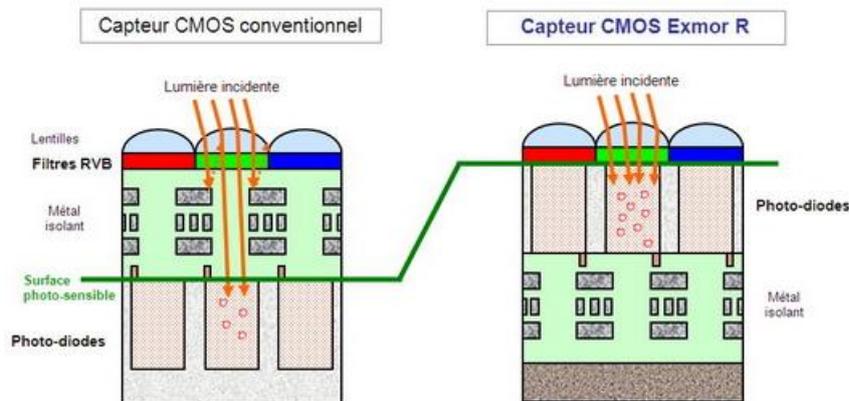


Figure 9 – Principe du capteur CMOS illuminé par l'arrière (ici capteur EXMOR R, source SONY)

A l'inverse, des efficacités quantiques supérieures à 90% peuvent être atteintes pour certaines longueurs d'onde, avec des capteurs amincis et éclairés par l'arrière.

La transmittance du polysilicium diminue graduellement de l'infrarouge vers des longueurs d'ondes qui tendent vers 600nm; et pour des longueurs d'onde inférieures à 400nm, le polysilicium est opaque. L'extension de la sensibilité spectrale est obtenue en utilisant des phosphores disposés à la surface du capteur. Ces phosphores absorbent par exemple l'ultraviolet (120 à 450nm) pour réémettre dans la fenêtre de sensibilité maximale du composant (540-580nm) (*extended and enhanced sensitivity*).

Les capteurs CCD et CMOS ont à présent des coûts comparables à volume équivalent.

Pour des applications performantes, la décision n'est pas liée à « CCD ou CMOS ? » mais bien à l'adéquation du produit à la tâche finale. On gardera en mémoire que si les CMOS permettent des hautes cadences (>20kfr/s pour le Mégapixel), les CCD restent toutefois meilleurs pour leur dynamique élevée (76 dB) et un facteur de remplissage plus conséquent, voire même une meilleure sensibilité intrinsèque (QE > 55%).

4.5 Architectures complexes

À titre indicatif, en imagerie classique, les derniers développements réalisés en architecture par différents fabricants (Sony, Fuji, Dalsa) font appel à des structures de fabrication qui permettent d'optimiser tant le facteur de remplissage que la vitesse de lecture. En particulier, des dispositions hexagonales, ou des groupes de pixels de différentes sensibilités, intrinsèque (en éclairement S pour élevée, R pour réduite) et en longueur d'onde, sont utilisés. Quelques architectures sont présentées à titre d'exemple (Figure 10).

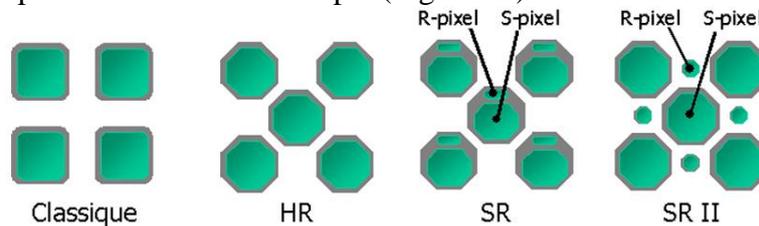


Figure 10 – Architecture des Super-CCD (source Fuji)

La Figure 11 reprend les tendances actuelles pour les capteurs d'images avec à gauche un taux de remplissage plus élevé, et des fonctionnalités moindres, et à droite une complexité architecturale plus élevée et des fonctionnalités étendues.

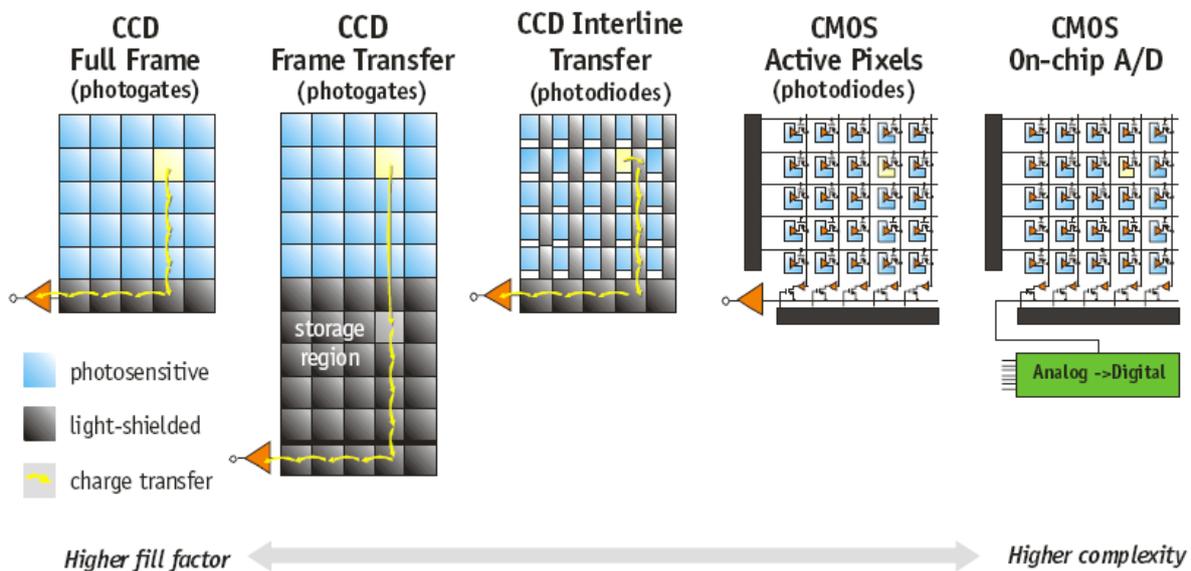


Figure 11 – Complexité architecturale et facteur de remplissage des capteurs (source Dalsa)

Pour rester dans le cadre de l'imagerie rapide, nous nous focaliserons sur le stockage in situ de grandes matrices.

4.6 Matrices CCD ultra-rapides à stockage in-situ

Cette partie s'attache plus spécifiquement au domaine de l'imagerie dite «ultra-haute cadence», communément définie par des cadences supérieures à 100 000 images par seconde. Comme nous l'avons vu plus haut, le développement de matrices CMOS rapides dédiées à l'enregistrement de durées de l'ordre de quelques dixièmes de secondes à quelques secondes se heurte encore aujourd'hui à des barrières technologiques qui les limitent à quelques dizaines de Gigapixels par seconde. C'est à dire que ces capteurs restent cantonnés à des résolutions très nettement inférieures au Mégapixel [3][10] lorsqu'il s'agit d'aborder des cadences de l'ordre de plusieurs centaines de milliers voire de millions d'images par seconde. Une faible résolution reste un compromis tout à fait acceptable pour de nombreuses applications, en particulier là où l'incertitude temporelle quant au déroulement du phénomène et l'établissement de l'enchaînement temporel d'un ensemble d'évènement reste le principal objectif. Dans de tels cas, l'enregistrement d'un grand nombre d'images reste nécessaire et les architectures de caméras à base de RAM embarquée sont totalement incontournables.

A l'inverse, certaines applications sont caractérisées par une connaissance *a priori* relativement précise de la chronologie des évènements, qui permettrait de travailler selon une logique de déclenchement pré-établie [2].

Il convient de préciser ici que, s'agissant de cadences d'enregistrement supérieures à 100000images/s, ladite connaissance de la chronologie des évènements se doit d'atteindre une précision de l'ordre de la microseconde au moins, et plus typiquement de l'ordre de la centaine de nanosecondes.

Il est évident que les évènements remplissant ce type de conditions sont relativement peu nombreux. Cependant, il existe des moyens d'améliorer cette connaissance chronologique, l'un d'entre eux étant précisément l'usage des caméras CMOS rapides «classiques» évoquées plus haut. Le problème de l'établissement d'une chronologie précise étant résolu, restent désormais les besoins auxquels ne peuvent satisfaire les caméras CMOS, et en particulier la résolution des clichés.

Un premier type de réponse à ce besoin a été apporté depuis fort longtemps, c'est à dire depuis les premières expériences de Muybridge, au travers de la multiplication des capteurs [2].

L'usage de plusieurs appareils photographiques déclenchés les uns après les autres avec la précision temporelle requise remonte jusqu'à la naissance de l'imagerie rapide, c'est à dire à la chronophotographie. On pourrait considérer que cette approche répond à tous les besoins, pour peu qu'on puisse économiquement se permettre de s'équiper d'autant d'imageurs que d'images requises...

Pour autant, la limite incontournable qui veut que chaque imageur soit situé dans l'espace à un emplacement très légèrement distinct de celui de ses voisins n'est pas sans poser problème. D'une part, cela conduit théoriquement à multiplier le nombre de chemins optiques (donc potentiellement le nombre d'objectifs photographiques en plus du nombre d'imageurs).

