

Evaluation d'imageurs à super-résolution au moyen de mires fractales binaires

Stéphane Landeau, Direction Générale de l'Armement
7-9 rue des Mathurins 92221 Bagneux Cedex. France

RESUME

De nos jours, de puissants traitements d'images non-linéaires sont utilisés en temps réel pour mettre en œuvre de la super-résolution et du débruitage. Les imageurs optroniques intégrant de telles techniques deviennent difficiles à évaluer, car la résolution spatiale est maintenant fonction du contenu de la scène. Beaucoup d'algorithmes incluent des processus de régulation qui généralement réduisent la complexité de l'image en lissant les contours. Des petits détails d'importance peuvent être ainsi détruits par ce genre de traitements. Dans cet article, une mire fractale binaire est présentée, avec un fouillis structuré et d'intéressantes propriétés d'autosimilarités multi-échelles. L'apparent fouillis structuré de cette mire offre un compromis entre bruit blanc, peu probable dans une scène réelle, et une mire très structurée comme l'est une mire de FTM. En association avec la conception fractale de la mire, une méthode d'analyse a été développée pour évaluer automatiquement les effets non-linéaires des images acquises et traitées par un imageur. La figure de mérite calculée est directement comparable avec une FTM linéaire dans Fourier. Dans cet objectif, les éléments en ondelette de Haar distribués spatialement sur la mire à différentes échelles, sont assimilés aux cycles sinus de Fourier à différentes fréquences. La probabilité de résolution correcte indique la capacité à lire correctement les contrastes de Haar parmi la population de tous les éléments de Haar avec une contrainte d'exactitude de position. Pour la validation de la méthode, la simulation de deux types différents d'imageurs a été réalisée, un système linéaire bien échantillonné et un système sous-échantillonné, associé à des traitements de super-résolution et de réduction de bruit. L'influence du contraste de cible sur les figures de mérites est analysée. Enfin, l'introduction de cette nouvelle figure de mérite dans les modèles de performance actuels, comme TRM4 (Fraunhofer IOSB) et NVIPM (NVESD) est envisagée. Les bénéfices et les limitations de la méthode sont aussi comparés avec l'évaluation TOD (TNO).

Mots-clés: traitement d'image, mire de caractérisation, FTM, acquisition de cible, modélisation de performance optronique.

1. INTRODUCTION

Ce rapport a pour objectif de présenter une méthode d'évaluation de la performance d'imageurs optroniques à partir de l'utilisation de mires fractales binaires. La méthode proposée a été développée pour répondre aux problèmes posés par les traitements d'images de restauration en voie d'être intégrés de plus en plus dans les imageurs. Il est en effet au cœur des responsabilités de la DGA (Direction Générale pour l'Armement) de quantifier avec suffisamment de précision le niveau de performance technique requis pour répondre à un besoin opérationnel, exprimé en termes de portée de DRI (Détection, Reconnaissance et Identification) de cible sur le terrain.

Les techniques de caractérisation qui donnaient satisfaction auparavant, se heurtent aujourd'hui aux nouveaux effets non-linéaires des traitements d'images de super-résolution ou de réduction de bruit. En pratique, la résolution effective de l'imageur ne dépend plus seulement linéairement de l'amplitude et de la taille de l'information présente sur la scène, comme auparavant, mais aussi de la distribution d'informations présentes sur la scène. Les traitements d'images s'adaptent en effet au contenu de la scène pour en optimiser le rendu d'image. Ce point touche directement les méthodes de caractérisation basées sur une forme particulièrement épurée de mire, comme les mires à barres, mires à fente ou mire en échelon. La réponse à ces stimuli peut en effet montrer des comportements aberrants qui défient les lois de la physique, comme par exemple le dépassement des limites de la diffraction, ce qui est difficile à admettre pour un système d'imagerie conventionnel.

Dans le chapitre 2, seront présentés des généralités sur la modélisation de performance en termes de portées de DRI. Les techniques de caractérisation linéaire dans l'espace de Fourier seront abordées. Sous cet angle, les problèmes posés par

les technologies de caméras à plan focal fixe, lié au sous-échantillonnage spatial, seront exposées. Les solutions utilisées pour palier ces non-linéarités seront présentées, en termes de modélisation et de technique de mesure. Ensuite, les effets non-linéaires produits par les traitements d'images de restauration seront exposés, en particulier face à une mire de mesure de FTM. Pour quantifier ce genre d'effets de dégradation d'image inhabituels, des solutions envisageables ont été développées dans le cadre de la communauté du traitement d'image, pour caractériser la qualité d'image, dans les domaines de la restauration ou de la compression d'image. Elles seront présentées dans les grandes lignes et critiquées sur la possibilité de les adapter à notre problème de performance de DRI. Sur la base de cette analyse, il sera fait une spécification des besoins que devrait satisfaire une nouvelle méthode adaptée à notre contexte.

Dans un chapitre 3, la mire fractale binaire sera présentée, du point de vue de son principe de conception, de ses propriétés, de son codage numérique ainsi que des figures de mérites qu'elle permet de mesurer. Les limitations actuelles de la méthode et les évolutions à prévoir seront aussi énoncées.

Dans un chapitre 4, l'application de la méthode sur des cas d'imageur simulé (imageur thermique) ou réel (imageur visible) sera présentée. Une discussion sur les particularités des puissants traitements d'images dédiés à la photographie numérique grand public sera abordée.

Enfin dans le chapitre 5, la méthodologie d'utilisation de cette mire en combinaison avec les outils existants sera présentée.

2. CARACTERISATION DE PERFORMANCE DES IMAGEURS OPTRONIQUES

2.1 Modélisation de performance de DRI

La modélisation de performance de DRI est essentielle pour la mise au point de protocoles et de métriques d'évaluation. Le triptyque de la figure 1 indique les trois lieux dans lesquels se mène l'évaluation de performance.

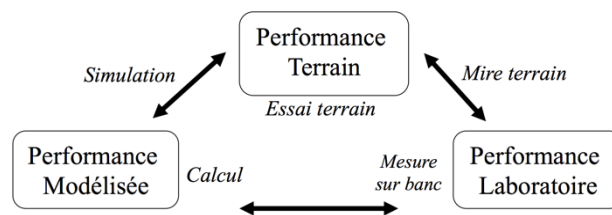


Figure 1. Trois types d'évaluation de performance qui permettent de couvrir toutes les phases de développement d'un imageur, de la conception théorique au produit fini.

Par calcul, la modélisation permet de calculer des portées de DRI sur la base d'une décomposition analytique de la chaîne optronique partant de la scène, traversant l'atmosphère, l'imageur, l'éventuelle transmission des images, la restitution des images sur écran et enfin la perception visuelle. A partir des caractéristiques de ces éléments on calcule une figure de mérite de performance propre à l'imageur, de type MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) [1] ou TOD (Triangle Orientation Discrimination) [2]. On peut citer comme modèles existants TRM4 [3] ou NV-IPM [4]. Le modèle d'acquisition de cible permet de calculer la portée de DRI en utilisant des données propres au scénario (contraste cible/fond, dimensions de la cible, critères de Johnson N50 [5] ou équivalents V50 [4] indiquant le niveau de résolution nécessaire sur l'objet pour atteindre 50% de probabilité de D, R ou I en vision humaine). La figure 2 résume la méthode de calcul de portée à partir d'une courbe de MRTD et le critère N50. Cette méthode est similaire pour la TOD [6].

Par mesure sur banc en laboratoire, on caractérise l'imageur du point de vue de la figure de mérite de performance définie en modélisation. La figure 2 explique rapidement la mesure de MRTD. On peut aussi caractériser l'imageur en

termes de FTM ou de sensibilité et bruit (temporel et spatial) qui servent en données d'entrée du modèle à calculer la figure de mérite de performance.

