

# La corrélation optique, un outil de décision

## 1.0 Introduction

**C** A l'origine de ce domaine, on trouve un certain nombre de travaux en traitement du signal (*signal unidimensionnel*) centrés essentiellement sur la détection et dont les applications (radar, sonar, ...) remontent aux années quarante. En particulier, la reconnaissance des formes connaît depuis quelques décennies un regain d'intérêt, tant dans ses aspects fondamentaux qu'appliqués. Cela est dû au moins à trois causes. Premièrement, le champ d'application de la reconnaissance est en croissance constante étant donné les nouveaux besoins qui se manifestent continuellement. On peut citer des domaines tels que la robotique, la sécurité bancaire, la sécurité routière, la vision artificielle, la détection de défauts, le suivi du regard (*eye tracking*), la météorologie, l'astronomie, ... À titre d'exemple, en reconnaissant les positions de la pupille de l'œil, on peut traiter l'information telle qu'une personne à mobilité réduite puisse contrôler son ordinateur et par exemple naviguer sur Internet. Deuxièmement, les progrès en mathématiques appliquées et en informatique et surtout en ce qui concerne l'algorithmique ont ouvert les perspectives de la reconnaissance des formes. Troisièmement bien entendu, les progrès technologiques au niveau des capteurs (caméra CCD, ...) et surtout au niveau des calculateurs numériques de plus en plus puissants ont contribué au progrès de la reconnaissance des formes.

On distingue deux familles d'approches pour la reconnaissance des formes : (1) Les approches par segmentation et (2) les approches globales. Pour la première famille, un certain nombre de caractéristiques propres à l'objet sont extraites et la classification se fait à partir de ces données. À cette famille appartiennent surtout les méthodes numériques. Les approches de la deuxième famille utilisent plutôt la comparaison à un ensemble de références. L'objet brut vu par le capteur d'entrée du système de reconnaissance est comparé à une bibliothèque d'images de référence. Aucune information n'est extraite de l'image et c'est sur la globalité de forme que se fonde la décision. La corrélation est une technique très efficace de la famille des approches globales. Elle a l'avantage d'offrir une grande robustesse au bruit.

## 2.0 L'optique, pourquoi?

L'outil puissant qu'est la corrélation est particulièrement approprié à l'optique essentiellement du fait que la transformée de Fourier, le noyau de la corrélation, est naturelle en optique. De plus, la nature bidimensionnelle de l'image se prête bien au traitement optique. En effet, le traitement parallèle de l'information contenue dans une image par des faisceaux lasers est un des atouts de l'optique cohérente. Outre les progrès inhérents aux qualités des lasers (faisceaux quasi-parallèles, haute puissance, cohérence et monochromatisme), le traitement de l'information par voie optique a fait des progrès énormes surtout grâce à l'introduction des interfaces opto-électroniques à base de cristal liquide (*Spatial Light Modulator : SLM*) et des matrices CCD.

## 3.0 La corrélation en signal un outil de décision

La corrélation, une technique de reconnaissance de formes, est bien appropriée aux signaux bidimensionnels et notamment aux images [1]. Comme précisé ci-haut, en plus de l'avantage de la robustesse par rapport au bruit, elle offre la possibilité de traiter l'image dans sa globalité [2]. Son principe est très simple (Figure 1-a) et consiste à comparer l'objet à reconnaître (*La cible*), en général figurant dans une scène limitée en espace, et des objets prédéterminés (*Les références : r<sub>i</sub>*).

Pour réaliser cette comparaison, le spectre de la cible (*S*), obtenu après un passage du domaine spatial à celui des fréquences par une Transformée de Fourier, est multiplié par le complexe conjugué du spectre de la référence, que nous notons  $h = R^*$ . Ainsi, une deuxième Transformée de Fourier fournit le produit de corrélation (*le plan de Corrélation : cible/référence*).

