



HAL
open science

Correction de Non-Uniformité (NUC) des caméras thermiques

Olivier Riou, Pierre Brémond

► **To cite this version:**

Olivier Riou, Pierre Brémond. Correction de Non-Uniformité (NUC) des caméras thermiques. journées de thermographie Instrumentale & industrielle Thermogram', Nov 2003, Lieusaint, France. hal-04135815

HAL Id: hal-04135815

<https://hal.u-pec.fr/hal-04135815v1>

Submitted on 9 Nov 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' 2003

THERMOGRAPHIE INSTRUMENTALE ET INDUSTRIELLE

27 ET 28 NOVEMBRE 2003

IUT SENART FONTAINEBLEAU - UNIVERSITE PARIS EST CRETEIL

INSTITUT DE LA THERMOGRAPHIE

Correction de Non-Uniformité (NUC) des caméras thermiques

OLIVIER RIOU (1), PIERRE BREMOND (2)

(1) Maître de Conférences Energétique et Génie des Systèmes
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.
E-mail : o.riou.iut@chbg.unicaen.fr

(2) Ingénieur-Docteur
CEDIP Infrared Systems
19 bd Georges Bidault F-77 183 Croissy-Beaubourg
E-mail : pierre.bremond@cedip-infrared.com

Résumé. Les nouvelles technologies d'imagerie thermique mettent en œuvre une matrice de $x \times y$ détecteurs. Il s'agit d'un saut technologique considérable dans l'espace de l'imagerie. Pour autant, 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 nécessaire d'observer les implications de l'emploi des matrices sur les caractéristiques métrologiques des caméras. C'est le cas en particulier lorsqu'on traite de la correction de non uniformité ou NUC (Non Uniformity Correction). L'objet du présent document est de présenter la procédure de correction et de tester ses limites et performances sur deux technologies d'imagerie: le LWIR-MCT et le MWIR-InSb.

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. Ces imageurs mettent en œuvre des détecteurs infrarouges miniaturisés disposés en matrice placée dans le plan focal de l'optique. La technologie FPA (pour « focal plane array ») associe la matrice de détecteurs à une électronique de détection et d'adressage. Cette technologie a permis une amélioration rapide des performances des imageurs thermiques. Néanmoins, leurs utilisations nécessitent certaines précautions lorsqu'il s'agit de thermographie de mesure. Les principaux problèmes métrologiques rencontrés sont l'uniformisation de la réponse des détecteurs, la stabilité temporelle de cette uniformisation et la compensation de la dérive.

2. CARACTERISTIQUES METROLOGIQUES DES SENSEURS IR

2.1. CARACTERISTIQUES D'EMISSION

Le rayonnement thermique est émis naturellement par la matière. Il est décrit par le rayonnement du corps noir. Max Planck a établi l'expression de la luminance énergétique spectrique émise par le corps noir en fonction de sa température thermodynamique T et de la longueur d'onde λ .

$$L^0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi} \frac{\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{W m}^{-3} \text{ sr}^{-1}) \quad (1)$$

En imagerie, on préfère la notion de flux spectrique représentant le nombre de photons objets émis à l'équilibre thermique à la longueur d'onde λ .

$$\Phi^0(\lambda, T) = \frac{L^0(\lambda, T)}{h \ c/\lambda} = \frac{c_3}{\pi} \frac{\lambda^{-4}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{photons s}^{-1} \text{ m}^{-3} \text{ sr}^{-1}) \quad (2)$$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK} \text{ et } c_3 = 2\pi c = 1,8836 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$$

La plupart des imageurs thermiques opèrent dans trois fenêtres de transmission atmosphérique^[1] : ce sont, en reprenant les désignations des militaires (qui ne correspondent pas aux désignations habituelles en thermographie industrielle), 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*). Sur le tableau 1, nous présentons dans ces fenêtres les caractéristiques d'émission pour une température objet de 300 K. Nous appellerons ici « contraste thermique » le rapport de la variation de flux correspondant à un écart de 1°C de la température objet sur le flux moyen. (cette définition ne correspond pas à la norme de thermographie, mais est très utile dans notre propos).

A 300 K, le flux émis est maximum dans la bande spectrale 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.

Bande spectrale μm	Luminance énergétique spectrique $L(\lambda, T)$ @300K $\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$	Flux spectrique $\Phi^0(\lambda, T)$ @300K $\text{photons s}^{-1} \text{m}^{-3} \text{sr}^{-1}$	Variation de flux $\Delta\Phi^0$ pour 1°C objet @300K $\text{photons s}^{-1} \text{m}^{-3} \text{sr}^{-1}$	Contraste %
1,4 - 1,8	$1,298 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{13}$	$1,09 \cdot 10^{12}$	9,6
2 - 2,5	$8,649 \cdot 10^{-4}$	$1,03 \cdot 10^{16}$	$7,20 \cdot 10^{14}$	7,0
3,2 - 4,2	0,46	$8,89 \cdot 10^{18}$	$3,74 \cdot 10^{17}$	4,2
4,5 - 4,9	0,78	$1,84 \cdot 10^{19}$	$6,30 \cdot 10^{17}$	3,4
8 - 11	29,3	$1,40 \cdot 10^{21}$	$2,36 \cdot 10^{19}$	1,7

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

Le rapport flux/bruit est aussi affecté par le choix de la bande spectrale. Si n est le nombre de photons, le bruit de photon varie comme $1/\sqrt{n}$ (ce qui n'est à considérer que pour les détecteurs BLIP, voir le paragraphe suivant). Ainsi, le rapport flux/bruit montre une croissance en \sqrt{n} et se révèle plus favorable dans la bande 8-12 μm .

2.2. POINT ELEMENTAIRE

Le point élémentaire (pel) assure les fonctions de détection et de lecture. Il fournit une photoréponse, en principe image du flux d'émission. En pratique, seul la photoréponse demeure accessible à l'utilisateur. La photoréponse est à distinguer du photosignal fourni le détecteur.

2.3. PHOTOSIGNAL

En détection photovoltaïque, un détecteur de rayonnement transforme le flux qu'il reçoit en une puissance électrique ou photosignal. Le photosignal prend ensuite la forme d'une tension ou d'un courant suivant la technologie de lecture. Flux et photosignal sont fonctions des variables d'espace et de temps. Le photosignal dépendra des caractéristiques d'absorption du détecteur : bande spectrale, surface de détection A_d , efficacité quantique (QE pour « quantum Efficiency ») et l'angle solide de détection $d\Omega$ par lequel le détecteur voit l'optique. La conversion flux-photosignal est précisée sur la relation 3 :

$$\text{Photosignal} \propto A_d \times d\Omega \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \text{QE}(\lambda) \times \Phi^0(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{W}) \quad (3)$$

L'angle solide de détection est d'autant plus important que le nombre optique n (indiqué par l'ouverture optique f/n de l'imageur) est faible. En conséquence, le flux reçu par le détecteur pour une ouverture optique $f/1$ est plus important qu'en $f/2$, etc... En pratique, la diminution du flux incident en fonction du nombre optique peut être technologiquement compensée par une bande spectrale de détection plus large (un détecteur MCT 3,7 - 4,9 μm en $f/2$ produit un photosignal équivalent à un détecteur InSb 3,7-5,1 μm en $f/3$).

