

# Imagerie infrarouge en haute résolution pour le contrôle des circuits électriques et électroniques

J. Sadi

Lightnics Sarl - Espace Lunel Littoral - 177b, avenue Louis Lumière – 34400 LUNEL

[contact@lightnics.com](mailto:contact@lightnics.com) – 04.67.64.37.72

## Introduction

Depuis leur origine, l'une des limitations majeures concernant les capteurs d'image infrarouge est leur faible résolution. Cependant, des résolutions élevées sont souvent recherchées pour permettre la visualisation de petits détails sur les objets, ou à des fins d'identification précise dans le champ de vision. La perte de visibilité des détails est notamment liée à l'utilisation d'optiques à nombre d'ouverture faible. Dans ce cas, la taille de la tâche de diffraction est largement inférieure à celle du pixel photosensible du capteur. En conséquence, l'intensité perçue par le pixel constitue une moyenne des intensités correspondant à plusieurs points-image. L'information individuelle sur chaque point-image est ainsi perdue.

Une telle situation est courante dans le domaine infrarouge où les faibles nombre d'ouverture utilisés conduisent à des points-image de petite taille en comparaison de la taille du pixel utilisé : le diamètre d'un point d'image est d'environ  $14\mu\text{m}$  tandis que les tailles de pixels standard dans l'infrarouge lointain sont de  $25\mu\text{m}$ .

Toutefois cette contrainte peut être surmontée en « désentreplaçant » les points-image individuels grâce à l'utilisation d'algorithmes spécifiques. Ceci est aujourd'hui permis par la puissance disponible tant au niveau des ordinateurs personnels que des processeurs de traitement du signal (DSP : Digital Signal Processor). De ce fait, de tels algorithmes peuvent aujourd'hui être embarqués sur des cartes électroniques pour améliorer la résolution des images infrarouge en temps réel (cadence vidéo). La seule condition est de disposer d'un capteur capable de produire des images à une cadence élevée. Les microbolomètres non refroidis sont ainsi de bon candidats pour effectuer cet accroissement de résolution.

Cependant, avant de réaliser le passage sur carte électronique de ces algorithmes, il est nécessaire d'en évaluer l'apport non seulement en terme d'accroissement de résolution, mais également d'analyser leur impact sur le bruit du capteur. Pour ce faire, il faut déterminer des critères d'appréciation qui permettront non seulement de valider l'intérêt d'utiliser cet algorithme mais qui serviront également dans les phases d'amélioration de l'algorithme et de comparaison des performances après passage sur carte électronique. En effet, le passage sur électronique implique des modifications dans le traitement des images (parallélisation, précision des calculs, architecture distribuée) dont il faudra évaluer l'impact sur les performances finales de l'algorithme.

Nous avons donc utilisé trois critères standard pour le test de systèmes d'imagerie infrarouge : la FTM (Fonction de Transfert de Modulation), le NETD (Noise Equivalent Temperature Difference : Différence de température équivalent au bruit) et la MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference : Différence de température minimale détectable). Il s'agit ici d'évaluer notre algorithme au regard de ces trois critères en les appliquant successivement à l'analyse d'images infrarouge en résolution standard puis à ces images retraitées par notre méthode pour en augmenter la résolution.

## 1. Principe général de l'augmentation de la résolution

Soit  $\{n_i\}$  un ensemble d'images infrarouge enregistrées en résolution standard par un système d'imagerie à base de capteur microbolométrique non refroidi. Afin d'effectuer le désentrelacement des points-image individuels conduisant à l'image haute résolution, et d'extraire l'information détaillée, il est nécessaire de référencer spatialement chaque image par rapport à l'une des images de l'ensemble  $\{n_i\}$ . Ce faisant, nous aurons une correspondance spatiale entre chaque couple d'images  $\{n_i, n_j\}$  de cet ensemble. Ceci permet de rendre la scène superposable à elle-même pour chaque image prise en résolution standard. Nous réalisons cette opération en appliquant un opérateur de translation à chaque image de l'ensemble  $\{n_i\}$  dans le cas d'un mouvement global de la scène ou de la caméra, par exemple. Le vecteur de translation de cet opérateur peut, par exemple, être calculé par une technique de corrélation de phase [1] :