Chacune de ces comparaisons conduit à une décision binaire, et la comparaison à toute une banque de références permet de réaliser une classification de la cible parmi ces références. Il s'agit donc d'une simple opération de filtrage, désignée en littérature par filtrage adapté. Cela

par Ayman AlFalou,

Institut Supérieur d'Electronique de Bretagne,  
Brest Cedex, France

### Abstract

Indisputably, pattern recognition is an expanding field due to the incessant need for recognizing forms (fingerprints, eyes, machine elements, ...). Correlation presents a very powerful tool of decision mainly due to its global behavior and to its robustness to noise. The present article gives an overview on the method of correlation which turns out to be appropriate to the optical approach. While covering the various techniques of optical correlations, the article will distinguish between mono- and multi-decision approaches.

### Sommaire

La reconnaissance des formes est incontestablement un domaine en expansion du fait que le besoin de reconnaître des formes (empreintes digitales, yeux, pièces mécaniques...) est incessant. La corrélation présente un outil de décision très puissant principalement du fait de son caractère global et de sa robustesse au bruit. Cet article donne un aperçu sur la méthode de corrélation qui s'avère appropriée à l'approche optique. En passant à travers les différentes techniques de corrélations optiques, l'article distinguera entre les approches monodécision (prise par simple détection d'une corrélation) et multidécision (la réalisation en parallèle de plusieurs corrélations).

étant dit, les performances de la corrélation sont limitées pour les raisons suivantes :

- En raison du caractère global du traitement, la corrélation est très sensible aux effets (rotation, variation d'échelle, bruits intenses, ...) des cibles par rapport aux références. Cette insuffisance a fait l'objet de travaux intensifs qui ont débouché sur plusieurs sortes de filtres pour assurer l'invariance par rotation ou par facteur d'échelle, etc.[3].
- Le processus de décision utilisé dans un corrélateur, la présence ou non d'un pic de corrélation localisé en un seul pixel, conduisent à l'utilisation d'une très faible partie du produit espace-bande passante dans le plan de sortie. Il en résulte une faible fiabilité (robustesse, pouvoir de discrimination). Cette structure de décision fondée sur une seule corrélation Figure 1 : est appelée **monocorrélation**.

## 4.0 Les corrélateurs optiques monovoies

Comme nous venons de le voir, l'objectif du processus de reconnaissance est d'identifier un objet (cible) en le comparant avec d'autres objets (références). Cela suppose que l'on dispose d'une base d'apprentissage (base des références) constituée des modèles représentatifs de cet objet (cible). Pour mieux illustrer ce processus nous avons choisi l'exemple de la reconnaissance de caractères d'imprimerie en utilisant la méthode de reconnaissance dite : « Vander-Lugt ». Toutes les méthodes développées ont été testées dans un premiers temps sur ce type d'application (caractères). Or ces images ont à peu près les mêmes énergies et leur comportement vis-à-vis de la corrélation est bien connu. Nous avons ensuite étendu le méthode à d'autres types d'applications et à d'autres types d'images, en particulier celles des visages afin d'évaluer les performances de notre processus de reconnaissance.

Le montage classique d'un corrélateur Vander Lugt [4] est donné par la Figure 1-b. La scène (*S*) (le mot « IEEE » écrit en Times New Roman), placée dans le plan d'entrée, est éclairée par une onde plane monochro-

