



HAL
open science

Segmentation d'images par contour actif: implantation optique avec un corrélateur incohérent ombroscopique

Eric Hueber

► **To cite this version:**

Eric Hueber. Segmentation d'images par contour actif: implantation optique avec un corrélateur incohérent ombroscopique. Autre [cs.OH]. Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2002. Français. NNT: . tel-00002984

HAL Id: tel-00002984

<https://theses.hal.science/tel-00002984>

Submitted on 11 Jun 2003

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Eric Hueber

**Segmentation d'images par contour actif:
implantation optique avec un corrélateur
incohérent ombroscopique**

Université de Haute-Alsace
École Supérieure des Sciences Appliquées
pour l'Ingénieur - Mulhouse

THÈSE

Présentée pour l'obtention du :

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE HAUTE-ALSACE
[arrêté du 30 mars 1992]

Spécialité Électronique - Électrotechnique - Automatique

par

Eric HUEBER

Segmentation d'images par contour actif : implantation optique avec un corrélateur incohérent ombroscopique

Thèse soutenue le 25 novembre 2002 devant le jury composé de MM. :

P. RÉFRÉGIER (Professeur, ENSP Marseille)	Président
V. DEVLAMINCK (Professeur, Université de Lille)	Rapporteur
M. PAINDAVOINE (Professeur, Université de Bourgogne)	Rapporteur
L. BIGUÉ (Maître de Conférences, UHA/ESSAIM)	Examineur
P. AMBS (Professeur, UHA/ESSAIM)	Directeur de Thèse

Remerciements

Je sais gré à F.-M. Schmitt, directeur de l'ESSAIM de m'avoir accueilli dans son établissement.

Je tiens à remercier Pierre Ambs et Laurent Bigué qui m'ont confié ce travail de doctorat au sein du laboratoire MIPS dans le groupe FOTI. Pierre Ambs m'a accordé sa confiance tout au long de ces travaux menés sous sa direction. Laurent m'a encadré en faisant preuve d'une patience et d'une disponibilité à toute épreuve. Il a su m'insuffler de sa grande rigueur scientifique et de son enthousiasme pour la recherche.

Je tiens à témoigner ma plus profonde reconnaissance à Philippe Réfrégier qui a non seulement accepté de présider la commission d'examen de cette thèse, mais s'est impliqué tout au long de ce travail par ses conseils, ses remarques et suggestions constructives, depuis les orientations initiales jusqu'à la rédaction finale.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux rapporteurs Vincent Devlaminck et Michel Paindavoine qui ont porté un grand intérêt à ces travaux. Leur lecture attentive et leurs commentaires sur le mémoire m'ont permis de le clarifier et de l'améliorer.

J'adresse un remerciement spécial à Thomas Sproesser pour la relecture des parties importantes du mémoire, pour sa présence toujours réconfortante et les passionnantes petites discussions scientifiques.

Je souhaite remercier Jean-Pierre Roth pour le temps qu'il a consacré à éclairer mes obscures préoccupations mathématiques.

Merci à mes deux camarades de laboratoire : Christophe Stolz pour ses réponses à des questions sur certains phénomènes peu évidents pour moi en début de thèse et Alexis Matwyschuk à propos d'interrogations plus précises à mesure que mes investigations progressaient.

Pendant ces années, j'ai assuré des enseignements à l'IUT GEII de Mulhouse et à l'ESSAIM dans d'excellentes conditions grâce à mes tuteurs et conseillers pédagogiques : Raymond Laagel, Alain Dieterlen, Hubert Jemelen, Jean Gaillard, Denis Giacona, Didier Bresch. J'associe à ces remerciements Patrick Alliot, qui a su ménager mon emploi du temps en fin de thèse.

Mister Lucien Blech a parfait la traduction de mes publications et actes de conférence, je l'en remercie. Je remercie également tout le personnel de l'ESSAIM pour sa gentillesse et ses "coups de main" divers et variés.

Je suis aussi très reconnaissant envers ma famille et ma belle-famille pour leurs encouragements et leur support "technique-logistique", et envers mon père pour certaines relectures qui m'ont été précieuses. Enfin, je souhaite remercier mon épouse, Céline, qui a su me soutenir et me motiver notamment dans la finalisation du manuscrit, me permettant ainsi d'aboutir en trois ans.

Table des Matières

INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1	
LA RECONNAISSANCE DES FORMES	9
1.1 INTRODUCTION	9
1.2 PROCESSEURS OPTIQUES	11
1.2.1 <i>Corrélation</i>	12
1.2.2 <i>Corrélateurs optiques en éclairage cohérent</i>	14
1.2.3 <i>Corrélateurs optiques en éclairage incohérent</i>	17
1.3 LA SEGMENTATION	20
1.4 CONCLUSION	21
1.5 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	21
CHAPITRE 2	
SEGMENTATION PAR CONTOURS ACTIFS.....	25
2.1 CONTOURS ACTIFS	25
2.1.1 <i>Le modèle classique</i>	26
2.1.2 <i>Limites et améliorations</i>	27
2.1.3 <i>Contour actif et approche région</i>	29
2.2 SNAKE BASÉ SUR LES PROPRIÉTÉS STATISTIQUES DES RÉGIONS	29
2.2.1 <i>Principe du snake SIRS</i>	30
2.2.2 <i>Critères à optimiser</i>	32
2.2.3 <i>Stratégie de convergence</i>	35
2.2.4 <i>Technique multi-résolution sur le contour</i>	36
2.2.5 <i>Autres améliorations</i>	37
2.3 CONCLUSION	38
2.4 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39
CHAPITRE 3	
MISE EN ŒUVRE OPTIQUE.....	41
3.1 INTRODUCTION	41
3.2 CORRÉLATION INCOHÉRENTE PAR OMBROSCOPIE.....	42
3.3 PRINCIPE.....	44
3.3.1 <i>Effets photométriques</i>	45

3.3.2	<i>Résolution d'un corrélateur incohérent par ombroscopie</i>	49
3.4	MISE EN ŒUVRE OPTIQUE DU SNAKE.....	50
3.4.1	<i>Présentation de l'algorithme</i>	50
3.4.2	<i>Les sources lumineuses</i>	51
3.4.3	<i>Les Modulateurs spatiaux de lumière</i>	54
3.4.4	<i>Les capteurs</i>	57
3.4.5	<i>Description du processeur optique</i>	60
3.5	CONCLUSION	64
3.6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	65
 CHAPITRE 4		
RESULTATS		69
4.1	CRITÈRE DE QUALITÉ	69
4.2	RÉSULTATS	72
4.3	DIFFRACTION.....	77
4.4	LOI GAUSSIENNE	78
4.5	CONCLUSION	80
4.6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	80
 CHAPITRE 5		
LIMITES ET AMELIORATIONS DU PROCESSEUR OPTIQUE		81
5.1	SIMULATION DES PERTURBATIONS SUR LA MESURE	81
5.1.1	<i>Bruit additif sur la mesure</i>	82
5.1.2	<i>Offset sur la mesure</i>	83
5.1.3	<i>Gain sur la mesure</i>	84
5.1.4	<i>Conclusion</i>	84
5.2	MESURE DE LA VALEUR CENTRALE DE LA CORRÉLATION	84
5.2.1	<i>Relation affine</i>	86
5.2.2	<i>Réinitialisation et convergence</i>	86
5.2.3	<i>Sensibilité de la mesure</i>	89
5.2.4	<i>Variations de la mesure</i>	90
5.2.5	<i>Discussion</i>	92
5.3	CORRECTION DES FLUCTUATIONS.....	93
5.4	LES NON-LINÉARITÉS DE CODAGE	97
5.4.1	<i>Transmission en amplitude des SLM</i>	97
5.4.2	<i>SLM VGA</i>	98
5.5	CONTRAINTES SPATIALES	99
5.5.1	<i>Diffraction</i>	99

5.5.2	<i>Source lumineuse</i>	99
5.6	RÉSOLUTION.....	100
5.7	AMÉLIORATIONS DE L'ALGORITHME.....	100
5.8	LIMITES EN PUISSANCE DE CALCUL.....	103
5.9	CONCLUSION	104
5.10	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	104
CHAPITRE 6		
CORRELATEUR INCOHÉRENT MULTICANAL ET APPLICATIONS DU PROCESSEUR		
OPTIQUE..... 105		
6.1	CORRÉLATEUR INCOHÉRENT MULTICANAL.....	105
6.2	STRATÉGIES DE TRAITEMENT PARALLÈLE.....	107
6.3	MISE EN ŒUVRE OPTIQUE.....	108
6.4	FAISCEAU D'INFORMATIONS.....	110
6.4.1	<i>Etat du faisceau lumineux</i>	110
6.4.2	<i>La correction de faisceau</i>	112
6.4.3	<i>LUT</i>	115
6.4.4	<i>Uniformisation du faisceau : ajout d'une branche de contrôle</i>	116
6.4.5	<i>Asservissement sur image</i>	121
6.4.6	<i>Discussion</i>	122
6.4.7	<i>Conclusion</i>	127
6.5	RÉSULTATS	128
6.5.1	<i>Accélération possibles</i>	131
6.5.2	<i>Opérations optiques complémentaires pour le snake</i>	132
6.6	DIVERSES APPLICATIONS DU PROCESSEUR OPTIQUE	133
6.6.1	<i>Reconnaissance de formes</i>	133
6.6.2	<i>Suivi de cible et corrélation</i>	133
6.7	CONCLUSION	134
6.8	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	134
CONCLUSION		139
 ANNEXE		145

Introduction

Il est généralement simple pour l'œil humain de discerner dans une image les contours d'un objet donné. En revanche, par des moyens informatiques, cette tâche de segmentation reste, dans certains cas, très difficile à réaliser de manière automatique en temps réel¹. Au-delà de ce constat, la segmentation d'objets dans des images est la clef de nombreuses applications, par exemple médicales [1], agronomiques [2], ou relatives à la sécurité routière et la surveillance (parkings, aéroports, etc.) [3].

La technique des contours actifs (*snakes*) [4] est une approche récente qui a permis de réaliser des progrès importants dans ces nombreuses applications. Elle consiste à déformer une courbe afin de l'adapter au contour d'un objet.

Des travaux réalisés à l'Institut Fresnel ont porté sur une nouvelle méthode de segmentation par contours actifs qui, pour des images bruitées ou jugées difficiles, donne de meilleurs résultats que les méthodes traditionnelles [5]. Elle prend en compte les propriétés statistiques des images pour séparer la surface de l'objet du fond de l'image. A partir d'un point de départ appartenant à la surface de l'objet, le contour actif se développe, en comparant la région interne à la région externe, jusqu'à englober l'objet. Cette approche de différenciation des régions et de modélisation de l'image par des champs aléatoires a suscité le développement de plusieurs algorithmes. Chaque algorithme est destiné à segmenter un type d'image dont les caractéristiques de répartition statistique sont connues.

Ces algorithmes de segmentation ont été validés de manière numérique [6]. Comme ils peuvent s'exprimer en termes de corrélations, l'idée de départ de la thèse était de les implanter dans une architecture hybride où les corrélations, qui sont des opérations coûteuses en temps de calcul, seraient réalisées de manière optique (donc plus rapidement). Partant de ce constat,

¹ Temps réel signifie ici que l'opération dépasse la limite de perception humaine. Par exemple, la vision humaine est limitée à la cadence de 25 images par secondes. Une opération en temps réel, dont le but est d'assister la perception visuelle, fonctionnera au-delà de 25 Hz.

nous proposons un processeur optoélectronique original, capable de réaliser un snake optiquement.

De manière générale, les corrélateurs optiques, qui existent depuis près d'un demi-siècle [7] [8] [9], ont toujours été dépendants de l'objet à détecter et à localiser. De plus, leur efficacité chute rapidement quand l'objet à détecter diffère de sa référence par rotation, homothétie ou en présence de bruit dans les images [10] [11]. Pour atténuer ce manque de robustesse, on peut adjoindre au corrélateur plusieurs références contenant différentes rotations et homothéties de la forme à reconnaître [12] [13]. A la différence de ces processeurs traditionnels, le processeur proposé effectue une opération de segmentation indépendante de toute connaissance *a priori* de l'objet à l'exception d'un point appartenant à la région de l'objet. Notre processeur contient une référence de base s'adaptant, au fur et à mesure des itérations, à la forme de la cible quelle que soit son orientation ou son échelle. On réalise en quelque sorte le travail inverse d'une corrélation habituelle où, connaissant la forme de l'objet, il faut déterminer sa position. De plus, le caractère statistique, propre à l'algorithme implanté (SIRS), rend notre processeur optique plus robuste aux bruits contenus dans les images traitées. Cette thèse met ainsi en lumière une nouvelle application possible des processeurs optiques.

Afin de justifier pleinement la mise en œuvre optique de cet algorithme de segmentation par contour actif, nous souhaitons exploiter le parallélisme inhérent aux architectures optiques. Ainsi, nous espérons accélérer sensiblement le processus grâce à un calcul optique parallèle.

Organisation du Mémoire

Ce manuscrit est composé de 6 chapitres.

Le premier chapitre, essentiellement bibliographique, nous donne l'occasion de dresser un état de l'art des différentes techniques de reconnaissance optique des formes, que ce soit de manière numérique ou analogique. Nous abordons plus particulièrement les notions de *corrélation* et de *segmentation*.

La deuxième partie traite des contours actifs, une technique de segmentation évoluée. Leur apport, leur principe et leurs limites sont énoncés ainsi que les raisons de l'évolution vers les snakes SIRS (*Statistical Independent Region Segmentation*).

Dans le troisième chapitre nous décrivons la mise en œuvre du processeur optique, du choix de son architecture jusqu'à sa conception et sa validation. Nous expliquons les raisons qui ont motivé notre choix pour un corrélateur incohérent par ombroscopie et nous en exposons les principes. Nous nous intéresserons également aux éléments-clés (modulateurs,

capteurs, sources de lumière, etc.) présents dans les architectures de corrélateurs optoélectroniques.

La mise en œuvre optoélectronique du "snake" décrite, nous présentons dans la quatrième partie les résultats de notre processeur hybride original capable de segmenter avec un contour actif des objets dans des images réelles. Nous mettons en évidence les problèmes intrinsèques à l'architecture en lumière incohérente et montrons comment ils influencent les résultats.

Dans le chapitre 5, nous caractérisons le comportement du processeur optique et ses paramètres de convergence en nous basant sur l'étude des composants optiques le constituant. Nous menons une étude temporelle de l'évolution du faisceau à l'intérieur du processeur et proposons des solutions de réduction des fluctuations de l'intensité lumineuse. Nous effectuons une estimation de la résolution du traitement optique de l'information de notre processeur et nous terminons le chapitre avec des améliorations algorithmiques du snake SIRS liées à notre implantation optique.

Enfin, le sixième chapitre propose des améliorations propres aux capacités de traitement parallèle de l'information dues au caractère optique du processeur. Nous y développons aussi une technique originale d'uniformisation adaptative de faisceau faisant appel à un asservissement par modulation de polarisation. Ainsi nous pouvons exploiter davantage de surface lumineuse et ajouter des canaux parallèles de calcul optique. Ce chapitre se clôt avec la description de diverses applications possibles.

Nous terminons ce mémoire sur une vue d'ensemble de la thèse et proposons des perspectives.

Références Bibliographiques

1. N. Ayache, I. Cohen et I. Herlin, "Medical Image Tracking", in *Active Vision*, édité par A. Blake & A. Yuille, MIT Press, 285-302 (1992).
2. M.S. Horritt, "A statistical active contour model for SAR image segmentation", *Im. Vis. Comp.* **17**, 213-224 (1999).
3. S.M. Smith, "ASSET-2: real-time motion segmentation and object tracking", *Real-time Imaging* **4**, 21-40 (1998).
4. M. Kass, A. Witkin et D. Terzopoulos, "Snakes: active contour models", *Int. J. Comp. Vis.* **1**, 321-331 (1988).
5. O. Germain, "Segmentation d'images radar : caractérisation des détecteurs de bord et apport des contours actifs", Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III (2001).

6. O. Germain et P. Réfrégier, "Optimal snake-based segmentation of a random luminance target on a spatially disjoint background", *Opt. Lett.* **21** (22), 1845-1847 (1996).
7. W. Meyer-Eppler, "Die funktionalanalytische Behandlung des Schattenproblems", *Optik* **1**, 465-474 (1946).
8. F.B. Berger, "Optical cross-correlator", Brevet (U.S.) n° 2 787 188 (1957).
9. A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering", *IEEE Trans. Inf. Theory* **10** (2), 139-145 (1964).
10. J.L. Horner et P. Gianino, "Additional properties of the phase-only correlation filter", *Opt. Eng.* **23** (6), 695-697 (1984).
11. Q. Tang et B. Javidi, "Sensitivity of the nonlinear joint transform correlator: experimental investigation", *Appl. Opt.* **31** (20), 4016-4024 (1992).
12. B.V.K. Vijaya Kumar, "Tutorial survey of composite filter designs for optical correlators", *Appl. Opt.* **31** (23), 4773-4801 (1992).
13. L. Bigué et P. Ambs, "Filter Implementation technique for multicriteria characterization of coding domains in the joint transform correlator", *Appl. Opt.* **38** (20), 4296-4305 (1999).

Chapitre 1

La Reconnaissance des Formes

Dans ce premier chapitre nous allons présenter les objectifs de la reconnaissance des formes et les techniques utilisées pour y parvenir de manière automatique. Les différentes solutions électroniques numériques et optiques seront présentées en insistant sur la corrélation et la segmentation, les deux opérations les plus utilisées en reconnaissance des formes. Nous terminerons avec une présentation des divers techniques de segmentation qui est une opération originale dans le domaine de l'optique.

1.1 Introduction

Il y a une quarantaine d'années, dans le bouillonnement d'activité de l'informatique naissante, le domaine de la reconnaissance des formes est apparu avec le besoin d'analyseurs automatiques. L'analyse automatique est potentiellement beaucoup plus rapide que l'analyse manuelle et, en principe, elle élimine la subjectivité due à l'opérateur ; de plus elle permet la mesure simultanée d'un grand nombre de paramètres ; enfin, elle est indispensable lorsque l'opération est répétitive [1].

Cependant, cet objectif d'automatisation de la perception s'est avéré présomptueux au vu des délais qui avaient été envisagés pour traiter la question. A l'heure actuelle, certains traitements d'image détectent des zones d'intérêt plus précisément et plus rapidement que le système de perception humain, mais uniquement pour des tâches simples ou très spécialisées.

Toutes les études qui ont porté sur la reconnaissance des formes ont avant tout démontré à quel point il est difficile de s'approcher des performances du système de perception humain. Détecter, localiser et reconnaître un objet dans une image est une opération relativement subjective qui peut différer d'une personne à une autre et selon l'environnement et le contexte.

« Les choses que l'on perçoit dans le monde autour de nous et les vécus que l'on perçoit en nous n'ont rigoureusement pas la même façon d'apparaître. Les choses apparaissent par "esquisses"; par exemple, lorsque je regarde un cube ou une maison, je n'ai toujours qu'une perspective sur lui, je n'en vois qu'une face à la fois, les autres aspects restant cachés. L'expérience visuelle d'une chose est ainsi une succession de visions de multiples faces s'enchaînant les unes aux autres. »

"Introduction à la phénoménologie"
de Philippe Huneman et Estelle Kulich

Lorsqu'un objet est détecté, l'étape suivante est de définir sa forme ; or c'est un problème qui ne présente pas de solution générale. C'est pourquoi elle reste souvent très descriptive et se réfère généralement à une forme géométrique parfaitement définie (carré, cube...). La description de la forme n'est possible dans l'absolu que s'il est possible de la faire coïncider avec une référence. En général, la forme de l'objet à étudier se rapproche plus ou moins de la forme de référence et c'est cela qui est difficile à évaluer [1].

L'analyse de la forme possède un vaste champ d'applications. Selon le domaine d'utilisation, elle se fera suivant essentiellement deux techniques, chacune dépendant de la nature de l'ensemble à analyser et du problème à résoudre. La première consiste à comparer les objets avec des références de formes parfaitement définies (la classification), et la deuxième s'attache à analyser l'objet de manière paramétrique (la description) pour ensuite pouvoir le classifier suivant les paramètres obtenus.

Depuis des années, de nombreuses approches ont été développées pour mettre en œuvre ces techniques de *haut niveau*¹. Parmi la multitude des solutions proposées, deux opérations de *bas niveau* ont été utilisées quasiment systématiquement: la corrélation pour la classification et la segmentation pour la description.

La segmentation d'images consiste à rechercher les principaux constituants d'une image (recherche d'objets) en ayant pour objectif de détecter la présence des objets et les extraire de l'image. Ainsi, elle permet d'étiqueter les régions dissociées avec des descripteurs et c'est sur cet étiquetage que vont se baser les algorithmes de reconnaissance. La segmentation est une étape requise pour un grand nombre de tâches de haut niveau nécessaires aux systèmes de vision autonomes (par exemple en robotique).

Un grand nombre de méthodes de segmentation réalisent tout d'abord une détection de contour [2]. En effet, une proportion importante de l'information présente dans une image se situe au voisinage des fortes transition de luminance. Ainsi en ne conservant que les frontières des objets, on retient l'information pertinente en se débarrassant d'un volume important de données encombrantes. Cependant, ces techniques rendent la segmentation sensible au bruit contenu dans l'image traitée.

¹ Les traitements de bas niveau travaillent directement sur les valeurs attachées aux pixels de l'image, tandis que les traitements de haut niveau opèrent sur des entités symboliques constituant une interprétation de la réalité extraite de l'image.

Une méthode tout indiquée dans ce contexte est la corrélation. Cette opération permet, en effet, de comparer une image à toutes les versions translattées d'une autre image prise comme référence, tout en étant robuste au bruit. Elle a été souvent utilisée en reconnaissance des formes et entre autre exploitée pour la localisation de cible (fig. 1.1).

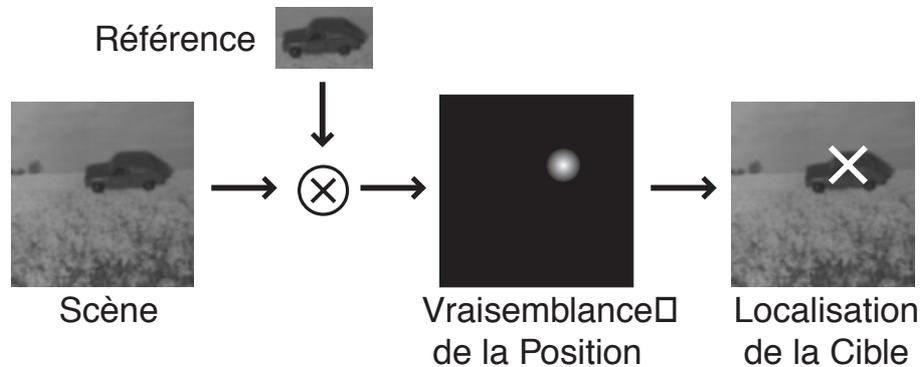


Figure 1.1 : Principe schématique de la localisation de cible par corrélation.
En corrélant la scène et la référence, un plan de sortie contenant un pic est obtenu. La position de ce pic permet de localiser l'objet recherché.

Mais la reconnaissance des formes a toujours fait appel à des représentations algorithmiques très complexes [3]. Les scientifiques ont testé de nombreuses voies pour effectuer les opérations de reconnaissance des formes plus rapidement. Par exemple, les calculs de corrélation ont bénéficié de nouveaux algorithmes, comme la transformée de Fourier rapide (FFT) [4]. Mais de manière générale l'accélération est davantage venue des nouvelles puissances de calcul avec les ordinateurs à structures massivement parallèles. Ces nouvelles architectures de calcul ont été conçues d'après la structure du cerveau, qui est particulièrement adaptée pour la résolution de problèmes nécessitant un très grand nombre de calculs [5]. D'autre part, l'optique s'est avéré être un moyen de calcul attractif puisque la reconnaissance d'une forme peut être réalisée par l'opération de corrélation et ce, à la vitesse de la lumière.

1.2 Processeurs Optiques

Depuis plus d'un demi-siècle, le calcul optique a été un domaine de recherche très actif. Au début des années 1960, les calculateurs optiques se sont révélés être un outil rapide comparé aux calculateurs numériques. Aujourd'hui encore les processeurs optiques¹ sont une alternative aux processeurs numériques en terme de rapidité pour certaines opérations. L'avantage de l'optique est qu'elle permet d'obtenir la multiplication, le produit de convolution ou de corrélation de deux images en quelques nanosecondes. C'est en ce phénomène que certains ont très tôt vu l'intérêt d'un parallélisme massif, laissant espérer la conception de processeurs optiques surpuissants.

¹ Nous entendons par processeur optique "processeur optoélectronique analogique" et non "processeur optique numérique" qui réalise des calculs logiques comme les implantations de transformées en ondelettes, des réseaux de neurones, ou qui sert de routeur d'informations.

Cependant les opérations optiques ont toujours été limitées en cadence de fonctionnement par les éléments d'interface électronique/optique (SLM) et optique/électronique (CCD). Cette situation s'est améliorée grâce à l'arrivée de modulateurs spatiaux de lumière (SLM) à cristaux liquides suffisamment performants à l'orée des années 1980 [6] [7], et plus récemment la fabrication d'une nouvelle génération de modulateurs à cristaux liquides ferroélectriques [8].

Différentes opérations, réalisables de manière optique, sont appliquées à la reconnaissance des formes :

- La transformée de Hough [9] [10] sert à extraire certaines parties d'images. Elle segmente des objets précis décrits par des courbes paramétriques : droites, ellipses,... Le processeur développé dans ce mémoire doit pouvoir s'appliquer à des images beaucoup moins spécialisées.
- Les moments géométriques servent à caractériser une image [11]. L'objectif de cette méthode est de comparer les moments géométriques d'une image avec des références préalablement répertoriées et de conclure sur les similitudes possibles. Cette technique est assez peu usitée, surtout au niveau des mises en œuvres optiques.
- La corrélation entre deux images, une opération intensive pour un calculateur numérique, est une opération largement utilisée en traitement d'image et en reconnaissance des formes. Les systèmes analogiques optiques, avec leur inhérent parallélisme en deux dimensions (2D), ont depuis longtemps été utilisés pour effectuer des corrélations en 2D [12]. C'est cette technique que nous avons privilégiée et que nous présenterons plus en détail dans la suite de ce mémoire.

1.2.1 Corrélation

La corrélation est une opération bien connue ; on l'utilise dans des domaines aussi variés que le traitement du signal, l'automatique, les statistiques, etc. En reconnaissance des formes, elle nous intéresse par sa bonne résistance au bruit affectant les scènes à traiter.

1.2.1.1 Définitions

On définit le produit de convolution $*$ sur l'ensemble \mathcal{L}^2 des fonctions complexes de carré sommable :

$$v(t) = (h * r)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) \cdot r(t - \tau) d\tau \quad (1.1)$$

On désire calculer la corrélation des fonctions (images) h et r . Elle s'exprime comme :

$$c(t) = (h \otimes r)(t) = h^*(-t) * r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h^*(\tau - t) \cdot r(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{+\infty} h^*(\tau) \cdot r(\tau + t) d\tau \quad (1.2)$$

où \otimes désigne l'opération de corrélation et $*$ la quantité complexe conjuguée¹. En exprimant l'équation (1.7) dans l'espace de Fourier, il vient :

$$\hat{c}(v) = \hat{h}^*(v) \cdot \hat{r}(v) \quad (1.3)$$

où le symbole $\hat{}$ désigne des fonctions dans l'espace de Fourier. En première approche, on voit donc que la fonction \hat{h}^* à implanter dans le plan de Fourier (en lumière cohérente) doit être la conjuguée de la transformée de Fourier de la fonction de référence \hat{r} proprement dite.

Sachant que nous utilisons des modulateurs spatiaux de lumière et des calculateurs numériques qui manipulent des fonctions discrètes, nous allons maintenant préciser les modalités d'implantation discrète des fonctions précédemment évoquées.

Les fonctions discrètes sont considérées en N points, regroupés au sein de vecteurs. Ainsi, la corrélation discrète des fonctions h et r (des vecteurs \mathbf{h} et \mathbf{r}) est donnée par :

$$\mathbf{c}_k = c(k) = (h \otimes r)(k) = \sum_{l=1}^N \mathbf{h}_l^* \mathbf{r}_{l+k} \quad (1.4)$$

Grâce au théorème de Plancherel, dans le plan de Fourier, l'expression (1.4) se simplifie en :

$$\hat{\mathbf{c}}_k = \tilde{c}(k) = \hat{\mathbf{h}}_k^* \hat{\mathbf{r}}_k \quad (1.5)$$

Bien évidemment, c'est cette expression dans le domaine de Fourier que l'on privilégiera dans le cas où on utilisera un calculateur purement électronique.

1.2.1.2 Propriétés

L'opération de corrélation présente une double propriété mathématique remarquable :

$$\bullet \forall r \in \mathcal{L}^2 \quad \forall x \in \mathbb{C} \quad (r \otimes r)(x) \leq (r \otimes r)(0) \quad (1.6)$$

(dans le cas où les deux fonctions corrélées sont identiques, c'est à l'origine qu'on détecte la valeur maximale de leur fonction de corrélation).

$$\bullet \forall (r, s) \in (\mathcal{L}^2)^2 \quad \max_{x \in \mathbb{C}} [(r \otimes s)(x)] \leq \max_{x \in \mathbb{C}} [(r \otimes r)(x)] \leq (r \otimes r)(0) \quad \text{si } \|s\| \leq \|r\| \quad (1.7)$$

¹ On notera que $\|x\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} x^* \cdot x dx = (x \otimes x)(0)$

(application du théorème de Cauchy-Schwartz : soit une quelconque fonction r à valeurs dans \mathbb{C} . Le maximum de sa fonction de corrélation avec une autre fonction s sera maximisé pour $s=r$ pourvu que $\|s\| \leq \|r\|$).

Ainsi, connaissant au préalable le maximum de la fonction d'autocorrélation c de r , la détection du maximum de la fonction de corrélation de s par r est censé nous indiquer si les deux fonctions corrélées r et s sont identiques à condition que $\|s\| \leq \|r\|$, ce qui n'est pas toujours vérifié, par exemple en présence de bruit affectant l'image d'entrée. On trouvera dans [13] une interprétation *bayésienne* de la corrélation : elle justifie le principe du *maximum a posteriori* [14], qui veut que la position du maximum de la fonction de corrélation nous donne la position de l'objet à reconnaître dans l'image d'entrée.

D'autres propriétés rendent également l'opération de corrélation attractive pour la reconnaissance des formes : elle est invariante par translation et linéaire. On notera également que l'opération de corrélation présente une forme de symétrie hermitique :

$$\forall (r,s) \in (\mathcal{L}^2)^2 \quad \forall x \in \mathbb{C} \quad (s \otimes r)(x) = (r \otimes s)^*(-x) \quad (1.8)$$

1.2.2 Corrélateurs optiques en éclairage cohérent

L'architecture optique la plus répandue opère la corrélation dans le plan de Fourier avec des filtres holographiques complexes proposés par Vander Lugt [12]. Un tel corrélateur réalise la corrélation grâce à l'enregistrement des spectres de fréquence spatiale en valeurs complexes des formes à détecter sur les filtres holographiques.

Les travaux en lumière cohérente n'auraient pas pu voir le jour sans la découverte du pompage optique en 1950 par Kastler, l'invention du laser par Schawlow et Townes en 1958 et sa première mise en œuvre expérimentale en 1960 par Maiman.

Nous détaillons ci-après les différents types d'implantation optique de corrélateurs fonctionnant en lumière cohérente. Les informations de cette section sont pour la plupart extraites de [15] et [16].

1.2.2.1 Les corrélateurs 4f et de Vander Lugt

L'architecture dite 4f (ou à double diffraction, fig. 1.2) est due à Maréchal et Croce [17], à la suite des travaux décisifs de Duffieux [18].

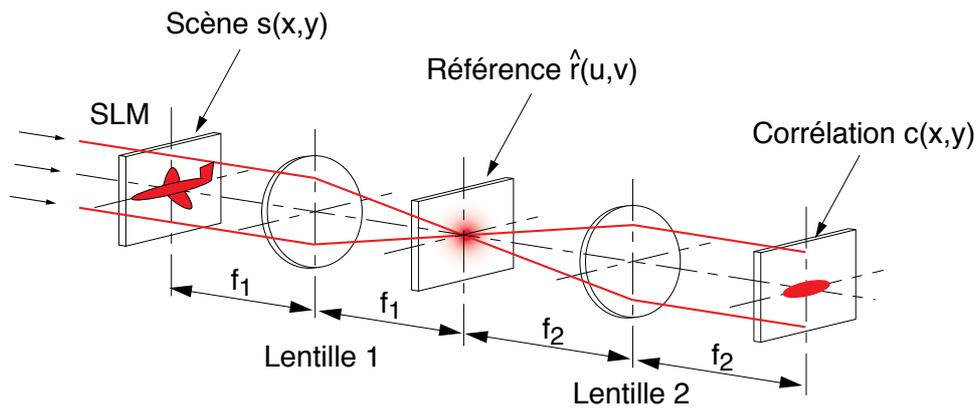


Figure 1.2 : Le montage 4f

On implante dans le plan d'entrée l'image scène. Dans le plan de Fourier, on place le conjugué de la transformée de Fourier de l'image de référence; ainsi, celui-ci est multiplié à la transformée de Fourier (TF) de l'image d'entrée. Après une nouvelle transformée de Fourier, on obtient alors le plan de corrélation. La difficulté réside dans l'implantation de la fonction de référence, ou plutôt de sa transformée de Fourier : comment coder cette information, *a priori* complexe ? Deux solutions se présentent. D'une part, le recours à un codage tel que ceux utilisés pour le calcul d'éléments diffractifs sur un support réel (à modulation d'absorption) ou un support de phase pure peut constituer une solution relativement simple, du point de vue du montage optique tout au moins; la qualité est néanmoins dégradée. D'autre part, Vander Lugt [12] a songé à remplacer le traditionnel masque d'amplitude ou de phase par un hologramme enregistré (fig. 1.3) contenant l'information complexe relative à la transformée de Fourier de l'image de référence.

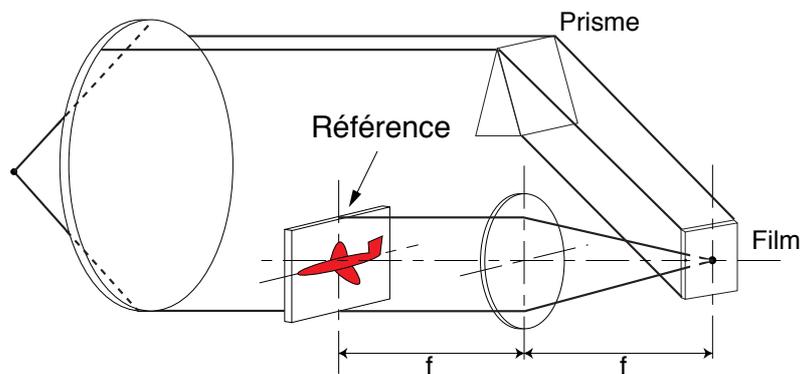


Figure 1.3 : Enregistrement de l'hologramme pour le filtrage de Vander Lugt d'après [19]

Alors le plan de détection comporte quatre composantes (dont deux confondues sur l'axe). Les deux composantes hors axe sont respectivement la convolution et la corrélation des images référence et cible. L'enregistrement de l'hologramme est délicat, l'angle que fait l'onde plane avec le faisceau de référence devant être soigneusement choisi pour éviter que les pics ne se recouvrent dans le plan de sortie [19].

Le développement récent des cristaux photoréfractifs (oxyde de bismuth et silicium - BSO- par exemple) a permis d'implanter des versions temps réel du corrélateur de Vander

Lugt. Ce type de montage (fig. 1.4) est dénommé mélange à quatre ondes (on peut également implanter le corrélateur joint, présenté ci-après, sous forme de mélange à quatre ondes).

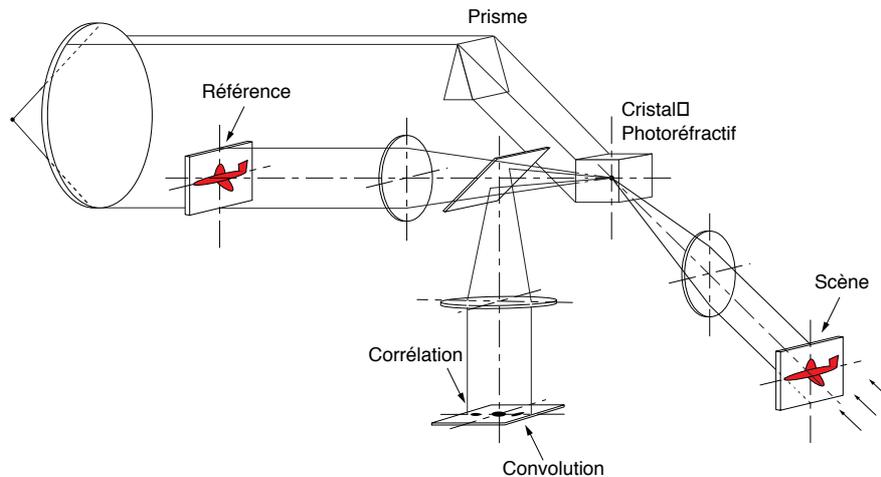


Figure 1.4 : Principe de mélange à quatre ondes : implantation optique temps réel du filtre de Vander Lugt grâce à un cristal photoréfractif.

Le corrélateur 4f est connu pour présenter des difficultés d'alignement dans le plan de Fourier (tout du moins dans sa version où l'on place un filtre dans le plan de Fourier) [20] [21]. Pour cette raison, on peut lui préférer le corrélateur joint, présenté ci-après.

1.2.2.2 Le corrélateur joint (JTC)

Au sein de l'architecture de corrélation à transformée de Fourier conjointe [22] (fig. 1.5), les images d'entrée et de référence sont juxtaposées dans le plan d'entrée.

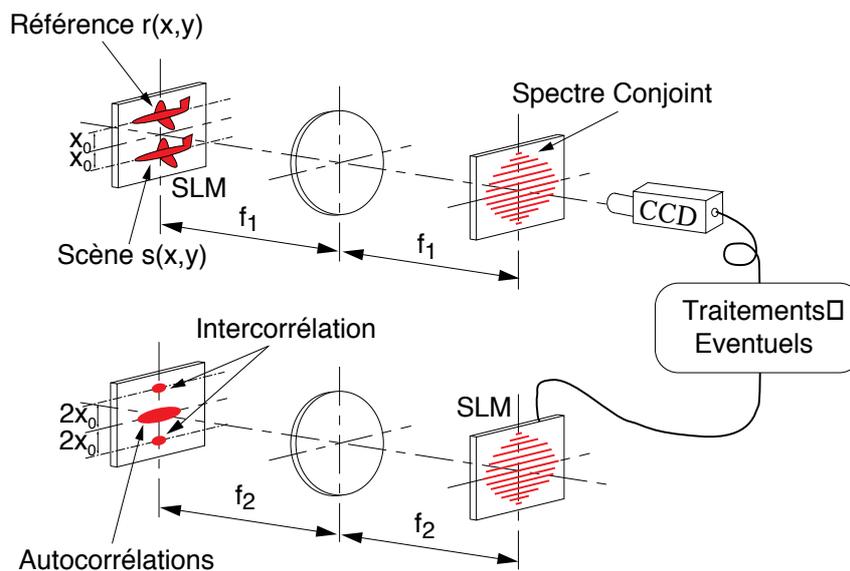


Figure 1.5 : Le montage de corrélation à transformée de Fourier conjointe JTC.

Le corrélateur joint (en anglais JTC, pour Joint Transform Correlator), comparé à son homologue, 4f-Vander Lugt, présente l'avantage d'être facile à aligner, mais dans le plan d'entrée, le produit espace-bande disponible est trois fois moindre.

1.2.3 Corrélateurs optiques en éclairage incohérent

Les corrélateurs optiques incohérents sont moins répandus que leurs homologues cohérents, ils présentent néanmoins des caractéristiques fort intéressantes et toutes liées à la notion de *redondance* de l'information [23] : le problème du bruit cohérent est écarté [24], l'alignement et l'état de surface sont moins critiques, et leur conception relativement fruste les rend peu coûteux. En revanche, il faut par contre se restreindre à l'affichage de valeurs réelles positives et la résolution est réduite à cause des effets de la diffraction.

L'optique en lumière cohérente et en lumière incohérente ne suit pas les mêmes lois. Une transformée de Fourier avec une lentille est naturelle en lumière cohérente, mais en lumière incohérente la phase aléatoire crée une superposition des informations dans le plan de détection. C'est pourquoi en lumière incohérente on ne traite que des amplitudes : la corrélation en amplitude de deux images donnera un résultat en amplitude.

Le lecteur trouvera de plus amples informations précises sur les différentes architectures en lumière incohérente dans les articles cités ci-dessous, mais aussi de manière plus générale dans le livre de Rogers [23] et l'article de revue de Monahan *et al.* [25].

1.2.3.1 Le corrélateur 4f incohérent

Le corrélateur 4f incohérent, aussi appelé processeur à balayage, est représenté ci-dessous :

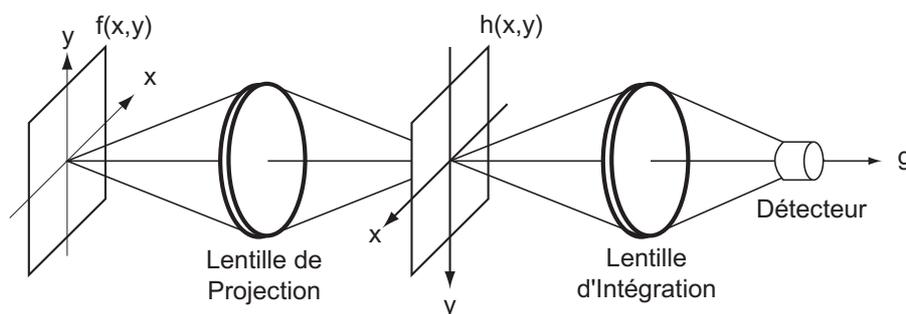


Figure 1.6 : Schéma d'un corrélateur 4f incohérent à balayage. Le flux lumineux modulé par $f(x,y)$ et filtré par $h(x,y)$ est recueilli par le photodétecteur.

L'intensité mesurée par le détecteur correspond à la corrélation des fonctions $f(x,y)$ et $h(x,y)$ au point (0,0). Le déplacement du plan $f(x,y)$, du plan $h(x,y)$, ou de la lentille de projection permet d'obtenir toute l'intégrale de corrélation.

La principale caractéristique de ce processeur est qu'il ne fournit pas une fonction de corrélation bi-dimensionnelle (image), mais un signal temporel (comparable à un signal vidéo) synchronisé avec le balayage utilisé. De ce fait il est plus adapté à un usage du type reconnaissance de forme par autocorrélation (détection d'un maximum d'amplitude dans un signal électrique), qu'au traitement d'image pour lequel il faudrait reconstruire une information bi-dimensionnelle à partir du signal temporel [26].

Ce corrélateur a récemment bénéficié d'une version en optique intégrée [27].

1.2.3.2 Le corrélateur holographique incohérent

Le corrélateur holographique incohérent, dont le principe [28] est schématisé figure 1.8, est en quelque sorte la version en éclairage incohérent du corrélateur de Vander Lugt. Comme lui, il nécessite deux étapes, une pour l'écriture de l'hologramme en éclairage cohérent, et une pour sa relecture en éclairage incohérent. Lors de la phase d'écriture, l'onde de référence doit être plane et monochromatique, issue d'une source laser par exemple, et l'onde irradiant le premier SLM doit provenir de la même source. En revanche, dans l'étape de relecture, la source peut être incohérente, à la fois spatialement et temporellement.

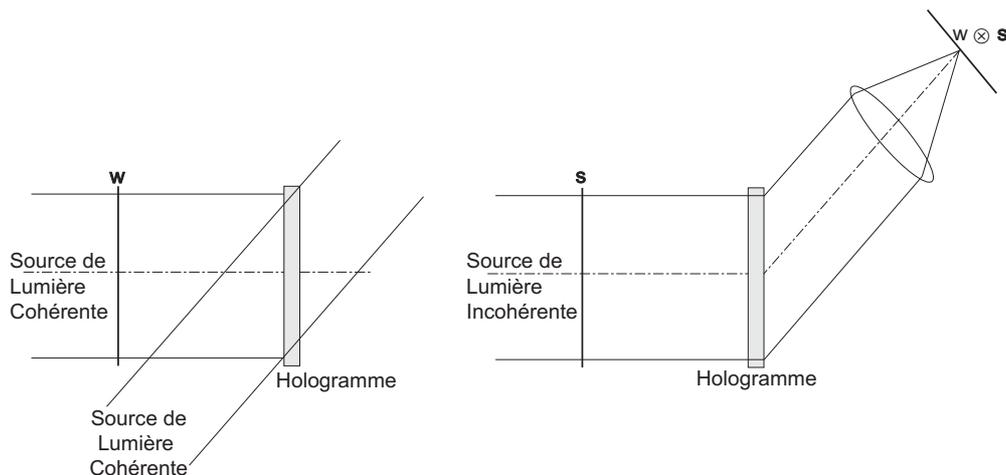


Figure 1.7 : Principe de la corrélation par holographie incohérente. En haut, écriture de l'hologramme en éclairage cohérent. En bas, relecture en éclairage incohérent [13].

En comparaison au corrélateur de Vander Lugt cohérent, le corrélateur holographique incohérent a l'avantage d'être moins sensible au bruit optique et aux désalignements, comme les autres corrélateurs incohérents.

1.2.3.3 Le corrélateur ombroscopique

L'ombroscopie est le montage incohérent le plus largement répandu chez les opticiens. Ce processeur permet d'obtenir le produit de corrélation à deux dimensions de deux plans sans avoir recourt à un quelconque balayage [13]. En outre, un corrélateur ombroscopique repose sur une architecture simple, basée entièrement sur l'optique géométrique (fig. 1.8).

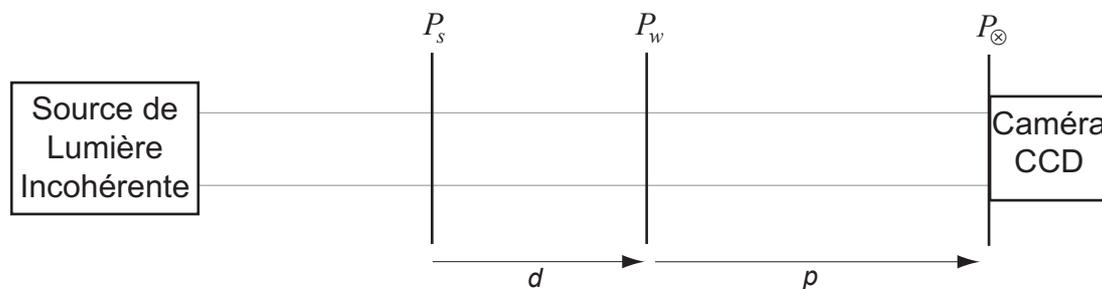


Figure 1.8 : Corrélateur optique incohérent par ombroscopie, montage sans lentille

Le plan P_s est éclairé par une source de lumière incohérente. Son ombre est projetée sur le plan P_w , situé à une distance d . Le plan de corrélation P_{\otimes} se trouve à la distance p de P_w . Il

faut que l'image inscrite sur la première transparence, P_s , soit homothétique de celle inscrite sur la deuxième, P_w , d'un facteur $(d+p)/p$. Sous cette condition, le montage permet de mesurer le produit de corrélation des deux images.

Robertson [29] utilisa le premier ce montage sans lentille pour relever les diagrammes de Patterson de réseaux cristallins. Peu après, Bragg [30] a introduit une lentille derrière la deuxième transparence (fig. 1.9a). Cette configuration a permis d'utiliser des transparences avec un facteur d'échelle identique et ainsi de ramener le plan de corrélation, situé à l'infini, dans le plan focal de la lentille. Mais c'est Meyer-Eppler qui remarqua le premier en 1946 que ces montages pouvaient être utilisés pour réaliser des corrélation bi-dimensionnelles [31]. Environ 30 ans plus tard, Knopp *et al.* ont fait état, dans la référence [32], d'un troisième montage obtenu en plaçant une lentille entre les deux transparences (fig. 1.9b). La corrélation y est mesurée en dehors du plan de focalisation de la lentille.