D'autre part, lorsqu'il s'agit d'appliquer des techniques de dépouillement avancées, et notamment de réaliser une comparaison spatio-temporelle entre les différents clichés obtenus, le fait que ceux-ci aient été pris depuis des points de vue distincts pose de réels problèmes opérationnels (calibration distincte et spécifique pour chaque imageur, corrélation entre clichés quasi impossible, etc.). La solution à ces deux problèmes a longtemps été de tenter de réunifier les chemins optiques en un seul. L'usage de prismes et miroirs, fixes ou tournants, permet ainsi relativement facilement de se contenter d'un seul objectif photographique, puis de projeter l'image obtenue via celui-ci sur les différents imageurs, en séparant le chemin optique en plusieurs sous-branches (via un jeu de prismes fixes le plus souvent) ou en présentant successivement les imageurs dans l'axe du chemin optique (via un jeu de prismes ou miroirs tournants ou un système de carrousel d'imageurs).

On comprend bien que ces solutions sont par nature extrêmement complexes et lourdes à mettre en œuvre et que, par conséquent, leur usage s'en est trouvé limité à quelques centres de recherche « stratégiques », le plus souvent proches du domaine de la défense.

Cependant, récemment, une équipe anglo-saxonne [12], puis un groupe de chercheurs japonais [6], ont envisagé des possibilités innovantes pour répondre à ce besoin spécifique.

Leur idée consistait à réutiliser le principe du capteur interligne, qui intercale un espace de stockage intermédiaire au niveau du capteur lui-même, entremêlé dans la trame du capteur.

Comme on l'a vu plus haut, ce stockage « sur site » présente notamment l'intérêt de permettre un transfert de charges extrêmement rapide de la zone photosensible d'un pixel vers la zone de stockage, puisque celles-ci sont contiguës. On peut donc ainsi imaginer une obturation électronique extrêmement rapide (le transfert des charges hors de la zone photosensible jouant ce rôle) et un temps extrêmement court entre l'acquisition de deux images successives (simplement égal au temps de transfert des charges), typiquement quelques dizaines de nanosecondes au plus.

Poussant la logique du CCD interligne un peu plus loin, l'équipe japonaise [6] a imaginé de flanquer chaque pixel non pas d'une seule zone de stockage de charges mais d'une centaine d'entre elles. Ces capteurs CCD, dits « ISIS » (In-Situ Image Storage) peuvent ainsi généralement stocker une centaine d'images au niveau du capteur lui-même, et enchaîner les

prises de vue à des cadences de plusieurs centaines de milliers voire de millions d'images par seconde. A l'inverse des CMOS rapides évoqués plus haut, absolument rien dans cette technologie n'impose de restreindre la résolution (nombre de pixels) mise en œuvre pour atteindre de telles cadences. Ainsi, il est devenu tout à fait concevable d'atteindre des résolutions de l'ordre du Mégapixel à des cadences de quelques millions d'images par seconde au travers de cette technologie, avec comme principale limite le nombre de sites de stockage, lui-même limité principalement par la taille du pixel.

Des vitesses supérieures à 5Tpx/s sont obtenues, avec des travaux de recherche [8][9][13] montrant (par la simulation, faute de débouchés industriels à ce jour), la possibilité d'atteindre 1Gfr/s, c'est à dire de s'approcher de plusieurs centaines de Tpx/s, voire du Ppx/s.

Cependant ces technologies sont également affectées par d'autres problématiques (fill factor faible de l'ordre de 10%, efficacité quantique faible de l'ordre de 10% elle aussi, donc sensibilité très faible, et temps de lecture très longs, de l'ordre de 100 ms par image) [14], pour lesquelles la recherche devra trouver des réponses avant que ce type de capteur ne se développe au-delà de quelques très rares applications extrêmement spécialisées.

4.7 Technologies hybrides et derniers développements

Dans la mesure où les développements dans le domaine des capteurs avec stockage in-situ se sont longtemps cantonnés à la technologie CCD ; il en résultait alors une lecture lente donc un taux de répétition extrêmement limité et la quasi-impossibilité d'offrir un mode « temps réel », même à vitesse moyenne.

Les premières tentatives visant à adopter une approche similaire avec des capteurs CMOS avaient elles aussi montré des résultats peu satisfaisants [12].

L'initiative « uCMOS » (pour « ultra-high-speed CMOS ») est alors apparue [10], en choisissant une approche hybride: photodiode « à la CMOS » pour la conversion photons-électrons, cellules de stockage de type CCD, et transistors CMOS pour le reset, la lecture et la sélection des zones d'intérêt.

Des vitesses de l'ordre de 3.5Tpx/s sont ainsi obtenues pour ce type de capteur le plus répandu, qui offre 0.7Mpx à 5Mfr/s, avec une capacité de stockage de 180 images [10][11].

Celui-ci est capable de fonctionner en mode « buffer circulaire » et par conséquent d'enregistrer en boucle en attendant un signal de déclenchement, tout en positionnant la séquence finale de manière précise « autour » (i.e. avant, après, ou de part et d'autre) de l'instant de réception du signal de déclenchement, à l'image des capteurs CMOS rapides «classiques».

Les principaux inconvénients de cette technologie restent une capacité de stockage malgré tout limitée, un « fill factor » extrêmement faible (autour de 10 %) [14] avec tous les artefacts que cela induit, une efficacité quantique extrêmement faible (quelques pourcents), conduisant donc à une sensibilité elle aussi extrêmement faible.

On parle donc ici d'une sensibilité deux à trois ordres de grandeur en dessous de celle des capteurs CMOS issus de l'état de l'art en matière de vidéo rapide traditionnelle.

Les contraintes inhérentes sont évidentes : les temps d'exposition extrêmement faibles induits par des fréquences d'acquisition de l'ordre de plusieurs millions d'images par seconde viennent se conjuguer à cette faible sensibilité pour conduire à la nécessité d'illuminer de manière extrême (c'est à dire des centaines de milliers à des millions de lumens), de se cantonner à des événements eux-mêmes extrêmement lumineux (principalement des phénomènes explosifs) [2], ou de travailler d'une manière ou d'une autre avec des lasers.

Il en découle que ces capteurs sont à ce jour très majoritairement limités aux recherches militaires, ainsi que dans quelques rares laboratoires de recherche en Physique avancée.

Aujourd'hui, les principales pistes d'amélioration explorées consistent à basculer vers une architecture illuminée par l'arrière [7][8], permettant d'augmenter considérablement le fill factor, tout en conservant la logique hybride CCD/CMOS, et en l'associant à une architecture MCG (« multi collection gate », grille de collecte multiple) [14].

5 Taille des capteurs

Au départ, les caméras étaient dotées de capteurs dont la taille devait s'approcher le plus des standards des caméras à films ou des caméras à tube, avec un lien direct à la diagonale du capteur. Si c'est encore le cas de nos jours, des capteurs de grande taille sont apparus et permettent à présent de couvrir des surfaces bien plus élevées. Les valeurs standards sont présentées ainsi que quelques tailles hors normes de nouveaux capteurs rapides (Tableau 1).

Tableau 1 – Taille des capteurs et des pixels associés

TAILLE DU CAPTEUR	TAILLE STANDARDISÉE	DIAGONALE MATRICE	TAILLE DU PIXEL (H x V)
1 pouce	12.8 mm x 9.6 mm	16 mm	20 µm x 20 µm
2/3 pouce	8.8 mm x 6.6 mm	11 mm	13.8 µm x 13.8 µm
1/2 pouce	6.4 mm x 4.8 mm	8 mm	10 µm x 10 µm
1/3 pouce	4.8 mm x 3.6 mm	6 mm	7.5 µm x 7.5 µm
1/4 pouce	3.2 mm x 2.4 mm	4 mm	5 µm x 5 µm
MARQUE DE CAMÉRA	TAILLE DU CAPTEUR	NOMBRE DE PIXELS	TAILLE DU PIXEL (H x V)
Phantom V2511	35.8 mm x 22.4 mm	1280 x 800	28 µm x 28 µm
Photron SA-Z	20.8 mm x 20.5 mm	1024 x 1024	20 µm x 20 µm
PHOTONFOCUS MV1	12.8 mm x 9.6 mm	1312 x 1082	8 µm x 8 µm

Si les standards continuent d'exister, le nombre de pixels en fonction de la diagonale de la matrice est très variable et dépend intrinsèquement de la taille du pixel et des blindages éventuels (*fill factor*). Certains fabricants n'hésitent d'ailleurs pas à embrouiller le futur utilisateur en parlant de "taille de capteur" et de "taille effective de capteur". C'est bien entendu à cette dernière qu'il faut se fier pour déterminer son capteur.

Par ailleurs, et à l'inverse, on voit arriver, avec les nouvelles générations de capteurs CMOS, des tailles de pixels extrêmement réduites (moins de 6 microns), issues des développements de pixels complexes et intelligents réalisés pour les applications mobiles.

Cela entraîne un retour des capteurs de taille 2/3" à 1 pouce, notamment parmi les caméras rapides, là où précédemment les capteurs 24x36 et les gros pixels étaient la référence.

Il convient cependant de ne pas confondre les petits pixels de dernière génération, aisément identifiés par les dynamiques importantes qu'ils permettent (60 dB et plus), avec les pixels, toujours très courants, de taille moyenne (~10 microns) de génération n-2 (design APS originel), qui sont loin d'offrir les mêmes performances, notamment en termes de niveau de bruit. A l'heure actuelle, il convient donc toujours de privilégier les grands pixels pour les applications très haute cadence et les petits pixels de nouvelle génération pour les applications où dynamique, faible niveau de bruit et qualité d'image sont primordiaux.