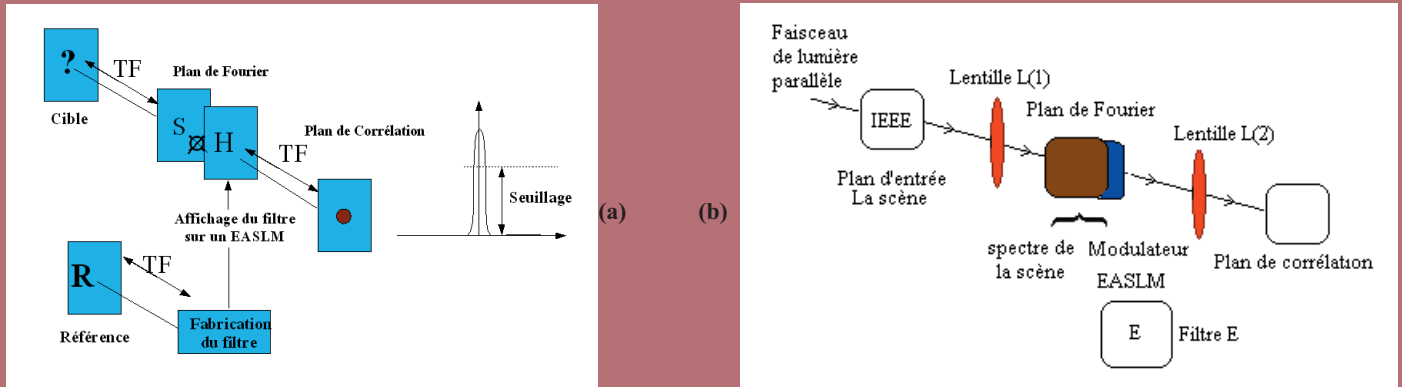


Figure 1: a) Schéma synoptique de l'algorithme de monocorrélation en signal, b) Schéma principe du corrélateur Vander Lugt (ou BPOF).

matique. Une lentille convergente implémente optiquement la transformée de Fourier (TF) de cette scène « S » et fournit le spectre dans son plan focal image (plan de Fourier ou plan du spectre). Dans ce plan, on place un filtre « H » appartenant à la base d'apprentissage choisie et calculée en fonction du traitement désiré. Donc la première étape de fabrication de ce filtre de corrélation consiste en construction d'une base d'apprentissage adéquate à notre application. Dans notre cas de reconnaissance des caractères d'imprimerie nous avons choisi une base constituée de deux classes de lettres, à savoir la classe (I) et la classe (E). Chacune de ces deux classes contient plusieurs représentations de police de chacune de ces deux lettres, afin de pouvoir reconnaître la lettre quelle que soit sa police.

Enfin une deuxième lentille effectue une seconde TF dans le plan de sortie (plan de corrélation). En effet, ce type de corrélateur consiste à agir sur le spectre de l'objet, donc sur le plan de Fourier, de façon à modifier la répartition spectrale de l'amplitude lumineuse. Le résultat est observé dans le plan de sortie ou plan de corrélation (Figure 2). Ce plan montre bien la présence de trois pics avec l'introduction du filtre « E » dans le montage via un modulateur EASLM. Ce qui est dû à la corrélation entre les trois lettres « E » existantes dans la scène d'entrée (le mot :IEEE) et le filtre « E » placé dans le plan de Fourier. Toutefois, nous observons un faux pic non négligeable. Il s'agit du pic correspondant à la lettre "I". L'apparition d'un tel pic peut être expliqué par le fait que les lettres "I" et "E" ont des segments et des parties de segments en commun et notamment le segment vertical qui est dominant de point de vue énergétique.

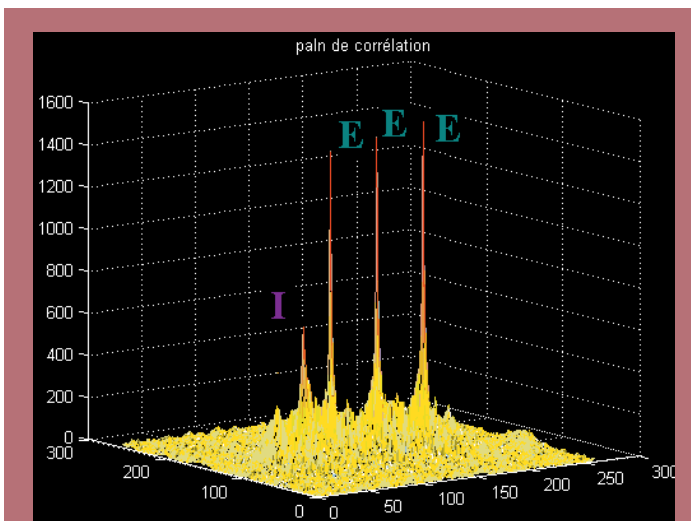


Figure 2: Plan de corrélation (réponse d'une corrélation du mot IEEE avec le filtre " E ")