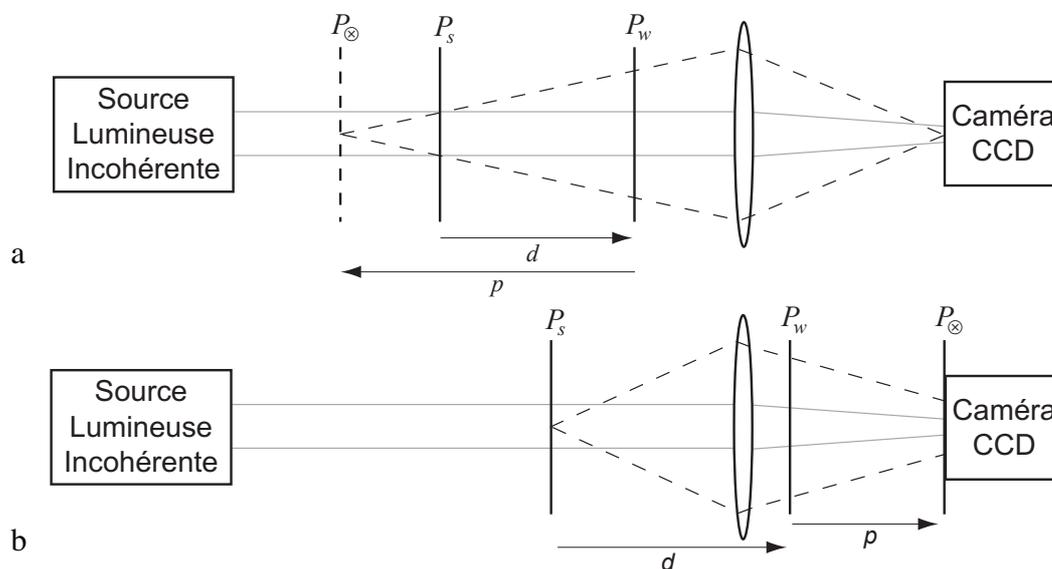


Figure 1.9 : Deux autres architectures classiques du corrélateur ombroscopique. (a) corrélation utilisant la projection angulaire. (b) corrélation n'utilisant pas le plan focal de la lentille [32]

Plus récemment, des versions temps réel de corrélateurs ombroscopiques ont été décrites [33] [34].

La plupart des réalisations en lumière incohérente utilisent des sources monochromatiques pour s'affranchir des effets de la dispersion inhérents aux architectures en lumière blanche. Mais dernièrement, un montage en lumière blanche avec dispersions chromatiques compensées a été validé [35].

Nous ne développons volontairement pas ici certaines solutions de corrélation optique incohérente peu usitées comme le JTC incohérent [36] [37] et la corrélation par synthèse de pupille incohérente [13].

Dans de nombreuses applications, cependant, les objets contenus dans la scène ne peuvent pas être reconnus en cherchant une correspondance directe avec une base de données d'images. Même en restreignant cette base de références à un seul objet, cet objet peut être déformé de tellement de manières différentes qu'il est illusoire et inutile de vouloir référencer toutes ces possibilités (orientation, échelle, ...). C'est pourquoi en reconnaissance des formes

il est parfois nécessaire d'utiliser des opérations plus souples qui, plutôt que de faire de la classification, font de la description, comme la segmentation.

1.3 La Segmentation

Un des principaux objectifs du traitement d'image et de la vision active¹ est de récupérer de manière automatique la forme des objets contenus dans une scène donnée. C'est pourquoi la segmentation d'image, qui s'applique à décomposer l'image en objets fondamentaux, est une des techniques d'analyse d'image les plus utilisées en reconnaissance des formes. L'approche la plus répandue consiste à subdiviser l'image en régions qui correspondent à l'objet et au fond.

Il existe de nombreuses techniques de segmentation [38]. Certaines utilisent uniquement l'histogramme des niveaux de gris², d'autres exploitent les détails spatiaux alors que d'autres font appel à des approches théoriques d'ensembles flous. En fait, on peut échelonner les méthodes allant des plus simples (comme le seuillage et le masquage) aux plus complexes (comme la détection de bord ou de texture [39], ou les algorithmes fonctionnant par croissance ou par division de régions). La segmentation est la plupart du temps aidée par une intervention manuelle ou automatique grâce à des opérations numériques [40]. Par exemple, l'application d'un détecteur de bord constitue souvent une première étape de la segmentation d'une image. Il faut ensuite passer par une seconde étape où l'on extrait les pixels d'intensité maximale de l'image de puissance de contours afin de fermer les contours. La plupart de ces méthodes ne sont pas adaptées pour les environnements bruités.

De nombreux travaux ce sont orientés vers les champs de Markov, ce qui a permis de prendre en compte de manière simple et rigoureuse le fait qu'une image est souvent composée de zones juxtaposées de statistiques différentes. Cette technique a l'avantage d'être robuste au bruit et l'inconvénient d'être gourmande en temps de calcul. Les architectures à réseaux de neurones, qui sont aptes à réaliser des opérations en temps réel à cause de leur capacités de traitement parallèle, ont aussi été appliqués à la segmentation, et ont montré une très bonne résistance au bruit.

Une présentation complète des principales techniques de segmentation nécessite un livre en soi. C'est pourquoi nous invitons le lecteur, désireux d'en savoir plus sur ce vaste domaine qu'est la segmentation, à se référer à des ouvrages spécialisés comme par exemple [41] ou des articles de synthèse comme ceux cités ci-dessus. Pour notre propos et les prochains chapitres, nous classerons les techniques de segmentation en deux catégories : les approches *contour* et les approches *région*, qui sont des expressions couramment utilisées dans la littérature. Les approches *contour* classiques consistent à identifier les transitions d'intensité

¹ Vision active (ou *tracking*) correspond à une opération de reconnaissance des formes dynamique qui suit le déplacement des formes à l'aide de leurs coordonnées dans la scène.

² La littérature à propos de la segmentation d'image en couleur n'est pas aussi riche que celle pour les images à niveaux de gris. Pourtant la couleur est un phénomène de perception important lié au processus de vision humain qui répond aux différentes longueurs d'ondes du spectre électromagnétique visible.

de pixel entre les régions pour définir des bords dans l'image. Les approches *région* les plus courantes divisent l'image en régions distinctes en cherchant la similarité des niveaux de gris des pixels pour grouper des points ayant des propriétés communes. Contrairement aux approches *contour*, les approches *région* permettent donc d'aboutir directement à une partition de l'image (chaque pixel étant affecté à une région unique).

Nous avons vu que la corrélation est une opération qui a donné lieu à la réalisation de nombreux processeurs optique, mais en ce qui concerne les implantations optiques de segmentations, elles sont rares. Veronin *et al.* [42] ont réalisé une segmentation optique qui, au vu des objectifs de la segmentation cités ci-dessus, s'apparente plutôt à une détection de contours. Michael et Arrathoon [43] ont proposé une segmentation en optique numérique d'images à résonance magnétique. Feng *et al.* [44] ont repris les travaux de Veronin *et al.* pour effectuer des segmentations de régions en tenant compte de leur texture. Dernièrement, Barbé et Campos [45] ont réalisé des segmentations en optique analogique, mais les images traitées sont abstraites et limitées à des objets dont les textures sont des lignes parallèles différemment orientées et espacées.

1.4 Conclusion

Le premier chapitre, essentiellement bibliographique, nous a permis de faire le point sur les diverses techniques utilisées en reconnaissance des formes que ce soit de manière optique ou numérique. Une attention particulière a été mise sur la corrélation et la segmentation d'images. Dans le prochain chapitre, nous approfondirons une technique de segmentation de plus haut niveau que celles décrites précédemment, faisant appel à des contours actifs.

Par ailleurs, nous avons constaté que la corrélation est une opération courante en optique contrairement à la segmentation. Pourtant, dans le domaine de la reconnaissance de formes la technique de *description* qu'est la segmentation est une opération complémentaire de la corrélation, utilisée pour la *classification*. Un de nos objectifs est de proposer dans ce mémoire une nouvelle technique de segmentation en optique analogique.

1.5 Références Bibliographiques

1. M. Coster et J.-L. Chermant, "Précis d'analyse d'images", Presses du CNRS, Paris, 560 p. (1989).
2. J. Figue, "Etude de méthodes de corrélation optimales avec apprentissage pour la reconnaissance des formes, et application à la détermination d'attitude d'avions", Thèse, Paris VI (1993).
3. F. Christnacher, "Etude de l'adaptation d'un système optique de reconnaissance de formes à un environnement sévère", Thèse, Université de Haute Alsace (1992).

4. J.W. Cooley et J.W. Tukey, "An algorithm for machine calculation of complex Fourier series", *Math. Computation* **19**, 297-301 (1965).
5. J.Y. Jau, Y. Fainman et S.H. Lee, "Comparison of artificial neural networks with pattern recognition and image processing", *Appl. Opt.* **28**, 302 (1989).
6. D. Casasent, "Materials and devices for coherent optical computing", in *Optical Information Processing*, édité par Y.E. Nesterikhin, G.W. Stroke & W.E. Kock, Plenum Press, 13-45 (1976).
7. E. Barrier, "Relais optiques pour traitement d'images par processeur hybride en lumière cohérente. Reconnaissance de caractères à l'aide d'un filtre optimal unique de transcodage, résultats expérimentaux", Thèse, Université de Haute Alsace (1980).
8. G. Moddel, "Ferroelectric liquid crystal spatial light modulators", in *Spatial light modulator technology: materials, devices, and applications*, édité par U. Efron, Marcel Dekker, Inc., 287-359 (1995).
9. P.V.C. Hough, "Method and means for recognizing patterns", Brevet (U.S.) n° 3.069.654 (1962).
10. S. Laut, F. Xu, P. Ambs et Y. Fainman, "A matrix of 64x64 computer generated holograms for an optical Hough transform processor", in *International Symposium Optical Information Science and Technology*, Moscou, édité par A. Mikaelian, SPIE **3402**, 22-31 (1998).
11. B.V.K. Vijaya Kumar, "Optical pattern recognition", in *Real-Time Optical Information Processing*, édité par B. Javidi & J.L. Horner, Academic Press, 39-88 (1994).
12. A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering", *IEEE Trans. Inf. Theory* **10** (2), 139-145 (1964).
13. V. Laude, "Corrélation optique optimale et application aux architectures cohérentes et incohérentes", Thèse, Paris XI Orsay (1994).
14. P. Réfrégier, "Théorie du signal", Masson, Paris, (1993).
15. S.P. Almeida et G. Indebetouw, "Pattern recognition via complex spatial filtering", in *Applications of optical Fourier transforms*, édité par H. Stark, Academic Press, Inc., 41-87 (1982).
16. L. Bigué, "Reconnaissance des formes en temps réel par voie optique : étude comparative d'implantations optiques de filtres de corrélation. Application au corrélateur optique à transformée de Fourier conjointe.", Thèse, Université de Haute Alsace (1996).
17. A. Maréchal et P. Croce, "Un filtre de fréquences spatiales pour l'amélioration du contraste des images optiques", *C. R. Acad. Sci.* **237** (12), 607-609 (1953).
18. P.M. Duffieux, "L'intégrale de Fourier et ses applications à l'optique", Masson, (1970).

19. J.W. Goodman, "Introduction to Fourier optics", McGraw-Hill, San Francisco, (1968).
20. F.T.S. Yu, Q.W. Song, Y.S. Cheng et D.A. Gregory, "Comparison of detection efficiencies for VanderLugt and joint transform correlators", *Appl. Opt.* **29** (2), 225-232 (1990).
21. B. Javidi, "Comparison of nonlinear joint transform correlator and nonlinear matched filter based correlator", *Opt. Commun.* **75**, 8 (1990).
22. C.S. Weaver et J.W. Goodman, "A technique for optically convolving two functions", *Appl. Opt.* **5** (7), 1248-1249 (1966).
23. G.L. Rogers, "Noncoherent optical processing", S.B. Stanley éd., Wiley, New York, 169 p. (1977).
24. L.M. Zerbino et J.P. Goedgebuer, "2-D wavelength multiplex correlator", *Opt. Commun.* **55** (4), 248-252 (1985).
25. M.A. Monahan, K. Bromley et R.P. Bocker, "Incoherent optical correlators", *Proc. IEEE* **65** (1), 121-129 (1977).
26. B. Thirion, "Filtrage optique en temps réel : utilisation d'un imageur à cristal liquide dans un corrélateur cohérent", Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg - Université de Haute Alsace, Mulhouse (1980).
27. W. Eckert, V. Arrizon, S. Sinzinger et J. Jahns, "Compact planar-integrated optical correlator for spatially incoherent signals", *Appl. Opt.* **39** (5), 759-765 (2000).
28. E.G. Paek, A. Von Lehmen, J.R. Wullert II et R. Martin, "Compact and robust incoherent holographic correlator using a surface-emitting laser-diode array", *Opt. Lett.* **16** (12), 937-939 (1991).
29. M.M. Robertson, "Interpretation of Patterson diagrams", *Nature* **152**, 411-412 (1943).
30. L. Bragg, "Lightning calculations with light", *Nature* **154**, 69-72 (1944).
31. W. Meyer-Eppler, "Die funktionalanalytische Behandlung des Schattenproblems", *Optik* **1**, 465-474 (1946).
32. J. Knopp et M.F. Becker, "Generalized model for noncoherent optical convolvers and correlators", *Appl. Opt.* **17** (7), 984-985 (1978).
33. S. Jutamulia, T.W. Lin et F.T.S. Yu, "Real-time noncoherent correlator using liquid crystal television", *Opt. Commun.* **64** (2), 115-119 (1987).
34. K. Raj, D.W. Prather, R.A. Athale et J.N. Mait, "Performance analysis of optical shadow-casting correlators", *Appl. Opt.* **32** (17), 3108-3112 (1993).
35. P. Andrés, *et al.*, "All-incoherent dispersion-compensated optical correlator", *Opt. Lett.* **24** (19), 1331-1333 (1999).
36. Y.-S. Cheng, "Analysis of a white-light joint-transform correlator with application to color-object detection", *Opt. Commun.* **99** (3,4), 252-263 (1993).

37. T. Nomura, Y. Yoshimura, K. Itoh et Y. Ichioka, "Incoherent-only joint transform correlator", *Appl. Opt.* **34** (8), 1420-1425 (1995).
38. N.R. Pal et S.K. Pal, "A review on image segmentation techniques", *Pattern Recognition* **26** (9), 1277-1293 (1993).
39. T.R. Reed, "A review of recent texture segmentation and feature extraction techniques", *CVGIP: Image Understanding* **57** (3), 359-372 (1993).
40. O. Monga, "Segmentation d'images : où en sommes nous ?", INRIA, rapport 1216, ISSN 0249-6399 (1990).
41. J.P. Cocquerez et S. Philipp, "Analyse d'images: filtrage et segmentation", Masson, Paris, (1995).
42. C. Veronin, *et al.*, "Optical image segmentation using neural-based wavelet filtering techniques", *Opt. Eng.* **31** (2), 287-294 (1992).
43. N. Michael et R. Arrathoon, "Optoelectronic parallel watershed implementation for segmentation of magnetic resonance brain images", *Appl. Opt.* **36** (35), 9269-9286 (1997).
44. W. Feng, Y. Yan, G. Huang et G. Jin, "Micro-optical multiwavelet element for hybrid texture segmentation processor", *Opt. Eng.* **37** (1), 185-188 (1998).
45. J. Barbé et J. Campos, "Image segmentation with a white light optical correlator", in *18th Congress of the International Commission for Optics : Optics for the Next Millenium*, San Francisco, SPIE **3749**, 775-776 (1999).

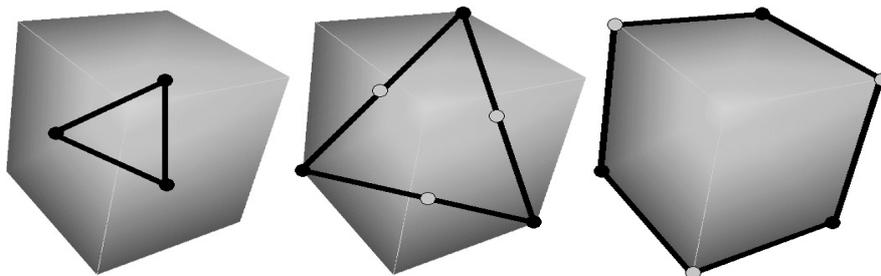
Chapitre 2

Segmentation par Contours Actifs

Dans ce chapitre nous présentons la méthode de segmentation par contours actifs qui vise à segmenter un objet unique dans une scène. Les principales limitations de la méthode originelle sont énumérées ainsi que les solutions qui ont été proposées pour s'en affranchir. Puis nous développons dans une deuxième partie les contours actifs statistiques et plus particulièrement le snake SIRS en exposant son principe, ses différents algorithmes et les améliorations qui lui ont été apportées.

2.1 Contours Actifs

Un contour actif est une courbe du plan qui, à partir d'un état initial donné, a la propriété de se déformer. La technique des contours actifs consiste à déformer cette courbe afin de l'adapter au contour apparent d'un objet (dû à sa perception bidimensionnelle). Le contour actif se déforme, en accord avec l'optimisation d'un critère, pour converger vers un état final, qui sera la segmentation de l'image (fig. 2.1). L'image est alors séparée en deux zones correspondant à l'objet à l'intérieur du contour et le fond à l'extérieur.



*Figure 2.1 : Principe de la segmentation par contour actif.
Initialisation du contour, convergence et résultat final.*

L'intérêt majeur de cette approche est qu'elle exploite un contour déjà fermé et la connexité n'est plus à vérifier lorsque que l'opération est terminée, contrairement aux détecteurs de bord traditionnels. C'est une opération qui permet d'obtenir les coordonnées du contour d'un objet, sa surface et sa position, contrairement aux filtres classiques de détection de contours qui sont des opérations traitant l'image globalement. En fait, une fois que le contour s'est stabilisé en convergeant vers la frontière recherchée, il ne reste que la dernière étape de la métrologie : la reconnaissance de la forme grâce à ses descripteurs (surface, périmètre, ...). C'est pourquoi cette opération est souvent considérée comme une opération de *haut niveau* contrairement aux segmentations plus classiques.

Il est important de noter que ce type d'approche est particulièrement bien adapté à la segmentation d'un objet dans une image, voire dans une séquence d'images. C'est pourquoi, au cours de ces dernières années, les contours actifs sont devenus très populaires. Leur principe général a été décliné de multiples façons en diversifiant les critères à optimiser, en définissant différents modèles de contour et différentes stratégies d'optimisation du critère.

2.1.1 Le modèle classique

Le premier modèle de contour actif a été introduit par Kass *et al.* en 1988 [1]. Les auteurs parlent de *snake* (*serpent* en français) en référence aux ondulations subies par le contour lors de sa convergence. Il se présente sous la forme d'une courbe dans le plan $C=[x(t), y(t)]$, continue, fermée ou non, paramétrée par son indice curviligne t .

On utilise le principe des multiplicateurs de Lagrange pour modéliser le snake en terme d'énergie (énergie cinétique et énergie potentielle due aux forces internes et externes). Le snake s'équilibre, s'immobilise, lorsqu'il minimise son énergie. Le critère à optimiser est une somme pondérée de trois énergies qui traduisent des forces de natures différentes et parfois contradictoires s'exerçant sur le snake.

$$E(C) = E_{interne}(C) + \lambda_1 E_{externe}(C) + \lambda_2 E_{interactive}(C) \quad (2.1)$$

En minimisant cette somme pondérée, on parvient à une solution offrant un bon compromis entre les contraintes.

2.1.1.1 Energie interne

L'énergie interne permet de contrôler les propriétés du snake et régularise la solution au sens des problèmes mal posés. Le snake est considéré comme un matériau déformable caractérisé par ses facultés d'allongement et de courbure. Comme en mécanique, on définit alors sa rigidité locale $\alpha(t)$ et son élasticité locale $\beta(t)$ pour écrire l'énergie sous la forme :

$$E_{interne}(C) = \int_{t_2}^{t_1} \alpha(t) \left[\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 \right] + \beta(t) \left[\left(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right)^2 \right] dt \quad (2.2)$$

2.1.1.2 Energie externe

L'énergie externe traduit les forces exercées par l'image à segmenter sur le contour actif et impose une attache aux données. Kass *et al.* ont proposé d'utiliser :

$$E_{\text{externe}}(C) = -\int_{t_0}^{t_1} |\nabla I(x(t), y(t))|^2 dt \quad (2.3)$$

où t_0 et t_1 sont les abscisses curvilignes, éventuellement confondues, des extrémités de la courbe. ∇I représente l'image de puissance de contours obtenue après application d'un détecteur de bord sur l'image $I(x,y)$. Pour minimiser cette énergie, le contour actif a tendance à recouvrir les lignes de fortes intensités dans l'image ∇I . Cette méthode relève donc de l'approche contour puisque le snake agit comme un extracteur de bord sur l'image de puissance de contours.

2.1.1.3 Energie interactive

Ce dernier terme est présent dans les méthodes de segmentation semi-automatique où l'utilisateur contrôle le résultat en temps réel. Il lui est alors possible d'introduire de manière interactive des informations de haut niveau telles que la présence de frontières préalablement détectées ou de points de passage obligé, par l'intermédiaire de potentiels stimulant des forces d'attraction-répulsion sur le contour actif. Cette énergie sera laissée de côté dans les problèmes de segmentation automatique.

2.1.1.4 Stratégie d'optimisation

En adoptant une approche de type modèle stationnaire, la minimisation de la fonctionnelle (2.1) se ramène à la résolution d'une équation aux dérivées partielles (équation d'Euler-Lagrange). La résolution numérique passe par une phase de discrétisation du problème et on est finalement amené à résoudre un système d'équations linéaire. Comme la matrice du système est singulière, il ne peut être résolu directement [2] et il est nécessaire de mettre en œuvre un algorithme de résolution itératif pour approcher la solution.

2.1.2 Limites et améliorations

Dans [2], Berger a mis en évidence la difficulté du choix des divers paramètres, ainsi que l'influence prépondérante de l'initialisation sur la convergence du contour actif. En effet, l'utilité des premiers contours actifs a été limitée à cause de ces problèmes associés à l'initialisation et à la convergence difficile au niveau des bords concaves. Les premiers snakes voyaient l'évolution des contours arrêtée dès qu'ils rencontraient le premier obstacle [3]. En outre, Amini *et al.* [4] ont signalé que la méthode pouvait s'avérer numériquement instable et que les points avaient tendance à s'entasser sur certaines portions du contour obtenu par extraction de contour.

Par ailleurs, avec le modèle classique de contours actifs [1], le critère à minimiser est calculé sur une image de contours. Pour cette raison, ce modèle peut être classé parmi les approches *contour*. L'image de contours est obtenue par application de l'opérateur gradient sur

l'image à segmenter. Ce type de filtrage donne des résultats satisfaisants en extrayant la plupart des frontières. Ainsi, le contour actif appliqué à cette image prétraitée va avoir tendance à recouvrir les lignes de fort gradient et par la même, localiser les contours dans l'image. Les opérateurs gradients sont bien adaptés à une certaine classe de problèmes, mais peuvent être mis en échec en présence de fort bruit et peuvent devenir totalement inefficaces, comme nous pouvons le constater dans l'illustration (2.2). Avec une telle opération, le contour obtenu au préalable est rarement continu et le résultat final présente toujours plusieurs contours parmi lesquels le contour actif devra choisir le bon.

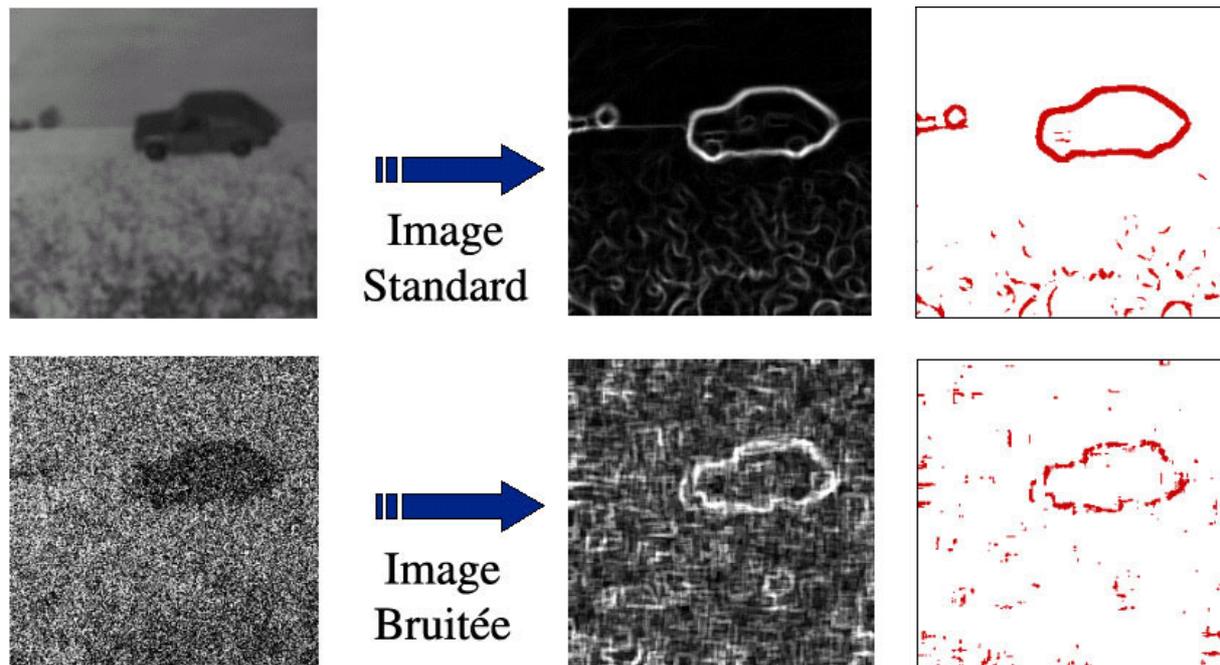


Figure 2.2 : Détection de contour effectuée sur une image normale en haut puis sur une image bruitée en bas. A l'extrême droite est montré le résultat d'un seuillage.

De nos jours, les méthodes classiquement usitées pour segmenter de telles images utilisent des détecteurs de bords particuliers, adaptés au caractère spécifique des tavelures (*speckle*) et autres bruits propres aux applications considérées. Une étude sur la précision spatiale de ces détecteurs a été menée par Germain [5], et a montré que ces détecteurs fournissent une estimation biaisée de la localisation d'un bord lorsque celui-ci n'est pas "idéal". De manière générale, le bord est localisé dans la région la plus sombre et ce biais augmente avec le contraste entre les deux régions.

L'introduction des contours actifs a suscité un vif intérêt dans la communauté des traiteurs de l'image et de nombreuses études ont permis des améliorations remarquables du modèle initial. Afin de diminuer la sensibilité à l'initialisation, une force de pression a été proposée pour "gonfler" le snake comme un ballon [6]. Cette "force ballon" permet d'améliorer la convergence du snake vers son objectif mais rend moins facile l'obtention du point d'équilibre.

Plus récemment, des modèles basés sur la théorie de l'évolution de courbes planes et des équations aux dérivées partielles géométriques sont apparues. L'arrêt de la convergence ne se fait plus en cherchant un point d'équilibre mais lorsqu'une certaine "fonction d'arrêt" s'annule.

Les contours actifs géodésiques reposent sur ce principe et permettent la segmentation d'objets avec une topologie complexe[5].

2.1.3 Contour actif et approche région

L'approche région, une évolution dans les contours actifs, exploite l'intérieur et l'extérieur de la région définies par le contour actif. Ces approches permettent de résoudre des problèmes pour lesquels il est difficile d'extraire les contours de l'objet. Cela correspond à des images qui sont fortement bruitées, floues... Ronfard a développé un modèle où le contour actif est déformé sous l'action de forces, normales au contour dont les intensités sont liées à une mesure de similitude entre régions [7]. La similitude entre deux régions R_1 R_2 est évaluée à l'aide de la *distance de Ward* $D(R_1, R_2)$, qui dans le cas étudié se résume à :

$$D[R_1, R_2] = \hat{\sigma}_{R_1 \cup R_2}^2 - \hat{\sigma}_{R_1}^2 - \hat{\sigma}_{R_2}^2 \quad (2.4)$$

où $\hat{\sigma}_{R_2}^2$ représente la variance empirique des niveaux de gris dans la région R . L'intensité de la force s'écrit alors :

$$D[R_{in}, \delta R] - D[R_{out}, \delta R] \quad (2.5)$$

où R_{in} et R_{out} représentent les régions intérieure et extérieure au contour et δR est une petite région dans le voisinage du point d'application de la force. Selon le signe de l'intensité, la force peut donc dilater ou rétracter le contour actif. La taille de δR , le nombre de points sur le contour et l'amplitude de déplacement de ces points sont des paramètres clés dans cette méthode.

Parmi les méthodes de contour actif basées sur l'approche région, deux approches peuvent également être distinguées. Dans la première, que l'on vient d'expliquer, toute l'image est prise en compte alors que dans la seconde les paramètres statistiques de l'objet sont estimés localement avec le but de définir des solutions optimales pour un modèle d'image donné [8] [9] [10].

2.2 Snake Basé sur les Propriétés Statistiques des Régions

L'imagerie active est une technique en plein essor, dans laquelle le système fournit lui-même la source d'illumination de la scène à imager. L'image est alors créée à partir de la rétro-diffusion du rayonnement émis par la source d'illumination. En choisissant judicieusement la longueur d'onde de l'illumination, il est désormais possible d'imager des scènes jusque là inaccessibles. C'est le cas notamment de l'imagerie SAR (*Synthetic Aperture Radar*), qui utilise un rayonnement micro-ondes qui traverse les nuages, permettant l'acquisition de zones géographiques placées en permanence sous une couverture nuageuse. L'imagerie cohérente va encore plus loin puisqu'elle permet, en plus de la mesure de l'intensité, une mesure temporelle qui donnera une information sur la distance de la scène observée, ainsi que la vitesse des objets qui s'y déplacent.

Cependant, les imageurs actifs présentent également quelques inconvénients. Les images obtenues en lumière cohérente sont perturbées par du bruit de tavelure, qui dégrade la qualité des images de façon conséquente. Pour obtenir des algorithmes efficaces, il est nécessaire de prendre en compte les caractéristiques de ce type de bruit. Les algorithmes statistiques sont bien adaptés à ce problème [11]. Si la segmentation s'attache aux régions, l'approche statistique est la plus robuste (par opposition à la géométrique, limitée en complexité et en bruit) [12]. Elle identifie, selon leur texture qui correspond à leur signature statistique, les différentes régions contenues dans une image.

Notons que de telles méthodes, qui sont basées sur une approche région, nécessitent un grand nombre de calcul puisque les calculs sont effectués sur une région (alors qu'ils sont effectués sur des contours dans l'approche contour) [13]. Une autre remarque doit être faite. Parmi les approches régions, il y a des approches qui supposent que les paramètres des lois statistiques sont connus alors que d'autres approches supposent qu'aussi bien le contour que les paramètres statistiques sont inconnus. Ces dernières approches sont très intéressantes car les algorithmes qui en découlent nécessitent généralement moins de paramètres à régler que les autres techniques de segmentation. Cependant, dans de nombreux cas, les méthodes d'optimisation numériques nécessaires à leur mise en œuvre requièrent des temps de calcul plus longs. Ce point se comprend bien puisque les paramètres statistiques inconnus doivent être estimés conjointement à l'optimisation des critères de segmentation. Cependant, dans certains cas, une expression analytique des paramètres statistiques peut être obtenue. Cela évite les problèmes relatifs à l'estimation conjointe. Récemment, une telle technique de segmentation développée dans le cadre de la théorie statistique de l'estimation a été proposée [14]. Ces travaux ont permis de développer des algorithmes de segmentation permettant de segmenter un objet apparaissant sur un fond lorsque les niveaux de gris (de l'objet et du fond) sont décrits par des statistiques blanches et gaussiennes. Ces travaux sont issus de recherches préalables sur les bruits non recouvrants [15] introduits dans le contexte du calcul de filtres de corrélation. Des algorithmes statistiques avaient alors été utilisés avec succès pour localiser une cible de forme connue [16].

Réfrégier *et al.* ont alors défini plusieurs nouveaux critères à optimiser et de nouvelles stratégies d'optimisation. Pour un modèle d'image donné, leur contour actif présente des propriétés d'optimalité pour l'estimation de la frontière d'un objet et sont même plus précis et plus robustes que les précédents dans de nombreux cas jugés difficiles [5]. Les algorithmes de segmentation du snake SIRS (*Statistical Independent Region Segmentation*) ont été validés de manière numérique. Ce sont des travaux qui ont servi de base à cette thèse.

2.2.1 Principe du snake SIRS

Nous considérons une description polygonale de la forme ; un contour quelconque est donc défini par le nombre et la position des nœuds du polygone le décrivant. \mathbf{w} correspond à la fenêtre, ou au "polygone actif", et contient les coordonnées des nœuds qui sont situés à ses sommets (un nœud fait partie de la fenêtre et est par conséquent blanc). Pour adapter la forme de \mathbf{w} à la forme de l'objet, la méthode SIRS, basée sur un algorithme stochastique, consiste à déplacer aléatoirement les nœuds du polygone de façon à optimiser un critère.

Dans la suite, on note $\mathbf{s} = [s_i, i \in [1, N]]$ le vecteur contenant les N pixels de l'image observée. L'hypothèse fondamentale est que l'image est constituée de deux régions indépendantes décrites par une même loi de probabilité de la famille exponentielle avec des paramètres différents. Une région correspond à l'*objet* qu'il faut segmenter et la région complémentaire est qualifiée de fond. La région objet est identifiée par un vecteur binaire \mathbf{w} tel que :

$$\begin{cases} w_i = 1 & \text{si le pixel d'indice } i \text{ appartient à l'objet} \\ w_i = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

\mathbf{w} réalise donc une partition de l'image en deux régions (fig. 2.3b) : l'objet $\Omega_a = \{i \mid w_i = 1\}$ et le fond $\Omega_b = \{i \mid w_i = 0\}$ constituées respectivement de $N_a(\mathbf{w})$ et $N_b(\mathbf{w})$ pixels.

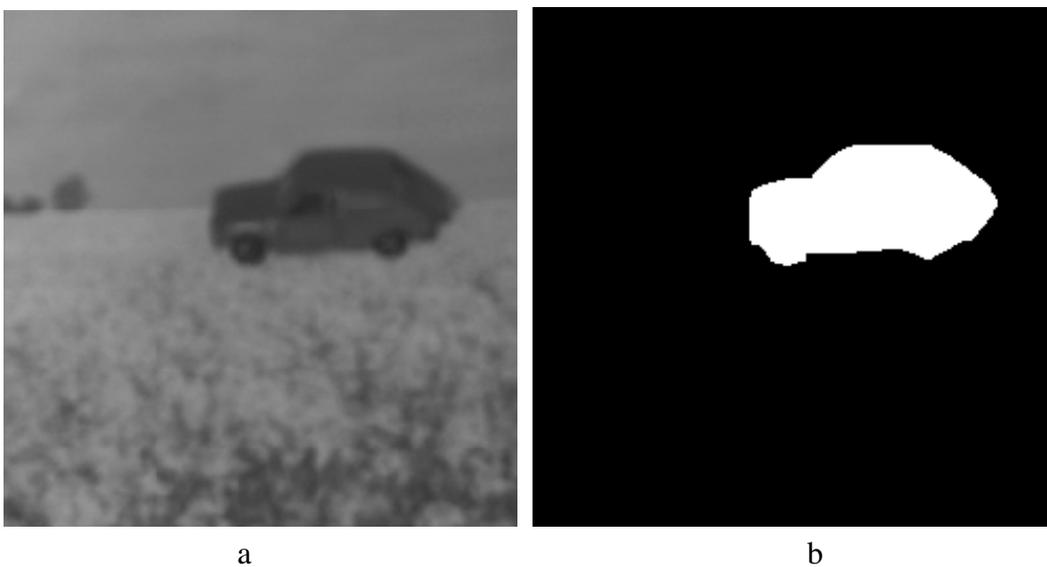


Figure 2.3 : (a) la scène, \mathbf{s} . (b) la fenêtre binaire, \mathbf{w} . Nous pouvons définir l'objectif de la segmentation d'un objet comme étant la décomposition de l'image en 2 régions : une région objet et une région fond.

On suppose ensuite que les pixels de l'objet (respectivement du fond) sont issus d'une réalisation d'un champ aléatoire homogène \mathbf{a} (respectivement \mathbf{b}) et que les champs \mathbf{a} et \mathbf{b} sont statistiquement indépendants. Le niveau de gris du pixel i de l'image peut donc s'écrire :

$$s_i = a_i w_i + b_i (1 - w_i) \quad (2.7)$$

L'objectif est de capturer l'objet dans la fenêtre. Chaque région a une répartition des niveaux de gris qui la caractérise. La méthode SIRS élaborée par Chesnaud *et al.* [17] propose de différencier les régions en tenant compte de leur surface, de l'écart type et de la moyenne de leur histogramme. Grâce à ces informations, le snake, qui est un polygone formé de plusieurs nœuds, peut se déformer en s'adaptant le mieux possible à la forme de l'objet à segmenter. Chacun des nœuds est déplacé de manière stochastique pour déformer le contour. Si la déformation se rapproche de la forme de l'objet, le critère combinant écart type, surface et moyenne est minimisé. Sinon, le nœud s'est éloigné du contour de l'objet et la déformation n'est pas prise en compte.

2.2.2 Critères à optimiser

Nous résumons en partie cette section d'après [18] où le lecteur trouvera une description plus exhaustive des différents critères.

Plusieurs critères ont été définis [17] pour segmenter différents types d'image. En effet, les images réelles sont tellement différentes les unes des autres qu'il est, aujourd'hui, irréaliste d'espérer obtenir un algorithme de segmentation unique capable de toutes les segmenter. Le choix de l'algorithme à utiliser se fait en fonction du domaine d'utilisation du snake et des propriétés statistiques des images à traiter.

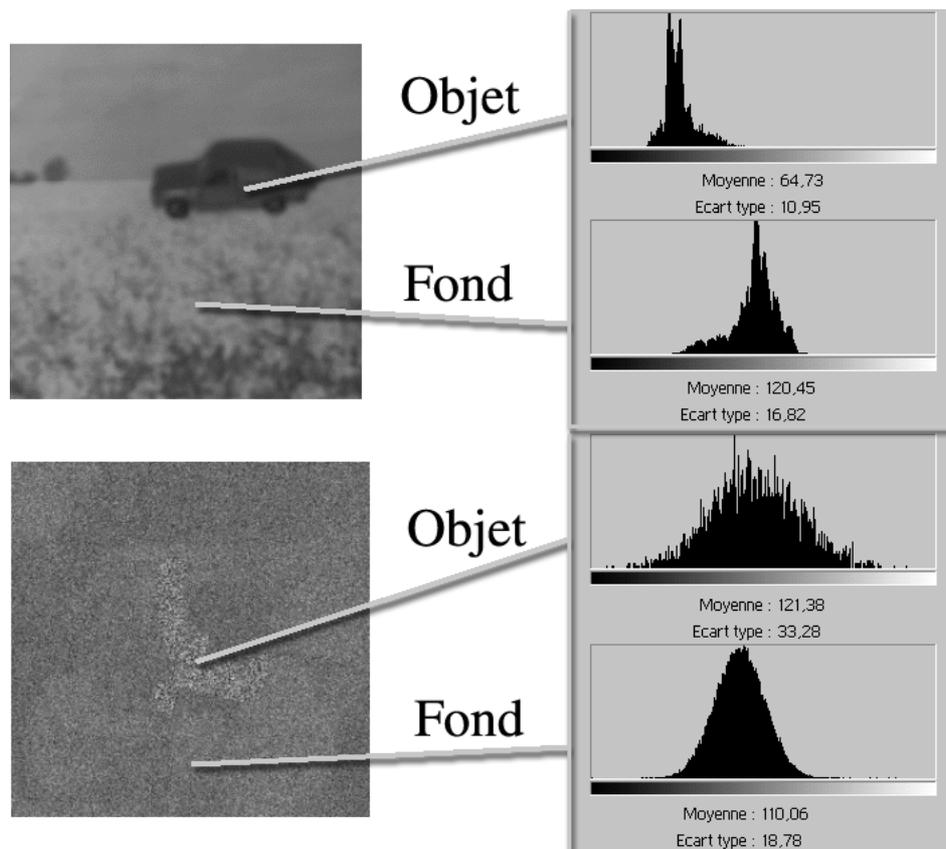


Figure 2.4 : Caractéristiques statistiques de différentes régions. En haut : scène de type Gamma d'une voiture dans un champ. En bas : scène de type Gauss d'un aigle noyé dans du bruit gaussien

On voit par exemple dans la figure (2.4) que l'image de la voiture contient un objet sombre dans un fond clair tandis que l'image de l'aigle contient deux régions sensiblement proches en moyennes de niveaux de gris le (tableau 2.1). En revanche, il est possible de différencier les régions dans l'image de l'aigle au moyen de leurs écarts types.

		Voiture	Aigle
FOND	Moyenne	120	110
	Ecart type	17	19
OBJET	Moyenne	65	121
	Ecart type	11	33

Tableau 2.1 : Caractéristiques statistiques de les images de la voiture et de l'aigle.

La voiture est une image qui se segmente plutôt en tenant compte des moyennes, tandis que l'aigle se segmentera plus facilement en tenant compte des écarts types. Par conséquent la voiture se segmentera avec l'algorithme Gamma et l'aigle avec l'algorithme Gauss.

Les images peuvent toutes être décrites par des fonctions de densité de probabilité. La plupart des situations réalistes sont régies par les lois de la famille exponentielle, qui englobe les distributions de Bernoulli, Gamma, Gaussiennes, Poisson, Rayleigh ainsi que d'autres distributions statistiques bien connues. On peut notamment citer les exemples suivants :

- loi de Gauss : cas des images optroniques,
- loi Gamma : cas des images SAR (*Synthetic Aperture Radar*) en raison du phénomène de tavelure,
- loi de Rayleigh : cas des images médicales acoustiques,
- loi de Poisson : cas des images astronomiques à faible flux de photons,
- loi de Bernoulli : cas des images binaires.

Les densités de probabilité appartenant à la famille des lois exponentielles peuvent être définies par l'équation :

$$P^\mu(x) = k(x) \exp[\alpha(\mu) \cdot \mathbf{f}(x) + \beta(\mu)] \quad (2.8)$$

où $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T$ est le vecteur des paramètres de la densité de probabilité, $k(x)$ est une fonction scalaire de x alors que $\alpha(\mu)$ et $\mathbf{f}(x)$ sont respectivement les p composantes du vecteur μ et x .

La loi Gamma [19] suppose que les distributions de niveaux de gris décrivant l'objet et le fond de la scène sont caractérisées par des densités de probabilité dites Gamma, c'est-à-dire que l'objet est plus clair ou plus sombre que le fond. Nous proposons d'expérimenter l'implantation du processeur optoélectronique pour cette loi qui semble être la loi la plus intuitive pour différencier des objets dans une scène en niveaux de gris. Le critère à minimiser est alors :

$$J(w, s) = N_a(w) \log m_a(w) + N_b(w) \log m_b(w) \quad (2.9)$$

avec

$$m_a(w) = \frac{1}{N_a(w)} [s \otimes w]_0 \quad (2.10)$$

et

$$m_b(\mathbf{w}) = \frac{1}{N_b(\mathbf{w})} [s \otimes \mathbf{w}]_0 \quad (2.11)$$

où \mathbf{s} correspond à la scène composée de N pixels, \mathbf{w} représente la fenêtre binaire qui vaut 1 à l'intérieur et 0 à l'extérieur. Le périmètre de la surface où \mathbf{w} vaut 1 correspond au contour actif. $N_a(\mathbf{w})$ est le nombre de pixels à l'intérieur de la fenêtre. \otimes symbolise un calcul de corrélation et l'indice 0 associé indique qu'on évalue cette fonction à l'origine.

Notre objectif est d'implanter optiquement le calcul de la corrélation contenu dans les équations (2.10) et (2.11) qui font partie du calcul du critère à optimiser. Il est à noter d'une part que le plan de la corrélation n'est pas nécessaire dans son ensemble, la valeur centrale est suffisante, et d'autre part que la segmentation peut avoir lieu si le contraste entre l'objet et le fond est suffisant. Ruch a déterminé ce *contraste minimal* pour différentes résolutions des la scène [20].

Les autres lois étudiées dans le cadre du snake SIRS ont débouché sur les critères suivants :

Le critère de Gauss :

$$J(\mathbf{w}, \mathbf{s}) = N_a(\mathbf{w}) \log[\hat{\sigma}_a(\mathbf{w})] + N_b(\mathbf{w}) \log[\hat{\sigma}_b(\mathbf{w})] \quad (2.12)$$

avec

$$\hat{\sigma}_a(\mathbf{w}) = \frac{1}{N_a(\mathbf{w})} [s^2 \otimes \mathbf{w}]_0 - \frac{1}{N_a(\mathbf{w})} [s \otimes \mathbf{w}]_0^2 \quad (2.13)$$

et

$$\hat{\sigma}_b(\mathbf{w}) = \frac{1}{N_b(\mathbf{w})} \left[\sum_{i=1}^N s_i^2 - (s^2 \otimes \mathbf{w})_0 \right] - \frac{1}{N_b^2(\mathbf{w})} \left[\sum_{i=1}^N s_i - (s \otimes \mathbf{w})_0 \right]^2 \quad (2.14)$$

Comme nous l'avons vu à la figure (2.4), la loi Gauss s'adresse à des images difficiles, où l'objet est difficile à différencier du fond à l'œil nu. Alors que la loi Gamma prend en compte les moyennes des deux régions, la loi Gauss tient compte des écarts types. Le temps de calcul avec la loi Gauss est certes plus long (éq. 2.12-14), mais elle s'avère plus robuste.

Le critère de Poisson[♦] :

$$J(\mathbf{w}, \mathbf{s}) = N_a(\mathbf{w}) \cdot m_a(\mathbf{w}) \cdot \log m_a(\mathbf{w}) + N_b(\mathbf{w}) \cdot m_b(\mathbf{w}) \cdot \log m_b(\mathbf{w}) \quad (2.15)$$

Le critère de Bernoulli[♦] :

$$J(\mathbf{w}, \mathbf{s}) = N_a(\mathbf{w}) [m_a(\mathbf{w}) \log m_a(\mathbf{w}) + (1 - m_a(\mathbf{w})) \log(1 - m_a(\mathbf{w}))] + N_b(\mathbf{w}) [m_b(\mathbf{w}) \log m_b(\mathbf{w}) + (1 - m_b(\mathbf{w})) \log(1 - m_b(\mathbf{w}))] \quad (2.16)$$

[♦] avec m_a et m_b respectivement identiques aux équations (2.10) et (2.11)

Le critère de Rayleigh :

$$J(w, s) = N_a(w) \log m_a(w) + N_b(w) \log m_b(w) \quad (2.17)$$

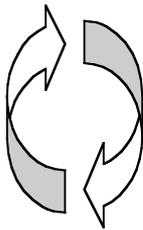
avec
$$m_a(w) = \frac{1}{N(w)} [s^2 \otimes w]_0 \quad (2.18)$$

et
$$m_b(w) = \frac{1}{N_b(w)} \left[\sum_{i=1}^N s_i^2 - (s^2 \otimes w)_0 \right] \quad (2.19)$$

2.2.3 Stratégie de convergence

Différentes stratégies itératives d'optimisation de critère ont été proposées pour minimiser le critère de segmentation. L'algorithme de base pour la minimisation du critère J suit cette structure :

- Initialisation du contour et calcul de J (en fonction de **s** et **w**)
- Répéter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration en ayant fait le tour des nœuds :



déplacer un nœud de manière stochastique

calculer le J_temporaire pour la nouvelle fenêtre

si J_temporaire est plus petit que J, valider la déformation,

sinon annuler la déformation.

