



HAL
open science

PANORAMA TECHNOLOGIQUE DES CAMERAS THERMIQUES A FPA, ATOUTS ET LIMITES

Olivier Riou, Luc Audaire

► **To cite this version:**

Olivier Riou, Luc Audaire. PANORAMA TECHNOLOGIQUE DES CAMERAS THERMIQUES A FPA, ATOUTS ET LIMITES. journées de thermographie Instrumentale & industrielle Thermogram', Oct 2001, Lieusaint, France. hal-04135753

HAL Id: hal-04135753

<https://hal.u-pec.fr/hal-04135753v1>

Submitted on 21 Jun 2023

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.

JOURNEES D'ETUDES

THERMOGRAM' 2001

THERMOGRAPHIE INSTRUMENTALE ET INDUSTRIELLE

18 ET 19 OCTOBRE 2001

IUT SENART FONTAINEBLEAU - UNIVERSITE PARIS EST CRETEIL

INSTITUT DE LA THERMOGRAPHIE

PANORAMA TECHNOLOGIQUE DES CAMERAS THERMIQUES A FPA, ATOUTS ET LIMITES

OLIVIER RIOU

Centre d'études et de recherche de thermique et d'environnement des systèmes (CERTES)
Université Paris XII, IUT de Sénart, avenue Pierre Point, 77127 Lieusaint.
o.riou.iut@chbg.unicaen.fr

LUC AUDAIRE

Ingénieur-Docteur en microélectronique
Laboratoire Infrarouge du département Optronique - CEA Grenoble/DTA/LETI
14 rue du docteur Mazet, 38000 Grenoble
luc.audaire@wanadoo.fr

Résumé. *En mesure radiométrique, émission et réception doivent être considérées simultanément. La réception met en œuvre des détecteurs intégrés dans des radiomètres ou des caméras, appareils développés pour des besoins spécifiques. Dans les appareils classiques de thermographie, un seul détecteur est utilisé (détecteur ponctuel ou monodétecteur). La caméra thermique est alors dotée d'un dispositif optico-mécanique de balayage spatio-temporel (scanneur) qui scrute la scène thermique. Les nouvelles technologies d'imageur thermique mettent en œuvre une matrice (parfois appelée mosaïque) de $X \times Y$ détecteurs, évitant l'emploi du scanneur. Depuis 1989, les imageurs thermiques à matrice sont disponibles pour des applications civiles et militaires : il s'agit d'un saut technologique considérable dans l'espace de l'imagerie. En 1995, les matrices ont été adoptées pour des caméras thermiques d'entrée de gamme. Une meilleure qualité d'image n'implique pas de meilleures qualités de mesure. Devant la complexité des technologies mises en œuvre et l'herméticité des appareils, la confusion est possible. Il est désormais nécessaire d'observer les implications de l'emploi des matrices sur les caractéristiques et performances instrumentales des caméras thermiques. L'objet du présent panorama est de détailler les technologies des matrices FPA et appareillages en résultant dans le but de présenter leurs atouts et leurs limites dans l'utilisation en mesure thermographique des températures.*

1. INTRODUCTION

La dernière décennie a vu se développer une nouvelle technologie d'imageurs thermiques sur la base de nouveaux détecteurs infrarouges, tant pour des utilisations civiles que militaires. Jusqu'environ 1995, les imageurs travaillant dans l'infrarouge étaient soit de basse qualité, soit de prix élevé. La qualité d'image est une notion qui a été abordée dans la conférence de M. PAJANI. Ces imageurs mettent en œuvre des détecteurs infrarouges miniaturisés disposés en matrice placée dans le plan focal de l'optique. La technologie FPA (« focal plane array »), qui associe une matrice de détecteurs à l'électronique de détection et d'adressage, a permis une amélioration rapide des performances des imageurs thermiques. Plus généralement, ces nouvelles technologies sont le fruit d'une évolution où entrent en compétition le coût et la qualité d'image. Au stade de la conception des matrices et de la réalisation des caméras thermiques, on se préoccupe encore insuffisamment de la qualité de la mesure thermographique laquelle ne représente que 20 % du marché mondial, 80% étant des appareillages à but militaire ou paramilitaire. Aujourd'hui, ces technologies convergent vers des dispositifs ayant une qualité d'image améliorée et une meilleure adaptation de leurs performances aux applications de plus en plus variées. Depuis toujours, l'évolution technique des détecteurs a été guidée par des applications militaires avec un objectif de qualité d'imagerie. Ce choix a favorisé le développement des imageurs refroidis de très hautes performances mais de prix élevés. La réduction des budgets militaires, au niveau mondial, et le besoin de bénéficier de technologies plus simples mais néanmoins satisfaisantes, d'exploitation moins contraignante et de moindre coût de fabrication, ont provoqué des développements débouchant immédiatement vers les applications civiles dans le domaine de la recherche, du développement, de la maintenance ou de la surveillance. Elles représentent un potentiel économique important qui reste toujours à exploiter. A l'exception des applications de sécurité, de surveillance et de CND, le besoin civil est différent : les appareillages basés sur des matrices FPA sont des instruments de mesure et doivent ainsi bénéficier de performances dans le domaine de la mesure thermographique. L'opérateur adapte ses besoins aux disponibilités technologiques et il est séduit par l'orientation actuelle principale : la technologie des détecteurs FPA non refroidis. Les matrices de détecteurs refroidis ne sont pas en reste : certains domaines de R & D continuent à doper le développement lorsque des performances supérieures sont recherchées. Les nouveaux détecteurs QWIP (quantum well infrared photodetector) peuvent, pour une part, y répondre [1]. Bien qu'elles nécessitent un refroidissement, les matrices QWIP peuvent être produites à meilleur marché que les matrices refroidies à détecteurs traditionnels (InSb et MCT). Si leurs performances d'imagerie sont excellentes, les caméras de technologies FPA nécessitent certaines précautions lorsqu'il s'agit de thermographie de mesure. Les problèmes essentiels sont la compensation de la dérive, l'uniformisation de la réponse des détecteurs et la stabilité temporelle de cette uniformisation.

2. SENSEURS INFRAROUGES POUR L'IMAGERIE THERMIQUE

2.1. Introduction à la détection infrarouge

Les détecteurs sont basés sur une détection passive du rayonnement thermique. Ainsi, il est possible de visualiser une scène dans le spectre infrarouge ou d'effectuer des mesures de flux et, moyennant la modélisation de l'émetteur (et de son environnement), de remonter à sa température. Le rayonnement thermique est émis naturellement par la matière. Il est décrit par le rayonnement du corps noir dont Max Planck a établi l'expression de l'exitance spectrale. La plupart des imageurs thermiques opèrent dans trois fenêtres de transmission atmosphérique[2] : ce sont, en reprenant les désignations des militaires, les fenêtres 1,5-2,5 μm (SWIR pour *short wave infrared*), 3-5 μm (MWIR pour *medium wavelength infrared*) et 8-12 μm (LWIR pour *long wavelength infrared*). Dans

ces fenêtres, le facteur de transmission atmosphérique est optimum. En imagerie, on est amené à donner le nombre de photons objets émis à l'équilibre thermique (flux objet émis) et sa variation correspondant à un écart de 1°C de la température objet. Le contraste thermique donne le rapport de cette variation sur le flux moyen. Ces caractéristiques d'émission sont précisées sur le tableau 1. Elles sont données pour une température objet de 300 K correspondant à un pic d'exitance à environ 10 µm.

Tableau 1. Caractéristiques d'émission (indépendamment de toute détection)

Bande spectrale	Flux objet émis Φ_0 @ 300K	Variation de flux $\Delta\Phi$ pour 1°C objet @ 300K	Contraste thermique $\Delta\Phi/\Phi_0$
µm	Photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	Photons $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$	%
1,4-1,8	10^{10}	$8 \cdot 10^8$	8
2-2,5	10^{12}	$6 \cdot 10^{10}$	6
3,2-4,2	$3,4 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	3,8
4,5-4,9	$9 \cdot 10^{15}$	$2,8 \cdot 10^{14}$	3,1
8-11	$4,7 \cdot 10^{17}$	$7 \cdot 10^{15}$	1,5

Le flux émis est naturellement maximum dans la fenêtre 8-12 µm, de même que la variation de flux : le nombre de photons émis est une fonction croissante de la bande spectrale. A l'opposé, le contraste est décroissant : la variation de photons associée à une variation de température objet croît moins vite que le niveau moyen d'émission. Le rapport flux/bruit est aussi affecté par le choix de la bande spectrale. Si n est le nombre de photons, le rapport flux/bruit croît comme $n^{0,5}$ (ce qui n'est à considérer que pour les détecteurs BLIP, voir le paragraphe suivant) et est plus favorable dans la bande 8-12 µm.

2.2. Les caractéristiques des détecteurs

Un détecteur de rayonnement transforme le flux qu'il reçoit en un signal électrique qui peut prendre la forme d'une tension, d'un courant ou d'une puissance. Flux et signal sont fonction des variables d'espace et de temps. Les détecteurs infrarouges fournissent une réponse dans le temps qui traduit l'évolution temporelle du flux. Lorsque l'évolution provient également d'un déplacement du champ de vision des détecteurs, elle comprend en outre une variable d'espace. Il s'agit de l'imagerie thermique infrarouge. La limitation dans la détection des faibles niveaux de flux est le bruit électronique qui affecte aussi bien la détection du flux que son conditionnement. L'évaluation du rapport signal sur bruit permet d'établir un critère de qualité. Il doit être aussi élevé que possible. Pour l'interpréter correctement, nous devons au préalable définir des termes conventionnels décrivant les caractéristiques des détecteurs : la sensibilité, la sensibilité spectrale et le rendement quantique, la puissance équivalente au bruit (PEB ou NEP pour *Noise Equivalent Power*), la détectivité, la linéarité et le temps de réponse. Ces caractéristiques sont spécifiques au détecteur et à son mode d'utilisation. Mais elles ne caractérisent pas les performances du détecteur associé à son optique et à son électronique de lecture constituant l'imageur thermique ou la caméra thermique.

2.2.1. Sensibilité

La sensibilité du détecteur est le rapport du signal qu'il fournit sur le flux incident. Pour un détecteur qui produit un courant électrique, la sensibilité est le rapport du courant (en Ampère) sur la puissance incidente (en Watt). Il en est de même pour les détecteurs qui produisent une tension. La température du détecteur influe sur la sensibilité : elle affecte les propriétés optiques et électriques du matériau et modifie ses capacités d'absorption ou son aptitude à fournir un signal. Pour un détecteur dont la caractéristique signal(flux) est non linéaire, la sensibilité s'écrit en

différentiel $s=dV/d\Phi$ pour un point de fonctionnement donné $V_0=f(\Phi_0)$. Cette sensibilité est appelée « responsivity » dans la littérature anglaise.

2.2.2. Sensibilité spectrale et rendement quantique

La sensibilité du détecteur dépend de la longueur d'onde. Elle présente un maximum à une longueur d'onde particulière qui dépendra de la nature du matériau absorbant et de ses conditions de fonctionnement. On associe généralement la sensibilité à ce maximum pour spécifier la sensibilité absolue du détecteur.

On distingue deux types de détecteurs : les détecteurs thermiques et les détecteurs quantiques. Les détecteurs thermiques se basent sur la détection de l'échauffement produit par l'absorption du flux dans le matériau de détection. C'est donc une propriété de masse. Les détecteurs thermiques sont en principe achromatiques : leur sensibilité ne dépend pas de la longueur d'onde. Mais une sélectivité spectrale peut résulter d'une optimisation du détecteur pour une bande spectrale donnée : la sensibilité de certains détecteurs peut être adaptée par un dispositif réflecteur quart d'onde[3] ou un matériau absorbeur spécifique[4].

La détection quantique, quant à elle, repose sur l'absorption du rayonnement d'énergie $E=h\nu$ (avec h , constante de Planck et ν , fréquence du rayonnement), énergie supérieure au niveau d'excitation des porteurs électrons ou trous. Une polarisation permet de recueillir un courant électrique dont l'intensité est l'image du flux (encore appelé photocourant). La sensibilité est ici une propriété de structure du réseau atomique. Elle est plus élevée que celle des détecteurs thermiques. Cet aspect sera abordé dans le paragraphe « détecteurs quantiques ».

Le rendement quantique est le rapport du nombre d'événements comptabilisables (tels que les paires électron-trou) sur le nombre de photons incidents. Par exemple, si sur une courte période, 10^4 paires électron-trou sont produites sous un flux de 10^5 photons, le rendement quantique est de 0,1 soit 10%. Le rendement quantique est un paramètre clé de la sensibilité des photodétecteurs. Pour la plupart des dispositifs, le rendement quantique est faible (PtSi : 0,05). Pour les meilleures absorptions, le maximum atteint est de l'ordre de 80 % (InSb, MCT).

2.2.3. Puissance équivalente au bruit et notion de BLIP

La sensibilité définie précédemment nous donne l'amplitude de la réponse que nous pouvons attendre d'un détecteur pour un flux donné. La puissance équivalente au bruit PEB est la puissance du flux incident qui produirait un signal utile à la valeur efficace du bruit relevé sur le signal fourni par le détecteur.

Les sources de bruit peuvent être divisées en deux catégories : elles peuvent être internes au détecteur ou externes.

- Les sources externes incluent principalement les phénomènes triboélectriques et piézoélectriques (typiquement des charges électriques créées par des vibrations mécaniques) et de manière irréductible, les fluctuations de flux encore appelé bruit de photons. Il est présent dans tous les photodétecteurs. Il est la conséquence de l'arrivée aléatoire des photons à la surface du détecteur. Ce bruit sur le signal d'entrée est la limite ultime aux performances de détection. On atteint alors le *Background Limited Input Power*, ou BLIP.
- Les sources internes sont beaucoup plus nombreuses et leur énumération fastidieuse. Ces bruits sont générés par le détecteur et son électronique de conditionnement. Les plus fréquents sont le bruit Johnson commun à tout élément résistif, le bruit en $1/f$ particulier aux semiconducteurs, les bruits de décharge (*Shot Noise*) et de fluctuations thermiques spécifiques respectivement aux détecteurs quantiques et thermiques.

Les bruits internes sont équivalents à des sources de tension ou de courant qui se superposent au signal. Le niveau RMS du bruit augmente avec la bande passante électronique ΔF comme racine de ΔF . Pour cette raison, il est exprimé en $V/\sqrt{\text{Hz}}$ ou en $A/\sqrt{\text{Hz}}$.

- Bruit Johnson. Tout élément résistif génère une tension de bruit qui ne dépend que de sa température absolue $V_{\text{Johnson}} = \sqrt{4kTR\Delta F}$. C'est un bruit blanc encore appelé bruit thermique car son spectre en fréquence est continu. Il est la conséquence du déplacement aléatoire des électrons dans le conducteur.
- Bruit 1/f [5]. Il se manifeste à basse fréquence chez tous les semi-conducteurs tels que les transistors, diodes et détecteurs photoconducteurs HgCdTe (MCT), PbS et PbSe. Il est lié aux fluctuations de densité des porteurs générés dans le processus de conduction semi-conductrice. On peut montrer que ce type de bruit provient d'un grand nombre de processus de génération-recombinaison faisant intervenir des centres recombinants d'énergies diverses, situés soit dans le volume du matériau, soit à sa surface ou à l'interface matériau-contact imparfait et matériau-isolant.
- Le bruit de fluctuation thermique. Les échanges aléatoires par émission-absorption du rayonnement entraînent des fluctuations de températures du détecteur. Il dépend essentiellement des températures d'environnement T_{env} et de détecteur T_d ainsi que de l'émissivité du détecteur et affecte le comportement des grandeurs thermosensibles. Il apparaît comme la limite ultime aux performances des détecteurs thermiques.

La PEB est une caractéristique principale du détecteur. Elle est calculée depuis la relation

$$NEP = \Phi_{\text{inc}} A_d \times \frac{V_n}{V_s}$$

- où :
- NEP : Puissance équivalente au bruit en Watt
 - Φ_{inc} : Flux radiatif incident à la surface du détecteur en W/cm^2
 - A_d : Surface sensible du détecteur en cm^2
 - V_s : Tension du signal de sortie
 - V_n : Tension de bruit

2.2.4. Défectivité

Lorsque nous comparons différents détecteurs, celui qui fournit la réponse la plus importante pour un flux incident offre le meilleur choix. Mais lorsqu'on les compare en terme rapport signal sur bruit, le meilleur détecteur est celui qui présente la NEP la plus petite (en fait le NEP est défini avec une optique et une électronique). L'inverse de la NEP définit la défectivité. Plus la défectivité est grande, meilleur est la dynamique du détecteur. De par la définition de la NEP, la défectivité est fonction des paramètres suivants :

- La surface du détecteur A_d
- La bande passante de l'électronique de détection ΔF

D'autres paramètres intrinsèques à l'absorption entrent en jeu :

- La longueur d'onde du rayonnement incident
- La température du détecteur
- Les conditions de polarisation du détecteur

La défectivité ne permet pas de comparer directement deux détecteurs entre eux car elle dépend de la surface du détecteur et de la bande passante électronique. Pour supprimer ces dépendances, on introduit la défectivité spécifique D^* . Elle est donnée par la relation :

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \times \Delta f}}{NEP} \text{ cm}\sqrt{\text{Hz}}/\text{W}$$

- où :
- $A_d = A \times ff$: Surface du pel de la matrice de détecteurs (cm^2) \times taux de remplissage (*fill factor*)
 - Δf : Bande passante électronique en Hz
 - NEP : Puissance équivalente au bruit en Watt

La défectivité dépend de la longueur d'onde tout autant que la défectivité spécifique.