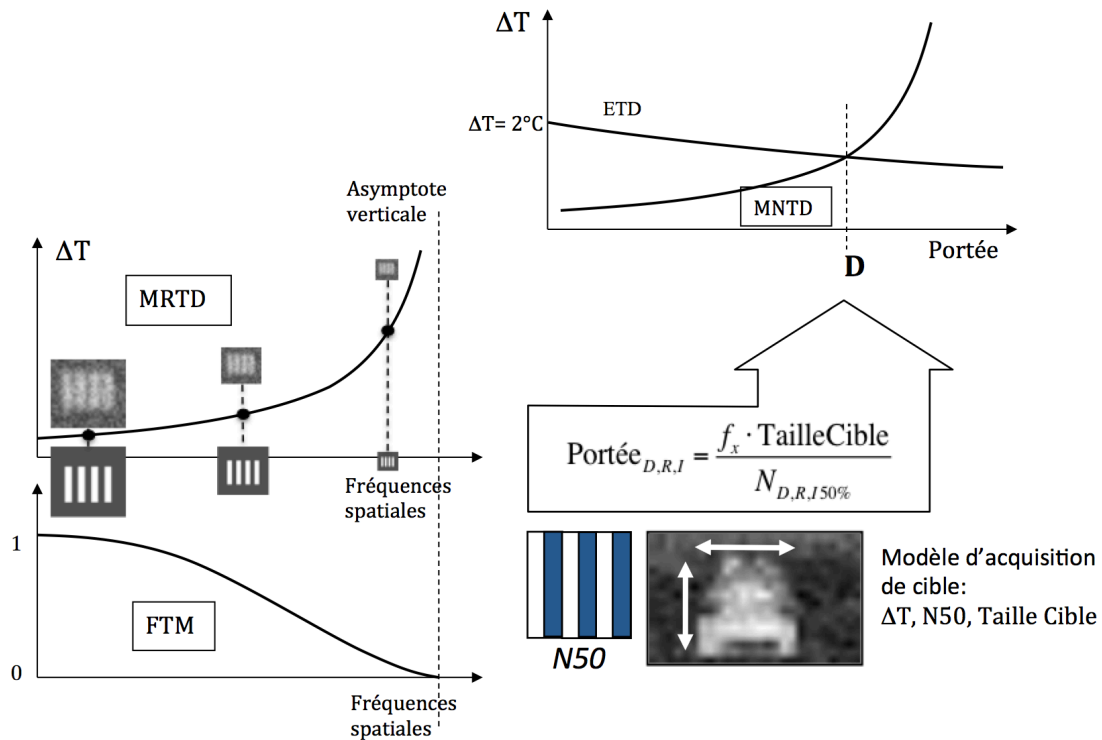


Figure 2. Calcul de portée à partir de la MRTD de l'imageur et du modèle d'acquisition de cible. La MRTD indique le niveau de contraste de température minimal résoluble à l'œil d'une mire à quatre barres projetée face à l'imageur, en fonction de sa fréquence spatiale. Plus la fréquence de la mire est élevée, plus la FTM atténue son contraste sur le plan focal de l'imageur, et plus son contraste doit être augmenté pour continuer à la résoudre, d'où l'asymptote verticale à la coupure de la FTM. La MRTD est transformée en MNTD (Minimum Necessary Temperature Difference) en remplaçant l'axe des fréquences spatiales par une portée imageur-cible, à l'aide de la formulation mettant en jeu les informations du modèle d'acquisition de cible: N50 et Taille Cible. La portée est obtenue par intersection entre la MNTD et la courbe ETD (Effective Temperature Difference) représentant l'évolution du contraste cible/fond en fonction de la portée par effet d'atténuation atmosphérique.

Sur le terrain, on dispose un jeu représentatif des cibles objets de la DRI (véhicules, personnels), face à l'imageur dont les images sont analysées par des humains entraînés. Au moyen d'un nombre suffisant de scénarios faisant varier le type de cible, son orientation et sa portée, l'analyse statistique des résultats d'observation permet de déterminer les seuils de DRI. La détection est une simple détection de point chaud, la reconnaissance fait état du type grossier de la cible (char, véhicule à roues,...) et l'identification du type exact de cible (T72, M1,...). Ces essais terrains peuvent aussi être obtenus par simulation d'image, mettant en jeu des modèles de cibles numérique, atmosphérique et d'imageur. On peut aussi utiliser sur le terrain des mires définies pour le laboratoire, mais conçues pour être robustes aux contraintes climatiques (contraste stabilisé).

2.2 Filtrage linéaire dans l'espace de Fourier et sous-échantillonnage

Les techniques de modélisation précédemment exposées reposent sur une analyse dans l'espace de Fourier. L'hypothèse sous-jacente est que l'on considère l'imageur comme un filtre linéaire, que l'on peut caractériser par sa réponse impulsionnelle, permettant d'obtenir par transformation de Fourier la FTM de l'imageur.

Cependant l'arrivée de la technologie matricielle dans tous les imageurs actuels a bien souvent posé le problème du non-respect des conditions d'échantillonnage de Shannon. Le filtrage anti-repliement de spectre formé par la FTM de l'optique et du détecteur est bien souvent peu efficace, et l'on constate un phénomène de non-isoplanétisme, qui donne

lieu à une réponse impulsionnelle variant avec le phasage détecteur/impulsion. L'imageur ne peut donc plus être considéré comme linéaire, et l'on constate une limite de résolution des mires à barres à la demi-fréquence d'échantillonnage spatial, appelée la fréquence de Nyquist. L'expression de la MRTD n'est ainsi plus valable au delà de la fréquence de Nyquist; pourtant, l'on a pu constater lors d'essais terrains des portées de DRI supérieures aux portées limitées à la fréquence de Nyquist de l'imageur [1], [6]. Des fréquences sous-résolues au sens de Shannon permettant d'améliorer la perception de l'objet sur la scène. La figure 3 donne une illustration de ce phénomène.

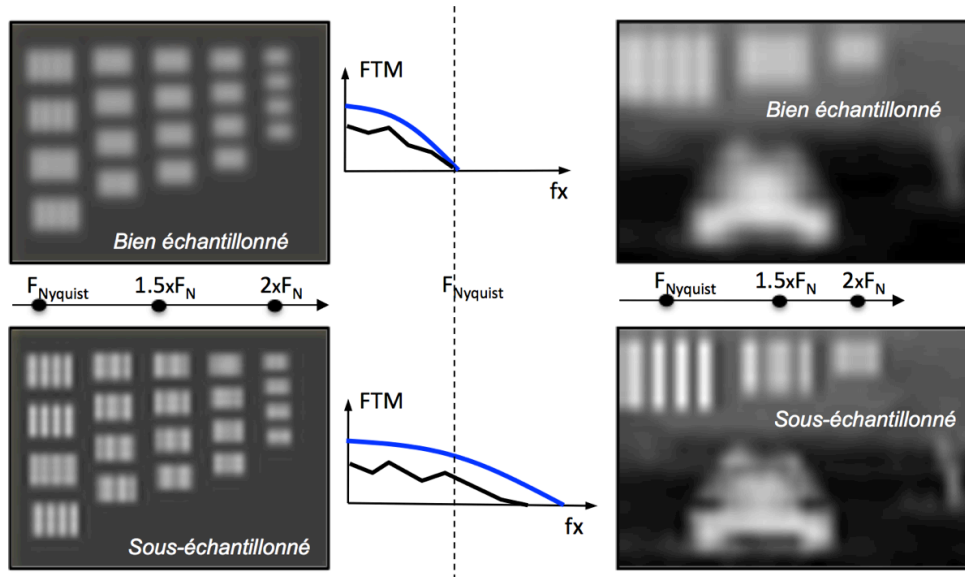


Figure 3. Simulation de deux imageurs matriciels ayant la même Fréquence de Nyquist (même détecteur, même focale) sur une scène à fort contraste (pas de bruit). En haut, avec une optique dont la FTM permet de couper les fréquences au delà de Nyquist et de satisfaire Shannon. En bas une optique laissant passer les fréquences au delà de Shannon (sous-échantillonnage, repliement de spectre). Malgré une forte distorsion sur les mires à barres au delà de Nyquist, l'image sous-échantillonnée offre paradoxalement un plus grand nombre de détails contrastés utiles pour identifier le char.

2.3 Modélisation des effets du sous-échantillonnage

Dans l'esprit de l'analyse de Fourier appliqué à la performance de DRI, un imageur est d'autant meilleur que sa réponse à haute fréquence est bonne. La barrière de Nyquist n'étant pas corrélée à une baisse brutale de performance, il a été développé des technique pour permettre de continuer l'expression de figure de mérite de performance au delà de Nyquist. Plusieurs voies ont été menées :

- Approche MTDP (Minimum Temperature Difference Perceived) [1], qui continue la MRTD au delà de Nyquist mais en relâchant le critère stricte de résolution de 4 barres à 3 voire 2, dans une situation de phasage optimal (phasage visible en figure 3 sur les mires de haut en bas, pour un même fréquence). Méthode compatible avec l'approche MRTD et ses mires à 4 barres, en remplaçant la FTM par l'AMOP (Amplitude Modulation at Optimal Phase) dans le calcul de la MTDP. L'AMOP est une fonction de transfert en amplitude de mire à 4 barres en fonction de la fréquence.
- Approche TOD, qui utilise des mires en triangle et un critère visuel robuste aux effets du sous échantillonnage, en multipliant les conditions de phasage lors de la procédure de mesure visuelle. Le parallèle avec la fréquence spatiale est obtenu par l'inverse de la taille moyenne du triangle observé.
- Approche NVTherm [7], qui utilise une métrique de conversion de l'imageur sous-échantillonné en un imageur linéaire, avec le concept de MTF squeeze (compression de FTM). La figure de mérite de prédiction de portée n'est plus mesurable en laboratoire.

Ces techniques ont offert une solution valable à la caractérisation de performance en estimant plus précisément des imageurs sous échantillonnés. Toutes ces techniques ne permettent pourtant pas aussi facilement, comme nous allons le

voir, de s'accommoder des traitements d'images de restauration, qui sont tout comme le sous échantillonnage source de non-linéarités importantes.

2.4 Problèmes posés par les traitements d'images de super-résolution et de réduction de bruit.

La figure 4 montre le gain en résolution sur des mire à barres, apporté par un traitement de super-résolution appliqué à un imageur thermique matriciel. Ces images proviennent d'une campagne d'acquisition d'image dédiée à l'étude de la super-résolution dans le cadre du SET-140 [8].

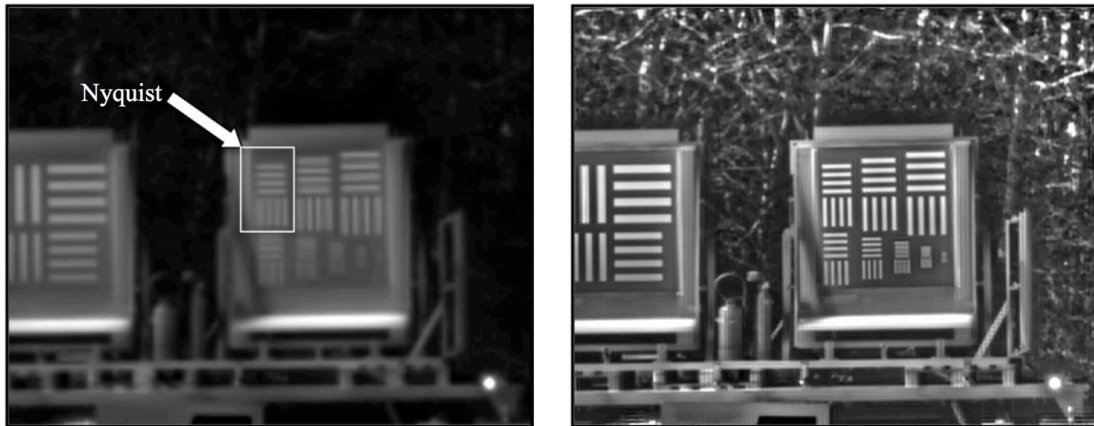


Figure 4. Exemple de traitement de super-résolution appliqué à un imageur matriciel IR (à gauche une image de la séquence sans traitement, à droite l'image résultant du traitement de la séquence). On constate que les mire de fréquence situées au delà de la fréquence de Nyquist sont presque toutes résolues.