Connaissant la forme initiale (notée w_0), cette méthode itérative permet de déterminer la forme pour une itération t quelconque (la forme est alors notée w_t) : à l'itération $t+1$, une nouvelle forme, notée w_{t+1} , est générée en déplaçant un des nœuds de la forme w_t dans une direction aléatoire avec une amplitude fixée. La déformation sur ce nœud est acceptée si la vraisemblance de la forme w_{t+1} est supérieure à celle de la forme w_t , c'est-à-dire si le critère J est minimisé. Dans le cas contraire, la déformation est rejetée, et on déplace le prochain nœud. Il faut noter que cette méthode d'optimisation est empirique car si la vraisemblance est une fonction non convexe, il se peut que le minimum atteint soit un minimum local.

Les équations des critères présentées au paragraphe précédent ne sont en général pas convexes et présentent donc de nombreux minima locaux. Des algorithmes tels que celui du *recuit simulé* [21], garantissent, en probabilité, la détermination du minimum global au prix d'un temps de convergence très important et donc souvent rédhibitoire. Une technique de minimisation plus simple a donc été proposée et fait l'objet du prochain paragraphe. Cette technique, appelée multi-résolution, réduit la probabilité de rester piégé dans un minimum local éloigné de la solution.

2.2.4 Technique multi-résolution sur le contour

L'initialisation de la fenêtre w_0 représente la seule connaissance *a priori* [22]. Une des difficultés inhérentes aux approches par contours actifs est justement leur sensibilité à ce contour initial utilisé pour la segmentation, c'est à dire à la forme initiale, qui ne doit pas être trop éloignée de l'objet à segmenter ainsi qu'au nombre de nœuds qui la composent. Afin de diminuer la sensibilité de l'algorithme face au choix de cette forme initiale, une méthode multi-résolution très simple a été proposée dans laquelle le nombre de nœuds est augmenté progressivement [22]. L'idée de base est de réaliser la segmentation en plusieurs étapes. Dans la première étape, un contour polygonal comportant peu de nœuds s'approche de l'objet à segmenter. Ensuite, nous augmentons le nombre de nœuds du contour actif afin d'affiner la segmentation (fig. 2.5).

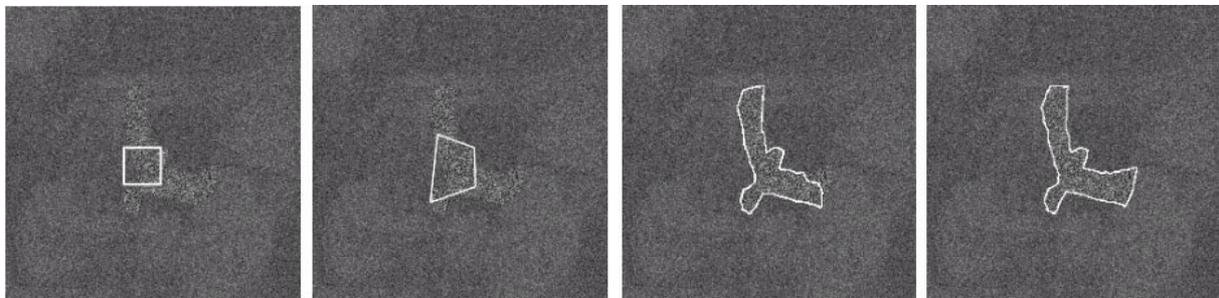


Figure 2.5 : Evolution d'un snake de gauche à droite avec la technique multi-résolution

Tout d'abord, nous commençons la segmentation à l'aide d'un contour actif initial qui comporte peu de nœuds (4 dans l'exemple ci-dessus). L'optimisation du critère J peut ainsi être réalisée rapidement (le faible nombre de nœuds induit un faible nombre de degrés de liberté) et permet d'obtenir une segmentation progressive de l'objet. Cette pré-segmentation est alors utilisée afin d'initialiser une nouvelle étape de segmentation dans laquelle nous augmentons le nombre de nœuds. Cette suite d'opérations est répétée plusieurs fois et permet, à chaque étape d'affiner la segmentation. En général, la segmentation finale est obtenue en appliquant l'algorithme avec trois niveaux de résolution du contour actif. Cette stratégie est résumée sur la figure (2.6).

Un point important dans l'algorithme, est que le nombre de nœuds est fixé en fonction de la résolution que nous souhaitons sur l'image finale. Nous avons choisi d'ajouter n nouveaux nœuds entre deux nœuds existants si leur distance D est supérieure à une valeur $dpix$ fixée. n est la partie entière du rapport $D/dpix$ et $dpix$ peut donc être vu comme la résolution sur le contour actif final.

Cette technique nous permet finalement de nous affranchir du problème difficile du choix du nombre de nœuds ainsi que de la forme initiale du contour actif. Mais son emploi améliore aussi la convergence puisqu'un nombre réduit de nœuds au départ, rend le snake moins sensible aux minima locaux dus à la texture de l'image ou au bruit qu'elle contient.

Il est possible d'accentuer l'amélioration de la convergence en adaptant la distance de déplacement des nœuds tout au long de la segmentation. En fait, on commence à déformer le

contour avec des déplacements importants, et lors du passage à la Résolution2 et à la Résolution3 (fig. 2.6) cette distance de déplacement est réduite.

La technique multi-résolution est au final une amélioration considérable, puisqu'elle permet d'améliorer la convergence du snake en l'accélégrant et en la rendant plus robuste aux minima locaux, donc de meilleure qualité.

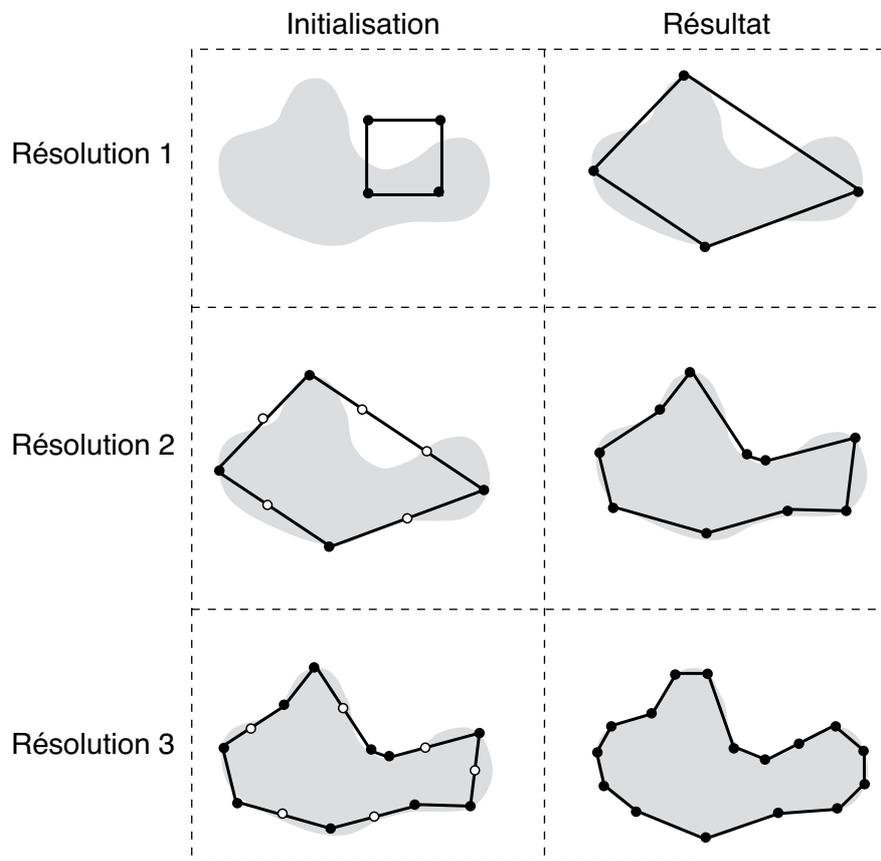


Figure 2.6 : Technique multi-résolution servant à améliorer la convergence du contour. La segmentation est ici réalisée en trois étapes, correspondant à des niveaux de résolution de plus en plus fins. A l'issue d'une étape, on augmente le nombre de sommets du contour pour initialiser la convergence dans l'étape suivante. (tiré de [23])

2.2.5 Autres améliorations

Il existe encore d'autres évolutions apportées au snake SIRS. Sans s'appesantir dessus, nous allons brièvement les résumer ici.

Les différents critères à optimiser ont été étudiés pour segmenter des images réelles pouvant être floues ou bruitées. Cependant, il arrive que le critère utilisé ne convienne pas pour traiter certains types d'images. En effet, l'approche SIRS est efficace pour segmenter des régions dont les textures sont légèrement corrélées, mais peut échouer avec des textures plus fortement corrélées. Afin d'améliorer la robustesse du snake SIRS et obtenir de bons résultats avec des images dont les régions ont des textures corrélées, Chesnaud [22] a proposé un pré-traitement à l'aide d'un filtre de blanchiment.

Un pré-traitement de blanchiment consiste à effectuer la transformée de Fourier d'une image, ne conserver que la phase et opérer une transformée de Fourier inverse. De manière optique, cette opération n'a encore jamais été implantée en tant que telle. Néanmoins, Matwyschuk a récemment proposé une solution optique dont les résultats s'apparentent à ceux d'un blanchiment [24]. En fait, il utilise filtre holographique favorisant les hautes fréquences.

Les croisements de sommets sont possibles lorsque les nœuds sont rapprochés et se déplacent avec une grande amplitude. Une amélioration consiste à détecter ces croisements, et refuser les déformations pouvant en occasionner. Ceci permet d'améliorer la vitesse de segmentation, puisque les sommets superflus sont évités, et la qualité en évitant l'introduction d'irrégularités dans le contour.

Dans le même esprit, la régularisation du contour [25] donne de bons résultats pour l'œil humain, mais pas forcément pour l'identification [20]. On améliore ainsi la qualité visuelle de la segmentation, mais si on compare point à point les distance entre le contour calculé et le contour exact, la régularisation dégrade le processus de segmentation tout en allongeant le temps de calcul.

En revanche, une récente amélioration a été proposée [26]. Il s'agit de réduire le nombre de nœuds. Effectivement, un snake lancé sans contrainte utilisera peut-être une centaine de nœuds pour segmenter un carré alors que 4 nœuds suffiraient.

Ce contour actif est un algorithme adapté à la délimitation d'une seule région objet contenue dans la scène. Pourtant dans une même scène, il arrive souvent que plusieurs objets soient présents. Parti de ce constat, Germain a proposé à partir des snake SIRS une extension qui fait appel à un réseau de mailles déformables [5].

Un algorithme rapide a aussi permis d'accélérer de manière notable la segmentation par snake SIRS. Chesnaud [17] a modifié les algorithmes pour alléger les calculs en ne considérant à chaque nouvelle itération que les régions qui ont été modifiées par les déformations du contour.

Enfin, une stratégie d'optimisation déterministe, par opposition à la stratégie stochastique, a été proposée par Ruch [20]. L'idée est d'essayer toutes les positions atteignables par un nœud en se déplaçant d'un pixel, et de n'effectuer que la déformation qui minimise le plus J . En fait, cette évolution n'a pas apporté d'amélioration, ni en qualité, ni en vitesse de segmentation.

2.3 Conclusion

Ce chapitre nous a donné l'occasion de présenter les contours actifs, une technique de segmentation devenue très efficace grâce à ses diverses évolutions. Nous avons présenté un type particulier de contour actif appelé snake SIRS qui différencie deux régions en tenant compte de leurs densités de probabilité. Cette méthode présente une meilleure robustesse au bruit que les techniques classiques de segmentation. Son principe est de définir une forme de départ pour l'objet à détecter et d'optimiser cette forme par minimisation d'un critère mathématique, J .

En outre, cette technique de segmentation repose sur un calcul de corrélation, entre la scène à segmenter et un masque binaire, qu'il faut effectuer à chaque itération. Une telle

opération est très coûteuse en temps de calcul et dépend de la taille de l'image à traiter. C'est pourquoi nous avons dédié cette partie du calcul à un processeur optique, de manière à bénéficier des avantages de l'optique (rapidité, multiplexage spatial, etc.).

2.4 Références Bibliographiques

1. M. Kass, A. Witkin et D. Terzopoulos, "Snakes: active contour models", *Int. J. Comp. Vis.* **1**, 321-331 (1988).
2. M.-O. Berger et R. Mohr, "Towards autonomy in active contour models", in *10th International Conference on Pattern Recognition*, Atlantic City, NJ, IEEE **1**, 847-851 (1990).
3. L. Cohen, E. Bardinnet et N. Ayache, "Surface reconstruction using active contour models", *Robotique, Image et Vision*, INRIA, rapport 1824 (1993).
4. A.A. Amini, T. Weymouth et R. Jain, "Using dynamic programming for solving variational problems in vision", **12** (3), 855-867 (1990).
5. O. Germain, "Segmentation d'images radar : caractérisation des détecteurs de bord et apport des contours actifs", Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III (2001).
6. L.D. Cohen, "On active contour models and balloons", *CVGIP: Image Understanding* **53** (2), 211-218 (1991).
7. R. Ronfard, "Region-based strategies for active contour models", *Int. J. Comp. Vis.* **13** (2), 229-251 (1994).
8. G. Storvik, "A bayesian approach to dynamic contours through stochastic sampling and simulated annealing", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **16** (10), 976-986 (1994).
9. J. Ivins et J. Porrill, "Statistical snakes: active region models", in *British Machine Vision Conference 2*, 377-386 (1994).
10. C. Kervrann et F. Heitz, "Robust tracking of stochastic deformable models in long image sequences", in *Conference On Computer Vision Pattern Recognition*, Seattle, IEEE, 724-728 (1994).
11. A.K. Jain, R. Duin, P.W. et J. Mao, "Statistical pattern recognition: a review", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **22** (1), 4-36 (2000).
12. P. Parrein, "Corrélation d'images de profondeur application à l'inspection automatique d'objets", Thèse, Université de Paris-Sud Centre d'Orsay (2001).
13. C. Chesnaud, "Techniques statistiques de segmentation par contour actif et mise en œuvre rapide", Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III (2000).
14. O. Germain et P. Réfrégier, "Optimal snake-based segmentation of a random luminance target on a spatially disjoint background", *Opt. Lett.* **21** (22), 1845-1847 (1996).

15. B. Javidi et J. Wang, "Limitation of the classic definition of the correlation signal-to-noise ratio in optical pattern recognition with disjoint signal and scene noise", *Appl. Opt.* **31** (32), 6826-6829 (1992).
16. B. Javidi, P. Réfrégier et P. Willett, "Optimum receiver design for pattern recognition with nonoverlapping target and scene noise", **18**, 1660-1662 (1993).
17. C. Chesnaud, P. Réfrégier et V. Boulet, "Statistical region snake-based segmentation adapted to different physical noise models", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **21** (11), 1145-1157 (1999).
18. P. Réfrégier, F. Goudail et C. Chesnaud, "Statistically Independent Region models applied to correlation and segmentation techniques", in *Euro American Workshop on Optoelectronic Information Processing*, Colmar (France), édité par P. Réfrégier & B. Javidi, *SPIE Critical Review* **CR74**, 193-224 (1999).
19. P. Réfrégier, O. Germain et T. Gaidon, "Optimal snake segmentation of target and background with independent Gamma density probabilities, application to speckled and preprocessed images", *Opt. Commun.* **137**, 382-388 (1997).
20. O. Ruch et P. Réfrégier, "Characterization of the recognition and the identification capabilities of the statistical snake at low resolution and high noise levels in speckled images", in *Optical Pattern Recognition XII*, Orlando, édité par D.P. Casasent & T.-H. Chao, *SPIE* **4387**, 152-163 (2001).
21. C. Kirkpatrick, C. Gelatt et M. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science* **220** (4598), 671-680 (1983).
22. C. Chesnaud, V. Pagé et P. Réfrégier, "Improvement in robustness of the statistically independent region snake-based segmentation method of target-shape tracking", *Opt. Lett.* **23** (17), 488-490 (1998).
23. O. Ruch, "Reconnaissance des formes par contour actif statistique - application à l'imagerie optronique active", Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III (2001).
24. A. Matwyschuk et P. Ambs, "Processeur optique améliorant la poursuite de cible", in *Journée du Centre de Recherche et d'Enseignement en Sciences Pour l'Ingénieur Mulhouse*, Université de Haute Alsace (2002).
25. C. Chesnaud et P. Réfrégier, "Snake region based segmentation for different physical noise models and fast algorithm implementation.", in *PSIP'99*, 1-8 (1999).
26. O. Ruch et P. Réfrégier, "Minimal-complexity segmentation with a polygonal snake adapted to different optical noise models", **26** (13), 977-979 (2001).

Chapitre 3

Mise en Œuvre Optique

L'objectif de ce chapitre est de présenter le choix et la conception d'un processeur optique analogique capable de réaliser optiquement une partie du travail du processeur électronique numérique de segmentation par contour actif. Nous discutons dans un premier temps du choix de l'architecture optique en lumière incohérente et dans un deuxième temps de son principe. Nous expliquons ensuite sa mise en œuvre optique. Les informations bibliographiques de ce chapitre sont pour la plupart extraites de [1] et [2]; on trouvera également des précisions sur le sujet dans [3].

3.1 Introduction

Le domaine du traitement du signal et des images a considérablement évolué ces dernières années. Grâce aux progrès réguliers des ordinateurs électroniques, les architectures numériques jouent un rôle de plus en plus important. Mais bien que les limites des capacités de tels processeurs ont été repoussées bien au-delà des espérances, l'électronique présente toujours des limites physiques qui résultent de l'interaction entre les électrons et de la nécessité d'avoir des lignes conductrices qui ne peuvent pas se croiser. Contrairement à l'électronique, l'optique permet de croiser des faisceaux d'informations sans qu'ils interagissent. De plus, la capacité de l'optique à effectuer de grandes quantités de calcul en temps réel, grâce à la rapidité de propagation des informations en parallèle, est maintenant bien établie. En particulier, à l'aide d'une lentille mince convergente, elle permet d'effectuer en éclairage cohérent une transformée de Fourier à la vitesse de la lumière [4]. Cette aptitude a été largement exploitée depuis les années 1950, en particulier pour le filtrage [5], la corrélation [6] et la reconnaissance des formes par corrélation [7] [8]. Depuis peu, on effectue également des opérations numériques de manière optique. Une revue des techniques et des applications pourra être trouvée dans les références [9] [10].

Par ailleurs, le calcul optique n'est pas seulement avantageux du point de vue temporel, il l'est aussi d'un point de vue énergétique [11]. Alors que la puissance de calcul des ordinateurs augmente, leur consommation énergétique s'accroît presque aussi rapidement. En optoélectronique, les capteurs sont de plus en plus sensibles et rapides, mais la consommation a plutôt tendance à baisser grâce aux progrès des nouveaux composants. Le choix d'un processeur optique pourrait donc aussi être motivé par souci d'économie d'énergie [12] [13].

C'est pour ces avantages du traitement optique par rapport au traitement numérique que nous avons opté pour une réalisation hybride optoélectronique d'un algorithme déjà validé de manière numérique.

3.2 Corrélation Incohérente par Ombroscopie

La plupart des corrélateurs optiques ont pour objectif de détecter le pic de corrélation donnant la localisation de l'objet recherché. Les informations fournies par le pic sont difficiles à interpréter. C'est pourquoi on se sert de nombreux filtres pour améliorer la qualité du pic de corrélation, mais ils agissent au détriment de la linéarité, ce qui empêche la mesure exacte de la hauteur du pic. En outre, ces corrélateurs fonctionnent généralement en lumière cohérente et emploient souvent pour l'affichage, des modulateurs spatiaux de lumière (SLM, pour "Spatial Light Modulators") nématiques en hélice qui sont les afficheurs les plus répandus (et dont nous sommes d'ailleurs équipés). Ces modulateurs ont la particularité de coupler une modulation de phase (angle de tilt) à une modulation de polarisation (angle de twist) [14]. Avec de tels écrans d'affichage, le résultat de la corrélation en lumière cohérente ne peut pas être exact puisque la phase n'est pas maîtrisée. Il existe des techniques pour compenser ces variations spatiales de manière dynamique grâce à un miroir adaptatif à phase conjuguée [15]. Juday et Florence [16] ont aussi suggéré de mettre en cascade un deuxième SLM ne réalisant qu'une modulation de phase pour compenser les modifications de phase indésirables du premier SLM. Cette théorie a été appliquée par la suite avec succès [17]. Toutefois, ces techniques sont onéreuses en matériel et compliquées à mettre en œuvre.

Le processeur optique nécessaire pour effectuer la corrélation contenue dans l'algorithme du snake doit pouvoir fournir l'amplitude de la valeur numérique du centre de la corrélation. Cette valeur doit correspondre (via une normalisation) à la valeur théorique calculée numériquement qui est utilisée dans le calcul de notre critère (défini au chapitre précédent). Pour ce calcul, une opération en valeurs réelles suffit. C'est pourquoi nous avons choisi de supprimer l'information de phase en utilisant une source de lumière incohérente. Ainsi le problème du couplage entre la phase et l'amplitude des SLM est en grande partie écarté. Dans un tel processeur, les SLM ne sont utilisés qu'en modulation de polarisation, qui est traduite en modulation d'amplitude grâce à un polariseur placé derrière le SLM.

Il est bien connu que les architectures cohérentes supportent mal les désalignements des composants optiques, les vibrations mécaniques et le bruit dû aux imperfections comme les poussières, les rayures et les défauts d'état de surface. Les performances en éclairage cohérent, en présence de ces défauts, se dégradent en général rapidement. Des études ont montré que la plupart de ces systèmes ne sont pas *redondants* et qu'une erreur s'y insérant ne peut jamais être corrigée [3].

Les architectures incohérentes tendent à être hautement *redondantes*, l'information est véhiculée dans plusieurs canaux parallèles à la fois, de telle manière qu'une erreur dans un canal n'influera que modérément sur la sortie, qui moyenne tous les canaux [3]. Par contre, la quantité d'information que peut brasser le système en est réduite et le plan de corrélation est très grand et nécessite des lentilles de réduction supplémentaires. En outre, ces architectures sont délaissées au profit des montages cohérents à cause de leur incapacité à traiter des valeurs réelles négatives. Mais récemment, des corrélations en lumière incohérentes ont été réalisées avec des valeurs réelles positives et négatives [2] comme l'avait suggéré Chavel [18]. D'ailleurs il est même possible de réaliser des opérations en valeurs complexes en lumière incohérente d'après Lohmann [19].

Mis à part ces inconvénients mineurs, concevoir un montage reposant entièrement sur l'optique géométrique, sans tavelure (*speckle*) inhérente aux processeurs cohérents [20] et peu sensible au bruit, est très séduisant. Avec le matériel dont nous disposons un corrélateur incohérent nous a semblé être la meilleure solution, et d'autant plus que les corrélations en éclairage incohérent traitent les informations en valeurs d'amplitude exactes.

Comme nous l'avons dit, nous souhaitons effectuer des segmentations optoélectroniques plus rapides que le processus numérique. C'est pourquoi nous écartons pour la suite de notre étude les architectures non reprogrammables, telles que le corrélateur holographique incohérent, et les architectures à balayage (cf. section 1.2.3) qui sont inadaptées au fonctionnement en temps réel. Le corrélateur incohérent par ombroscopie permet, lui, d'utiliser des SLM reprogrammables pour afficher la scène et la fenêtre.

Remarque : Comme on ne mesure que le centre de la corrélation, il aurait été possible d'adopter le corrélateur 4f incohérent (cf. section 1.2.3.1). Mais en choisissant, comme nous l'avons fait, un processeur optique réalisant une corrélation bi-linéaire ne nécessitant pas de balayage, on adopte une application plus générale et d'autre part, une implantation parallèle (faisant appel à plusieurs canaux optique) est envisagée (cf. chapitre 6). Une telle implantation nécessiterait alors un balayage dans le corrélateur 4f, ce qui serait difficilement réalisable sans perte de temps.

Les systèmes optiques fonctionnant en éclairage incohérent et suivant le principe de l'ombroscopie permettent d'obtenir très simplement le produit de corrélation ou de convolution de deux images représentées dans l'espace objet [3]. La corrélation ombroscopique, ou par projection d'ombre (*shadow-casting*), est historiquement la plus ancienne corrélation réalisée optiquement [21] [22].

De tels corrélateurs ombroscopiques ont été proposés pour mettre en œuvre des opérations morphologiques sur des images [23] [1], des filtrages spatiaux [24] [3] éventuellement appliqués à la reconnaissance de caractères [25], des filtres à compromis optimaux pour la reconnaissance de forme [2], mais aussi des opérations logiques [26] et de

calcul numérique pour effectuer des substitutions symboliques [27] ou encore des réseaux de neurones¹ [28].

Actuellement, ces corrélateurs ombroscopiques bénéficient d'un regain d'intérêt [29] [30], et récemment, des algorithmes de reconnaissance de forme par modulation de cohérence ont été implantés dans un tel corrélateur [31].

3.3 Principe

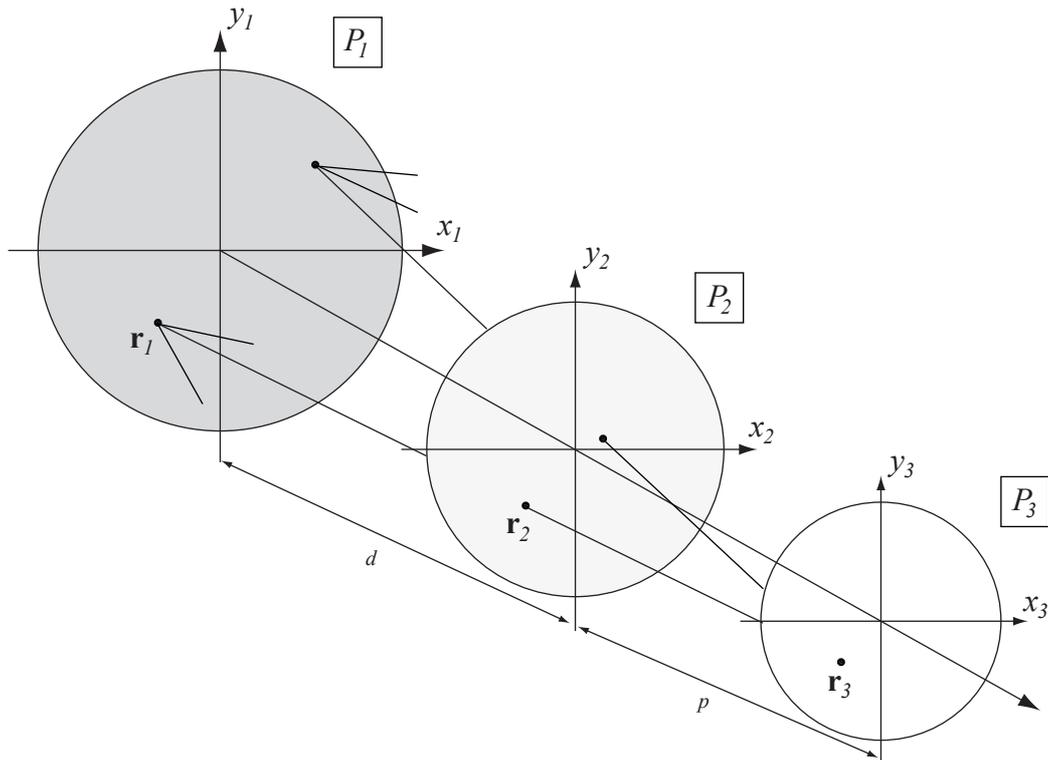


Figure 3.1 : Principe de l'ombroscopie. Dans le premier plan P_1 , la transmittance M_1 est une source diffuse. Dans le second P_2 , la transmittance M_2 est une transparence. P_3 est le plan de détection [2].

Afin d'analyser le principe de l'ombroscopie, raisonnons en termes d'optique géométrique. Avec les notations de la figure (3.1), un rayon émis depuis un point \mathbf{r}_1 , avec les coordonnées (x_1, y_1) , du plan de la source diffuse et qui atteint le point \mathbf{r}_3 du plan de détection, traverse le plan intermédiaire au point \mathbf{r}_2 , tel que

$$\frac{\mathbf{r}_2}{d'} = \frac{\mathbf{r}_1}{d} + \frac{\mathbf{r}_3}{p} \quad (3.1)$$

où la distance algébrique d' est définie par

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{d} + \frac{1}{p} \quad (3.2)$$

¹Processeur incohérent à mémoires associatives holographiques

Considérons les surfaces élémentaires $d\mathbf{r}_1$ et $d\mathbf{r}_3$ centrées aux points \mathbf{r}_1 et \mathbf{r}_3 , respectivement. La source et le système optique peuvent être caractérisés par le flux élémentaire $\xi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_3$ qui est émis dans l'élément de surface $d\mathbf{r}_1$ et reçu par l'élément de surface $d\mathbf{r}_3$. Deux transmittances M_1 et M_2 sont placées respectivement dans les plans P_1 et P_2 . L'éclairement au point \mathbf{r}_3 est alors donné par la contribution de tous les éléments sources $d\mathbf{r}_1$:

$$I(\mathbf{r}_3) = \int_{P_1} d\mathbf{r}_1 \xi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_3) M_1(\mathbf{r}_1) M_2 \left[d' \left(\frac{\mathbf{r}_1}{d} + \frac{\mathbf{r}_3}{p} \right) \right] \quad (3.3)$$

Cette expression montre que l'opération d'ombroscopie est une fonction de corrélation ou de convolution (selon la valeur de p^1) entre M_1 et M_2 , en supposant que le noyau ξ soit constant. Le noyau ξ inclut tout ce qui concerne la photométrie du montage, c'est-à-dire les caractéristiques de la source diffuse et de tous les éléments optiques. Un noyau ξ constant signifierait que tous les canaux optiques du corrélateur contiennent la même énergie. Pour l'instant nous considérons ce noyau constant, et nous reviendront sur ce point au chapitre 6.

Dans cette thèse nous étudierons principalement la corrélation, nécessaire au calcul du critère défini au chapitre précédent, mais les mêmes remarques pourront être appliquées à la convolution. Un système en lumière incohérente qui corréle deux images peut devenir un convolveur en effectuant une symétrie centrale sur l'une des deux transparences traitées.

3.3.1 Effets photométriques

Dans un corrélateur optique incohérent par ombroscopie, la corrélation est obtenue par projection géométrique des images. Le schéma d'un tel montage est montré ci-dessous avec des écrans LCD (placés dans les plans P_1 et P_2) supposés de dimensions égales.

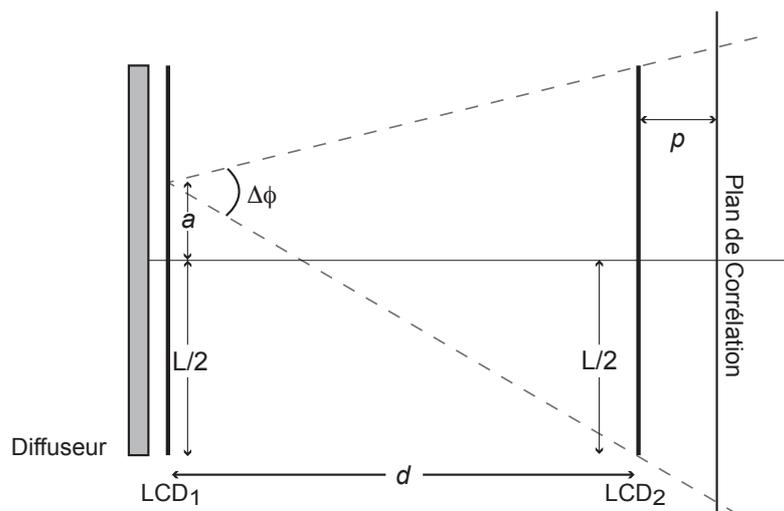


Figure 3.2 : Schéma type du corrélateur incohérent par ombroscopie sans lentille (vue du dessus) où L correspond à la largeur des écrans LCD.

¹ Le signe de d' dépend de p , et si $d' \mathbf{r}_1/d$ est positif on obtient une corrélation, sinon une convolution.

Les images corrélées sont agrandies à cause de la projection. Le grandissement entre le premier plan (LCD₁) et le deuxième plan (LCD₂) est égal à

$$G = \left| \frac{d+p}{p} \right| \quad (3.4)$$

D'un point de vue purement géométrique, si le rapport d'échelle entre les deux écrans LCD n'est pas imposé par leur taille, le plan de corrélation peut être mesuré n'importe où le long de l'axe du montage. Le plan de corrélation peut se situer d'un côté ou de l'autre de LCD₂. Quand il est situé devant le deuxième SLM, du côté de la source, le plan de corrélation est virtuel et peut être imagé de manière réelle via une lentille. Utiliser un plan de corrélation virtuel (avec un p négatif) facilite le choix des facteurs d'échelle entre les SLM. La plupart des corrélateurs ou convolveurs optiques sont basés sur cette configuration [32]. Les architectures de corrélateurs sans lentille paraissent plus simples à réaliser, mais elles nécessitent des éléments optiques de grandes dimensions en bout de montage, notamment en ce qui concerne les capteurs.

En lumière incohérente, les montages doivent être compacts pour éviter de grosses pertes d'énergie : l'énergie lumineuse en sortie du diffuseur diminue suivant la loi carrée inverse ($1/\text{distance}^2$). La quantité de lumière utile émise par un point uniformément illuminé du premier écran LCD₁ est comprise dans le cône d'ouverture $\Delta\phi$ des rayons qui vont de ce point jusqu'aux bords délimitant le second écran LCD₂. Plus les écrans sont proches (plus d est petit), moins la lumière sera perdue. En même temps, plus les écrans seront rapprochés, plus les rayons seront divergents en sortie du deuxième SLM. C'est pourquoi la distance séparant les écrans LCD doit être suffisamment importante pour réduire l'angle de sortie des rayons lumineux, ce qui réduira d'autant la taille du plan de corrélation. Sinon, le plan de corrélation risque d'être imagé avec vignettage. En revanche, si une bonne efficacité lumineuse est nécessaire, il vaut mieux rapprocher les SLM [1].

En admettant que la lumière rayonne dans toutes les directions, depuis un pixel situé sur le premier SLM à une distance a de l'axe du système (fig. 3.2), seulement une partie des rayons compris dans une fourchette angulaire $\Delta\phi$ atteindra le second SLM. Cet angle utile, proportionnel à l'efficacité lumineuse de ce point, vaut dans le plan horizontal :

$$\Delta\phi(a) = \arctan\left(\frac{L/2 - a}{d}\right) + \arctan\left(\frac{L/2 + a}{d}\right) \quad (3.5)$$

où $L/2$ et d correspondent respectivement à la demi largeur des écrans LCD₁ et LCD₂ et à la distance les séparant. L'angle utile change avec la position du pixel dans LCD₁, du plus important pour $a=0$ au centre de l'écran, au plus faible pour $a=L/2$ au bord. Pour les valeurs très faibles du rapport $L/d \ll 1$, ce qui correspond à une largeur d'écran faible comparée à la distance d'écartement des écrans, la différence entre les deux angles utiles extrêmes ($a=0$ et $a=L/2$) devient insignifiante (notons au passage que l'efficacité globale serait à ce moment aussi très faible puisque les ouvertures angulaires $\Delta\phi_{\max} \approx \Delta\phi_{\min}$ seraient petites). En revanche, pour des valeurs plus importantes de L/d , la différence d'efficacité lumineuse entre un pixel au centre et un pixel au bord devient significative.

Ceci a pour conséquence de pondérer le résultat de la corrélation dans le plan en entier. Cet effet, propre aux corrélateurs incohérents, influe sur le résultat mesuré dans le plan de corrélation. Si l'on considère l'ensemble de la surface de LCD₁, l'efficacité, η , de chacun de ses pixels, ou la puissance transmise à LCD₂ par chaque pixel, est proportionnelle à l'angle solide :

$$\eta(a,b) = \alpha \cdot \Omega(a,b) \quad (3.6)$$

Cette efficacité correspond de manière proportionnelle au flux lumineux, émis par le pixel de coordonnées (a,b) , qui atteint le plan du second écran LCD.

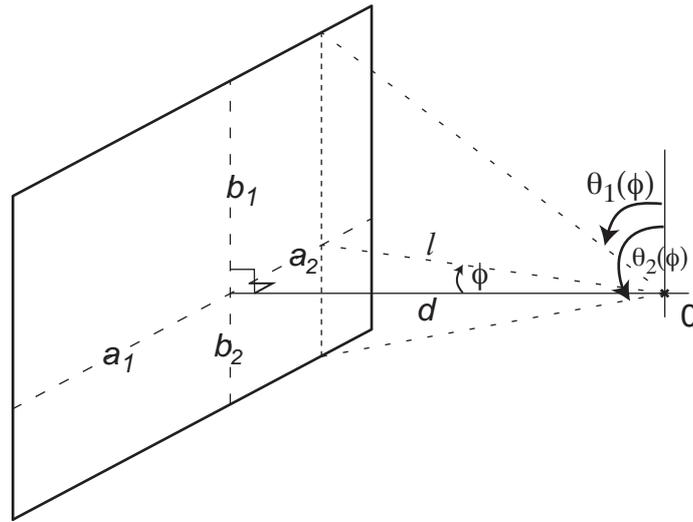


Figure 3.3 : Paramètres géométriques nécessaires à l'obtention de l'angle solide.

L'angle solide s'obtient à l'aide de la géométrie différentielle (intégrale double suivant θ et ϕ). Les paramètres géométriques du calcul sont donnés dans la figure (3.3). Nous recommandons au lecteur, soucieux de connaître les détails du développement, de se référer à l'annexe de ce mémoire. L'angle solide vaut :

$$\begin{aligned} \Omega(a,b) = & \text{Arcsin} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + d^2}} + \text{Arcsin} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + d^2}} \\ & + \text{Arcsin} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + d^2}} + \text{Arcsin} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + d^2}} \end{aligned} \quad (3.7)$$

où a_1, a_2, b_1 et b_2 correspondent respectivement à $(L/2 + a), (L/2 - a), (L/2 - b)$ et $(L/2 + b)$.

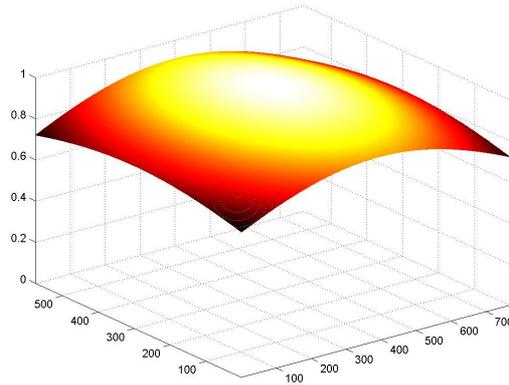


Figure 3.4 : Flux lumineux transmis par chaque pixel de LCD_1 (768x576) qui atteint LCD_2 . Les niveaux de gris représentent l'efficacité qui est aussi présente sur le troisième axe.

Chaque pixel est pondéré par l'efficacité de l'équation (3.7). Dans la figure (3.4), où $d/L=1$, le flux lumineux transmis par un pixel situé dans un coin de LCD_1 est 29% moins important que le flux transmis par un pixel au centre de LCD_1 . En revanche, si on éloigne suffisamment les deux écrans pour obtenir $d/L \gg 1$ (où les angles θ et ϕ sont petits), alors tous les pixels auront autant d'importance, et ceux situés sur les bords ne seront pas défavorisés. Plus on éloigne les écrans, plus la pondération sera uniforme. Nous pouvons d'ailleurs constater qu'au contraire, la pondération est accentuée en rapprochant les écrans LCD (fig. 3.5a, où $d/L=0,5$).

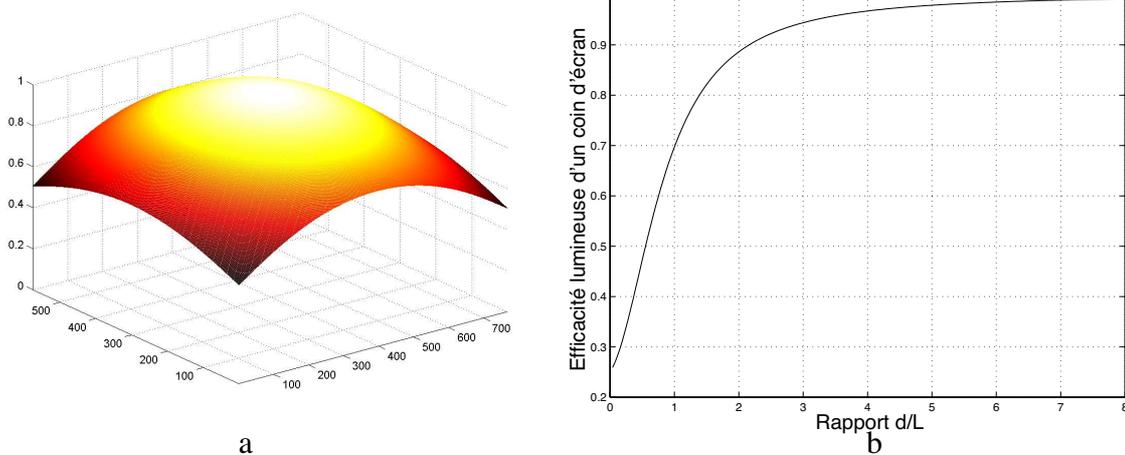


Figure 3.5 : (a) Flux lumineux (transmis par les pixels de LCD_1) atteignant LCD_2 , pour un rapport $d/L=0,5$. Dans ce cas, les coins sont 52% moins efficaces que le centre. (b) Efficacité lumineuse d'un pixel d'un coin de LCD_1 par rapport au centre, en fonction du rapport d/L .

On remarque d'après la figure (3.5b) que l'efficacité lumineuse, dans le cas où les plans des deux écrans seraient confondus ($d/L=0$), peut être atténuée de 75% pour un pixel situé dans un coin. Comme nous le verrons plus loin, notre montage est bien plus espacé que dans les exemples montrés ci-dessus, et par conséquent moins sujet à cette pondération du flux lumineux.

Un autre effet de pondération du flux lumineux vient s'ajouter au précédent. Il repose entièrement sur l'optique géométrique. Les rayons provenant de LCD_1 et qui interceptent LCD_2 seront d'autant plus divergents en sortie de LCD_2 que les écrans LCD seront proches (fig. 3.6).

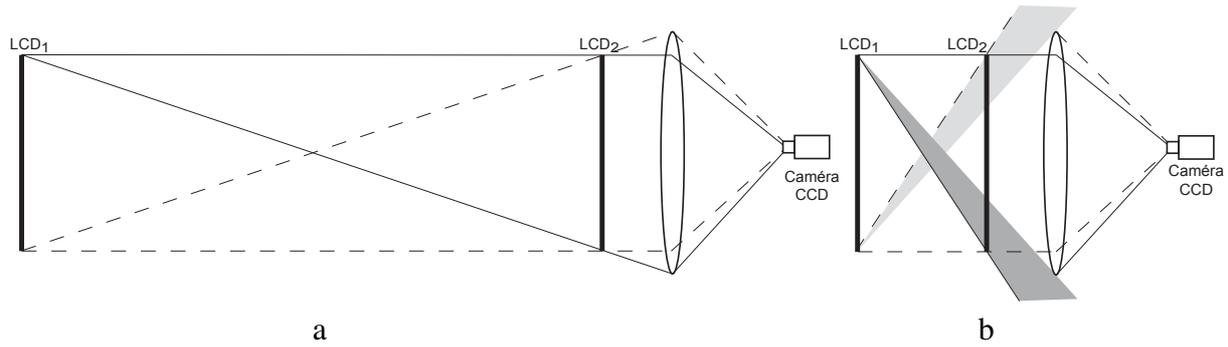


Figure 3.6 : Effets de vignetage. (a) sans vignetage (b) avec vignetage.

Le danger du rapprochement des écrans est le vignetage des faisceaux de lumière qui partent de LCD_1 et interceptent LCD_2 (fig. 3.6b). En revanche, nous rappelons que plus les écrans seront proches et moins la lumière sera perdue par diffusion entre les deux écrans LCD.

3.3.2 Résolution d'un corrélateur incohérent par ombroscopie

Plusieurs recherches ont été menées sur la résolution d'un corrélateur ombroscopique [33] [34] [35]. Green a montré qu'à cause des problèmes de diffraction, les processeurs ombroscopiques souffrent d'un mauvais produit *espace-bande* (nombre de points du plan d'entrée). Partant du théorème de Van Cittert – Zernike [36], il a étudié la taille maximale utilisable dans les deux plans à corrélérer. Cette étude a été reprise par Gedziorowski [35] dont la reformulation par Laude [2] est la suivante :

Green considère tout d'abord que les cellules constituant les plans P_1 et P_2 sont circulaires avec des rayons respectifs ρ_1 et ρ_2 . A l'aide du critère de Rayleigh, il montre ensuite que

$$\rho_1 \rho_2 = \alpha \lambda d, \quad (3.8)$$

où λ est la longueur d'onde de la source lumineuse utilisée et α est une constante, habituellement fixée à 0,61 et qui correspond à la demi-largeur de la tache d'Airy [35]. Laude adapte ensuite cette idée à des pixels rectangulaires dont les dimensions sont fixées à travers le critère de Rayleigh. Les surfaces des pixels des plans P_1 et P_2 sont ainsi respectivement S_1 et S_2 . Avec nos notations, nous pouvons écrire la relation (3.8) sous la forme [2] :

$$S_1 S_2 = 4 \alpha^2 \lambda^2 d^2 \quad (3.9)$$

Comme les pixels ne sont pas circulaires mais rectangulaires, la valeur de α est légèrement différente de 0,61. De l'équation (3.9), il est maintenant possible de déduire le nombre de pixels contenus dans les plans P_1 et P_2 . Ces nombres sont respectivement,

$$N_1 = \frac{A_1}{S_1}, \quad N_2 = \frac{A_2}{S_2}, \quad (3.10)$$

où A_1 et A_2 représentent les surfaces totales utilisées des plans P_1 et P_2 . Nous obtenons finalement

$$N_1 N_2 = \frac{A_1 A_2}{4\alpha^2 \lambda^2 d^2} \quad (3.11)$$

Nous pouvons remarquer, d'après l'équation (3.11), que la résolution des informations traitables sans tenir compte des effets de la diffraction varie directement avec la surface des deux plans et inversement avec le carré de la distance qui sépare les transparences. Ainsi, plus on éloigne les deux plans à corrélérer, plus le produit *espace-bande* est réduit.

Cette approximation de la résolution des corrélations ombroscopiques a été approfondie par Laude [37] qui a étudié l'influence de la pixélisation des différents plans du système. Partant d'une formulation discrète de la corrélation bi-dimensionnelle (éq. 3.3), il a démontré que les plans devaient être homothétiques, quantifié le flou géométrique dû aux limites de l'optique géométrique et exprimé l'influence de la diffraction dans le plan de corrélation en prenant en compte des pixels rectangulaires.

Les effets de la diffraction sont invariants par translation¹ : si le point source ou le centre du pixel diffractant sont déplacés, la tache de diffraction ne change pas de forme, mais son centre se déplace simplement suivant le principe de l'optique géométrique. La diffraction, contrairement aux effets photométriques, n'affecte pas l'invariance spatiale du corrélateur ombroscopique.

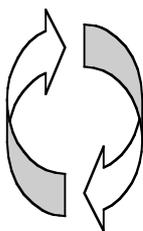
3.4 Mise en Œuvre Optique du Snake

3.4.1 Présentation de l'algorithme

Il fallait dans un premier temps réaliser une simulation pour ensuite pouvoir analyser le comportement expérimental du snake en le comparant à celui du processus numérique. Par conséquent, deux programmes distincts ont été utilisés, le premier dédié à la simulation et le deuxième dédié au processeur optoélectronique.

L'algorithme implanté pour la minimisation du critère J suit cette structure :

- Initialisation du contour et calcul de J (en fonction de \mathbf{s} et \mathbf{w})
- Répéter jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration en ayant fait le tour des nœuds :



déplacer un nœud de manière stochastique

calculer/mesurer la valeur, C , du centre de la corrélation de \mathbf{s} et \mathbf{w}

calculer le $J_{\text{temporaire}}$ pour la nouvelle fenêtre à l'aide de C

si $J_{\text{temporaire}}$ est plus petit que J , valider la déformation,

sinon annuler la déformation.

¹ conséquence de l'approximation de Fresnel

Un nœud déplacé de manière stochastique signifie qu'il est déplacé aléatoirement dans une des 8 directions possibles (fig. 3.7).