Cependant, plusieurs travaux [5,6] ont montré que la phase de la transformée de Fourier contient la majeure partie de l'information. De plus, cette méthode conduit à un rendement optique optimal car un tel élément n'est pas absorbant. Ces raisons nous ont amenés à adopter le filtre de phase dans nos travaux. Un tel corrélateur utilisant ce type de filtre de phase pure est appelé corrélateur « POF » (Phase Only Filter). Le filtre POF peut être ensuite binarisé suivant différents codages [6] pour obtenir le filtre binaire de phase pure BPOF (selon que sa partie réelle est positive ou négative). Ce filtre binaire de phase s'est imposé en corrélation optique pour plusieurs raisons, dont:

- Tout comme les POFs, il présente un bon rendement optique [5]. Ce qui le rend attractif lors de la réalisation pratique de systèmes optiques de corrélation (permet de réduire la puissance des sources utilisées) surtout pour le compositage (c.à.d combinaison de transmittances),
- L'existence des modulateurs spatiaux binaires fonctionnant en phase,
- Les données sont binaires d'où la réduction du volume de la base des données.

### 5.0 Processus de décision et multicorrélation

Pour améliorer la fiabilité de la décision lors d'une reconnaissance d'une forme complexe (décision prise sur un seul point dans le plan de sortie : **monocorrélation**), nous proposons de faire de la **multicorrélation** [7]. En effet, cette alternative consiste à prendre en considération une part plus importante du plan de corrélation au prix d'un alourdissement algorithmique [7] pour couvrir toutes les situations possibles et limiter les ambiguïtés (bon pouvoir discriminant). Ainsi, on décide au vu de plusieurs corrélations, réalisées à l'aide de plusieurs références. En d'autres termes, il est utile de s'intéresser à des structures de décision fondées sur l'utilisation de plusieurs corrélations pour palier les insuffisances précédemment citées. D'un point de vue pratique, la prise en compte de plusieurs références peut s'envisager simplement, et dans un premier cas, en multiplexant temporellement ces références (Figure 3-a). Cette solution consiste à considérer successivement, plusieurs corrélations (au nombre des références) utilisées en un seul point pour prendre la décision. Ceci est évidemment au prix d'un temps de calcul important.

Une autre solution consiste à multiplexer spatialement ces références [3] en combinant leurs filtres respectifs tel que le montre la Figure 3-b. La solution, qui a été choisie dans nos travaux, consiste à réaliser simultanément et indépendamment un certain nombre de corrélations puis à prendre une décision au vu de cet ensemble de résultats : *c'est l'approche de la multicorrélation* [3].

### 6.0 La multicorrélation au moyen d'une approche monovoie

Dans cette approche, nous proposons de revenir à l'architecture la plus simple, la monovoie (Figure 4-a), et de transférer toute l'intelligence de la reconnaissance dans la détermination de la base de filtres utilisés. Le filtre que nous cherchons à construire est donc un filtre permettant de

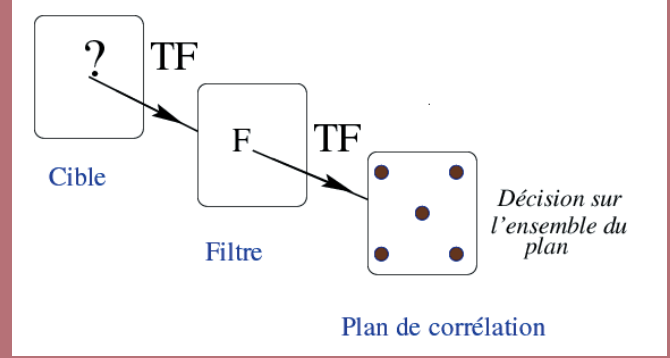
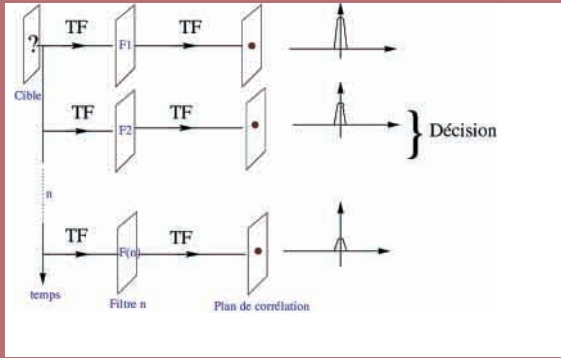