6 Bruit des capteurs

Pour les capteurs d'images en général, le bruit correspond à tout signal qui ne participe pas à la formation de l'image désirée (Figure 12). Son origine peut être diverse, de la collection des photons en charge, à la conversion de la charge en tension, en passant par tous les processus de transfert entre lignes, colonnes, trames et blocs. Ce bruit est également lié aux effets thermiques (bruit Johnson principalement), à l'irradiation lumineuse pendant le transfert, au remplissage et au débordement des puits sur les voisins, mais également au bruit de quantification en sortie de la chaîne.

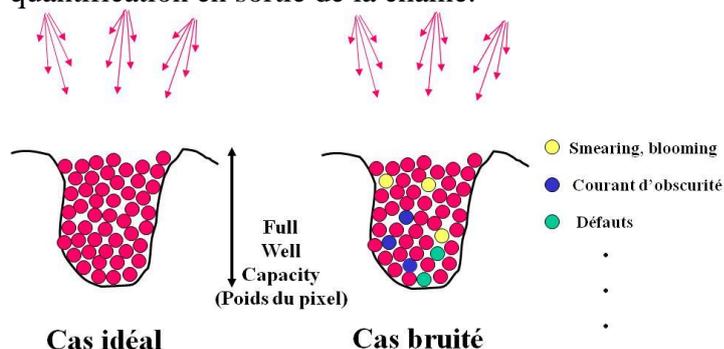


Figure 12 – Représentation artistique des types de bruit dans les capteurs

6.1 Courant d'obscurité

La sortie d'un capteur image est proportionnelle à l'exposition, $L \times T_p$, où L est l'éclairement à la surface du capteur et T_p le temps d'intégration. Le signal de sortie, propre à l'image ou photocourant, peut être amélioré en augmentant le temps d'intégration ... et des temps d'intégration longs sont généralement utilisés pour les applications à faible niveau lumineux. Toutefois, cette approche est vite limitée par la génération de courant d'obscurité, qui est intégré tout comme le photocourant. Le courant d'obscurité (*dark current*) s'exprime en densité de courant [A/m^2] ou en électron/pixel/seconde [$e^-/pix/s$].

Pour un pixel ($24\mu m^2$), une densité de courant d'obscurité de $1000 pA/cm^2$ peut être atteinte, ce qui produit 36000 électrons/pixel/seconde. Si le système a une capacité à puits plein (*FWC*) de 360000 électrons, le puits est donc rempli en 10 secondes. Le courant d'obscurité est seulement appréciable lorsque T_p est grand. Ceci peut être le cas dans des applications scientifiques à bas niveau lumineux et à temps d'intégration long (étude de plasmons, photoémission, matériau peu réfléchissant, astronomie ...), prépondérant en imagerie infrarouge... mais complètement négligeable en acquisition rapide d'images.

Un paramètre critique du design du chip sera de réduire sensiblement le courant d'obscurité. Il y a trois sources potentielles de courant d'obscurité:

- génération thermique et diffusion dans le matériau neutre (bulk),
- génération thermique dans la zone de déplétion,
- génération thermique due aux états de surface.

Les densités de courant d'obscurité varient de manière significative avec les fabricants et dans une gamme comprise entre $0.1 nA/cm^2$ à $10 nA/cm^2$ pour les CCD à base silicium.

Le courant d'obscurité dû à la génération thermique d'électrons peut être résolu en refroidissant le système.

6.2 Bruit de photons

Le bruit de photons, ou aussi appelé bruit de Schottky (ou "shot noise" en Anglais), limite tout système de détection de flux lumineux. Il est lié directement à la nature corpusculaire de la lumière. Les photons éclairent le pixel de façon totalement désordonnée, et ils suivent une statistique de Poisson. Ce désordre est lié à l'émission aléatoire par les atomes excités. Le photocourant est ainsi affecté par cette fluctuation qui domine généralement toutes les autres sources de bruit. La puissance de bruit de photon sur le photocourant est donnée par la formule de Schottky [15]:

$$\sigma_{i_{ph}}^2 = 2q i_{ph} \Delta f \quad [\text{éq.3}]$$

où Δf correspond à la bande passante de la détection ($\Delta f = 1/2T_p$, T_p : temps d'intégration).

On peut également l'exprimer en nombre de photoélectron par la relation suivante :

$$\sigma_{ph}^2 = 2i_{ph} \Delta f \quad [\text{éq.4}]$$

6.3 Bruit de quantification

Le bruit de quantification ou de numérisation du capteur dépend de la dynamique de numérisation, donc du nombre de bits du convertisseur analogique numérique en sortie de la chaîne d'acquisition (nb). La puissance de bruit de numérisation est donnée en photoélectrons par la relation suivante [15]:

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{12} \left(\frac{n_e^{sat}}{2^{nb} - 1} \right)^2 \quad [\text{éq.5}]$$

La relation montre que ce bruit dépend aussi du nombre d'électrons à saturation du pixel (n_e^{sat}). Pour des capteurs d'image sur 8, 10 ou 12 bits, ce bruit est négligeable comparativement aux autres bruits.

6.4 Couverture de capteur : Référence au noir (Shading)

Les différentes composantes du bruit peuvent être mesurées en capturant des images à divers temps d'intégration avec le capteur couvert par un bouchon ou par un obturateur mécanique (inclus à la caméra) fermé pour générer une référence au noir (*shading*). Certains capteurs incluent la mesure du courant d'obscurité en utilisant des pixels supplémentaires, jouxtant la surface image et blindés, appelés pixels sombres (« dark pixels »).

En imagerie rapide, pour les caméras rapides en CMOS, on retrouve un bruit qui pourrait ressembler au courant d'obscurité mais qui est lié à l'offset des amplificateurs de chaque pixel. Ce bruit ayant une structure relativement figée pour un jeu de paramètres d'imagerie donné, il est nommé « Fixed Pattern Noise » (FPN).

Les images peuvent présenter des zones non uniformes ou un marquage "poivre et sel". Il est dès lors toujours nécessaire de réinitialiser les amplificateurs de chaque pixel afin de tous les accorder sur un niveau de noir de référence commun à chaque pixel. Ceci est également réalisé par shading. Les dernières générations de caméras ultrarapides comprennent un obturateur mécanique qui permet d'effectuer cette référence à distance.

La référence au noir est requise après tout changement par l'utilisateur du temps d'exposition, de la fréquence d'acquisition ou de la taille active de la région image.

6.5 Éblouissement (blooming)

Un pixel est saturé lorsque sa capacité à puits plein (FWC) est atteinte. Quand un puits de potentiel est rempli, la charge excédentaire peut déborder sur les puits voisins des pixels adjacents. On distingue deux types d'éblouissement en fonction de la directionnalité du débordement. Ces débordements peuvent bien entendu être évités en n'atteignant jamais la saturation de la FWC, donc en travaillant avec des temps d'obturation courts...ce qui n'est pas toujours possible en pratique pour tout ou partie de l'image.

Ceci est particulièrement le cas dans le cas de scènes qui présentent de fortes hétérogénéités d'éclairage (objets très contrastés, flammes, explosions, éclairages ponctuels, ...) En acquisition rapide d'images, le blooming horizontal est prépondérant. Dans ce cas, le débordement de charges se produit dans les colonnes, voire même pour les ISIS dans les images, adjacentes. Pour l'éviter, seuls des drains relatifs à chaque pixel ou à chaque colonne peuvent empêcher la collection des charges voisines. Pour les systèmes à transfert interligne, ce procédé s'appelle drain vertical de débordement (« VOD »). Toutefois, on peut noter à nouveau que leur présence rend l'architecture plus complexe et diminue le facteur de remplissage. La surface efficace diminue car la charge générée par la lumière sur le drain sera directement éliminée.

Par contre, on peut lier le fonctionnement du drain à l'obturateur électronique. Dans ce cas, on s'en servira pour purger les charges de l'image en cours rapidement en cas d'acquisition asynchrone notamment. Cet usage est prépondérant en acquisition rapide d'image déclenchée (trigger).

Concernant l'obturateur, le «rolling shutter» (ou obturateur à rideau) correspond à la technologie de contrôle du temps d'exposition sur un capteur d'image, lorsque celle-ci consiste à « dérouler » horizontalement ou verticalement à la surface du capteur l'opération électronique (quelle qu'elle soit) permettant de débuter et/ou de mettre fin à l'exposition du capteur. En d'autres termes, différentes zones (lignes ou colonnes généralement) de l'image ne sont pas enregistrées de manière tout à fait simultanée.

Cela produit généralement des distorsions d'objets en mouvement rapide, ou des apparitions «fantômes» de flashes en cas d'utilisation de lumière pulsée à haute vitesse.

Par opposition, les méthodes les plus performantes de contrôle de l'exposition permettant de démarrer et d'arrêter l'exposition de toute l'image aux mêmes instants sont dénommées «global shutter» (obturateur global).

L'avantage principal des procédés à base de «rolling shutter» réside dans la possibilité de maximiser le temps d'intégration et de conversion des photons durant toutes les phases du processus d'acquisition et de lecture de l'image, améliorant par voie de conséquence la

sensibilité. La majorité des capteurs CMOS rencontrés dans les appareils photo du commerce utilisent un rolling shutter. Cependant un nombre important de capteurs CMOS scientifiques sont effectivement «global shutter», et en particulier, de manière évidente, ceux utilisés par les caméras haute cadence.

La plupart des capteurs CCD sont « global shutter ».