La super résolution [9] exploite les mouvements sub-pixelliques existant des objets présents dans les images d'une séquence. Le principe consiste généralement en :

- le ré-échantillonnage avec une grille sub-pixellique des objets de la scène, de manière à augmenter la fréquence de Nyquist de l'imageur,
- La réduction du bruit temporel, en faisant l'hypothèse que l'objet de la scène ne s'est pas déformé d'une image à l'autre (ce qui n'est pas forcément le cas !), par processus d'accumulation locale dans le temps de l'image stabilisée,
- La réduction du bruit spatial résultant de la non uniformité des réponses des détecteurs sur la matrice, par processus d'accumulation, le bruit spatial se comportant comme un bruit temporel du point de vue local de l'objet stabilisé, lors d'un mouvement de celui-ci dans une séquence,
- La déconvolution de la PSF de pré-échantillonnage (optique-détecteur), avec régularisation du bruit dans les hautes fréquences.

Le ré-échantillonnage de l'image a comme intérêt d'enlever la barrière de Nyquist et d'éviter les artefacts liés au sous échantillonnage. Cependant la déconvolution provoque des phénomènes posant de nouveaux problèmes de linéarités, comme on peut le constater sur la figure 5. La FTM d'un tel imageur SR n'est donc pas intégrable directement dans un modèle de MRTD sous peine de surestimation des performances de portée de DRI.

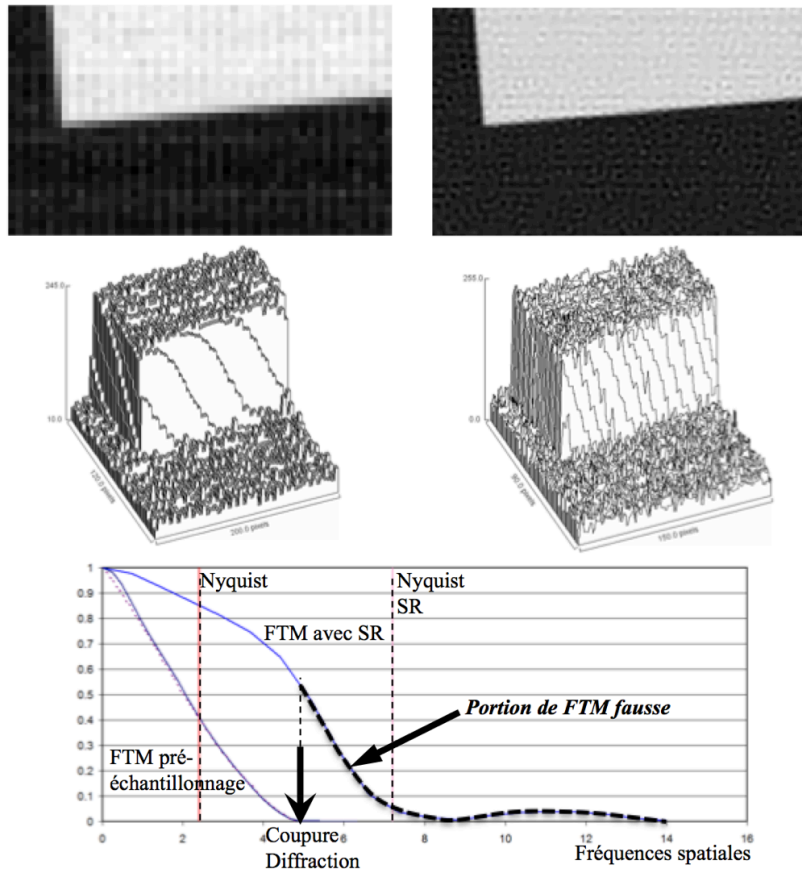


Figure 5. Sur la gauche une image de mire bord de plage inclinée pour la mesure de FTM de pré-échantillonnage (extrait d'une séquence avec un axe de vue en rotation par translation). A droite l'image résultante d'un traitement de super-résolution x3 sur la même séquence. Il est à noter qu'il s'agit de la simulation d'un imageur n'ayant en pré-échantillonnage que l'effet de la diffraction optique (sans FTM détecteur) à fin didactique, pour obtenir une coupure plus nette. On constate que la mesure de FTM avec SR a un niveau élevé même au delà de diffraction de l'optique d'entrée, ce qui est rigoureusement impossible pour un système linéaire. La mesure a été réalisée en réduisant les effets du bruit par régression sur les signaux échelons le long du bord de plage. Il faut de plus remarquer que le niveau de bruit est équivalent entre les deux images, malgré la déconvolution.

La FTM SR mesurée sur un bord de plage est ici sur accentuée par l'algorithme, du fait de la nature étendue du bord de plage, par une sorte de rehaussement des contours étendus. Cette FTM SR n'est probablement pas représentative de la FTM SR que l'on aurait pu mesurer d'une image ayant un fouillis plus important, car c'est la présence de contours marqués qui permet la régularisation de l'augmentation du bruit lors de la déconvolution. L'augmentation de résolution n'est donc pas uniforme et dépend du contenu image, pour contenir l'augmentation excessive du bruit.

Les réducteurs de bruits spatiaux modernes cherchent de la même manière à exploiter la similarité locale, voire non locale [10], ce qui donne d'excellents résultats lorsque l'image est formée d'une répétition de structures simples (lignes, courbes, échelons, motifs répétitifs) sur toute ou partie de l'image. La difficulté tient en l'évaluation de qualité d'image résultante de ces traitements et de l'adéquation à la problématique de performance de DRI.

2.5 Techniques d'évaluation des traitements de restauration/compression d'images

Beaucoup de méthodes de caractérisation de la qualité d'image en traitement d'image utilisent des métriques calculant l'écart entre une image restaurée et une image de référence non dégradée, et cela pour différents niveaux de dégradation. On peut citer pour les plus utilisés :

- Le PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) [11], métrique objective très utilisée en compression d'image, celui-ci n'intégrant pas de modèle visuel.
- le SSIM (Structure SIMilarity) [12], qui intègre certains processus visuels de perception des contours.

Ces métriques posent toutefois le problème d'intégration dans une chaîne de modélisation dans l'espace de Fourier. Il n'existe par ailleurs pas d'équivalent des critères de Johnson pour relier qualité d'image avec capacité de DRI.

Une autre technique [13] permet de caractériser le piqué d'image à partir d'une mire étendue basée sur le concept du modèle de feuilles mortes. L'objectif est de mesurer un équivalent de FTM, donc compatible de Fourier, sur une mire ayant une texture naturelle proche d'une image réelle. L'inconvénient de la méthode est qu'elle ne permet pas de différencier localement les différences de détail d'image entre image de référence et image dégradée, puisqu'il est réalisé une comparaison des modules des spectres de Fourier de chacune des images, ceci globalement. Le bruit et les distorsions peuvent donc être mal interprétés comme une augmentation de la FTM aux hautes fréquences, ce qui devrait être le contraire, en terme de performances de DRI.

Sur ce dernier concept général de mire étendue ayant une texture équilibrée entre la structure simpliste d'une mire classique et un bruit uniforme non structuré, une mire fractale binaire a été développée, faisant l'objet des chapitres suivants.

3. CARACTERISTIQUES DE LA MIRE FRACTALE BINAIRE

3.1 Principes de la construction

Lors d'une étude précédente, il fût développé des mires fractales [14] dont le principal défaut est qu'elles sont définies en niveaux de gris. Il est en effet difficile de fabriquer de telles mires, d'autant plus en IR. La spécification principale est donc une mire composée de deux niveaux noir/blanc en visible ou chaud/froid en thermique. Deux niveaux uniformes sont ainsi plus faciles à maîtriser d'un point de vue métrologique en laboratoire ou sur le terrain. Le principe général repose sur un transfert de résolution en fraction dyadique d'échelle à échelle, d'un élément unitaire en un motif orienté 2x2. La figure 6 indique le processus mis en œuvre pour chacun des éléments.

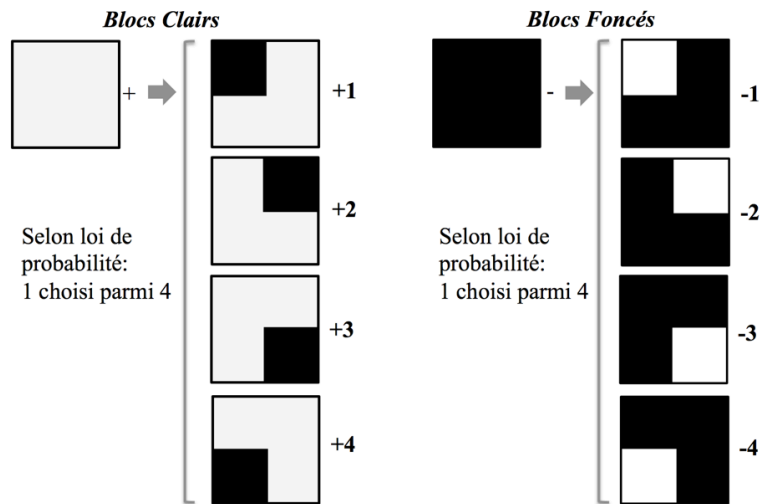


Figure 6. Transformation d'un élément binaire d'une échelle n à $n+1$. Deux classes : Clairs ou Foncés. Le choix de l'orientation du motif (appelés de +1 à +4 pour les clairs et -1 à -4 pour les foncés) est fixé aléatoirement.