Figure 3: a) Multiplexage temporel, b) Multiplexage spatial

reconnaître un ou plusieurs objets dans une scène. Afin de construire un tel filtre nous avons adopté dans l'un de nos travaux une démarche qui est celle des filtres composites [3] pour la multicorrélation. Dans l'approche filtre composite chaque point du plan de Fourier participe à la corrélation d'une classe donnée à concurrence de l'intensité de son spectre en ce point. Ceci est évidemment gênant si plusieurs classes différentes sollicitent un même point. La démarche proposée dans cet article consiste à attribuer à chacun des points du plan de Fourier (Figure 4-b), une classe gagnante (segmentation spectrale) ce qui permet éventuellement de neutraliser les zones de forte ambiguïté. Cette segmentation doit viser à neutraliser les zones de forte ambiguïté, la diaphonie (chevauchement de références qui induit à des fausses décisions), introduite par la superposition des spectres des différentes classes, sans toutefois trop affaiblir la représentation d'une classe (conserver pour une classe un pic suffisant). Il y a un compromis à obtenir entre les deux cas suivants : premièrement tout affecter à une classe pour obtenir le meilleur pic, deuxièmement supprimer toute zone d'ambiguïté de façon à supprimer toute diaphonie.

Pour une segmentation optimale, il convient de choisir un bon critère de segmentation conduisant à des corrélations optimales. Après avoir testé plusieurs critères, le critère qui nous a semblé le mieux adapté à notre étude est un critère d'énergie. Physiquement, ce critère compare, pour chaque pixel, l'énergie d'une classe donnée à l'énergie totale de cette classe sur tout le plan de Fourier avec celle des autres classes. La décision d'affecter ce pixel à une classe ou à une autre, est prise sur l'ensemble de ces comparaisons, en affectant ce pixel à la classe gagnante.

### 7.0 Erreur de reconnaissance du filtre composite segmenté de phase vis-à-vis de l'invariance par rotation

D'un point de vue pratique, le filtre de phase demeure un filtre à fort pouvoir de discrimination mais à une faible robustesse [3,5,6]. Pour

constater cette faible robustesse, nous allons prendre un visage au quel nous allons appliquer une rotation comprise entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , par pas de  $10^\circ$ . Cette base de rotation est alors comparée par corrélation au filtre composite fabriqué à partir deux positions pour le visage initial : aucune rotation ( $0^\circ$ ) et une rotation de ( $90^\circ$ ). La Figure 5-a confirme la faible robustesse de notre filtre de phase à la rotation. En effet, le PCE est divisé par un rapport de quatre. Pour palier cette insuffisance nous allons rajouter une référence qui est un visage mais tourné de  $45^\circ$ . Les résultats obtenus, en reprenant les mêmes conditions qu'auparavant, sont présentés (Figure 5-b). Ces résultats montrent la possibilité d'améliorer la robustesse du filtre de phase en utilisant une base d'apprentissage constituée de trois références dans chaque classe (une à  $0^\circ$ , la deuxième à  $45^\circ$  et enfin une troisième à  $90^\circ$ ).

### 8.0 Effet de la binarisation sur le filtre composite segmenté de phase pure

Pour des raisons technologiques, mais aussi pour économiser de la mémoire et diminuer le temps de transfert de l'information entre le filtre et la base des filtres, il est intéressant d'étudier l'impact de la binarisation du filtre composite sur ses différentes réponses dans le plan de corrélation. En effet les modulateurs spatiaux de lumière (SLMs) rapides (3 kHz et plus) permettant l'implantation optique de ces filtres dans un corrélateur. Les filtres rapides actuellement commercialisés sont encore binaires (de phase ou d'amplitude à cristaux liquide ferroélectrique).

On substitue au filtre précédemment calculé, des filtres binaires de phase pure segmenté (SBPOF) obtenus en donnant à ces filtres la valeur  $\pm 1$  suivant que la partie réelle des filtres calculés est positive ou négative.