2.4. PHOTOREPONSE

La photoréponse correspond à l'énergie absorbée par le détecteur pendant le temps d'exposition (si on parle en luminance) ou d'intégration (si on parle en flux). En supposant les caractéristiques d'émission constantes, la photoréponse est le produit du photosignal par le temps d'intégration :

$$\text{Photoréponse} = \int_{\text{temps d'intégration}} \text{photosignal}(t) dt \approx \overline{\text{photosignal}} \times \tau \quad (\text{Joule}) \quad (6)$$

Dans l'étape de lecture, la photoréponse est convertie en numérique sur un maximum de 16000 niveaux en lecture 14 bits. Il est aussi intéressant de tester la linéarité de la photoréponse avec le flux, dans les limites précisées ci-dessus. La figure 2 présente la photoréponse d'une matrice LWIR-MCT pour deux temps d'intégration :

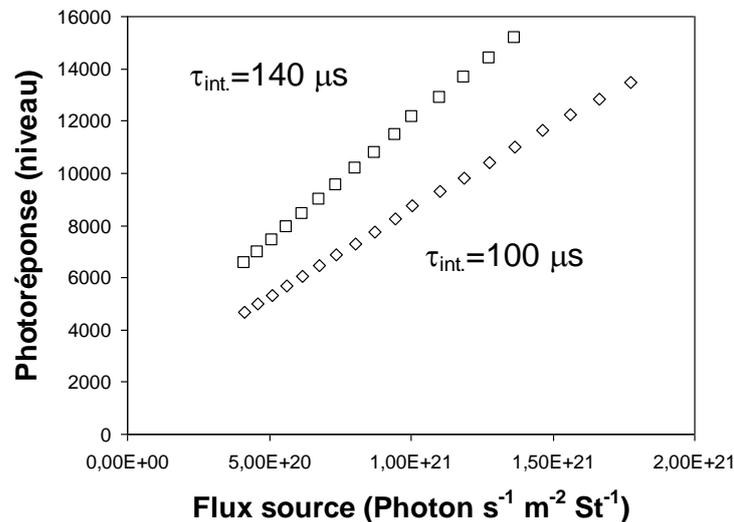


Figure 2. - Photoréponse d'un imageur LWIR-MCT en fonction du flux dans la bande spectrale 8-9,5 μm. L'échelle de flux correspond à un maximum de calibre en lecture de 14 bits (16 000 niveaux). Elle est associée au maximum de calibre en température 5-95°C.

La photoréponse montre une variation linéaire avec le flux incident. A flux constant, le temps d'intégration modifie l'offset, la sensibilité du pel et le calibre de mesure.

2.5. LES CARACTERISTIQUES DES DETECTEURS

Les détecteurs infrarouges sont basés sur une absorption 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. Flux et photosignal sont fonction des variables d'espace et de temps. La limitation dans la détection des faibles niveaux de flux est le bruit électronique qui affecte le détecteur. 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 d'un détecteur : la sensibilité, la linéarité et la NETD.

2.5.1. Sensibilité

La sensibilité du détecteur est le rapport du photosignal 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 photovoltaïque (en Watt). Il en est de même pour les détecteurs qui produisent une tension. Cette sensibilité est appelée « responsivity » dans la littérature anglaise. D'un point de vue pratique, on préfère la notion de « sensibilité pel » définie par le rapport de la variation de la photoréponse sur la variation correspondante de température du corps noir. Elle est exprimée en niveau/°C et s'obtient en situation d'étalonnage.

2.5.2. Linéarité

Toute variation de flux provoque une variation dans le photosignal. Dans les meilleures conditions, cette variation doit être la même quel que soit le niveau de flux. La limite supérieure de linéarité est la saturation en flux intenses. La limite inférieure est la sensibilité en faibles flux. Suivant ces caractéristiques, les détecteurs InSb sont d'excellents détecteurs qualifiés de « théoriques ». Les détecteurs photovoltaïques MCT ne sont pas linéaires et la distorsion de la caractéristique photoréponse fonction de flux demande une correction du signal.

2.5.3. La Différence de Température Equivalente Bruit (NETD, ou DTEB)

Dans la limite BLIP (background limited input power), le bruit temporel est réduit à son minimum. La plus petite variation de température détectable (NETD, *Noise Equivalent Temperature Difference* ou différence de température équivalente au bruit) est alors uniquement limitée par la présence de bruit de photons (détecteurs quantiques) ou par le bruit de fluctuation thermique (détecteurs thermiques). Dès l'instant où est atteinte la limite BLIP, la NETD et la sensibilité sont inversement proportionnelles. Le propos est illustré sur la **figure 3**.

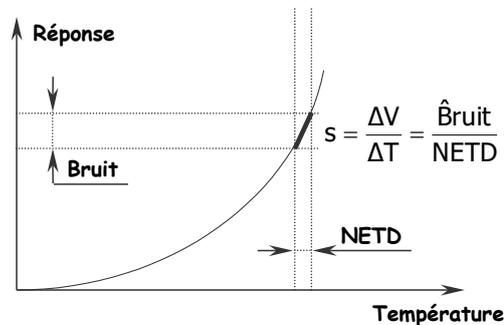


Figure 3 - Sensibilité et NETD. Un niveau de bruit indépendant de la détection induit une NETD inversement proportionnelle à la sensibilité.

La dispersion technologique des pels autour d'un comportement moyen (en sensibilité et offset) induit une figure de bruit spatial fixe 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. On en déduit la notion pratique de NETD image tant pour chaque pel que pour l'ensemble de la matrice (NETD image = écart type/sensibilité, associée au bruit spatial fixe), à distinguer de la NETD pel (NETD pel = bruit RMS moyen/sensibilité, associée au bruit temporel).

2.6. DU PEL AU PIXEL

L'exposition fournit un photosignal (courant ou tension) dont la caractéristique flux-température est intrinsèquement non linéaire. Le photosignal est lu sur 14 bits puis conditionné en niveaux. La lecture du photosignal donne une photoréponse en niveau DL (digital level) sur lequel on procède en numérique à l'évaluation des pels défilants et aux corrections de NUC puis de dérive thermique. Le pixel (élément d'image) est enfin affiché sur l'écran, à sa place dans l'image de la scène observée. Les différentes étapes du processus sont représentés sur la figure 4. D'un point de vue métrologique, on peut mettre en évidence deux caractéristiques majeures : la dynamique (je ne suis pas d'accord avec ce mot) et la linéarité de la photoréponse. Les limites inférieure et supérieure de linéarité sont dues respectivement à une insensibilité aux bas flux (photosignal limité par le bruit temporel et les signaux d'obscurité) et à une saturation aux flux ou temps d'intégration importants. Ces limites établies, on évalue la dynamique de mesure par le maximum de calibre en niveau sur

lequel la photoréponse est l'image du flux incident (zone de quasi-linéarité). La sensibilité du détecteur permet enfin d'évaluer le maximum de calibre en température.