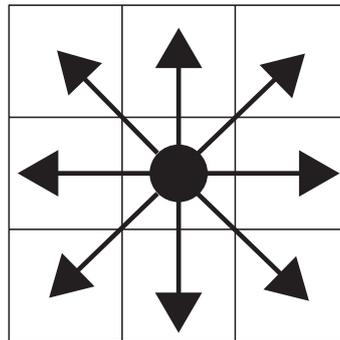


Figure 3.7 : 8 déplacements unitaires possibles d'un nœud lors de l'essai d'un déplacement stochastique.

La stratégie multi-résolution a été adoptée. Pour diminuer les problèmes d'initialisation, le nombre de nœuds augmente au fur et à mesure des itérations. Des nœuds sont insérés entre deux autres nœuds tant que la distance entre ces nœuds est égale ou inférieure à une valeur $dpix$ (cf. chapitre 2). En même temps que le nombre de nœuds augmente, les déplacements effectués sont plus petits. En fait, les déplacements unitaires (fig. 3.7) sont multipliés par une valeur de *pas de déplacement* qui diminue au fur et à mesure des itérations.

Cette stratégie entraîne donc trois contraintes à l'algorithme de base donné ci-dessus :

- Ajouter des nœuds au fur et à mesure des itérations
- lors d'une stagnation, ajouter des nœuds et réduire le pas de déplacement
- si le dernier ajout de nœuds n'a pas amélioré la segmentation, ne plus en ajouter

Chaque fois que le snake converge et stagne, un nœud est ajouté au milieu de chaque segment du contour (à condition que sa longueur soit inférieure à $dpix$) pour améliorer la résolution de la segmentation.

La fenêtre, w , est définie par une série de nœuds dont les coordonnées sont contenues dans un tableau. Pour dessiner la fenêtre binaire (objet blanc (1), fond noir (0)), on utilise les fonctions Matrox fournies avec les cartes de traitement vidéo. Le buffer de w est initialisé à la valeur minimale de 0. Ensuite on dessine le contour en blanc (255) en traçant des segments d'un nœud à un autre. Puis, on remplit la région de l'objet depuis la position de l'initialisation du contour.

3.4.2 Les sources lumineuses

Le traitement optique d'informations en lumière incohérente commence par le choix d'une source de lumière. On peut classer les sources lumineuses selon deux catégories : les sources de lumière cohérente et les sources de lumière incohérente. De manière naturelle nous sommes d'abord intéressés aux sources incohérentes puisque la corrélation est incohérente.

L'objectif est de disposer d'une source *lambertienne* en tout point du premier plan [3]. Une source *lambertienne* signifie qu'en tout point de la source, le flux de lumière rayonne peut s'écrire de cette manière :

$$I_{\theta} = I_0 \cos \theta \quad (3.12)$$

où I_0 est le flux normal à la direction du faisceau source au point 0, et I_{θ} est le flux issu de 0 décalé d'un angle θ par rapport à I_0 .

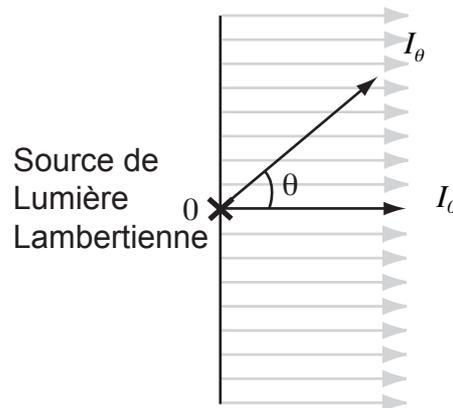


Figure 3.8 : Caractéristique d'une source lambertienne définie au point 0

On peut remarquer que I_{θ} ne varie que de 6% par rapport à I_0 lorsque que θ varie de $\pm 20^{\circ}$ par rapport à la normale. Ceci signifie que l'intensité est quasiment constante dans un assez large champ angulaire, ce qui est un critère peu sélectif concernant les sources lumineuses. Cependant, Laude a démontré [38] que le premier modulateur, à l'entrée d'un corrélateur ombroscopique, doit posséder un contraste important pour rendre la corrélation moins sensible aux bruits. Il faut donc collimater un maximum la lumière de la source dans le montage pour éviter que des rayons divergents brulent l'opération.

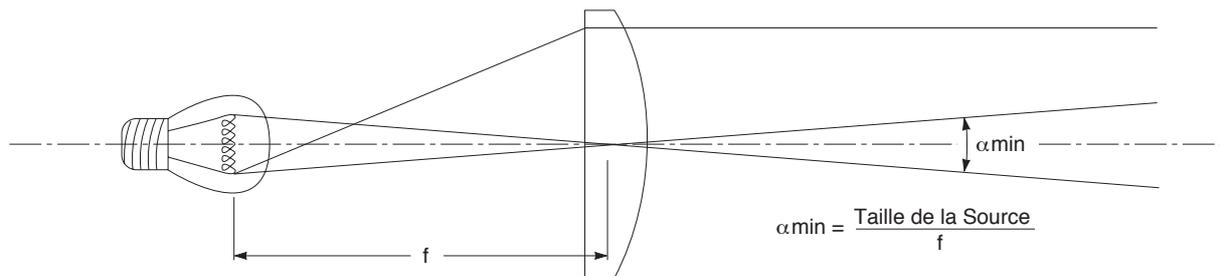


Figure 3.9 : Collimation d'une source incandescente

La figure (3.9) décrit la divergence minimum, α_{\min} (en radians), comme étant égale à la taille du faisceau divisée par la distance focale du système de collimation. En augmentant la distance focale de cette lentille de collimation, on diminue la divergence, et par conséquent, la résolution du faisceau augmente¹. En revanche, pour perdre le moins de lumière possible il faudrait travailler avec de courtes focales, pour récupérer un maximum de lumière radiée par la source et ainsi améliorer l'efficacité lumineuse. Il existe donc un compromis entre efficacité lumineuse (irradiance) et résolution (collimation).

¹ Les rayons de lumière sont parallèles et les informations se propagent parallèlement, sans se croiser et perturber la corrélation.

Une source de lumière *lambertienne* peut être réalisée de plusieurs manières : une surface réfléchissante éclairée par des lampes, une lampe halogène, etc. Mais il existe des sources qui ont la possibilité inhérente de pouvoir transmettre en même temps l'information. Une source de ce type, utilisée communément, est par exemple une page de livre, où la surface une fois éclairée réfléchit une information lumineuse codée avec des lettres. Cette source de d'information est statique et notre objectif est d'effectuer des opérations optiques dynamiquement. C'est pourquoi un tube CRT (*Cathode Ray Tube*), une matrice de LED (*Light Electroluminescent Diode*) ou de diodes laser seraient des sources *lambertiennes* plus appropriées.

Casasent et House ont étudié ces différentes sources lumineuses pour les traitements en lumière incohérente [39]. Leur conclusion stipule que la meilleure solution possible s'avère être la configuration laser/diffuseur. C'est donc vers cette source lumineuse que nous nous sommes tournés.

3.4.2.1 Sources laser

La lumière spatialement cohérente, qui est apparue avec les lasers au milieu du siècle précédent, est un phénomène purement artificiel. La seule manifestation naturelle qui s'en rapproche est le front d'onde lumineuse provenant d'une étoile isolée. Un rayon de soleil est aussi cohérent mais seulement sur une fraction de millimètre.

Il peut sembler étrange d'utiliser une source cohérente pour réaliser des traitements en lumière incohérente, mais un laser présente des avantages indiscutables :

- Collimation : Comme les sources laser sont ponctuelles, il est facile de les collimater. Aucune source de lumière incohérente, que ce soit en sortie de fibre optique ou au niveau d'un arc de lampe au xénon, la source aura un diamètre supérieure à 100 microns. Il est possible de filtrer un faisceau incohérent par un trou de 10 microns ou moins, mais l'énergie perdue est alors trop importante.
- Monochromatique : Une source monochromatique améliore le contraste dans un processeur ombroscopique en diminuant les perturbations dues à la dispersion chromatique [14]. Les lasers fournissent une énergie importante dans une longueur d'onde donnée, alors qu'un filtre spectral sélectif (pour ne permettre le passage que d'une longueur d'onde) appliqué à une source de lumière blanche élimine une grande partie de l'énergie.

Cependant, le laser présente aussi certains inconvénients :

- profil gaussien TEM_{00} qui ne permet pas d'éclairer un plan uniformément,
- bruit cohérent (tavelure),
- plus cher qu'une source de lumière blanche pour une même puissance.

3.4.2.2 Diffuseur

Il existe différentes manières d'obtenir un faisceau incohérent à partir d'une source cohérente laser, pour éliminer la tavelure (bruit cohérent). Une source laser peut être décochée par un élément optique diffractif (DOE), par un diffuseur, par des vibrations appliquées à la

trajectoire du faisceau, ... Mais ces solutions ont l'inconvénient d'absorber une bonne partie de l'énergie irradiée. Afin de décoherer un faisceau laser, il est aussi possible d'utiliser un SLM à adressage optique en phase [40]. Cette solution absorbe peu d'énergie puisqu'elle n'affecte que la phase, mais on perd alors la collimation du faisceau. Nous nous en sommes donc tenus à un diffuseur.

Un diffuseur est une lame de verre dépolie translucide qui diffuse le faisceau de lumière qui le traverse en éparpillant aléatoirement les rayons lumineux à cause de sa microstructure granuleuse. Les diffuseurs traditionnels laissent seulement passer 1 ou 2% de la lumière. L'introduction d'une lame de verre dépolie dans un système en lumière cohérente augmente de manière importante la redondance des informations. En effet, comme les rayons de lumière sont éparpillés, la même information peut emprunter différents chemins et être recombinaée par la suite [3]. C'est ce type de diffuseur que nous avons choisi pour bénéficier de la redondance d'information.

Si le diffuseur est fixe, le faisceau qui en résultera ne sera que partiellement incohérent. Les franges d'interférence, proportionnelles au degré de cohérence [36], seront alors réduites, mais toujours visibles. Afin de décoherer le faisceau laser, nous devons bouger le diffuseur circulaire. A cet effet, nous lui avons adjoint un moteur placé en son centre. La vitesse de rotation du diffuseur est d'environ 62 tours par seconde. Ainsi, pour la caméra qui fonctionne à 25Hz, la source lumineuse est incohérente¹.

3.4.3 Les Modulateurs spatiaux de lumière

Nous décrivons ici uniquement le matériel utilisé pour notre mise œuvre optique. Le lecteur pourra trouver un état de l'art sur les modulateurs spatiaux de lumière (SLM) dans la thèse de Bigué [41] et [42].

Les SLM sont des dispositifs permettant de modifier l'amplitude, la phase, ou la polarisation d'un rayon lumineux. Ces composants connaissent un intérêt grandissant depuis l'augmentation de leur résolution spatiale, et, selon la technologie, de leur rapidité de rafraîchissement. Ce dernier paramètre est fondamental lorsque l'on souhaite reconfigurer en temps réel les plans de traitements d'un processeur optique.

Nous utilisons pour notre processeur optique des matrices actives à cristaux liquides nématiques en hélice de résolution SVGA (800x600 pixels). Les pixels ont une taille de 24x26 μm avec un pas de 33 μm . Nous utilisons une électronique permettant de commander la matrice avec un signal vidéo monochrome (1 bande) à une cadence de 56Hz ou 60Hz. En fait, la carte vidéo du PC² qui envoie le signal à afficher, utilise un format 3 bandes à 60 Hz. Les canaux RGB (*Red Green Blue*) contenant la même information (puisque les images envoyées sont en niveaux de gris), nous n'exploitons qu'une seule bande.

¹ Comme nous n'exploitons qu'une petite portion du diffuseur, nous avons observé qu'une fréquence de rotation de 6 tours par seconde suffit déjà à rendre le faisceau incohérent.

² L'ordinateur utilisé est un Pentium III avec une fréquence d'horloge à 450 MHz et 192Mo. de RAM, fonctionnant sous l'environnement Windows NT4.0.

La réponse en amplitude d'un SLM dépend de la tension de commande appliquée aux bornes des électrodes des pixels. Cette tension, codée sur 8 bits (de 0 à 255), influe sur l'orientation des cristaux liquides de la cellule (donc la biréfringence de celle-ci) et ainsi sur la rotation de la polarisation du faisceau lumineux qui traverse la cellule. Un polariseur, en sortie de SLM, filtre la lumière et transforme le codage de l'information, modulée en polarisation, en codage d'amplitude. Il faut noter que la lumière irradiant le SLM doit être polarisée pour obtenir un bon contraste. De plus, l'angle de polarisation en entrée d'un SLM peut jouer sur la qualité du contraste. Souvent, une lame retardatrice ($\lambda/2$) est placée avant le modulateur nématique twisté pour adapter l'angle de polarisation de la lumière à l'angle d'attaque des cellules à cristaux liquides [43]. Ainsi la lumière reste linéairement polarisée en traversant le modulateur à cristaux liquides et le meilleur contraste peut être obtenu. Dans notre montage optique, le choix de l'angle d'attaque du second SLM n'est pas très important comparé à l'angle d'attaque du premier [38]. C'est pourquoi nous n'utiliserons pas de lame retardatrice pour le second SLM.

Nos deux écrans LCD sont identiques, et leurs dimensions *a fortiori* égales. Ils reproduisent donc les effets photométriques décrits à la section (3.3.1). Mais, ces SLM absorbent une grande quantité de lumière. En effet seulement 10% de la lumière sont transmis dans le meilleur des cas.

Notre groupe de recherche a tout récemment fait l'acquisition d'un SLM ferroélectrique. Celui-ci affiche les images en niveaux de gris sur 8 bits (256 valeurs) sans déphasage, alors que les traditionnels modulateurs ferroélectriques ne peuvent que coder les informations sur deux niveaux de phase ou d'amplitude. Il ne module que la polarisation, telle une lame $\lambda/2$ accordable, et fonctionne à 1000 Hz. Sa mise œuvre optique est complexe : il fonctionne en réflexion, il a sa propre électronique, non commandable par un signal vidéo classique, et son logiciel de commande est contraignant. Malgré ces contraintes, les applications temps réel en optique ont un avenir prometteur grâce à ce nouveau matériel.

3.4.3.1 Traitements numériques

Certains traitements numériques élémentaires peuvent améliorer sensiblement les performances du système optique, en transformant la scène et éventuellement la fenêtre.

Une image étant en général analogique au départ, elle doit être préalablement numérisée pour la mémoriser dans une mémoire d'ordinateur. La conversion analogique/numérique entraîne obligatoirement une transformation des niveaux de gris. Une image analogique risque d'être numérisée avec une perte d'informations (saturations) ou avec un contraste trop faible. Pour occuper au mieux les niveaux de gris numériques, dans le premier cas il faudra compresser l'échelle de gris, et dans le second l'étendre. Ce type de transformation des niveaux de gris s'appelle une *anamorphose* [44].

L'extension et la compression linéaires sont les anamorphoses les plus simples. Une image en niveaux de gris est définie par une fonction $f(x)$, qui représente l'amplitude du signal au point x . L'anamorphose linéaire consiste à établir une nouvelle fonction $g(x)$ reliée à la

précédente par la relation affine :

$$g(x) = a \cdot f(x) + b \quad (3.12)$$

Grâce à cette transformation, la scène, affichée sur un des SLM, aura un meilleur contraste. Comme nous l'avons déjà dit, ceci est fondamental pour obtenir de bons résultats avec un processeur en lumière incohérente. Cette opération nécessite deux passages sur l'image, un premier pour déterminer les extrema, un deuxième pour effectuer le calcul de $g(x)$ sur l'ensemble des pixels de l'image.

Les anamorphoses sont souvent réalisées de manière dynamique grâce à des mémoires rapides que l'on appelle des LUT (*Look Up Table*). Ces mémoires permettent notamment de corriger les courbes de réponse en amplitude des SLM. Ceci sera développé dans le sixième chapitre.

Pour maximiser l'énergie dans la région d'intérêt et non dans le fond, il est parfois nécessaire de prendre le négatif d'une scène (comme la voiture par exemple). Ainsi la valeur mesurée (le centre de la corrélation) n'est plus un minimum, mais un maximum qui sera plus élevé que le bruit, et ceci d'autant plus que la diffraction d'un fond sombre influe moins que celle d'un fond lumineux (fig. 3.10).

Pour inverser une image en niveaux de gris (au sens photographique), il faut la complémenter. Si l'on appelle n la valeur du niveau de gris la plus élevée, la complémentation sera la transformation :

$$g(x) = n - f(x) \quad (3.13)$$

En d'autres termes la complémentation revient à effectuer une symétrie par rapport au niveau de gris $n/2$.

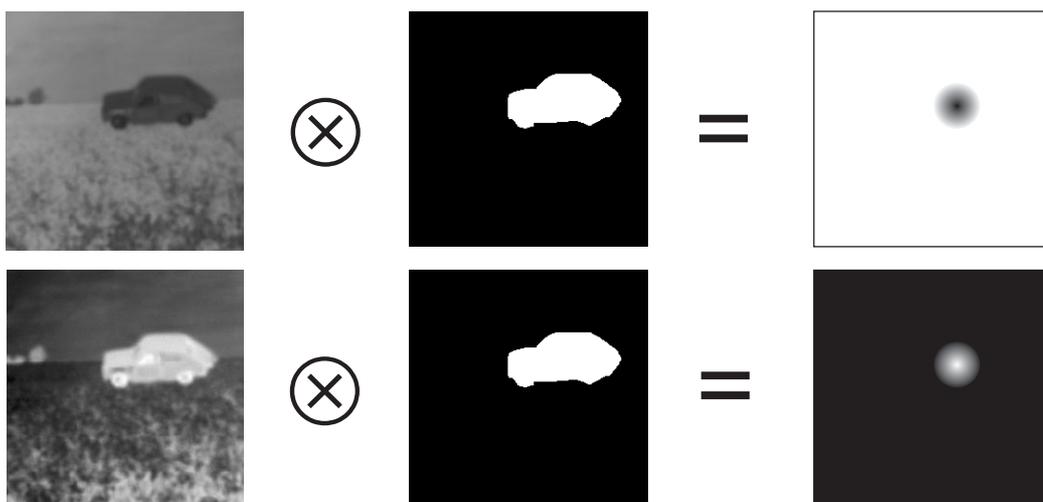


Figure 3.10 : Corrélations de la scène avec la fenêtre binaire. Dans le premier cas, le résultat de la corrélation est de valeur inférieure au reste du plan. Dans le deuxième, en ayant inversé la scène, le résultat contient plus d'énergie que le fond et est ainsi mieux détectable.

D'un point de vue pratique, la première opération du processus de segmentation optique consiste donc à tester si la surface autour du point d'initialisation dans l'image est plus sombre que l'intensité globale de l'image. Dans ce cas, il faut inverser numériquement la scène. Ceci peut-être réalisé en une passe sur l'image, et en même tant que l'opération d'extension linéaire. A la fin de la passe, selon la comparaison entre la moyenne des pixels autour du point d'initialisation et la moyenne totale de l'image, on traitera la scène ou son complément.

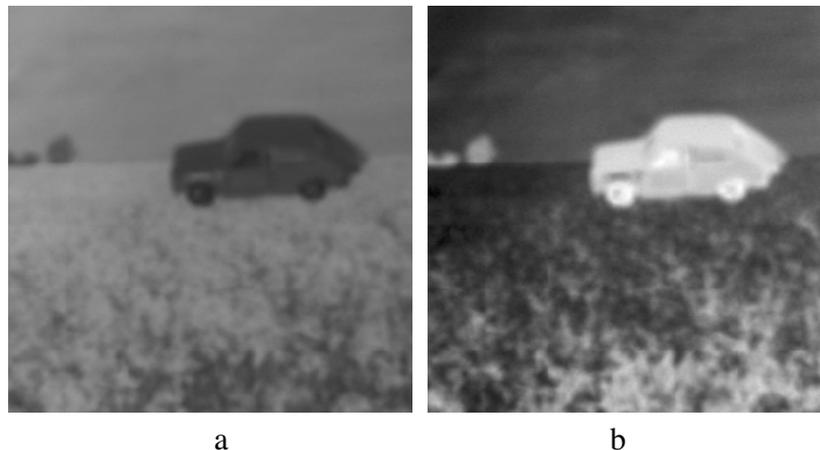


Figure 3.11 : (a) scène originale (b) scène prétraitée (négatif et extension linéaire par anamorphose).

La figure (3.11b) montre l'effet des deux pré-traitements numériques sur la scène. Ces pré-traitements augmentent le contraste entre l'objet et le fond, et le traitement de l'image de manière analogique en est ainsi amélioré. Les statistiques de la "nouvelle" scène qui sera traitée optiquement sont les suivantes :

		Sans traitement	Avec traitements
FOND	Moyenne	120	87
	Ecart type	17	33
OBJET	Moyenne	65	202
	Ecart type	11	24

Tableau 3.1 : Statistiques de la scène sans et avec pré-traitements.

Il existe d'autres prétraitements et certains auraient certainement permis d'accroître davantage les performances du système optoélectronique, mais nous n'avons pas approfondi cette voie propre au traitement d'image. Notre scène est seulement "améliorée" et non "transformée".

3.4.4 Les capteurs

3.4.4.1 Caméra à transfert de charge

Le système de détection est un composant essentiel du processeur optique. Il sert d'interface entre l'information lumineuse et l'information électronique envoyée à l'ordinateur. Appelé CCD (*Charge Coupled Device*), ce capteur d'intensité transforme l'énergie lumineuse

contenue dans les photons en énergie électrique. Lorsqu'ils atteignent le condensateur de type MOS (*Metal Oxide Substrate*), les photons génèrent des charges, sensiblement proportionnelles à l'intensité lumineuse, qui sont converties en signal électrique.

La caméra CCD utilisée est de marque Sony et possède une matrice de 752x582 cellules photoréceptrices, qui ne sont pas sensibles à la polarisation de la lumière reçue. La caméra est monochromatique (en niveaux de gris) et délivre un signal vidéo de type CCIR (*European monochrome video format standard*), ce qui signifie que la cadence du signal est de 25 Hz pour une définition de 768x576 pixels. Comme sa résolution d'entrée, de la matrice photoréceptrice, et celle de sa sortie, le signal vidéo, sont différentes, elle effectue un rééchantillonnage.

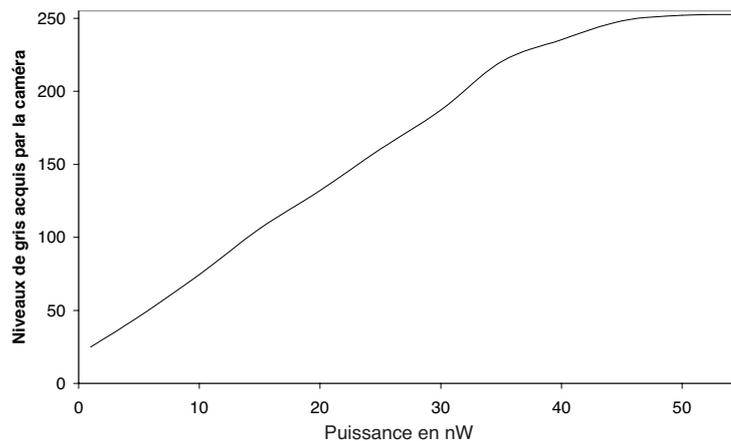


Figure 3.12 : Fonction de transfert de la caméra. Mesure effectuée sur 16x16 pixels au centre et avec la sensibilité réglée au maximum.

La figure (3.12) montre que notre caméra est légèrement non-linéaire, puisqu'elle sature pour les niveaux de gris élevés. Comme nous l'utiliserons sur une plage allant de 0 à 45 nW nous considérerons ce capteur comme linéaire dans cette zone de fonctionnement.

Le signal vidéo envoyé à l'ordinateur est numérisé via une carte d'acquisition et de traitement qui code sur 8 bits (0-255) le signal électrique provenant de chaque pixel. On peut régler le gain et l'offset de l'entrée analogique de la carte pour adapter la plage de conversion analogique/numérique au signal reçu et ainsi optimiser la résolution de l'acquisition.

Le processeur optique a tout d'abord été testé avec la caméra CCD pour des raisons de commodité. En effet, il est ainsi facile de déterminer si le capteur est correctement situé dans le plan de la corrélation en vérifiant sa focalisation. Ce capteur est limité à une cadence de fonctionnement du même ordre de grandeur que celle de nos SLM (25 Hz), ce qui n'est pas pénalisant. Nous envisagerons une configuration plus rapide dans le sixième chapitre.

3.4.4.2 Photodiodes

La valeur du centre de la corrélation doit être mesurée au point central de la corrélation. Il est donc possible de s'affranchir de la lente matrice CCD en utilisant un capteur de taille réduite et n'utilisant qu'une cellule photoréceptrice.

Il existe plusieurs semi-conducteurs capables de convertir une lumière incidente en un signal électrique utile. Nous avons opté pour des photodiodes qui font partie des capteurs les plus répandus, les plus linéaires, les plus fiables et les plus économiques. Les photodiodes sont des dispositifs qui fournissent une tension ou un courant proportionnel à l'intensité du flux lumineux les éclairant.

L'utilisation d'un capteur d'intensité muni d'une seule cellule, au lieu d'une matrice de capteurs, nous permettra d'accélérer le traitement de l'information. En effet, les photodiodes ont des temps de montée et de descente bien inférieurs à ceux de la caméra, ce qui leur permet de fonctionner à des fréquences supérieures au MHz. De plus, leur plage d'acquisition est plus importante (fig. 3.13). Nous avons choisi des photodiodes UDT455LN et UDT455HS. Ces photodiodes sont insensibles à la polarisation de la lumière incidente.

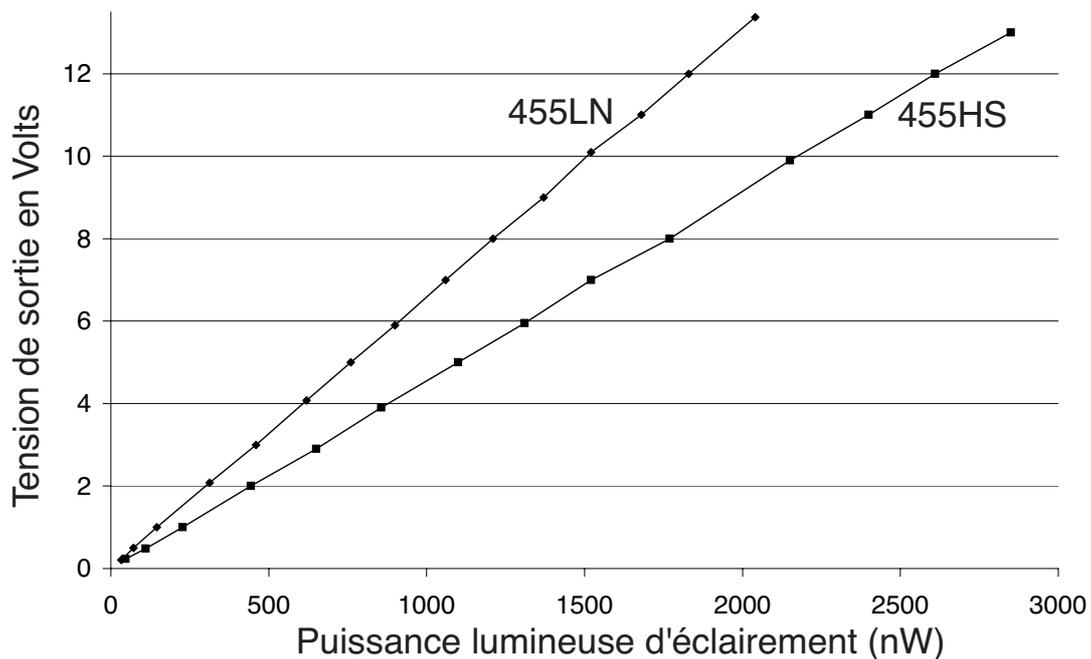


Figure 3.13 : Fonction de transfert des photodiodes à amplificateur opérationnel intégré UDT 455 Low Noise (LN) et High Speed (HS).

Les capteurs UDT455LN et UDT455HS, tels que nous les avons conditionnés, possèdent respectivement un gain de 6,6 kV/mW et 4,6 kV/mW à la longueur d'onde utilisée (532 nm). En comparant la figure (3.13) et la figure (3.12), on remarque que nos photodiodes permettent de mesurer une plus large gamme de puissances lumineuses.

Avec ces capteurs, la cadence d'affichage des SLM serait alors le dernier facteur limitant la vitesse. Toutefois, ces capteurs sont difficiles à placer dans le montage comparé à la caméra qui permet de vérifier la position sur l'axe optique (focalisation dans le plan de corrélation) et sur les axes transverses (vertical et horizontal). C'est pourquoi, les photodiodes seront utilisées dans le cinquième chapitre, après avoir effectué les premières expérimentations pour valider la mise en œuvre optique.

3.4.5 Description du processeur optique

En appliquant le principe de l'ombroscopie décrit précédemment, un corrélateur incohérent peut être simplement mis en œuvre de cette manière :

Le processeur optique comporte trois parties :

- Plan d'entrée : l'image à traiter (la scène) est affichée sur un écran LCD de résolution SVGA, qui est éclairé par une onde lumineuse incohérente de longueur d'onde 532 nm (fournie par un laser Nd:YAG, doublé en fréquence de puissance 400 mW de marque COHERENT, décohérent par un diffuseur tournant).
- Plan de traitement : la fenêtre binaire de segmentation est affichée sur un SLM SVGA.
- Plan de sortie : le résultat de la corrélation y est acquis par une caméra CCD.

Suite aux différentes études menées sur ces corrélateurs, nous avons opté pour la configuration la moins contraignante en ce qui concerne les rapports de grandissement entre les plans [32] :

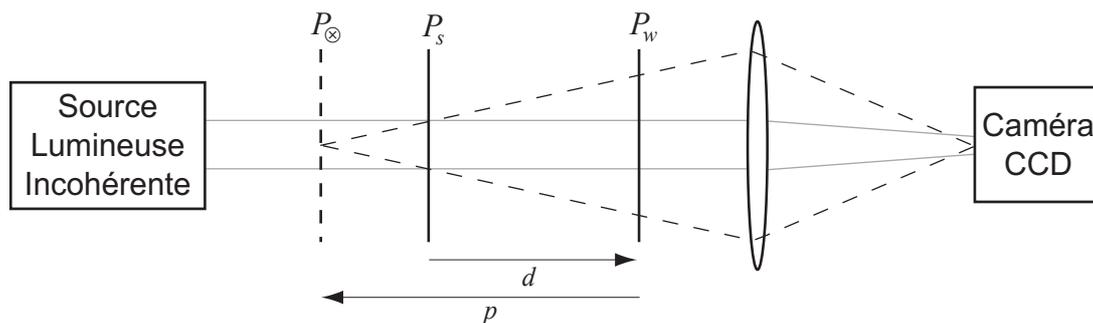


Figure 3.14 : Configuration du corrélateur optique. Le plan P_{\otimes} contient la distribution d'amplitude de la corrélation des plans P_s et P_w .

Le plan de détection P_{\otimes} est positionné avant P_s et P_w . Il doit être observé à l'aide d'une lentille qui ne fait qu'imager P_{\otimes} dans le plan de la caméra. Comme p est négatif, nous avons un plan de corrélation virtuel. Pour notre montage $d = 115,5$ mm, $p = -346$ mm et le grandissement (éq. 3.4) vaut alors $G = 0,67$, ce qui signifie que la fenêtre est 1,5 fois plus grande que la scène.

Ces distances ont été choisies en tenant compte des limitations photométriques et des effets de la diffraction, puisque ce choix est un compromis fonction de la distance de séparation des plans à corréler. Si d est grande, les effets de la diffraction seront importants et la qualité de la corrélation faible, mais la quantité d'informations traitées sera plus importante [45], et inversement. De plus, les effets photométriques nous empêchent de trop rapprocher les plans.

Nous pouvons maintenant calculer la résolution de notre corrélateur ombroscopique avec l'équation (3.11) :

$$N_1 N_2 = \frac{A_1 A_2}{4\alpha^2 \lambda^2 d^2} .$$

Les écrans LCD ont une surface de $26 \times 20 \text{ mm}^2$ et la longueur d'onde utilisée est de 532 nm , ce qui limite la résolution des images affichées sur LCD_1 et LCD_2 à :

$$N_1 \approx 60 \times 77$$

$$N_2 \approx 89 \times 117$$

avec un diamètre de pixel effectif d'environ $310 \mu\text{m}$ de diamètre pour chacun des plans. Ceci correspond à peu près à une surface de 90 pixels réels ($\sim 33 \mu\text{m}$ de diamètre) affichant la même information. C'est à cause de cette faible résolution que les corrélateurs ombroscopiques sont délaissés au profit des architectures cohérentes. Les effets de la diffraction, provoqués par la grille du second SLM sur le plan de corrélation, ne peuvent plus être négligés si nous dépassons ces contraintes de résolution.

Le processeur optique qui réalise la corrélation entre s et w est schématisé ci-dessous [46] :

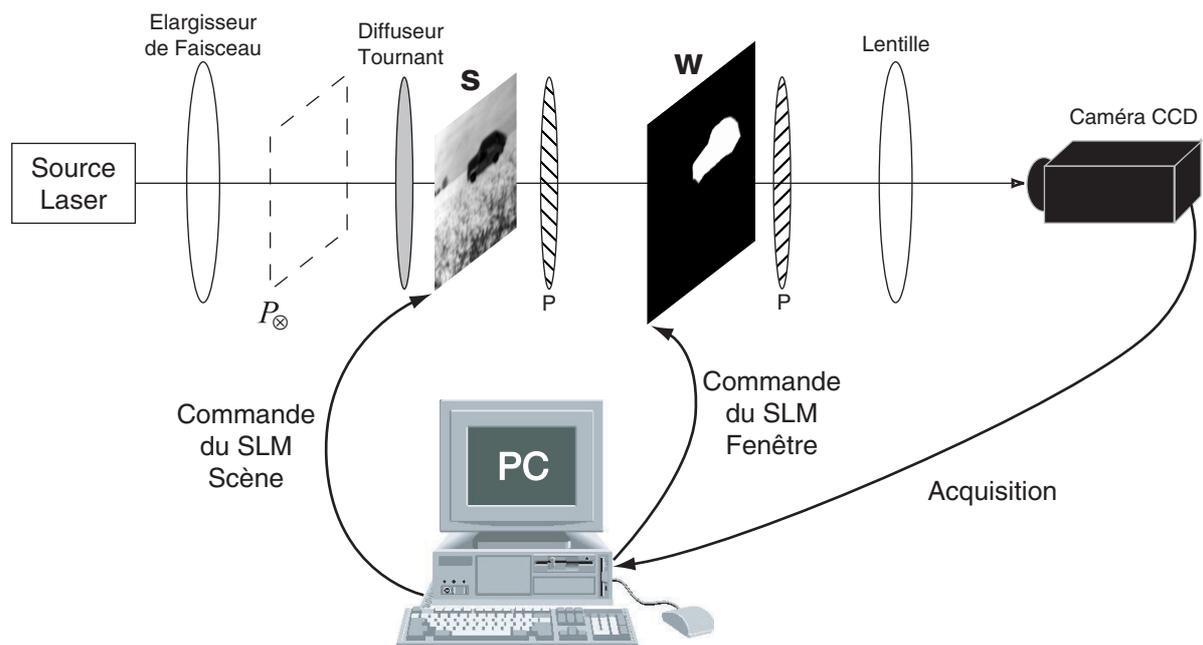


Figure 3.15 : Schéma du corrélateur incohérent ombroscopique.

Le principe de fonctionnement du processeur optique est le suivant. Un faisceau collimaté de lumière cohérente traverse tout d'abord un diffuseur tournant. La lumière incidente est alors diffusée dans toutes les directions. Elle éclaire un SLM SVGA (800×600 pixels) sur lequel est affichée la scène, s . Comme la phase du faisceau provenant du diffuseur tournant est aléatoirement modulée, l'image en sortie du SLM scène est spatialement incohérente. Après un passage à travers un polariseur, l'information est traduite en amplitude. Puis, le faisceau projette l'ombre de s sur un autre SLM SVGA (identique au premier) où est affichée la fenêtre, w . Enfin, derrière le polariseur associé au deuxième SLM, une lentille image le plan

P_{\otimes} (fig. 3.15) sur la matrice CCD de la caméra. Comme les mesures en corrélation incohérente sont proportionnelles à l'amplitude, la caméra acquiert directement le produit de corrélation entre s et w (plan P_{\otimes}). Pour calculer le critère, seule la valeur centrale est nécessaire. Par conséquent l'acquisition est moyennée sur quelques photorécepteurs du centre de la caméra.

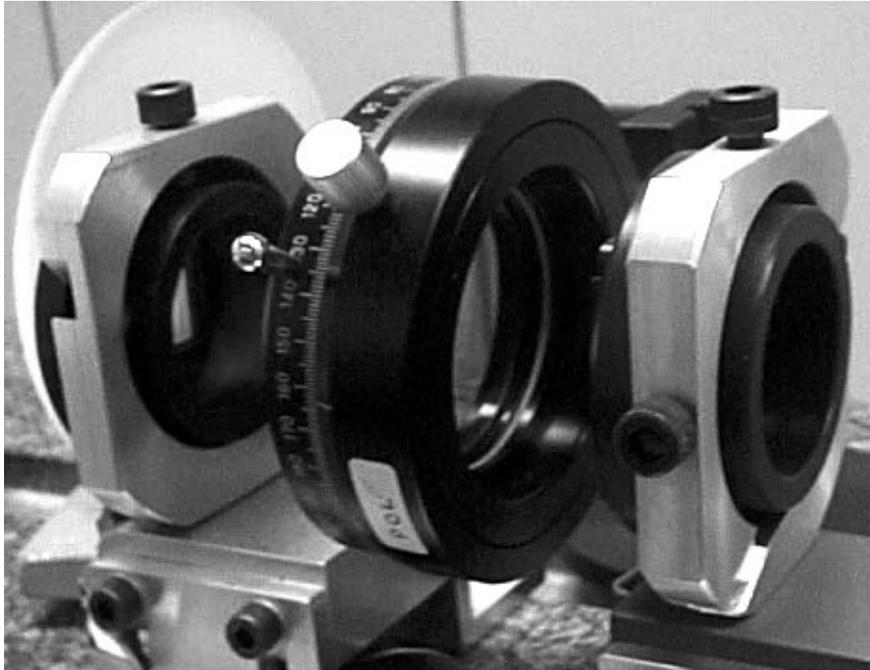


Figure 3.16 : Photo représentant de gauche à droite : le diffuseur tournant, le SLM fenêtre, un polariseur et le SLM scène.

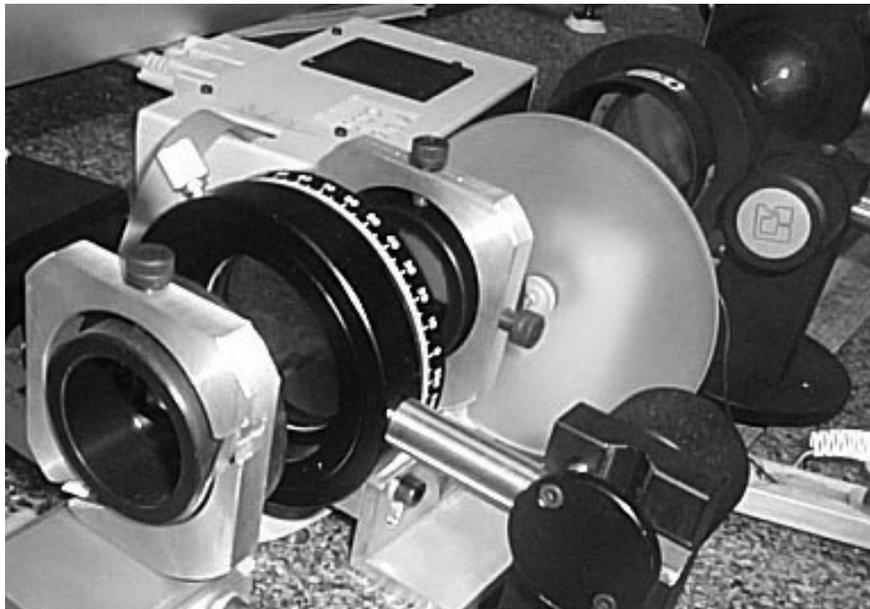


Figure 3.17 : Autre photo du processeur où le diffuseur est plus visible.

Bien qu'en principe, le plan du diffuseur et celui du SLM devraient être confondus, en pratique il suffit que la source lumineuse incohérente qui éclaire le premier SLM soit suffisamment grande pour qu'il soit illuminé uniformément de n'importe quel point de vue [3]. Le diffuseur peut donc être placé sans grande précision devant le premier SLM tant qu'il

respecte cette condition. Toutefois, il est à noter que plus ces deux éléments seront proches, plus l'intensité lumineuse sera importante dans le reste du montage.

Le fait que la lumière passe à travers le diffuseur annihile la cohérence, mais elle garde son angle de polarisation. Le laser fournit une onde lumineuse polarisée verticalement. Le premier SLM, dont les cellules ont un angle de polarisation vertical en entrée, n'a pas besoin de lame retardatrice ($\lambda/2$) pour adapter l'angle de polarisation de la lumière incidente. Pour le second SLM, comme le contraste est satisfaisant quelque soit l'angle d'attaque (cf. section 3.4.3), une lame n'est pas nécessaire non plus.

Le capteur en bout de bras doit être très sensible puisque dans le cas le plus lumineux, lorsque les SLM affichent un niveau de gris de 255, seulement 600 nW/cm^2 parviennent à l'extrémité du bras optique (fig. 3.18). Entre l'entrée de la lumière dans le processeur et sa sortie, 99,97% de l'énergie est absorbée.

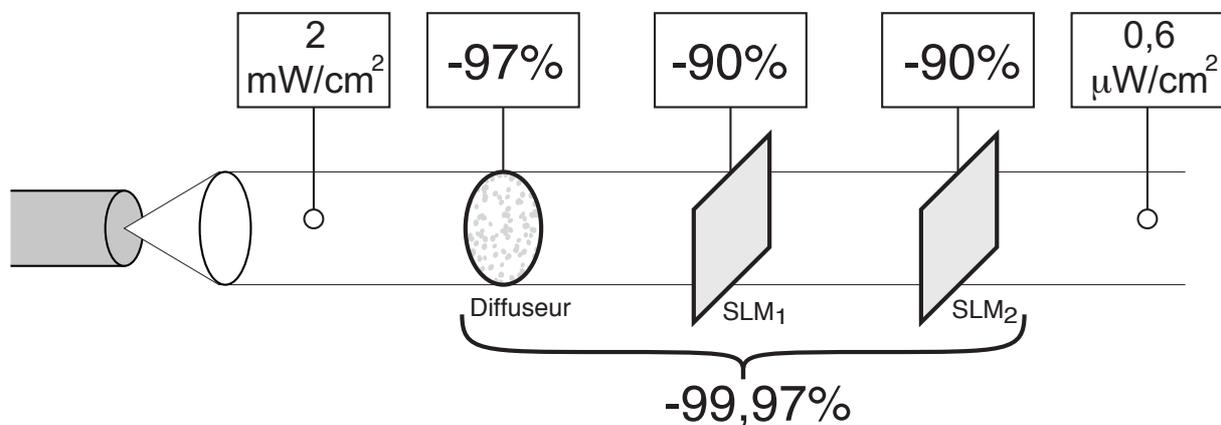


Figure 3.18 : Illustration de l'absorption de la lumière émise par le laser tout au long de son chemin dans le processeur.

Nous exploitons le plan de corrélation, mais nous aurions tout aussi bien pu opter pour le plan de convolution et obtenir la corrélation en réalisant une symétrie centrale sur la scène ou sur la fenêtre. En fait, le plan de convolution est beaucoup plus flou, moins énergétique et les déformations dues aux lentilles y sont plus importantes.

3.4.5.1 Illustration des performances du corrélateur optique

Avant toute utilisation de notre montage expérimental, nous avons procédé à sa caractérisation. Il s'agit de le tester avec des objets dont la fonction de corrélation est bien connue : des carrés et des triangles rectangles évidés (fig. 3.18).

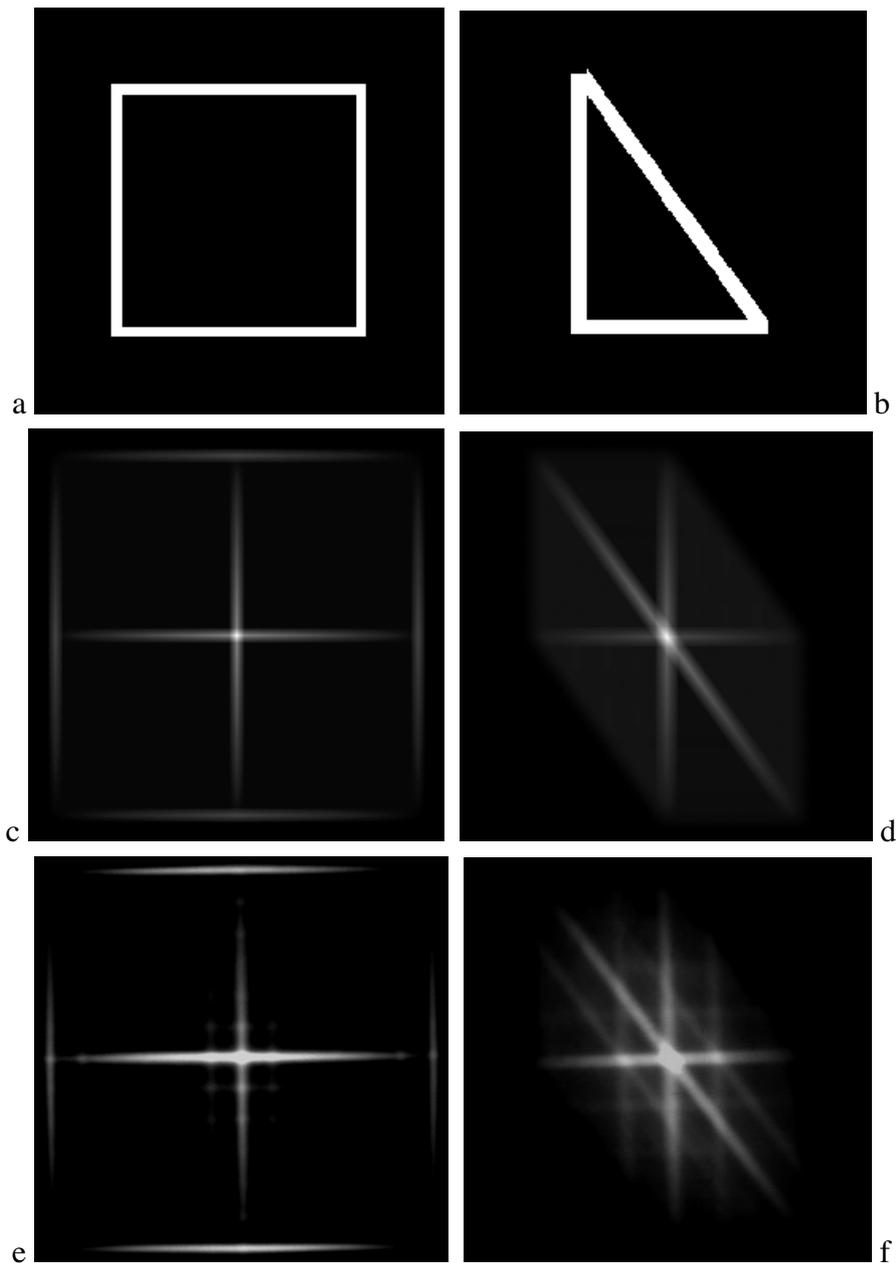


Figure 3.19 : (a-b) Les deux formes de départ (c-d) autocorrélations théorique des formes de départ (e-f) autocorrélations mesurées avec le processeur optique.

La figure (3.19) prouve que la mise en œuvre optique de la corrélation donne des résultats fidèles à la corrélation théorique. Cependant, les figures (3.19e et f) mettent en évidence les effets de la diffraction. En fait, l'image affichée sur le premier écran LCD est diffractée par la grille du deuxième. Lorsqu'on image le premier SLM sur la caméra, on observe la scène diffractée par la structure de grille du second SLM.