Afin d'évaluer la détérioration introduite par cette opération de binarisation sur les performances de notre filtre segmenté, nous allons observer le comportement de ce filtre vis-à-vis du nombre de corrélations réalisées, dans les deux cas : binaire et non binaire. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 6. Cette comparaison montre très clairement la détérioration du niveau de discrimination obtenue avec le filtre com-

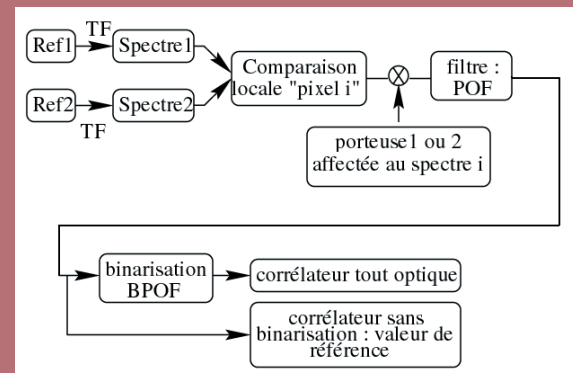
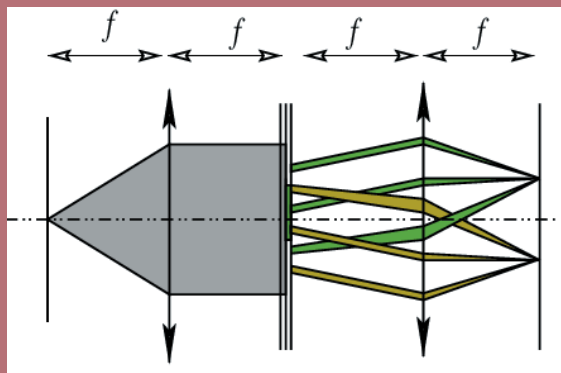


Figure 4: a) Schéma de base d'un corrélateur monovoie utilisant un filtre composite segmenté pour la multicorrélation, (b) schéma synoptique d'un corrélateur utilisant un filtre composite segmenté pour la multicorrélation

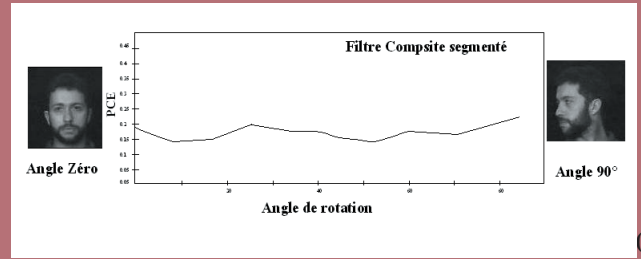
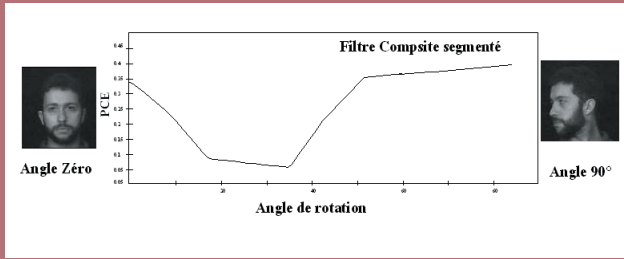


Figure 5: Robustesse du filtre composite segmenté à l'invariance par rotation: (a) Réponses obtenues avec un filtre segmenté à deux références 0° et 90°. (b) Réponses obtenues avec un filtre segmenté à trois références 0°, 45° et 90°

posite segmenté binarisé. Cependant pour maintenir les bonnes performances de notre corrélateur, nous devons lutter contre ces types de pertes d'informations et essayer de corriger ces erreurs en les diffusant sur l'ensemble du spectre de chaque référence avec la technique de diffusion d'erreur [ 8].