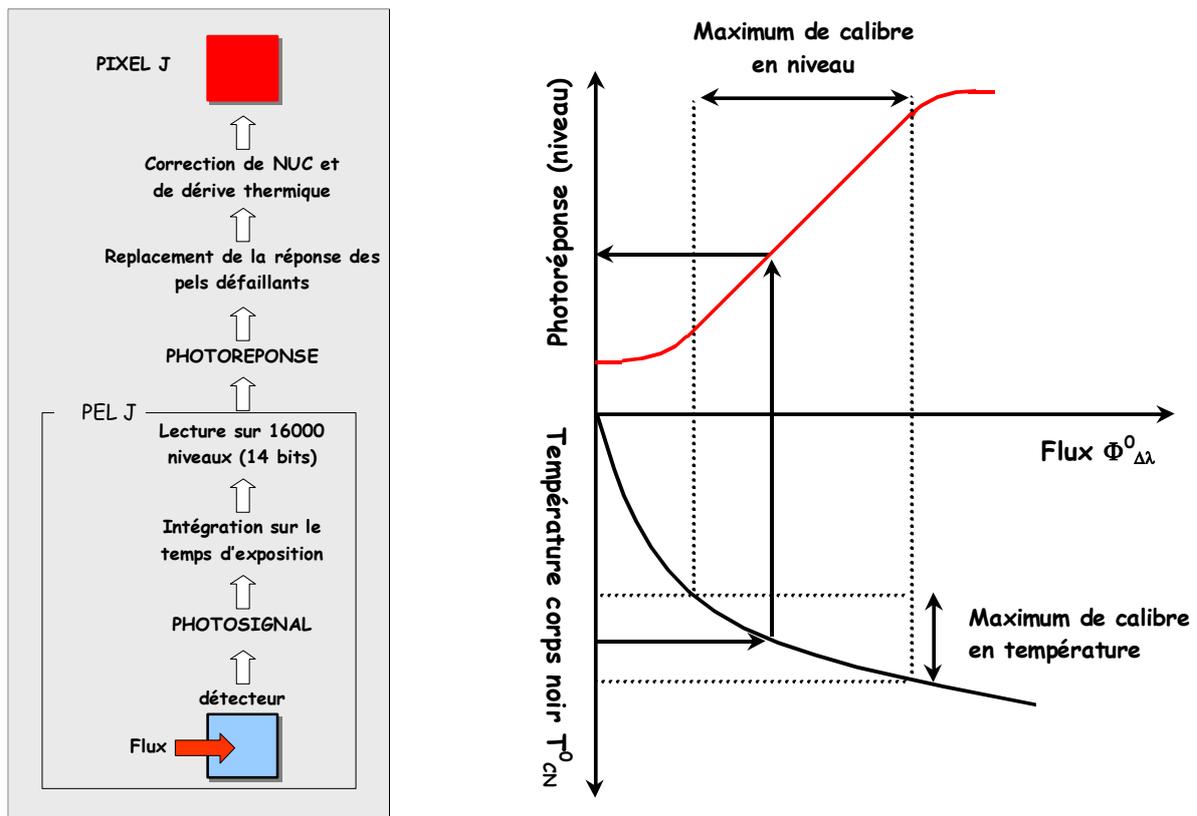


Figure 4 - Principe de l'imagerie thermique. Elle procède en deux parties: une mesure radiométrique fournissant un photosignal et sa lecture fournissant une photoréponse. La dynamique de mesure est évaluée par le maximum de calibre en niveau sur lequel la photoréponse est l'image du flux incident. Le maximum de calibre en température est obtenu en divisant le maximum de calibre en niveau par la sensibilité moyenne du détecteur.

3. 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 et constituent un imageur avec balayage mécanique puisqu'on y vient ensuite. 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 mécanique. Dans les matrices de troisième génération, on trouve des senseurs de complexité supérieure à 640×480 au pas de 25 μm. Avec des différences entre les technologies de lectures, ils acquièrent tous les points de la prise de vue simultanément (*Starring Arrays*, matrice fixe, par opposition aux matrices avec balayage mécanique). Le thermosignal est délivré dans le plan focal : 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 : détection, lecture du détecteur avec adaptation d'impédance, conditionnement du signal de lecture par intégration et enfin multiplexage des thermosignaux élémentaires.

3.1. ELECTRONIQUE DE LECTURE ET DE CONDITIONNEMENT DU SIGNAL DETECTEUR

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.

3.2. ELECTRONIQUE D'ADRESSAGE

Gérer une matrice de détecteurs pour 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 Oxyde Semiconductor*)^[2].

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 adresses autorise une localisation spatiale de l'acquisition. Elles permettent le développement de ROIC (*Read out integrated circuit*) 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 2 propose une comparaison des technologies CCD et CMOS.

	IRCCD		IRCMOS	
possibilité de choix du fondeur	Difficile	-	Secondes sources.	++
évolution de la densité d'intégration	très faible	-	Evolution permanente	+
potentiel d'évolution de la technologie	Quasi nulle	-	Evolution 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	+

Tableau 2 : comparaison entre l'IRCCD et l'IRCMOS (+ : favorable, - : défavorable)

4. PROBLEMES SPECIFIQUES DES SENSEURS

4.1. DISPARITE DE REPONSE ET DE RESOLUTION THERMIQUE DES DETECTEURS 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.

4.1.1. Les causes du bruit spatial fixe

Lors de la prise de vue d'une scène thermique uniforme, la photoréponse est entachée d'un bruit invariant d'une image thermique à l'autre. Il manifeste les non uniformités de conversion flux - photoréponse dues aux disparités dans les caractéristiques métrologiques des détecteurs ainsi qu'à l'interface électronique et au multiplexage des photoréponses. L'ensemble des perturbations se traduit par la notion de bruit spatial fixe (BSF ou FPN pour *Fixed Pattern Noise*). Les sources de bruit spatial fixe sont variées. Citons les principales :

- La qualité industrielle des matrices de détecteur. Leur production met en œuvre les techniques de la microélectroniques et les aléas qui en résultent (variations dans la taille et dans la qualité métallurgique des composants semi-conducteurs). Ces variations modifient les caractéristiques métrologiques des pels.
- Régulation thermique. Afin d'obtenir un thermosignal stable, il est indispensable de maintenir constante la température de la matrice de détecteur. De petites variations sont difficiles à éviter. Elles ont un impact variable sur le fonctionnement des pels.
- L'électronique de lecture et de conditionnement. Les technologies de lecture génèrent un bruit spatial fixe. Les images peuvent être affectées d'une structure aléatoire, d'une structure de grille (technologie CMOS) ou de ligne (technologie CCD).
- Le bruit électronique (1/f noise). Le bruit en 1/f provient des centres de piégeage présents aux interfaces semiconducteur-isolant, ce qui lui donne un caractère irréductible. Il limite la sensibilité aux bas niveaux et l'exactitude des procédures de correction.
- L'optique. Le bruit spatial fixe peut être causé par l'optique de l'imageur. L'optique peut engendrer une non uniformité dans l'éclairage de la matrice. Sur l'image thermique, cela se traduit par une baisse d'intensité sur les bords ou des défauts géométriques généralement circulaires. Il ne s'agit pas à proprement parler d'un bruit.

Il est impossible de contrôler chaque source de bruit spatial fixe. Dans une opération de correction, on considère l'imageur comme une boîte noire opérationnelle et on cherchera à corriger la photoréponse tenant compte de toutes les sources interne de bruit fixe.

4.1.2. 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 de leur fabrication. Les sources d'excès de bruit ou d'atténuation de la réponse proviennent des différents processus entre la détection et la photoréponse. De façon globale, ces défauts conduisent à la dégradation des pels. On est amené à distinguer leurs propriétés métrologiques :

- Les pels dont la sensibilité est nulle et une NETD infinie.
- Les pels qui présentent un offset ou une sensibilité importants.
- Les pels bruités qui répondent correctement mais dont la NETD dépasse excessivement la NETD pel moyenne.

Les premiers sont aveugles, les seconds limitent la dynamique de mesure, les troisièmes fournissent un pixel dégradé. Il est indispensable de les identifier avant de procéder à leur élimination par remplacement de leur signal.