$$C = \frac{I_0 \cdot I_j^x}{I_0 \cdot I_j^x}$$

où  $I_0$  est l'image de référence prise dans  $\{n_i\}$  et  $I_j$  l'image courante également prise dans  $\{n_i\}$ .

Pour rendre cette corrélation plus efficace, il est possible d'effectuer des pré-traitements sur les images de résolution standard en entrée de l'algorithme. Ces opérations dépendent des conditions particulières résultant de la scène observée. Une scène à faible contraste, par exemple, pourrait bénéficier d'un pré-traitement de type « égalisation d'histogramme ».

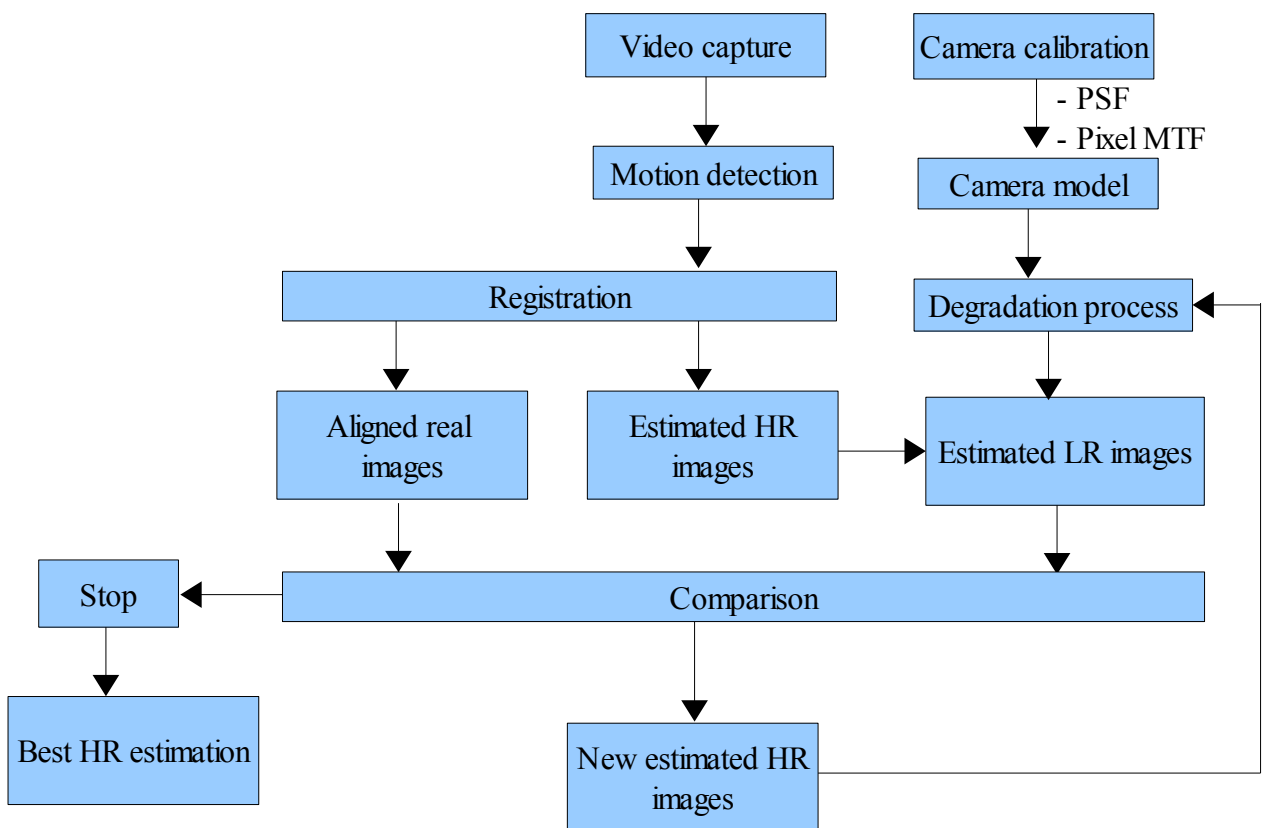
Lorsque toutes les images  $I_j$  de l'ensemble  $\{n_i\}$  ont été traitées en fonction de leur référence commune  $I_0$ , nous pouvons appliquer la méthode de reconstruction en haute résolution.