6.6 Dynamique extrême à double pente

En acquisition rapide d'images, il est courant de rencontrer des scènes d'éclairage hétérogène, et particulièrement dans l'étude d'impacts rapides de projectiles. Les images doivent alors supporter des dynamiques gigantesques, avec des zones très sombres (e.g. le fond) et des zones extrêmement intenses (e.g. le point d'impact). Si la caméra le permet, des temps d'obturation de $1\mu\text{s}$ ou inférieur devront être sélectionnés. Dans d'autres cas, il est parfois impossible d'imager correctement la scène entière avec des temps d'exposition aussi courts. Certains fabricants proposent dès lors d'étendre la dynamique du capteur grâce aux possibilités offertes par le post-traitement en acquisition. Chaque pixel est piloté en mode extrême avec la possibilité de changer, d'image à image, sa sensibilité intrinsèque. Si le pixel sature à l'image N, le gain de l'amplificateur de ce pixel est diminué à l'image N+1, d'une valeur définie par l'opérateur. Cette valeur peut être équivalente à un pourcentage de la dynamique du capteur ou à un temps d'obturation moindre, équivalent à au moins la moitié de la consigne générale. Ainsi les zones plus sombres seront exposées avec la consigne d'obturation globale. Pour les zones potentiellement surexposées ou saturées, chaque pixel sera piloté indépendamment avec la consigne extrême (Figure 13).

Nota: Pour afficher des images codées en plus de 8bits, il faut jouer sur le curseur du « shift bits », qui permet d'afficher toujours en 8bits mais en choisissant les bits hauts ou les bits bas. Pour les phénomènes très lumineux, il est souvent très utile de bien régler ce curseur.

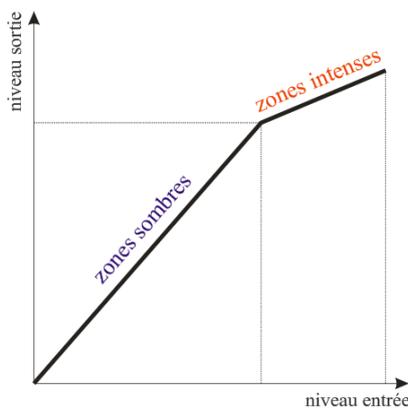


Figure 13 – Dynamique extrême à double pente

6.7 Efficacité du transfert de charge (CCD)

Pour les CCD, la charge est transférée successivement de porte à porte, puis est finalement convertie au nœud de sortie (Figure 14). La qualité du signal de sortie dépend directement de deux paramètres vitaux : l'efficacité de transfert de la charge CTE (*Charge Transfer Efficiency*) et l'efficacité de conversion en sortie.

L'efficacité de transfert de charge permet de quantifier la qualité de passage de la charge d'une porte à l'autre d'un pixel ou d'une ligne/colonne à l'autre, ainsi qu'à travers les portes du registre à décalage de lecture. L'efficacité de transfert de charge d'une porte est très souvent proche de 1, toutefois le moindre écart peut avoir des répercussions énormes sur le signal final en fonction de la taille et du nombre de transfert de proche en proche. On peut la comparer avec la quantité d'eau qu'il resterait dans un seau après le transfert de tout son contenu dans un seau voisin. Le pourcentage de la quantité initiale d'eau transférée dans le second est la CTE. Les CCD de bonne qualité ont une CTE proche de 99.999%.

Si la CTE d'un CCD est très mauvaise, des rayures (*streaks*) peuvent même apparaître sur l'image.

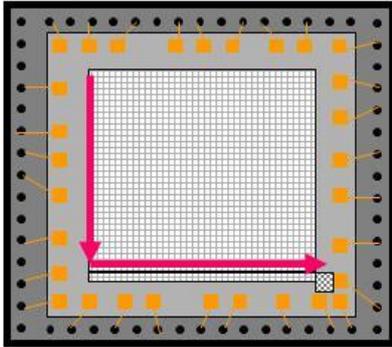


Figure 14 – Transport de la charge jusqu'à lecture

6.8 Conversion en sortie (CCD)

À la fin de son parcours à travers les différentes portes, la charge est finalement convertie en une tension par une diode. La différence de tension entre l'état final de la diode et sa valeur préchargée est linéairement proportionnelle au nombre d'électrons, n_e . La tension de signal après la source est

$$V_S = V_{\text{reset}} - V_{\text{out}} = \frac{n_e G q}{C} \quad [\text{éq.6}]$$

Le gain G est approximativement égal à 1, q est la charge de l'électron et le taux de conversion de charge Gq/C varie typiquement entre $0.1\mu\text{V}/e^-$ et $10\mu\text{V}/e^-$.

7 Gestion de la mémoire

La sélection de l'architecture du capteur permet à l'utilisateur de disposer d'un moyen d'enregistrement approprié à ses besoins. Il peut sélectionner les cadences maximales liées notamment à la résolution spatiale requise. Les images générées par le capteur sont ensuite transférées pour stockage en mémoire. Deux types de mémoire sont présents en imagerie rapide, le stockage en mémoire interne et le stockage en mémoire externe après transfert de la zone image vers un moyen extérieur de stockage. La quantité d'information à transférer est directement proportionnelle au nombre de bits par pixel, au nombre de pixels par image... et au nombre d'images par seconde. Certains fabricants parlent en Mpix/s ou en Gpix/s, la vitesse de transfert est alors obtenue en multipliant cette valeur par le poids du pixel en octet (1octet=8 bit; o en français, B en anglais).

Nota: Certains fabricants expriment les vitesses de transferts en Mo/s (MB/s) ou en Go/s (GB/s), alors que d'autres se targuent de vitesses 8 fois supérieures... mais exprimées en Mbits/ ou en Gbits/s, soit une unité de base 8 fois plus petite.

Ainsi une cadence de 10000 images/seconde de 1Mégapixel, pixel codé sur 256 niveaux de gris (1octet), représente un flux de $10^4 \cdot 10^6 \cdot 1 = 10^{10}$ octets/s = 10Go/s = 10GB/s.

Avec ce type de débit, seul le stockage en mémoire vive de type RAM est envisageable avec la technologie actuelle, le seuil entre mémoire vive RAM et mémoire non-volatile de type flash se situant actuellement aux alentours de 2Go/s.

Une fois enregistrées en mémoire vive, les images peuvent être transférées plus lentement vers un système de stockage non-volatile durable.

Celles-ci peuvent alors être directement écrites en fichier standard haute résolution spatiale comme le format TIFF (*Tagged Image File Format*), ou en BMP (*Bit-mapped Graphics Format*), voire même en JPEG (*Joint Photographic Expert Group*) ou en film AVI (*Audio Video Interleave*... avec le bon CODEC) si une légère perte de résolution peut être concédée. Les fichiers, images ou films, au format propriétaire brut ou « RAW » (CINE, CIH...) sont par contre conseillés pour conserver tous les réglages caméras dans un fichier propriétaire joint ainsi que la pleine résolution spatiale et une dynamique étendue sur le nombre maximal de bits... au détriment de l'espace mémoire.

7.1 Mémoire externe

Toutes les caméras ne disposent pas forcément de mémoire rapide (type RAM) embarquée. Dans d'autres cas, la capacité de stockage techniquement intégrable sous forme de RAM est insuffisante et restreint la durée d'enregistrement, ce qui peut se révéler problématique pour certaines applications. Dans ces différentes situations, l'enregistrement des images est réalisé sur disque dur externe à transfert rapide, connecté directement à la caméra. La cadence finale d'enregistrement correspond à la cadence la plus faible entre la vitesse de transfert de la caméra et la vitesse d'écriture sur le disque externe. Il est également possible de relier la caméra au disque externe via un ordinateur et de dédier une partie de la RAM du PC en tampon de mémoire (ex SDRAM-DDR4 à 25.6Go/s). Dans ce cas précis, la cadence de transfert est optimisée sur la taille de la mémoire tampon, qui transfère en FIFO vers le stockage définitif (Disque dur classique à plateau(x) ou disque flash SSD). Un point crucial est alors le type de liaison entre la caméra et le PC. En fonction du type de caméra, différentes connectiques existent et permettent des taux de transfert très différents vers le stockage. Les principales normes de transfert et matériels de stockage, sont présentés dans le Tableau 2. Ce tableau comprend également des moyens utilisés avec des caméras rapides à mémoire embarquée, et qui sont utilisés pour purger cette mémoire rapidement (*). Chaque norme de transfert est également liée à un type de connecteur précis associé à un câble qui peut être de différentes catégories... dont le non-respect peut entraîner une chute du taux de transmission. Outre la qualité du câble, la longueur est aussi limitée en fonction du type de transmission (par exemple 5m pour le FireWire) mais peut être augmentée en utilisant soit des répéteurs soit des convertisseurs optico-électroniques pour injection du signal dans des fibres optiques blindées sur plusieurs centaines de mètres, voir kilomètres.

Tableau 2 - Principales normes de transfert, matériels et débits associés (1octet= 8bits=1B)

Normes	Débits théoriques
IEEE1394a - S100 à S400 (FireWire)	100 - 400 Mbit/s
IEEE1394b - S800 à S3200 (FireWire Gigabit)	800 - 3200 Mbit/s
GigE - 1 à 100 (Gigabit Ethernet) *	1 - 100 Gbit/s; 10Gbit/s= 1,25Go/s
USB 3 à 3.1	625 Mo/s - 1,25Go/s
CameraLink	255 Mo/s - 680 Mo/s
CoaXpress 4 canaux	Jusqu'à 25 Gbits/s
ThunderBolt	5 à 20 Gbit/s
Matériels	
Disque dur eSATA 600	6Gbits/s = 750 Mo/s
CineMag® (stockage de 144 à 2 To) *	1.8Go/s
SD card : SDHC: 2 à 32 Go	Speed Class 2 -10: 2 à 10Mo/s, Bus max 25Mo/s
SD card : SDXC: 32 Go à 2 To) *	UHS 1-3: 10 à 30Mo/s, Bus max 312Mo/s

7.2 Mémoire embarquée

La mémoire embarquée dans les caméras ultrarapides se caractérise également par la taille et la vitesse d'écriture. Elle est donc directement liée à la bande passante disponible du système de transfert. Sauf pour le cas particulier des caméras ultrarapides CCD à stockage in situ où elle est limitée au nombre d'images voisines, la mémoire embarquée peut varier de quelques centaines de Mo jusqu'à 128 Go associée à un débit maximum de 25Gpix/s, soit 38Go/s pour des images codées en 12bits. Dans certains cas, la mémoire peut être divisée en segments, accordés à des déclenchements et à des configurations d'enregistrement différents.