2.2.5. Linéarité

Les photodétecteurs produisent un courant ou une tension qui est une fonction linéaire du flux incident. Toute variation de flux provoque une variation dans la réponse. Dans les meilleures conditions, cette variation doit être la même quel que soit le niveau de flux. La limite supérieure est le courant de saturation. Suivant cette caractéristique, les détecteurs InSb sont d'excellents détecteurs qualifiés de « théoriques ». Les détecteurs photoconducteurs MCT ne sont pas linéaires et la distorsion de la caractéristique signal(flux) demande une correction du signal du flux. Une caméra thermique non linéaire ne permet pas d'assurer l'exactitude des mesures de températures en haut des calibres.

2.2.6. La différence de Température équivalente bruit (NETD)

La présence de bruit de photons pour les détecteurs quantiques et de bruit de fluctuation thermique pour les détecteurs thermiques limitent, pour l'imageur ou la caméra intégrant les détecteurs, la plus petite variation de température détectable (NETD, *Noise Equivalent Temperature Difference* ou différence de température équivalente au bruit). Ces bruits sont la limite ultime à la détectivité. Les fluctuations de température existent dès lors que sa température est différente de 0 K. Dans les conditions optiques et électroniques optimales, la NETD est donnée par[6]

$$\text{NETD} = \frac{\sqrt{\Delta f}}{\Delta \lambda \times D^* \times \frac{dR(\lambda, T)}{dT}} \times \frac{1}{\sqrt{A_d}}$$

où : $dR(\lambda, T)/dT$: dérivée de exittance spectrale du corps noir à la température T ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$)

$\Delta \lambda$: la bande spectrale ($\Delta \lambda = 3\text{-}5 \mu\text{m}$ ou $8\text{-}12 \mu\text{m}$)

D^* : Détectivité spécifique

Une plus grande surface du détecteur améliore la NETD mais limite les possibilités de détection dans le cas d'importante miniaturisation. Dans la pratique, ce n'est pas une règle absolue. La détection utilise un transducteur de sensibilité $s(\text{V/K})$. La NETD est le rapport la valeur RMS du bruit par la sensibilité de l'appareil (fig.1). Dans le cas de détecteurs quantiques, l'augmentation de la surface de détection entraîne un moyennage spatial du bruit de photons mais une sensibilité plus faible du fait des nombreuses recombinaisons de charges ; la NETD peut rester invariante. Dans le cas de détecteurs thermiques, une grande surface rend les détecteurs plus sensibles aux fluctuations de température de leur environnement [8].

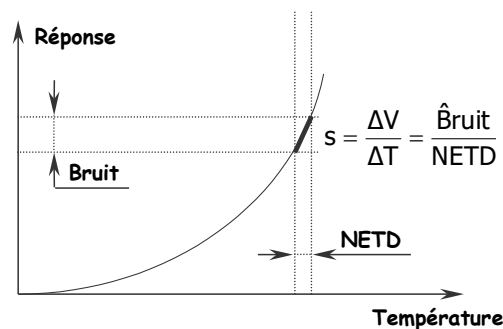


Fig.1 Sensibilité et NETD.

2.3. Les détecteurs thermiques

Les détecteurs thermiques peuvent fonctionner aux températures ordinaires avec une relativement bonne sensibilité à condition de bien maîtriser les échanges thermiques. Un contrôle strict de sa stabilité en température est indispensable en thermographie de mesure. Un autre aspect intéressant de ces détecteurs est leur coût de fabrication. Les détecteurs thermiques mettent en

œuvre une propriété de masse tandis que les détecteurs quantiques utilisent des propriétés de structure plus difficile à mettre en œuvre.

Un détecteur thermique (cas du microbolomètre intégré en matrice) comporte trois parties : un absorbeur infrarouge, un transducteur et une membrane autoportante (fig.2). L'absorption du rayonnement provoque un échauffement de l'absorbant et, de ce fait, modifie la valeur d'une grandeur thermosensible. Cette variation est convertie en signal par le transducteur. Le signal est enfin conditionné par un circuit intégré de lecture (ROIC, *Read Out Integrated Circuit*) qui fournit le signal à l'électronique. Le schéma de détection est illustré sur la figure 3. Pour les applications courantes, le plan de lecture comporte une couche réfléchissante déposée sur le plan de lecture. La hauteur membrane-plan de lecture est normalement de $\lambda/4$ avec $\lambda = 10 \mu\text{m}$. L'optique et la cavité absorbante $\frac{1}{4}$ onde définissent la bande spectrale. Pour des applications plus spécifiques, l'absorbant et le transducteur sont différenciés : les mesures en infrarouges lointains (à partir de $30 \mu\text{m}$) nécessitent un dispositif absorbant interférométrique[7] ou bien une antenne adaptée (de 200 à $800 \mu\text{m}$)[8].

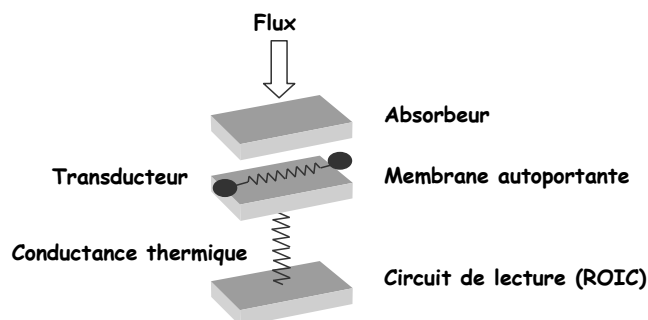


Fig.2 Vue générale d'un détecteur thermique. La cavité formée entre la membrane et le plan de lecture est absorbante. La conductance thermique est le fait des contacts électriques reliant le transducteur au plan de lecture et de la membrane. Il comporte un circuit de lecture (*Read Out Integrated Circuit*) dont le rôle est de conditionner le signal.

Les détecteurs thermiques sont classés en fonction de la nature de l'effet produit. Elle peut être résistive (détecteurs bolométriques), voltaïque (détecteurs thermopiles) ou capacitive (détecteurs pyroélectriques et ferroélectriques). Les détecteurs bolométriques et thermopiles permettent de mesurer un flux permanent alors que les détecteurs ferroélectriques et pyroélectriques sont sensibles uniquement aux variations de flux. Ces derniers nécessitent un hacheur pour moduler le flux incident. L'inconvénient majeur est la réduction de la puissance moyenne absorbée dans le rapport temps de flux/temps de cycle. D'autre part, le hacheur augmente la complexité du dispositif et sa consommation électrique.

2.3.1. Temps de réponse

Le temps de réponse d'un détecteur thermique est le temps d'établissement du signal en réponse à un échelon de flux incident. La constante thermique limite l'intervalle de temps auquel le détecteur fournit une réponse pertinente. Dans le cas idéal, il est relié à la constante de temps thermique d'un point élémentaire (pel) telle que $\tau_{th} = C/G$ (C : capacité calorifique du pel en J/K et G : conductance thermique pel-bain en W/K). Il est pratique pour l'électronicien de jouer avec la similitude des équations linéaires ou différentielles qui régissent les comportements électriques et calorifiques au travers des équivalences présentées dans le tableau 2.

Deux relations interviennent dans la description du comportement thermique dès l'instant où on néglige la diffusion de la chaleur : $\delta T = P \times R_{th}$ et $T(t) = \delta T \times (1 - \exp(-t/\tau_{th}))$ ($T(t)$ est la température instantanée et δT est l'incrément de température en réponse à un échelon de puissance). A une certaine puissance absorbée P , l'incrément de température est proportionnel à R_{th} . A capacité thermique donnée, le temps d'établissement du signal croît avec le même R_{th} comme $\tau_{th} = C \times R_{th}$: il y a un compromis à faire entre vitesse (largeur du régime transitoire) et exactitude (niveau de l'incrément de température). Les deux cas de figure sont représentés sur la figure 3.

Tableau 2 Analogies électrique-thermique

	Electrique	Thermique
courant	Ampères (A)	Watt (W)
tension	Volts (V)	Kelvin (K)
Capacité	C_{elec} (F)	C_{th} (J/K)
charge	Coulomb (C)	Joule (J)
résistance	R_{elec} (Ω)	R_{th} (K/W)
constante de temps (s^{-1})	RC	
« Loi d'Ohm »	$V=R \times I$	$T=R_{th} \times P$
constante de temps	$\tau_{elec}=R_{elec} \times C_{elec}$ et $\tau_{th}=R_{th} \times C_{th}$	
Réponse à un échelon	$V(t) = \delta V \times (1 - \exp(-t/\tau_{elec}))$	$T(t) = \delta T \times (1 - \exp(-t/\tau_{th}))$

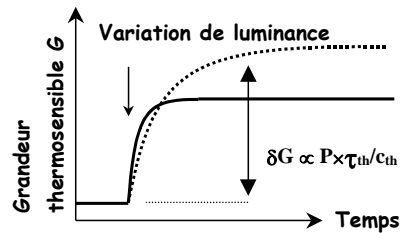


Fig.3 La réponse thermique suite à un échauffement met un certain temps à s'établir. La constante de temps thermique a tendance à élargir le temps de réponse comme le montre le tracé en pointillé (grande constante thermique) comparé au tracé en trait plein (faible constante thermique). Le temps de réponse est donné généralement dans la fourchette 10-90% de la valeur stabilisée et correspond à environ $2,2\tau_{th}$. A puissance fixe, la réponse à un échelon de température est proportionnelle à τ_{th}

2.3.2. Détecteur bolométrique

Le détecteur bolométrique utilise un matériau dont la résistance électrique est très sensible à la température. La réponse est caractérisée par le TCR (*Temperature Coefficient Ratio*) couplant le bilan électrique au bilan thermique. Pour atteindre une bonne sensibilité, le TCR doit être le plus élevé possible et le bruit résultant des contacts et de la résistance elle-même maintenu à un niveau faible. Deux approches sont mises en œuvre pour mesurer le photosignal (fig.4) : la première consiste à imposer une tension V puis à mesurer le courant correspondant I avec intégration dans une capacité. La seconde qui impose le courant, est suivie d'une lecture en tension. Dans tous les deux cas, la puissance $P_{lecture} = I \times V$ dissipée dans le détecteur intervient dans le bilan thermique : $T_{dét} = T_{ref} + (P_{scène} + P_{lecture}) \times R_{th}$. Actuellement, la lecture la moins bruyante est faite en courant avec le circuit injection directe décrit sur la figure 15 (adaptation d'impédance suivit d'intégration est d'adressage). Le détecteur est une résistance variable au même titre que les photoconducteurs quantiques.

Les matériaux utilisés traditionnellement sont le platine, le cuivre ou le nickel. Ils présentent, à l'ambiante, un coefficient de température de l'ordre de $10^{-3} K^{-1}$ associé à une faible résistivité ($\sigma \approx 0,1 \mu\Omega cm$). Les semiconducteurs (thermistance) sont aussi utilisés. Ils sont connus pour leur forte résistivité ($\rho \approx 1000 \mu\Omega cm$) et leur fort coefficient de température ($\alpha \approx 10^{-2} K^{-1}$). Pour les matériaux amorphes tels que les oxydes de vanadium V_2O_5 ou le silicium, la variation est de la forme $R(T) = R_0 \times \exp(-E_a/KT)$ où E_a (énergie d'activation) est caractéristique du matériau et R_0 de la géométrie du détecteur. Les semiconducteurs les plus utilisés en thermographie infrarouge sont principalement le silicium polycristallin dopé au germanium (SiGe), les oxydes de vanadium (VO_x) et récemment le composé supra conducteur $YbaCuO$. Ils sont choisis pour leur grande reproductibilité. L'emploi de la thermistance est semblable à celui des métaux à la différence près qu'ici ce n'est pas la température du détecteur que l'on veut identifier mais ses variations. Les ordres de grandeur sont différents. L'optique projette la cartographie des températures apparentes sur le plan focal

mais avec une atténuation de la puissance telle que si l'on veut détecter $0,1^{\circ}\text{C}$ sur la scène, il faut pouvoir détecter $0,001^{\circ}\text{C}$ sur le détecteur, ce qui correspond (par exemple) à une variation de $25\ \Omega$ sur une résistance nominale de $1\text{M}\Omega$ [9]. Le niveau de bruit des métaux est généralement faible ($V_{\text{bruit}} = \sqrt{4kTR\Delta f} \approx 0.1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ à l'ambiante pour $R = 100\ \Omega$). Celui des semiconducteurs est plus important : au bruit Johnson se superpose le bruit en $1/f$ qui élève ce niveau typiquement d'un ordre de grandeurs en dessus de celui des métaux. Malgré cela, les métaux ont été progressivement abandonnés au profit des semiconducteurs. Le choix est imposé par l'électronique de lecture. Les résistances métalliques sont de l'ordre de quelques ohms. Il n'est pas envisageable d'intégrer un circuit de lecture moins bruyant que $0,1\ \mu\text{Vrms}$ pour les résistances réalisables dans les pas des matrices d'imagerie.

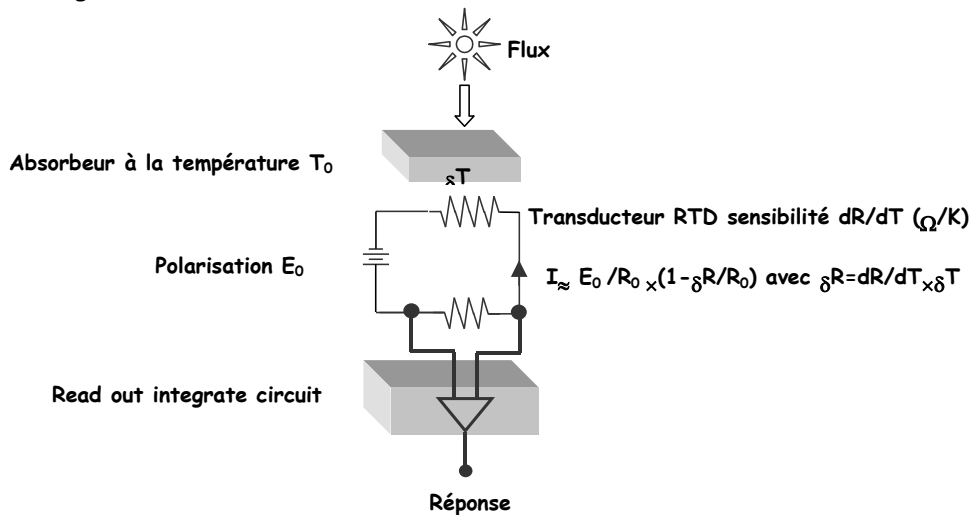


Fig.4 Principe général de la chaîne de détection utilisant un détecteur bolométrique sous éclairage permanent. Actuellement la lecture la moins bruyante est faite par intégration en courant (voir chapitre microélectronique dans le plan focal).

2.3.3. Détecteur pyroélectrique

Les détecteurs pyroélectriques utilisent la propriété qu'ont certains cristaux de se polariser spontanément en dessous d'une certaine température (température de Curie). La polarisation est sensible à la température. La dépendance est donnée par la sensibilité diélectrique $p = dP/dT$ au point de fonctionnement du détecteur. Cependant, à température constante, la distribution de charge interne est neutralisée par les porteurs libres et par les potentiels de surfaces de telle sorte qu'aucune tension n'est mesurée. Par contre, si la température est rapidement modifiée, les moments des dipôles internes changent et ce qui se traduit par l'apparition d'une tension transitoire qui peut être détectée. Cet effet pyroélectrique est exploité pour détecter des rayonnements modulés en travaillant à la température ambiante. En appliquant un champ électrique, on peut améliorer la sensibilité diélectrique en utilisant la dépendance en température de la permittivité diélectrique ϵ du matériau. C'est ce l'on entend par effet pyroélectrique induit ou bolomètre ferroélectrique. La polarisation obtenue sous champ est alors [10]

$$p = p_0 + \int_0^E \frac{\partial \epsilon}{\partial T} dE \quad (\text{coulombs}/(\text{cm}^2\text{K}))$$

(p_0 est la polarisation diélectrique en absence de champ électrique).

Les détecteurs pyroélectriques sont en fait de type capacitif. Un rayonnement incident modulé va donc provoquer une variation de température ΔT à la même fréquence s'accompagnant d'une variation de charge ΔQ telle que $\Delta Q = p \times A_d \Delta T$. L'utilisation de matériaux à forte sensibilité diélectrique p et un dispositif électronique d'intégration permettent une très grande détectivité de l'ordre de $10^{-8}\ \text{W}/\text{cm}^2$ à une fréquence de $1000\ \text{Hz}$. Les matériaux couramment utilisés pour les détecteurs pyroélectriques sont donnés dans le tableau 3. En ce qui concerne le bruit, il faut noter

qu'en dessous leur température de Curie, s'ils sont pyroélectriques, ces corps sont également piézoélectriques donc microphoniques.