3.5 Conclusion

Ce troisième chapitre nous a permis d'expliquer notre choix d'architecture optique. En accord avec notre matériel et nos besoins, nous avons opté pour un corrélateur incohérent. Ainsi la corrélation n'est pas perturbée par la tavelure, ni par le couplage entre l'amplitude et la phase intrinsèque aux modulateurs utilisés. En revanche, la diffraction et les effets photométriques

risquent de dégrader les résultats. C'est ce que nous allons vérifier dans le chapitre suivant où nous testerons la faisabilité d'un snake SIRS optoélectronique.

3.6 Références Bibliographiques

1. M. Gedziorowski et J. Garcia, "Programmable opticaldigital processor for rank order and morphological filtering", *Opt. Commun.* **119**, 207-217 (1995).
2. V. Laude, P. Chavel et P. Réfrégier, "Implementation of arbitrary real-valued correlation filters for the shadow-casting incoherent correlator", *Appl. Opt.* **35** (26), 5267-5274 (1996).
3. G.L. Rogers, "Noncoherent optical processing", S.B. Stanley éd., Wiley, New York, 169 p. (1977).
4. J.W. Goodman, "Introduction to Fourier optics", McGraw-Hill, San Francisco, (1968).
5. A. Maréchal et P. Croce, "Un filtre de fréquences spatiales pour l'amélioration du contraste des images optiques", *C. R. Acad. Sci.* **237** (12), 607-609 (1953).
6. F.B. Berger, "Optical cross-correlator", Brevet (U.S.) n° 2.787.188 (1957).
7. A. Vander Lugt, "Signal detection by complex spatial filtering", *IEEE Trans. Inf. Theory* **10** (2), 139-145 (1964).
8. C.S. Weaver et J.W. Goodman, "A technique for optically convolving two functions", *Appl. Opt.* **5** (7), 1248-1249 (1966).
9. H.H. Arsenault, T. Szoplik et B. Macukow ed., "Optical processing and computing", Academic Press, San Diego (1989).
10. B. Javidi et J.L. Horner ed., "Real-Time Optical Information Processing", Academic Press, San Diego (1994).
11. R. Somas, "Contribution à la modélisation des réseaux de diffraction. Application à l'étude d'interconnexions optiques holographiques pour liaisons à haut débit", Thèse, Université de Haute Alsace (1997).
12. J. Sloan et S. Udomkesmalee, "An optical processor for object recognition and tracking", Perkin-Elmer Applied Optics Operations, (1987).
13. J. Colin, "Corrélation optique photoréfractive haute cadence à transformée de Fourier conjointe", Thèse, Université Paris VI (1998).
14. V. Laude, S. Mazé, P. Chavel et P. Réfrégier, "Amplitude and phase coding measurements of a liquid crystal television", *Opt. Commun.* **103** (1,2), 33-38 (1993).
15. D.M. Pepper, C.J. Gaeta et P.V. Mitchell, "Real-time holography, innovative adaptive optics, and compensated optical processors using spatial light modulators", in *Spatial light modulator technology: materials, devices, and applications*, édité par U. Efron, Marcel Dekker, Inc., 585-654 (1995).

16. R.D. Juday et J.M. Florence, "Full complex modulation with two one-parameter SLMs", in *Wave Propagation and Scattering in Varied Media II*, SPIE **1558**, 499-504 (1991).
17. L.G. Neto, D. Roberge et Y. Sheng, "Full-range, continuous, complex modulation by the use of two coupled-mode liquid-crystal televisions", *Appl. Opt.* **35** (23), 4567-4576 (1996).
18. P. Chavel et S. Lowenthal, "A method of incoherent optical image processing using synthetic holograms", *J. Opt. Soc. Am.* **66** (1), 14-23 (1976).
19. A.W. Lohmann, "Incoherent optical processing of complex data", *Appl. Opt.* **16** (2), 261-263 (1977).
20. L.M. Zerbino et J.P. Goedgebuer, "2-D wavelength multiplex correlator", *Opt. Commun.* **55** (4), 248-252 (1985).
21. M.M. Robertson, "Interpretation of Patterson diagrams", *Nature* **152**, 411-412 (1943).
22. L. Bragg, "Lightning calculations with light", *Nature* **154**, 69-72 (1944).
23. Y. Li, A. Kostrzewski, H.H. Kim et G. Eichmann, "Compact parallel real-time programmable optical morphological image processor", *Opt. Lett.* **14**, 981-983 (1989).
24. P.L. Jackson, "Correlation function spatial filtering with incoherent light", *Appl. Opt.* **6**, 1272-1273 (1967).
25. J.D. Armitage et A.W. Lohmann, "Character recognition by incoherent spatial filtering", *Appl. Opt.* **4** (4), 461-467 (1965).
26. B.E. Krikenkov, S.V. Mikhlyaev, P.E. Tverdokhle et Y.V. Chugui, "Non-coherent optical system for processing of images and signals", in *Optical Information Processing*, édité par Y.E. Nesterikhin, G.W. Stroke & W.E. Kock, Plenum Press, 203-216 (1976).
27. A. Louri, "Efficient optical implementation method for symbolic substitution logic based on shadow casting", *Appl. Opt.* **28** (16), 3264-3267 (1989).
28. E.G. Paek, A. Von Lehmen, J.R. Wullert II et R. Martin, "Compact and robust incoherent holographic correlator using a surface-emitting laser-diode array", *Opt. Lett.* **16** (12), 937-939 (1991).
29. P. Andrés, *et al.*, "All-incoherent dispersion-compensated optical correlator", *Opt. Lett.* **24** (19), 1331-1333 (1999).
30. A. Pe'er, D. Wang, A.W. Lohmann et A.A. Friesem, "Optical correlation with totally incoherent light", *Opt. Lett.* **24** (21), 1469-1471 (1999).
31. E.H. Horache, B.E. Benkelfat, Q. Zou et V. Laude, "Incoherent multiplex optical correlator for pattern recognition", in *Optics in Computing*, Université Laval, édité par R.A. Lessard & T. Galstian, SPIE **4089**, 41-45 (2000).
32. J. Knopp et M.F. Becker, "Generalized model for noncoherent optical convolvers and correlators", *Appl. Opt.* **17** (7), 984-985 (1978).

33. E.L. Green, "Diffraction in lensless correlation", *Appl. Opt.* **7**, 1237-1239 (1968).
34. K. Raj, D.W. Prather, R.A. Athale et J.N. Mait, "Performance analysis of optical shadow-casting correlators", *Appl. Opt.* **32** (17), 3108-3112 (1993).
35. M. Gedziorowski, T. Szoplik et C. Ferreira, "Resolution of a lensless shadow casting correlator with partially coherent illumination", *Opt. Commun.* **106** (4,5,6), 167-172 (1994).
36. M. Born et E. Wolf, "Principles of optics", Pergamon Press, Oxford, (1980).
37. V. Laude, "Diffraction analysis of pixelated incoherent shadow casting", *Opt. Commun.* **138**, 394-402 (1997).
38. V. Laude, "Corrélation optique optimale et application aux architectures cohérentes et incohérentes", Thèse, Paris XI Orsay (1994).
39. D.P. Casasent et G. House, "Implementation issues for a noncoherent optical correlator", in *Optical Pattern Recognition V*, Orlando, édité par D.P. Casasent & T.-H. Chao, SPIE **2237**, 179-188 (1994).
40. M.G. Tomilin, "Liquid crystals at the turn of the century", *J. Opt. Technol.* **68** (9), 641-645 (2001).
41. L. Bigué, "Reconnaissance des formes en temps réel par voie optique : étude comparative d'implantations optiques de filtres de corrélation. Application au corrélateur optique à transformée de Fourier conjointe.", Thèse, Université de Haute Alsace (1996).
42. P. Ambs et L. Bigué, "Characterization of an analog ferroelectric spatial light modulator. Application to dynamic diffractive optical elements and optical information processing", in *Optics for Information Systems, 4th Euro-American workshop on optoelectronic Information Processing*, Valencia, édité par B. Javidi, P. Réfrégier, C. Ferreira & S. Vallmitjana, SPIE Critical Review **CR81**, 365-393 (2001).
43. M. Yamauchi et T. Eiju, "Optimization of twisted nematic liquid crystal panels for spatial light phase modulation", *Opt. Commun.* **115**, 19-25 (1995).
44. M. Coster et J.-L. Chermant, "Précis d'analyse d'images", Presses du CNRS, Paris, (1989).
45. B. Thirion, "Filtrage optique en temps réel : utilisation d'un imageur à cristal liquide dans un corrélateur cohérent", Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg - Université de Haute Alsace, Mulhouse (1980).
46. E. Hueber, L. Bigué, P. Réfrégier et P. Ambs, "Optical snake-based segmentation processor with a shadow casting correlator", *Opt. Lett.* **26** (23), 1852-1854 (2001).

Chapitre 4

Résultats

L'architecture choisie - un corrélateur incohérent par ombroscopie - se démarque des corrélateurs usuels car le faisceau de lumière traité est incohérent et donc adapté au traitement de valeurs d'amplitude pure. Dans ce chapitre, nous désirons montrer son aptitude à segmenter des objets grâce à un contour actif et ainsi prouver la faisabilité de notre processeur optoélectronique. Nous allons aussi quantifier la qualité de ses résultats et donner ses limites, en comparant les résultats des simulations et des expérimentations.

4.1 Critère de Qualité

Avant de présenter nos résultats, il faut rappeler que notre objectif est de réaliser des segmentations rapides et de bonne qualité. La vitesse est une grandeur objective. L'évaluation de la qualité de la segmentation est en revanche plus délicate. Nous avons besoin d'un outil, un critère fiable capable de quantifier le résultat de manière la plus objective possible.

Il existe plusieurs critères de qualité permettant de déterminer si un contour est fidèle à la forme de l'objet à segmenter. Le plus évident est le critère visuel [1]. Ce critère est subjectif car lié à une appréciation du contour interprétée par le cerveau qui reconstruit l'image; il est de plus difficilement quantifiable. En revanche, le critère numérique à minimiser, J , est un indice de qualité qui évolue en fonction de l'adéquation du contour à l'objet à segmenter. Mais il est relativement opaque : les variations en pourcentages sont très faibles et s'il converge vers une valeur, on ne peut pas dire si c'est un minimum local ou global. Pour deux segmentations stochastiques différentes donnant le même J minimisé, les qualités ne seront pas identiques.

Le critère le plus objectif est basé sur le calcul de la distance point à point entre le contour calculé et le contour réel. Cette méthode utilise les distances de Hausdorff. Cette méthode convient parfaitement pour évaluer la qualité d'une segmentation et sert même à

effectuer des discriminations entre différentes formes [2]. Cependant, cette opération peut sembler compliquée par rapport à une solution certes légèrement moins précise, mais beaucoup plus simple, qui consiste à réaliser un *OU exclusif* (\oplus) entre les surfaces.

$$Q = W \oplus W_{\text{référence}} \quad (4.1)$$

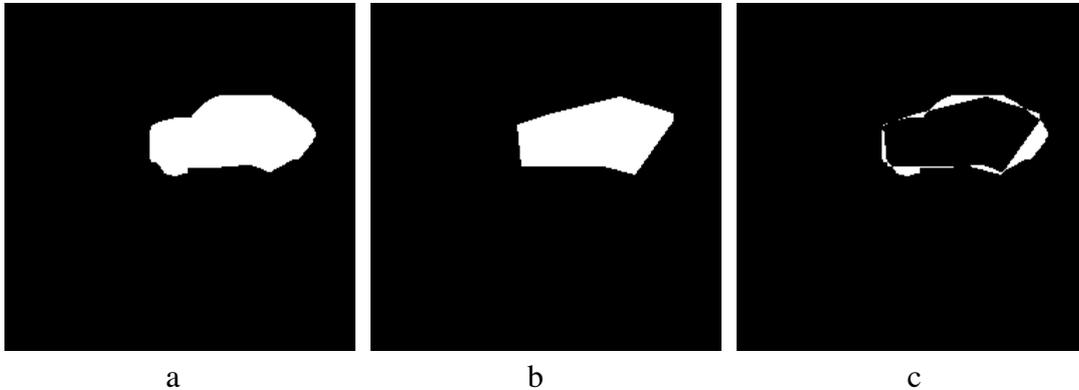


Figure 4.1 : (a) Pochoir référence (b) pochoir obtenu par segmentation optoélectronique avec un nombre de nœuds limité (c) résultat du OU exclusif entre les deux première images

Pour pouvoir quantifier la qualité d'une segmentation, il faut comparer le résultat obtenu avec une segmentation de référence, si possible la forme exacte de l'objet. A défaut, on peut essayer de s'approcher de cette référence en superposant plusieurs bons résultats de simulations. Pour retrouver une image binaire, un seuillage est effectué pour ne garder que la forme la plus universelle. Si le niveau du seuillage est élevé, la référence sera "cintrée", tandis que si le niveau est bas, la référence sera plus "épaisse".

Afin de calculer Q (le critère de qualité), il faut compter le nombre de pixels blancs de l'image obtenue avec l'opération logique *OU exclusive*. Puis, il faut le comparer au nombre de pixels blancs contenus dans le pochoir référence. Par exemple, la comparaison, pour l'exemple de la figure ci-dessus, donnerait 81%. Ce qui signifie que 19% de surface ne correspond pas au pochoir référence. Cette surface n'est pas forcément un "manque" de surface comme on le voit dans l'exemple ci-dessus, mais peut aussi être un "excès", comme on le voit ci-dessous :

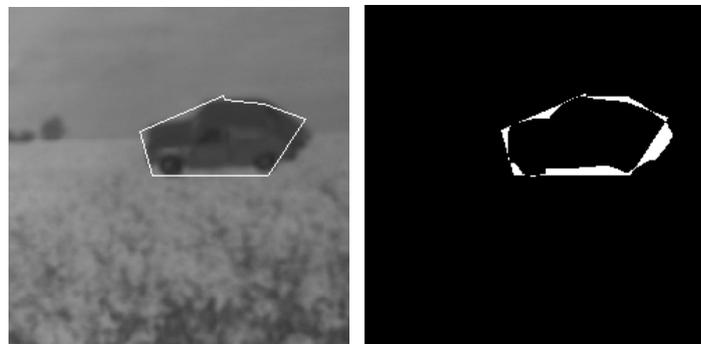


Figure 4.2 : A gauche : scène avec le contour ; à droite : OU exclusif sur ce même contour

Notons que Q n'est pas tout à fait objectif puisqu'il dépend de l'image de référence. Comme on l'a expliqué précédemment, la référence synthétique peut être différente selon les résultats des

snakes stochastiques moyennés et selon le seuil de binarisation. Néanmoins, pour rendre ce critère le plus fiable possible, on effectue une moyenne sur 10 pochoirs et le seuil est choisi à 50%. Avec cette référence, un snake en simulation, avec un nombre de nœuds illimité, donne des résultats compris entre 96% et 100%. Sur la figure ci-dessous on voit le résultat d'un OU exclusif sur un contour snake simulé.



Figure 4.3 : OU exclusif réalisé sur un résultat de simulation où le nombre de nœuds n'était pas limité

Ceci prouve que notre référence est satisfaisante ainsi que notre critère. Sur la figure (4.4) est représentée l'évolution de notre critère de qualité, Q , et celle de notre critère à optimiser, J , en fonction du nombre d'itérations.

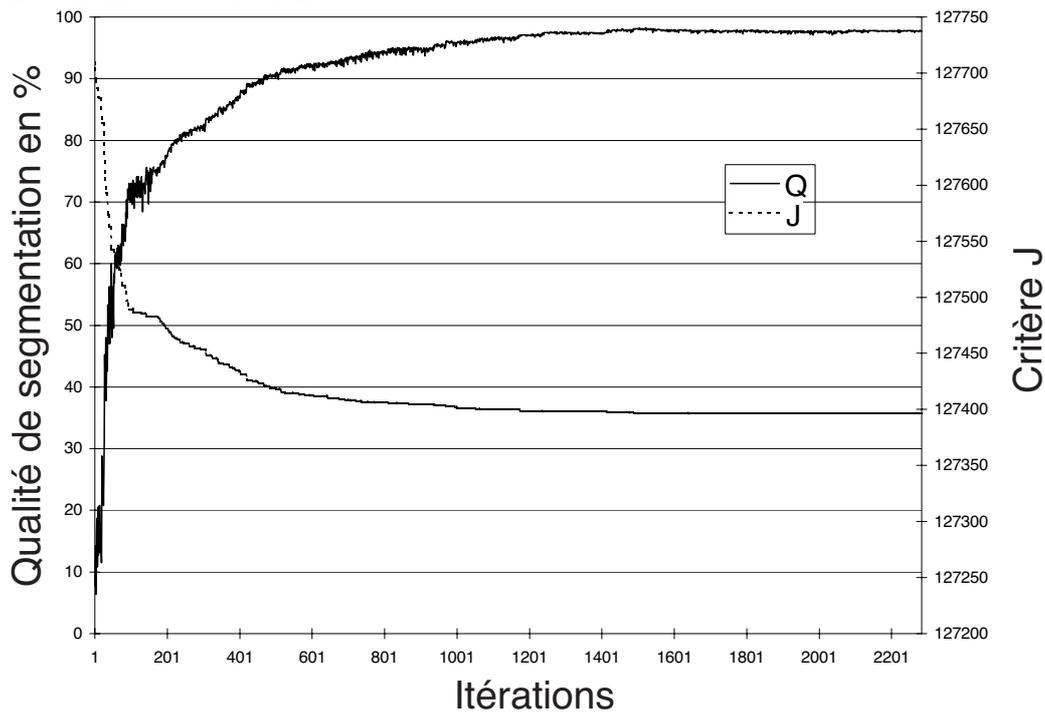


Figure 4.4 : Le critère de qualité, Q , et le critère à optimiser, J , en fonction des itérations

Cette figure a été obtenue en simulation avec un nombre dynamique et illimité de nœuds. Alors que le critère J décroît au fur et à mesure que le contour se rapproche de l'objet, la qualité augmente. On peut noter les faibles variations de J comparé à Q , ce qui s'explique au regard des équations des critères (cf. section 2.2.2) qui sont logarithmiques.

4.2 Résultats

Au préalable, nous souhaitons avertir le lecteur que les résultats présentés ici ont été obtenus avec l'algorithme "piqûre" qui sera développé au prochain chapitre. Cet algorithme, implanté relativement tôt, a permis d'améliorer la qualité des résultats d'environ 7%.

Les résultats présentés sont représentatifs pour des images suivant une loi de répartition Gamma, c'est à dire que l'objet contenu dans l'image peut être séparé du fond en tenant compte des moyennes des régions. Nous avons choisi de prendre l'image de la voiture (qui a justement une distribution d'intensité Gamma) comme base pour toutes les opérations et ainsi pouvoir comparer les résultats entre eux.

Les résultats présentés ci-dessous résultent de la mise en pratique de la loi Gamma appliquée à une image de 249x249 pixels. Cette image représente une voiture dans un champ. Pour montrer que le processeur fonctionne pour des images réelles, la photo est floue et mal contrastée.

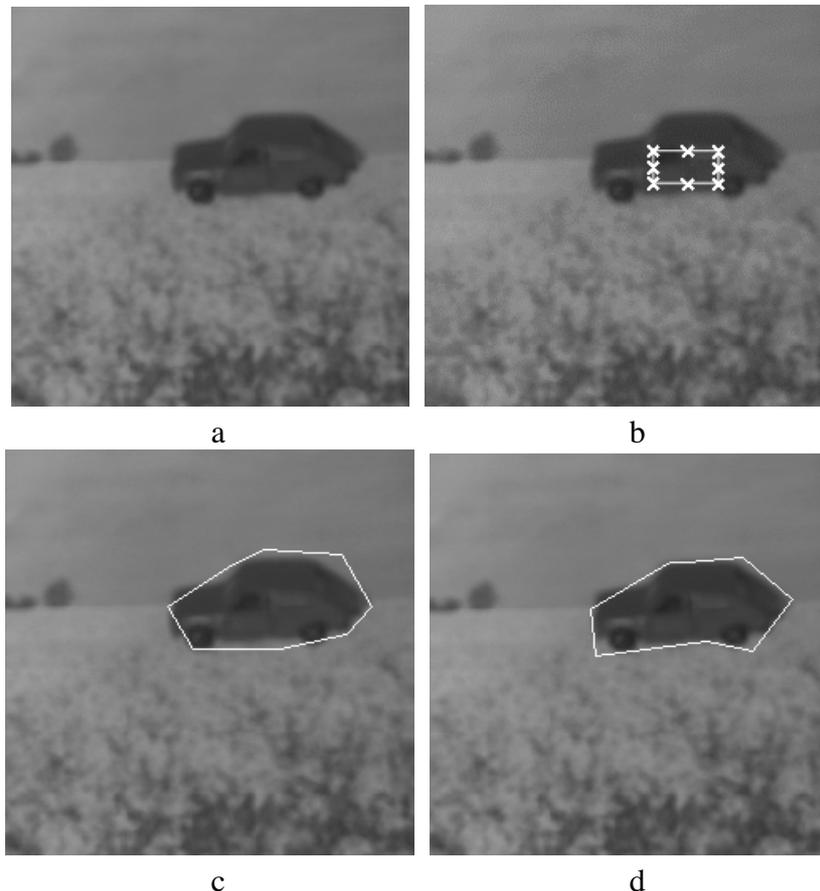


Figure 4.5 : (a) scène d'entrée, (b) initialisation du contour actif où les nœuds sont matérialisés par des croix (c) résultat de la segmentation grâce au processeur optique (d) résultat obtenu par simulation.

Les résultats décrits ici ont été obtenus avec un contour actif de 8 nœuds. Le déplacement des nœuds étant stochastique, les résultats peuvent différer d'une segmentation à l'autre : on vérifie que le contour actif, qui évolue dans un environnement bruité, peut converger vers un minimum local.

Numériquement, il est aisé d'éviter les minima locaux, mais la mise en œuvre optique complique la tâche puisque la détection de la valeur centrale du pic de corrélation est bruitée, comme nous le verrons plus en détail dans le chapitre 5. Ainsi, différentes segmentations optiques d'un même objet sont possibles. Le résultat expérimental (c) présenté en figure (4.5) a une qualité de 80,5 %, et le résultat (d) obtenu par simulation donne 88,1%. Les résultats sont relativement proches, ce qui prouve avant toute chose que le snake est une opération réalisable grâce à un processeur optoélectronique.

Le résultat expérimental (c) de la Figure (4.5) a été obtenu en 256 itérations et environ 61 secondes, et la simulation (d) a nécessité 208 itérations en 4 secondes. Dans les deux cas, c'est un PC Pentium III 450 MHz avec 184 Mo. de RAM équipé de cartes d'acquisition et de traitement Matrox Corona qui dirige la segmentation. A l'heure actuelle, le processeur optique ne nous permet pas de réaliser des segmentations à cadence vidéo, ce qui ne remet aucunement en cause le choix technologique optoélectronique puisqu'il s'agissait uniquement dans le présent chapitre de démontrer la viabilité d'une telle solution. Des améliorations sont proposées dans les chapitres suivants.

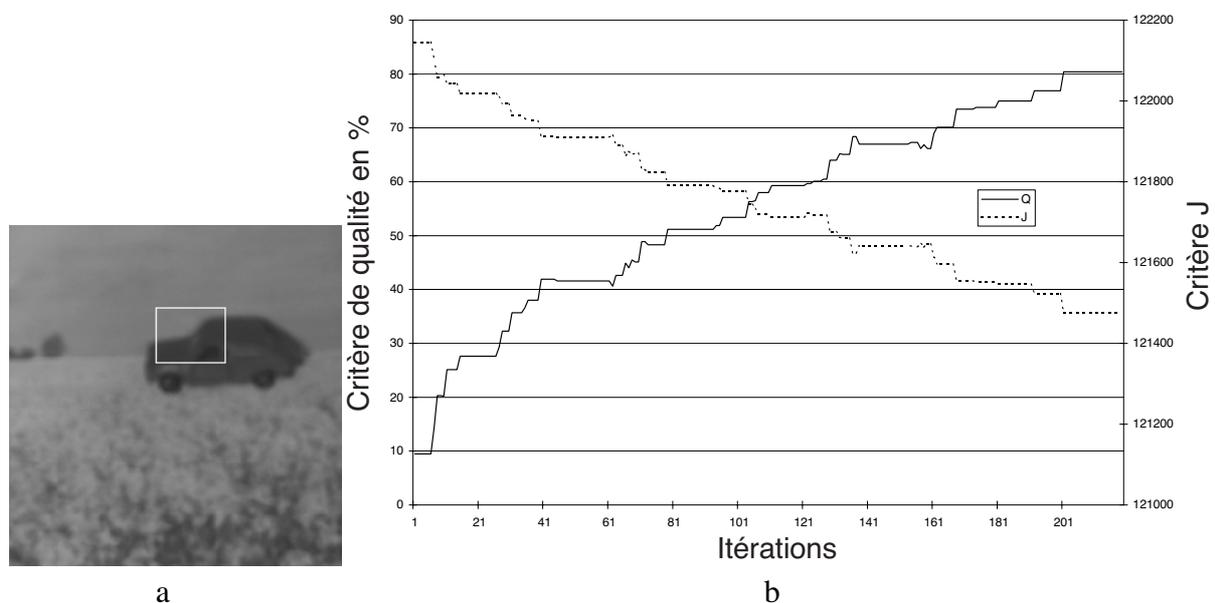


Figure 4.6 : (a) Initialisation défavorable du snake (b) Evolution expérimentale du critère à minimiser et du critère de qualité en fonction des itérations. La qualité du snake part de moins de 10% pour finir à plus de 80%.

La figure (4.6b) illustre l'évolution du critère de qualité, Q, défini au début de ce chapitre et le critère à minimiser, J, défini au chapitre 2. Ce résultat prouve la capacité de convergence du snake optoélectronique qui, partant d'un contour initial défavorable (fig. 4.6a), arrive à segmenter correctement la cible.

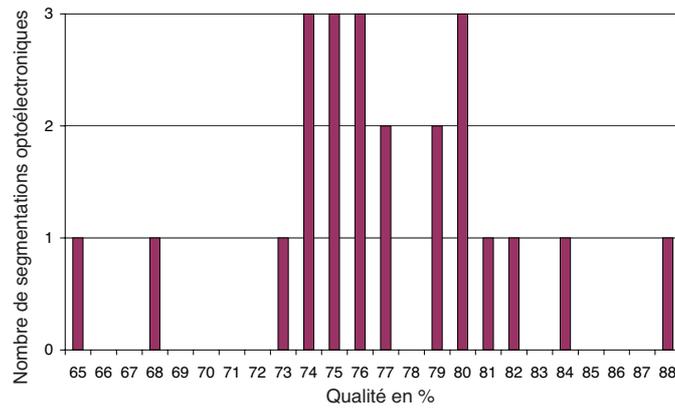


Figure 4.7 : Etude statistique sur un échantillon de résultats expérimentaux.

L'étude statistique effectuée sur le snake optoélectronique (fig. 4.7) montre que la qualité moyenne des segmentations s'élève à 77% au lieu de 88% en simulation.

Afin de tester la robustesse au bruit propre au modèle SIRS implanté, nous avons ajouté un bruit blanc de distribution gaussienne à la scène de la voiture pour simuler un bruit important. L'image obtenue (fig. 4.8a) conserve néanmoins une densité de probabilité suivant la loi Gamma (tableau 4.1).

		Sans bruit	Avec bruit
FOND	Moyenne	120	123
	Ecart type	17	78
OBJET	Moyenne	65	78
	Ecart type	11	72
	Contraste ¹	1,85	1,58

Tableau 4.1 : Caractéristiques statistiques de l'image de la voiture avant et après l'ajout de bruit.

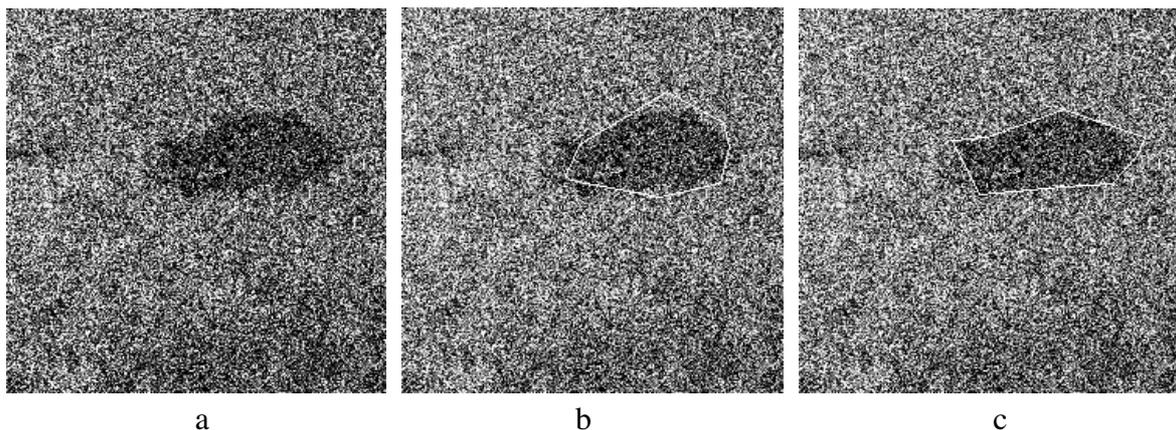


Figure 4.8 : Segmentation en environnement bruité (a) scène bruitée par un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et d'écart type 73 (b) résultat de la segmentation obtenue avec le processeur optique, $Q=77\%$ pour 208 itérations (c) résultat obtenu par simulation, $Q=86,3\%$ pour 256 itérations

¹ défini ici comme le rapport entre la moyenne de la région du fond et celle de la région de l'objet

La figure (4.8) montre des résultats de segmentation en environnement bruité. La segmentation simulée est presque aussi bonne que lorsque la voiture n'est pas en environnement bruité. De même, la mise en œuvre optique de l'algorithme arrive à segmenter la voiture de manière presque équivalente. Il est clair que dans ce cas, il faut un montage optique de très bonne qualité pour reproduire précisément les valeurs de chaque pixel.

La qualité et la vitesse de la segmentation reposent essentiellement sur deux paramètres (mis à part la loi de probabilité choisie pour l'image considérée) : la distance de déplacement des nœuds et leur nombre. Si les déplacements sont grands et le nombre petit, la segmentation se fera rapidement mais pour un résultat approximatif, et inversement. Des problèmes de croisement peuvent d'autre part survenir si le pas de déplacement est plus grand que l'espace minimum entre deux nœuds. Les premiers résultats satisfaisants ont été obtenus pour des déplacements de nœuds de 6 pixels et des contours de 8 nœuds.

L'algorithme peut être paramétré de manière à effectuer des segmentations numériques d'excellente qualité, avec plus de nœuds et plus d'itérations. De manière expérimentale, le fait d'ajouter des nœuds au fur et à mesure de la progression du contour actif n'apporte pas d'amélioration notable, pour l'image étudiée, à partir de 8 nœuds comme on peut le constater figure (4.9).

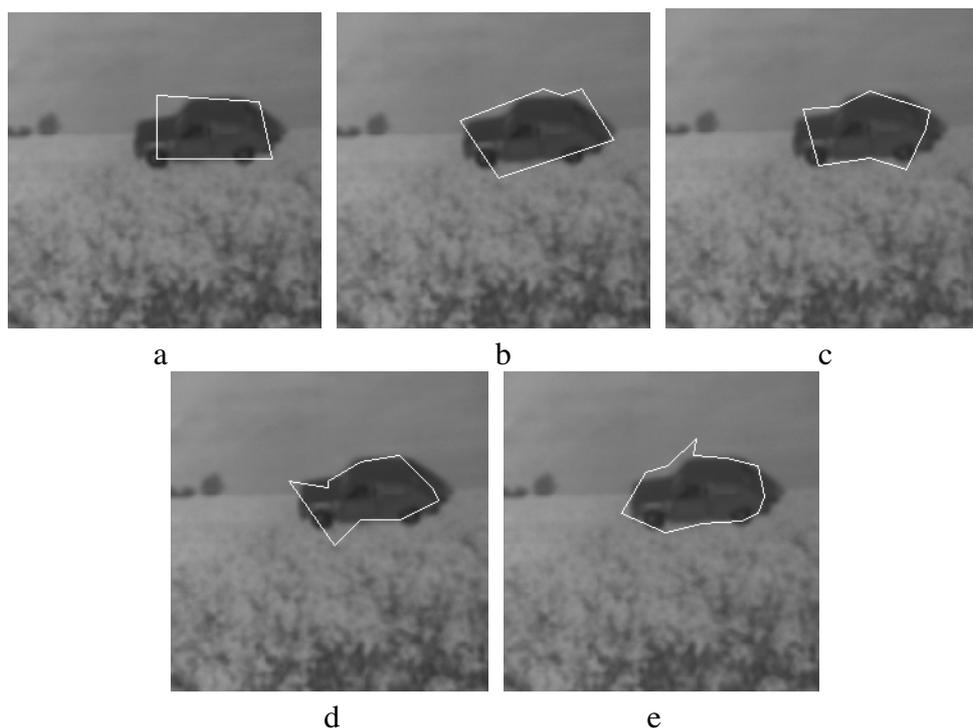


Figure 4.9 : Résultats expérimentaux de snakes pour différents nombres de nœuds. (a) 4 nœuds $Q=69,5\%$
(b) 6 nœuds $Q=72,8\%$ (c) 8 nœuds $Q=72,2\%$ (d) 10 nœuds $Q=72,3\%$ (e) 12 nœuds $Q=73,1\%$

Les résultats montrés figure (4.9) représentent le résultat d'une segmentation parmi les 10 qui ont été moyennés pour obtenir la figure (4.10).

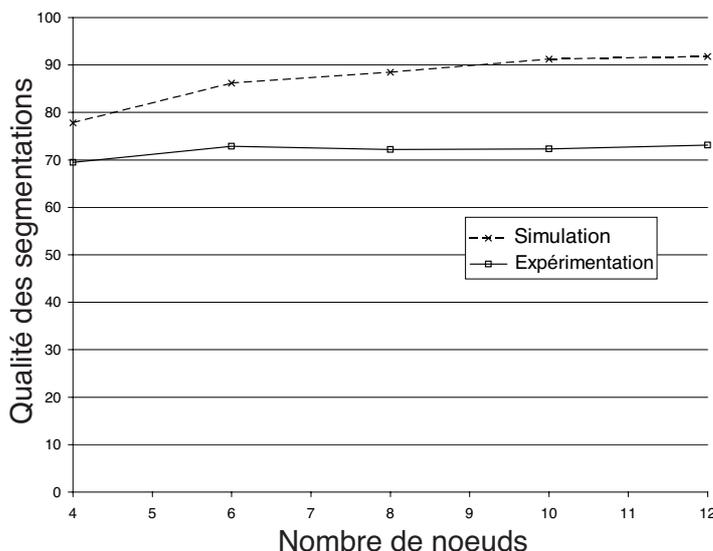


Figure 4.10 : Qualité des segmentations obtenues en moyennant 10 résultats pour chaque nombre de nœuds. Une courbe représente la qualité en simulation et l'autre de manière expérimentale en fonction du nombre de nœuds du contour.

Lors de cette campagne d'expérimentations, le laser s'est avéré particulièrement peu stable, ce qui explique que les qualités soient inférieures à celles obtenues en temps normal. Même si de nouvelles mesures seraient nécessaires pour parfaire cette étude, les chiffres donnés ici nous suffisent à montrer que la qualité est quasiment identique avec 8 ou 12 nœuds.

En réalité, la sensibilité aux détails de la scène et à son bruit s'accroît quand le nombre de nœuds augmente. Nous avons illustré ce comportement à la figure (4.11) où nous avons réalisé une simulation de la segmentation de l'image bruitée de la figure (4.8a) en utilisant 12 nœuds au lieu de 8.

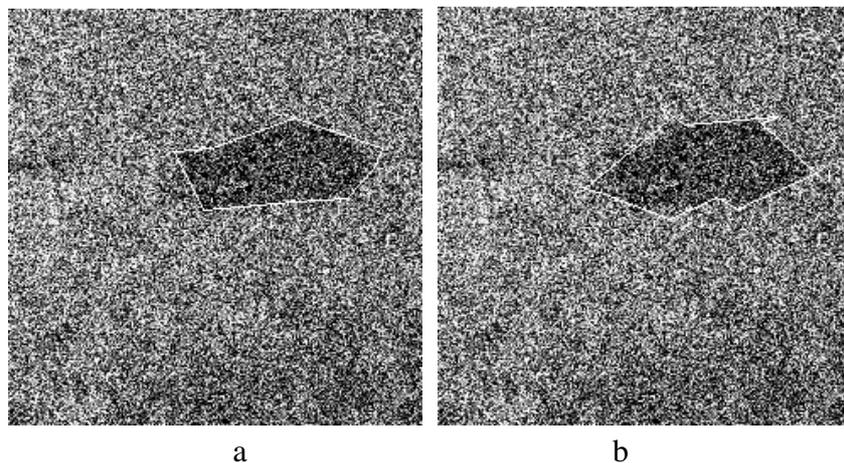


Figure 4.11 : Segmentation d'une image bruitée, (a) simulation avec 8 nœuds, $Q=86,3\%$ pour 256 itérations (b) simulation avec 12 nœuds, $Q=78,2\%$ pour 276 itérations.

En effet, la qualité a baissé de 8% par rapport au snake à 8 nœuds (fig. 4.8c). Ce résultat confirme qu'un contour de 8 nœuds est plus robuste qu'un contour de 12 nœuds. Evidemment, avec moins de nœuds, la qualité de la segmentation est intrinsèquement limitée, moins précise.

Il va sans dire que l'implantation analogique du processus fonctionne bien pour un nombre réduit de nœuds. Nous avons choisi, pour la voiture, d'utiliser 8 nœuds car la qualité de segmentation n'est pas nettement meilleure avec 10 ou 12 nœuds (fig. 4.10), alors que le temps de calcul est en revanche sensiblement allongé, et un contour avec 4 ou 6 nœuds donne des segmentations trop approximatives.

Pour illustrer le présent mémoire avec d'autres images, nous avons mené des essais sur d'autres scènes. La figure (4.12) présente des résultats obtenus avec trois images différentes.

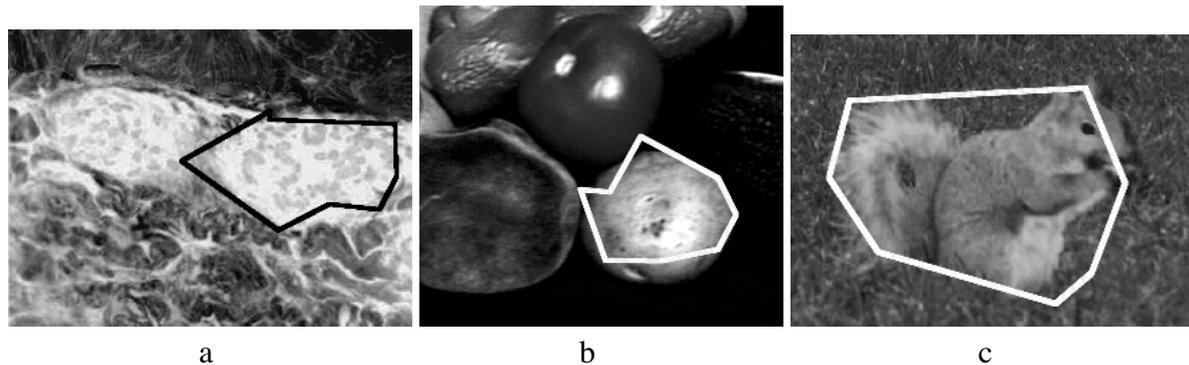


Figure 4.12 : Autres images de type Gamma segmentées de manière optoélectronique (a) cellule trisomique segmentée avec une qualité de 78% (b) fruit segmenté avec une qualité de 81% (c) écureuil segmenté avec une qualité de 70%. Pour cette dernière image, notons qu'elle ne suit pas parfaitement la loi Gamma et que 8 nœuds ne sont pas suffisants pour représenter le contour de l'objet en question.

Ces résultats prouvent que le snake optoélectronique est capable de segmenter d'autres images que celle de la voiture (qui a été utilisée tout au long du mémoire dans un souci de cohérence et pour faciliter la comparaison entre les différents résultats).

4.3 Diffraction

Nous utilisons des modulateurs avec des pixels carrés de 33 μm de côté, l'un affiche une scène de 249x249 pixels et l'autre une fenêtre binaire 1,5 fois plus grande que l'image de la scène. Nous dépassons donc les limites calculées au chapitre précédent (cf. section 3.4.5). Par conséquent, les effets de la diffraction sur le plan de corrélation ne peuvent plus être négligés. La figure (4.13) montre l'impact de la diffraction sur la scène de la voiture.

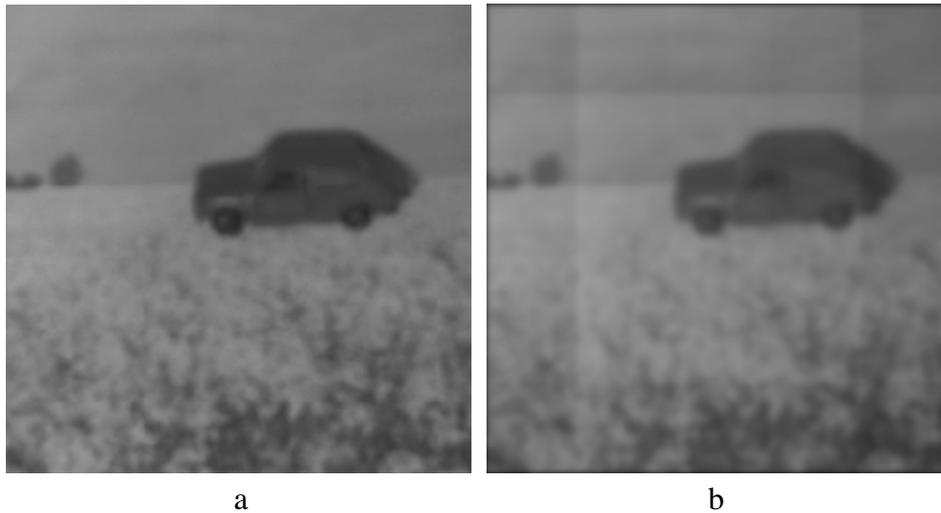


Figure 4.13 : (a) Image à traiter (b) image (a) soumise aux effets de la diffraction et de la pixélisation des plans scène et fenêtre.

Nous avons obtenu l'image (4.13b) en appliquant un noyau 90x90, issu d'observations expérimentales, qui correspond à la diffraction de la grille du deuxième SLM, et nous avons encore ajouté le léger effet de flou dû à la pixélisation des plans scène et fenêtre [3]. Les statistiques de l'image de la voiture sont modifiées comme suit :

		Sans diffraction	Avec diffraction
FOND	Moyenne	120	118
	Ecart type	17	20
OBJET	Moyenne	65	75
	Ecart type	11	11
Contraste		1,85	1,57

Tableau 4.2 : Caractéristiques statistiques de l'image de la voiture sans et avec diffraction.

Le flou sur la scène, provoqué essentiellement par la diffraction, entraîne un glissement des moyennes; la région sombre de la voiture se superpose au fond clair et inversement. Le contraste chute d'environ 15%, ce qui entraîne une baisse de qualité de 1% sur les simulations avec 8 nœuds. Cette légère baisse de qualité signifie que les effets de la diffraction, pourtant réputés pour leur importance dans les corrélateurs ombroscopiques, n'empêchent pas le bon déroulement du processus de segmentation avec le snake SIRS. Nous expliquerons dans le chapitre suivant d'où viennent les réelles causes des différences en simulations et expérimentations.

En outre, dans certains cas d'images, ce flou peut être avantageux dans un algorithme suivant la loi Gamma. L'algorithme itératif de segmentation s'arrête lorsqu'il n'arrive pas à trouver de nouvelle déformation du contour qui puisse minimiser davantage J, pouvant ainsi provoquer un blocage du snake à la proximité de régions très claires ou très foncées. Pour cet algorithme, qui n'utilise pas l'information sur les écarts types, une opération de flou ou de moyennage peut favoriser une meilleure convergence en évitant certains minima locaux. Par conséquent, les effets de la diffraction peuvent se révéler paradoxalement bénéfiques dans certains cas.

4.4 Loi Gaussienne

L'algorithme Gauss est le plus universel puisqu'un pré-traitement de blanchiment permet de s'y ramener dans de nombreux cas [4]. Mais cet algorithme est aussi celui qui nécessite le plus de calculs. En effet, la différenciation statistique des régions ne se contente pas uniquement des moyennes, comme avec le critère Gamma, mais encore des écarts types. De manière optique, la loi gaussienne nécessite deux corrélations, une pour s et l'autre pour s^2 , ce qui prend deux fois plus de temps.

Malheureusement l'implantation optique de cette loi n'a pas été fructueuse, notamment à cause des problèmes liés à la diffraction. Comme nous l'avons vu précédemment avec la scène de la voiture, les propriétés statistiques de la scène sont modifiées par la diffraction (fig. 4.14).

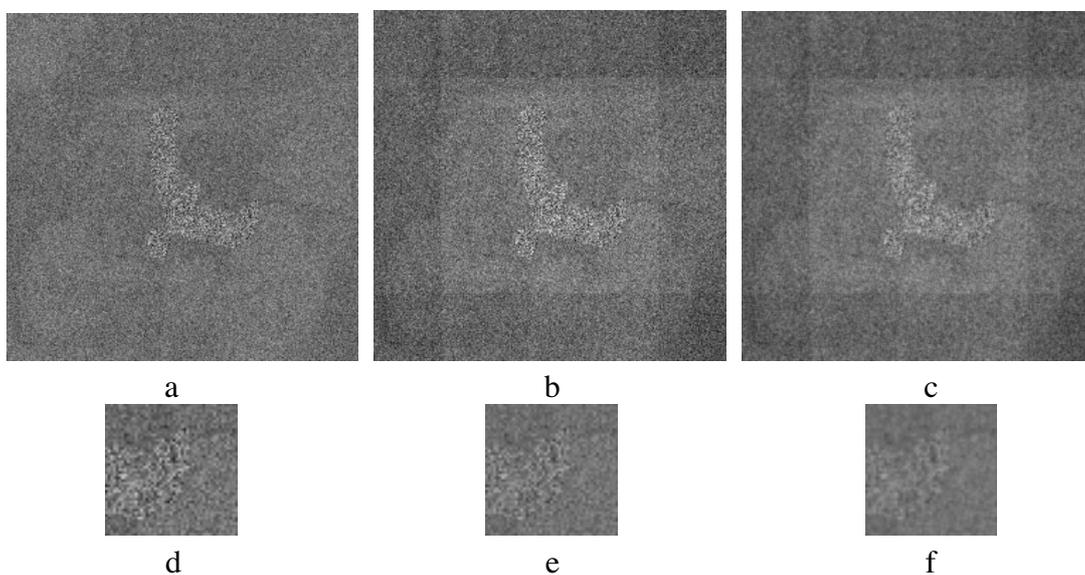


Figure 4.14 : (a) Image à traiter (b) image (a) soumise à la diffraction (c) image (b) soumise au flou supplémentaire dû à la pixélisation des plans scène et fenêtre (d-e-f) détails du bout d'aile droite extrait des images (a-b-c).

Comme la scène de l'aigle et ses dégradations (fig. 4.14) sont des images difficiles à analyser en les observant simplement, nous en avons extrait les caractéristiques statistiques dans le tableau suivant :

		Sans diffraction	Avec diffraction	Avec diffraction et flou
FOND ¹	Moyenne	110	110	110
	Ecart type	19	14	10
OBJET	Moyenne	121	121	121
	Ecart type	33	23	14

Tableau 4.3 : Caractéristiques statistiques.

¹Pour éviter de perturber les statistiques avec les bords plus sombres dans les figures (4.14b et c), nous considérons ici la zone centrale carrée des images où le fond est statistiquement homogène, et non l'ensemble du fond comme dans les autres études statistiques d'images de ce mémoire.

La scène de l'aigle sans diffraction présente des caractéristiques typiquement gaussiennes puisque les régions ont des écarts types distincts alors que les moyennes sont similaires, ce qui empêche l'utilisation de l'algorithme Gamma. Cependant, la diffraction et le flou dû à la pixélisation des plans entraîne une importante chute de ces écarts types.