Cette deuxième étape, de reconstruction, est rendue particulièrement délicate du fait de la pluralité des facteurs pouvant affecter la qualité de l'image tout au long de la séquence enregistrée : un éclairage de la scène variable, par exemple, et, en général : toute condition liée à la scène, des informations perdus dans le bruit de fond (les zones d'ombres) et le processus de conversion analogique-numérique à l'aide d'un nombre limité de bits. Ainsi la dynamique forcément restreinte et le bruit électronique introduisent tous deux une limite à la fois au contraste perceptible et à la taille minimale du détail visible. En conséquence, tous deux dégradent la FTM du système d'imagerie. L'objet de la reconstruction en haute résolution est d'améliorer cette FTM dégradée en agissant à la fois sur le contraste et la taille du détail. Le premier est amélioré à travers une diminution du bruit, qui induit un meilleur rapport signal/bruit, tandis que la seconde est réduite par une réorganisation particulière des pixels provenant des images en résolution standard à l'intérieur d'une matrice plus grande.

La reconstruction en haute résolution est connue comme étant un problème inverse « mal posé », c'est-à-dire mal défini, ce qui en fait un problème insoluble par les méthodes classiques d'inversion, telles que l'inversion linéaire. En d'autres termes, un ensemble d'images en résolution standard peut donner lieu à différentes images résultantes en haute résolution. Il est donc souvent difficile d'atteindre la solution exacte sans connaissance a priori de la scène : on se trouve dans le cas où la cible est dite « non-coopérative ». C'est pour cette raison que des réseaux de neurones [2], des méthodes approximatives d'inversion de matrices [3], des statistiques basés sur des champs de Markov aléatoires [4] ou sur des ensembles convexes, peuvent être utilisés dans ce domaine. Cependant, ce sont des méthodes gourmandes en temps de calcul et donc difficilement applicables pour des applications en temps réel. De plus, la présence de bruit dans les images infrarouge impose souvent un niveau de calcul supplémentaire sous la forme d'une régularisation de type Tikhonov [5].

Pour ces raisons, notre méthode repose sur un schéma itératif comportant une régularisation implicite provenant du domaine de la tomographie médicale. Ce schéma est amélioré par un paramétrage précis de sa condition d'arrêt, conduisant à une relativement bonne approximation de la solution exacte. Une telle méthode s'effectue par comparaison d'un ensemble d'images estimées en résolution standard avec l'ensemble d'images réelles. Les images estimées sont calculées à partir d'un modèle précis du système d'imagerie. Cette étape demande donc un étalonnage précis de la caméra au préalable, de manière à avoir accès aux paramètres optiques du système tels que la fonction de diffraction (PSF : point spread function) et la fonction de transfert des pixels faisant partie du capteur microbolométrique. Cette modélisation aboutit à la construction d'un noyau de convolution pouvant être utilisé par la suite au cours du processus de dégradation.

Le diagramme logique de cet algorithme est donc le suivant :



L'objectif étant de tester les performances de cet algorithme, nous avons évalué la qualité des images obtenues en comparant des images de résolution standard (« images réelles » dans le diagramme ci-dessus) avec les images en haute résolution issues du traitement par notre algorithme (« Meilleure estimation HR » dans le diagramme ci-dessus).