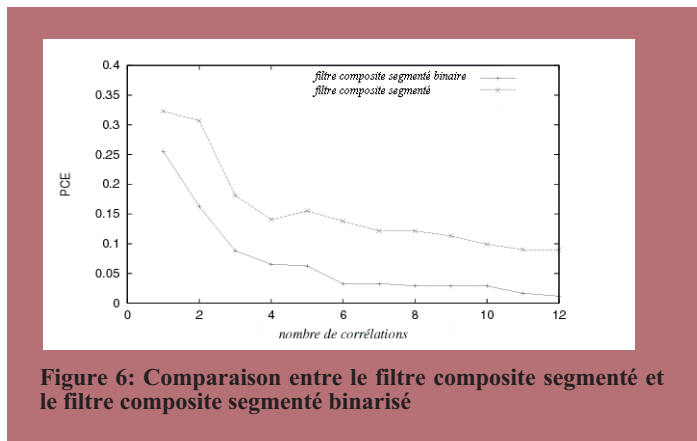


Figure 6: Comparaison entre le filtre composite segmenté et le filtre composite segmenté binarisé

### 9.0 Méthode de diffusion d'erreur

Le principe de la méthode de diffusion d'erreur (Figure 7-a) consiste à diffuser l'erreur commise lors de la binarisation d'un pixel sur le ou les pixels voisins. En effet la binarisation se fait de la manière suivante : après la comparaison de la valeur du pixel choisi  $f(i)$  à un seuil  $T$  (seuil de binarisation), si  $f(i) < T$  nous codons cette valeur par zéro :  $h(i) = 0$ , dans le cas contraire si  $f(i) > T$  nous attribuons à sa valeur une unité :  $h(i) = 1$ . Dans les deux cas de figure nous commettons une erreur égale à  $S(i) = f(i) - h(i)$ . Cependant pour conserver l'énergie dans le plan de filtrage, l'énergie perdue ou ajoutée (erreur commise) lors de la binarisation d'un pixel est rajoutée ou retranchée des autres pixels avec des portions (poids) propres à chacun de ces pixels (Figure 7-b).

Pour sélectionner les pixels et leurs poids qui seront utilisés pour dif-

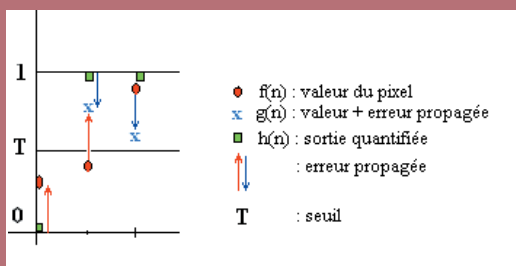
fuser cette erreur, plusieurs techniques ont été proposées [ 8]. De notre côté, nous avons proposé une nouvelle méthode de génération de la matrice des poids. Au lieu d'utiliser une matrice de coefficients connus, nous proposons de générer notre propre matrice en posant la contrainte suivante : **Les erreurs commises lors de la binarisation du filtre (dans le domaine de Fourier) ne doivent pas affecter le pic de corrélation et ainsi leurs effets doivent être placés ou répartis à l'extérieur de l'entourage du pic de corrélation.** Pour se faire nous imposons une zone sans bruit autour du pic de corrélation tel que montré dans la Figure 7-c. Pour mettre en évidence le bon comportement de notre méthode d'optimisation, nous l'avons comparé avec la méthode classique de binarisation. Le tableau 1 présente en première ligne le rapport signal sur bruit ( $S/B$ ) obtenu en utilisant la binarisation classique. Les résultats obtenus par la nouvelle méthode de binarisation sont reportés par la dixième ligne. Cette comparaison montre clairement l'amélioration significative de rapport  $S/B$  ce qui augmentera la fiabilité de décision de la multicorrélation avec une approche monovoie.

Tableau 1: Résultats de la corrélation en utilisant un filtre composite segmenté

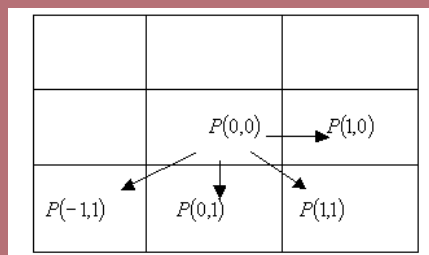
	Amplitude du pic de corrélation	S/B
Méthode de binarisation classique	307.401	0.433
Nouvelle Méthode de binarisation	301.70	2.581