Tableau 3 Détecteurs pyroélectriques

Sigle	Nom	Composition	Température Curie (°C)	de Nature-Utilisation
TGS	Sulfate de triglycine		49	Organique monocristallin Peu utilisé car hygrophile
PVFD/TRFE	Polyvinyle di/trifluoré	(CF ₂ (x)-CF ₃ (1-x)) _n	110	Polymère organique. Très facile à déposer par tournette.
LiTaO ₃	Tantalate de lithium	LiTaO ₃	665	Cristallin, aminci. Très difficile à mettre en forme car cassant et ingravable.
BST	Titanate de barium-stontium		?	
PST	Tantalate de plomb-scandium	PbSc _(x) Ta _(x) O ₃	> 100, dépend de x	Céramique, massive amincie
PZT	titanate,zirconate de plomb	PbZr _(1-x) Ti _(x) O ₃	> 100, dépend de x	Céramique, dépôt mince, recuite

2.4. Les détecteurs quantiques

L'absorption des rayonnements électromagnétiques produit des effets quantiques qui peuvent être de surface (émission d'électron de surface) ou de masse (interaction avec les électrons du matériau). La réponse du détecteur quantique dépend essentiellement de la quantité de photons incidents et non de leur énergie à condition qu'elle soit supérieure à $h\nu$. Leur utilisation requiert généralement un refroidissement aux températures cryogéniques afin de réduire les courants d'obscurité (*Dark Current*). En retour, ils présentent de très bonnes performances, une détectivité importante et un temps de réponse beaucoup plus court que celui des détecteurs thermiques (100 ns à 1 μ s).

2.4.1. Le point sur les matériaux semiconducteurs utilisés en détection IR

Les détecteurs quantiques sont subdivisés en fonction de l'effet produit : les détecteurs photoconducteurs et les détecteurs photovoltaïques. Chacun utilise un matériau semiconducteur spécifique mais tous présentent la particularité de produire un effet à une certaine longueur d'onde du rayonnement (longueur d'onde coupure λ_c fonction de $E=h\nu$). Ils sont ainsi intrinsèquement sélectifs contrairement aux détecteurs thermiques. L'effet photosensible peut être masqué par d'autres effets électriques thermiquement dépendants (loi d'Arrhenius). C'est pourquoi le refroidissement est indispensable. Le tableau 4 donne pour, divers matériaux, les limites de longueurs d'ondes ainsi que les températures optimales de fonctionnement.

Tableau 4 Semiconducteurs utilisés en thermographie infrarouge

	CdS	CdSe	CdTe	GaP	GaAs	Si	Ge	PbS	PbSe	InAs	InSb	Pb _{0.2} Sn _{0.8} Te	Hg _{0.8} Cd _{0.2} Te
T(K)	295	295	295	295	295	295	295	195	195	195	77	77	77
E _g (eV)	2.40	1.8	1.5	2.24	1.35	1.12	0.67	0.42	0.23	0.39	0.23	0.1	0.1
λ_c (μ m)	0.52	0.69	0.83	0.56	0.92	1.1	1.8	2.9	5.4	3.2	5.4	12	12

Le silicium est un composé très stable et de réponse linéaire. Il couvre la bande de 0,4 à 1,1 μ m mais elle peut être étendue à 23 μ m avec un dopage à l'arsenic et à 29 μ m avec de l'antimoine. En matrice refroidie ou stabilisée, il est à la base des caméras scientifiques de thermographie fonctionnant dans le spectre visible. Le germanium est un composé relativement instable ne permettant pas de faire des mesures fiables. Le dopage du germanium par l'or repousse la limite de longueurs d'ondes

efficaces à $8,3 \mu\text{m}$ et même à $120 \mu\text{m}$ avec du bore. Les détecteurs PbS et PbSe sont encore utilisés dans certains analyseurs ligne. Ce sont les plus anciens détecteurs quantiques utilisés en infrarouge. L'InAs n'est pas encore très répandu. Non refroidi, il est utilisé dans la réalisation d'imagerie thermique FPA proche infrarouge ($0,9$ à $1,9 \mu\text{m}$). Le PtSi, du fait de son rendement quantique médiocre (inférieur à 1%), n'est utilisé que dans les senseurs matriciels. Très stable et reproductible, son utilisation en matrice SW est favorable aux mesures au standard vidéo. L'HgCdTe (ou MCT), plus répandu du fait de l'adaptation aisée de la bande spectrale par dosage des composés de base, reste le composant le moins reproductible et le moins stable malgré les lourds moyens mis en œuvre pour maîtriser la technologie de fabrication des matrices. En photoconducteur, il est non linéaire et nécessite une correction de la courbe d'étalonnage.

Le bruit en $1/f$ est dominant chez tous ces matériaux. Il provient des défauts de structure cristalline lors de la mise en forme du semiconducteur, des défauts de surface ou d'interface semiconducteur-contacts électrique. Fondamentalement, ces défauts génèrent une distorsion locale du réseau cristallin et présentent un grand nombre de centres recombinants qui piègent les porteurs. Ils sont caractérisés par des constantes de temps de l'ordre de la dizaine de millisecondes, particulièrement résonant aux basses fréquences. Le bruit en $1/f$ est présent chez HgCdTe du fait de son instabilité naturelle et de la grande mobilité des dislocations. Chez les détecteurs QWIP, le composé AsGa/AlGaAs présente peu de centres recombinants car ils mettent en œuvre une structure alternée dont les réseaux cristallins sont bien adaptés.

2.4.2. Détecteurs photoconducteurs

C'est l'effet le plus exploité. Il se manifeste principalement dans les semiconducteurs. Les détecteurs photoconducteurs sont basés sur la génération de porteurs libres (électrons, trous ou paires électron-trou) sous l'action du rayonnement. Elle se traduit par une augmentation de la conductivité du semiconducteur. L'effet peut être intrinsèque ou extrinsèque suivant qu'il implique la largeur de bande interdite propre au semiconducteur ou des états localisés d'énergie plus faible, proches de la bande de valence ou de conduction, regroupés en niveaux d'énergie donneur ou accepteur. La photoconductivité intrinsèque exploite l'excitation d'une paire électron-trou du matériau par le photon incident et ne considère que les photons d'énergie $h\nu > E_g$ la largeur de la bande interdite (fig.5).

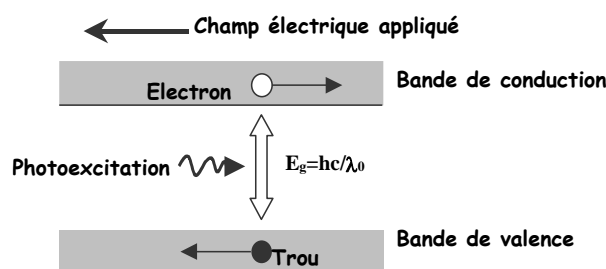


Fig.5 Photoconductivité intrinsèque. Une plus grande largeur de bande interdite repousse la détectivité vers les faibles longueurs d'onde. La conduction repose sur la génération de paires électron-trous par des photons d'énergie supérieure à E_g , paires qui seront séparées par un champ électrique.

Dans le cas d'un semiconducteur extrinsèque, la conductivité peut être accrue par addition d'impuretés. Si la valence de l'impureté est supérieure à celle du semiconducteur, il apparaît un électron supplémentaire. Ces électrons vont se regrouper dans des niveaux d'énergie (niveau donneur) très voisins de la bande de conduction. Ils peuvent donc facilement passer dans cette bande en rendant le matériau conducteur. Il s'agit alors d'un semi-conducteur de type N. Si la valence de l'impureté est inférieure à celle du solide, il apparaît des niveaux vides (niveau accepteur ou trou) au voisinage de la bande de valence. Ces niveaux peuvent se remplir en extrayant des électrons de la bande de valence et le matériau devient alors conducteur par une génération de

trous. Il s'agit d'une génération de type P (fig.6). La nature et la quantité de dopant élargissent considérablement la plage de longueurs d'onde susceptibles de produire l'effet photoconducteur.

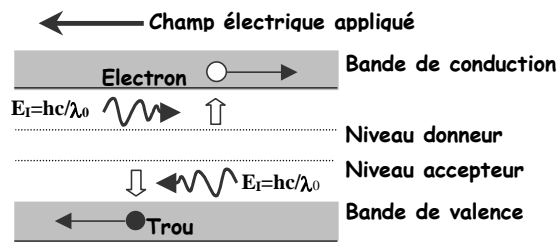


Fig.6 Photoconductivité extrinsèque. La largeur de bande interdite est considérablement réduite par l'ajout de dopant N (niveau donneur) ou P (niveau accepteur). La conduction repose sur la génération de porteurs majoritaires soit d'électrons dans la bande de conduction, soit de trous dans la bande de valence.

En pratique, le détecteur photoconducteur génère un courant en circuit fermé. La génération des photoporteurs module la conductivité naturelle du matériau $\sigma = d \times q \times \mu$ où la densité de porteurs générés d est liée au rendement quantique η et au flux N_λ :

$$d = \eta q N_\lambda \quad \text{tel que} \quad N_\lambda = (\lambda_0 A_d \frac{dR}{d\lambda}) \times \frac{1}{hc}$$

où η : rendement quantique (sans dimension)

μ : mobilité électronique des porteurs

q : Charge de l'électron (Coulomb)

N_λ : Nombre de photons de longueur d'onde λ absorbée par unité de temps

La polarisation par un générateur de tension (V) induit un courant dont les variations reproduisent le flux incident sur le détecteur de surface collectrice A_d . Le schéma de détection est donné sur la figure 7.

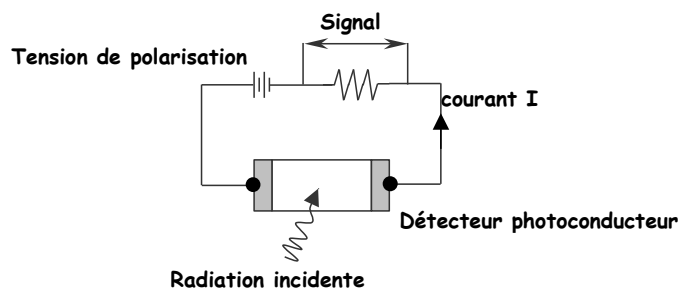


Fig.7 Schéma de détection d'un détecteur photoconducteur. L'élément semi-conducteur fournit un courant proportionnel au flux de photons incident. Le photocourant est ensuite détecté aux bornes d'un élément résistif qui fournit le signal. Le circuit de détection est polarisé afin de contrôler le point de fonctionnement.

La résistance du détecteur varie comme $R_{det} = \rho \times L / S$ (S et L respectivement section et longueur du détecteur). Le courant photoconducteur est alors

$$I = G \times V / R_{det}$$

G : Gain photoconducteur représentant le rapport entre la durée de vie d'un porteur et le temps de transit dans le détecteur

Le gain photoconducteur est généralement très faible à cause des recombinaisons électron-trous au sein même du semi-conducteur. Il en est de même pour le rendement quantique qui reste une limite incontournable. Ces caractéristiques font que le courant photoconducteur est de très faible niveau. A titre d'exemple, un éclaircissement de $0,16 \text{ W/cm}^2$ ($1 \mu\text{W}$ sur une surface active de $25 \times 25 \mu\text{m}^2$), un rendement quantique de 10 % et un gain photoconductif de 10 % produisent un photocourant de l'ordre de $0,1 \mu\text{A}$ pour le composé $\text{Hg}_{0,8}\text{Cd}_{0,2}\text{Te}$. La caractéristique tension-courant est donnée sur la figure 8. En thermographie, Les semiconducteurs utilisés dans les détecteurs photoélectriques sont :

- l'antimoniure d'Indium (InSb)

- l'arséniure de Gallium (AsGa)
- le tellurure de mercure cadmium (HgCdTe)
- le sulfure de plomb (PbS)
- le sélénure de plomb (PbSe)

InSb et GaAs sont deux semi-conducteurs covalents très stables mais l'adaptation sur des substrats silicium est génératrice de nombreux centres de recombinaison (une forte composante en 1/f). Le HgCdTe est un semi-conducteur ionique instable. Inadapté aux températures supérieures à 120°C, l'élaboration de son électronique de détection se fait séparément et l'assemblage du senseur fait appel à la technologie hybride 3D.

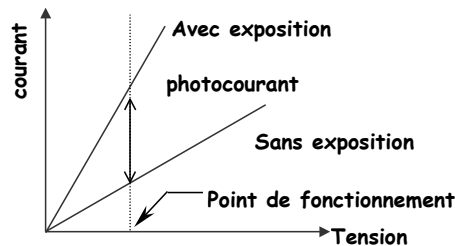


Fig.8 Caractéristique tension-courant d'une cellule photoconductrice. Le photocourant est accru sous éclairage. Pour une puissance de 1 μW , le photocourant est de l'ordre de 0,1 μA . Il est essentiellement limité par les recombinaisons électron-trou dans le semiconducteur.

2.4.3. Détecteurs QWIP

Le détecteur QWIP est photoconducteur. Le principe QWIP (quantum well infrared photodetector) est expliqué par la mécanique quantique. Il met en œuvre une alternance de couches semiconductrices grand gap et petit gap qui forment une succession de puits quantiques (quantum well) exposés chacun au rayonnement. Chaque puits est équivalent à une boîte drainant les porteurs majoritaires. De par la propriété des puits quantiques, les porteurs sont liés à des niveaux d'énergie quantifiés. Ces niveaux dépendent des « dimensions » du puits (hauteur et largeur). Ces dimensions ont une définition énergétique et spatiale : dans le cas d'une interface grand gap/petit gap/grand gap, les électrons libres sont confinés dans une bande étroite de largeur ω et la hauteur du puits est définie par la nature de l'interface, perçue par les électrons comme une barrière d'énergie qu'il doit franchir pour participer à la conduction (fig.9).

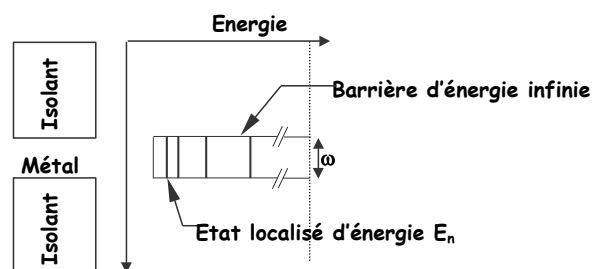


Fig.9 Etats localisés dans une structure grand gap-petit gap-grand gap.

Dans un tel puits quantique, les états énergétiques des électrons sont décrits par

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* \omega^2} \times n^2$$

où m^* : masse effective des porteurs liés
 n : entier ≥ 1

Les détecteurs QWIP utilisent la photoexcitation des électrons dans un état fondamental pour les porter dans le premier état excité correspondant aux bandes de conduction pour les électrons (ou de valence pour les trous). Ils peuvent alors s'échapper du puits et sont ensuite collectés en tant que photocourant (fig.10). L'écart d'énergie entre ces deux états est

$$E_2 - E_1 = \frac{3\hbar^2 \pi^2}{2m^* \omega^2}$$

Une telle structure procure plus de flexibilité que les détecteurs photoconducteurs car il est possible d'ajuster indépendamment la longueur d'onde d'absorption (en faisant varier la largeur du puits ω) et la hauteur de barrière (en contrôlant la composition des couches intercalaires). Le multicouche GaAs/Al_xGa_{1-x}As est particulièrement bien adapté à cet usage. La largeur des empilements peut être changée continûment en faisant varier la composition en aluminium. Il faut noter au bénéfice de l'AsGa qu'il a la maturité d'une technologie maîtrisant les interfaces grand gap/petit gap, donc exempt de bruit 1/f et la stabilité naturelle d'un semiconducteur grand gap.

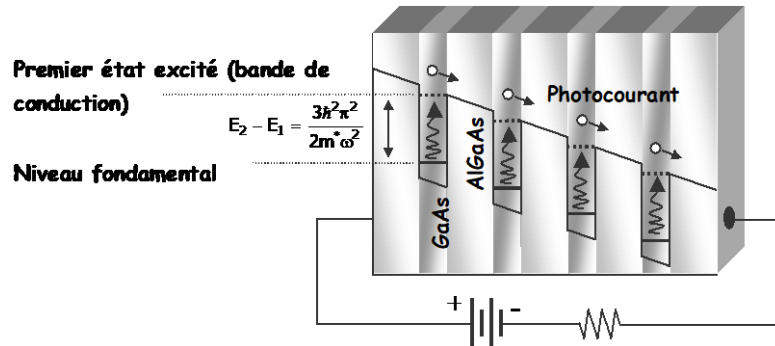


Fig.10 Diagramme d'énergie et principe de détection d'un détecteur QWIP. L'absorption de flux crée par photoexcitation des électrons libres dans le semiconducteur AsGa. Ils sont ensuite drainés grâce à un champ électrique externe.

Sa mise en œuvre suppose un bon couplage optique car ne sont détectés que les photons qui se propagent parallèlement aux couches technologiques pour entrer en résonance avec le puits. Or, par définition, le FPA est orthogonal à l'axe optique. Il est impératif de déposer une couche d'entrée dite de couplage optique qui induit un rendement quantique faible (quelque %) mais significative en diffractant le faisceau. Une photographie de la couche optique de réflexion est présentée sur la figure 11.

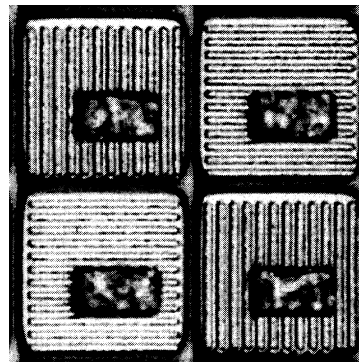


Fig.11 Couche optique de réflexion. Photographie issue de la référence [11]. La grille a un pas de 3 μm . La taille du pel est 40 μm .