Il faut remarquer qu'un élément clair reste clair par moyenne locale, de même qu'un élément foncé reste foncé, comme on peut le voir en figure 7. Ce type d'invariance par moyenne locale est à la fois un avantage mais aussi une difficulté comme on le verra par la suite.

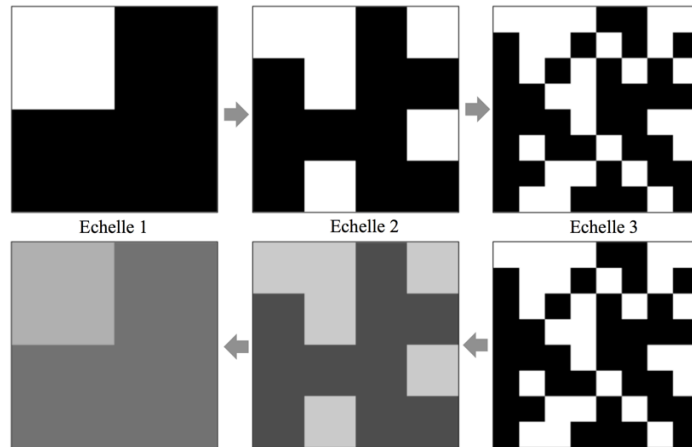


Figure 7. En haut, exemple de transformation de la mire d'une échelle 1 à 3. En bas, transformation inverse par moyenne locale 2x2. On retrouve la mire originale avec un contraste entre niveaux clairs et foncés divisé par 2 d'une échelle à l'autre.

Pour optimiser l'exploitation automatique des images en sortie de l'imageur, il a été conçu en périphérie de la zone de test à distribution fractale, un cadre à damier de moyenne 0.5 pour éviter les effets de bord en périphérie de la mire et cadre à binaire de grande dimension pour des besoin de calibrage à basse fréquence.

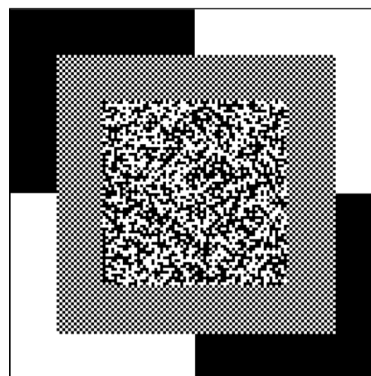


Figure 8. Mire utilisée lors de l'étude. Une échelle 6 de 64x64 éléments. Un premier cadre à damier de 16 éléments et un deuxième de 16 également.

3.2 Codage de la mire

Comme la figure 6 l'indique, chaque orientation de motif est représentée par une valeur, de l'ensemble $\{-4,-3,-2,-1, 1, 2, 3,4\}$. Pour connaître la vérité terrain de d'une mire, il suffit de connaître l'ensemble des matrices de 1 à M-1, pour une échelle maximum de M. La figure 9 donne un exemple pour M=3.

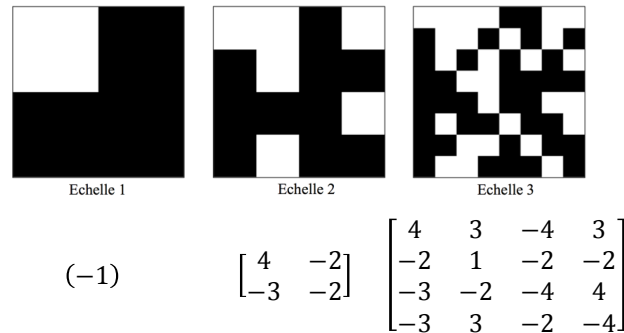


Figure 9. Expression numérique des images binaires en fonction de l'échelle (M=3 ici). Se référer à la figure 6 pour retrouver l'orientation correspondante au code inclus dans $\{-4,-3,-2,-1, 1, 2, 3,4\}$.

3.3 Types de mesures pouvant être réalisées

La figure 10 montre une sous partie du motif orienté original, qui a été considéré comme une ondelette de Haar. Le lien avec un cycle de Johnson, une mire à barres, est évident, ce qui permet d'envisager la relation avec l'espace de Fourier.

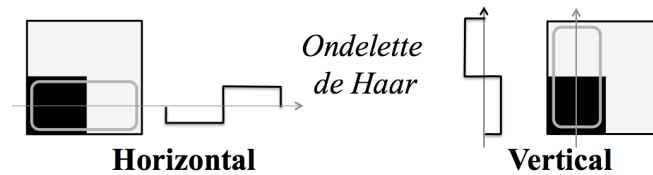


Figure 10. Mesure de contraste sur une portion d'un motif considéré comme une ondelette de Haar. On dénombre pour chaque échelle $k = 2^{2N-1}$ éléments de Haar au total, soit pour N=6, 2048 éléments, N=5 512 éléments, N=4 128 éléments, N=3 32 éléments, N=2 8 éléments, N=1 2 éléments.

Plusieurs types de mesures peuvent être réalisées à partir de la réponse à cette mire. On peut donner comme exemple :

- (1) Mesure de FTM équivalente à partir des réponses aux ondelettes de Haar, à fort contraste de la mire.
- (2) Mesure de la probabilité de résolution correcte des contrastes par échelle, à partir des réponses aux ondelettes de Haar, en fonction du contraste de la mire,
- (3) Mesure de la probabilité de discrimination correcte de l'orientation du motif complet par échelle,
- (4) Mesure du bruit multi-échelle à partir des réponses aux ondelettes de Haar, pour des contrastes de mire faibles.
- (5) Mesure de type SSIM ou PSNR, en comparant l'image

Seules les mesures (1) et (2) ont fait l'objet d'une étude détaillée qui sera présentée dans la suite de cet article. Pour mettre en œuvre ces mesures une étape commune de mise en correspondance spatiale est nécessaire, entre la mire dégradée et la mire originale.

3.4 Mise en correspondance spatiale des images et extraction de la mire dégradée

La figure 11 montre les opérations nécessaires à l'exploitation des images produites par l'imageur. Le recalage effectue des opérations de rotation, grossissement et translation de manière à maximiser la mise en correspondance. Une minimisation par descente de gradient de la mesure de l'écart quadratique moyen a été utilisée. Un modèle de distorsion géométrique pourrait être utile dans le cas de la couverture d'une portion de champ importante, pour des imageurs à focale courte. Un point important tient en la fonction d'interpolation utilisée pour la transformation géométrique du recalage, qui devra être de bonne qualité type Lanczos voire bicubic. Dans l'étude il a été utilisé un sur-échantillonnage par 8 et une interpolation Lanczos 3. L'extraction consiste quant à elle dans notre cas en un sous-échantillonnage 1/8 de l'image recalée, aux coordonnées du centre de chacun des carrés élémentaires de la mire.

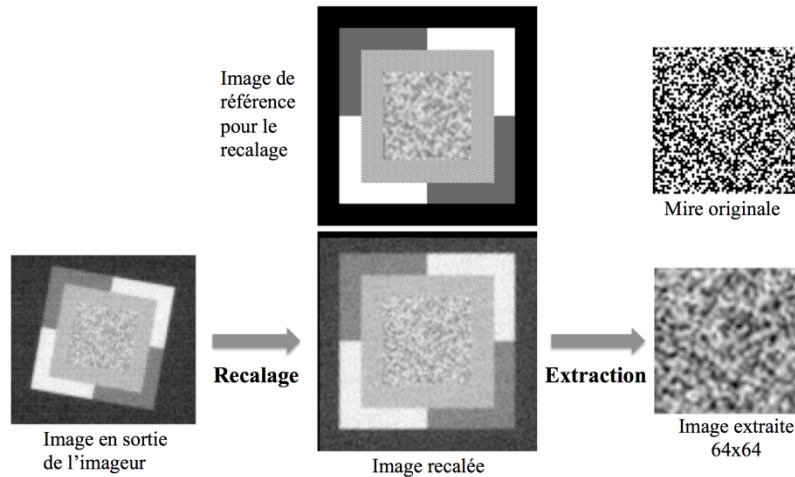


Figure 11. Etapes nécessaires à l'analyse de la mire dégradée. L'image est dans un premier temps recalée par rapport à une image de référence, ce qui permet l'extraction précise de l'image dégradée de la mire originale.

3.5 Mesure de FTM équivalente

L'objectif est d'obtenir la fonction de transfert de modulation des ondelettes de Haar contenues sur une mire, soit 2048 sur une mire 64^2 . La propriété d'invariance par moyenne locale doit permettre d'obtenir la réponse de modulation à des fréquences inférieures, divisées par 2 d'échelle en échelle. En combinant la réponse de plusieurs mires de dimensions variables, on accroît la résolution fréquentielle de l'analyse, comme il est montré en figure 12.

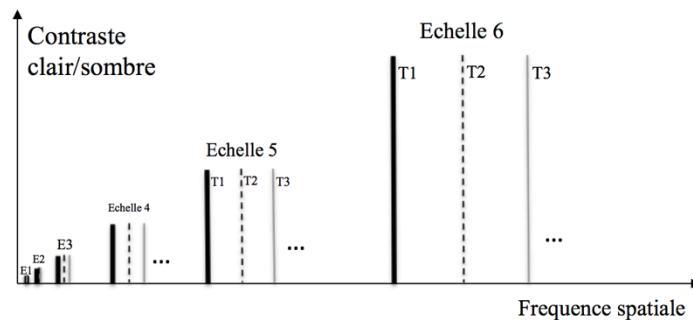


Figure 12. Distribution de fréquences pouvant être analysée avec un jeu de mires de tailles variables (ici trois mires T1, T2 et T3). L'exemple sur ce graphe représente une mire T2 18% plus petite que T1, et T3 36% plus petite que T1. Le contraste est divisé par 2 d'échelle en échelle du fait du moyennage local 2x2 lors du transfert d'échelle.