## 2. Evaluation des résultats obtenus

### 2.1 Procédure

Afin d'évaluer l'algorithme décrit ci-dessus, tel qu'il a été développé par Lightnics, nous avons utilisé :

- une cible thermoélectrique comprenant 4 traits de ½ pouce d'épaisseur chacun, espacés de ½ pouce ;
- un capteur microbolométrique Ulis comprenant 160x120 pixels ayant une taille individuelle de 25µm (ULO2152).

Nous avons enregistré 11 films à différentes distances de la cible, allant de 2 à 15 mètres. Les fréquences spatiales correspondantes s'étalent ainsi de 4,4 cy/mm à 32.8 cy/mm.

Chaque film enregistré comportait 150 images et chaque pixel était codé sur 16 bits.

Un objectif Janos (Tyto Series) a été utilisé avec ce capteur, de focale 18 mm et de  $f\# = 1$ .

Avec ce matériel, nous avons voulu évaluer notre algorithme selon les trois critères de qualité retenus habituellement en imagerie infrarouge : FTM, NETD et MRTD.

Après enregistrement des 11 films, plusieurs profils d'intensité ont été sélectionnés à travers la cible, pour plusieurs images de chaque films. Ces profils ont permis de calculer le contraste moyen pour chaque film, donc chaque distance. En traçant les contrastes ainsi obtenus en fonction de la fréquence spatiale, nous obtenons la fonction de transfert de contraste (FTC) du système.

L'interpolation de la FTC est alors nécessaire pour obtenir les valeurs de la FTC aux fréquences spatiales précises requises pour convertir la FTC en FTM. Nous avons donc appliqué une interpolation polynomiale de degré 6 à la FTC avant d'utiliser la relation de Coltman pour convertir la FTC interpolée en FTM [6].

Pour évaluer la NETD (Différence de température équivalent au bruit), nous avons mesuré indépendamment le bruit spatial et le bruit temporel :

- le bruit spatial fixe a été mesuré en calculant une image moyenne de la séquence d'images entière puis en calculant l'écart-type des intensités sur cette image moyenne ;
- le bruit temporel a été évalué en calculant l'écart-type des intensités de tous les pixels d'une séquence prise sur une scène fixe et situés à une même position dans l'image, puis en calculant la moyenne de ces écarts-types pour toutes les positions de l'image.

La MRTD (Différence de température minimale détectable) est déduite des deux calculs précédents en formant le rapport de la NETD par la FTM.

## 2.2 Résultats

Les contrastes mesurés pour chaque séquence prise à une distance donnée ont été interpolés de manière à accéder à l'évaluation du contraste pour la fréquence spatiale nulle (figure 1).