Avec cette structure, la réponse spectrale balaye en principe une large gamme de fréquences : depuis le proche infrarouge (SWIR, 1,5-2,5 μm), l'infrarouge moyen (MWIR, 3-5 μm), l'infrarouge lointain (LWIR, 8-12 μm) et l'infrarouge fossile (VLWIR, >12 μm). La largeur spectrale de fonctionnement d'un QWIP « normal » est actuellement assez faible. Les recherches en cours montrent que ce type de structure permet aussi de faire de l'imagerie multi-spectrale[12,13] dans laquelle le même FPA délivre, en synchronisme spatial et temporel, le thermosignal dans deux bandes de longueur d'onde spectralement disjointes.

2.4.4. Détecteur photovoltaïque

Le détecteur photovoltaïque se comporte en générateur de tension. A la différence du précédent, cet effet requiert une barrière de potentiel pour se manifester. En pratique, on réalise une jonction P-N dont la caractéristique principale est d'être très dissymétriquement dopée et surtout d'avoir une zone N très fine de telle sorte que la zone de charge d'espace se situe très près de la surface éclairée (Fig.12).

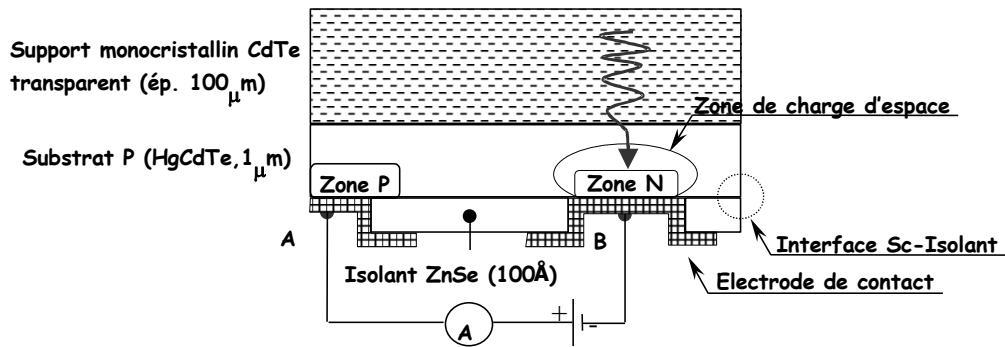


fig.12 Structure d'un pel HgCdTe photovoltaïque. Les contacts, ramenés sur le même plan, sont adaptés à la technique d'assemblage 3D hybride.

Sans polarisation, les niveaux de Fermi des semi-conducteurs sont alignés. La zone de diffusion correspond à la distorsion des niveaux de valence et de conduction créant la barrière de potentiel et un champ électrique local. L'absorption de photons d'énergie $h\nu$ suffisante libère des électrons et des trous qui vont diffuser de part et d'autre de la jonction. L'extrémité P devient positive, l'extrémité N devient négative (fig.13).

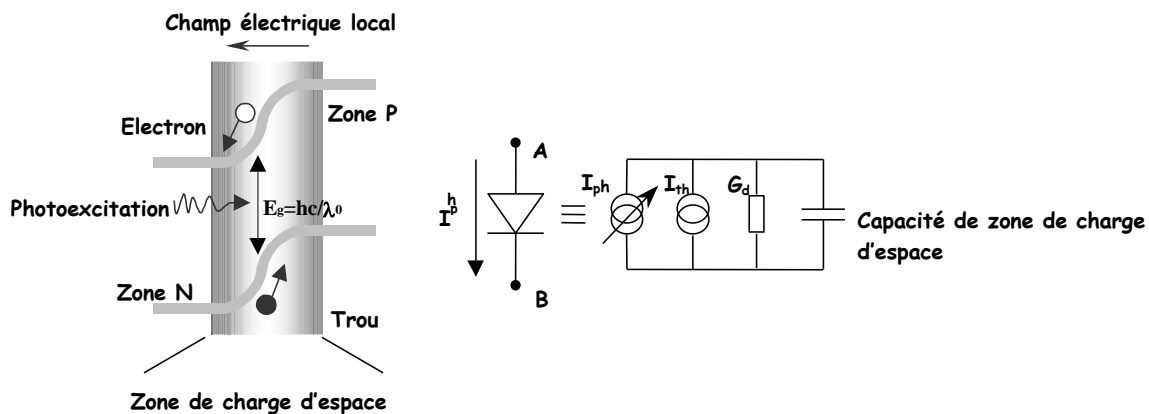


Fig.13 Diagramme de bande de la barrière Schottky. En absence de polarisation, les porteurs électrons et trous générés par photoexcitation se répartissent de part et d'autre de la jonction P-N, créant une zone de charge d'espace et un champ électrique local. Le schéma électrique équivalent est donné. Au photocourant se superpose un courant thermiquement activé.

La relation donnant le photocourant en circuit fermé est identique à celle des détecteurs photoconducteurs mais ici avec un gain photoconducteur de 1 puisque tous les porteurs générés vont franchir la barrière sans recombinaison possible. Dans les mêmes conditions de flux incident, le courant photovoltaïque est 10 fois supérieur au courant photoconductif. La caractéristique courant-tension permet d'illustrer les différents paramètres électriques mis en jeu (fig.14).

Les semiconducteurs mis en œuvre dans les détecteurs photovoltaïques sont

- L'antimoniure d'Indium (InSb)
- Le tellurure de mercure cadmium (HgCdTe)
- Le siliciure de platine (PtSi)

Les semiconducteurs basés silicium sont d'une très grande stabilité et s'adaptent remarquablement à l'électronique au silicium : propreté des interfaces, reproductibilité et technologie

remarquablement maîtrisée. Il reste un matériau de choix dans la fabrication économique des détecteurs photovoltaïques et de son électronique en silicium dans le même plan (architecture 2D). L'InSb est un composant photovoltaïque très stable et sa sensibilité $dI/d\Phi$ est indépendante du flux sur plusieurs décades. C'est le meilleur détecteur pour la bande 3-5 μm . Il présente un fort rendement quantique (supérieur à 80 %). Le HgCdTe, utilisé en détecteur photovoltaïque, présente davantage de bruit. La destination en est principalement l'imagerie thermique rapide du fait de son bon rendement quantique (supérieur à 80 %) et de son faible temps de réponse (qq 100^{aines} de ns).

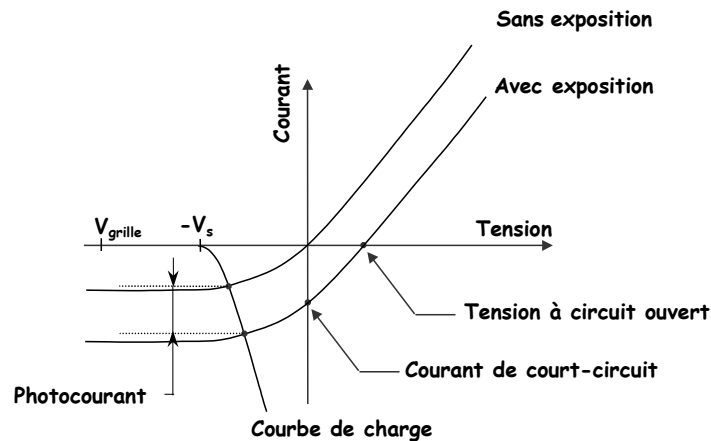


Fig.14 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. Le champ naturel de la jonction est assisté par une tension de polarisation inverse.

2.5. MICROELECTRONIQUE DANS LE PLAN FOCAL

Depuis les années 60, les détecteurs dits de « première génération » sont constitués d'un monodétecteur ou d'une barrette de détecteurs. Les connexions entre détecteurs et électronique sont faites par une nappe de fils, chacun associé à un détecteur. La 2^{ème} génération est constituée des matrices de faibles dimensions avec balayage. Dans les matrices de troisième génération, on trouve des senseurs de complexité supérieure à 640×480 au pas de 25 μm . Ils acquièrent tous les points de la prise de vue simultanément (*Starring Arrays*, matrice fixe, par opposition aux matrices avec balayage mécanique). Le plan focal délivre le thermosignal: l'imagerie dans l'infrarouge a rejoint l'imagerie visible. Au-delà de la diversité des technologies de détection, il y a unité structurelle dans l'assemblage des fonctions élémentaires du pel (point élémentaire) : détection, lecture du détecteur avec adaptation d'impédance, conditionnement du signal de lecture par intégration et enfin multiplexage des signaux vers la sortie.

2.5.1. Electronique de lecture et de conditionnement du signal détecteur

Dans sa forme la plus simple, Le circuit de conditionnement comporte le détecteur (Photovoltaïque, photoconducteur, QWIP...), un transistor MOS et une capacité de stockage. Par conditionnement du signal, on entend d'une part l'adaptation d'impédance de la lecture à celle du détecteur et d'autre part un filtrage du signal par intégration dans le pel lui-même. La lecture peut être faite soit en courant, soit en tension. Les transistors MOS autorisent ces deux lectures, à basse impédance sur la source (quelques $\text{k}\Omega$) ou à haute impédance sur la grille (courant d'entrée $< 10^{-14}\text{A}$).

2.5.1.1. Lecture en courant

Appelée injection directe, elle est utilisée aussi bien pour les photodiodes que pour les bolomètres de type résistif. La tension de grille V_{grille} (diminuée d'une tension de seuil caractéristique du transistor et de sa technologie) impose la tension inverse de polarisation du détecteur V_{source}

(fig.15). Pour une diode « bien faite », on obtient ainsi une grande impédance de source (dans le domaine 3-5 μm : 10 $G\Omega$, dans le domaine 8-12 μm : 100 $M\Omega$). Le courant détecteur est injecté dans la source à basse impédance, relativement à celle de la diode, typiquement $G_d/100$ tel que le rendement d'intégration $G_d/(G_t+G_d)$ soit satisfaisant. Il est conservé sur le drain sous forme d'un générateur de courant pratiquement idéal qui débite dans le condensateur. En fin d'intégration, la charge $Q_{\text{int}}=I_t \times \tau_{\text{int}}=C_{\text{int}} \times V_{\text{int}}$ est proportionnelle au temps d'intégration τ_{int} .

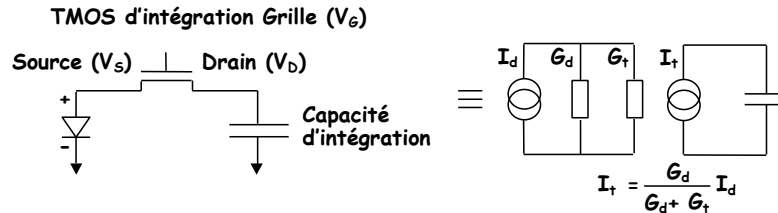


Fig.15 lecture en courant avec adaptation d'impédance sur la source du TMOS d'intégration. Elle est satisfaisante pour $G_d/100$, le rendement d'intégration atteignant 99%.

Le temps d'intégration du signal est conditionné par la charge maximale admise par la capacité de stockage : la tension de condensateur est limitée par la tension de grille du TMOS d'intégration et la capacité C_{int} est un paramètre fixé dès la fabrication du pel tandis que I_t est l'image du flux incident. Ainsi, le temps maximal d'intégration avant saturation $\tau_{\text{max}}=C_{\text{int}} \times V_{\text{max}}/I_t$ limite le flux maximum admissible. Dans le domaine temporel, chaque pel est « lu » à une fréquence trame dans un filtre passe-bas de largeur τ_{int} . Le schéma de conditionnement est présenté sur la figure 16.

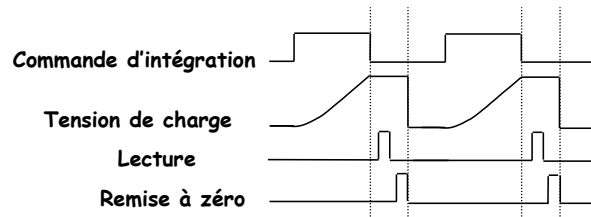


Fig.16 Séquence d'intégration, de lecture et de remise à zéro du circuit de conditionnement

Il est important de remarquer que ce filtrage passe-bas améliore le rapport signal/bruit en limitant la bande passante du bruit à celle qui est utile à la détection. La réponse est ensuite conditionnée, puis le condensateur est remis à zéro. Dans le domaine fréquentiel, l'intégration prend la forme d'un sinus cardinal de période $\tau \times f = \pi$ qui présente un premier zéro pour $f_0 = \pi/\tau_{\text{int}}$. La fréquence trame est alors choisie inférieure à f_0 afin d'éviter un phénomène de recouvrement de spectre. τ_{int} est également ajusté afin de travailler typiquement à mi-charge du condensateur en fin d'intégration.

2.5.1.2. Lecture en tension

Ce mode de lecture a été mis en œuvre dans le satellite d'observation astronomique ISO (*Infrared Space Observatory*) et dans la lecture de détecteurs pyroélectriques. L'ensemble du plan focal d'ISO, hors service aujourd'hui, fonctionnait à température de l'hélium liquide : 4,2 K. A cette température les détecteurs photoconducteurs avaient une résistance moyenne R_{det} supérieure à $10^{12} \Omega$, modulée par le flux absorbé. Le schéma de lecture en tension est présenté sur la figure 17.

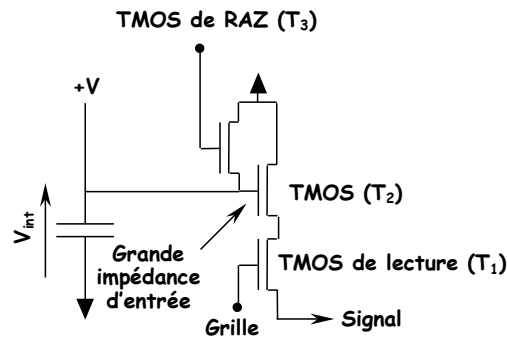


Fig. 17 Lecture en tension avec adaptation d'impédance sur la grille de T_2 . La tension d'intégration V_{int} est recopiée sur la source du TMOS de lecture.

Le photoconducteur est chargé par un condensateur $C_1=0,1$ pF. Un transistor MOS T_{raz} , utilisé en interrupteur, réinitialise les détecteurs avant chaque prise de vue. La tension évolue ensuite exponentiellement avec un constante de temps $\tau_{det}=C_{lec}\times R_{det}(\Phi)$. Le transistor MOS T_1 , chargé par T_2 , recopie sur sa source la tension d'intégration. L'adaptation d'impédance et La gestion de l'adressage est faite au travers du transistor T_2 . La valeur du signal utile est la différence entre les valeurs des échantillons suivants : l'un à l'initialisation, l'autre après un temps d'intégration $\tau_{int}<\tau_{det}$. La différence, proportionnelle à $\tau_{int}/R(\Phi)\times C_{lec}$, a pris en compte le bruit de réinitialisation. Une adaptation de $C_{lec}=1$ pF en a été faite pour l'observation à partir du sol où le flux de fond atmosphérique est important. En 1990, dans le cadre d'un contrat européen d'aide à la conduite tous temps sur les véhicules civils, une approche plus sophistiquée a exploité la technologie CMOS en lecture de détecteurs capacitifs pyroélectriques. Dans ce pel présenté sur la figure 18, le détecteur C_{det} (0,2 pF) est lu en tension. La réponse, $300 \mu V/K$, impliquait, avant adressage, une amplification in situ. Le deuxième étage, réinitialisé périodiquement par l'interrupteur T_2 , présente un gain de 150. Les deux étages sont couplés par une liaison alternative constituant une détection synchrone à la fréquence du choppeur.

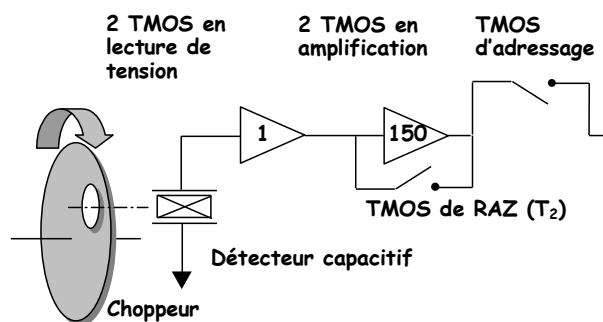


Fig. 18 Technologie CMOS en lecture de détecteurs capacitifs pyroélectriques.

2.5.2. Electronique d'adressage

Gérer une matrice de détecteurs dans la réalisation d'une image thermique suppose un adressage synchronisé sur la fréquence de trame. Il existe à ce jour deux technologies d'adressage : le CCD (pour Charge Coupled Device) et le CMOS (pour Complementary Metal Oxide Semiconductor).

2.5.2.1. Lecture par CCD

Dès 1980, les senseurs IRCCD (pour Infrared Charge Coupled Device) sont une extrapolation des circuits de la prise de vue utilisés dans le domaine visible. Le courant détecteur est intégré directement dans le pel durant le temps d'exposition (fig.19).