La qualification opérationnelle de chaque pel est faite par l'assembleur. Le test de détection de « mauvais » pel repose sur les informations d'offset, de gain et de bruit temporel. En pratique, l'assembleur se donne des limites compatibles le maximum de calibre en niveau. Une sensibilité trop importante réduirait le maximum de calibre en température et contraint à la réforme du pel. Une

faible sensibilité pel dégrade la NETD tandis que le bruit temporel affecte la détectivité aux bas niveaux. Un taux de défaut inférieur à 0,1% pour les pels aveugles est actuellement réaliste pour les matrices à usage militaire. Le complément à 1 du taux de défaut définit l'*operability*. Il est peu probable de trouver des matrices zéro défaut dans un lot de fabrication. Une spécification 0 défaut dans le cahier des charges d'un senseur impliquerait le rejet d'un grand nombre de composants et conduirait à un coût de fabrication prohibitif. Les matrices sont donc produites dans diverses qualités à partir desquelles l'assembleur adapte la performance de ses produits. Sur la figure 5, nous présentons l'évolution comparée du pourcentage de pels dégradés sur les matrices MCT-LWIR et InSb-MWIR de 320x256 éléments utilisées dans la production d'imageurs « Jade »

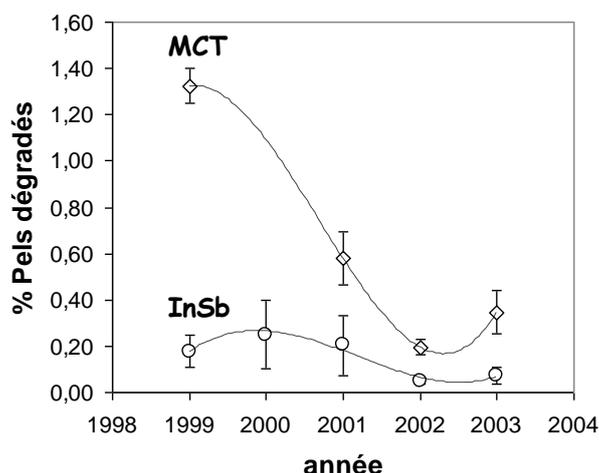
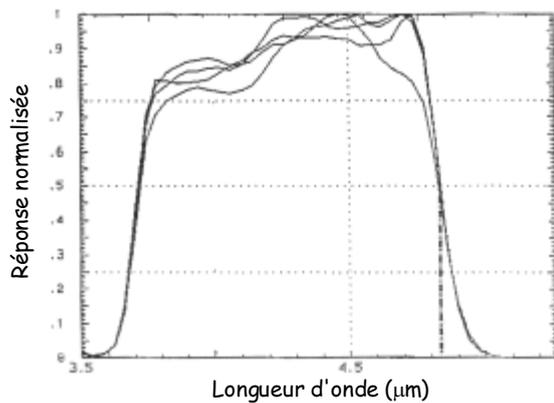


Figure 5 - Evolution du nombre de pels réformés dans les matrices MCT-LWIR et InSb-MWIR depuis 1999. Les critères de test sont un écart de $\pm 25\%$ sur la sensibilité, de $\pm 30\%$ sur l'offset et un bruit Pel supérieur à 7-10 niveaux sur 16000. Le taux de rejet, en 2002 s'élève à 1,5 %. Les barres indiquent la dispersion statistique des imageurs testés sur la période 1999-2003 (12 MCT et 20 InSb). Données CEDIP.

Dans le cas du MCT, un effort constant dans la qualité des matrices a permis de réduire d'un facteur 10 le taux de pels réformés. Elle atteint le niveau de qualité de l'InSb dont la technologie fait référence. Ces productions ont notamment bénéficiées des progrès fait ces dernières années dans la technologie CMOS.

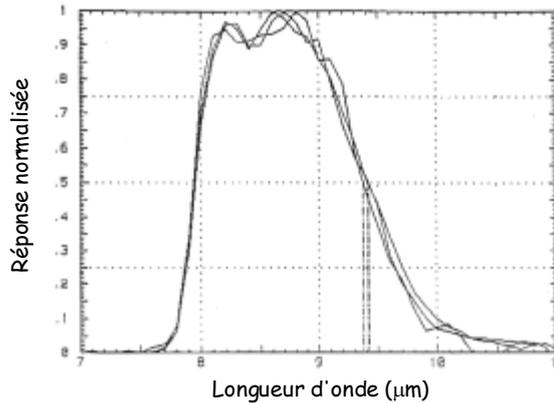
4.1.3. Dispersion des autres caractéristiques des détecteurs

Le niveau de dispersion des caractéristiques (réponse spectrale, temps de réponse, etc...) est important. Citons principalement la réponse spectrale relative variant d'un pel à l'autre. La réponse spectrale normalisée du composé HgCdTe est présentée sur les figures 6. Ce composé est utilisé dans la fabrication des matrices photovoltaïque MCT refroidies. D'usage répandu du fait de l'adaptation aisée de la bande spectrale par le dopage des composés de base, ce composant est difficilement stable et reproductible. Les caractéristiques spectrales relevées sur quelques pels extraits d'une matrice de 320x256 varient en défaveur de l'utilisation LW. On le remarque notamment sur la définition conventionnelle de la fréquence de coupure haute λ_2 (trait pointillés) et la position du pic d'absorption. Sur les deux caractéristiques, la fenêtre d'absorption montre une dispersion importante due à la décroissance irrégulière d'un pel à l'autre. La fréquence basse de coupure λ_1 est obtenue par un filtre froid placé devant la matrice de détecteurs limitant efficacement sa dispersion.



Matrice SWIR - HgCdTe - 320x256

Diode	bande d'absorption		Pic
	λ_1	λ_2	λ_{max}
	μm	μm	μm
1	3.71	4.832	nc
2	3.71	4.839	nc
3	3.72	4.84	nc
4	3.71	4.839	nc
moyenne	3.713	4.838	4.650
écart type	0.005	0.004	nc
Dispersion (%)	0.13	0.08	0.28



Matrice LWIR - HgCdTe - 320x256

Diode	bande d'absorption		Pic
	λ_1	λ_2	λ_{max}
	μm	μm	μm
1	7.96	9.416	8.7
2	7.95	9.41	8.6
3	7.94	9.372	8.8
moyenne	7.950	9.399	8.7
écart type	0.010	0.024	0.1
Dispersion (%)	0.13	0.25	1.1

figure 6 - Réponse spectrale de quelques pels HgCdTe en SWIR et LWIR. La fréquence de coupure haute est définie conventionnellement à 50% du maximum même si l'absorption se poursuit au delà. La dispersion dans les caractéristiques spectrales du MCT photovoltaïque est défavorable en utilisation LW. Données ULIS-SOFRADIR 1999

Les autres sources caractéristiques de dispersion interviennent dans les conversions du photosignal (conditionnement et numérisation) et dans la pollution par les signaux numériques de commande dans le plan focal (adressage).

4.1.4. Limite BLIP

Dès l'instant où est atteinte la limite BLIP, la dispersion technologique des pels autour d'un comportement moyen induit une figure de bruit spatial fixe supposée suffisamment invariante pour être corrigée à partir de données de caractérisation. En photovoltaïque, on peut situer la limite blip en NETD Pel de l'ordre de 10 mK (@300K, f/1, 8-12 μm)^[3]. Une étude statistique menée sur la période 1999-2003 concernant des imageurs photovoltaïques LWIR-MCT et MWIR-InSb montre qu'elle est aujourd'hui atteinte sur les matrices commerciales.

La dispersion statistique plus importante chez le composé MCT qu'InSb. L'InSb est un semi-conducteur covalent très stable dont la technologie a été très tôt maîtrisée. La technologie LWIR-MCT, semi-conducteur moins stable, montre une amélioration constante et atteint aujourd'hui un niveau équivalent à celle du MWIR-InSb.

5. LA CORRECTION DU BRUIT SPATIAL FIXE (NON UNIFORMITY CORRECTION, NUC)

Dans la mesure où la caméra est stable et fidèle, le bruit spatial fixe est en principe invariant dans le temps et peut être corrigé^[4]. La procédure de NUC présentée dans la suite est basée sur l'algorithme de Shulz^[5] qui suppose a priori la linéarité de la photoréponse avec le flux incident.