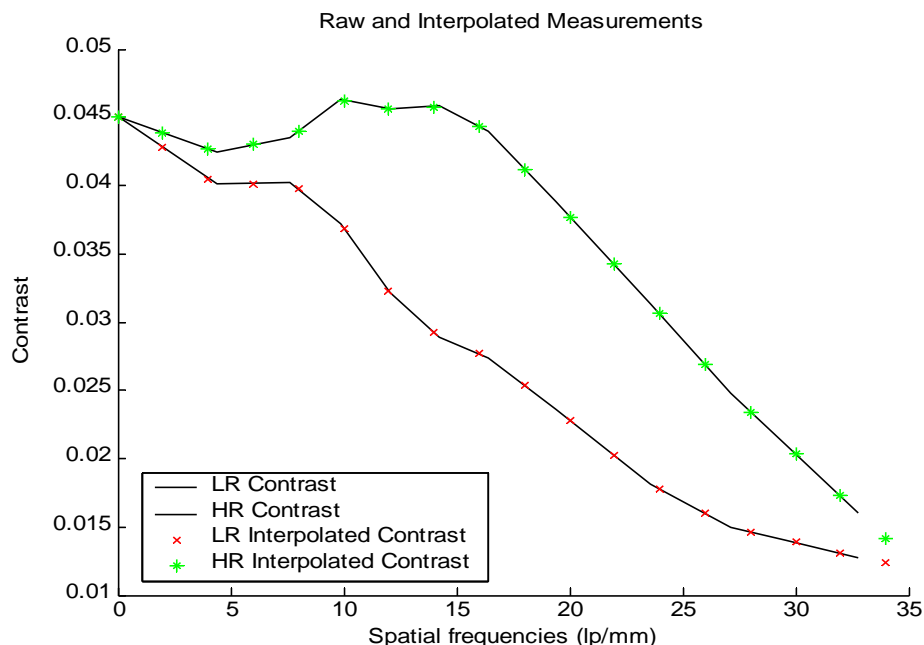


Figure 1 : Données brutes et interpolées des mesures de contraste pour les images en résolution standard (LR) et en haute résolution (HR).

Après normalisation des contrastes par rapport à leur valeur pour la fréquence nulle, la FTC obtenue est représentée sur la figure 2.

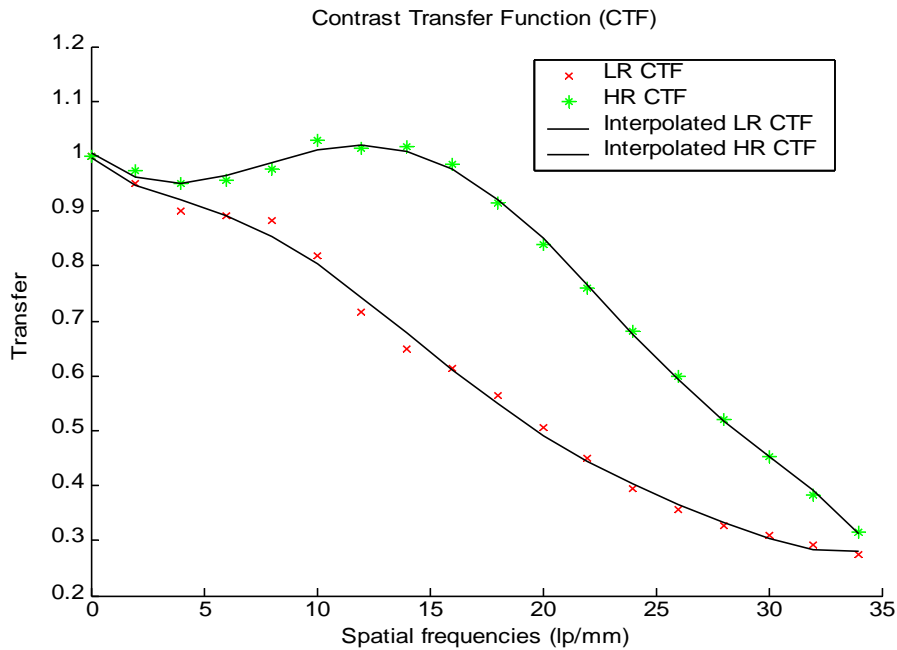


Figure 2 : FTC calculée sur des images en résolution standard (LR) et après traitement haute résolution par notre algorithme (HR).

Ces deux FTC fournissent les FTM correspondant au système d'imagerie standard et amélioré par notre algorithme, comme les montrent la figure 3.