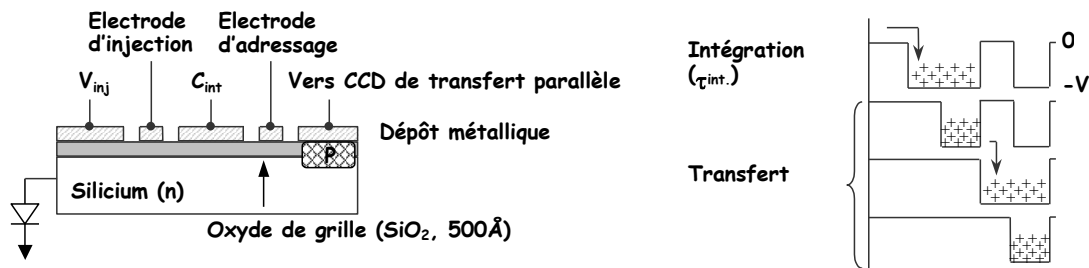


Fig. 19 Architecture d'un point élémentaire et schéma d'intégration et de transfert de charge d'un PEL dans un circuit de lecture CCD. Il comprend la photodiode et son électronique d'intégration et d'adressage. Le signal sous la forme de charges électriques est intégré dans un condensateur puis transféré vers la barrette CCD de transfert parallèle.

En fin de pause, la matrice de charges intégrées est transférée dans les registres parallèles puis l'interface est remise à zéro[14]. L'exposition suivante peut commencer pendant l'adressage séquentiel par ligne. Les signaux sont alors transférés dans un registre série (RS) qui est lui-même vidé séquentiellement par transfert vers une conversion charge/tension de sortie (fig.20).

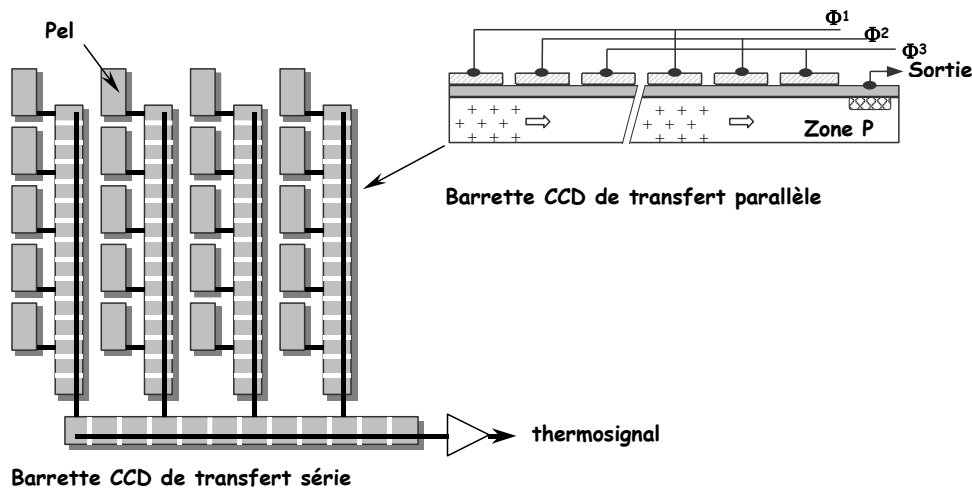


Fig. 20 Architecture d'une matrice de transfert CCD à trois phases. Le transfert est commandé par une impulsion de tension de 15 V pendant 20 ns. Le transfert complet demande environ 100 ns. L'efficacité de transfert se situe entre 0,01% et 0,1% de la charge nominale. La lecture des PELs est successive et le transfert de charge consomme une partie du signal, sans correction possible car la perte est très inhomogène. Pour une matrice de 1000×1000 PELs, la lecture complète demande environ 100 ms soit 10 images par seconde

Un problème spécifique de la lecture CCD tient au fait que la lecture en ligne par transfert de charge conduit à des pertes lors de chaque transfert, pertes d'autant plus importantes que la vitesse de transfert est grande et que le nombre de pels adressés sur une ligne est élevé (fig.19). Les pertes dépendent également du niveau de charge à transférer et donc du flux absorbé, ce qui induit des non-linéarités. On est amené à définir l'efficacité de transfert indiquant la perte d'un pel à l'autre pour une fréquence de trame donnée. Ce défaut métrologique est particulièrement prononcé pour les CCD dont la fréquence de lecture est élevée (par ex. au standard vidéo). C'est pourquoi les caméras scientifiques équipées de matrice à lecture CCD et fonctionnant dans le spectre UV, visible et proche infrarouge sont des caméras lentes (*Slow Scan*). Le temps de transfert est aussi élevé que 3 μ s. Les caméras vidéo classiques ne peuvent pas être employées en mesure radiométrique [15]. Dans les bandes spectrales usuelles en thermographie, les caméras thermiques PtSi à lecture CCD (fabrication peu onéreuse, heureusement abandonnée) nécessitent des corrections en fonction du flux et de l'emplacement du détecteur sur la matrice.

2.5.2.2. De l'IRCCD à l'IRCMOS

Bien que développée pour les circuits digitaux, mémoire et microprocesseur, la technologie CMOS est tout à fait satisfaisante en analogique. Les senseurs sont devenus des produits microélectroniques à part entière en ceci qu'ils s'intègrent bien aux technologies dominantes. Les fondeurs de CCD sont peu nombreux et les filières sont figées pour les marchés du caméscope ; en revanche, plusieurs filières CMOS industrielles sont accessibles et évolutives, assurant une grande fiabilité et une sécurité d'approvisionnement. La technologie CMOS bénéficie également des savoir-faire en matière d'intégration nécessaires dans l'élaboration de matrice FPA 1000×1000. Dans l'architecture CMOS se retrouvent les concepts de bus données, de bus adresses et bus contrôle des mémoires numériques RAM (*Random Access Memory*). Le bus contrôle est utilisé pour séquencer l'ensemble de la matrice. Le bus adresse autorise une localisation spatiale de l'acquisition. Elles permettent le développement de ROIC spécifiques ne mettant pas en œuvre la notion de « *Slow Scan* » puisque il n'y a pas de notion d'efficacité de transfert de charges. L'électronique de contrôle et d'adressage, programmable, est intégrée dans le plan focal, ce que ne permet pas la technologie analogique de lecture CCD. Elle est en outre peu consommatrice d'énergie. Le tableau 5 propose une comparaison des technologies CCD et CMOS.

Tableau 5 : comparaison entre l'IRCCD et l'IRCMOS (+ : favorable, - : défavorable)

	IRCCD		IRCMOS	
possibilité de choix du fondeur	difficile	-	secondes sources.	++
évolution de la densité d'intégration	très faible	-	évolution permanente	+
potentiel d'évolution de la technologie	quasi nulle	-	évolution permanente	+
contrôle de prise de vue	externe	-	intégrable	+
commandes d'adressages	analogiques	--	logiques normalisées	+
	externes	--	intégrables	++
nature de l'adressage	séquentielle	-	programmable	++
gain des amplificateurs élémentaires	< 10	-	> 100	++
températures de fonctionnement	> 30 K	-	0,3 K...300K	+

2.5.2.3. Lecture CMOS

La structures CMOS appliquée à l'imagerie dans l'infrarouge a émergé dans les années 1990[16]. L'interface pel est identique à celui du CCD à ceci près que la conversion charge-tension est faite in situ. Dans chaque pel, l'intégration en courant est suivie d'un conditionnement en tension. Le multiplexage en lignes et en colonnes vers l'amplificateur est fait en tension, permettant de mettre en œuvre un adressage aléatoire de type RAM soit sur l'intégralité de l'image soit sur des « sous-images » estimées pertinentes dans les matrices de grande complexité 1000×1000.

En CMOS, l'électronique de commande et de contrôle du senseur sont actuellement intégrées dans le plan focal (figure 21).

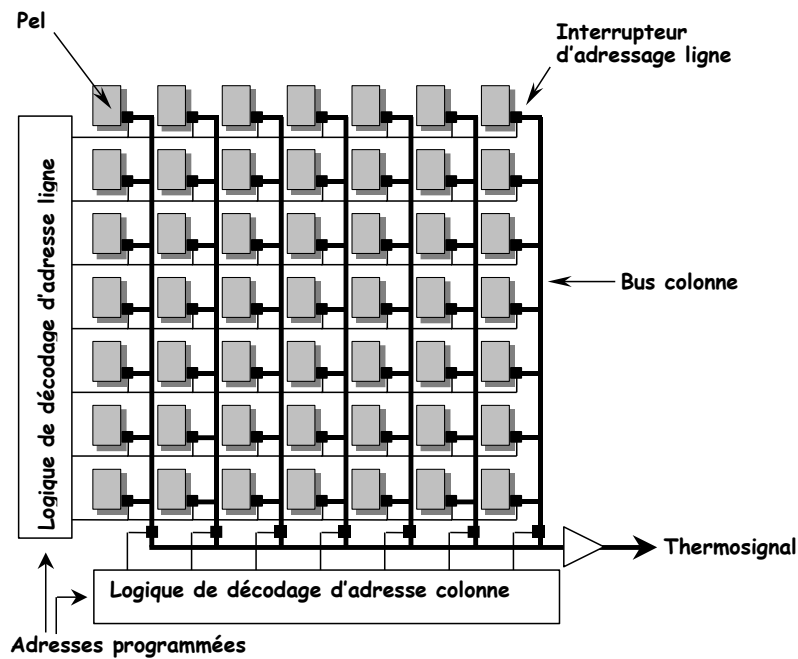


Fig.21 imagerie par la technologie CMOS. Chaque PEL est adressé comme un périphérique dans une architecture informatique. Ils peuvent être lus individuellement ou par groupe dans un ordre défini par programmation. Le bus de données permet de gérer les signaux en VGA (640×480) à la fréquence de 33 images à la seconde (ou 132 images/s en quart VGA).

Un dernier pas est en cours avec l'introduction de circuits le codage du thermosignal « on chip ». Ce bus de données numérique, les bus adresses et contrôle de prise de vue, placent les senseurs en tant que périphérique spécifique dans une architecture informatique.

La course à la complexité des plans focaux tire bénéfice de l'évolution du CMOS. La connectique dans les circuits logiques haute densité a conduit à multiplier les niveaux d'interconnexions ; ils sont réinvestis en optimisation analogique dans la matrice. La réduction de l'épaisseur de l'oxyde de grille induit une augmentation de la capacité des condensateurs d'intégration. Les concepteurs disposent avec le CMOS de la sécurité d'une CAO (Conception Assistée par Ordinateur) à part entière. Les modèles et les moyens de simulation évoluent en finesse et en fiabilité. Pour l'utilisateur, le gain en rapport signal/bruit par rapport aux matrices à lecture CCD est manifeste aux fréquences de trame élevées. Pour la synthèse de plans focaux complexes (plusieurs millions de transistors), les fondeurs fournissent aux concepteurs une bibliothèque de cellules logiques ou analogiques validées par leurs technologues. L'interconnexion, le dessin, sa conformité aux schémas électriques simulés, sont réalisés, vérifiés, par l'informatique mise en place pour les circuits logiques. Il faut noter ici que la qualité de l'acquisition échappe complètement au concepteur de caméras thermiques de mesure.

Pour le spectre visible et proche infrarouge, les matrices à lecture CMOS sont arrivées en fin de développement. Les technologies APS (*Active Pixel Sensor*) dans le visible et SMART[17] dans l'infrarouge sont des exemples. Dans ces technologies, les conditions de détection, de conditionnement et d'adressage sont complètement inaccessibles à l'utilisateur. Les produits sont reconnus comme un périphérique informatique *plug and play* au même titre qu'un lecteur CD-rom, etc... Leur domaine d'application est celui des *Webcam* utilisées en surveillance à distance.

2.6. Technologie d'assemblage des senseurs

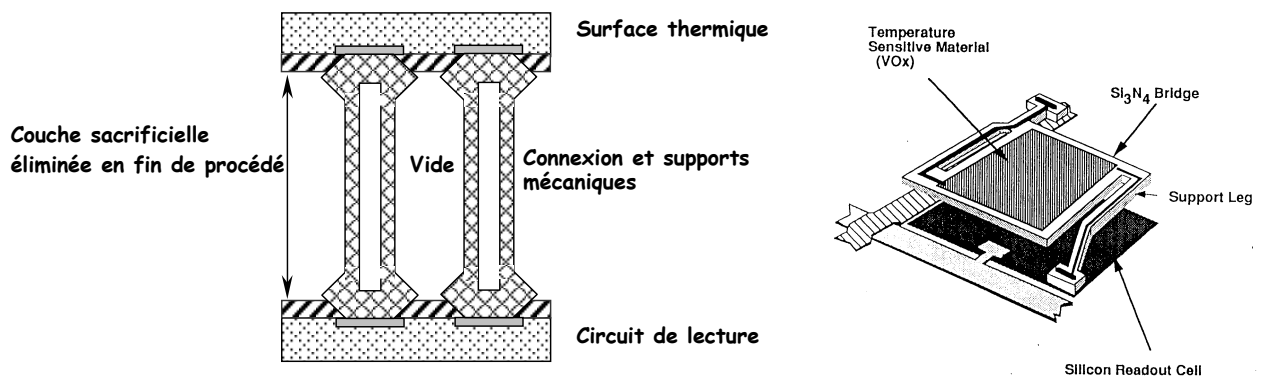
Dans la réalisation des matrices à plan focal, le concepteur est confronté à trois problèmes. Le premier est d'ordre expérimental : à bruit de lecture et à pas de matrice donnée, il doit maximiser la réponse d'un détecteur, donc l'énergie absorbée par chaque pel. Dans cette optique, il cherchera à optimiser le taux de remplissage. Le second est rencontré chez certains semi-conducteurs dont la chimie ne supporte pas les températures de procédés habituellement utilisés en microélectronique. C'est le cas du HgCdTe, mais aussi des détecteurs QWIP. Les techniques d'hybridations 3D

permettent aujourd'hui de concilier les performances des détecteurs aux contraintes de mises en forme.

2.6.1. Le taux de remplissage

Le taux de remplissage (fill factor) est le rapport de la surface du détecteur (surface sensible) et de la surface du pel qui comprend l'électronique de proximité. Le problème du taux de remplissage dans un assemblage dans le plan de détection 2D est résolu par le déplacement de l'électronique de proximité dans une matrice sous-jacente à la matrice de détecteurs. C'est la technologie 3D.

2.6.2. La technologie 3D Hybride



Les matrices de détection et de lecture sont fabriquées séparément par des procédés microlithographiques différents. Il suffit alors d'assembler les matrices par superposition et d'assurer la connexion par pressage à température ambiante (technologie flip chip), par collage des matrices et réalisation de traversées de connexions (*technologie Loophole*) ou par brassage à faible température (technologie aux billes d'Indium, température de fusion 100°C). La technologie hybride 3D est présentée sur la figure 22.

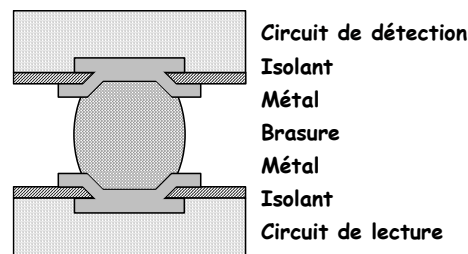


Fig.22 technologie 3D hybride.

Malgré le handicap de faible productivité et de coût élevé, cette technique d'assemblage est largement utilisée. Les deux matrices sont optimisées indépendamment. Le taux de remplissage d'un pel est idéal, ce qui justifie le recours à l'hybridation pour des technologies de détection pourtant compatibles avec la filière silicium (par exemple PtSi).

2.6.3. La technologie 3D monolithique

Elle est développée pour les détecteurs thermiques. Pour ces derniers, il faut réduire le couplage thermique reliant le pel au plan de lecture. La technologie 3D monolithique met en œuvre une membrane autoportante très fine [18,19,20] et un circuit de lecture. La technologie est présentée sur la figure 23. Elle est développée dans un contexte des produits de la microélectronique et de la notion de senseurs à faibles coûts.

Fig.23 technologie monolithique 3D. Les supports mécaniques servent de fuites thermiques calibrées. Ils portent également les contacts électriques reliant le détecteur au circuit de

lecture. L'espace interstitiel permet de réaliser, avec les contacts, une antenne absorbante. A droite, représentation d'un microbolomètre VO_x (Communication AMBER, Ratheon company).

3. PROBLEMES SPECIFIQUES DES SENSEURS

3.1. Disparité de réponse et de résolution thermique des détecteurs en matrice

La caméra à matrice, comportant un grand nombre de détecteurs, présente un problème spécifique d'uniformité de réponse dans l'image thermique. On caractérise cette non uniformité par le bruit spatial fixe. Dans ce qui suit, justifions quelques arguments dans la discussion imagerie par rapport à radiométrie

3.1.1. Les causes du bruit spatial fixe

Lors de la prise de vue sur une scène thermique uniforme, le thermosignal est entaché d'un bruit invariant d'une image thermique à l'autre. Il manifeste les non uniformités de conversion flux-signal dues aux disparités des caractéristiques des détecteurs ainsi qu'à l'interface électronique associée et au multiplexage des tensions de sortie des pels. C'est le bruit spatial fixe (BSF ou FPN pour *Fixed Pattern Noise*). Les images peuvent être affectées d'une structure aléatoire, d'une structure de grille (technologie CMOS) ou de ligne (technologie CCD).

3.1.2. Le bruit spatial fixe et la NETD image

Dans l'histoire des senseurs IR à détecteurs quantiques, une première période a été consacrée à la maîtrise des bruits temporels. Dès l'instant où est atteinte la limite BLIP (bruit sur le signal limité par le bruit de photons incidents), il a été demandé de maîtriser le bruit spatial fixe. La dispersion technologique des pels autour d'un comportement moyen induit une figure de bruit spatial qui est supposée suffisamment invariante pour être corrigée à partir de données de caractérisation. La NETD image représente la projection en température sur le plan objet de la dispersion spatiale de la réponse des pels de la matrice.