### 10.0 Conclusion

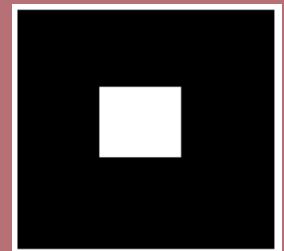
Nous avons fait un tour d'horizon de la reconnaissance de forme en focalisant sur la corrélation. Cette dernière s'avère bien adaptée à l'approche optique offrant ainsi le parallélisme du traitement de l'information. Étant donnée que la corrélation est un outil de reconnaissance à caractère global, la tâche essentielle dans la mise en oeuvre du corréla-



(a)



(b)



(c)

Figure 7: (a) Méthode de diffusion d'erreur en une dimension, (b) Méthode de diffusion d'erreur en deux dimensions, (c) fenêtre d'optimisation.

teur est la conception du filtre approprié. Les filtres binaires ont montré des avantages incontestables tant au niveau technologique qu'au niveau performance. Cependant, la neutralisation ou du moins la minimisation des effets cumulatifs de la binarisation des pixels du filtre sur la qualité du plan de corrélation demeure souhaitable. C'est dans cet objectif que la méthode de diffusion d'erreur a été élaborée.

Finalement, les performances de la corrélation comme outil de décision ont été améliorées par l'utilisation de l'approche multivoies. En effet, dans cette logique multivoies, nous utilisons l'ensemble du plan de sortie pour prendre une décision, et nous avons augmenté le nombre de corrélations effectuées par seconde.

## 11.0 Remerciements

Le Groupe optique de traitement du signal et de l'image « GOSI » de l'ISEN-Brest remercie le laboratoire d'optique et d'électromagnétisme de l'université de Moncton- Faculté d'ingénierie, en particulier son responsable le Prof. Hamam Habib, pour leurs conseils techniques et la mise à disposition d'un stagiaire, ce qui non seulement a été une aide pour la réalisation de ce travail, mais également permet d'amorcer une collaboration dans le domaine du Traitement optique d'information entre nos deux établissements.

## 12.0 Références

- [1]. J.D Armitage and A.W. Lohmann "Character recognition by incoherent spatial filtering". Applied optics, vol 4:461-467, 1965.
- [2]. C.S Maréchal et P.Groce. "Un filtre de fréquences spatial pour l'amélioration du contraste des images optiques" C.R. Acad. Sci,127: 607, 1953.
- [3]. A. Al Falou, Implantation optique de corrélateurs monovoie et multivoies appliqués à la reconnaissance des formes. thèse de doctorat, Université de Rennes I, France 1999.
- [4]. A.B. Vander Lugt "Signal detection by complex spatial filtering" IEEE, IT-10, 139-145, 1964.
- [5]. A.V. Oppenheim "The importance of phase signals" In proceedings of the IEEE, vol 69: 529-541, 1981.
- [6]. T.H. Barners, F.T.J Johson, T Eiju, T.G. Haskell, K. Mattsuda and Kohajis "Opt-electronic determination of binary phase only filters for optical correlation". Optical engineering, vol 31:1936-1945, 1992.
- [7]. D. Mendlovic and V. Kirysche "Two-channel computer-generated hologram and its application for optical correlation" Optics Communications, 116: 322-325, 1995.
- [8]. M. EL Bouz and K. Heggarty. "Signal window minimum average error algorithm for multi-phase level computer-generated holograms" Optics Communications 180, 21-28, 2000.

### À propos de l'auteur

**Ayman AlFalou** a obtenu un B.Ing. en électronique, électrotechnique et auto-matique à l'université Al-Fanar - Liban en 1994. Il a obtenu une M.Sc. en traitement de l'information de l'Université de Bretagne Occidentale, France 1995, et un Ph.D en traitement du signal et télécommunications de l'Université de Rennes I conjointement avec l'École Nationale Supérieure de Bretagne, France 1999. Actuellement, il occupe le poste de maître de conférence et responsable du laboratoire GOSI à l'Institut Supérieur d'Électronique et du Numérique – Brest, France. Dans ses recherches scientifiques, il s'intéresse au traitement optique du signal et de l'image, aux télécommunications optiques, aux problèmes d'optimisation et aux systèmes opto-électroniques.