Le calcul de modulation revient à faire la moyenne des rapports de contrastes entre mire originale et mire dégradée, cela pour chacun des éléments de Haar. Pour une échelle N variant de 1 à M (dans notre étude M=6) :

$$FTM\left(\frac{1}{2 \cdot P_M \cdot 2^{M-N}}\right) = \frac{1}{2^{2N-2}} \sum_{i=1}^{2^{2N-2}} \frac{(B_{N,i} - D_{N,i})}{(Bgt_{N,i} - Dgt_{N,i})} \quad (1)$$

Avec $B_{N,i}$ et $D_{N,i}$ les valeurs des pixels clairs (B) et sombre (D) d'un même élément de Haar, à l'échelle N. $Bgt_{N,i}$ et $Dgt_{N,i}$ les valeurs des pixels clairs (B) et sombre (D) d'un même élément de Haar sur la mire VT (Vérité Terrain), dont les contrastes ont été réduits avec l'échelle, à l'échelle N.

P_M est le pas de la mire (écart entre deux pixels de la mire) à son échelle la plus élevée M. De plus, P_M est mesuré en unité physique (angle, taille) ou bien en rapport avec le pas du capteur à évaluer (pour $P_M=1$ et $N=M$, $\frac{1}{2 \cdot P_M \cdot 2^{M-N}}$ est à la fréquence de Nyquist de l'imageur égal à 0.5).

La Figure 13 montre le résultat d'une série de mesures expérimentales en simulation, pour un imageur thermique sans bruit, dont l'effet de la FTM optique avec aberration et de la FTM détecteur est appliqué.

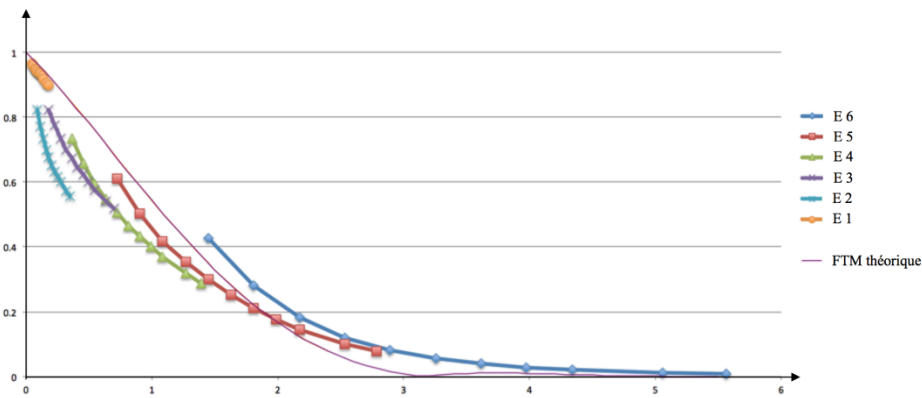


Figure 13. Exemple de résultats bruts de mesure de FTM, pour un imageur simulé. La FTM théorique est en trait fin. Ces courbes résultent de 11 mires de tailles variables qui permettent d'échantillonner plus finement les fréquences. Il a été tracé 6 courbes, chacune représentant une échelle regroupant les résultats de 11 mires.

Il apparaît un écart assez sensible pour chacune des échelles. Les phénomènes mis en jeu sont relativement difficiles à modéliser dans leur ensemble mais il sera tenté de résoudre analytiquement le problème dans de futures études. Pour corriger les valeurs brutes d'une manière satisfaisante (voir figure 14), nous avons appliqué les règles suivantes :

1) Les résultats de modulation à l'échelle maximum M (M=6 dans notre cas) sont corrigés d'un facteur $\frac{\pi}{4}$. En effet les éléments de Haar sont des signaux carrés dont les harmoniques de la série de Fourier ($3xf_0, 5x f_0, 7xf_0 \dots$) sont filtrées par la FTM de l'imageur. La fondamentale conservée à f_0 est $\frac{4}{\pi}$ supérieure à l'amplitude de la modulation carrée.

2) Pour chaque mesure, la valeur à l'échelle M corrigée du facteur $\frac{\pi}{4}$ est utilisée pour modéliser une FTM générique gaussienne passant par ce point ($FTM_{brute}(f_0)$). Cette FTM générique est utilisée en simulation afin de réaliser une nouvelle mesure sur une mire identique. Les mêmes types de défauts aux échelles $N < M$ sont retrouvés, mais sont utilisés pour corriger la mesure de FTM inconnue précédente, car la FTM gaussienne est elle connue. L'hypothèse sous-jacente à cette correction est que l'on considère que les défauts aux échelles $N < M$ sont fonctions de la forme passe-bas de la FTM rapporté à la position relative de la fréquence de l'échelle M.

$$\sigma_{\text{freq}} = \sqrt{\frac{f_0^2}{2 \cdot \text{Logn}(FTM_{brute}(f_0))}}$$

$$\sigma_{\text{spatial}} = \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{freq}}}$$

$$FTM_{Gauss}(N) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{f_0}{2^{M-N} \cdot \sigma_{freq}} \right)^2}$$

Ci-dessus l'équation de l'écart type de la gaussienne en fréquence et en spatial est donné. La simulation utilise un noyau gaussien pour effectuer le flou. Les particularités de la FTM inconnue sont restituées par la formule de correction ci-dessous :

$$FTM_{corr_inconnue}(N) = \frac{FTM_{brute_inconnue}(N)}{FTM_{brute_Gauss}(N)} \cdot FTM_{Gauss}(N)$$

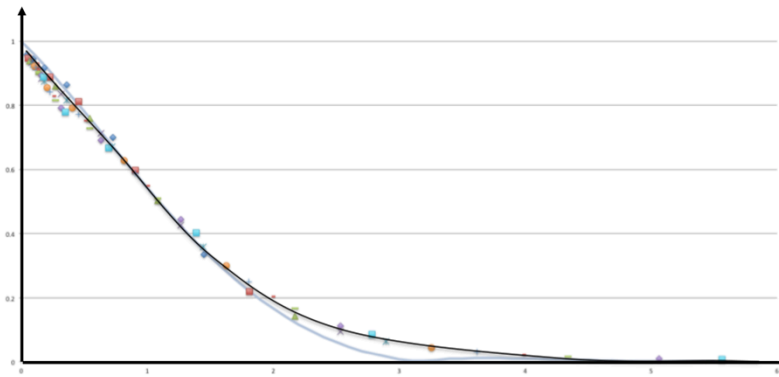


Figure 14. Le résultat de la correction offre un bien meilleur respect de la FTM théorique. Les différences aux hautes fréquences, près de la première coupure seront discutées au chapitre 4.

3.6 Mesure de la Probabilité de Résolution Correcte (PRC)

L'analyse statistique des contrastes $(B_{N,i} - D_{N,i})$ de la formule (1) permet de mesurer les histogrammes de contraste en fonction de l'échelle N.

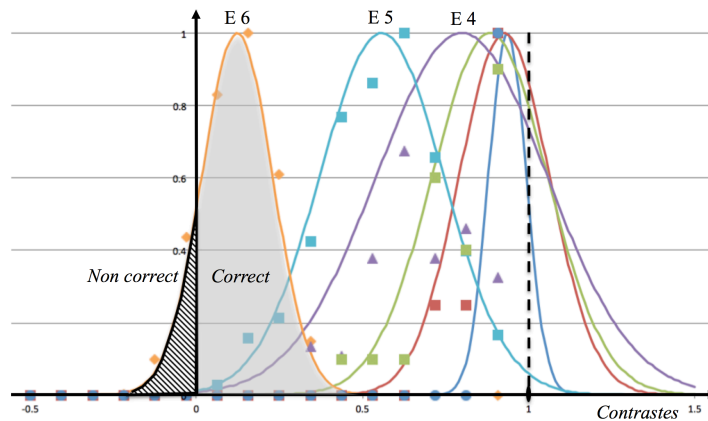


Figure 15. Histogrammes normalisés de contrastes des échelles 1 à 6 affichés par points marqués. Les courbes gaussiennes sont synthétisées à partir de l'écart type et de la moyenne calculés sur la liste des contrastes. On peut remarquer que la moyenne à une échelle est la valeur de la FTM de cette échelle.

La mesure qu'il a été choisi d'effectuer est la probabilité d'obtenir un contraste correct, à savoir >0 . Il est ainsi comptabilisé, pour chaque échelle, la proportion de contrastes vus dans le bon sens par rapport au nombre total d'éléments présentés. Il a été choisi de normaliser la probabilité de manière à ce que les 50% de la probabilité mesurée, qui correspondent à une indétermination du contraste réel, soient ramenés à 0%. La formule suivante est utilisée :

$$Prob_{(B-D)>0_corrigee} = \frac{Prob_{(B-D)>0} - 50}{50}$$

Sur l'exemple de la figure 15 on mesure $P(6)=73\%$, $P(5)=99\%$ et les autres échelles à 100%. Nous verrons sur les exemples d'applications qui vont être présentés une forme plus intéressante de ce résultat ou l'on mesurera la fréquence spatiale à laquelle on obtient une probabilité de valeur définie.

4. APPLICATION DE LA METHODE SUR DES IMAGEURS SIMULES OU REELS

4.1 Simulation d'un imageur thermique sous échantillonné

Dans ce premier exemple d'application, il est simulé un cas typique d'imageur thermique non refroidi bande III fortement sous-échantillonné. La figure 16, montre les résultats en termes de FTM et de PRC pour 11 mires de tailles variables, inclinées de 10° pour éviter les effets de phasage.