Le tableau 6 présente un étalonnage des images obtenues par deux générations de technologies : les technologies photovoltaïques et bolométriques. Sur un banc optique normalisé, les sorties pour une température moyenne de 300 K (la réponse à un incrément de température, par exemple de 20 à 30 °C, et les bruits temporels) sont acquises pour chaque pel. Elles sont mémorisées en numérique. On en déduit la notion ambiguë mais pratique de NETD image tant pour chaque pel que pour l'ensemble de la matrice (NETD image = dispersion de la réponse/sensibilité, associée au bruit spatial fixe), à distinguer de la NETD pel (NETD pel = bruit RMS moyen/sensibilité, associée au bruit temporel).

Tableau 6 NETD image

Type de détecteurs	Paramètre	Moyenne	Ecart-type	Unités
Photovoltaïque (8-12 μm)	Réponse (@300K, f/1)	0,99	0,056	V
	Sensibilité	46	4,13	mV/K
	Bruit	0,59	0,096	mVrms
	NETD pel (@300K, f/1)	13	/	mK
	NETD image	1,22	/	K
	Maximum de calibre en tension ^[1]	2,66	/	V

¹ Le maximum de calibre en tension correspond à la tension de saturation (ici 3 Vcc) diminuée de la valeur crête à crête de l'écart type mesurée sur la réponse de chaque PEL (dispersion de bruit spatial fixe).

	Maximum de calibre en température ^[2]	62	/	K
Bolomètres (8-12 μm)	Réponse (@300K, f/1)	1,81	0,356	V
	Sensibilité	10,1	0,85	mV/K
	Bruit	0,52	0,051	mVrms
	NETD pel (@300K, F/1)	50	/	mK
	NETD image	35	/	K
	Maximum de calibre en tension	0,86	/	V
	Maximum de calibre en température	88	/	K

Les performances comparées sont très défavorables pour le détecteur bolométrique. La technologie des détecteurs photovoltaïques capitalise quelques milliers d'hommes-ans de savoir-faire des différentes spécialités investies dans leur réalisation alors que les bolomètres n'en sont qu'à de petites centaines seulement. Alors que les détecteurs photovoltaïques n'ont que 300 mV_{cc} ^[3] de dispersion au point de fonctionnement, les bolomètres totalisent $2,1 V_{cc}$. De même, le PV est BLIP dans les conditions de caractérisation tandis que le bolomètre en est seulement à un facteur 3 ou 4. Dans les deux cas, la NETD image ne permet pas de « voir » la NETD pel.

La réponse analogique pour les deux technologies est expérimentalement limitée par une valeur de saturation, par exemple 3 V. Cette valeur, diminuée du bruit spatial fixe, détermine le maximum du calibre de température comme le montre la figure 24. Si le détecteur photovoltaïque présente un maximum de calibre en tension proche de la limite analogique de saturation, sa grande sensibilité réduit le maximum de calibre en température associé. L'effet de la sensibilité est aussi vérifié chez le détecteur bolométrique.

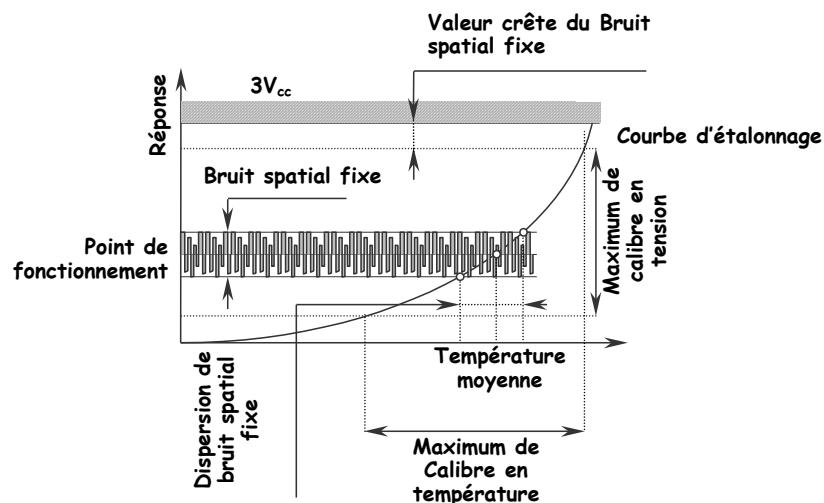


Fig. 24 Bruit spatial fixe et NETD.

3.1.3. La correction du bruit spatial fixe (Non Uniformity Correction, NUC)

Dans la mesure où la caméra est stable et fidèle, ce qui implique des qualités identiques pour le capteur, le BSF est en principe invariant dans le temps et peut être corrigé[21]. Il y a autant de réponses $R_{i,j}(\Phi)$ et de sensibilités $S_{i,j}$ (supposée invariante en flux) que de détecteurs (i,j) . Le relevé des valeurs pour deux températures (deux corps noirs aux températures de 20 et 30°C par exemple, les standards d'imagerie) conduit à cartographier les réponses $R_{i,j}$, les sensibilités $S_{i,j}$ et le

² Le maximum de calibre en température est estimé en supposant la sensibilité dV/dT constante sur le calibre en tension. Strictement démonstratif, ceci n'est justifié qu'en imagerie classique qui ne considère que des objets à température ambiante (20 et 30°C typiquement). Le cas de l'imagerie dans l'infrarouge est présenté sur la figure 24.

³ On obtient la valeur crête à crête de la dispersion RMS en la multipliant par 6.

bruit $B_{i,j}$. La réponse comparée à la source (corps noir) donne l'exactitude du senseur (NETD image) alors que la sensibilité et le bruit donnent sa résolution (NETD pel). La cartographie des réponses permet ensuite de calculer deux matrices de Gains et d'Offsets suivant la relation :

$$R_{i,j}(\Phi) = R_{i,j}(\Phi_0) + S_{i,j} \times (\Phi - \Phi_0)$$

où : $R_{i,j}(\Phi)$: offset de pel (i,j)
 $S_{i,j}$: gain du pel (i,j)

Ces deux matrices sont ensuite appliquées en temps réel ou en différé sur la réponse de chaque pel. Ces opérations nécessitent certaines précautions que l'assembleur de caméra thermique est chargé de vérifier :

- A la conception : le bureau d'étude fait un certain nombre de choix technologiques dans la conception d'une caméra, choix qui rendent possible les qualités métrologiques définies par le cahier des charges. Il s'efforcera d'insensibiliser le thermosignal aux variations de température de la caméra ;
- Le calibrage ou calibrage + NUC : l'assembleur ajuste les paramètres internes pour pouvoir travailler dans un calibre de température donné ;
- L'étalonnage : l'assembleur relève la courbe d'étalonnage de la caméra ;
- La révision : l'assembleur propose le contrôle et la restitution éventuelle dans le temps des qualités métrologiques de la caméra.

Généralement, au niveau opérateur, seul le calibrage sur la matrice d'offsets est possible. Elle se fait à partir de la température d'obturateur (donc pour une seule température). Le détail des procédés habituels de correction lors de l'utilisation des appareils est traité dans la référence 2.

3.2. Les limites de la correction de non-uniformité

3.2.1. Distorsion et stabilité des détecteurs

La suppression du bruit spatial fixe pour pertinente qu'elle soit en imagerie trouve deux limites : la distorsion et la stabilité temporelle. Ces cas sont illustrés sur la figure 25.

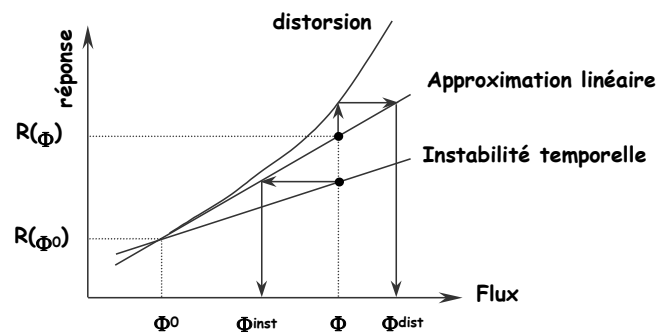


Fig.25 Correction du bruit spatial fixe. La distorsion et l'instabilité temporelle affectent la détermination du flux Φ .

La caractéristique tension de sortie sur puissance d'entrée est en toute rigueur de la forme :

$$R_s(\Phi) = R_s(\Phi_0) + S \times \Delta\Phi + D \times (\Delta\Phi)^2$$

Les termes d'ordre supérieurs ne sont pas mesurables. En imagerie, la correction n'est faite que sur le développement limité à l'ordre 1 et la correction de distorsion n'est pas systématique. Dans ces conditions, la variation de flux est obtenue en comparant deux réponses successives :

$$\Delta\Phi = \frac{R_s(\Phi) - R_s(\Phi_0)}{S}$$

Dans une approche d'imagerie, on se soucie peu de l'exactitude des termes mais de la linéarité. Dans le cas de forte distorsion, cette détermination de l'écart de flux est discutable. Dans une approche radiométrique, l'exactitude prend une importance prépondérante : l'exactitude sur Φ dépend de

celle sur le flux de référence (par exemple Φ_0) et de la stabilité de la réponse. Si, de surcroît, le flux s'écarte des flux de calibration, cette approche est nettement insuffisante selon l'algorithme précédent. Il faut noter qu'il n'est exact que pour les deux températures de calibrages et diverge en dehors de cet intervalle.

Le tableau 9, issu de la référence 22, est une évaluation de la stabilité des plans focaux, qui conditionne la qualité temporelle de la correction de non-uniformité. Dans le contexte opératoire rigoureux, les matrices sont caractérisées, corrigées, puis suivies. Le temps de stabilité est défini par $NEDT_{image} corrigée \geq NEDT_{pel}$, temps au bout duquel les corrections deviennent insuffisantes.

Tableau 7 : Exemples de stabilités temporelles

Dispositifs	PtSi	InSb	HgCdTe	Unités
	640×486	256×256	128×128	
Bande spectrale	3-5	3-5	8-12	μm
NEDT pel	57	20	21	mK
NEDT image	11	11	19	mK
temps de stabilité	>> 25	1	< 0,1	Heure(s)

Le siliciure de platine (PtSi) a la stabilité d'une technologie silicium ; l'InSb est un composé binaire au cristal covalent stable. Le CdHgTe, composé ternaire aux liaisons ioniques faibles, devrait être recalibré toutes les dix minutes environ. Il nous manque actuellement des données comparables sur les QWIP AlAsGa.

3.2.2. Les défauts des matrices

Les défauts des matrices sont dus à des défauts locaux de composition métallurgiques des plaques de détection (wafer) ou apparaissent lors des assemblages par hybridation. Les sources d'excès de bruit ou d'atténuation de la réponse proviennent des différents processus entre la détection et la sortie du signal. On distingue deux types de défauts :

- Les pels dont la sensibilité est nulle et la NETD infinie.
- Les pels qui répondent correctement mais dont le NETD dépasse excessivement la NETD moyenne.

Les premiers sont aveugles, les seconds fournissent un pixel dégradé.

La qualification opérationnelle de chaque pel est faite par le constructeur. Les pels en défaut sont artificiellement masqués par un filtrage spatial qui consiste à attribuer au pel défectueux un niveau de sortie interpolé des pels adjacents. Les technologies de lecture permettent divers filtrages dont l'impact sur l'image est d'importance : il peut être ponctuel (technologie CMOS), le pel défectueux est isolé à la source du fait de la technique d'adressage spécifique ; ou en ligne (technologie CCD), le PEL défectueux réforme avec lui une ligne entière de détecteurs.

3.2.3. Notion d'operability et de grade

Un taux de défaut inférieur à 0,1% pour les pels aveugles est actuellement réaliste pour les matrices à usage militaire. Le complément du taux de défaut définit l'*operability*. Il est peut probable de trouver des matrices zéro défaut dans un lot de fabrication. Une spécification 0 défaut dans le cahier des charges d'un senseur implique le rejet d'un grand nombre de composants et conduit à un coût de fabrication prohibitif. Les matrices sont donc produites dans diverses qualités (grades) selon les assembleurs de caméras et selon le prix qu'il veut bien payer. L'opérateur n'est que rarement averti de la qualité de la matrice qui équipe son appareil d'où l'intérêt de disposer d'un thermosignal non corrigé pour juger de la qualité de la matrice.

3.2.4. Dispersion des autres caractéristiques des détecteurs

Le niveau de dispersion des caractéristiques (réponse spectrale, temps de réponse, etc...) est important. Il est illustré par l'écart type sur la réponse donné dans le tableau 6: 5 % pour le détecteur photovoltaïque et près de 20 % pour le détecteur bolométrique ! Les sources de ces dispersions sont nombreuses. Citons principalement la dispersion dans toutes les conversions du signal (conditionnement et numérisation) et la pollution par les signaux numériques de commande dans le plan focal (adressage).

La sensibilité spectrale subit aussi des dispersions d'un détecteur à l'autre. C'est pourquoi les assembleurs proposent des filtres gris plutôt que des filtres spectraux pour adapter la caméra à des gammes de températures élevées (par atténuation du rayonnements). Ceci évite les calibrages spectraux des matrices. En cas d'utilisation de filtre spectraux, les matrices de sensibilités et d'offsets doivent être relevées, mémorisées et commutées pour chacun des filtres.

3.2.5. La compensation de dérive des caméras thermiques

Plus généralement, les caractéristiques des détecteurs sont fonction de la température. Il se pose le problème de la stabilité de la température du senseur et de son uniformité sur le plan focal lorsque ses dimensions sont importantes. La caméra à matrice ne bénéficie pas de l'observation périodique (à la fréquence trame ou à la fréquence ligne) de références internes de température servant à la compensation de dérive. L'opération de NUC, dès lors qu'elle prend en compte la température de l'obturateur, est mise à profit pour assurer la compensation de dérive de la caméra. Cette opération interdit un fonctionnement en temps réel continu.

4. LES TECHNOLOGIES DE REFROIDISSEMENT DES MATRICES A PLAN FOCAL

4.1. Nécessité du refroidissement

Afin de permettre une résolution thermique satisfaisant aux besoins d'imagerie (NETD image de l'ordre de $0,1^{\circ}\text{C}$ @300K), les senseurs quantiques sont nécessairement refroidis :

- A une température cryogénique (de l'ordre de -200°C) pour les senseurs LW et SW (PtSi et InSb). Cette température est obtenue par un refroidissement à l'azote liquide ou par une machine à froid (cycle Stirling) ;
- A une température intermédiaire (de l'ordre de -70°C) pour certains senseurs SW (HgCdTe), obtenue par des éléments Peltier.

Les senseurs à détecteurs quantiques visibles et proches infrarouges (Si et InAsGa) sont éventuellement refroidis selon les besoins de l'application mais sont nécessairement régulés en température afin d'assurer leur aptitude à la mesure.

Les senseurs à détecteurs thermiques ne nécessitent pas de refroidissement mais une stabilisation thermique très fine car l'optique projette la cartographie de températures objet dans le plan focal avec une atténuation de la puissance : un écart de 1°C sur la scène thermique induit un écart de température de l'ordre de $1/100^{\circ}\text{C}$ sur la matrice. La stabilisation est généralement obtenue par des éléments Peltier.

Pour ces deux types de senseurs, la stabilité en température est une nécessité absolue : la sensibilité, le rendement quantique ou d'absorption dépendent de la température. La qualité de régulation est d'autant moins importante que les senseurs fonctionnent à des longueurs d'onde faibles, où le contraste thermique objet est plus important (voir tableau 1 « caractéristiques d'émission »).

4.2. Les solutions techniques de refroidissement employées

Il existe plusieurs modes de refroidissement correspondant chacune à des températures et des puissances frigorifiques différentes :

- Refroidissement cryogénique par gaz liquéfié ;
- Refroidissement par détente Joule-Thomson ;
- Refroidissement par machine cryogénique ;
- Refroidissement par effet thermoélectrique (effet Peltier).

Le choix de l'un de ces modes dépend des conditions d'exploitation des senseurs : l'emploi des gaz liquéfiés ou par détente Joule-Thomson nécessite un environnement lourd (vase Dewar instrumenté) qui interdit son utilisation en poste mobile et autonome dans le temps. Elles sont en revanche bien adaptées aux conditions de laboratoire. Soulignons l'absence de vibrations mécaniques dans le refroidissement par gaz liquéfié. L'emploi du refroidissement par machine cryogénique et par effet thermoélectrique est aujourd'hui généralisé chez les assembleurs de caméras. Ils nécessitent uniquement une alimentation en courant d'autant plus importante que la charge thermique à évacuer est grande. La capacité et le rendement de refroidissement sont généralement faibles. Il se pose alors les problèmes de leur autonomie (si l'alimentation est sur batteries) et de l'absolue nécessité de réduire la consommation électrique des senseurs, impliquant des choix technologiques de polarisation des détecteurs et de conditionnement du signal.

4.2.1. Le refroidissement par machine Stirling

Ce refroidissement utilise un cycle thermodynamique (dit cycle Stirling) dans la production continue de froid. Ces machines sont du type isotherme-isochore. Le schéma de principe, figure 26, illustre le fonctionnement d'une machine Stirling dite à piston moteur et régénérateur mobiles. Le cycle Stirling se développe en quatre temps :

- Compression isotherme du gaz à la température de régénérateur T_1 . La chaleur de compression est évacuée dans l'environnement attendant à l'oscillateur de pression ;
- détente isochore du gaz à travers le régénérateur dans lequel il termine de se refroidir pour atteindre la température de source froide (température du plan focal) ;
- détente isotherme pendant laquelle le gaz absorbe les calories du support métallisé couplé thermiquement au plan focal ;
- compression isochore pendant laquelle le gaz est réchauffé en traversant le régénérateur jusqu'à la température T_1 .