C'est pourquoi, nous n'avons pas approfondi plus loin l'implantation optique de la loi gaussienne.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les résultats préliminaires de segmentation avec le processeur optoélectronique ont été présentés, validant ainsi l'implantation optique du snake SIRS, et du premier processeur optique capable de réaliser une opération de segmentation par contour actif. Notre processeur optique effectue une opération de segmentation ne nécessitant comme seule connaissance *a priori*, que la position de l'objet. Comparé aux corrélations optiques traditionnelles, appliquées à la reconnaissance des formes, qui sont plus contraignantes, cette réalisation ouvre les portes à de nouvelles applications optiques plus souples.

De plus, le caractère statistique, propre à l'algorithme implanté (SIRS), rend notre processeur optique peu sensible aux bruits contenus dans les images traitées. Nous avons illustré les performances du processeur avec des images réelles et bruitées.

Cependant, nous avons relevé plusieurs limites, entre autres le nombre de nœuds et les effets de la diffraction qui font chuter la qualité de 1%. Mais les raisons de la différence de qualité entre les simulations (88%) et les expérimentations (77%) n'ont pas encore été totalement déterminées. Nous nous y attèlerons dans le cinquième chapitre.

4.6 Références Bibliographiques

1. N.R. Pal et S.K. Pal, "A review on image segmentation techniques", *Pattern Recognition* **26** (9), 1277-1293 (1993).
2. O. Ruch et P. Réfrégier, "Comparison of Hausdorff distances performance in dissimilarity measurements for silhouette discrimination", in *Automatic Target Recognition XI*, Orlando, édité par F.A. Sadjadi, SPIE **4379**, 454-465 (2001).
3. V. Laude, "Diffraction analysis of pixelated incoherent shadow casting", *Opt. Commun.* **138**, 394-402 (1997).
4. C. Chesnaud, V. Pagé et P. Réfrégier, "Improvement in robustness of the statistically independent region snake-based segmentation method of target-shape tracking", *Opt. Lett.* **23** (17), 488-490 (1998).

Chapitre 5

Limites et Améliorations du Processeur Optique

Ce chapitre approfondit les expérimentations préliminaires, obtenues avec le processeur optique, présentées au chapitre précédent. L'objectif était de montrer dans un premier temps la faisabilité d'une segmentation par contour actif à l'aide d'un processeur optoélectronique. Nous allons maintenant nous attacher à déterminer les limites de notre système et les solutions pour améliorer les résultats.

5.1 Simulation des Perturbations sur la Mesure

Dans les simulations des perturbations effectuées, nous n'avons pas implanté la modélisation de tout le système optique et ses spécificités inhérentes aux traitements analogiques bien que nous ayons évalué assez précisément le modèle de notre montage d'un point de vue analytique grâce à la littérature. Les résultats expérimentaux sont de moins bonne qualité que les résultats obtenus en simulation et la raison cette différence provient du bruit et des non-linéarités introduits par les éléments optoélectroniques utilisés.

Dans le processus itératif, le seul point de différence possible provient de la mesure de la valeur centrale de la corrélation, valeur fournie par le processeur optique, qui dépend de beaucoup d'éléments.

Voici la liste des sources potentielles de différences :

- diffraction de l'image affichée sur le premier SLM par le deuxième SLM,
- aberrations des éléments optiques,
- non-linéarités de la réponse en transmission des SLM,
- rééchantillonnages de l'image (mise à l'échelle de la scène, CCD qui délivre un signal CCIR (768x576) à partir de 752x582 pixels),

- non-linéarités optiques et photométriques,
- bruit des capteurs (bruit de la caméra),
- bruit de quantification de la carte d'acquisition.

Ces phénomènes faussent la mesure. Avant de se pencher sur la partie de traitement du signal analogique, nous allons estimer de manière numérique l'influence théorique sur la mesure des différentes perturbations possibles.

5.1.1 Bruit additif sur la mesure

D'après les premières mesures, un bruit blanc de distribution uniforme semble se rapprocher le plus du bruit affectant le processeur. Afin de tester l'influence du bruit sur les segmentations, nous avons introduit ce bruit de manière numérique dans le calcul de la valeur centrale de la corrélation. La figure (5.1) montre l'influence que peut avoir un tel bruit sur la qualité des segmentations.

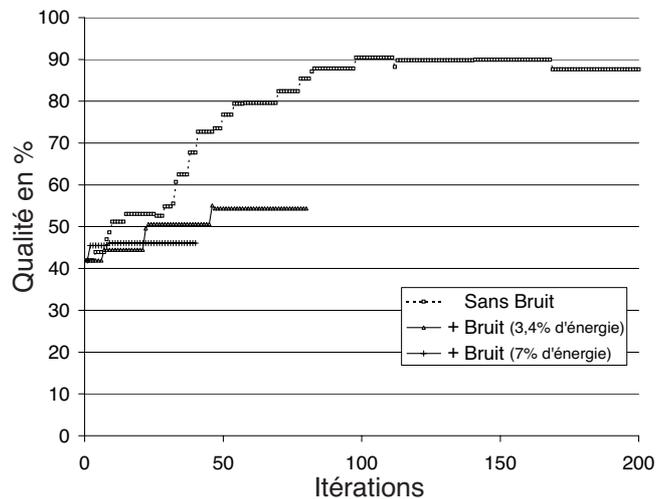


Figure 5.1 : Evolution de la qualité de segmentation pendant une simulation pour différentes amplitudes de bruit additif, quantifié en donnant la quantité d'énergie contenue dans le bruit par rapport à l'énergie totale du signal.

Nous remarquons dans la simulation qui a été réalisée pour la figure (5.1) que la qualité de la segmentation a chuté en fin de snake. Ce phénomène est dû à une convergence meilleure que la moyenne, et comme la référence est justement calculée sur une moyenne de résultats il arrive comme ici que la qualité baisse à la fin de la segmentation.

Nous observons que plus le bruit est important, moins la qualité est bonne, mais nous remarquons aussi que le nombre d'itérations utiles est réduit. Certes, le processus prend moins de temps, mais on ne peut pas considérer ce phénomène comme une amélioration. Une amélioration en terme de rapidité serait de réduire le nombre d'itérations en *conservant* la qualité des segmentations. Lors des expérimentations, guidé par des valeurs perturbées du centre qui induisent l'algorithme en erreur, le snake converge vers un minimum local du critère qui est erroné.

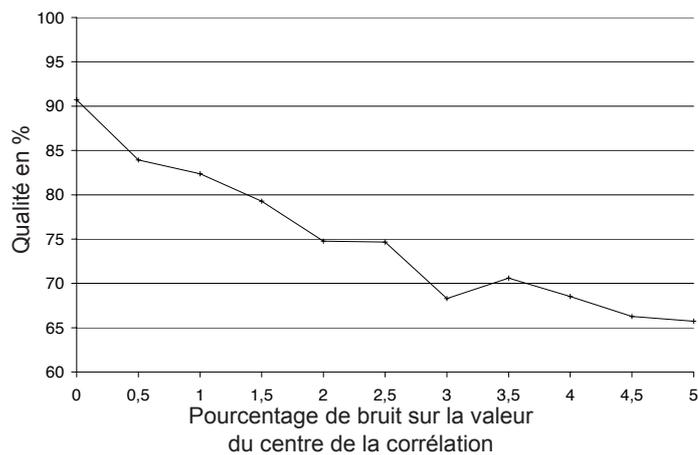


Figure 5.2 : Evolution, moyennée sur 20 échantillons, de la qualité des snakes en fonction du pourcentage de bruit additif perturbant le calcul de la valeur centrale de la corrélation

Au vu de la figure (5.1), le lecteur ne sera pas surpris par la figure (5.2) qui montre de quelle manière la qualité décroît en fonction du pourcentage de bruit additif.

5.1.2 Offset sur la mesure

Les mesures de signaux analogiques sont souvent soumises à des offsets; des réglages de compensation sont d'ailleurs prévus sur les cartes d'acquisition. Nous avons étudié ici comment varie la qualité des segmentations avec différents offsets ajoutés au calcul de la valeur centrale de la corrélation.

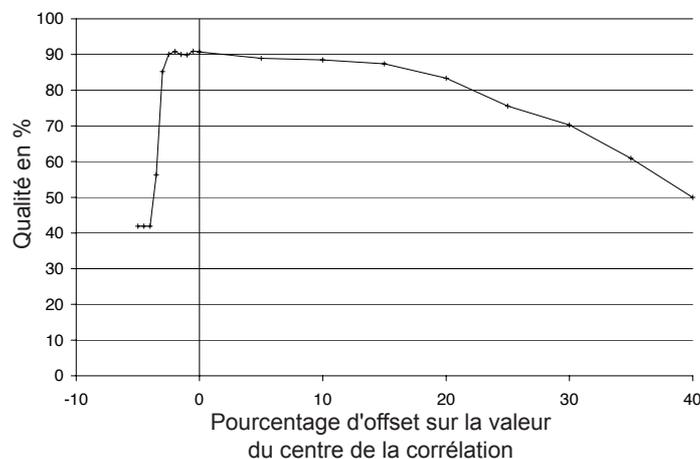


Figure 5.3 : Qualité des segmentations en fonction du pourcentage d'offset ajouté au calcul de la valeur centrale de la corrélation.

D'après la figure (5.3), nous pouvons dire que la segmentation est peu sensible à un offset positif. En revanche, elle est beaucoup plus sensible à un offset négatif. Pour un offset négatif supérieur à 4%, le contour de départ n'évolue pas et reste à 42%.

5.1.3 Gain sur la mesure

Une autre source de perturbation des mesures analogiques réside dans le gain.

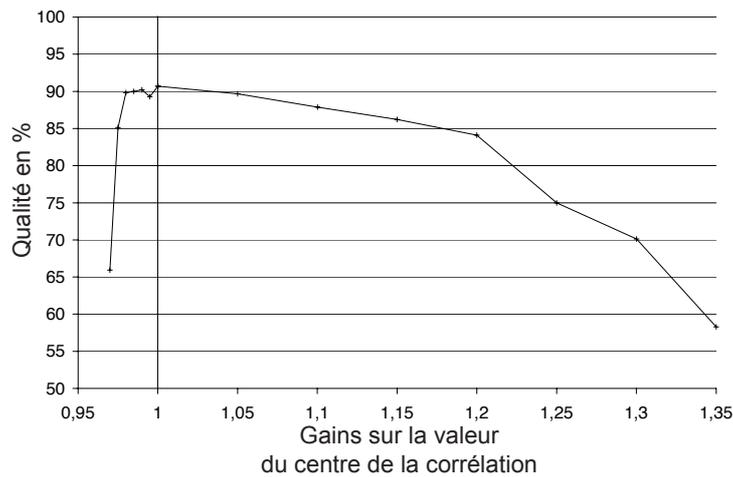


Figure 5.4 : Qualité des segmentations en fonction du gain perturbateur affecté au calcul de la valeur centrale de la corrélation.

On voit sur la figure (5.4) que l'algorithme de segmentation est plus sensible à un gain inférieur à 1 qu'un gain supérieur à 1. Au delà des perturbations maximales appliquées lors de ces mesures, le snake diverge.

5.1.4 Conclusion

Grâce à ces simulations de différentes perturbations, nous avons tout d'abord démontré que les perturbations qui affectent la valeur centrale de la corrélation affectent aussi la qualité de la segmentation. Nous avons observé qu'un bruit additif aléatoire influe beaucoup plus sur la qualité des segmentations que les autres perturbations.

D'après cette série de simulations, nous pouvons tirer des conclusions sur la nature des perturbations dans notre système optoélectronique. Nous écartons la possibilité d'une perturbation par un gain inférieur à 1 car le processus est en limite de stabilité, or expérimentalement, nous n'avons jamais détecté la moindre instabilité. D'une manière similaire, nous écartons la possibilité d'un offset négatif qui aurait provoqué des situations où le snake n'évolue pas lors des expérimentations. Par conséquent; la qualité des segmentations expérimentales est peut-être affectée par un léger bruit, un gain supérieur à 1 voire un offset positif.

5.2 Mesure de la Valeur Centrale de la Corrélation

La mesure de la valeur centrale de la corrélation est le point clef du processeur hybride. C'est l'aboutissement de l'opération de corrélation qui est réalisée optiquement et qui est censée accélérer le processus.

Cette acquisition est réalisée au centre de la caméra qui est placée au bout du processeur optique. Elle correspond à une moyenne sur une surface de plusieurs cellules CCD. La valeur centrale de la corrélation une fois acquise est transmise au PC qui peut alors calculer le critère à optimiser. La valeur centrale et le critère, J , sont liés par l'expression (2.9) et pendant une segmentation ils peuvent évoluer très différemment suivant que le contour initial est plus

grand ou plus petit que l'objet à segmenter. Figure (5.5) par exemple, le centre de la corrélation augmente alors que J décroît.

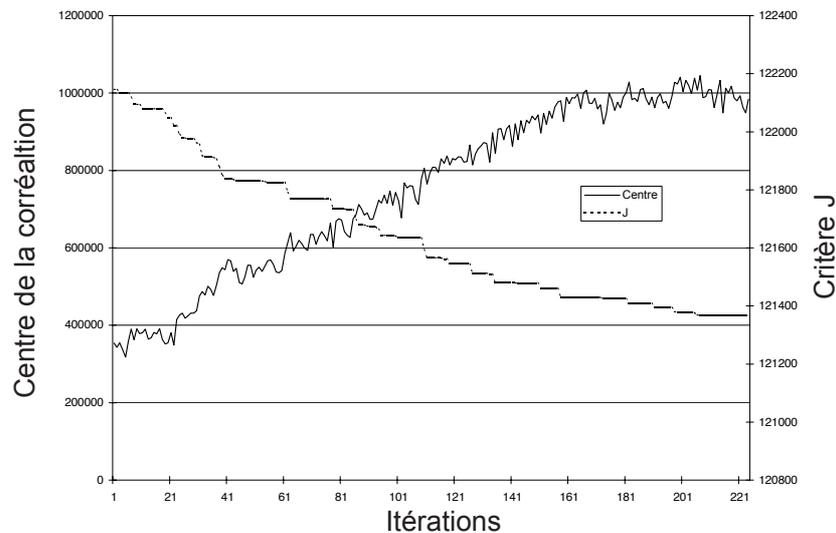


Figure 5.5 : Evolution de la valeur centrale de la corrélation et du critère J pendant un snake

La valeur centrale de la corrélation augmente dans ce cas car la fenêtre grandit et laisse donc passer plus de lumière. Si le contour initial avait été plus grand que l'objet, le contour actif se serait contracté et aurait fait chuter la valeur centrale de la corrélation.

Entre la mesure de la valeur centrale de la corrélation optique et la valeur simulée, la relation est quasiment linéaire :

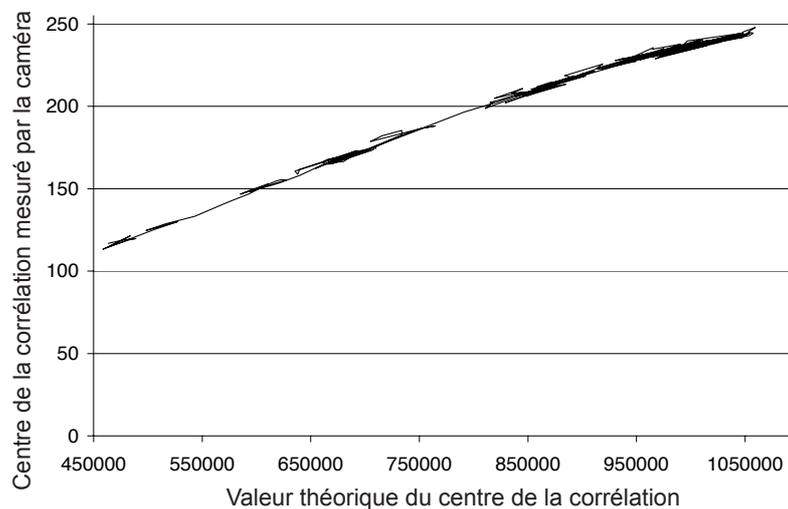


Figure 5.6 : Relation entre le centre de la corrélation théorique et le centre de la corrélation mesuré en bout de processeur optique avec la caméra

5.2.1 Relation affine

L'objectif du processeur optique est d'acquérir la valeur centrale de la corrélation la plus proche possible de la valeur numérique. Comme la carte d'acquisition ne fournit que des

valeurs sur 8 bits (donc entre 0 et 255), il est nécessaire de normaliser le résultat acquis. La figure (5.6) montre que la loi est linéaire. Il suffit donc de mesurer deux points de fonctionnement et pour pouvoir déterminer le coefficient directeur, a et l'ordonnée à l'origine, b , de cette loi affine.

$$(s \otimes w)_0^{\text{optoélectronique}} = a \cdot (s \otimes w)_0^{\text{mesuré}} + b \quad (1.1)$$

Avant de commencer le processus itératif de déformation du snake, deux pochoirs de tailles différentes sont affichés. Pour chaque pochoir on calcule la valeur numérique et on mesure la valeur centrale de la corrélation. Ainsi on peut déterminer a et b .

Sans cette normalisation préalable, la segmentation ne fonctionne pas.

5.2.2 Réinitialisation et convergence

Les premiers essais ont montré que la valeur centrale de la corrélation mesurée et celle calculée s'éloignaient au bout d'un certain nombre d'itérations. Pourtant le snake converge quand même. Afin que le processeur optique donne des résultats les plus proches possible du processeur numérique, une réévaluation ponctuelle des coefficients de la loi linéaire a été étudiée.

L'accroissement de la surface de la fenêtre provoque l'entrée de davantage de lumière dans le processeur, ce qui modifie le point de fonctionnement du système. Pour réajuster a et b on effectue des réinitialisations, en comparant (comme au départ) les mesures et les valeurs numériques de deux fenêtres. La première fenêtre, la petite, est toujours la même. La deuxième fenêtre est la fenêtre actuelle qui correspond au point de fonctionnement au moment de la réinitialisation.

Comme on n'a aucun moyen de vérifier quand les valeurs divergent (on ne peut pas effectuer systématiquement de corrélation numérique pour vérifier celle optique, l'objectif étant de remplacer le calcul numérique par un calcul optique), il faut judicieusement placer ces réinitialisations au cours des itérations, en évitant quelles soient intempestives. Comme le snake grandit d'abord rapidement, puis ralentit sa progression au fur et à mesure qu'il se rapproche de la forme finale, les intervalles doivent être de plus en plus écartés pour suivre l'évolution du point de fonctionnement.

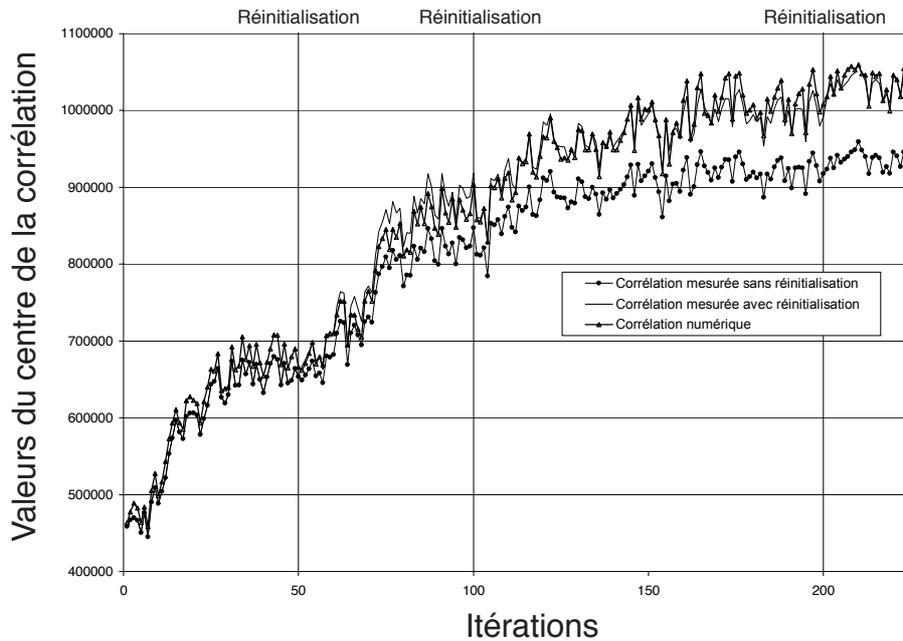


Figure 5.7 : Valeurs centrales de la corrélation acquises et calculées pendant un snake. Le centre de la corrélation mesuré diverge si les réinitialisations ne sont pas effectuées. Les réinitialisations sont effectuées aux itérations 50, 100 et 200.

Lors d'une dérive sur la mesure, on observe que le critère calculé grâce au processeur optoélectronique s'éloigne du critère calculé numériquement lors des simulations. Pourtant la segmentation est effectuée correctement (fig. 5.7). On remarque aussi que la dérive correspond à un "offset" positif croissant, ce qui, d'après l'étude menée au début de ce chapitre, ne dégrade pas tellement la qualité des segmentations à moins que l'offset dépasse 20%.

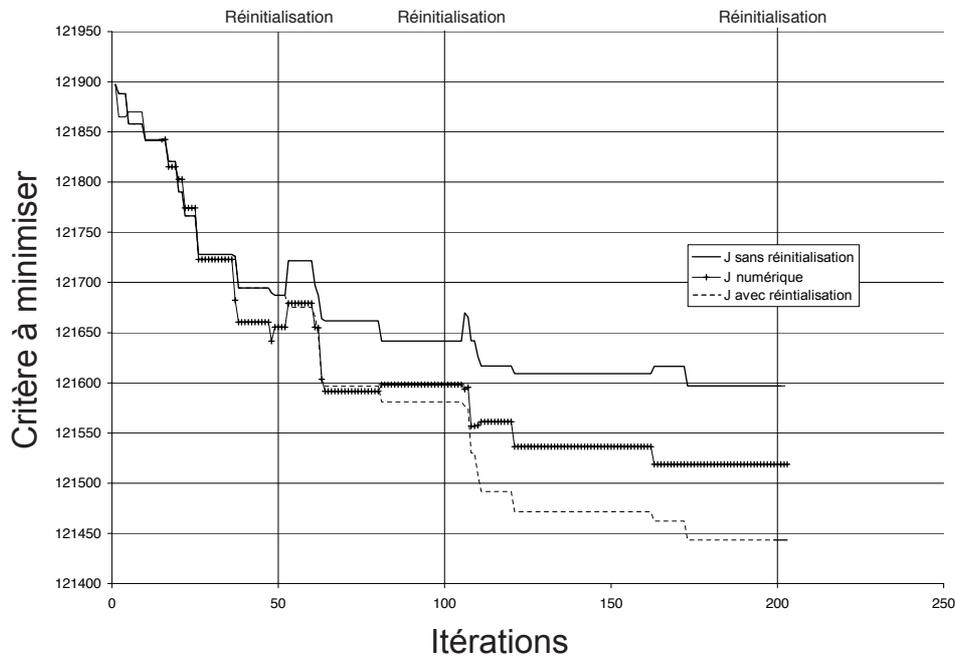


Figure 5.8 : Evolutions du critère à minimiser selon qu'il soit calculé numériquement, à l'aide de l'optique, et à l'aide de l'optique en effectuant les réinitialisations.

Avec les réinitialisations (fig. 5.8), on obtient expérimentalement une meilleure minimisation de J qu'en simulation puisque le snake optique va converger non seulement vers un minimum "statistique" de l'image traitée, mais encore vers un minimum relatif aux fluctuations du signal lumineux. La "carte" où sont situés les minimums locaux est donc modifiée par les variations sur la mesure. Sans les réinitialisations, le critère à minimiser demeure plus élevé. Néanmoins, le résultat s'avère en général globalement comparable à la solution avec réinitialisation.

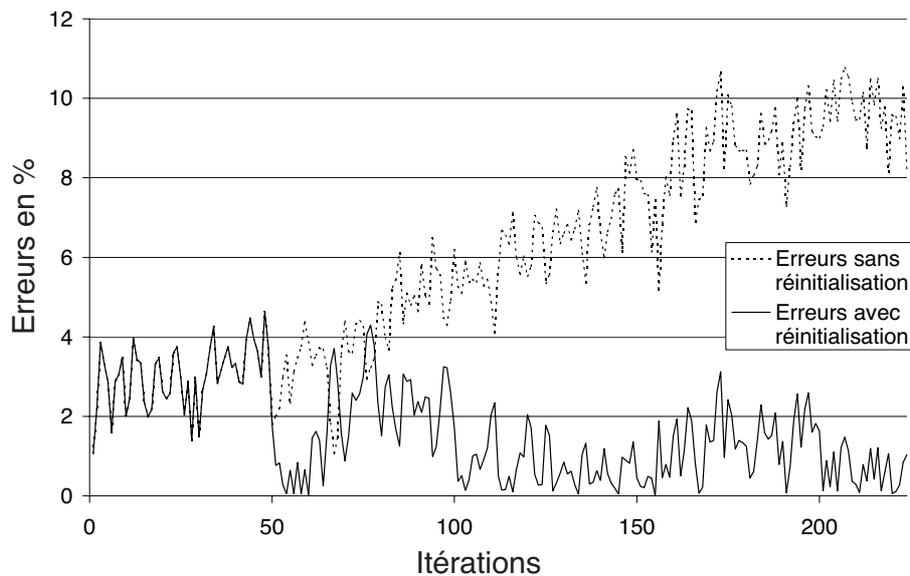


Figure 5.9 : Erreurs en pourcentages entre le centre de la corrélation théorique et la valeur mesurée avec le processeur optique. La réinitialisation des coefficients a et b permet de réduire la dérive.

Nous observons à la figure (5.9) que la différence entre la valeur de la corrélation mesurée et celle théorique augmente au fur et à mesure que le snake grandit. Grâce à la réinitialisation fréquente des coefficients, cette différence est réduite. On note aussi que la différence s'amenuise au fur et à mesure que la puissance lumineuse augmente dans le montage (le bruit, essentiellement additif, est d'autant réduit).

En étudiant les résultats obtenus avec ou sans les réinitialisations, on ne remarque pas de grande différence. Il est difficile de choisir entre les deux solutions. Aucune n'est moins gourmande en itérations que l'autre et aucune ne se démarque en donnant de meilleurs résultats. On peut alors se demander quelle est l'utilité de la réinitialisation des coefficients a et b .

Comme nous l'avons vu lors de la simulation des bruits (cf. section 5.1), un offset positif sur la mesure ne dégrade pas le snake même si dans notre cas l'offset est important et frôle les 10% (fig. 5.9) sans réinitialisation. Cet offset correspond à un apport de lumière sans cesse plus important au fur et à mesure de l'agrandissement du contour alors que a et b ont été initialisés pour des contours plus petits. Il n'entrave pas la segmentation car il est positif. En revanche, si le snake se contractait sur sa cible, l'offset serait identique mais négatif. Alors, la réinitialisation serait indispensable.

La réinitialisation n'est donc pas inutile, mais dans le cas où nous étudions des snakes qui s'agrandissent, nous ne la conserverons pas.

5.2.3 Sensibilité de la mesure

En théorie la sensibilité de la mesure est de 18 bits (32x32 pixels sur 8 bits). Mais cette sensibilité ne tient pas compte du bruit qui la limite énormément. Le bruit sur l'acquisition est représenté figure (5.10).

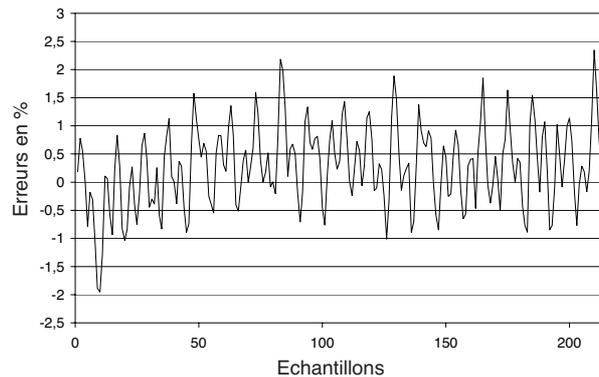


Figure 5.10 : Pourcentages d'erreurs entre la valeur centrale théorique d'une corrélation et plusieurs valeurs centrales de cette même corrélation acquise par la caméra.

Les fluctuations s'élèvent à environ $\pm 1\%$. Un bruit équivalent a été étudié en section (5.1) et montre que la qualité des snakes chute en simulation de 86% à 78%. Ce bruit additif, l'offset positif croissant de 0 à 10% (fig. 5.9) et les effets de la diffraction (cf. section 4.3) cumulés provoquent une baisse de la qualité des segmentations du snake optoélectronique à 77%.

Ayant maintenant une meilleure appréciation de la nature des perturbations temporelles du faisceau, nous allons essayer d'évaluer la sensibilité de la mesure.

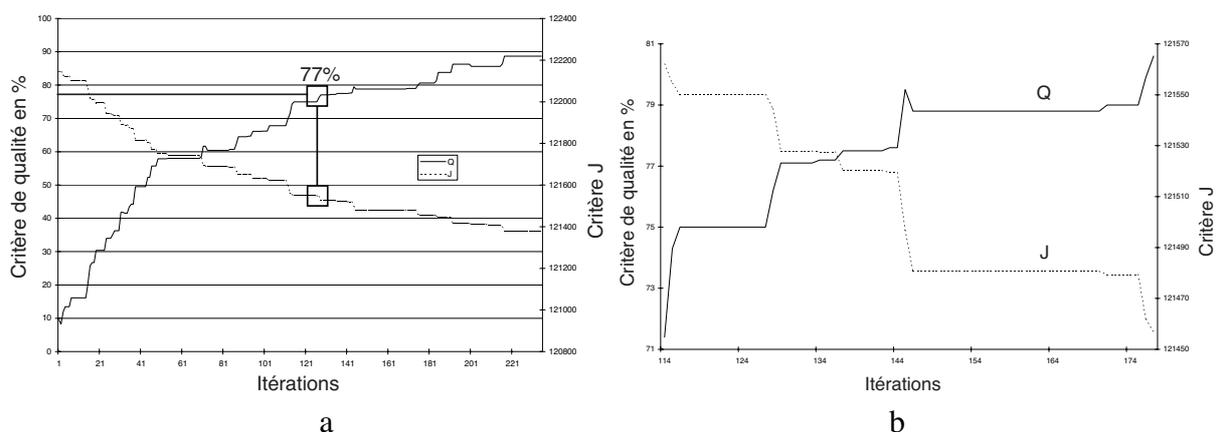


Figure 5.11 : (a) Résultat de simulation avec 8 nœuds. (b) Agrandissement de la courbe (a) où $Q=77\%$ (moyenne de qualité des snakes optoélectroniques).

Figure (5.11) nous avons mesuré les variations de J autour de la qualité moyenne des snakes optoélectroniques (77%). Dans cette zone, le critère J diminue par pas d'environ 0,01%. Le snake optoélectronique arrive en général à minimiser J dans cette zone où la caméra est

capable de mesurer des variations de la valeur centrale d'un peu plus de 3 niveaux de gris¹ par pixel (sur 255), c'est-à-dire environ 1,5%. Or en fin de simulation avec 8 nœuds, J est optimisé pour des variations du centre d'environ 1,5%², ce qui signifie que notre processeur est capable de détecter d'aussi faibles variations que celles nécessaires à la segmentation numérique. La différence réside dans les perturbations sur la mesure.

5.2.4 Variations de la mesure

Dans cette section nous allons tenter d'identifier toutes les sources de variations temporelles dans le montage optique. Pour cette étude nous proposons de suivre le chemin optique du faisceau lumineux :

- source laser,
- diffuseur,
- scintillement des SLM.

5.2.4.1 Laser

La source de lumière utilisée est un laser Nd:YAG doublé en fréquence de puissance 400 mW (longueur d'onde : 532 nm). Ce laser introduit deux types de variations : des lentes sur plusieurs dizaines de secondes et des rapides, de l'ordre de la dizaine de kilohertz : notre source s'avère défectueuse.

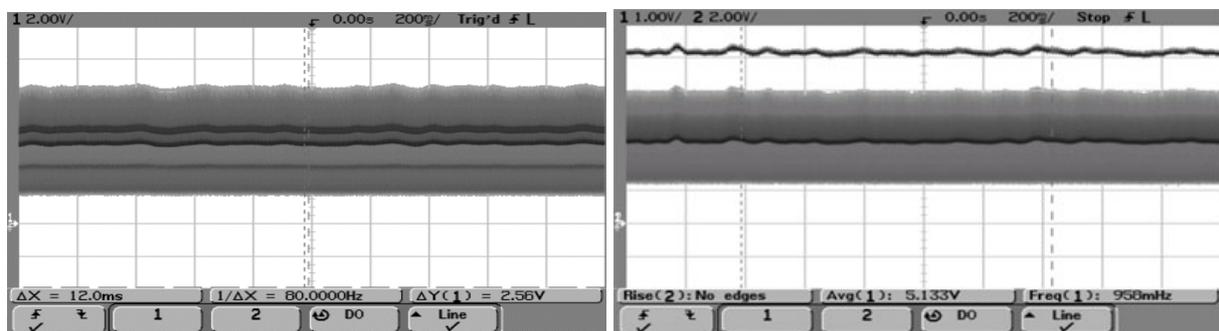


Figure 5.12 : Variations du laser mesurées avec une photodiode. Les variations sont de $\pm 65\%$ autour de la moyenne. A droite est représentée la mesure avant et après l'action d'un filtre passe-bas Butterworth du second ordre.

Les fluctuations rapides du laser ont été mesurées avec une photodiode (cf. section 3.4.4). Afin de pouvoir observer les fluctuations lentes, un filtre de Butterworth passe-bas du deuxième ordre avec une fréquence de coupure vers 250 Hz a été adjoint à la photodiode. Ce filtre électronique a permis d'éliminer les fluctuations rapides du laser (plusieurs dizaines de kHz).

Les fluctuations rapides s'élèvent à $\pm 75\%$ de la valeur moyenne. Heureusement, la caméra fonctionne à 25 Hz et intègre les fluctuations du laser, mais la mauvaise qualité de

¹ Ce qui correspond à 0,6 nW.

² Avec un nombre illimité de nœuds les variations minimales du centre prises en comptes sont inférieures à 0,1%.

celui-ci ne nous permettra pas d'utiliser des photodétecteurs rapides. Les fluctuations du laser mesurées avec la caméra sont de 3% pour une fréquence de 3 Hz.

5.2.4.2 Diffuseur

L'angle entre l'axe du moteur qui fait tourner le diffuseur et le plan du diffuseur n'est pas exactement de 90°. La rotation est donc légèrement vrillée, ce qui introduit une déviation du faisceau.

D'autre part, le diffuseur utilisé est un verre dépoli. Son coefficient d'absorption n'est pas uniforme et provoque des variations d'intensité de 11,5% lorsqu'il tourne. Après l'avoir ramené chez le fabricant qui l'a homogénéisé, les variations de transmission ont été réduites à 5,5%.

5.2.4.3 SLM

Les modulateurs spatiaux de lumière ont une cadence de rafraîchissement de 60 Hz. En réalité, on observe de la rémanence en y affichant des images à cadence vidéo. En étudiant de plus près les temps de commutation des cristaux liquides, nous avons observé que les SLM utilisés ne peuvent pas prétendre pouvoir rafraîchir les images à 60 Hz.

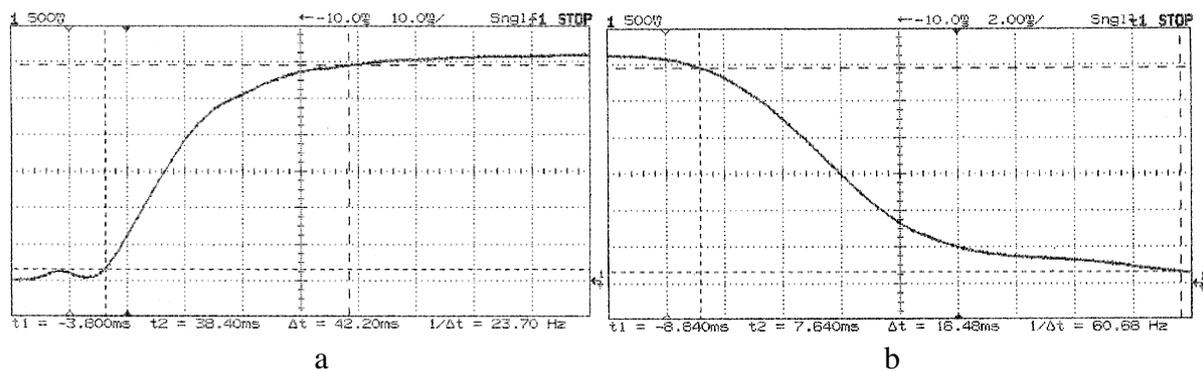


Figure 5.13 : Temps de commutation d'un SLM SVGA. (a) passage du niveau 0 au niveau 255 : 42,2 ms. (b) passage de 255 à 0 : 16,5 ms.

Ces mesures montrent que la cadence effective de rafraîchissement des SLM SVGA est inférieure à 25 Hz (au lieu des 60 Hz prévus par le constructeur), ce qui signifie qu'une mesure à l'aide de la caméra (25 Hz) nécessitera au minimum deux acquisitions.

Le principe de mesure utilisé pour obtenir ces courbes est présenté à la figure (5.14).

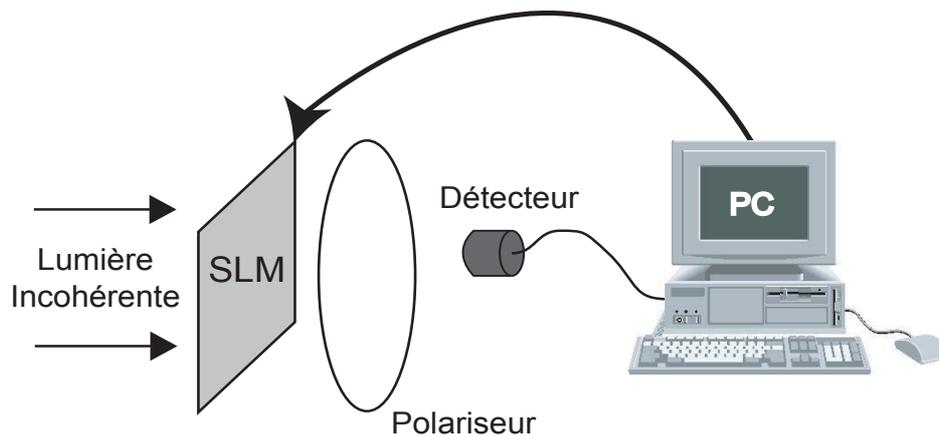


Figure 5.14 : Principe de la mesure de la transmission du SLM en fonction du niveau de gris. Le PC envoie les images en niveaux de gris au SLM.

Nous n'utilisons pas de lentille pour focaliser la lumière sur la photodiode car la puissance lumineuse lui suffit déjà.

Les SLM sont adressés en ligne, c'est à dire qu'ils réactualisent leur affichage par balayage horizontal. Ceci a pour conséquent de détériorer les images contenant des informations verticales fines. Nous avons mis en évidence ce phénomène en affichant un réseau vertical de pas unitaire. Un sur-échantillonnage (deux pixels au lieu d'un) peut résoudre le problème. Les images sont alors physiquement deux fois plus grandes.

Un autre problème temporel affecte les SLM : le scintillement propre au rafraîchissement de l'affichage à 60 Hz. Il provoque des fluctuations de l'ordre de 6% sur la mesure avec la caméra. Le codage en niveaux de gris n'est donc pas tout à fait fidèle à la commande des SLM. Pourtant, des études ont montré que cet effet est normalement négligeable si les mesures sont réalisées avec des capteurs, comme les caméras, dont le temps d'intégration est de 40 ms [1].

5.2.5 Discussion

Nous avons vu qu'au début d'un snake optoélectronique il est indispensable de déterminer les coefficients de normalisation de la valeur centrale de la corrélation. Normalement, à chaque nouvelle scène, les coefficients a et b doivent être recalculés. Cependant, avec une fenêtre d'initialisation plus petite que l'objet, nous avons vu qu'un offset positif, correspondant à un b plus élevé qu'il ne le devrait, apparaît. Or, dans la section précédente, il a été montré qu'une telle perturbation dégrade peu la segmentation, et pareillement pour un gain positif qui concerne le coefficient a . Ainsi, nous pouvons supposer que lors d'une segmentation en temps réel, il ne sera pas utile de recalculer ces coefficients pour chaque nouvelle scène à condition que le contour initial soit plus petit que l'objet à segmenter.

Nous avons vu qu'il existe des fluctuations rapides et des fluctuations plus lentes. Les fluctuations lentes influent tel un offset sur la mesure et dégradent donc beaucoup moins la segmentation. Voici un tableau récapitulatif des différentes variations lumineuses introduites par les éléments optiques du montage :

Élément optique	Fluctuations introduites	Fréquence des fluctuations
Laser	3%	3 Hz
Diffuseur	5,5%	62 Hz
SLM	6%	60 Hz

Tableau 5.1 : Variations lumineuses introduites par les différents éléments optiques.

Au vu de l'importance de ces fluctuations, nous n'avons pas jugé utile de quantifier les bruits de quantification et les bruits des capteurs qui sont bien plus faibles.

La segmentation par snake SIRS est une technique qui requiert une précision de calcul importante : 25 bits pour traiter une image 256x256 [2]. De manière numérique, le calcul n'est soumis à aucun bruit et la précision est très élevée¹. Expérimentalement il faut pouvoir mesurer des variations d'intensité inférieures à 1 nW pour pouvoir segmenter la voiture avec une bonne qualité. Il est difficile de mesurer de si petites variations en optique. Compte tenu des performances de notre laser et de nos SLM, nous ne pouvons *a priori* pas obtenir une excellente qualité.

Les expérimentations convergent plus vite à cause des variations sur la mesure qui peuvent à un moment donné minimiser J exagérément. Ces variations influencent donc la qualité et la rapidité des segmentations. Nous allons donc essayer d'y remédier.

5.3 Correction des Fluctuations

Les variations temporelles du faisceau d'informations sont la principale cause des différences entre segmentation numérique et segmentation optoélectronique. La réduction de ces fluctuations améliorerait la vitesse, puisque le nombre d'acquisitions à moyenner pourrait alors être réduit et la qualité, puisque le processeur serait alors apte à effectuer des mesures plus précises.

5.3.1.1 Intégrations

Afin de réduire les fluctuations de la mesure, la solution la plus évidente est d'effectuer une moyenne sur plusieurs échantillons. Ainsi, plus le nombre d'acquisition est grand, plus la moyenne sera stable et insensible aux fluctuations. Cependant, notre objectif étant avant tout d'accélérer le processus de segmentation grâce à l'optique, ce nombre d'échantillons doit être limité. De manière empirique nous avons remarqué qu'un bon compromis est obtenu en ne tenant pas compte du premier échantillon mais du deuxième et du troisième.

¹ On travaille avec des représentations flottantes sur 4 ou 8 octets/réel.

Afin de déterminer si cette solution ne peut être améliorée, nous avons procédé à plusieurs acquisitions après une actualisation de la fenêtre binaire (fig. 5.15).

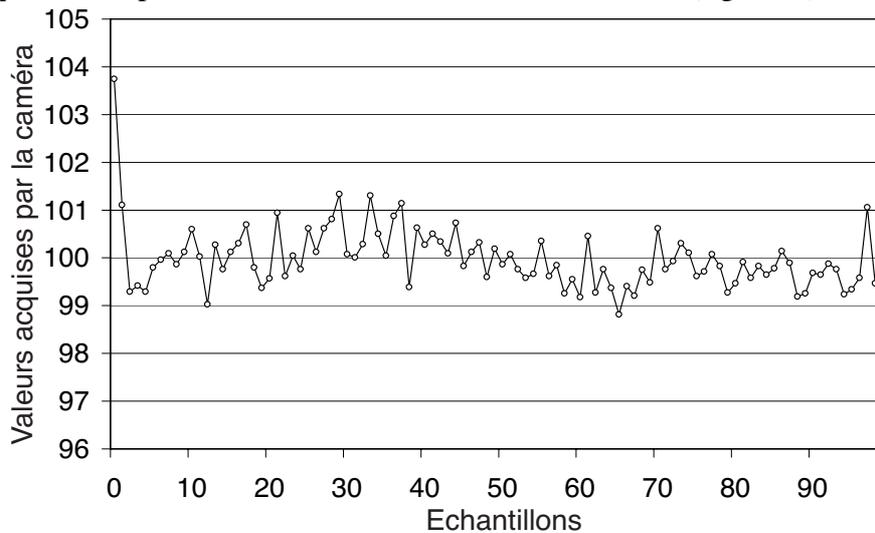


Figure 5.15 : 100 acquisitions de la valeur du centre de la corrélation après une actualisation de la fenêtre binaire.

On constate que la première valeur acquise est erronée de 4% par rapport à la moyenne de la mesure, égale à 100. Cette première mesure est obtenue à un instant où l'affichage de la fenêtre binaire n'est pas encore stabilisé (cf. section 5.2.4.3). Ensuite, les 2 valeurs suivantes se répartissent de part et d'autre de la moyenne. En moyennant ces deux acquisitions, nous obtenons 100,2, valeur extrêmement proche de la valeur à mesurer. Nous n'avons donc pas jugé utile de considérer davantage d'échantillons.

Par conséquent, la solution consistant à prendre le deuxième et le troisième échantillons s'avère être le meilleur compromis entre qualité et rapidité. Un nombre plus important d'acquisitions n'intégrerait pas beaucoup plus les fluctuations. La moyenne sur les deuxième et troisième échantillons

Cette intégration dure 240 ms équivalentes à 6 acquisitions de 40 ms. En fait, une acquisition est perdue dès qu'il y a transfert ou traitement de données entre deux échantillons. 6 acquisitions sont nécessaires pour calculer le critère J et passer à l'itération suivante dans l'algorithme du snake optoélectronique, ce qui réduit la fréquence des itérations à ~ 4 Hz.

Pour réduire les variations sur les acquisitions, une autre possibilité, qui ne consomme pas de temps supplémentaire, est d'agrandir la surface d'acquisition (le nombre cellules CCD) au centre de la caméra.

Théoriquement, le centre de la corrélation est un point, mais en pratique, il est plus étalé à cause des effets de la diffraction [3]. Pour notre montage, la surface d'acquisition optimale que nous exploitons est de $\sim 1 \text{ mm}^2$ (32×32 pixels). Si la surface est plus petite, elle est alors davantage sensible aux fluctuations. Si la surface est plus grande, on s'éloigne du résultat que nous cherchons, c'est-à-dire la valeur centrale de la corrélation. Ainsi, le nombre de cellules prises en compte a été choisi de manière empirique, de manière à se rapprocher le plus possible du résultat obtenu en simulation.

Afin d'intégrer les fluctuations, il serait possible d'augmenter la taille du plan de corrélation et ainsi le centre serait moyenné sur davantage de cellules CCD. Cependant, l'intensité lumineuse mesurée par les cellules photoréceptrices serait moins importante et plus proche du bruit. D'autre part, cette solution limiterait la place disponible sur la matrice CCD et compromettrait l'utilisation de plusieurs canaux optiques (cf. chapitre 6).

Jusqu'à présent, nous avons toujours travaillé avec une image de taille 249x249. Cependant, nous pourrions traiter une image quatre fois plus grande 498x498; cela moyenne les variations qui diminuent alors sensiblement. De surcroît, le sur-échantillonnage améliore l'affichage des images sur les modulateurs (cf. section 5.2.4.3).

Bien que réduisant les variations temporelles et donnant parfois des résultats de bonne qualité, cette solution n'en est pas vraiment une car elle limite alors le processeur optoélectronique à des images de petite taille. En outre, d'autres différences apparaissent entre la simulation et les expérimentations lorsqu'on augmente la surface de traitement. Nous développerons ce point au prochain chapitre.

La caméra travaille à une fréquence d'échantillonnage de 25 Hz et intègre donc les variations du diffuseur qui tourne à 62 tours par seconde et celles dues à la commande à 60 Hz rafraîchissant les modulateurs. Mais l'intégration ne se fait pas sur un nombre entier de périodes, ce qui provoque de petites variations d'une mesure à l'autre, auxquelles viennent s'ajouter les lentes fluctuations du laser. En revanche, les fluctuations rapides du laser (plusieurs kHz) sont presque totalement intégrées.