7.2.1 Mémoire tournante

Que la mémoire soit embarquée ou distante, l'utilisation la plus confortable est obtenue en configuration de mémoire tournante (*rolling buffer*) avec déclenchement (*trigger*). Cette configuration permet une gestion aisée de l'obtention des images d'intérêt liée au phénomène étudié. Elle est aussi appelée acquisition en tonneau.

En acquisition passive, la caméra enregistre en permanence dans la mémoire tournante et la mémoire image est remplie jusqu'à saturation de la quantité maximum d'images B_{max} . L'image

numéro $B_{\max+1}$ remplace alors l'image numéro 1 du buffer (acquisition FIFO).

Lorsque le déclenchement survient, l'acquisition active des images commence et leur position temporelle est tributaire de la position du trigger assignée dans le buffer tournant (Figure 15).

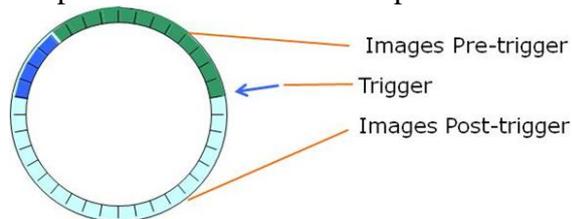


Figure 15 –Principe du buffer tournant

L'avantage de l'acquisition en mémoire tournante réside en la possibilité de "revenir en arrière". Si le phénomène étudié est l'impact d'un projectile sur une cible, et que le trigger, lié à l'impact, est réglé à la moitié du buffer tournant, il est possible de lire les images avant et après l'impact. Dans d'autres cas, le déclenchement peut survenir juste au début, pour disposer de toute la taille de la mémoire... ou juste à la fin pour être sûr de déclencher après le phénomène, et ainsi ne jamais le manquer.

7.2.2 Déclenchements

Le déclenchement de l'enregistrement actif peut être commandé par l'utilisateur via l'interface logicielle, ou par un signal externe relié à l'entrée adéquate de la caméra ou via un boîtier électronique de pilotage.

Ce signal externe peut être seul ou répété, et il peut s'agir d'un contact sec, ou d'un signal d'amplitude 5V de type TTL. Certaines caméras permettent également de choisir un retard (de 100ns à quelque μ s) entre le déclenchement et la capture d'images. Enfin le déclenchement peut être généré par la caméra elle-même en détection d'un pourcentage de variation de niveau de gris dans une zone image choisie lors de l'acquisition passive. Tout changement induit dans l'image passive N générera le trigger à l'image N+1; ce trigger pouvant lui-même entraîner une action sur des données externes (lecture de capteurs physique, ouverture de vanne...) ou le déclenchement d'autres caméras. Dans ce cas précis, il faut définir une caméra maître et des caméras esclaves.

7.2.3 Synchronisation

Il est également possible de synchroniser entre elles des caméras du point de vue temporel (verrouillage de fréquence ou de phase, *frequency/phase lock*). Les cadences d'acquisition d'images et de temps d'exposition sont dès lors tributaires de l'affectation de ces valeurs à la caméra maître ou à un signal de synchronisation externe (laser pulsé, centrale de pilotage numérique).

Un mode particulier de synchronisation est appelé mode rafale (*burst*). Dans ce cas précis, la bande passante est maximisée pour réaliser plusieurs captures d'images consécutives, à intervalles périodiques. Ceci est réalisé soit au détriment de la taille d'image, soit au détriment de la fréquence d'acquisition afin de respecter la bande passante. La période de la rafale est le temps entre deux signaux de déclenchement temporel consécutifs. Le nombre de rafales est le nombre d'images qui peuvent être prises entre deux signaux temporels extérieurs.

Par exemple si la cadence maximale d'une caméra est 6273fr/s pour 1280×800pixels codés sur 8bits, la période de rafale ne peut pas dépasser la cadence maximale de la caméra et donc:

$$\text{Min Période rafale} = 1/6273 = 159,41 \mu\text{s}.$$

La seconde règle à respecter est que le nombre de rafales maximum, à cadence fixée, est la valeur entière de la cadence maximale divisée par la fréquence du déclenchement extérieur. Ainsi pour la même caméra, si on souhaite une fréquence extérieure de 1000fr/s, le nombre de rafale maximum est égal à $6273/1000 = 6$. Ceci permet à l'utilisateur de choisir entre 0 et 6 coups en rafale.

Un mode particulier de l'acquisition en rafale est atteint lors du couplage de la caméra rapide avec un laser pulsé, notamment pour des applications en vélocimétrie de particules (PIV) ou

en ombroscopie pulsée. Dans ce cas précis, le mode rafale est piloté par les pulses du laser d'un point de vue temporel, mais chaque image a un temps d'obturation long, égal à l'intervalle temporel entre deux images consécutives diminué du straddle time. On retrouve dès lors la notion de temps de chevauchement (*straddle time*), qui est le temps le plus court entre deux pulses consécutifs (Figure 16). Il est directement conditionné par la capacité de la caméra à lire le frame 1 et être prête à acquérir le frame 2... et de répéter cette opération périodiquement en cas de pulses laser entretenus. En 2015, le temps de chevauchement le plus court est d'environ 200ns, ce qui permet en PIV de calculer des vitesses avec un intervalle de temps ultra court entre deux pulses. Chaque pulse, d'une durée d'environ 10ns (en fonction du type de laser), fige l'image comme un flash et permet ainsi d'obtenir une image temporellement nette d'un phénomène très rapide.

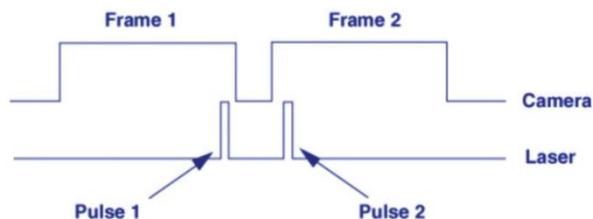


Figure 16 – Temps de chevauchement T_c

8 Derniers développements

À l'heure actuelle, la course à la vitesse commencée depuis une bonne dizaine d'années pour le tout numérique est dominée par les caméras CCD à stockage sur site pour la partie "méga rapide", supérieure au million d'images par seconde. Pour les caméras plus conventionnelles à capteurs CMOS, on tend vers une vitesse de 30000fr/s, avec des caméras munies de "gros" pixels ($>20\mu\text{m}$) voire même recouverts de microlentilles (Figure 17).

Les progrès réalisés sont directement liés à l'architecture des capteurs, mais aussi aux avancées en élaboration des semiconducteurs, et en particulier leur sensibilité. Pour la méthode ISO 12232 SAT, on atteint 100000 T (sous éclairage tungstène) et 32000 D (en lumière du jour) en monochrome.

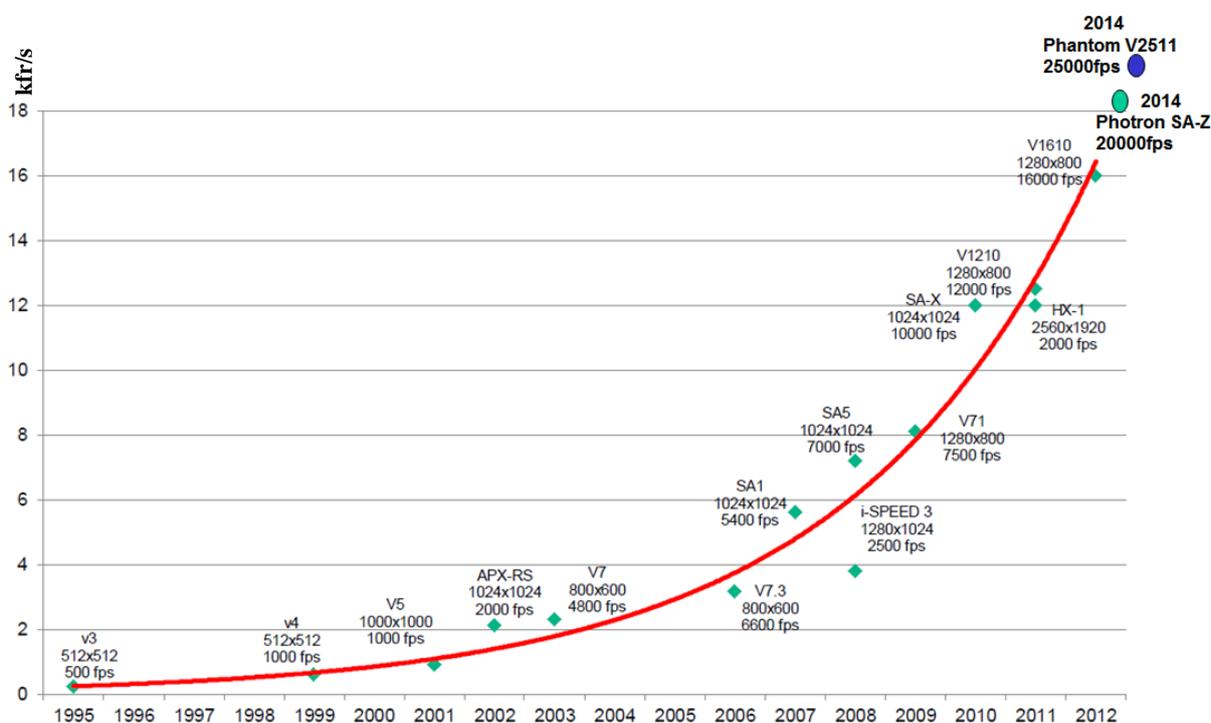


Figure 17 – Croissance de la vitesse d'acquisition pour le tout numérique en capteur CMOS (pleine résolution)

En encombrement, le poids des caméras les plus performantes peut atteindre entre 8 et 14kg, tandis que les plus légères ne pèsent que quelques centaines de grammes. Elles peuvent être

équipées d'objectifs photographiques grand format, aux montures Nikon ou Canon, ou encore de minis objectifs en monture C ou CS (Figure 18).