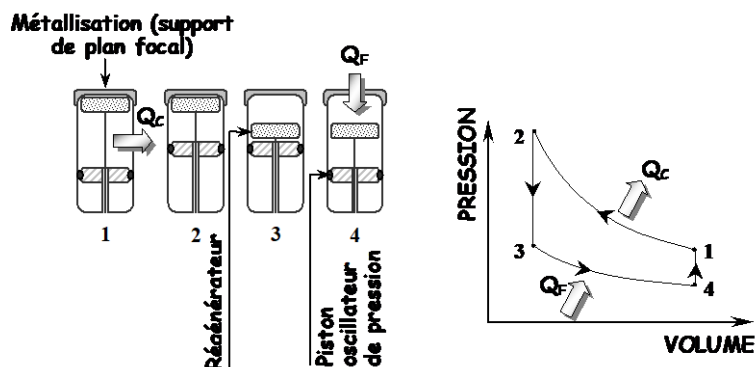


Fig. 26 Cycle Stirling.

Les machines Stirling ne nécessitent aucun clapet, ce qui est un atout sur le plan de la fiabilité et de la miniaturisation. D'autre part, le piston moteur récupère le travail de détente permettant d'obtenir une consommation spécifique relativement faible. Plutôt que de parler de compression, on préfère employer le terme d'oscillateur de pression car typiquement ces machines utilisant l'hélium travaillent à des pressions moyenne d'environ 25 bars avec des oscillations de pression de ± 5 bars.

Appliquées à la détection infrarouge, les machines Stirling présentent de faible rendement de refroidissement (≈ 1 à 4% , 250 mW à 1 W pour des températures de travail situées entre 60 et 80 K). La conception compacte souvent retenue (moteur, piston oscillateur de pression et régénérateur dans le même ensemble) n'est pas une obligation. Pour diminuer les vibrations ou faciliter l'implantation du doigt froid, on utilise des machines « splittées » dans laquelle la sortie froide (comportant le régénérateur) est reliée à l'oscillateur de pression par une ligne de transfert.

Ces dispositifs présentent les particularités suivantes[23]:

- Bonne fiabilité (MTBF de l'ordre de $2\ 000$ h) ;
- L'accouplement est soit mécanique (par un système à embiellage commun avec un déphasage de $\pi/2$), soit linéaire résonant (entraînement magnétique type haut-parleur). La fréquence de compression est comprise entre 20 et 40 Hz ;
- L'entraînement du déplaceur-régénérateur peut être pneumatique (le déplacement utilise l'onde de pression de l'oscillateur) ou motorisé (le déplacement utilise un moteur synchronisé par rapport au piston oscillateur de pression) ;
- Paliers et étanchéité par frottements secs.

La figure 27 présente le schéma de principe des techniques compacte et splittée à entraînement magnétique linéaire. La séparation du piston et du régénérateur permet aussi de réduire les effets de champ magnétique sur le plan focal. L'ensemble est conditionné sous vide (technologie IDDCA, *Integrate Detector Dewar Cooler Assembly*) prêt à l'utilisation.

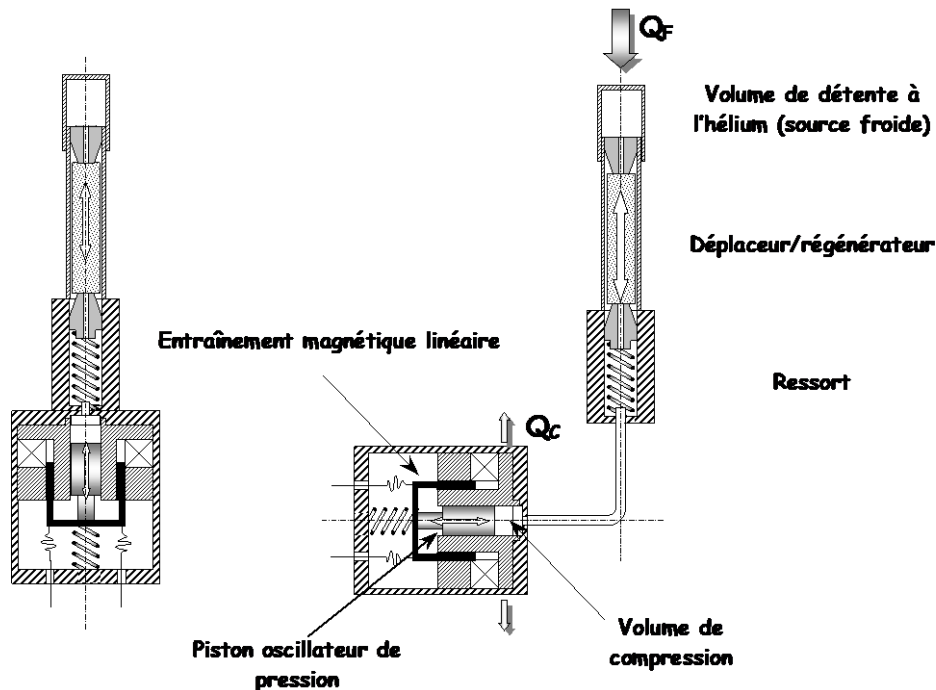


Fig.27 Machines Stirling compacte et splittée à entraînement linéaire magnétique. L'entraînement du déplaceur-régénérateur est pneumatique.

4.2.2. Le refroidissement Peltier

L'effet thermoélectrique Peltier permet d'absorber ou de dégager de la chaleur à la jonction de deux matériaux de pouvoir thermoélectrique différents. Comme pour les machines Stirling, la production de froid est continue dès lors qu'un courant électrique traverse la jonction (figure 28).

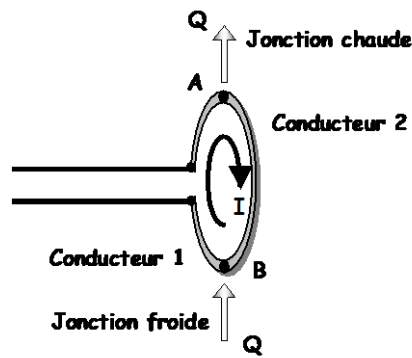


Fig.28 Effet Peltier

L'effet s'inverse (production de chaud) si on change le sens du courant. Le refroidissement Peltier n'est pas une machine thermique au sens de la thermodynamique. Il repose sur la différence des niveaux de Fermi des deux conducteurs en contact. L'efficacité de refroidissement est proportionnelle au « gap » unitaire $E_F^{(2)} - E_F^{(1)}$ des deux matériaux en contact et au courant de polarisation. Dans une boucle fermée, les échanges thermiques sont complémentaires. Si le courant « attaque » la jonction A du conducteur 1 vers le conducteur 2 en produisant de la chaleur, en abordant la jonction B en sens inverse (conducteur 2 vers 1), il produit des frigories en B. Dans la pratique, le matériau le plus utilisé est le tellure de Bismuth (Bi_2Te_3) dopé de type n (pouvoir thermoélectrique négatif) associé au même matériau de type P mais de pouvoir thermoélectrique positif. Les jonctions sont réalisées par un pont de cuivre. Un élément Peltier est présenté sur la figure 29.

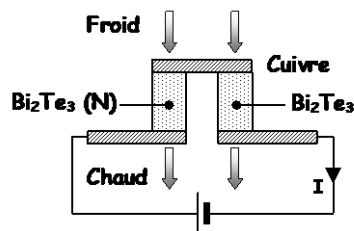


Fig.29 Élément Peltier

La puissance réfrigérante d'un tel module est faible. Les modules sont assemblés en série, alternant les dopages n-p, sous la forme de matrice carrée de $n \times n$ éléments Peltier. Les constructeurs donnent les caractéristiques des refroidisseurs Peltier sans charge de refroidissement. Leur utilisation ne demande pas de précaution particulière si ce n'est la connaissance de la charge thermique à évacuer compatible avec le courant d'alimentation qui a tendance à réduire l'efficacité de refroidissement par effet Joule. Pour des charges thermiques importantes, l'utilisation de plusieurs matrices en cascade est nécessaire. Soulignons l'absence de toute mécanique susceptible de produire des vibrations. L'alimentation des refroidisseurs Peltier requiert une forte alimentation en courant (9W, de l'ordre de 6A sous 1,5V). L'ensemble, conditionné sous vide, présente une très grande compacité. La figure 30 montre un senseur FPA 128x128 de technologie HgCdTe-MOS refroidi par éléments Peltier sur 4 étages (températures de fonctionnement : -93 à -53°C).



Fig. 30 Photographie est issue de la référence [24]. Le temps de refroidissement est de 2min30 @20°C et nécessite une puissance électrique de 8W. Le maintien en température consomme 3,1W.

5. LES CAMERAS THERMIQUES A MATRICE DERNIERE GENERATION

5.1. Les grandes lignes de l'évolution des technologies

L'évolution technologique aboutit à la dernière génération de caméras thermiques aujourd'hui disponibles sur le marché. Elles sont comparables aux caméscopes ou aux appareils photo numériques de grande diffusion. D'énormes progrès restent à réaliser en maîtrise de la technologie et des coûts et surtout en thermographie de mesure. L'imagerie thermique a toujours visé à rejoindre les qualités des appareils d'imagerie visible : trois grandes caractéristiques et une orientation vers la convivialité d'utilisation.

1. Une excellente qualité d'image : résolution spatiale exprimée en nombre de détecteurs sur la matrice ;
2. Un faible bruit superposé au signal : la résolution thermique (NETD) de l'ordre de 0,1°C sur des scènes thermiques aux températures ordinaires (30°C) ;
3. Une fréquence trame compatible avec le standard vidéo, soit 25 à 50 trames/seconde ;
4. Une portabilité, autonomie et réduction des contraintes (intégration de l'électronique, faible consommation et absence de refroidissement de la matrice).

Mais la thermographie nécessite des caractéristiques instrumentales qui ne se définissent pas en terme de qualité d'image. L'emploi de matrice de détecteurs dans les caméras thermiques résulte (mais reste tributaire) des efforts de recherche et de développement en image thermique à usages militaire ou paramilitaire. Ils représentent environ 80% du marché. Les avancées technologiques ont été consécutives aux progrès de la microélectronique et à la maîtrise tant des senseurs du spectre visible (matrices CCD des caméscopes) que des mémoires et processeurs (CMOS des micro-ordinateurs), lesquels produits ont servi de moteur économique.

5.1.1. Du balayage optico-mécanique au balayage électronique

Il s'est agi d'éliminer le balayage optico-mécanique, lourd, complexe et onéreux.

Une première évolution a consisté à élaborer des senseurs en barrette de détecteurs. A chaque prise de vue élémentaire, les éléments d'une « ligne » de l'image sont acquis simultanément : on a substitué une partie du balayage optico-mécanique par un balayage électronique. La démarche s'est poursuivie par le développement d'une génération intermédiaire d'imageurs militaires mettant en œuvre des matrices bidimensionnelles à faible nombre de détecteurs, nécessitant le balayage optico-mécanique. Pour des matrices de dimension plus importante (de l'ordre de 128 x 128), une technique de micro balayage (*Micro-Scan*) décale l'axe optique d'un demi pas de matrice dans une ou

deux directions lors des prises de vue successives : l'image résultante, de meilleure résolution spatiale, est générée par réorganisation en mémoire des 2 ou 4 trames successives. Puis, le deuxième balayage optico-mécanique a été supprimé, remplacé par une structure matricielle à grand nombre de détecteurs (au-delà de 256×256). Ce sont les matrices « fixes » (*Staring Arrays*) ou matrices à plan focal (*Focal Plane Arrays - FPA*), puisqu'elles sont placées dans le plan focal de l'objectif pour une visée à l'infini.

5.1.2. De la cryogénie à la température ordinaire

Restait à supprimer la contrainte liée au refroidissement du senseur à la température cryogénique le plus souvent exigée par la détection quantique. Le principe de cette dernière mutation est achevé avec les matrices de détecteurs thermiques en pleine émergence.

5.2. Evolution du compromis technologique entre les résolutions spatiale, thermique et temporelle

Pour un appareil de technologie classique (à monodétecteur et à balayage optico-mécanique), le temps de réponse du détecteur est un paramètre important. Le détecteur, associé à son électronique de lecture, parcourant toute une image définie succinctement par n lignes \times m colonnes ($n \times m$ pixels), à une fréquence trame f_t , doit être apte à répondre à une fréquence f de modulation du flux d'entrée de l'ordre de $f = f_t \times m \times n$ (ou bien $\tau_{\text{dét}} = \tau_{\text{trame}} / m \times n$). Sa bande passante doit être adaptée à cette fréquence-pixel f , sans aucune possibilité de filtrage du bruit (autre que le passe-bas électronique classique). Ces considérations imposent un détecteur quantique rapide, refroidi et de bonne détectivité. Pour un appareil à matrice, chacun des pels est lu à la fréquence trame. Ce fait autorise le concepteur du senseur à introduire une limitation de bande passante dans le PEL lui-même, limitation qui adapte le temps de réponse électrique du pel à la période-trame, et non plus à la période-pixel, réduisant d'autant la bande passante dès l'entrée. L'amplificateur en sortie de multiplexage des pels doit, bien entendu, passer la fréquence-pixel f . Cette réduction de bande passante rend les détecteurs thermiques et les détecteurs quantiques à faible rendement compatibles avec les besoins de l'imagerie thermique. La résolution temporelle recherchée en imagerie est naturellement celle du standard vidéo, soit 25 ou 50 trames par seconde.

Si l'on augmente la résolution spatiale, la bande passante électronique s'accroît corrélativement ; c'est l'une des raisons qui ont poussé les technologues à employer des circuits de lecture CMOS plutôt que les circuits à CCD.

Pour une matrice dont les dimensions sont fixées par des considérations technologiques, la réduction d'un facteur 2 du pas de la matrice (dimension d'un pel) multiplie par 4 la résolution spatiale (nombre de détecteurs) mais divise par 4 la puissance reçue par chaque détecteur, donc dégraderait par 4 la résolution thermique (NETD). Cette dégradation de la résolution thermique peut être compensée :

- en doublant le diamètre de la pupille d'entrée (à distance focale fixée). Le gain en résolution spatiale est alors payé en encombrement, poids et coût d'étude et de réalisation de l'optique ;
- en réduisant par 4 le bruit de lecture des pels. C'est, pour l'essentiel, cette démarche qui a été faite pour les détecteurs quantiques classiques (InSb et HgCdTe) permettant ainsi d'augmenter la fréquence-trame bien au-delà des besoins d'imagerie vidéo, pour l'imagerie rapide ;
- en multipliant par 4 le temps d'exposition de la matrice, sans dépasser le temps d'une trame imposé par la résolution temporelle recherchée ;
- en améliorant le taux de remplissage d'un pel (en technologie monolithique) ou en renvoyant l'électronique de proximité dans une matrice de lecture connectée pel par pel à la matrice de détection (en technologie hybride).

On peut, dès lors, développer des matrices sur la base de détecteurs de plus faible qualité : détecteurs quantiques à faible rendement (PtSi) ou détecteurs thermiques (à temps de réponse

élevé). L'augmentation du temps d'exposition et la diminution du nombre d'ouverture de l'objectif sont les démarches de base conjuguées éventuellement avec la division par 2 de la fréquence-trame.

5.3. Les caractéristiques des caméras thermiques

La caméra thermique est constituée de deux parties : d'un côté, les détecteurs et l'électronique de mesure et de l'autre, le dispositif optique. Les caractéristiques des caméras peuvent être classées dans deux espaces distincts : celui de l'imagerie et celui de la mesure thermographique. Les deux espaces superposés réunissent celles des caméras thermiques.

5.3.1. L'espace de l'imagerie

Un imageur a pour vocation de présenter, sur un écran et pour un observateur humain, des images thermiques de bonnes qualités au standard vidéo d'une scène thermique aux températures ordinaires. La bande spectrale 8-12 μm est favorisée. L'imageur n'a pas les compétences à quantifier ces images en cartes de luminances ou à les transcrire en thermogrammes. L'espace de l'imagerie (ou espace des résolutions) rassemble les caractéristiques des imageurs thermiques : les résolutions spatiale, thermique et temporelle. Les progrès d'imagerie sont présentés sur la figure 31.

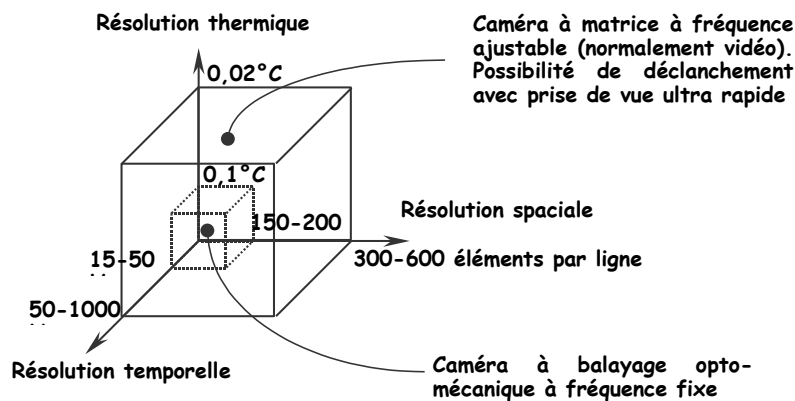


Fig. 31 Evolution des technologies dans l'espace de l'imagerie.