Finalement, en moyennant les acquisitions sur deux échantillons, nous arrivons à réduire les variations à environ $\pm 1\%$ (fig. 5.10). Si l'on tient compte de l'intégration de la mesure sur trois acquisitions et des différents calculs numériques accompagnant ces mesures, la fréquence des itérations est pour l'instant très faible (~ 4 Hz), en rappelant que près de 200 itérations sont nécessaires pour atteindre une qualité de segmentation d'environ 77%.

5.3.1.2 Mesure des variations

Les solutions précédentes consomment du temps pour améliorer la qualité, ce qui s'oppose à notre premier objectif qui est l'accélération du processus. La solution proposée dans ce paragraphe est de mesurer les variations pour pouvoir ensuite en tenir compte lors des acquisitions. Le principe est de dédier un capteur à la détection des variations d'intensité de la source pour corriger en conséquence la mesure effectuée par la caméra.

En fait, la mesure de la valeur centrale de la corrélation contient non seulement les informations recherchées, mais encore les perturbations introduites par le laser, le diffuseur tournant et les deux écrans LCD. Il faudrait idéalement pouvoir supprimer ces perturbations qui influent sur notre mesure. Nous avons donc essayé de les mesurer en les isolant, pour ensuite les compenser.

Nous avons dans un premier temps tenté de dévier une portion du faisceau qui n'est pas exploitée avec une fibre optique, pour l'amener sur une photodiode. Cette méthode de mesure non invasive, s'est révélée être insuffisante en puissance lumineuse.

Nous avons alors essayé de dévier une portion en bordure de faisceau par réflexion avec un miroir. Nous avons alors pu constater que les variations entre le bord et le centre du faisceau étaient différentes. De plus, la photodiode est un capteur unicellulaire à réponse rapide difficilement comparable avec une surface de 32x32 photorécepteurs lents.

Par conséquent, nous avons placé une deuxième caméra sur une nouvelle branche optique perpendiculaire à celle effectuant le snake. La lumière est séparée en deux branches après le diffuseur et le premier SLM par une cube séparateur (50%/50%). La seconde caméra mesure ainsi les fluctuations du laser, du diffuseur et du premier SLM. Cependant, les mesures entre les fluctuations mesurées par les deux caméras ne concordaient pas, notamment à cause du deuxième SLM dont ne tenait pas compte la branche de correction.

Les solutions basées sur la déviation d'une partie du faisceau n'ont donc pas donné satisfaction. En revanche, la solution avec la deuxième branche optique pourrait servir à détecter des variations supérieures à $\pm 5\%$ du laser (lorsqu'il se met à osciller) et interdire par conséquent les segmentations.

Nous avons alors exploré une nouvelle voie en calculant optiquement l'autocorrélation *témoin* (ici d'un disque) dans une portion de la fenêtre et de la scène. En mesurant la valeur de cette autocorrélation nous pouvons mesurer directement toutes les perturbations de la mesure du centre. Ainsi nous sommes en mesure de pouvoir corriger les fluctuations du laser, du diffuseur tournant et des SLM avec un capteur enfin comparable à celui utilisé pour la mesure du centre. Cependant, cette technique ne marche qu'à condition que les variations du faisceau lumineux soient identiques spatialement, et à condition que le canal optique du snake n'influence pas le canal *témoin*.

Pour vérifier la fiabilité du canal témoin nous en avons placé plusieurs dans les quatre coins des SLM. Les fluctuations mesurées dans les coins et au centre se sont révélées concordantes.

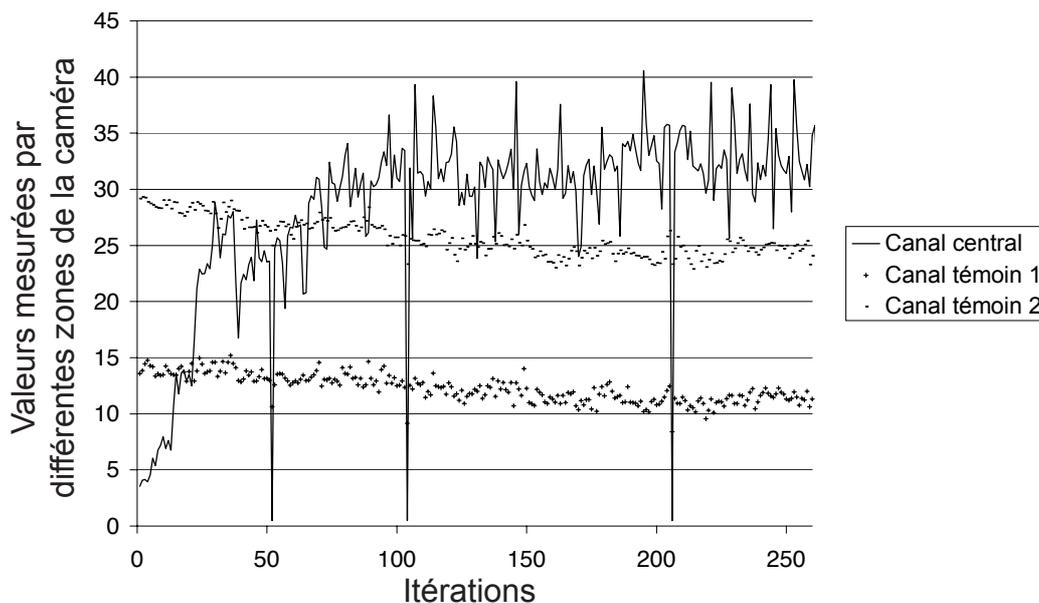


Figure 5.16 : Evolution du canal central et des canaux témoins mesurant les perturbations pendant une segmentation.

Comme nous pouvons le constater sur la figure (5.16), les mesures des canaux témoins évoluent de manière relativement semblable. Normalement, s'il n'y avait pas de perturbation, la valeur mesurée dans les canaux témoins devrait rester stable. En réalité nous voyons au cours de cette mesure que les perturbations globales ont fait chuter l'intensité lumineuse alors que l'intensité du canal central augmente puisque le contour grandit. Ceci montre l'indépendance des canaux optiques puisque les canaux témoins ne sont quasiment pas influencés par le calcul optique effectué au centre. En outre, on peut remarquer que les perturbations temporelles semblent être équivalentes spatialement dans l'ensemble du faisceau.

Malheureusement, une fois la mesure des perturbations prise en compte, elle augmente légèrement les variations, contrairement à ce que nous espérons. Effectivement, si on compare précisément les fluctuations, on observe que les fluctuations sont légèrement différentes. En revanche, comme on le voit sur la figure (5.16), les canaux témoins peuvent mesurer de manière fiable des perturbations de grande amplitude. L'utilisation d'un canal témoin peut donc améliorer la segmentation dans des situations très bruitées où un snake normal ne convergerait pas.

Finalement, aucune des solutions proposées n'a permis de corriger temporellement les perturbations dans le processeur optique.

5.4 Les Non-Linéarités de Codage

Il existe d'autres limitations au processeur optoélectronique. Elles sont peut-être moins importantes que les fluctuations sur la mesure de la corrélation, mais il est nécessaire de les signaler.

5.4.1 Transmission en amplitude des SLM

L'affichage d'images à niveaux de gris n'est pas une opération linéaire. L'information lumineuse obtenue après le polariseur en sortie du SLM, restitue les niveaux de gris selon une courbe de transfert relevée ci-dessous :

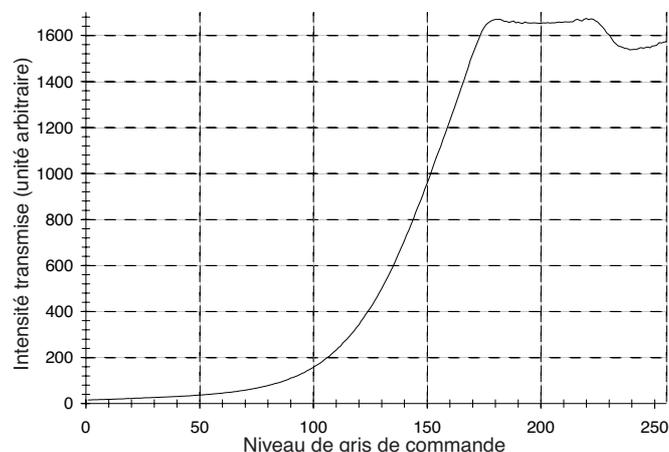


Figure 5.17 : Courbe de transfert du SLM SVGA

D'après la figure (5.17), les niveaux de gris entre 110 et 180 bénéficient d'une bonne sensibilité tandis que les niveaux inférieurs et supérieurs sont mal représentés. Cette non-linéarité modifie les caractéristiques de l'image affichée sur le SLM. Dans le cas d'une image suivant la loi de répartition Gamma, l'affichage de l'image sur un SLM pourra être avantageux, car il augmentera le contraste entre l'objet et le fond.

5.4.2 SLM VGA

Un des deux SLM SVGA (800x600 pixels) est tombé en panne en cours de thèse et a dû être échangé avec un SLM VGA (640x480 pixels). Cette modification a des influences sur la corrélation optique.

Pour rester dans les mêmes conditions que pour le début des expérimentations, il a fallu mettre à l'échelle les images sur le SLM VGA pour qu'elles aient la même taille que si elles étaient affichées sur le SLM SVGA. Comme le SLM VGA a des pixels plus grands, la scène doit être sous-échantillonnée pour être affichée avec la même taille physique que précédemment (fig. 5.18).

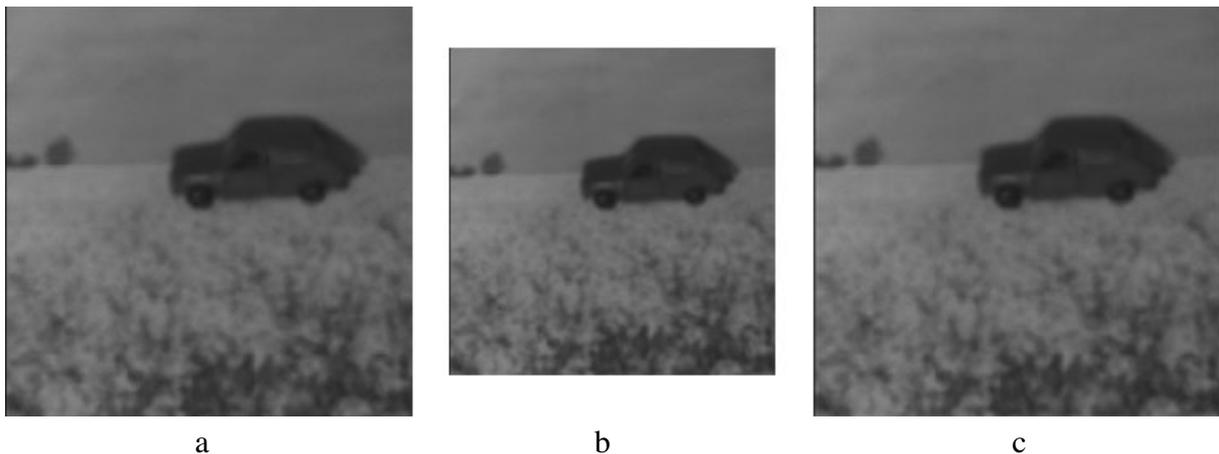


Figure 5.18 : (a) scène de départ 249x249 (b) scène sous-échantillonnée 199x199 (c) agrandissement de (b) simulant l'affichage sur SLM VGA.

Il est difficile de remarquer un changement en observant la figure sous-échantillonnée ci-dessus. En sous-échantillonnant la scène, les caractéristiques statistiques sont très légèrement modifiées :

		249x249	199x199
FOND	Moyenne	120	121
	Ecart type	17	17
OBJET	Moyenne	65	63
	Ecart type	11	12
Contraste		1,85	1,92

Tableau 5.2 : Caractéristiques statistiques de l'image de la voiture avec sa taille d'origine et rapetissée.

Les statistiques de l'image qui nous intéressent principalement pour notre implantation de la loi Gamma concernent les moyennes, or on voit dans le tableau (5.2) que le contraste ne change quasiment pas. En revanche, le fait de réduire la résolution augmente la valeur du contraste minimal pour détecter l'objet, c'est-à-dire que le sous-échantillonnage va dégrader la segmentation [4]. Néanmoins, le rapport entre les résolutions étant faible (0,8), la dégradation de la scène ne sera pas importante, d'autant plus que les problèmes de diffraction l'affectent davantage (cf. section 4.3). D'ailleurs, d'après nos observations expérimentales, cette légère modification n'a pas entraîné une baisse de qualité.

5.5 Contraintes Spatiales

Au-delà des limitations dues à la taille et à la qualité des éléments optiques comme l'ouverture numérique et les aberrations des lentilles, il existe d'autres problèmes plus importants.

5.5.1 Diffraction

Les effets de la diffraction ont déjà été étudiés au chapitre précédent (cf. section 4.3). Nous avons montré que l'influence de la diffraction est légère concernant les images de caractéristiques Gamma et provoquent une baisse de 1% de la qualité des segmentations.

5.5.2 Source lumineuse

Le faisceau est gaussien et influe sur le premier SLM contenant la fenêtre magnifiée par 1,5.

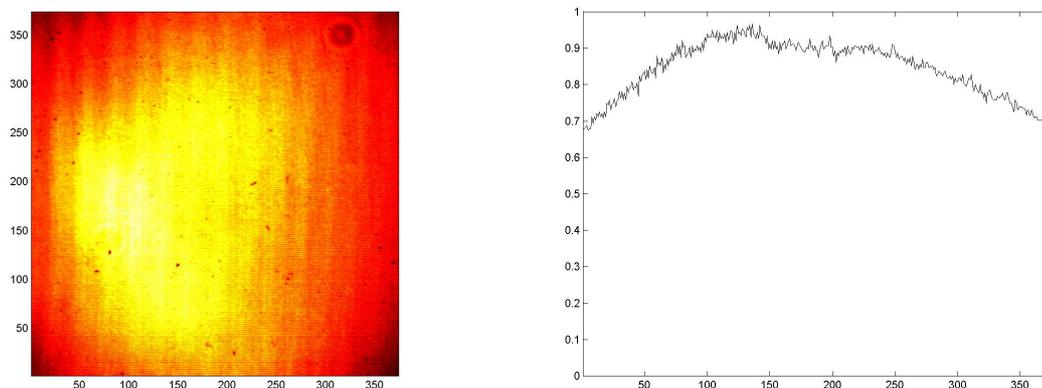


Figure 5.19 : Etat du faisceau dans la zone utile de la fenêtre (374x374). A droite, front d'onde en amplitude (niveaux de gris). A gauche, profil pris le long de la diagonale du front d'onde.

Un nœud déplacé près du bord de l'image aura donc moins d'importance qu'un nœud déplacé près du centre.

Ce problème d'éclairement rend le résultat mesuré sensible à la translation d'un des plans image, alors que la diffraction conserve l'invariance par translation. Pour rétablir l'invariance par translation, il est possible de corriger les non-uniformités du faisceau. Nous proposons une méthode de correction dans le prochain chapitre.

5.6 Résolution

Afin de quantifier la résolution effective lors de la segmentation, il faudrait pouvoir évaluer la plus petite modification du pochoir perceptible par le processeur optique.

Le déplacement d'un sommet modifie le centre de la corrélation plus ou moins selon la surface balayée dans la fenêtre (fig. 5.20), mais aussi suivant la nature statistique des régions balayées dans la scène. Si l'aire ajoutée ou supprimée dans la fenêtre correspond à une aire sombre dans la scène, l'intensité du centre de la corrélation sera quasiment identique. De manière expérimentale, la différence d'intensité risque d'être noyée dans le bruit sur la mesure (cf. section 5.2.3).

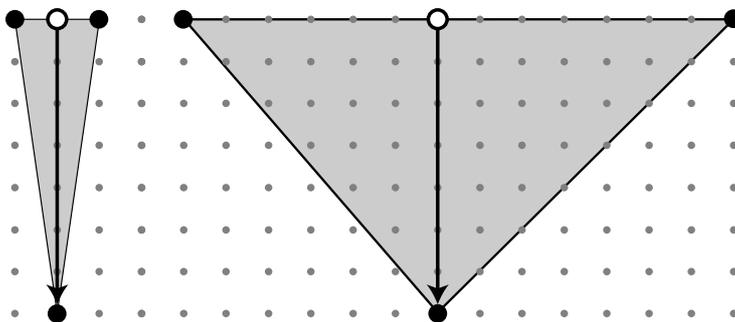


Figure 5.20 : Translation de 7 pixels d'un nœud, deux cas de figure : à gauche : la surface balayée est réduite ; à droite : la surface balayée est importante

La résolution est très difficile à mesurer en pratique car elle dépend de la *surface balayée* dans la fenêtre, qui dépend donc du *déplacement* stochastique du nœud et de la *position des nœuds voisins* (fig. 5.20), et des *statistiques* de la surface correspondante dans la scène. De surcroît, avec la source lumineuse que nous utilisons, les SLM ne sont pas éclairés uniformément et une même modification de surface "scène-fenêtre" sera perçue différemment suivant sa *position dans le SLM*. Enfin, la diffraction, la pixélisation des plans scène et fenêtre, les perturbations introduites par le laser, le diffuseur et les SLM participent à la dégradation de la résolution du snake optoélectronique.

De manière empirique, on peut retenir que le snake optoélectronique converge en détectant des déplacements de nœuds de 6 pixels et avec un nombre limité de nœuds et donc d'itérations.

5.7 Améliorations de l'Algorithme

Afin d'augmenter la qualité et la vitesse des segmentations, on peut envisager des solutions algorithmiques pour diminuer le nombre des itérations et optimiser les déplacements des nœuds sans perdre de qualité.

Une solution rapide avec des contours homothétiques a été proposée pour accélérer la détection [2]. Le principe est de déplacer les nœuds sur des branches en étoile autour de la position d'initialisation. Une première opération consiste à tester différentes tailles de cercles.

Une fois la taille de cercle optimale déterminée, les nœuds du périmètre se déplacent en bordure pour affiner le contour.

Cette solution a l'avantage de ne nécessiter qu'une centaine d'itérations. Cependant, elle reste limitée à des objets particuliers qui ne présentent pas d'anfractuosité trop prononcée.

L'algorithme étant stochastique, on peut se demander si le fait d'ajouter quelques contraintes, relevant du bon sens, ne va pas accélérer la convergence. La première idée qui vient à l'esprit est de choisir parmi les différents déplacements possibles, le meilleur. Cet algorithme déterministe, proposé par Ruch [4], donne des résultats de bonne qualité, mais certains résultats stochastiques peuvent parfois s'avérer meilleurs dans les mêmes conditions. Mais l'avantage indéniable de cette solution déterministe est l'amélioration de la reproductibilité. En simulation, pour une même initialisation, les résultats sont par définition toujours identiques et ne risquent pas donner une mauvaise segmentation stochastique. On sait que la qualité sera intermédiaire : comme tous les snakes, il est sensible aux minima locaux, et cette dépendance est accentuée par le fait qu'une seule solution peut être obtenue avec un même contour initial. Il dépend donc de l'initialisation davantage qu'un algorithme stochastique multi-résolution. En outre, Ruch a démontré que cette stratégie de convergence ne réduit pas le nombre des itérations, au contraire elle multiplie le temps de la segmentation par 8, qui correspond au nombre de positions testées à chaque itération.

Ainsi la mise en œuvre optique de cet algorithme déterministe pourrait améliorer la reproductibilité de la segmentation optique et peut-être sa qualité. Mais notre objectif étant avant tout la rapidité et en second lieu la qualité, l'algorithme déterministe - uniquement implanté pour certaines simulations numériques – n'a pas été expérimenté de manière optoélectronique.

En travaillant avec peu de nœuds et avec le processeur optoélectronique, nous avons rapidement déterminé (cf. section 4.2) qu'une réinitialisation du critère, alors que le snake stagne, relance la segmentation et permet d'améliorer le contour final. Cette méthode a amélioré dès le départ la qualité des segmentations optoélectroniques limitées en nœuds (Q passe de 72 à 77%).

Ne bénéficiant pas de l'algorithme multi-résolution (cf. section 2.2.4) puisque nous n'utilisons qu'un nombre réduit de nœuds, cette méthode sert à atténuer la dépendance à l'initialisation et éviter les minima locaux. Le principe de la "piqûre" est de redonner à J sa valeur initiale lorsque le critère stagne. Cette opération intervient suite à une déformation ayant occasionné une diminution importante du critère, ce qui empêche les déformations suivantes de minimiser davantage le critère. La "piqûre" revient à déplacer de manière arbitraire le nœud qui avait provoqué cette stagnation. C'est en quelque sorte comme si on "bousculait" le système pour le faire sortir d'un minimum local.

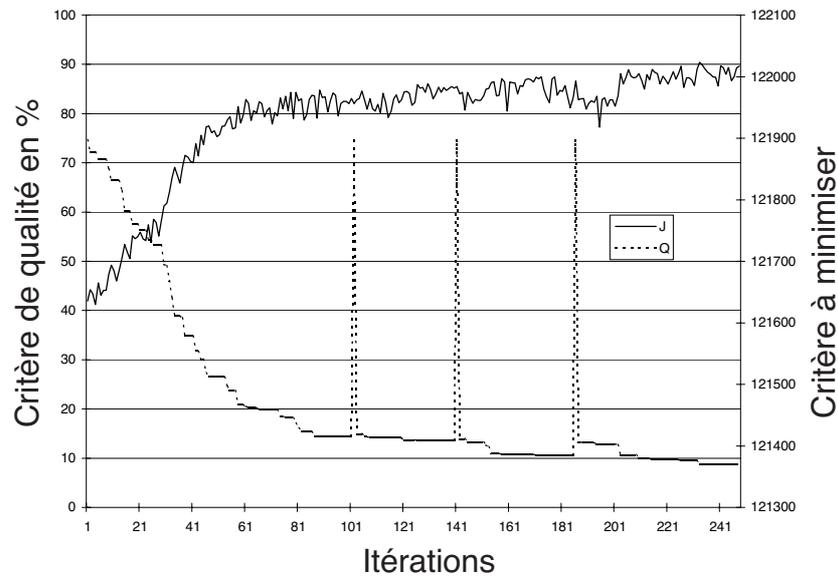


Figure 5.21 : "Piqûre" effectuées lors d'une segmentation simulée avec 8 nœuds. On observe que le snake continue la segmentation grâce à la "piqûre" et l'améliore.

Dans l'exemple de la figure (5.21), le snake simulé se serait arrêté avec une qualité inférieure à 90%. Grâce à la "piqûre", la qualité passe la barre des 90%. Figure (5.22), cette technique est appliquée à des simulations soumises à différentes énergies de bruit.

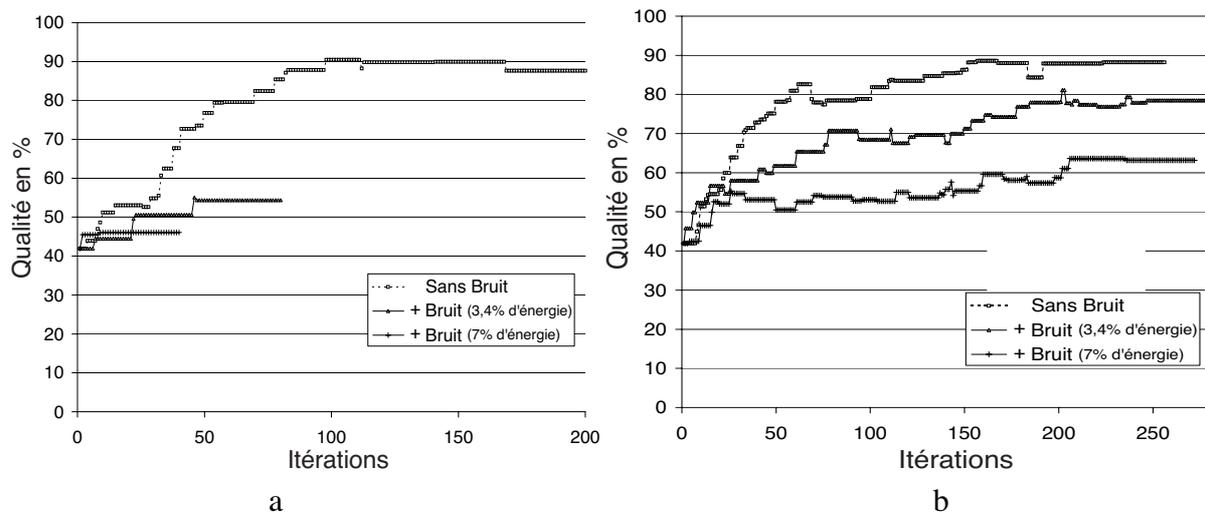


Figure 5.22 : Evolution de la qualité des snakes pour différentes perturbations de bruits additifs. (a) sans "piqûre" (b) avec "piqûre".

Ces résultats montrent l'efficacité de la "piqûre" avec des snakes composés de 8 nœuds. Avec plus de nœuds, il faudrait effectuer un rétrécissement ou un agrandissement de l'ensemble du contour en agissant sur tous les nœuds simultanément. Optiquement, avec une source de lumière blanche, cela pourrait se réaliser sans temps de calcul supplémentaire grâce aux différents trajets des longueurs d'onde [5]. Si cette possibilité d'amélioration du contour était prouvée, ce serait un argument pour travailler avec plus de nœuds en lumière blanche.

5.8 Limites en Puissance de Calcul

Nous sommes conscients du fait que notre processeur optique est limité en puissance de calcul. Cette limite vient essentiellement des SLM nématiques twistés que nous utilisons pour l'instant. Nous présentons dans le tableau (5.3) une comparaison entre les différentes possibilités de calcul à notre disposition immédiatement ou dans un avenir proche.

	Image 800x600		Image 512x512		Image 256x256
	PC	CO avec SLM NT	PC	CO avec SLM ferroélectrique	PC
Opérations pour une corrélation	135 Mflop		70 Mflop		15,6 Mflop
Puissance du calculateur Mflop/s	905	1600	905	35000	905
Corrélations par seconde	6,6	12,5 ¹	12,8	500	60

Tableau 5.3 : Comparaison des puissances de calcul entre processeurs optiques et numériques à notre disposition. PC : Athlon-MP biprocesseur 1,66 GHz ; CO : Corrélateur Optique ; NT : Nématique Twisté

Nous pouvons observer (tableau 5.3) que dans la configuration actuelle, nous effectuons deux fois plus rapidement les calculs de corrélation de 800x600 pixels qu'avec un PC performant. En revanche, en travaillant avec de plus petites résolutions le nombre de corrélations optiques reste le même en calcul optique alors que le nombre de corrélations numériques par seconde augmente nettement : environ 5 fois plus performant que la solution optique en traitant une image de 256x256 pixels. Ceci montre d'une part que le calcul numérique dépend fortement de la taille des images à traiter et d'autre part qu'une solution numérique devient plus avantageuse, en corrélations par seconde, lorsque les images à corrélérer sont de l'ordre de 512x512 pixels ou moins. Ces constatations nous incitent par conséquent à mieux exploiter la surface disponible de nos SLM SVGA. Effectivement, nous n'avons utilisé pour l'instant que des surfaces de 249x249 pixels alors que nous pouvons aller jusqu'à 800x600 pixels. C'est la voie que nous allons développer dans le prochain chapitre.

En outre, on remarque que la solution avec le SLM ferroélectrique est de loin la plus rapide. Ce tableau prouve donc que le calcul optique a encore un véritable intérêt de nos jours.

¹ Notre processeur optique peut fonctionner à 12,5 Hz en ne tenant compte que de la deuxième acquisition de la caméra au lieu de la deuxième et la troisième, comme on le fait pour le snake optoélectronique qui nécessite un résultat plus précis.

5.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer précisément l'origine des différences entre segmentations simulées et segmentations optoélectroniques, principalement dues à un bruit additif de $\pm 1\%$ et à un offset positif croissant de 0 à 10% sur la mesure et aux effets de la diffraction quantifiés au chapitre 4. Ces perturbations dues au matériel et le bruit inhérent aux systèmes analogiques et à notre architecture optique nous ont empêché de réaliser des segmentations d'aussi bonne qualité que celles obtenues en simulation.

Nous avons tenté de corriger les fluctuations temporelles indésirables, mais la seule solution efficace, qui est d'augmenter taille de la scène et de la fenêtre, a soulevé un nouveau problème qui affecte la reproduction des informations dans un faisceau nécessairement plus large. Nous avons déjà relevé en partie ce problème, mais il sera approfondi dans le prochain chapitre où davantage de surface d'information sera exploitée.

Dans ce chapitre nous avons encore estimé la résolution de notre snake optoélectronique et décrit notre technique, appelée la "piqûre", qui améliore la convergence des snakes SIRS limités en nombre de nœuds.

5.10 Références Bibliographiques

1. V. Laude, S. Mazé, P. Chavel et P. Réfrégier, "Amplitude and phase coding measurements of a liquid crystal television", *Opt. Commun.* **103** (1,2), 33-38 (1993).
2. A. Matwyschuk et P. Ambs, "Processeur optique améliorant la poursuite de cible", in *Journée du Centre de Recherche et d'Enseignement en Sciences Pour l'Ingénieur Mulhouse*, Université de Haute Alsace (2002).
3. V. Laude, "Diffraction analysis of pixelated incoherent shadow casting", *Opt. Commun.* **138**, 394-402 (1997).
4. O. Ruch et P. Réfrégier, "Characterization of the recognition and the identification capabilities of the statistical snake at low resolution and high noise levels in speckled images", in *Optical Pattern Recognition XII*, Orlando, édité par D.P. Casasent & T.-H. Chao, SPIE **4387**, 152-163 (2001).
5. J.J. Esteve-Taboada, J. Garcia et C. Ferreira, "Extended scale-invariant pattern recognition with white-light illumination", *Appl. Opt.* **39** (8), 1268-1271 (2000).

Chapitre 6

Corrélateur Incohérent Multicanal et Applications du Processeur Optique

Afin d'augmenter la rapidité de notre système bridé dans sa configuration actuelle par les modulateurs spatiaux de lumière (SLM) et les caméras, nous proposons dans ce chapitre d'accélérer le processus en exploitant le parallélisme inhérent aux architectures optiques. Le principe d'un processeur optique parallèle consiste à ajouter de nouveaux canaux d'information en juxtaposant plusieurs images dans un même plan pour les traiter simultanément sans que le temps de calcul en soit augmenté. Cependant le faisceau de lumière délivré par notre source laser n'est pas uniforme et empêche le traitement des informations situées sur la périphérie du faisceau. Par conséquent, nous devons élaborer une correction spatiale du faisceau éclairant le plan où sont affichées les différentes images pour pouvoir réaliser notre calculateur optique parallèle.

6.1 Corrélateur Incohérent Multicanal

Le traitement parallèle de l'information est une technique amplement validée dans le domaine des systèmes électroniques numériques. Le principe est de faire travailler plusieurs processeurs en parallèle et ainsi d'obtenir les résultats escomptés plus rapidement. Les processeurs numériques sont des entités autonomes qui ne sont pas destinés à travailler avec d'autres processeurs de manière implicite. Ils nécessitent un protocole de communication entre eux pour traiter des informations en parallèle.

En optique, les informations sont affichées dans un plan. Si on ajoute d'autres informations dans le même plan elles seront traitées en parallèle sans augmenter le temps de traitement de l'information. Ajouter des informations dans un plan implique l'envoi d'un flux de données plus important vers les SLM, mais ne complique en rien les processeurs optiques

qui sont intrinsèquement parallèles. Une opération effectuée par un calculateur optique parallèle à N canaux équivaut à la même opération effectuée par N processeurs numériques en parallèle.

Dans notre système, la vitesse de segmentation du processeur optoélectronique est limitée par la cadence de rafraîchissement des SLM et par le temps d'acquisition de la caméra. Cependant, il est possible d'afficher plusieurs fenêtres (249x249) différentes simultanément sur un SLM SVGA (800x600), afin de réaliser des corrélations indépendantes en parallèle, sans que le temps de calcul n'en soit rallongé. Cette technique est relativement classique avec des corrélateurs optiques cohérents [1] [2] [3] [4] [5].

En revanche, elle l'est moins en ce qui concerne les architectures en lumière incohérente même si le principe d'ajouter des canaux d'information est exactement le même que ce soit en lumière cohérente ou incohérente. Certaines réalisations en optique numérique ont donné de bons résultats [6], mais à notre connaissance une seule réalisation en optique analogique avec des images (bi-dimensionnelle) a été proposée [7]. Liu *et al.* ont réalisé un corrélateur ombroscopique à 4 canaux pour effectuer la reconnaissance de visages. Un corrélateur multicanal incohérent rebute probablement les opticiens à cause de la taille importante du plan de corrélation et les problèmes dû aux effets de la diffraction.

Un processeur numérique effectue les traitements de manière séquentielle et son temps de calcul dépend donc de la quantité d'information à traiter. Cette dépendance ne concernait pas jusqu'à présent notre processeur optique qui était monocanal et segmentait des images de 249x249 pixels tout aussi rapidement que des images allant jusqu'à 800x600 pixels (résolution SVGA). Maintenant, l'ajout de canaux d'information supplémentaires va réduire notre marge de manœuvre vis à vis de la taille des images. Effectivement, si par exemple 4 canaux sont utilisés, l'espace utile maximum est réduit de 800x600 à 400x300 pixels. Au-delà de cette limite de taille, les images devront être soit sous-échantillonnées, soit tronquées si on veut éviter de revenir à une architecture monocanal.

Ce léger inconvénient du traitement parallèle de l'information lumineuse est largement contrebalancé par le fait qu'il permet de gagner en rapidité et en qualité. Un corrélateur 4 canaux peut :

- soit accélérer la vitesse de calcul par 4 en effectuant 4 opérations, qui étaient effectuées séquentiellement en monocanal, en parallèle,
- soit améliorer la qualité du calcul en le moyennant sur 4 canaux contenant 4 fois les mêmes informations.

Une architecture multicanal est donc apte à améliorer la robustesse et la vitesse de segmentation de notre processeur.

6.2 Stratégies de Traitement Parallèle

Avec une configuration multicanal, nous pouvons envisager différentes possibilités de traitement réalisables grâce à la multiplicité des canaux. Un corrélateur multicanal peut permettre différentes configurations :

- 1 une scène et plusieurs fenêtres identiques, ce qui améliore la *qualité*; les variations dans les différents canaux sont moyennées,
- 2 une fenêtre et plusieurs scènes identiques, ce qui améliore la *qualité*; cette configuration est très proche de la première,
- 3 une scène et plusieurs fenêtres évoluant de manière indépendante, ce qui améliore la *qualité*; une moyenne est effectuée entre les contours finaux obtenus dans les différents canaux,
- 4 idem avec des snake initialisés différemment, ce qui améliore la *robustesse*; des fenêtres grandes et petites pour moyenner des snakes en contraction et d'autres en expansion [8], ou en plaçant les fenêtres initiales à des positions différentes,
- 5 une scène avec plusieurs fenêtres différentes, le même nœud étant déplacé dans une direction différente dans chaque fenêtre, ce qui correspond à l'implantation optique de l'algorithme déterministe et améliore la *qualité* (cf. section 5.7),
- 6 idem mais où un nœud différent par fenêtre est déplacé dans une même direction aléatoire, ce qui améliore la *vitesse*; le contour est actualisé avec tous les déplacements qui ont minimisé le critère.

A côté de ces solutions adaptées à notre application nous avons imaginé d'autres possibilités qui pourraient être implantées au delà du cadre de cette thèse :

- segmentation parallèle de plusieurs objets contenus dans une même image,
- placement aléatoire de plusieurs pochoirs à différents endroits de la scène, permettant de détecter la présence d'objets dans une scène aux endroits où le critère est minimisé, ce qui permettrait de localiser un objet sans avoir à prendre en compte une intervention humaine pour l'initialisation du snake,
- pour l'algorithme correspondant à la loi Gauss nous envisagions d'afficher la scène dans un canal et dans un autre la scène mise au carré, ce qui n'occasionnerait pas de perte de vitesse entre la loi Gamma opérée en monocanal et la loi Gauss 2-canaux.

Notre objectif étant d'accélérer le calcul numérique grâce à un processeur optique, nous écartons les possibilités pouvant améliorer la qualité et la robustesse. Nous adoptons donc la stratégie numéro 6 et multiplexons les fenêtres.

La plupart des processeurs optiques multicanaux effectuent de la redondance d'information en traitant plusieurs fois les mêmes images. Mais dans notre corrélateur incohérent l'information est déjà fortement redondante. Nos différents canaux contiennent donc des informations différentes.

Au lieu de déplacer un nœud après l'autre séquentiellement dans le même canal, nous pouvons désormais en déplacer plusieurs en même temps et mesurer parallèlement les différentes valeurs des corrélations de chaque canal. La parallélisation du calcul de segmentation divise en théorie le temps de calcul global du processus par le nombre de canaux utilisés.

6.3 Mise en Œuvre Optique

Le montage actuel ne permettant pas de mesurer les valeurs centrales des différentes corrélations, nous avons dû compacter le montage. Le montage télécentrique de la figure (6.1) permet de réduire la taille du plan de corrélation et ainsi d'exploiter plusieurs canaux en parallèle. Nous aurions aussi pu utiliser une caméra de surface plus large, mais la taille des cellules CCD ne cesse de réduire et les grandes cellules CCD sont de plus en plus rares.

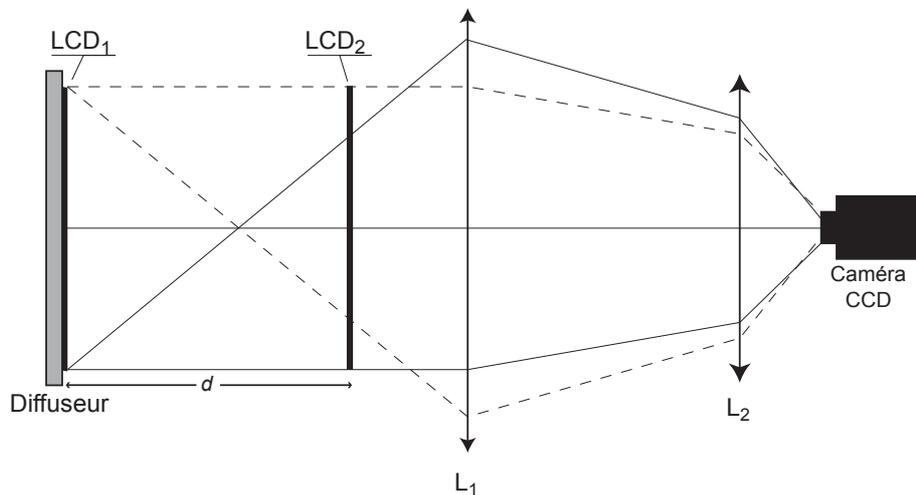


Figure 6.1 : Schéma du montage télécentrique utilisé pour mettre en œuvre le corrélateur incohérent multicanal.

Dans la configuration monocanal, la fenêtre était agrandie d'un facteur 1,5. Comme nous l'avons déjà dit, en multicanal, des contraintes sur la taille de l'image interviennent. Le rapport d'échelle entre les plans corrélés est donc fixé à 1, ce qui a pour effet de rejeter le plan de corrélation à l'infini. Les lentilles L_1 et L_2 (fig. 6.1) forment un système qui image et réduit le plan de corrélation sur la cellule CCD.

La diagonale des écrans utilisés est de 33 mm. La diagonale de la cellule CCD est de 8 mm. Par conséquent, une réduction d'un facteur 4 est requise. Si une seule lentille était utilisée, elle devrait être éloignée du deuxième écran d'une distance correspondant à plusieurs fois sa focale. Le diamètre de la lentille devrait alors être grand, correspondant à une ouverture numérique inférieure à 1, pour éviter le vignetage [9]. Cette difficulté peut-être surmontée en faisant appel à un montage télécentrique avec deux lentilles au lieu d'en n'utiliser qu'une.

Les lentilles utilisées sont les suivantes : L_1 est un achromat de distance focale 80 mm et de diamètre 50 mm; L_2 est un achromat de distance focale 125 mm et de diamètre 50 mm.

Nous avons optimisé les distances du montage télécentrique pour pouvoir y corrélérer le maximum de canaux, et réussi à corrélérer 6 images de 256x256 pixels (fig. 6.2). Comme le processeur optique multicanal contient beaucoup d'informations spatialement, les SLM ne peuvent pas être rapprochés afin de diminuer effets de la diffraction, sinon la corrélation serait vignetée. D'ailleurs, la distance d choisie est légèrement supérieure à la distance en monocanal : $d=119$ mm.

Lorsque de grandes images sont affichées sur LCD2, les aberrations dues aux lentilles ne sont pas négligeables. En revanche, on peut utiliser la totalité de la surface de LCD1, comme on le voit ici :

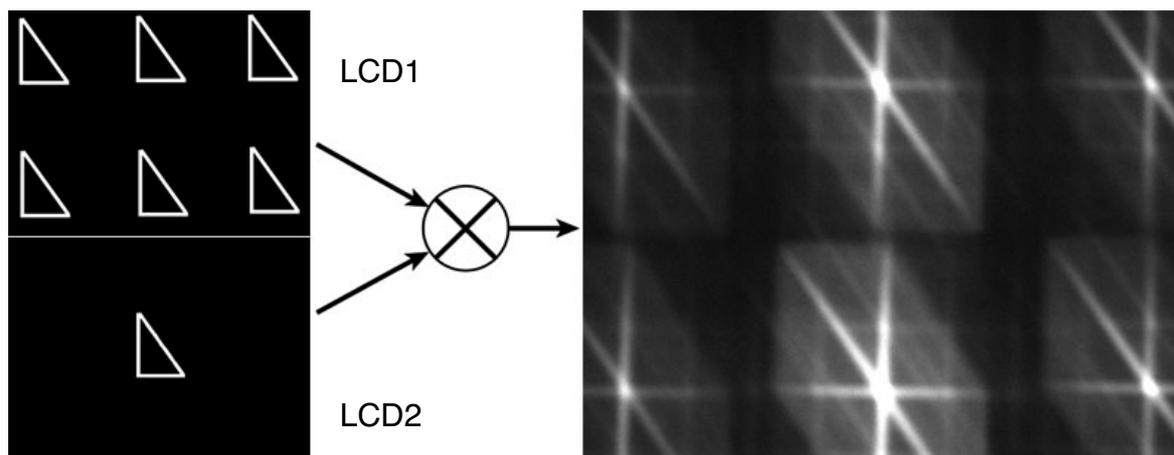


Figure 6.2 : Corrélation de triangles rectangles sur 6 canaux parallèlement. A droite on voit le résultat acquis par la caméra en bout de processeur.

Malgré ces avantages, le montage télécentrique présente un inconvénient. Les plans de corrélation des différents canaux se focalisent à différentes distances sur l'axe optique. Ce phénomène dépend de l'éloignement du canal vis à vis de l'axe optique. Pour contrer cet effet, il faut choisir des canaux disposés symétriquement par rapport à l'axe optique. Une solution est de disposer les canaux en cercle autour du centre (fig. 6.3).

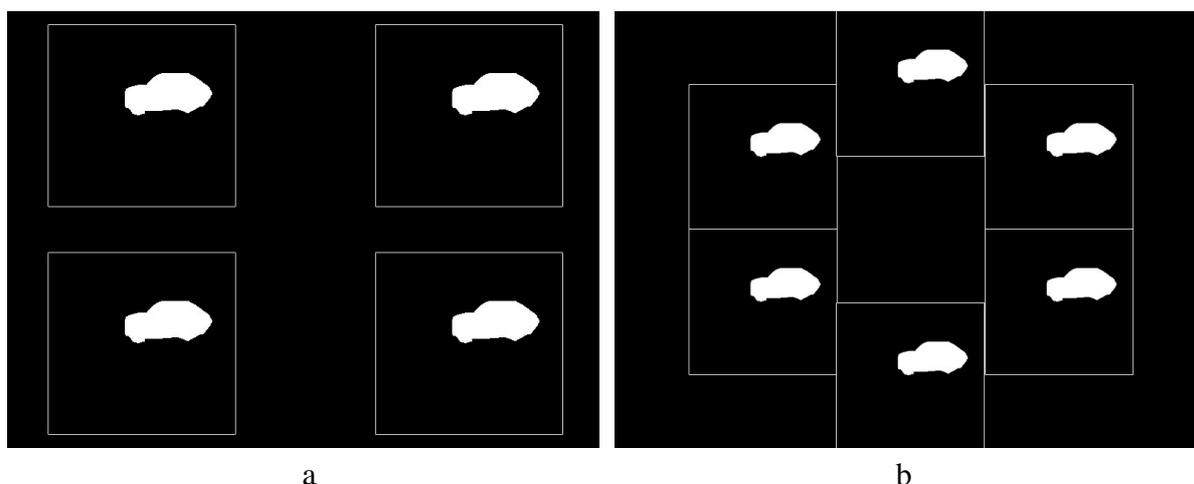


Figure 6.3 : (a) Plan fenêtre d'un corrélateur à 4 canaux (b) Plan fenêtre d'un corrélateur à 6 canaux (disposition en cercle).

Pour réaliser un tel montage il faut que le contraste soit équivalent dans tous les canaux. C'est pourquoi nous avons mené dans la suite une étude sur le faisceau qui est censé éclairer uniformément la fenêtre qui contient les multiples canaux d'information.

6.4 Faisceau d'Informations

Le faisceau lumineux qui traverse le processeur optique véhicule des informations, c'est le faisceau d'informations. Avant le diffuseur, le faisceau est circulaire, collimaté, cohérent, sa distribution énergétique est gaussienne, et l'intensité lumineuse fluctue à cause de l'instabilité de la source lumineuse (cf. section 5.2.4.1). A l'entrée du processeur (après le diffuseur tournant), la lumière est incohérente pour des capteurs lents comme la caméra, et l'intensité varie suivant le coefficient d'absorption de la partie éclairée du diffuseur (cf. section 5.2.4.2). A la sortie du premier SLM, le faisceau contient des informations (exactement 800x600 pixels codés sur 8 bits) codées en polarisation et sensibles à la fréquence de rafraîchissement de l'écran LCD (cf. section 5.2.4.3). Puis le faisceau intercepte les données du second SLM (640x480 pixels) en le traversant. Enfin, deux lentilles focalisent le plan de corrélation en le réduisant sur la caméra en bout de processeur optique.

Pour que la valeur du centre de la corrélation optique se rapproche le plus possible de la valeur numérique, il faut uniformiser le faisceau. Nous avons vu au chapitre 3 que le noyau ξ (éq. 3.3) dépend de l'uniformité du faisceau. Un noyau ξ constant garantirait une invariance spatiale de la corrélation. Nous avons expliqué dans ce même chapitre que la diffraction ne peut pas affecter ξ . En revanche, les non uniformités photométriques du faisceau doivent être corrigées pour garantir une corrélation optique correcte.

6.4.1 Etat du faisceau lumineux

Nous avons commencé par mesurer le faisceau en entrée de processeur, celui qui éclaire le premier plan où sont affichés les différents canaux. Nous avons déjà plusieurs fois fait allusion à la non-planéité du faisceau qui irradie l'entrée du montage optique. Comme les images affichées dans le plan d'entrée étaient jusqu'à présent de petite taille, nous n'en avons pas tenu compte. Maintenant, le profil gaussien (fig. 6.4) de ce faisceau source est un réel obstacle à la mise en place d'un corrélateur multicanal.

Cet état du faisceau est essentiellement dû au laser dont le mode électromagnétique transverse est TEM_{00} , c'est à dire que sa répartition énergétique lumineuse est gaussienne suivant l'axe optique. Comme nous le verrons plus loin dans ce chapitre, le diffuseur introduit aussi un profil gaussien mais comme il est très proche du premier SLM, il n'est pas la cause de cet état de faisceau, son effet intervient plus loin sur l'axe optique, dans le plan de corrélation.