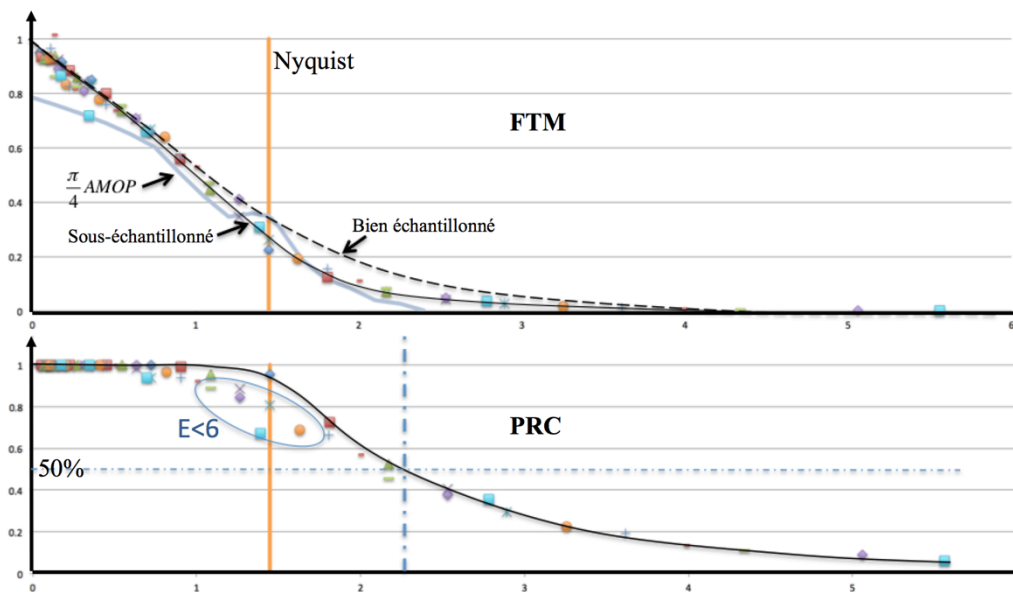


Figure 16. Le résultat de la mesure de FTM du système sous-échantillonné est représenté par la courbe noire en trait fin. En trait hachuré est représenté la mesure de l'imageur avec la même FTM de pré-échantillonnage mais sans sous échantillonnage donc sans effet de repliement de spectre. L'AMOP de l'imageur calculée par TRM4v1.1 est représentée corrigée du facteur $\frac{\pi}{4}$ (l'AMOP est une réponse de signal carré) en gris clair. La PRC montre des points plus faibles (entourés), il s'agit d'échelles inférieures à M, qui demanderaient à être corrigées dans le futur. Il a été préféré de les éliminer des statistiques en ne conservant que les données plus fiables de l'échelle M chaque mire pour toutes les mesures de PRC.

On constate que la courbe de FTM est proche de la courbe d'AMOP corrigée, aux fréquences moyennes à élevées. La PRC indique à la coupure d'AMOP une valeur proche de 50%. Cette valeur est à rapprocher du critère de résolution de l'AMOP qui, aux plus hautes fréquences, va jusqu'à résoudre 2 cycles de barres sur les 4 de la mire. Le PRC pourrait correspondre ainsi à la proportion de barres résolues sur les 4 barres. La figure 17 donne une illustration des images de mires exploitées pour cette expérience.

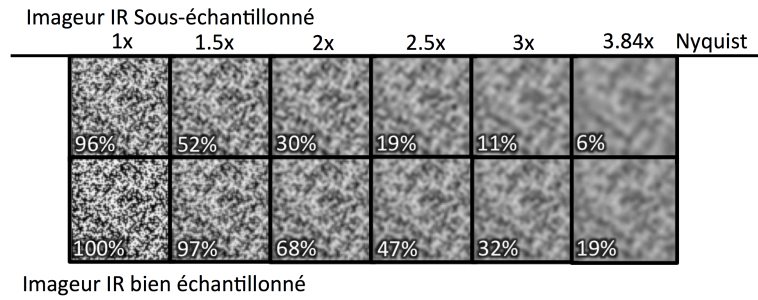


Figure 17. Echantillon d'images de mire extraite correspondantes aux mesures effectuées. Le PRC mesuré est affiché sur chaque image.

Sur la figure 18, une nouvelle façon de présenter les résultats est montrée. Elle vise à comparer les mesures de PRC avec la MRTD, voire ici la MTDP. Le principe est de mesurer la PRC pour différents contrastes de mires, de faible à élevé, pour mettre en valeur l'influence progressive du bruit. A chaque contraste de mire, on calcule, par interpolation de la courbe de PRC, la fréquence à laquelle le PRC franchit un seuil (ici choisis à 50%, 63% et 75%). Ces points de coordonnées (fréquence, contraste mire) peuvent alors être intégrés dans un graphe de MRTD.

On constate sur la figure 18, que la courbe de MTDP est encadrée par P50 et P75 sauf pour les valeurs élevées en fréquence, où la coupure PMRTD est plus brutale. Un seuil de probabilité moyen de P63 est aujourd'hui proposé, qui correspond à la MTDP (pour une configuration écran et œil négligés dans le modèle) aux fréquences moyennes.

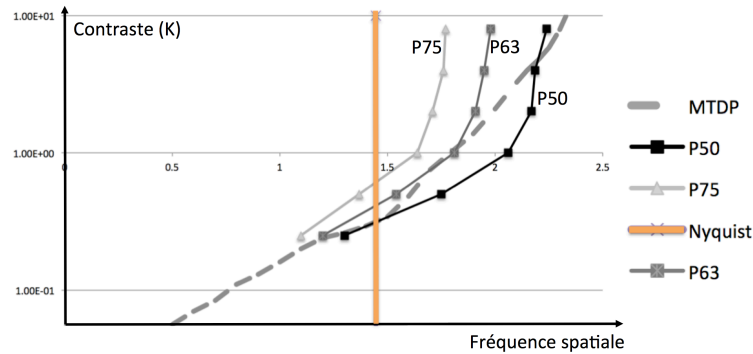


Figure 18. PMRTD (Probable Minimum Resolvable Temperature Difference) de l'imageur sous-échantillonné, avec bruit simulé. La MTDP calculée par TRM4v1.1 (image fixe, visualisation et œil négligés) est comparée. Trois valeurs de seuils de PRC ont été choisies : P50, P63 et P75. Echelle logarithmique en contraste.

4.2 Simulation d'un imageur à super-résolution

Dans cette partie est étudiée la caractérisation d'un imageur à super-résolution en mode photo, c'est à dire produisant une seule image à partir d'une séquence de l'ordre de la centaine d'images, donc sur une scène fixe. A fins exploratoires, il a été décomposé les fonctions de restauration en deux parties. La première consiste à simuler le sur-échantillonnage spatial associé à la réduction de bruit temporel et spatial, configuration appelée RB. L'imageur simulé est identique au chapitre précédent, mais avec une fréquence de Nyquist multipliée par 4 et bruit temporel et spatial divisé par 8. La FTM de pré-échantillonnage est identique. Ce cas est probablement optimiste, mais il permet de constater les effets de non-linéarités autour de la première coupure de la FTM détecteur (dû au sinc, ici autour de 3 en figure 13-19). La deuxième fonction de restauration qui s'ajoute à la première est une déconvolution du type Lucy-Richardson avec comme paramètre principal la PSF de pré-échantillonnage de l'imageur, configuration appelée SR. La figure 19 résume les résultats de mesure.

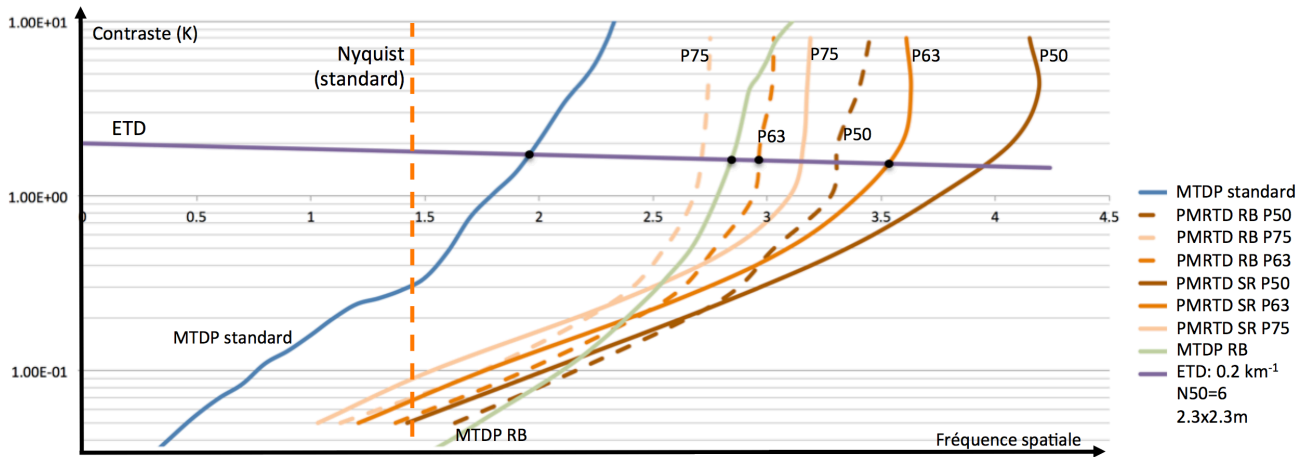
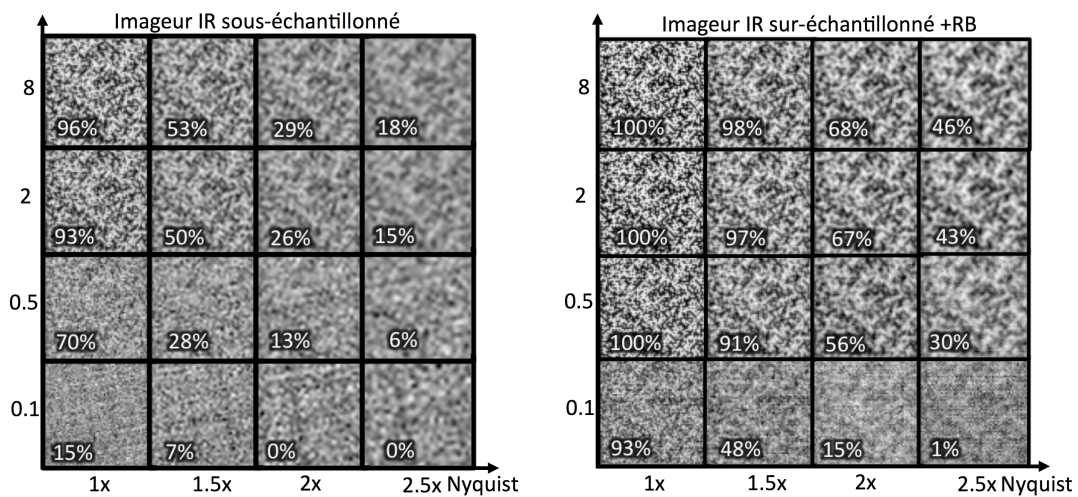