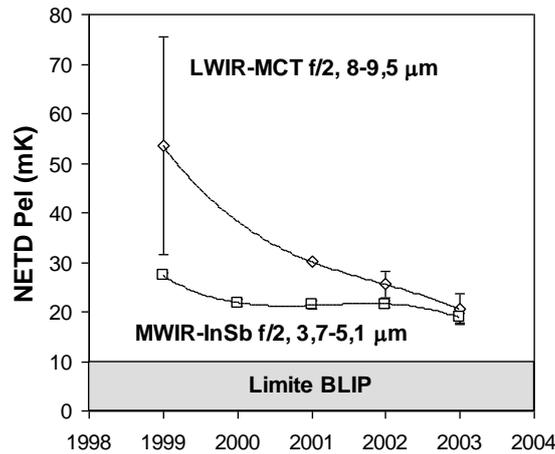


Figure 7 - Evolution comparée de la NETD Pel des matrices commerciales LWIR-MCT et MWIR-InSb. La NETD Pel est donnée à 25°C. Pour chaque imageur, La NETD pel est obtenue en divisant le bruit spatial moyen résiduel après NUC par la sensibilité. Donnée CEDIP.

L'intérêt d'un tel algorithme est de permettre avec rapidité tous les traitements relatifs à l'imagerie.

5.1. ÉTALONNAGE DE LA MATRICE

L'étape d'étalonnage consiste à corrélérer la température de corps noir à la photoréponse d'un ensemble de points élémentaires agissant comme autant de mono détecteurs. On procède à un étalonnage utilisant un corps noir dont on fait varier la température. Pour chaque température d'étalonnage, on enregistre la photoréponse associée. La caractéristique photoréponse-température de corps noir définit la courbe d'étalonnage du détecteur.

Les dispositifs d'imagerie infrarouge mettent en œuvre un grand nombre de pels qu'il faut distinguer les uns des autres. Dans la suite, la photoréponse associée à un pel sera représentée par y_{ij} . L'indice i ($1 < i < n$) indique les températures de corps noir T_i^0 utilisées en situation d'étalonnage tandis que l'indice j ($1 < j < N$) se rapporte aux N pels du senseur.

Dans la situation d'étalonnage, la photoréponse de chaque pel du FPA est mesurée pour différentes températures de corps noir. A l'échelle de la matrice, on définit une photoréponse moyenne $\langle y_i \rangle$ associée à la température de corps noir T_i^0 :

$$\langle y_i \rangle = \frac{\sum_{j=1..N} y_{i,j}(T_i^0)}{N} \quad (7)$$

Le point d'étalonnage est ensuite représenté par le couple $(T_i^0, \langle y_i \rangle)$ autour duquel se disperse les photoréponses des pels. Sur la figure 8, nous présentons la courbe d'étalonnage et la sensibilité des matrices photovoltaïques MWIR-InSb et LWIR-MCT déterminées sur 7 points de température pris entre 5°C et 35°C. Le temps d'intégration pel est choisi compatible avec une dynamique 25%-75% des 16000 niveaux disponibles sur le maximum de calibre en température. Cet aménagement permet d'intégrer la dispersion d'offset des pels de $\pm 25\%$ pour laquelle une correction de NUC est recherchée.

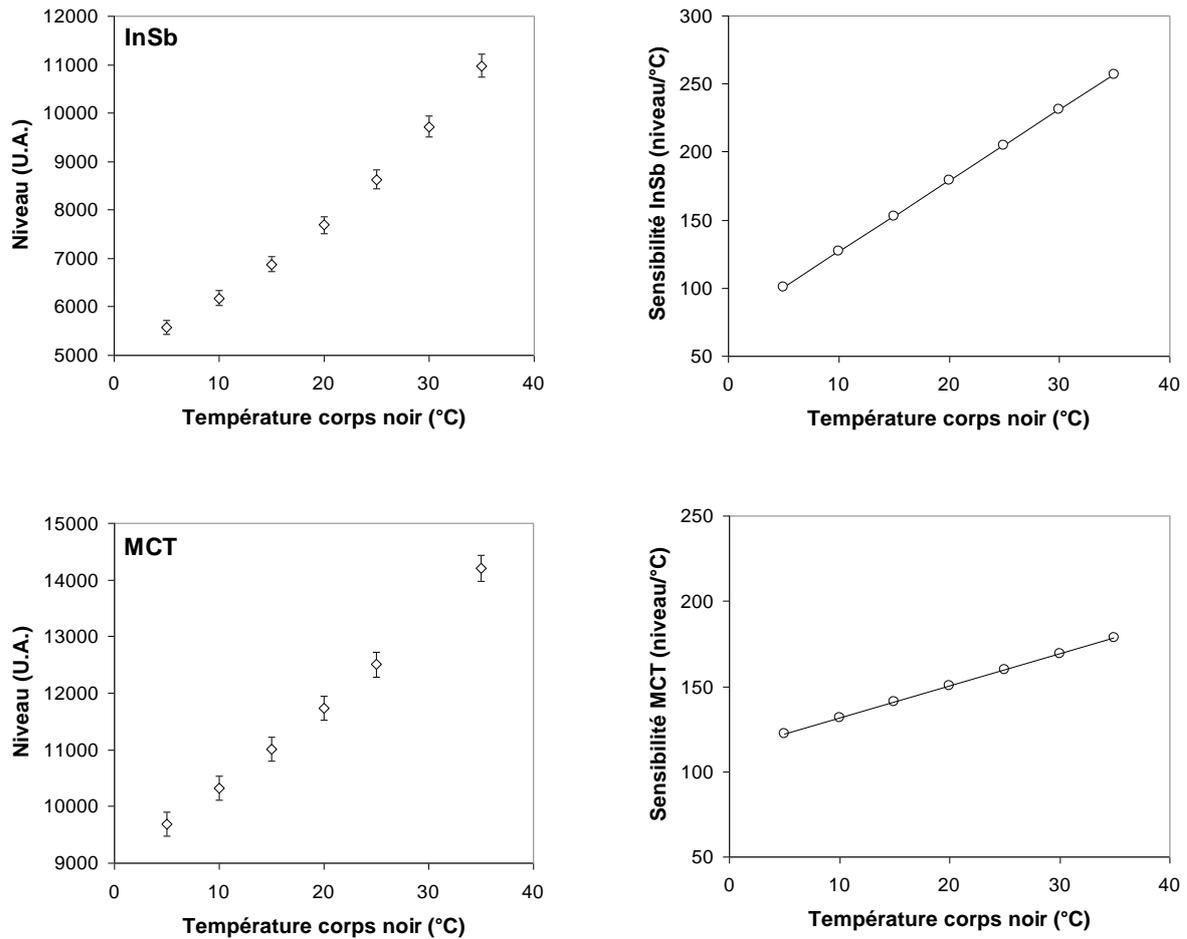


Figure 8 - Courbes moyennes d'étalonnage et de sensibilité Pel d'une matrice de détecteurs 320x256 MWIR-InSb et LWIR-MCT. Le pel moyen est représenté par un losange. Les barres verticales donnent une indication de la dispersion des photoréponses individuelles entre γ_{min} et γ_{max} autour de la valeur moyenne $\langle \gamma \rangle$.

La sensibilité est obtenue en dérivant la photoréponse moyenne par rapport à la température. Sa variation souligne le caractère non linéaire de la photoréponse avec la température d'émission. La dispersion du photosignal est représentée sur la figure 9 pour la température corps noir de 30°C.