Ils sont rendus possibles :

- En résolution thermique, par le choix du temps d'intégration et du maximum du calibre en température.
- En résolution spatiale, par le degré d'intégration des détecteurs rendu possible par les technologies d'assemblage 3D et l'amélioration du taux de remplissage.
- En résolution temporelle, par la transition des techniques de lecture CCD vers le CMOS, imposée rapidement par le nombre croissant de détecteurs en matrice.

5.3.1.1. Vers une meilleure résolution thermique

Dans la plupart des applications, une NETD de 0,1°C est suffisante. Cependant, il existe des applications d'imagerie plus spécifiques qui demandent une meilleure résolution thermique. C'est le cas, par exemple, en contrôle non destructif, en analyse de contrainte, en détection et démodulation synchrone... Si on recherche à améliorer la résolution thermique, pour une fréquence trame donnée, plusieurs solutions sont possibles :

- Par le choix de la bonne technologie de détecteurs. La figure 32 présente la progression de la résolution thermique des différentes technologies actuellement commercialisés (les valeurs sont indicatives).

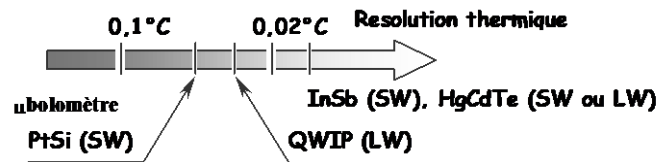


Fig.32 Echelle de résolution thermique des senseurs (les valeurs sont indicatives).

- Par l'augmentation du temps d'exposition. La plupart des détecteurs débitent un photosignal dans une capacité d'intégration (cas des détecteurs quantiques, pyroélectriques, etc...). La première limite est la période trame : elle concerne tout particulièrement les détecteurs thermiques dont le temps de réponse conditionne la valeur maximale de la fréquence trame. La seconde est d'ordre instrumentale : pour un maximum de calibre en tension U (hors gains éventuels), le temps d'exposition est limité par la valeur des capacités qu'on peut reproduire au degré d'intégration des détecteurs (quelques dixièmes de picofarads). Le temps d'exposition à mi-charge étant inversement proportionnel à U , l'augmentation du temps d'exposition impose donc une diminution de U et une diminution corrélative du maximum de calibre en température.
- Par l'application d'un moyennage numérique différé pixel par pixel, si le temps réel n'est pas un impératif.

5.3.1.2. Vers une meilleure résolution spatiale

Le passage de matrice de 256×256 détecteurs vers des matrices 1000×800 ne pose pas de problème technologique particulier. Une limitation est pourtant rencontrée chez les détecteurs thermiques pour lesquels la taille optimale est actuellement de $50 \mu\text{m}$. Elle semble difficilement réductible. Une matrice de tels détecteurs présenterait un encombrement important et nécessiterait une optique adaptée difficilement compatible avec un faible coût de production. Si l'on recherche une meilleure résolution spatiale, le recours aux détecteurs quantiques est indispensable car ils se prêtent bien à la miniaturisation. L'objectif est de réduire leur taille (actuellement d'environ $25 \mu\text{m}$) à $15 \mu\text{m}$.

5.3.1.3. Vers une meilleure résolution temporelle

Une fréquence de 50 Hz est communément admise pour la restitution du thermosignal. Deux raisons à cela :

- Un bon confort visuel ;
- Une compatibilité avec le matériel vidéo standard (Standard CCIR).

Rien n'empêche d'analyser une scène thermique à des fréquences plus élevées (fréquence d'analyse). Un convertisseur de standard est utilisé pour adapter la fréquence d'analyse à la fréquence de restitution. Dans certaines applications, on est amené à utiliser un enregistreur ultrarapide. La figure 33 permet d'illustrer ces propos. La figure 34 présente la progression de la résolution temporelle des différents détecteurs pour une résolution thermique standard selon les technologies et pour une résolution spatiale identique.

5.3.1.4. Conclusions relatives à l'espace de l'imagerie

Pour réunir toutes les performances précédemment citées (résolutions thermique, spatiale et temporelle), le recours aux détecteurs quantiques refroidis est incontournable. L'imagerie ultrarapide utilisera les détecteurs InSb au HgCdTe. Les matrices à détecteurs HgCdTe sont celles qui présentent le plus de dispersion dans les caractéristiques de calibrage. Les matrices InSb sont davantage uniformes et de détectivité 5 fois supérieure : ce sont les meilleurs détecteurs en short wave. Les matrices PtSi et QWIP sont les plus uniformes. Ils sont les candidats naturels des applications au standard vidéo avec un avantage pour les QWIP en long wave si l'on recherche une résolution thermique élevée.

5.3.2. Espace de la mesure thermographique

Les caméras thermiques sont conçues pour la mesure de flux ou de températures quelconques, pas seulement ordinaires. Par ailleurs, on ne peut pas prétendre que le standard vidéo destiné à la vision soit un standard adapté à la mesure thermographique. : c'est un standard courant et économique, sans autre prétention que d'être pratique. La diversité actuelle des senseurs conduit à une grande complexité de compréhension des technologies des caméras lorsque l'on cherche à les comparer entre-elles. Les concepteurs de matrices eux-mêmes disent ne plus utiliser la notion de détectivité, notion de base servant à la conception des appareils pour assurer des caractéristiques recherchées de NETD et dynamique du thermosignal, notion plus aisément applicable aux monodétecteurs. Désormais, le temps d'intégration est une variable supplémentaire qui permet de niveler les écarts de compétence des technologies disponibles. Cette variable masque les comportements de base des détecteurs et induit une forte difficulté de synthèse chez les opérateurs face au choix d'un appareil de thermographie.

Dans l'espace de la mesure radiométrique, on place les caractéristiques sur les mêmes axes thermique, spatial et temporel :

- ✓ Axe thermique.
 - Courbes d'étalonnage et calibres selon la configuration;
 - Exactitude et dérive.
 - Dynamique du thermosignal (limité par le maximum de calibre en tension et la tension crête du bruit spatial fixe) déterminant le maximum du calibre en température ;
 - NETD
- ✓ Axes spatial
 - Uniformité de la réponse en température dans l'image thermique (correction de bruit spatial fixe) ;
 - Pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM), différent du nombre de détecteurs.

- ✓ Axe temporel
 - Temps de réponse (détecteurs thermiques) ;
 - Temps d'intégration
 - Rémanence ;
 - Temps réel continu.

Les progrès dans l'espace de la mesure thermographique sont présentés sur la **figure 35**. En pouvoir de résolution spatiale de mesure (PRSM), les caméras à matrice de détecteurs sont supérieures en qualité par rapport aux caméras classiques à balayage et cela quelle que soit la technologie. Néanmoins, les caméras à matrice pêchent par une moindre exactitude et une impossibilité actuelle de temps réel continu du fait de l'obligation de numérisation du signal, directement en sortie du capteur afin d'assurer le NUC temps réel. Il se pose le problème soit de limiter le nombre de calibres (usage courant), soit de multiplier le nombre de calibres, à charge de l'opérateur d'assurer les étalonnages correspondants afin d'adapter la caméra à son application. Elle ne possède pas la souplesse d'une caméra à thermosignal à sortie analogique.

5.3.3. Comparaison rapide des caméras classiques et des caméras à matrice dans l'espace de la mesure

Les deux familles de caméras diffèrent principalement par l'exactitude et la dérive, l'étendue et le recouvrement des calibres, les résolutions thermique et spatiale et l'uniformité de la réponse dans l'image thermique.

5.3.3.1. Dérive

La dérive est un défaut de base des caméras thermiques infrarouges à matrice qui ne peuvent encore rivaliser avec leurs aînées. Les solutions, rencontrées à ce jour, soit prennent en compte diverses températures internes de la caméra pour corriger la valeur du thermosignal, soit mesurent la température d'un obturateur périodiquement présenté devant la matrice, soit modifient temporairement et progressivement le temps d'exposition pixel par pixel afin de corriger le rapport des réponses d'un même détecteur à scène thermique invariante, soit sont une combinaison des deux solutions. Il en résulte que les caméras ne sont pas « temps réel continu ». Ce problème de dérive ne se pose pas pour des caméras thermiques fonctionnant dans une bande spectrale inférieure à 2 μm puisqu'elles sont moins sensibles aux rayonnements propres de la caméra.

5.3.3.2. Calibres

A bande spectrale identique, les calibres sont moins étendus pour les caméras à matrice : exprimée en luminance, ils sont généralement 4 fois plus faibles. Ceci tient à la limitation actuelle des possibilités de numérisation du thermosignal et à l'opération de NUC. Sur ces caméras, les différents calibres sont obtenus par divers temps d'exposition calibrés, les caméras restant à pleine ouverture. Le nombre réduit de différents temps d'exposition limite le recouvrement des calibres.

5.3.3.3. Résolution thermique

A technologie et température de détecteur identiques, toutes choses étant égales par ailleurs, la résolution thermique des caméras à matrice peut être meilleure que celle des caméras classiques.

5.3.3.4. L'uniformité de réponse dans l'image classique

La dispersion de bruit spatial fixe est une caractéristique importante à considérer sur les caméras à matrice. Les méthodes d'uniformisation ne sont valables qu'en première approximation, bien que le résultat soit satisfaisantes dans l'espace de l'imagerie.

5.3.3.5. Conclusions relatives à l'espace de la mesure

La tendance vers les caméras thermiques non refroidies se justifie entièrement dans les applications en portable. Elle ne se justifie pas en thermographie industrielle à poste fixe et encore moins en laboratoire. Les matrices micro-bolométriques arrivent à maturité pour des applications courantes. Si l'avenir des applications industrielles semble devoir passer par les matrices à μ bolomètres, celles-ci ne sont pas encore en mesure de répondre à des besoins exigeants en qualité de mesure et en temps de réponse, même si certaines applications peuvent utilement s'en contenter (maintenance, prévention, quelques applications à poste fixe). Les caméras *very short wave* peuvent prétendre aujourd'hui aux qualités de mesure scientifique, mais en *slow scan* (du fait de la lecture CCD), dans l'attente des caméras de mesure à matrice APS (*active pixel sensor*).

6. CONCLUSION : UN VASTE CHOIX DE CAMERAS THERMIQUES

Chaque technologie a ses domaines de compétences propres. A ce jour (2001), si les caméras classiques pèchent par leurs résolutions thermique et spatiale moins bonnes (mais le plus souvent considérées comme suffisantes), les caméras à matrice présentent des problèmes spécifiques d'une caractérisation lourde et délicate, de moindre qualité et souplesse de mesure par les problèmes de dérive et de calibre, et d'une inaptitude éventuelle au mesurage en dynamique et au temps réel continu.

Une caméra thermique est conçue pour une application ou un ensemble d'applications. La gamme des matériels des constructeurs en atteste : caméras d'entrée de gamme jusqu'aux caméras scientifiques ou qui se prétendent telles. A ce jour, les caméras à matrice ne peuvent prétendre rivaliser avec leur aînées en mesure thermographique. Inversement, certaines caractéristiques des appareils à matrice permettent de conforter ou d'étendre le champ des applications déjà abordées par les appareils classiques. Les développements en cours témoignent d'une volonté des constructeurs à résoudre les problèmes spécifiques à cette nouvelle génération.

Les caméras à matrice non refroidie ouvriront-elles un vaste domaine d'applications industrielles à poste fixe ? C'est peut-être l'avenir de la thermographie, dès lors que les caméras à senseur non refroidi seront en *short wave* et auront un coût acceptable. Reste le problème de fond de ces caméras : le temps d'exposition trop long pour des événements rapides.

Une caméra scientifique de thermographie se définit comme possédant toutes les bonnes caractéristiques de mesure sur les axes thermique, spatial et temporel. L'opérateur scientifique doit avoir accès à l'information brute mesurée, avant tout traitement tels que la NUC. Il souhaite pouvoir calibrer par lui-même et étalonner son appareil dans des conditions spécifiques des mesures à mener. Les caméras à matrice nécessitent un laboratoire d'optique afin d'assurer des scènes thermiques de luminance uniforme, ce qui est hors de portée ou hors des axes de recherche des laboratoires habituels, sachant qu'on ne pourra caractériser une caméra à matrice aussi aisément qu'une caméra à monodétecteur. La caméra scientifique doit être caractérisable par l'opérateur, tant en thermique, spectral, spatial que temporel. En particulier, il est souhaitable que cette caméra fonctionne en temps réel continu sans coupure de l'image durant les phases de compensation de dérive. Enfin, la caméra scientifique doit être interfaçable : elle est donc autonome et peut être alors complétée par l'indispensable station d'acquisition et de traitement qui évoluera ou sera échangée au rythme rapide de l'informatique. Si la caméra est intégralement pilotée par un ordinateur externe, obsolète en quelques 2 à 3 ans, tout autant que le système d'exploitation associé, l'opérateur court le risque de devoir renouveler l'ensemble complet au même rythme ou du moins d'être définitivement lié au même fournisseur.

REFERENCES

- 1 Recent developments and applications of quantum well infrared photodetector focal plane array. S.D. GUNAPALA California institut of technology. Proceedings of SPIE vol. 4028 (2000), p262.
- 2 Dominique PAJANI et Luc AUDAIRE. Thermographie. Techniques de l'Ingénieur. R 2740 et R 2741. Septembre 2001.
- 3 Uncooled infrared focal plane arrays, Technical trends ans LETI/LIR microbolometer development. J.L. TISSOT, LETI. Proceedings of the 5Th international workshop on Advanced Infrared technology and application.
- 4 Semiconducting YbaCuO bolometer for uncooled IR détection. M. ALMASRI, Southern methodist university Dallas-Texas. Proceedinds of SPIE vol. 4028 (2000), p17.
- 5 Bruit de fond et mesures. Michel Savelli et al, techniques de l'ingénieur E1 150-R 310.
- 6 Uncooled IR detector performance limits and barriers. CM HASON, RAYTHEON Co. Proceedinds of SPIE vol.4028 (2000), p2
- 7 Semiconductor YbaCuO bolometers for uncooled IR Detection. Mahmoud ALMASRI, Southern methodist university Dallas-Texas. Proceedings of SPIE vol 4028 (2000) p 17.
- 8 Olivier SAURY. Matrices de détecteurs bolométriques pour l'imagerie dans les bandes millimétriques : faisabilité, performances et réalisation d'un démonstrateur. Thèse de l'INP-Grenoble, à paraître.
- 9 L'infrarouge sur le chemin de la démocratisation. Electronique international N°291 22 janvier 1998
- 10 Uncooled Infrared focal plane arrays Technical Trends and LETI/LIR microbolometer development. J.L. TISSOT, Infrared Technologie and applications Venesia 1999, pp57-63
- 11 Polarization sensitive QWIP Thermal imager. Daniel W Beekman, Army research laboratory Adelphi. James Van Anda, Digital Imaging Infrared Inc. Proceedings of SPIE vol 4028 (2000) p 102.
- 12 2-color QWIP FPA's. Mani Sundaram and Samuel C. Wang. Advanced Technologie division, Sanders, A Lockheed-Martin Co. Proceedings of SPIE, Vol 4028 (2000) pp. 311-317.
- 13 Dual band QWIP MWIR/LWIR FPA test results. A. Goldberg. Advanced Technologie division, Sanders, A Lockheed-Martin Co. Proceedings of SPIE, Vol 4028 (2000) pp. 276-287.
- 14 Luc AUDAIRE. Dispositifs à transfert de charge. Technique de l'ingénieur E2210.
- 15 P. SAUNDERS et T. RICOLFI. The caracterisation of CCD camera for the purpose of temperature measurement. Proceedings of Tempmeko'96, 1996 p6.
- 16 A. MANISSADJIAN et al. Sofradir infrared detector products :the past and the futur. Proceedings of SPIE 2000, San Diego.
- 17 MAPP 2200 Smart Optical Sensor et LAPP 1100 Smart Camera. Documents OPTILAS 91018 EVRY.
- 18 Linear arrays of fast uncooled poly SiGe microbolometers for IR detection. Piet De MOOR, IMEC Leuven-Belgium. Proceedinds of SPIE vol.4028 (2000), p27-34.
- 19 Uncooled infrared sensors, Rapid growth and futur perspective. Raymond S. BALCERAK, Microsystems technology office Arlington-Virginia. Proceedinds of SPIE vol.4028 (2000), p36-39.
- 20 Miniature VO₂-based bolometric detectors for high-resolution uncooled FPAs. Hubert JEROMINEK, INO Sainte Foy-Québec. Proceedinds of SPIE vol.4028 (2000), p47-56.
- 21 J. METSCHULEIT et J. GRAFF. Stability evaluation of staring imager InSb imagers. Amber, 1995.
- 22 W.GROSS et al. Correctability and long term stability of infrared focal plane arrays, Opt.Eng 38(5) 862-869 (may 1999).
- 23 A. RAVEX. Stage de cryogénie. Formation permanente du Centre de recherche sur les très basses températures, CRTBT-CNRS Grenoble, juin 1994.
- 24 ID MM 015, 128x128 MWIR thermoelectrically cooled IDDCA. Sofradir, Chatenay Malabry-France.