*Kirana, uCMOS, 30 μ m,
2Mfr/s, 180 images, 924*768pixels
416x228x192mm, 10.5kg*



*Phantom V2511, CMOS, 28 μ m
26kfr/s, 188Go, 1280*800pixels
273x190x170mm, 7.7kg*



*AVT Pike, CCD, 7.4 μ m
202fr/s, 0(zéro) Mo, 640*480pixels
96.8x44x44mm, 250g*

Figure 18 – Comparaison des performances (fréquence, mémoire embarquée, surface image) et des dimensions et poids de différentes caméras

Les protocoles de communication entre les caméras et les ordinateurs sont très variés, et vont de câbles spécifiques dédiés, à des connectiques Ethernet standard, y compris compatibles avec des cartes du type ExpressBusCard enfichables dans un ordinateur portable. Si des petits pixels permettent d'obtenir une fonction de transfert de modulation élevée, les gros pixels limitent la FTM. Toutefois, la qualité des images et le piqué obtenus sont incroyables à des cadences d'acquisition mégapixel proches de 25000fr/s.

9 Applications

Les domaines d'applications de l'imagerie rapide sont extrêmement variés, que ce soit en mécanique du solide ou en mécanique des fluides, et bien sûr pour obtenir des ralentis impressionnants notamment lors d'impacts hypervéloces (Figure 19).

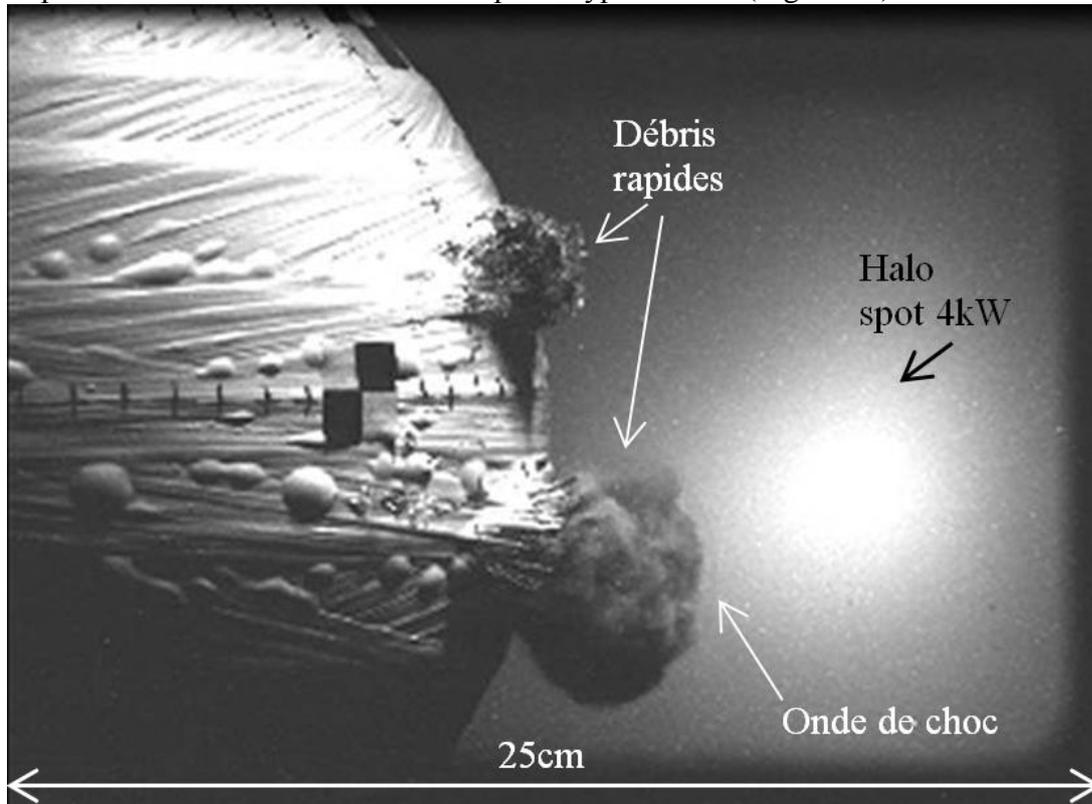


Figure 19 – Impact hypervélocé sur une structure en carbone sous pression : étude des impacts de petites météorites à 4km/s sur des structures spatiales et mise en évidence des débris rapides (>100m/s) et de l'onde de choc en sortie de face arrière, capteur CCD ISIS (Shimadzu HPV1), 500000fr/s (source CEA Gramat – CNES – Ecole des mines d'Alès)

Dans son expression la plus simple, elle permet notamment de révéler de subtiles instabilités de gouttes, lorsqu'on verse de l'eau dans un verre alors que notre œil ne voit qu'un jet continu

(Figure 20) ou de figer les pales d'un ventilateur en rotation (source <https://x-equals.com>).



Figure 20 –Visualisation des composantes d'un jet d'eau, capteur CMOS, 20000fr/s (source Ecole des mines d'Alès).

Elle est également utilisée pour la capture de mouvement, en utilisant notamment des réseaux de caméras rapides qui observent le sujet mobile et muni de marqueurs rétro réfléchissants. Après calibrage de l'espace de travail, les différents points de vue sont combinés informatiquement pour recréer l'intégralité de la scène en réalité augmentée, y compris avec des modèles morphologiques en squelette (Figure 21).

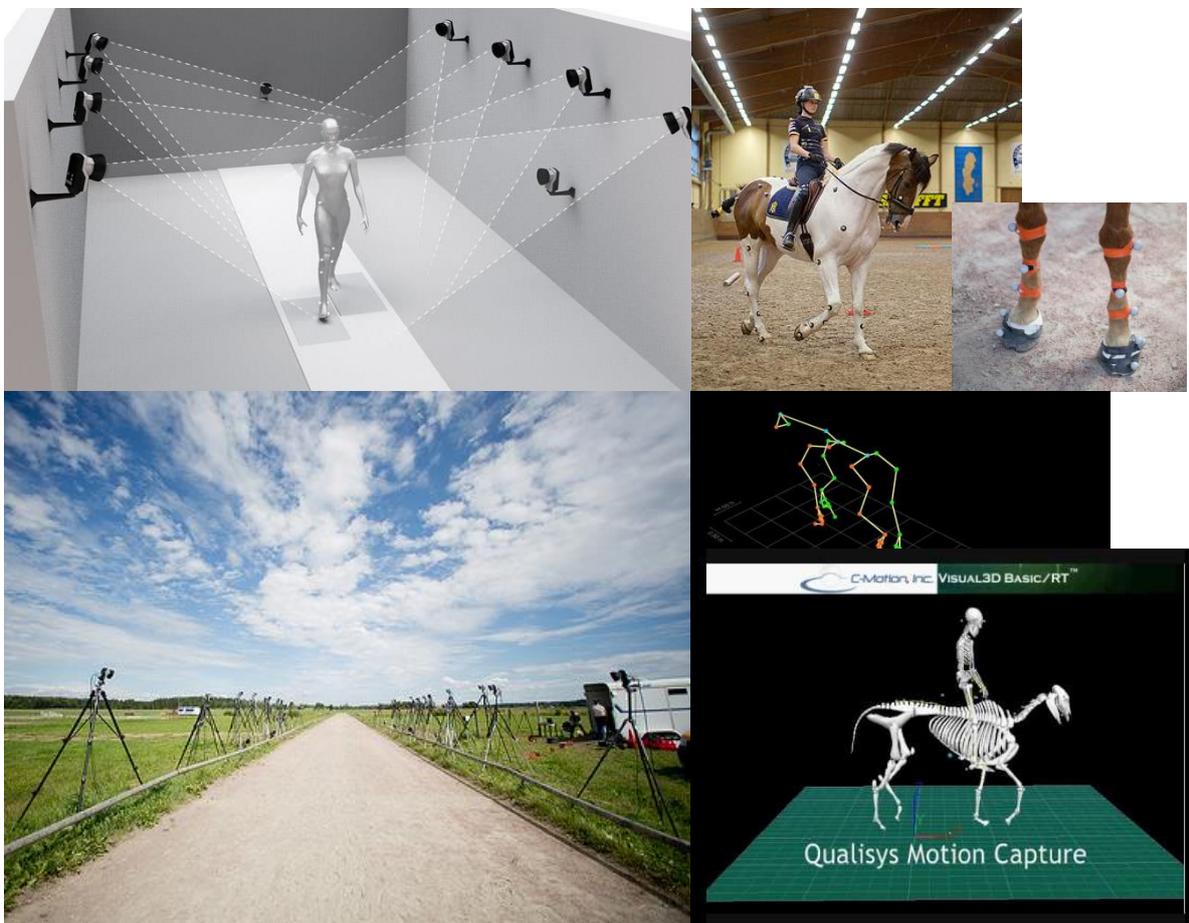


Figure 21 –Principe de la capture de mouvement et application au galop de cheval (source Qualisys).