A la différence du MCT, la répartition des photoréponses concernant l'InSb n'est pas gaussienne. Cependant, moyenne et écart type ont une signification indépendante de la distribution statistique. Dans le cadre d'une représentation Gaussienne, $m \pm \sigma$ donne l'intervalle de confiance contenant 85% des événements. C'est sans aucun doute le cas pour le MCT. σ représente la dispersion moyenne des photoréponses et donne un ordre de grandeur statistique du bruit spatial fixe. La NEDT pixel est alors définie par le rapport du bruit spatial fixe sur la sensibilité moyenne. A la source, elle est ici de l'ordre de 2,6°C pour le MCT et 1,8°C pour l'InSb. Ces valeurs élevées requièrent, à l'évidence, une correction de non uniformité.

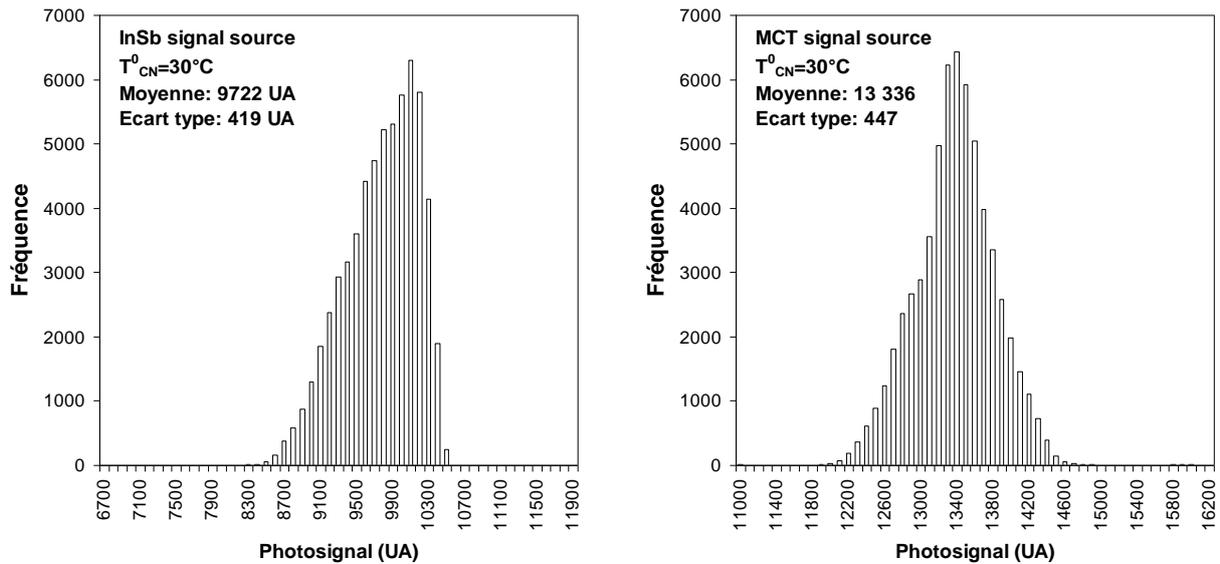


Figure 9 - Distribution statistique des photoréponses fournies par une matrice de 320x256 détecteurs InSb et MCT. L'écart type σ donne un ordre de grandeur du niveau de bruit spatial fixe.

5.2. ALGORITHME DE NON UNIFORMITE

Pour la correction de non uniformité, il n'est pas nécessaire d'explicitier la fonction mathématique de la courbe d'étalonnage : on emploie le flux incident comme nouvelle variable. Associant la photoréponse avec le flux, nous obtenons une caractéristique moyenne en principe linéaire. Les photoréponses individuelles dévient de la caractéristique moyenne à cause des non uniformités spatiales et du bruit temporel. Sur la figure 10, nous présentons la caractéristique moyenne ainsi que la caractéristique individuelle d'un pel. L'écart mis en évidence fait l'objet d'une correction de non uniformité consistant à ramener la caractéristique individuelle sur la caractéristique moyenne.

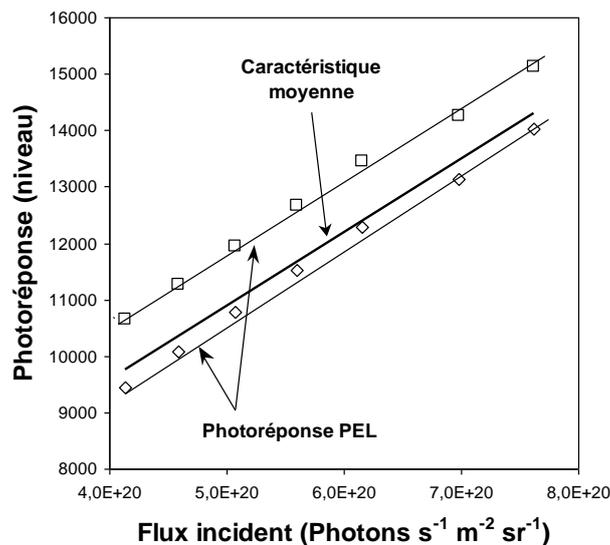


Figure 10 - Photoréponse fonction du flux incident. La caractéristique moyenne $\langle y_i \rangle$ est représentée en un trait plein associée à une pente arbitraire 1 et un offset 0. La caractéristique PEL individuelle est accompagnée des points de réponse. L'échelle des flux correspond à la gamme de température 5-35°C. La correction consiste à ramener la caractéristique individuelle sur la caractéristique moyenne ce qui est la correction de non uniformité.

Pour chaque pel, la non uniformité et le niveau de bruit sont représentés par un l'écart Δy_{ij} à la réponse moyenne :

$$\Delta y_{ij} = y_{ij} - \langle y_i \rangle \quad (8)$$

L'écart fait l'objet d'un ajustement polynomial. Le degré est choisi selon la forme de l'amplitude des déviations évaluées pour chaque pel. La loi d'ajustement des moindres carrés est de la forme

$$\Delta y_{ij}^{lq} = a_j + b_j \langle y_i \rangle + c_j \langle y_i \rangle^2 + \dots \quad (9)$$

Pour une correction d'offset, seul le paramètre a_j est déterminé. Pour une correction linéaire, l'offset a_j et le gain b_j sont déterminés. La correction quadratique introduit un troisième terme c_j , etc. Le degré de correction est arbitraire. Tous ces paramètres sont évalués et mémorisés pour chaque pel du senseur. L'amplitude corrigée est obtenue en ajoutant l'écart ajusté à la réponse individuelle :

$$y_{ij}^c = y_{ij} - \Delta y_{ij}^{lsq} \quad (10)$$

Des déviations d'ordres supérieurs demeurent après la correction. L'écart résiduel est obtenu en soustrayant l'écart ajusté à l'écart individuel :

$$\Delta y_{ij}^c = \Delta y_{ij} - \Delta y_{ij}^{lsq} \quad (11)$$

L'écart résiduel est dû au bruit temporel et à la courbe individuelle d'étalonnage dont la forme peut varier d'un pel à l'autre. En pratique, si on se contente d'une correction linéaire, deux points en température suffisent à déterminer les paramètres gain et offset. Les températures choisies sont généralement de 20°C et 100°C. La limite supérieure est imposée par les conditions normales d'utilisation d'un corps noir étendu. Au niveau opérateur, seul le calibrage sur la matrice d'offsets est possible. Elle se fait à partir d'une seule température d'obturateur.