Figure 19. Synthèse des résultats d'évaluation en simulation de l'imageur IR du §4.1. L'ETD due à l'atmosphère (fig. 2), ramenée en fréquences spatiales est calculée selon les critères standard d'identification sur char en atmosphère favorable. Echelle logarithmique en contraste.

On constate globalement par rapport à la portée nominale standard TRM4, un gain en portée de +50% en P63 pour la RB et de +80% en P63 pour la SR. La modélisation linéaire TRM4 du cas RB donne un gain de +45% proche du P63 (50%).

On peut remarquer l'effet négatif du traitement de déconvolution utilisé aux faibles contrastes de mires (-12% de résolution), qui traduit une perte d'efficacité lorsque le bruit est important. On peut facilement le constater visuellement sur les images en figures 20.



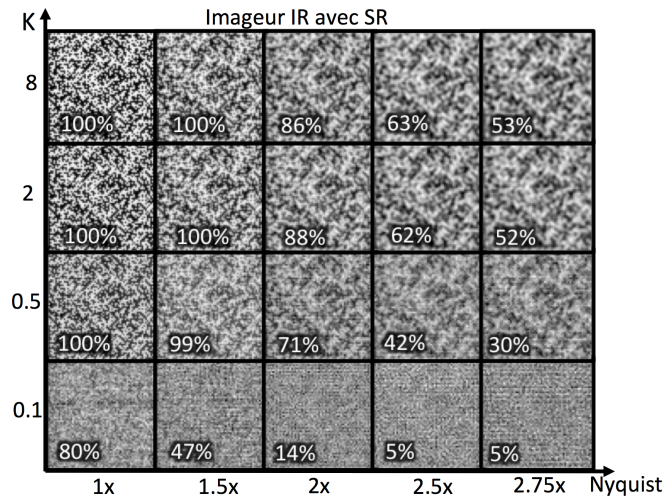


Figure 20. Echantillon d'images de mire extraite correspondantes aux mesures effectuées. Le PRC mesuré est affiché sur chaque image. La mire a été inclinée de 10° seulement pour le cas de l'imageur sous échantillonné standard.

4.3 Mesure sur un appareil photographique numérique associé à des traitements de réduction de bruit

Il a été évalué dans cette partie un appareil photo numérique grand-public, associé à un traitement de dé-matrigage de Bayer évolué et de deux traitements de réduction de bruits. Toutes les évaluations ont été réalisées en convertissant les images avant mesure en luminance, pour éliminer la composante chrominance. La mesure a consisté à photographier un écran d'ordinateur affichant la mire fractale binaire (M=6) au contraste maximum, pour différents réglages de sensibilité ISO de l'appareil. Ceci revient à faire varier artificiellement le niveau de contraste de la mire, l'appareil modifiant avec l'ISO le temps d'intégration du capteur (pour un ISO élevé on a un temps de pose court, un bruit fort équivalent à un contraste faible en ISO moyen). L'approche de caractérisation précédente est ainsi conservée en remplaçant la température par l'ISO, mais en inversant son échelle de variation pour être comparable. La figure 21 résume les résultats de mesure. On constate que le JPG offre une résolution inférieure au RAW dé-matricé de l'ordre de 20%, dû aux effets de la compression.

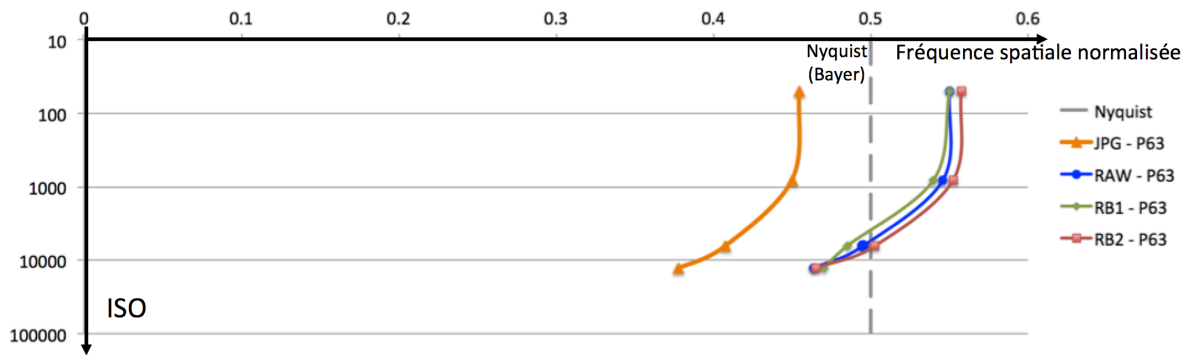


Figure 21. Synthèse des résultats de PMRC (Probable Minimum Resolvable Contrast) mesurés en unités ISO. L'appareil photo utilisé est un Sony A77 firmware v1.07, objectif 16-50 F/2.8 réglé à 16mm et F/5, l'écran est celui d'un Apple Macbook Pro retina 15" fin 2013 réglé à 50% de luminance, les traitements de dé-matrigage RAW, RB1 et RB2 sont les traitements de DXO Optics Pro v9.5.1 build 121, RB1: réducteur de bruit qualité haute et RB2: qualité PRIME. Le JPG est celui intégré dans l'appareil, en qualité maximale. La correction d'objectif est activée sur le boîtier (JPG) et sur DXO. Les réglages ISO furent 50, 800, 6400 et 12800. Les fréquences de mires utilisées : 0.66, 1, 1.5, 2xNyquist de la matrice de Bayer. La fréquence spatiale affichée est normalisée à une fréquence de Nyquist de 0.5. Le A77 présente un filtre anti-repliement sur le capteur, ce qui limite le dépassement de Nyquist.

Cela est accentué par le fait que le dé-matrigage RAW dans cette version intègre aussi une amélioration de résolution. Un point intéressant concerne le comportement des RB1 et RB2 qui sont proches voire dépassent le RAW (RB2) ; ceci est

surprenant du fait du nettoyage du bruit important réalisé par ces traitement (voir figure 22 en bas). Il s'agit de traitements adaptatifs qui font plutôt bien la différence entre information structurée et bruit uniforme.