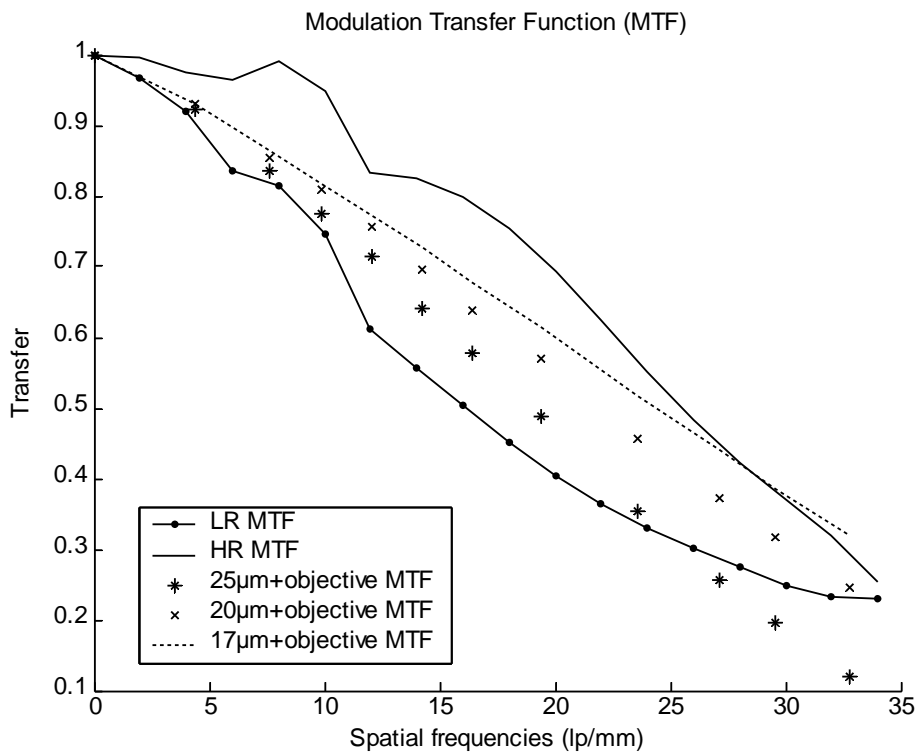


Figure 3 : FTM pour des séquences avec (HR) et sans (LR) traitement haute résolution, comparées aux FTMS d'autres systèmes d'imagerie. Nous notons le bon accord entre les données expérimentales et la théorie dans le cas du pixel de 25μm. Nous voyons nettement que le traitement HR améliore substantiellement la performance du système, en faisant

pratiquement l'équivalent d'un système à pixels de 17 $\mu$ m.

Les mesures de bruit explicitées plus haut ont donné les résultats suivants :

<b>Bruit</b>	<b>Procédure</b>	<b>BR</b>	<b>HR</b>
<b>Temporel</b>	Ecart-type moyen à chaque position	8.8	<b>6.6</b>
<b>Spatial</b>	Ecart-type global d'une image moyenne	89.5	<b>82.9</b>
<b>Global</b>	Moyenne quadratique	<b>63.6</b>	<b>58.8</b>

En tenant compte de ces résultats, nous pouvons calculer la MRTD à la fréquence spatiale  $f$  :

$$\text{MRTD}(f) = \text{NETD} / \text{MTF}(f).$$

La figure 4 montre le résultat de l'application de cette relation aux données précédentes :