5.3. CORRECTION DE L'IMAGE

Dans le cas d'une prise de vue, l'éclairement est par nature non-uniforme. Les paramètres a_j , b_j , c_j , etc.. déterminés par le procédé ci-dessus pour différentes températures d'étalonnage, sont supposés constants et sont enregistrés sous la forme de matrices. Le procédé numérique de correction est ensuite appliqué en temps réel ou en différé sur la réponse de chaque pel.

Le pixel corrigé est déterminé par les relations suivantes :

$$y_j^c = y_j - a_j \text{ (correction d'offset seul)} \quad (12)$$

$$y_j^c = \frac{y_j - a_j}{1 + b_j} \text{ (correction linéaire)} \quad (13)$$

$$y_i^c = -\frac{1 + b_j}{2c_j} \sqrt{\frac{(1 + b_j)^2}{4c_j^2} + \frac{y_j - a_j}{c_j}} \text{ (correction quadratique)} \quad (14)$$

Pour des corrections d'ordre trois, les relations mathématiques sont plus complexes. Le résultat de la correction de NUC d'une matrice LWIR-MCT dans un schéma linéaire est présenté sur les figures 11.

5.4. ELIMINATION DES PELS DEFECTUEUX

Les pels défectueux doivent être évalués puis exclus de la procédure de NUC. Un pel n'ayant aucune réponse est représenté par un gain $b_j = -1$. Un tel Pel n'est pas corrigible et doit être considéré comme mort. Pour des corrections linéaires ou d'ordre supérieur, le bruit temporel lié aux différents Pels conduit à une erreur dans le procédé de correction. Si un Pel montre un photoréponse faible (b_j proche de -1), ils sont difficilement corrigibles parce que le bruit temporel est amplifié ($1/(1+b_j) \gg 1$). Pour des utilisations qui nécessitent une grande résolution, ces pels sont déclassés. D'autre part, le bruit temporel peut varier d'un pel à l'autre. Cela crée une erreur dans la détermination des paramètres individuels de correction a_j , b_j , etc... La qualité du procédé de correction est alors principalement limitée par le bruit temporel. Un Pel montrant le bruit temporel excessif, par exemple le bruit en $1/f$, reste également difficilement corrigible. Les pels éliminés sont artificiellement masqués par un filtrage spatial qui consiste à attribuer au pel défectueux un niveau de sortie interpolé des pels adjacents.

6. LES LIMITES DE LA CORRECTION DE NON-UNIFORMITE

La suppression du bruit spatial fixe pour pertinente qu'elle soit en imagerie trouve deux limites : la distorsion et la stabilité temporelle du thermosignal.

6.1. DISTORSION

La plus petite non-linéarité, négligeable lorsqu'on étudie le comportement moyen, peuvent être conséquente lorsqu'il s'agit de différences, comme c'est le cas dans la correction de NUC. Les limitations du procédé de NUC sont présentés sur la figure 12 dans les cas d'une correction d'offset et d'une correction linéaire. Dans le cas d'une correction d'offset seul, les écarts sont diminués de la même quantité sur toute la gamme d'étalonnage. Les points corrigés sont représentés par des triangles vides. Les écarts résiduels autour de la courbe « zéro » restent importants aux extrémités. Dans une correction linéaire, les points de mesure se dispersent autour de la courbe « zéro ». La correction linéaire donne un résultat satisfaisant comparée à la correction d'offset seule.

La procédure NUC dans un schéma linéaire ne peut pas tenir compte des déviations non-linéaires.

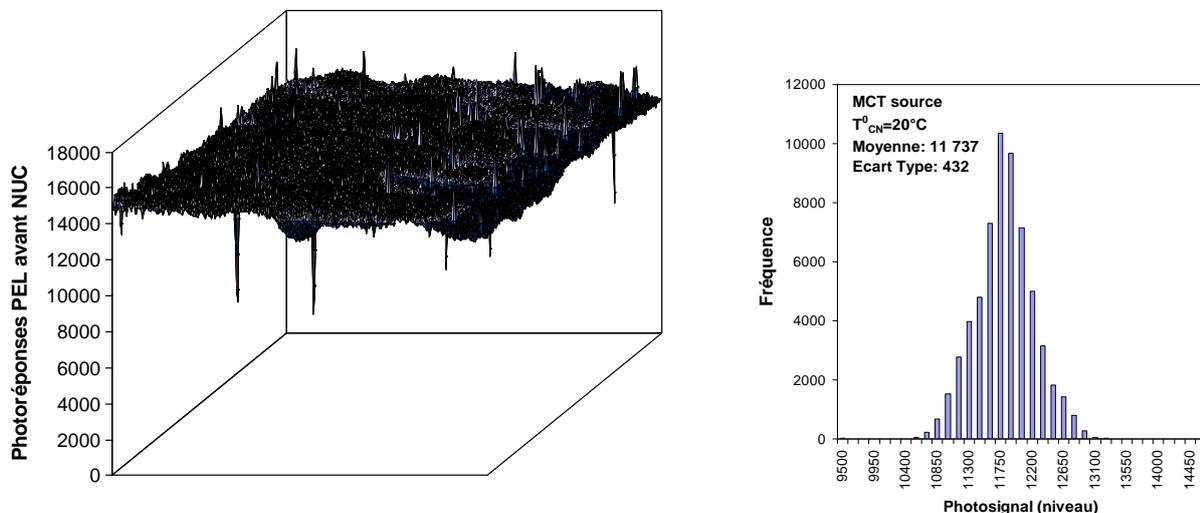


Figure 11a - Photoréponse brute pour une température de corps noir de 35°C. La sensibilité moyenne à cette température est 231 niveaux/°C. Le bruit spatial fixe à $\pm \sigma$ s'élève à 1,87 K.

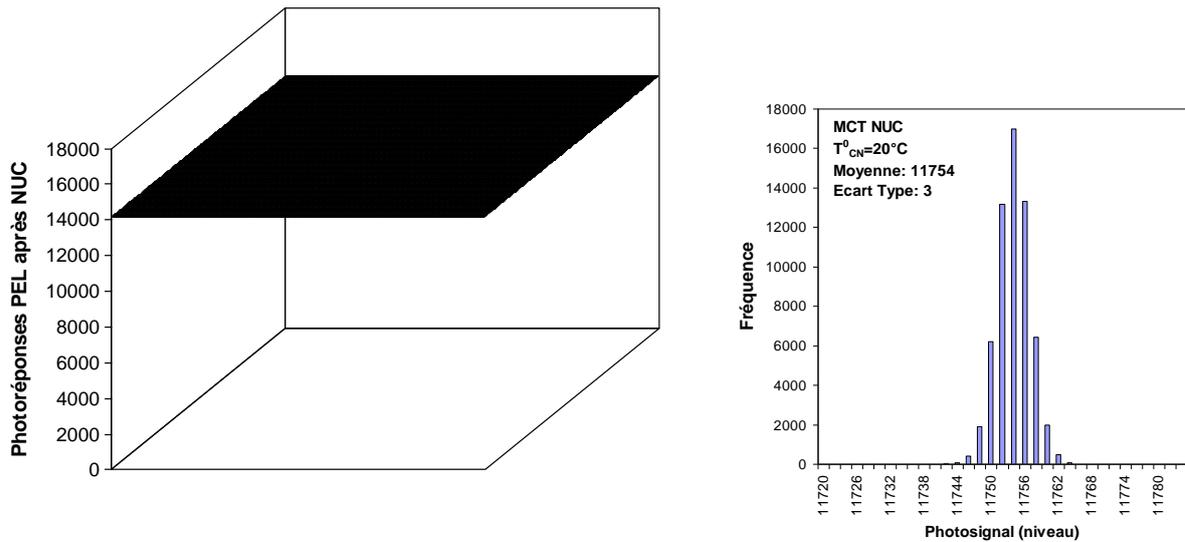


Figure 11b - Photoréponse corrigée. La correction de NUC (gain et offset) est calculée aux températures 5 et 35°C. La NETD image, image du bruit spatial résiduel s'élève à 13 mK.