Un exemple d'application en imagerie scientifique est présenté à la figure 22. L'imagerie rapide (capteur CMOS 20000fr/s) est couplée à l'ombroscopie afin de révéler simultanément le passage d'une onde de choc (trait vertical clair à l'instant T_0)... qui se déplace à plus de 400m/s) sur des gouttes de liquide en chute libre. L'onde de choc, puis le souffle, impacte les gouttes et les disloque en microgouttelettes ($T_0+90\mu s$). Cette visualisation permet de quantifier l'interaction du liquide avec l'air ambiant après rupture catastrophique des gouttes et ceci est d'un intérêt tout particulier en sciences des risques en cas d'accident industriel couplé à des explosions secondaires [16].

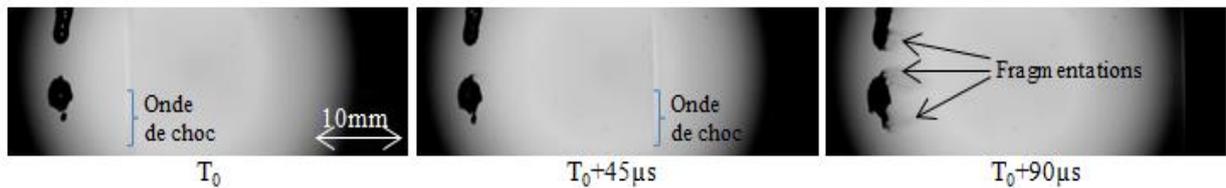


Figure 22 – Interaction d’une onde de choc avec des gouttes tombantes, capteur CMOS, 22000fr/s (source Ecole des mines d’Alès).

Une autre application d’imagerie rapide concerne la visualisation d’ondes acoustiques transitoires se propageant dans des structures, et excitées par des chocs. L’holographie numérique ultra rapide permet d’enregistrer à haute cadence des hologrammes numériques qui codent l’état de la structure [17, 18]. L’extraction de la phase optique des hologrammes permet de visualiser le front d’onde. La figure 23 montre une série d’images extraite d’une séquence d’hologrammes enregistrée à 60kHz. On peut y observer la propagation d’un front d’onde dans une poutre équipée d’un trou noir acoustique [19, 20]. On observe un front d’onde plan se propager vers la terminaison trou noir et se convertir en ondes transverses. La méthode permet donc de visualiser la conversion de modes à l’extrémité du trou noir acoustique.

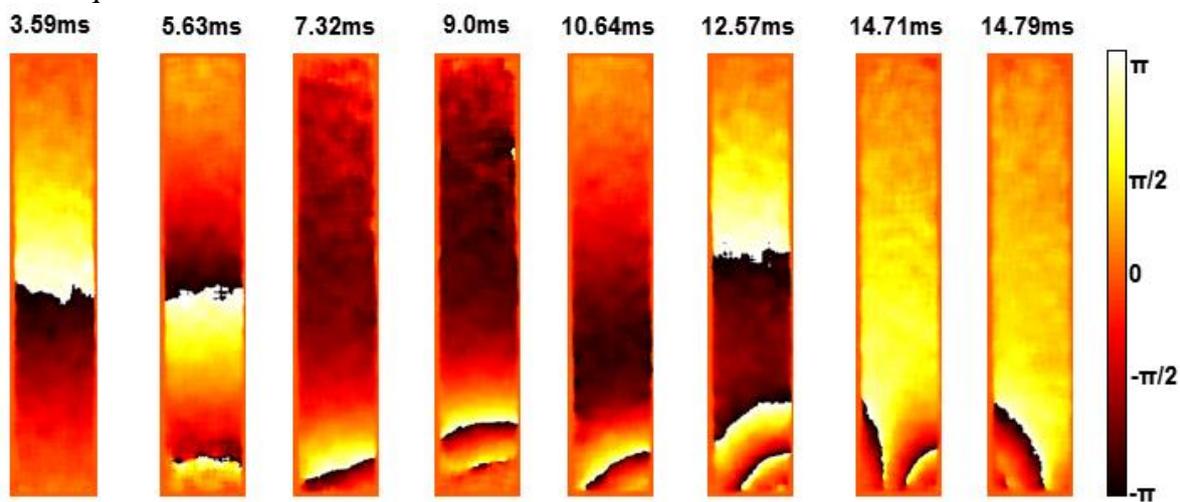


Figure 23 –Visualisation du front d’onde acoustique se propageant sur une poutre trou noir ; résultat obtenu avec une résolution de 512×128 pixels à une cadence de 60kHz (source LAUM-Université du Maine).

Mais l’imagerie rapide est également présente dans la vie de tous les jours. Les capteurs des téléphones portables et les appareils photographiques grand public utilisent à présent des détecteurs CMOS. Certains fabricants les utilisent également en mode d’acquisition rapide afin de permettre à l’utilisateur de choisir la meilleure vue parmi une rafale acquise en mémoire (mémoire vive de l’appareil photographique ou carte SD à transfert rapide par exemple). Dans ce cas précis, l’acquisition passive débute avec la détection de l’œil sur l’oculaire, ou la mise en route de l’appareil, tandis que l’acquisition active est initiée par l’appui du déclencheur. Et le spectateur, voire même le téléspectateur, ébahi peut dès lors admirer un magnifique ralenti ou choisir l’image qui lui tient le plus à cœur dans la séquence enregistrée.

10 Bilan et attentes

Trois types de capteurs photosensibles permettent d’atteindre des cadences d’acquisition élevée en imagerie numérique : les capteurs CCD, les capteurs CMOS et les capteurs hybrides (CCD à stockage in-situ et uCMOS). Si les capteurs CCD se cantonnent à quelques centaines d’images par seconde (fr/s) en pleine résolution, les capteurs CMOS peuvent atteindre 25000fr/s pour le mégapixel et frisent le million d’images/s en résolution décimée. Ces capteurs sont généralement munis d’une mémoire embarquée de taille élevée (de la dizaine à la centaine de Gigaoctets). Pour atteindre plusieurs millions d’images par seconde en pleine résolution, les capteurs hybrides ont été développés mais la mémoire de stockage disponible

est limitée à quelques centaines d'images, physiquement proches de la zone sensible où l'image est formée.

Spectralement, l'acquisition rapide d'images en couleurs est principalement réalisée en plaçant une matrice de filtres colorés (rouge, vert, bleu) sur des structures classiques. Trois pixels « noir et blanc » sont utilisés, au détriment de la résolution, pour générer un pixel couleur par mélange des couches rouge, verte et bleue. Les procédures de balance des blancs sont identiques à celles de l'imagerie classique.

L'acquisition rapide d'images dans l'infrarouge est également couramment utilisée. Ceci est atteint grâce à des capteurs classiques (en silicium, Si), sensibles au proche infrarouge, ou à des capteurs dédiés (en antimoniure d'indium, InSb) sensibles à des fenêtres de longueur d'onde infrarouges comprises entre 1,5 et 5 μ m. Pour une résolution de 1344 x 784 pixels, la fréquence d'acquisition maximale est de 132fr/s et des fréquences de quelques milliers d'images par seconde sont obtenues pour des résolutions décimées.

Dans un futur proche, les progrès attendus seront principalement réalisés dans les caméras CCD à stockage in situ, où le nombre de pixels est grandissant et ce pour un nombre d'images stockées en nette évolution. L'hybridation CCD-CMOS est d'ailleurs une piste sérieuse d'amélioration dans les prochaines années. Quant à la guerre des caméras CMOS, les progrès en sensibilité (temps d'obturation de 159ns) et l'augmentation de la bande passante sont les clefs de voûte du système et leur amélioration grandissante promet à l'utilisateur de demain des moyens de révéler les moindres détails temporels de l'évolution d'un phénomène ultrarapide en haute résolution.

Glossaire - Définitions

Effet photoélectrique ; *photoelectric effect*

Processus par lequel un photon de lumière, incident sur un matériau spécifique, permet de libérer un électron qui participe au courant de conduction. L'énergie du photon est transformée, totalement ou partiellement, en énergie cinétique.

Pixel ; *pixel*

Le plus petit élément d'une image qui est sensible à la lumière (contraction de *picture element*). Les pixels d'un capteur peuvent être jointifs ou espacés ; leur taille (1.5 μ m à 30 μ m) et leur forme sont optimisées en fonction de l'application visée

Capacité à puits plein ; *full well capacity*

Nombre maximum d'électrons qui peuvent être piégés par la différence de potentiel qui maintient le puits de potentiel du pixel. Elle est exprimée en nombre d'électrons, en bits ou en niveaux de gris/couleurs.

Dynamique ; *dynamic range*

Rapport entre le signal de saturation (exprimé en photons/pixel, légèrement inférieur à celui de la capacité à puits plein) et l'irradiation minimum détectable (le nombre moyen de photons/pixel pour lequel le rapport signal à bruit est unitaire)

Taux de remplissage ; *fill factor*

Rapport de la surface véritablement sensible à la lumière par la surface totale de l'image. Elle dépend du type et de l'arrangement des pixels. Elle varie typiquement de 60% à 100%.

Taux de transfert ; *Throughput*

Par abus de langage, vitesse de transfert d'une image. Elle peut s'exprimer en pixels/s ou en octets par seconde. Généralement elle est donnée au plein format du capteur.