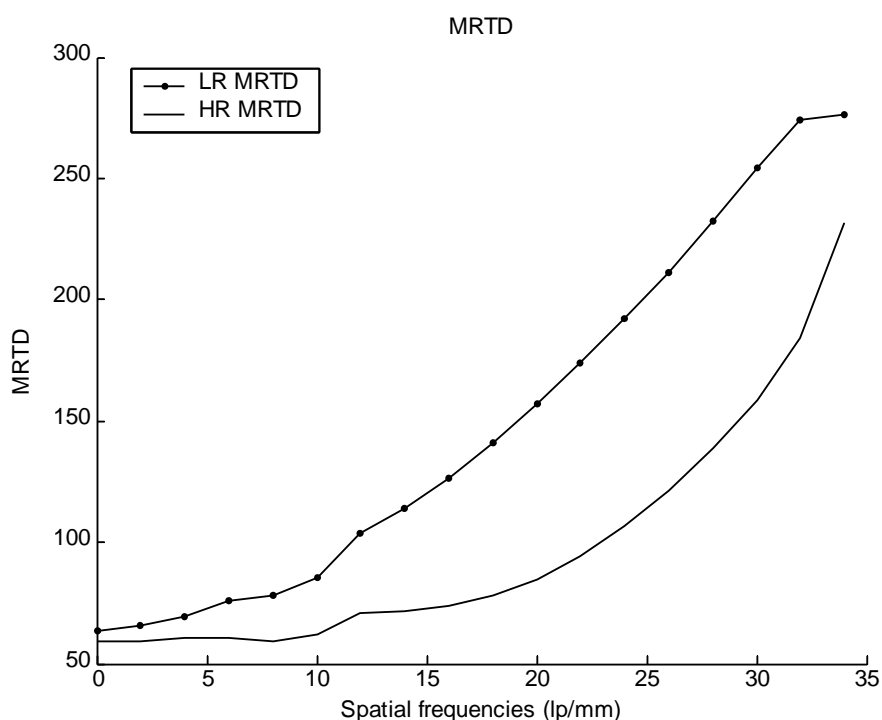


Figure 4 : MRTD pour les séquences avec (HR MRTD) et sans (LR MRTD) traitement HR.

### 2.3 Apports de l'algorithme d'augmentation de la résolution

Il résulte de l'analyse précédente que les trois critères communément adoptés pour l'évaluation d'un système d'imagerie infrarouge, FTM, NETD et MRTD, font nettement apparaître l'amélioration des performances d'un tel système procurée par l'utilisation de l'algorithme d'augmentation de la résolution développé par Lightnics.

En regardant les chiffres et les schémas de plus près, il est possible d'expliquer cette amélioration par le fait que notre algorithme HR agit à la fois sur les niveaux de bruit temporel et spatial, ainsi que sur le contraste des images transformées.

## **Conclusion**

D'après les résultats présentés, les capteurs microbolométriques peuvent tirer avantage du traitement HR de Lightnics. Celui-ci les rend aptes à percevoir à la fois des détails plus petits et des différences de température plus faibles. Cela signifie que notre technologie leur permet d'améliorer à la fois leur capacité de détection et leur portée. Par conséquent, notre algorithme peut être utilisé dans le contrôle électrique d'installations lointaines (lignes à haute tension par exemple). En effet, sa capacité à rendre perceptibles de petits détails lui permet de remplacer de lourds et coûteux zooms optiques, fastidieux à manipuler lors de tournées sur le terrain. De la même manière, installé sur une caméra infrarouge pour le test de microprocesseurs en R&D, il permet de localiser plus précisément les pistes défectueuses (court-circuit) à des échelles encore inaccessibles dans ce domaine de longueurs d'onde.

## **Remerciements**

L'auteur tient particulièrement à remercier A. Crastes de la société Ulis pour l'aide apportée dans la réalisation des expériences.

## **References**

- [1] C. D. Kuglin and D. C. Hines, "The phase correlation image alignment method," in Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society, pp. 163–165, IEEE, Sep. 1975.
- [2] Ripley, B.D. (1996) Pattern Recognition and Neural Networks, Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 0-521-46086-7 (hardback), xii+403 pages, 1996.
- [3] Gareth Williams, « Linear Algebra With Applications », Jones & Bartlett Publishers, 2005.
- [4] Chellappa, R., Jain, A.K., (Eds.) « Markov Random Fields: Theory and Applications », Academic Press, 1993.
- [5] A. N. Tikhonov and V. Y. Arsenin, Solutions of Ill-Posed Problems, Wiley, New York, 1977.
- [6] J. Coltman, « Specifications of Imaging Properties Response to a Sine Wave Input », J. Opt. Soc. Am., vol. 44, p. 468-, 1954.