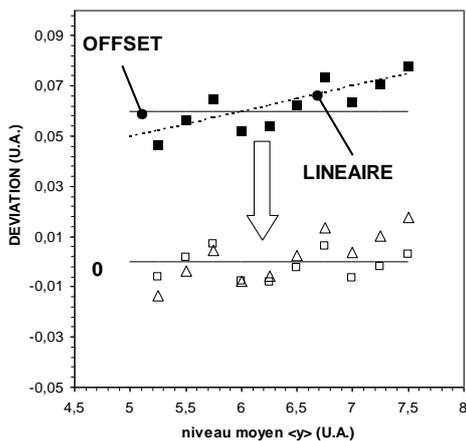


Figure 12 - Correction de NUC. Les carrés pleins représentent l'écart à la photoréponse moyenne (En trait plein : correction d'offset, en trait pointillé : correction de gain+offset) Les triangles vides sont obtenus après correction d'offset tandis que les carrés vides le sont après correction linéaire.

En principe, Les écarts de linéarité peuvent être traités par des corrections d'ordre plus élevé, induisant des relations mathématiques plus complexes et difficiles à numériser (division, extraction de racine...), un développement logiciel spécifique et un temps de calcul important. Ces corrections ne sont pas mises en œuvre dans une approche d'imagerie. Il est à noter qu'une correction d'ordre supérieur à 3 n'a pas de solution analytique. Une méthode simplifiée tenant compte de la non-linéarité de la photoréponse est présentée dans la référence [6].

La NETD image masque une réalité métrologique : elle donne un ordre de grandeur statistique du bruit spatial résiduel mais ne permet pas de chiffrer la dispersion dans la photoréponse des pels. Après correction de NUC, il n'est pas étonnant de constater des variations d'un pel à l'autre supérieures à la NETD image. Ces écarts peuvent être amplifiés par des non-linéarités de la photoréponse avec le flux. Nous avons testé l'écart résiduel à 20°C de la photoréponse après correction de NUC de 3 pels choisis au hasard parmi les 320x240 d'une matrice MWIR-InSb. Le résultat est présenté sur la figure 13.

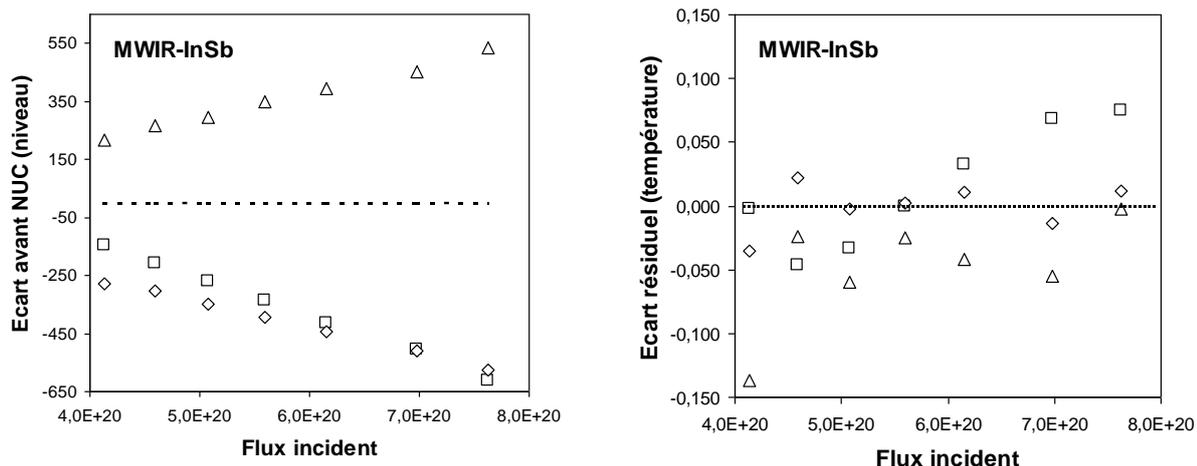


Figure 13 - Correction du bruit spatial fixe. A gauche, écart de la photoréponse brute non moyennés (en pointillé : réponse moyenne, écart nul). A droite, écart résiduel calculé en température à partir des paramètres a_j et b_j issus de la correction. Les températures de NUC correspondent aux points de mesure aux extrémités du graphique (5 et 35°C).

Le comportement individuel montre de grande dispersion mais aucune non-linéarité n'a pu être mise en évidence sur l'échelle des températures d'étalonnage explorées. A noter l'amplitude des dispersions plus importante aux extrémités. L'écart type sur l'écart résiduel varie de 20 à 50 mK, deux à cinq fois supérieures à la NETD image.

6.2. STABILITE DE LA MATRICE

La correction de NUC suppose les paramètres gain et offset constants dans le temps. Le tableau 3, issu de la référence^[7], 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 $NEDT_{image} corrigée \leq NEDT_{pel}$, temps au bout duquel les corrections sont injustifiées.

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)

Tableau 3- Exemples de stabilités temporelles

Le siliciure de platine (PtSi) a la stabilité d'une technologie silicium ; l'InSb est un composé binaire au cristal covalent stable. Le HgCdTe (MCT), 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.

7. CONCLUSIONS

Nous avons détaillé la chaîne métrologique mise en œuvre depuis le flux (signal source) et le pixel (point image). D'un point de vue métrologique, il est indispensable de définir la notion de photosignal

et de photoréponse, seule accessible à l'utilisateur de caméra à FPA. Cela nous amène à préférer la notion de point élémentaire (pel) à celle de détecteur et à redéfinir les termes de linéarité, de sensibilité et de dynamique de mesure. La photoréponse fournie en éclairage uniforme présente de grande disparité d'un pel à l'autre : c'est le bruit spatial fixe, inévitable dès lors qu'on assemble un grand nombre de détecteurs. Les performances d'une telle matrice seraient médiocres si on ne procédait à une correction de NUC. Nous avons étudié deux type de matériels: le LWIR-MCT et le MWIR-InSb. Nous avons relevé de très bonne caractéristiques statistiques (NETD image) même si celle-ci masque une disparité résiduelle des photoréponse qui semble irréductible. L'écart entre la NETD et la dispersion pouvant atteindre un facteur 3. Enfin, nous avons posé le problème de la stabilité temporelle de la correction. Nous n'avons pas parlé de la compensation de dérive de la caméra équipée d'une telle matrice FPA, ce qui fera l'objet d'une autre conférence lors de Thermogram'2005.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dominique Pajani et Luc Audaire. Thermographie. Techniques de l'Ingénieur. R 2740 et R 2741. Septembre 2001.
- [2] Chih-Cheng Hsieh, Focal-plane arrays and CMOS read out techniques of infrared imaging systems. I3E Transaction on circuits and systems for video technology, vol.7 n°4 (1997)
- [3] Olivier Riou et Luc Audaire, Panorama technologique des caméras à FPA, atouts et limites, Thermogram'2001 pp115-155
- [4] J. Metschuleit et J. Graff. Stability evaluation of staring imager InSb imagers. Amber, 1995.
- [5] M. Shultz, L. Caldwell, Infrared physical technologie 36 (1995) page 763
- [6] Ruizhong Wang, An improved nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays which is easy to implement, Infrared physical technologie 39 (1998) page 15-21
- [7] W.Gross et al. Correctability and long term stability of infrared focal plane arrays, Opt.Eng 38(5) 862-869 (may 1999).