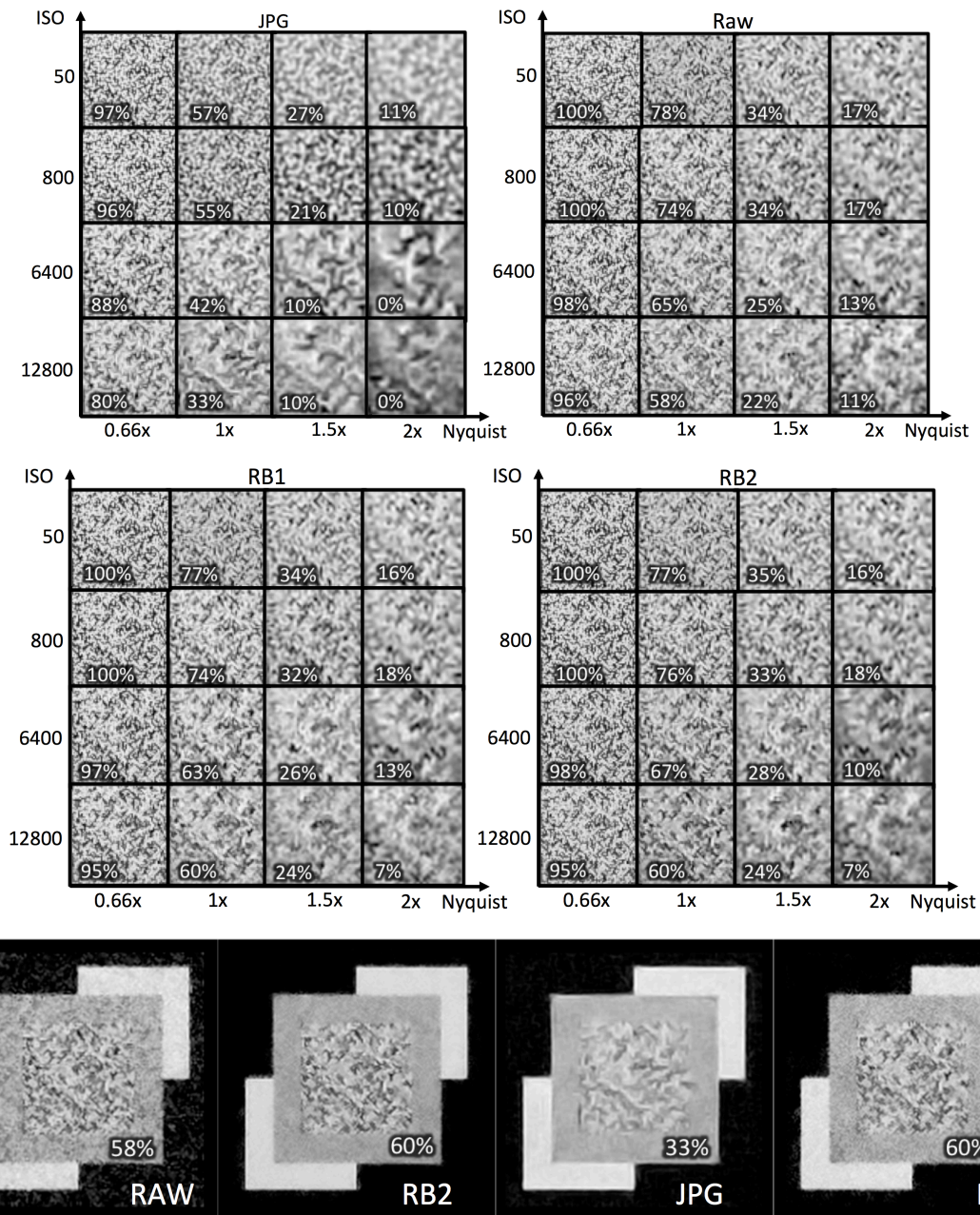


Figure 22. Echantillon d'images de mire extraite correspondant aux mesures effectuées. Les images du bas sont prises à la fréquence de Nyquist de l'appareil photo.

5. DISCUSSION SUR L'UTILISATION DE CETTE METHODE ET CONCLUSIONS

5.1 Avantages et limitations de cette technique de caractérisation

Au terme de cette première série d'expérimentations on peut lister les principaux avantages suivants de cette méthode. Tout d'abord, la mire a la qualité de pouvoir intégrer des phénomènes non linéaires comme le maintenant classique repliement de spectre et comme les traitement de déconvolution et de débruitage les plus récents. La mesure de PRC semble fiable pour décrire la proportion d'ondelette de Haar conservé par l'imageur, lorsque l'on fixe une contrainte de position précise des éléments sur la mire. Le principe est assez voisin de l'approche AMOP de TRM4, même si celui-ci ne caractérise qu'indirectement le phénomène de destruction des cycles de Johnson, dans le cas particulier d'une suite alignée de 4 cycles. De plus, le rapprochement de définition entre ondelette de Haar et cycle de Johnson permet a priori d'être compatible avec les critères de Johnson actuels utilisés pour le calcul de portée. Les mesures de PMRTD et PMRC ont ainsi le potentiel de calculer une portée de DRI d'un imageur en fixant un seuil de qualité objective acceptable. Cette technique est de plus compatible d'un outil de simulation et de mesure laboratoire.

Au sujet maintenant des limitations, la principale est qu'elle ne prend pas directement en compte la perception visuelle, sauf indirectement par l'usage d'ondelettes de Haar ou plus généralement des sinusoides de Fourier dont on connaît la pertinence dans la caractérisation de la vision. En conséquence, la mire n'a pas à vocation à caractériser les algorithmes d'adaptation de contraste; elle reste cantonnée à l'étude des petits signaux. Pour intégrer la perception visuelle, il serait nécessaire d'y adjoindre une fonction de Sensibilité au Contraste Visuel (CSF) dans laquelle il faudrait inclure les caractéristiques de l'affichage (luminance, contraste, résolution, ...). Un autre inconvénient tient en la surface plus importante de la mire fractale binaire qu'une mire à 4 barres. A l'échelle 6, il faut 8 fois plus de pixels dans une dimension pour décrire la mire fractale. La mire étant plus grande à fréquence de travail équivalente, les applications de la mire sur le terrain seront limitées.

5.2 Méthodologie d'utilisation de cette mire en combinaison des autres outils de référence

Les outils ou méthodes actuelles de référence couramment utilisés sont TRM4, NV-IPM et TOD. L'évaluation des traitements non-linéaires reste une difficulté pour les modèles analytiques TRM4 et NV-IPM dans leur version actuelle car il est nécessaire de travailler en mode image réaliste pour stimuler convenablement les traitements d'images, qui sont difficiles à modéliser analytiquement. Des passerelles entre la méthode fractale et TRM4 ou NV-IPM sont à l'étude, comme la mesure d'AMOP ou de FTM. La difficulté réside dans la mesure de bruit qu'il faut y adjoindre, l'AMOP et la FTM étant mesurées sans bruit. Ce point devrait être étudié dans l'avenir.

Une solution réside dans l'utilisation d'un modèle de CSF (limitation de l'œil uniquement, hors bruit), les non linéarités et les effets du bruit étant intégrés dans la FTM fractale, obtenue par mesure ou par simulation. NV-IPM a déjà cette propriété, appelée CTF (Contrast Threshold Function), ce qui lui permet d'être compatible d'une telle FTM fractale.

La TOD a de bons arguments en principe pour être robuste aux traitements non-linéaires et le futur modèle travaillera en mode image. Toutefois, la nature très locale du triangle de la TOD peut avoir l'inconvénient de ne pas stimuler l'imageur comme le ferait une scène réelle riche en textures.

Une utilisation optimale envisageable de la méthode de mire fractale serait aujourd'hui:

- Caractérisation d'un imageur en portée de DRI objective à seuil de probabilité fixé (P63?), permettant de fixer à l'imageur une résolution quantifiée à la portée demandée, pour un contraste de mire donnée. L'utilisation de cette technique est aussi possible pour la spécification des traitements d'identification automatique de cible.
- Utilisation d'une méthode visuelle à base de TOD ou de mire à barres pour caractériser la qualité du reste de la chaîne, dédié à l'adaptation de contrastes et à l'affichage de l'image à l'observateur humain.

5.3 Conclusions

Les expérimentations menées lors de cette étude sur la technique de caractérisation d'imageurs à l'aide de mires fractales binaires ont donné des résultats pour le moment très prometteurs. Le principal objectif de remplacer les mires à 4 barres avec une mire texturée d'apparence plus naturelle pour la prédiction de portée de DRI semble atteint, mais demande

encore quelques validations. Le principe d'une mire binaire utilisée en combinaison avec un critère de performance à seuil (PCR), donne plus d'indépendance par rapport à la linéarité relative de l'imageur.

Les outils mis en place permettent de calculer des portées de DRI à partir de critères de Johnson avec un critère objectif qu'il faut encore ajuster. La fabrication d'une mire thermique expérimentale de 64^2 éléments est en cours à la DGA. Elle permettra d'évaluer des prototypes de caméras IR SAGEM intégrant des traitements de super-résolution.

Une analyse plus poussée des phénomènes mis en jeu dans la transition inter-échelles reste nécessaire dans l'avenir pour mieux exploiter les informations multi-échelles contenue dans la réponse à une mire. Une analyse complémentaire doit aussi être menée pour étudier la perte de précision introduite par réduction de la taille en pixels de la mire fractale, lors d'application terrain longue portée de la mire, qui nécessitent des tailles de mires importantes.

Enfin d'autres applications sont à l'étude, comme l'évaluation des imageurs visibles couleur. Une mire binaire définie dans le domaine colorimétrique pourrait permettre de caractériser les complexes traitements intégrés dans les imageurs couleurs modernes.

REFERENCES

- [1] Wittenstein, W., "Minimum temperature difference perceived - a new approach to assess undersampled thermal imagers" *Opt. Eng.* 38, pp. 773-781, (1999).
- [2] Bijl, P., Valeton, J.M., "TOD: a new method to characterize electro-optical system performance" *Proc. SPIE* 3377, (1998)
- [3] Fraunhofer Institute of Optronics, System Technologies and Image Exploitation. TRM4 v1.1 "Tools for the development and performance evaluation of modern optronic imagers". <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/44119/>
- [4] Fanning, J., Teaney, B., "Imaging system sensitivity analysis with NV-IPM" *Proc. SPIE* 9071, (2014).
- [5] Kopeika, N.S., [A system engineering approach to imaging]. SPIE Press. p.337, ISBN 978-0-8194-2377-1. (1998).
- [6] Bijl, P., Valeton J. M., de Jong, A.: "TOD predicts target acquisition performance for staring and scanning thermal imagers" *Proc. SPIE* 4030, (2000).
- [7] Maurer, T., Driggers, R.G., Vollmerhausen, R.H., Friedman, M. H., "2002 NVTherm improvements" *Proc. SPIE* 4719, (2002).
- [8] Weiß, R., Adomeit, U., Chevalier, P., Landeau, S., Bijl, P., Champagnat, F., Dijk, J., Göhler, B., Landini, S, Reynolds, J.P., Smith, L.N., "A standard data set for performance analysis of advanced IR image processing techniques" *Proc. SPIE* 8355, 835512 (2012).
- [9] Milanfar, P., [Super-Resolution Imaging], ISBN 978-1439819302.
- [10] Lebrun, M., Buades, A., Morel, J.M., "Implementation of the Non-Local Bayes (NL-Bayes) Image Denoising Algorithm", *IPOl Image Processing On Line Journal*, <http://www.ipol.im/pub/art/2013/16/>.
- [11] Huynh-Thu, Q., Ghanbari, M., "Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment" *Electronics Letters* 44 (13): 800, (2008).
- [12] Wang, Z., Bovik, A.C., "A Universal Image Quality Index" *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3) (2002).
- [13] Cao, F., Guichard, F., Hornung, H., "Dead leaves model for measuring texture quality on a digital camera" *Proc. SPIE* 7537, Digital Photography VI, 75370E (2010).
- [14] Landeau, S., "Characterization of thermal staring imagers with multielement fractal test targets" *Proc. SPIE* 3377, 194 (1998).