Imagerie rapide ; *high speed imaging*

Technique qui permet d'enregistrer des images à une vitesse bien supérieure à l'œil humain, soit plus de 10 images/s. On parle d'imagerie ultra rapide lorsqu'on atteint des vitesses supérieures à 10000images/s et d'imagerie mégarapide ou ultra-haute pour 10⁶images/s.

Sources bibliographiques

- [1] HOLST G.C., LOMHEIM T.S. - *CMOS/CCD Sensors and Camera Systems*, SPIE Press 2nd edition (15 may 2011).
- [2] RAY Sydney F., - *High speed photography and photonics*, SPIE Press (1997).
- [3] DURINI, Daniel (ed.). *High Performance Silicon Imaging: Fundamentals and Applications of CMOS and CCD sensors*. Elsevier, 2014.
- [4] ETOH, T. A high-speed video camera operating at 4,500 fps. *ITE J.* 1992, 46, 543–545 (en langue japonaise).
- [5] MENDIS, S., KEMENY, S. E., FOSSUM, E. R. CMOS active pixel image sensor. *IEEE transactions on Electron Devices*, 1994, vol. 41, no 3, p. 452-453.
- [6] ETOH, T.G.; POGGEMANN, D.; RUCKELSHAUSEN, A.; THEUWISSEN, A.; KREIDER, G.; FOLKERTS, O.-H.; MUTOH, H.; KONDO, Y.; MARUNO, H.; TAKUBO, K.; et al. A CCD image sensor of 1 Mframes/s for continuous image capturing of 103 frames. In *Proceedings of International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 3–7 February 2002; Digest of Technical Papers*, pp. 46–47.
- [7] ETOH, T.G.; NGUYEN, D.H.; DAO, V.T.S.; VO LE, C.; TANAKA, M.; TAKEHARA, K.; OKINAKA, T.; Van KUIJK, H.; KLAASENS, W.; BOSIERS, J.; et al. A 16 Mfps 165 kpixel backside-illuminated CCD. In *Proceedings of International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 20–24 February 2011; Digest of Technical Papers*, pp. 406–407.
- [8] ARAI, T.; YONAI, J.; HAYASHIDA, T.; OHTAKE, H.; Van KUIJK, H.; ETOH, T.G. Back-Side-Illuminated image sensor with burst capturing speed of 5.2 Tpixels per second. In *Proceedings of Sensors, Cameras, and Systems for Industrial and Scientific Applications XIV, Burlingame, CA, USA, 3 February 2013; doi:10.1117/12.2003496*.
- [9] Vu Truong Son (D.), Goji Etoh (T.), Tanaka (M.), Hoang Dung (N.), Le Cuong (V.), Takehara (K.), Akino (T.), Nishi (K.), Aoki (H.), Nakai (J.) - Toward 100 Mega-Frames per Second: Design of an Ultimate Ultra-High-Speed Image Sensor. *Sensors*, 10, p.16-35, 2010.
- [10] CROOKS, J.; MARSH, B.; TURCHETTA, R.; TAYLOR, K.; CHAN, W.; LAHAV, A.; FENIGSTEIN, A. Kirana: A solid-state megapixel uCMOS image sensor for ultrahigh speed imaging. In *Proceedings of Sensors, Cameras, and Systems for Industrial and Scientific Applications XIV, Burlingame, CA, USA, 3 February 2013; doi:10.1117/12.2011762*.
- [11] TOCHIGI, Y.; HANZAWA, K.; KATO, Y.; KURODA, R.; MUTOH, H.; HIROSE, R.; TOMINAGA, H.; TAKUBO, K.; KONDO, Y.; SUGAWA, S. A global-shutter CMOS image sensor with readout speed of 1 Tpixel/s burst and 780 Mpixel/s continuous. In *Proceedings of International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 19–23 February 2012; Digest of Technical Papers*, pp. 382–383.
- [12] KOSONOCKY, W.F.; GUAND, Y.; CHAO, Y.; KABRA, R.K.; XIE, L.; LAWRENCE, J.L.; MASTROCOLLA, V.; SHALLCROSS, F.V.; PATEL, V. 360×360-element very-high-frame-rate burst image sensor. In *Proceedings of International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 8–10 February 1996; Digest of Technical Papers*, pp. 182–183.

- [13] ETOH, T. G., SON, D. VT, YAMADA, T., et al. Toward one giga frames per second—evolution of in situ storage image sensors. *Sensors*, vol. 13, no 4, p. 4640-4658 (2013).
- [14] ETOH T. G. et al., Toward 1Gfps: Evolution of Ultra-high-speed image sensors-ISIS, Multi-Collection Gates, and 3D-stacking-, *Proc. IEDM 2014*, 10-3, 2014.
- [15] ASCH G. et al, *Les Capteurs en Instrumentation Industrielle*, Editions Dunod Paris, ISBN 2-10-000220-1 (1991).
- [16] SLANGEN P., LAURET P., APRIN L., HEYMES F., LECYSYN N., Optical characterizations of falling droplets interacting with shock wave, *Proc. 10th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing*, Italy, 2015.
- [17] PICART P., LI J.C., *Digital holography*, ISBN: 9781848213449 (Editions ISTE-Wiley, London, 2012).
- [18] POITTEVIN J., PICART P., FAURE C., GAUTIER F., PEZERAT C., Multi-Point Vibrometer Based on High-Speed Digital in-line Holography, *Applied Optics*, Vol. 54, N°11, 3185-3196 (2015).
- [19] POITTEVIN J, PICART P, GAUTIER F and PEZERAT C, Contact-less full-field optical measurement method to analyze vibrations of structures, *Proceeding of DYNCOMP'15*, 2-4 June 2015, Arles (France).
- [20] POITTEVIN J., PICART P., GAUTIER F., PEZERAT C., High-Speed Digital in-Line Holography as Multipoint Vibrometry to Analyze Vibrations of Structures, *Optical Metrology*, SPIE Conference 9525, Munich, Germany, June 22-25, 2015.

Autres références :

- WETZEL Monique. – *Cinématographie ultra-rapide. Caméras mécano-optiques à haute résolution* [R6730] (1993)
- BELAN Jean-Paul. – *Analyseurs d'images* [E5520] (1997)
- FLEUROT Noël. – *Cinématographie ultrarapide Caméras électroniques* [R6732] (2006)
- CARON Guillaume, EL MOUADDIB Mustapha. – *Vision pour la robotique* [S7797] (2014)
- SMIGIELSKI Paul - *Holographie optique Interférométrie holographique* [R6330] (2001)
- SCHON Jean-Paul, FOURNEL Thierry, FOURNIER Corinne. – *Mesure de caractéristiques d'écoulement par imagerie numérique* [R2162] (2007)

Sites Internet

- Cours UNIT (Université Numérique en Ingénierie et Technologie), OPI (Optique pour l'Ingénieur) « M7G4 Principes de base des capteurs d'images », http://optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C06/co/OPI_fr_M05_C06_web.html
- SD association, (page consultée mars 2015)
- Linkemann J. , Weber B. , "WHITE PAPER: Global Shutter, Rolling Shutter - Functionality and Characteristics of Two Exposure Methods (Shutter Variants)", Basler AG, Germany, www.baslerweb.com, jan 2014.
- <https://blogrecherche.wp.mines-telecom.fr/2015/03/24/les-pollutions-marines-sous-loeil-des-cameras-ultrarapides/>

Normes et standards

EMVA Standard 1288, *Standard for Characterization of Image, Sensors and Cameras, Release 3.0, Issued by European Machine Vision Association, November 29, 2010*,
ISO 12232: *Photography - Digital still cameras - Determination of exposure index, ISO speed ratings, standard output sensitivity, and recommended exposure index, 2006*,

Brevets

[21] YAMADA, Shigeru, TSUJI, Masataka, et MITSUI, Kenji. High speed imaging apparatus. U.S. Patent No 5,412,422, 2 mai 1995.

[22] ACIU, Alexandru V., POP, Petru, et CORLAN, Radu. High-frame rate image acquisition and motion analysis system. U.S. Patent No 5,625,412, 29 avr. 1997.

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

Vision Research, 100 Dey Rd. Wayne, NJ 07470, USA, www.visionresearch.com

Photron (Europe) Limited, The Barn, Bottom Rd, West Wycombe, Bucks. HP14 4BS, United Kingdom,

NAC, Japan, <http://www.nacinc.com/>

PCO, Germany, <http://www.pco.de/>

Specialized Imaging, UK, <http://specialised-imaging.com/>

Allied Vision, Taschenweg 2a, D-07646 Stadtroda, Germany, www.alliedvision.com

Point Grey, Canada, <http://www.ptgrey.com/>

FLIR, <http://www.flir.com/science/display/?id=68096>

Alliance Vision, 7 Avenue du Meyrol, 26200 Montélimar, France

Qualisys, Sweden, <http://www.qualisys.com/>

Photon Lines SAS, Parc Pereire Bât B99 rue Pereire, 78100, Saint-Germain-en-Laye France.
www.photonlines.fr/

Trinoma, 38 Avenue des Cévennes, 48800 Villefort, <http://www.trinoma.fr>

Dalsa, Canada, <https://www.teledynedalsa.com/imaging/products/cameras/>

Sony, Japan, www.sony.fr

Fuji, Japan, <http://www.fujifilm.eu/fr/>

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

Société Française d'Optique, <http://www.sfoptique.org/>

International Congress on High-speed Imaging and Photonics

Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche (liste non exhaustive)

CEA Gramat, Gramat, BP 80200 - 46500 Gramat. www.cea.fr/le-cea/les-centres-cea/gramat

Fraunhofer Institute, <http://www.freiburg.fraunhofer.de/>