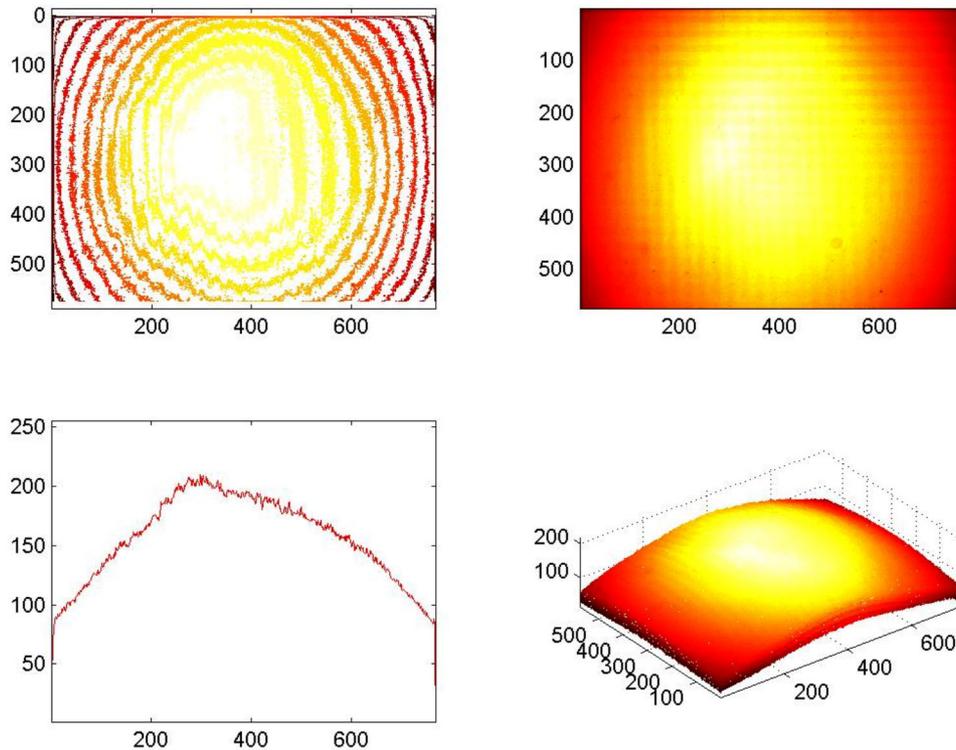


Figure 6.4 : Etat du faisceau qui illumine le premier SLM où se trouvent tous les canaux des différentes fenêtres.

Cette observation (fig. 6.4) permet d'expliquer qu'en agrandissant les plans les résultats de segmentation ne sont pas meilleurs (cf. section 5.3.1.1). En agrandissant les plans scène et fenêtre, l'information est davantage redondante, mais la sensibilité à la qualité du faisceau lumineux en est aussi accrue. Le snake optique est donc sensible à l'uniformité du faisceau.

Le faisceau d'origine étant gaussien les bords des images à traiter sont moins intenses qu'au centre. Il est important qu'à l'intérieur de l'image la lumière soit uniforme pour rester fidèle à l'image originale et ainsi réaliser des calculs plus précis.

Pour éviter que la plage d'acquisition de la caméra soit différente pour chaque canal, il faut que l'énergie lumineuse soit équivalente dans tous les canaux. Sinon, lorsque le canal central sera saturé (niveau de sortie de caméra égal à 255) les canaux extérieurs seront noyés dans le bruit ambiant et l'empiètement de la lumière diffractée par le canal central. Il faudrait idéalement que le capteur reste toujours dans sa plage de fonctionnement. Ceci serait possible en commandant l'obturateur de caméra et en jouant en même temps sur le gain d'entrée de la carte d'acquisition vidéo. Ainsi, pour chaque canal on arriverait à travailler dans une plage de fonctionnement avec une bonne sensibilité. Cependant, effectuer ces corrections pour chaque canal au niveau du capteur et de la carte d'acquisition consommerait beaucoup de temps. La répartition spatiale gaussienne de l'énergie lumineuse fournie par le laser et décohérente par le diffuseur doit donc être corrigée en amont.

6.4.2 La correction de faisceau

La correction de faisceau peut être accomplie de plusieurs manières différentes. Tout d'abord on peut envisager de changer la source lumineuse. Il existe des sources de lumière uniformes sur le marché mais elles sont à large spectre et nécessiteraient un filtre spectral pour obtenir un bon contraste et peu de dispersion. Comme nous l'avons déjà dit au chapitre 3, nous ne retenons que les sources monochromatiques laser.

La première idée pour corriger la gaussienne serait d'élargir le faisceau. Cette opération est coûteuse en énergie lumineuse, précieuse pour réaliser optiquement le snake, et ne résout pas le problème puisqu'on obtiendra dans le meilleur des cas une gaussienne aplatie [10]. Cette solution est adaptée à des petites surfaces actives. Dans notre processeur optique, la diagonale des SLM est de 33 mm, ce qui est relativement grand.

La qualité du faisceau peut être améliorée en ajustant sa phase et son amplitude. La correction d'amplitude peut être réalisée de manière simple grâce à une transparence imprimée [11]. C'est une technique rudimentaire et difficile à mettre en œuvre. L'impression sur le support transparent doit correspondre précisément à l'inverse de l'amplitude du faisceau avec la taille et la transmittance du transparent adéquates.

Après discussion avec des techniciens des sociétés Melles Griot et Otilas, une solution relativement simple pour transformer le profil gaussien d'un faisceau en un profil carré serait d'envoyer le faisceau laser non élargi dans une fibre optique très fortement multimode à saut d'indice et de l'enrouler autour d'une bobine pour accentuer les multiples réflexions à l'intérieur de la fibre. Cette solution c'est finalement avérée peu efficace car le sommet du faisceau obtenu n'était pas parfaitement plat. De plus, le diamètre de sortie de la fibre est de 100 μm et une source aussi large est difficile à collimater.

Il nous reste alors les techniques classiques de remodelage de faisceau (*beamshaping*) qui sont séparées en deux catégories : optique diffractive et optique réfractive.

La reconstruction de faisceau par éléments diffractifs est une technique dans laquelle notre laboratoire est compétent. Les éléments optiques diffractifs ont l'avantage de reconstruire une image avec environ 80% de l'intensité lumineuse de départ pour un codage en phase (40% en amplitude et phase, 12% en amplitude seule). Le codage en amplitude ou en phase dépend du type de support utilisé :

- Un élément optique diffractif (ou hologramme calculé) en *amplitude* de faible coût est en général imprimé sur une feuille de papier. Ensuite, l'image est photo-réduite et la diapositive obtenue est placée dans le faisceau cohérent dans le plan de Fourier. Il existe aussi des masques à niveau de gris très coûteux (Canyon Materials, Inc.).
- La précédente technique peut aussi être implantée sur des SLM en tenant compte dans le calcul du couplage *amplitude-phase* des SLM [12] [13] [14]. Il s'agit de calculer l'élément optique diffractif qui reconstruira le front d'onde désiré, en l'occurrence, la surface rectangulaire utile de l'écran du premier SLM en entrée de montage.

- La correction ne faisant appel qu'à la *phase* [15] [16] [17] est la meilleure solution d'un point de vue énergétique. En effet, chaque rayon lumineux est en quelque sorte redirigé vers un endroit précis. Ainsi, aucun rayon n'est perdu et l'efficacité lumineuse est élevée. Il faut soit un élément fixe, soit un SLM supplémentaire.

Le concept de remodelage de faisceau laser de profil gaussien par éléments réfractifs est vieux de 30 ans [18]. En général cette méthode consiste à associer une paire de lentilles asphériques. La première lentille asphérique, de forme positive, redirige la lumière d'un faisceau gaussien collimaté de manière à ce qu'elle soit uniforme lorsqu'elle atteint la seconde lentille, de forme asphérique négative, qui recollimate le faisceau.

Le problème souvent rencontré était la réalisation de la seconde lentille asphérique de forme négative. Aujourd'hui l'optique réfractive permet de remodeler presque parfaitement des fronts d'onde en phase et en amplitude grâce à une nouvelle solution très efficace et économique qui a été proposée par Hoffnagle [18].

Toutes ces solutions ont l'inconvénient d'être statiques, alors que le profil du faisceau évolue au cours du temps (suivant le filtre de densité neutre dans le faisceau, ressort de miroir qui se détend, changements du laser avec sa température...). La correction spatiale du profil doit donc être effectuée dynamiquement en faisant appel à l'optique adaptative.

L'optique adaptative [19] est une discipline qui cherche à améliorer les performances d'un signal optique en analysant l'environnement qu'il traverse. Le principe est d'extraire les informations sur les perturbations pour les corriger de manière dynamique.

Ces dernières années, l'optique adaptative et la correction de front d'onde ont fait l'objet d'un intérêt croissant, principalement dans les domaines de l'astronomie et de la médecine [19]. L'objectif de l'optique adaptative est de mesurer les aberrations dynamiques du faisceau, et de commander un correcteur qui puisse compenser les déformations en temps réel. Pour y parvenir, la plupart des systèmes existants utilisent des "micro-opto-electromechanical systems" (MOEMS), microsystèmes généralement constitués de micromiroirs mobiles commandés électroniquement. Cependant, la complexité, le prix et la consommation énergétique de ces miroirs adaptatifs sont devenus préoccupants au fur et à mesure que le nombre des pistons électrostatiques pour déformer les miroirs augmentait. Pour s'affranchir de ce problème, une attention particulière s'est donc portée sur les modulateurs spatiaux à cristaux liquides comme une alternative aux conventionnels miroirs déformables [20].

Les premières corrections de faisceaux en boucle fermée grâce à des SLM datent du début des années 80. Fisher et Warde ont proposé une solution pour asservir la phase d'un faisceau en le rebouclant sur lui-même [21]. Un peu plus tard, ils ont eux-même réalisé cette expérience avec succès [22]. Aujourd'hui encore, la correction adaptative de front d'onde est un sujet de recherches actives [23] [24]. Quasiment toutes ces corrections s'appliquent à la phase pour éviter de perdre de l'énergie par absorption. Pour corriger notre faisceau en phase, il faudrait effectuer la correction lorsque le faisceau est encore cohérent, donc avant le diffuseur tournant qui détruit la phase. Un SLM supplémentaire devrait alors être inséré dans le montage pour afficher l'hologramme calculé en temps réel afin de corriger spatialement le faisceau.

Cette solution n'a pas été testée car nous ne disposons pas de modulateurs en phase pure suffisamment performant. Nos modulateurs couplent amplitude et phase et ne transmettent pas plus de 10% de la lumière. Une telle perte d'énergie en entrée de montage ne permettrait plus de réaliser le snake. De plus, le calcul d'un élément diffractif, en tenant compte du front d'onde en entrée ou de la distribution d'énergie en sortie du SLM, serait long et difficile en temps réel.

En revanche, une correction en amplitude peut être réalisée à l'intérieur même du processeur optique par les SLM déjà présents. Certes, le bilan énergétique est faible comparé aux solutions en phase (optique réfractive), mais meilleur que pour les solutions faisant appel à un SLM supplémentaire. Cette solution a l'avantage de ne nécessiter aucun matériel supplémentaire, contrairement à toutes les autres solutions de correction de faisceau.

Afin de corriger le faisceau, nous imageons le plan du SLM, où a lieu la correction, sur une caméra supplémentaire qui ne sert qu'à effectuer la correction de faisceau.

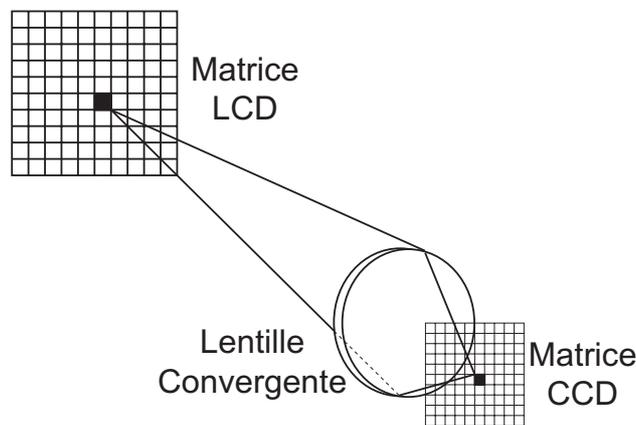


Figure 6.5 : Asservissement pixel à pixel du faisceau. Une lentille de focale 80 mm image l'écran LCD sur la caméra avec un facteur de réduction environ égal à 5:1.

Un asservissement itératif est effectué sur chaque canal optique, pixel à pixel. Asservir au niveau de gris 127 un faisceau lumineux provenant d'un pixel du SLM, revient à mesurer ce pixel sur la caméra et d'augmenter sa valeur affichée sur l'écran si elle est insuffisante ou inversement. Et ceci pour chaque pixel ou canal optique considéré. Ce qui revient à réaliser un asservissement en deux dimensions en boucle fermée. La boucle d'asservissement est fermée au sens où la lumière qui traverse le SLM est récupérée par la matrice CCD, qui envoie la mesure au contrôleur (PC), qui adaptera la transmittance du pixel considéré, via la carte de commande vidéo, puis l'intensité du pixel est à nouveau mesurée et corrigée et ainsi de suite. Le cycle se répète jusqu'à l'obtention d'un faisceau dont la répartition énergétique spatiale correspond à la référence.

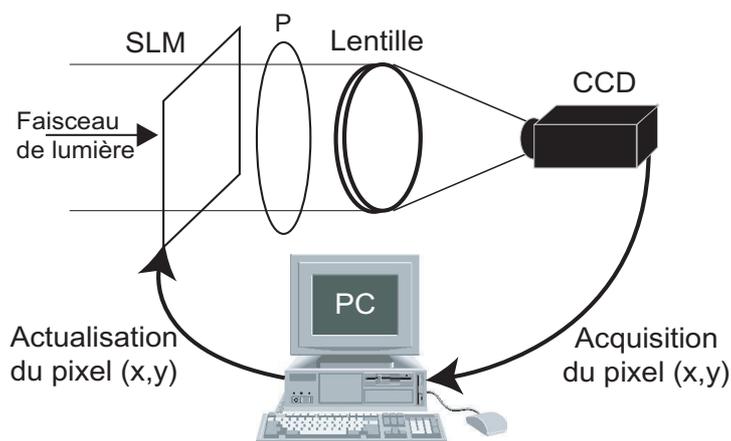


Figure 6.6 : Principe de l'asservissement. Les valeurs à l'entrée de la boucle de retour sont comprises entre 0 et 255 (sortie caméra), comme les valeurs à la sortie (commande du SLM sur 8 bits).

La correction de faisceau s'effectue grâce à un asservissement par modulation de polarisation, traduite en amplitude grâce au polariseur (la phase n'étant pas prise en compte). La référence était fixée dans un premier temps à 127 pour bénéficier du maximum de dynamique : 127 niveaux de gris pour rehausser les bords et 127 pour atténuer le centre. Par la suite, les expériences ont montré que le maximum du filtre ne dépassait pas 220. Nous avons alors diminué la plage dynamique en montant la référence à 160, ce qui permet en outre de diminuer l'absorption de lumière du SLM.

6.4.3 LUT

Avant de réaliser l'asservissement il faut préalablement linéariser la fonction de transfert en transmission du SLM. Ceci s'effectue simplement grâce aux LUT affectées aux sorties de la carte vidéo de commande du SLM.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la fonction représentant la transmission en amplitude des SLM n'est pas linéaire. Dans la figure 6.7 nous montrons la différence entre la transmission avec une LUT normale (fig. 6.7a) et avec une LUT corrigée (fig. 6.7b).

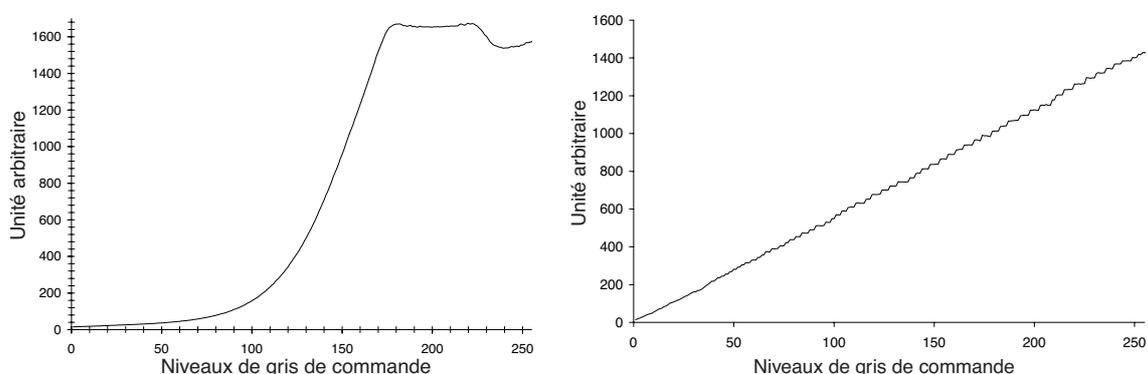


Figure 6.7 : (a) Transmission en amplitude du SLM sans correction (b) Idem avec la LUT corrigée.

La figure 6.7 montre la courbe de la fonction de transfert des SLM. La nouvelle fonction de transfert (fig. 6.7b) n'est pas parfaite surtout en ce qui concerne les valeurs de niveaux de gris

élevées (au delà de 200) où des paliers sont visibles. Malgré cela, nous sommes arrivés à rendre cette fonction presque linéaire en modifiant la LUT.

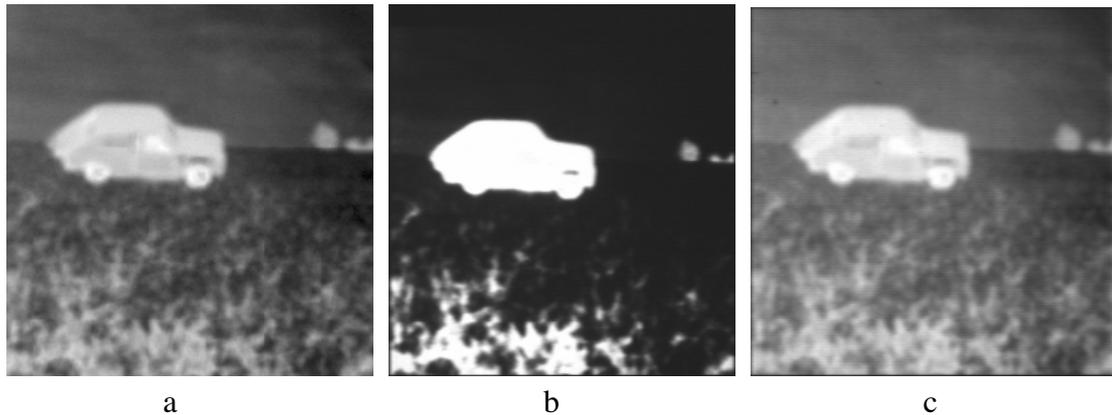


Figure 6.8 : (a) Scène que nous souhaitons afficher sur le SLM scène (cf. fig. 3.7) (b) Scène imagée sur une caméra sans correction (c) idem avec la correction de la LUT linéarisée.

La correction de la transmission du SLM scène a l'inconvénient d'augmenter l'importance du fond de l'image et donc du bruit ambiant par rapport à l'objet (fig. 6.8c). Par conséquent la qualité des résultats baisse. En revanche, les résultats ne dépendront plus des fonctions de transfert des SLM. Ainsi, notre processeur optique sera plus facilement portable. De plus, la scène représentée est maintenant plus proche de l'originale, les informations statistiques des régions sont mieux restituées.

6.4.4 Uniformisation du faisceau : ajout d'une branche de contrôle

L'asservissement pixel à pixel SLM-caméra est essentiel à la réalisation d'un corrélateur ombroscopique multicanal. Le montage complet est le suivant :

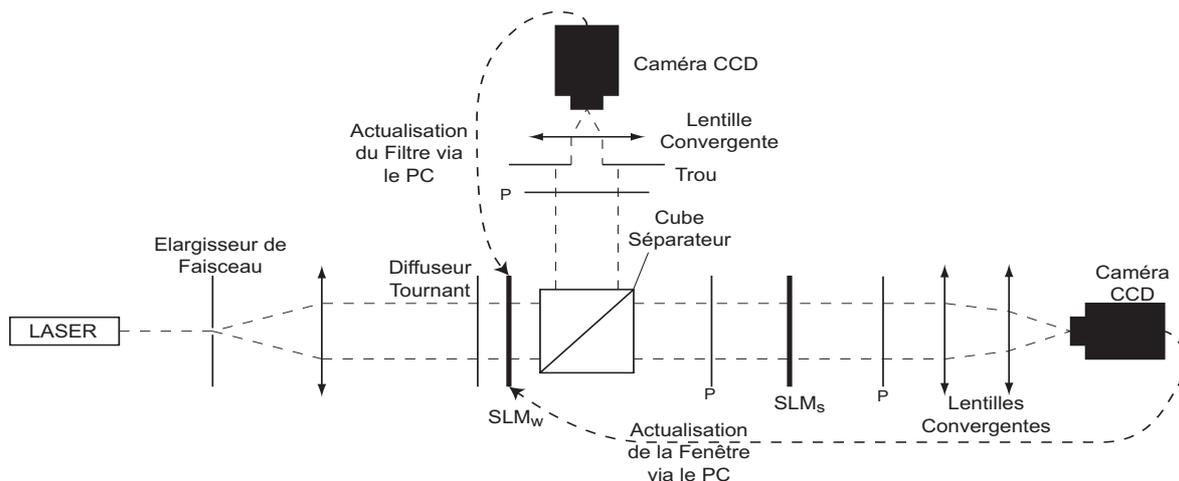


Figure 6.9 : Montage avec la branche principale du corrélateur incohérent télécentrique et la deuxième branche, verticale, où est mesuré la qualité du faisceau. L'image en niveau de gris qui uniformise le faisceau est appelée le "filtre".

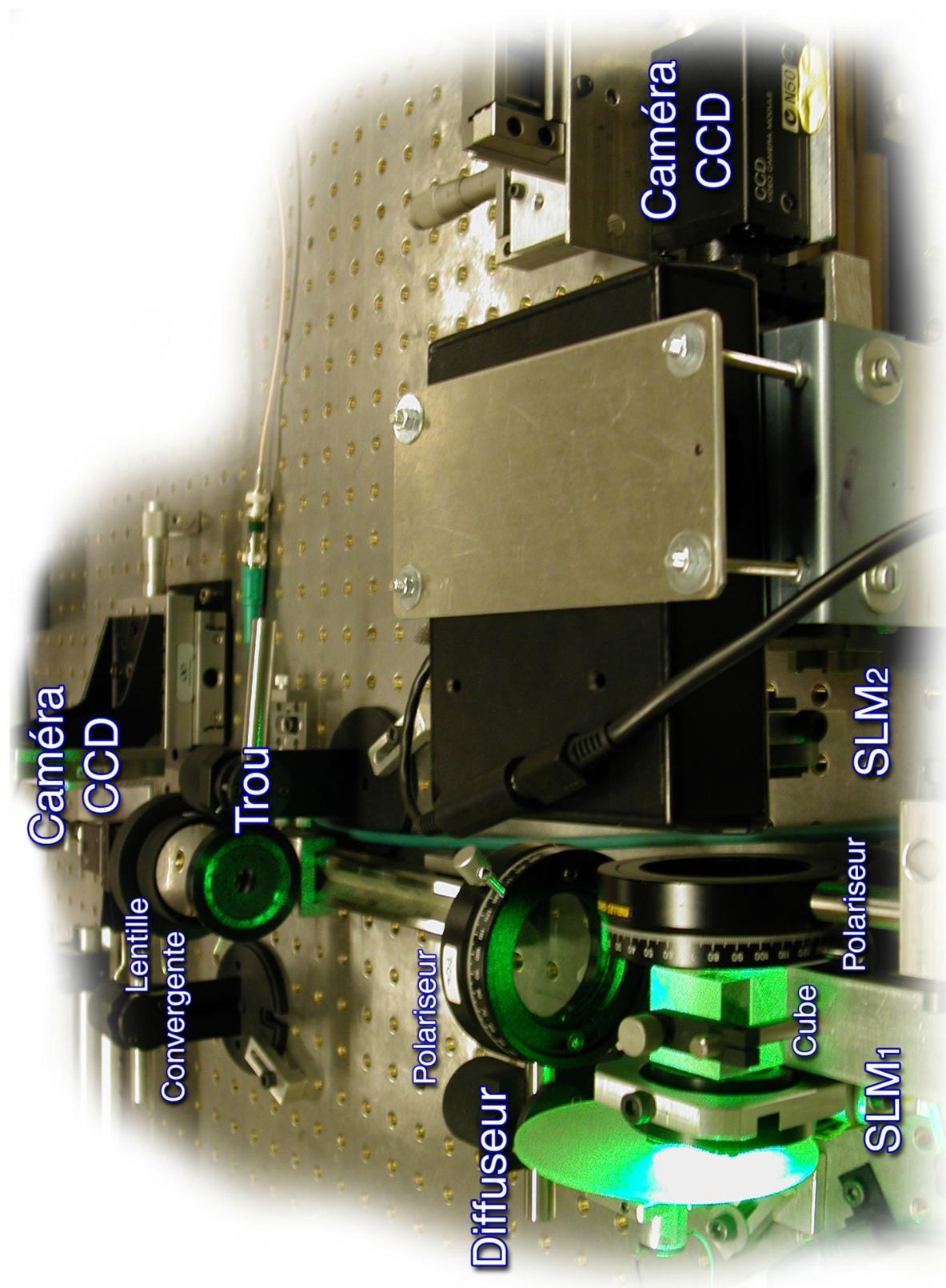


Figure 6.10 : Photo du montage avec les deux branches : la branche de correction de faisceau à gauche et la branche de la corrélation à droite.

Le premier SLM a été choisi pour contenir le filtre correcteur de faisceau, parce qu'il est situé à l'entrée du faisceau lumineux dans le processeur (mieux vaut corriger en amont). Afin d'effectuer une correction efficace, il faut qu'elle s'applique à une grande surface. C'est pourquoi nous avons choisi d'y placer la fenêtre qui utilise une grande surface puisqu'elle contient les multiples canaux (conformément à la stratégie de traitement parallèle de l'information choisie en section 6.2). Le premier SLM représente donc les différentes fenêtres multiplexées qui seront corrigées par l'asservissement.

La fenêtre contient un pochoir binaire qui évolue à l'intérieur d'un canal d'information de 249x249 pixels pour l'image de la voiture. En revanche, la scène contient des informations dans l'ensemble du canal, jusqu'aux bords. En plaçant la fenêtre avant la scène, c'est le canal d'information le plus petit qui est diffracté, ce qui réduit les possibilités d'empiètement inter-canaux dus à la diffraction de la grille du second SLM.

Avant la caméra de la deuxième branche, une ouverture circulaire de diamètre 12 mm permet d'éliminer les informations fantômes dues principalement aux multiples réflexions de la lumière au niveau du cube séparateur [25]. Cet iris sert aussi à régler l'intensité lumineuse qui éclaire la caméra de la deuxième branche.

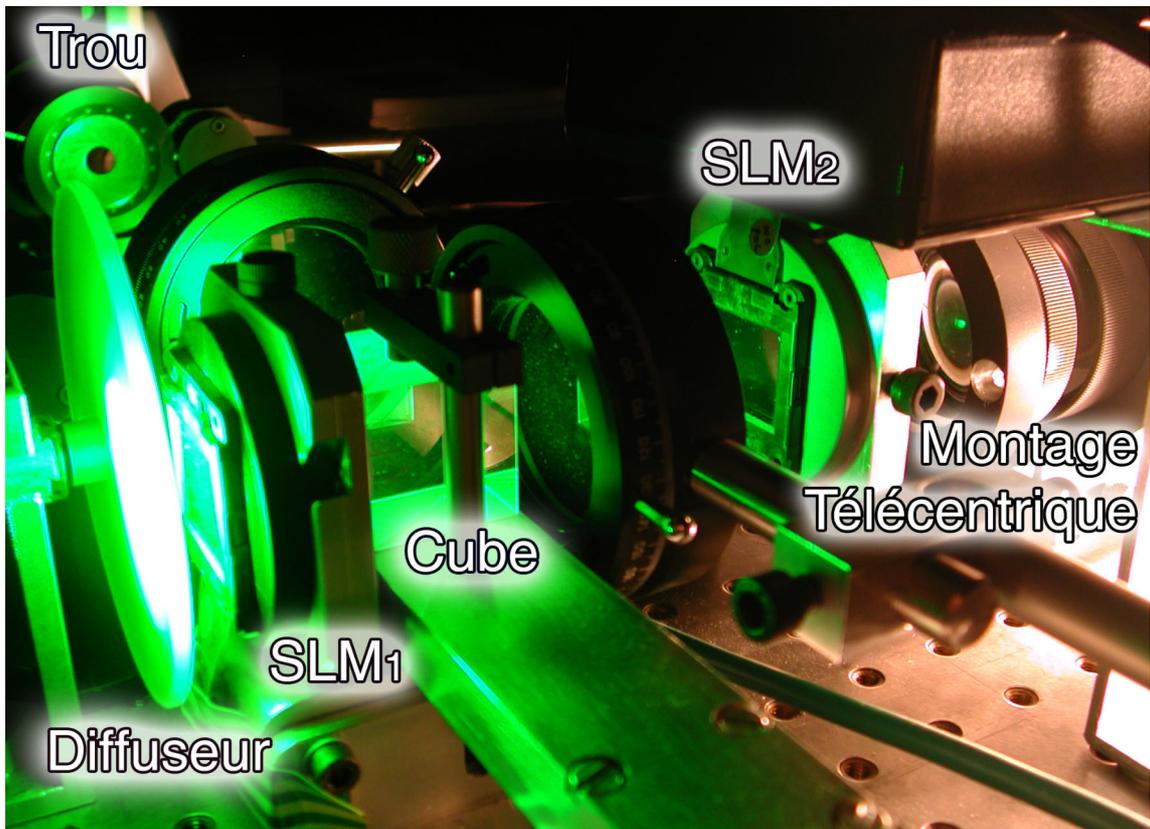
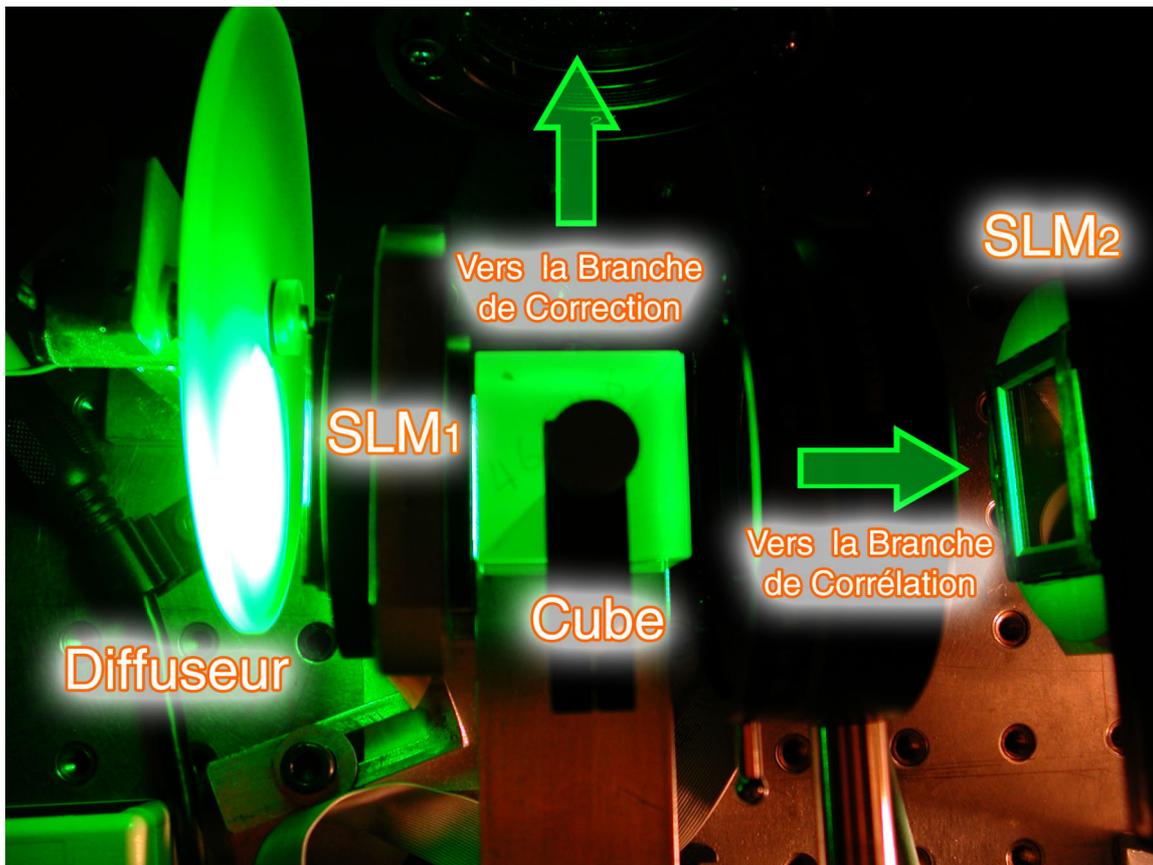


Figure 6.11 : Deux autres vues du cœur du processeur où le faisceau d'information est dirigé dans les deux branches optiques grâce au cube séparateur. Le lecteur peut ainsi se rendre compte de la compacité du montage.

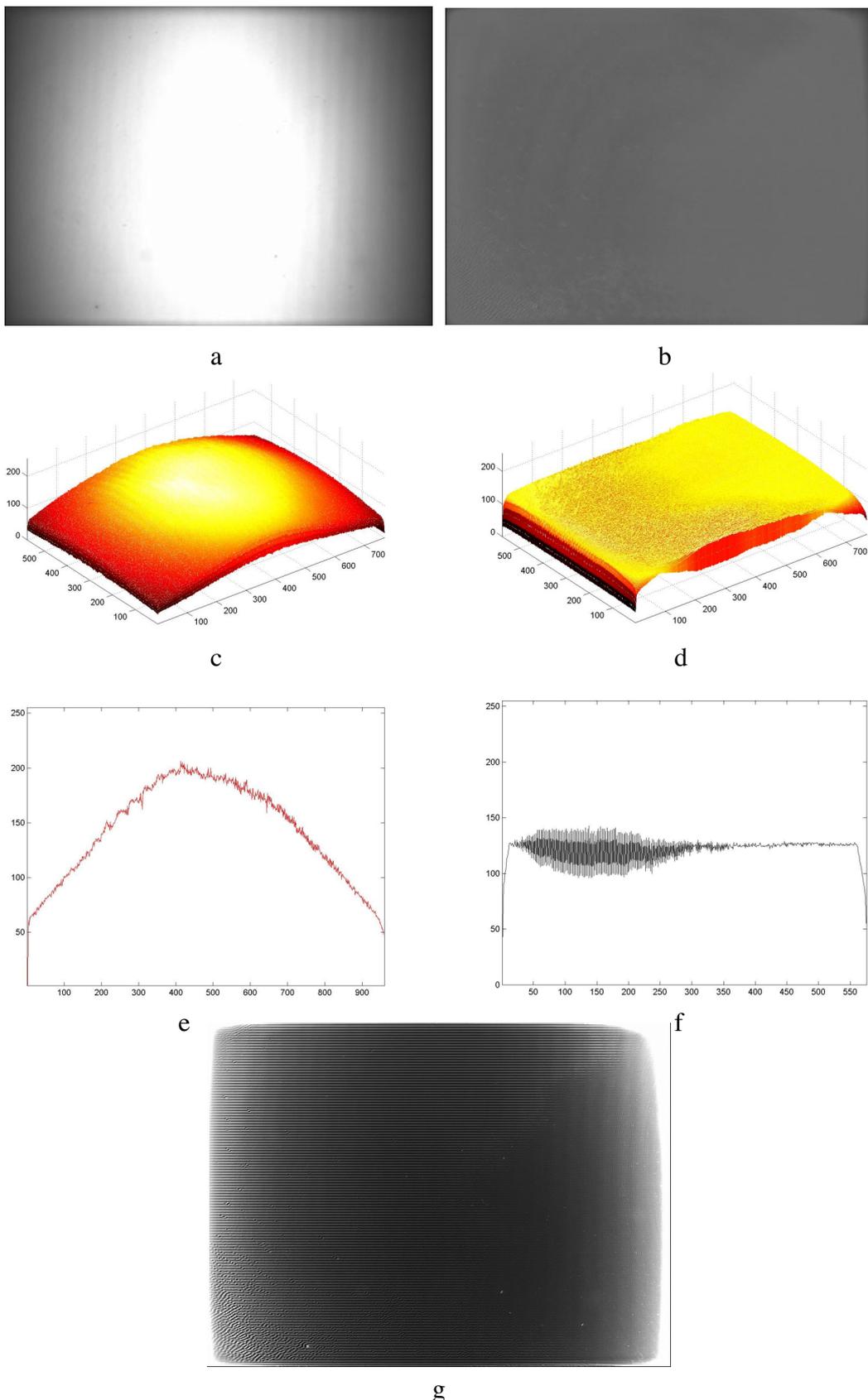


Figure 6.12 : (a) et (c) faisceau éclairant le premier SLM (b) et (d) faisceau après correction pixel à pixel (e) diagonale de (a) et (c) (f) diagonale de (b) et (d) (g) filtre affiché sur le premier SLM pour corriger le faisceau.

Comme on le voit sur la figure (6.12), le filtre obtenu par asservissement donne entière satisfaction, surtout depuis que la LUT a été corrigée. Auparavant des saturations

apparaissaient dans le filtre de correction de faisceau. On obtient en moins de 2 secondes un faisceau uniforme dans le plan du premier SLM.

Cette technique de correction de faisceau, par absorption répartie dans le plan d'entrée du faisceau, supprime 46% de l'énergie. Le bilan énergétique est quand même positif puisque nous pouvons désormais utiliser plusieurs canaux.

6.4.5 Asservissement sur image

Même avec une LUT corrigée, la réponse du SLM n'est pas idéale. La technique d'adressage des pixels fait qu'il reproduit mal les colonnes (cf. section 5.2.4.3) par exemple. La meilleure solution est donc d'effectuer un asservissement directement sur l'image à afficher au lieu de tenter d'uniformiser le faisceau en l'asservissant à une valeur donnée (160). En même temps que l'asservissement sur l'image s'effectue, le faisceau est uniformisé (fig. 6.13).

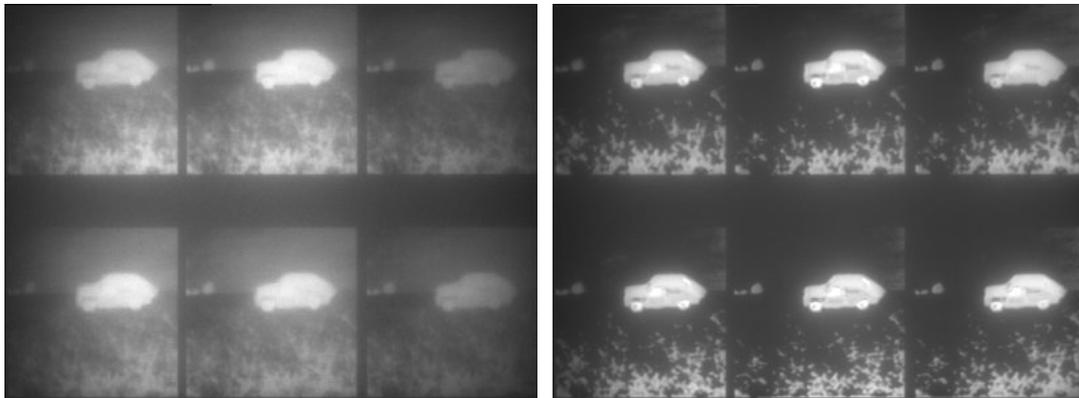


Figure 6.13 : A gauche : affichage des 6 scènes sur le premier SLM ; A droite : idem avec correction du faisceau par asservissement sur l'image à afficher.

L'asservissement sur la scène ne donne pas de bons résultats, à moins de soigneusement calibrer le gain et l'offset de la caméra de la branche d'asservissement, comme nous avons dû le faire pour la figure (6.13). La caméra ne donnera jamais en sortie un niveau 0. Elle mesure toujours de la lumière provenant des pixels adjacents ou ne serait-ce que le bruit d'obscurité. Par conséquent, lorsqu'elle devra asservir un pixel à un niveau faible, elle risque de provoquer un asservissement à 0 de tous les niveaux faibles. Pour réaliser une acquisition de bonne qualité il faudrait ajuster le gain et l'offset de la caméra de manière dynamique en fonction du point de fonctionnement où l'on se trouve pour ainsi conserver une résolution sur 8 bits.

En revanche, si l'asservissement a lieu sur l'image binaire que doit afficher la fenêtre, d'excellents résultats sont obtenus, en réduisant au préalable la plage binaire de 0-255 à 0-160 pour laisser une certaine dynamique à la correction (cf. section 6.4.2).

6.4.6 Discussion

Dans cette section nous allons présenter les avantages et les inconvénients de la correction de faisceau proposée. Mais au préalable, nous montrons ce qu'apporte la correction du faisceau, effectuée dans le plan d'entrée, au plan de corrélation :

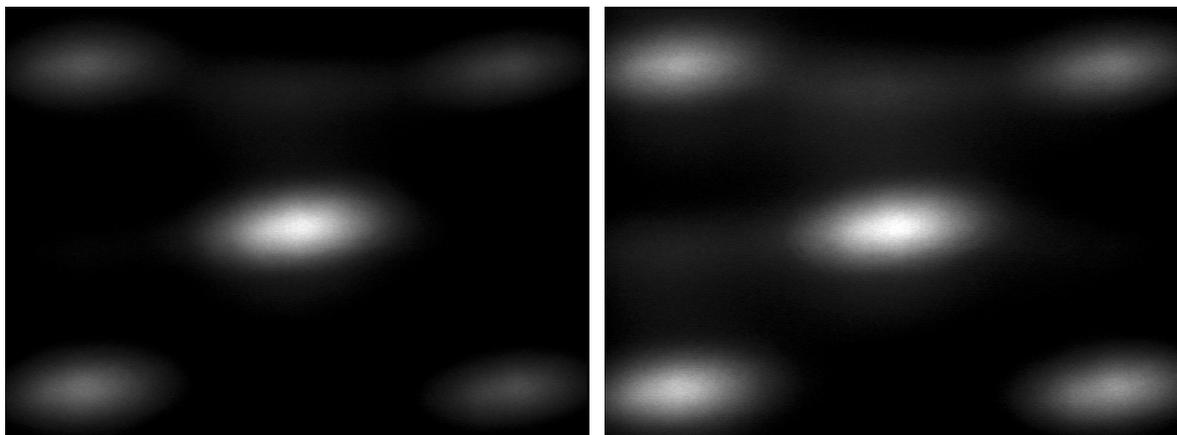


Figure 6.14 : Plans de corrélation de la scène avec la fenêtre de référence dans 5 canaux.
A gauche : sans correction. A droite : avec correction de faisceau sur le premier SLM.

La figure (6.14) prouve que la correction effectuée a amélioré la répartition de l'énergie lumineuse dans le plan de corrélation. Sans cette amélioration, le processeur multicanal ne peut pas fonctionner car les canaux en bord de SLM sont moins énergétiques que le canal central et donc la sensibilité est trop réduite. Cependant, le lecteur pourra remarquer qu'après la correction, les différents canaux n'ont pas exactement la même énergie.

En effet, si le faisceau dans le plan du premier SLM est uniforme, il ne l'est pas forcément dans le plan de corrélation [26]. Même avec un plan d'entrée uniforme on retrouve dans le plan de corrélation un profil d'intensité lumineuse ressemblant à une gaussienne. Ce plan est d'une part vigneté (cf. section 3.3.1) et d'autre part le diffuseur introduit un effet photométrique supplémentaire en éparpillant aléatoirement les rayons de lumière, suivant une répartition gaussienne [27].

Reprenons l'étude introduite dans le troisième chapitre. Supposons que le faisceau soit uniforme dans le plan du premier SLM, un point lumineux sur le bord verra son énergie diffusée dans un cône de lumière utile plus réduit qu'un point lumineux au centre de ce même plan. Ainsi, l'information sur les bords est d'autant plus atténuée que les SLM sont proches. Dans notre configuration¹ $d/L \gg 1$. La pondération angulaire est donc faible et correspond aux Figures (6.15b et d).

¹ $d=119$ mm ; $L=26$ mm ; $H=20$ mm

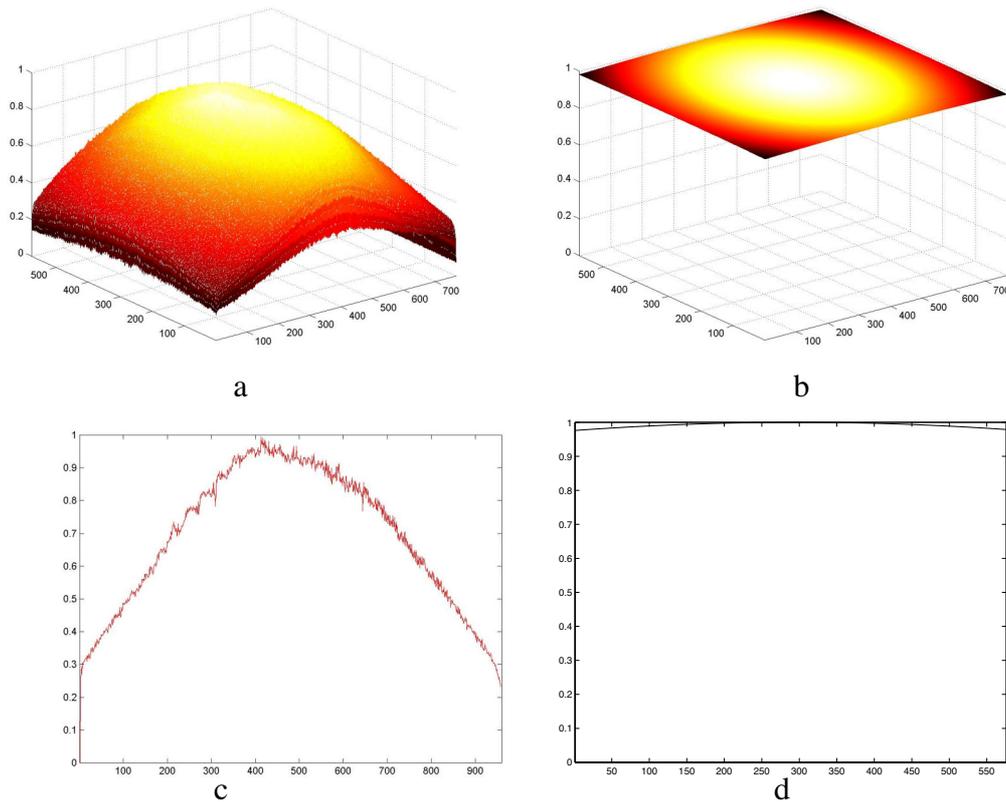


Figure 6.15 : (a) Profil expérimental du faisceau lumineux irradiant le premier SLM (b) pondération photométrique théorique de l'image affichée (c) coupe diagonale de (a) (d) coupe diagonale de (b).

Pour corriger ce problème d'efficacité lumineuse suivant la position du pixel, il existe une solution [28]; derrière le premier écran LCD est placée une lentille convergente. On suppose que cette lentille est proche du plan du premier SLM. Alors, pour chaque pixel, le rayon de lumière émis passera d'abord par le foyer de la lentille avant d'atteindre le second SLM. Ainsi l'efficacité angulaire est identique pour tous les pixels. Cependant, dans notre situation, réaliser cette correction et en même temps l'asservissement avec la deuxième branche serait très difficile d'un point de vue matériel. En l'état actuel, ces deux corrections complémentaires ne peuvent être effectuées de manière simultanée. C'est pourquoi nous avons éloigné suffisamment les deux SLM pour réduire cet effet de pondération photométrique selon la position des pixels par rapport à l'axe optique.

Le faisceau gaussien présente une différence d'énergie de 60 à 70% entre un point au centre et un autre dans un coin (fig. 6.15a et c), alors que la pondération photométrique évoquée ci-dessus provoque une différence de moins de 4% entre ces extrêmes (fig.6.15b et d). La pondération photométrique peut donc être négligée comparée au profil gaussien de l'éclairage délivré par la source lumineuse. L'asservissement de faisceau est, dans notre cas, la correction la plus intéressante.

Lors des premiers asservissements de faisceau, nous avons remarqué des irrégularités dans le filtre correcteur de faisceau. Elles sont dues à un alignement imparfait des matrices LCD et CCD. Nous avons donc opéré un adoucissement avec un filtre adaptatif médian [29] utilisant un noyau unitaire de taille 3x3 (fig. 6.16).

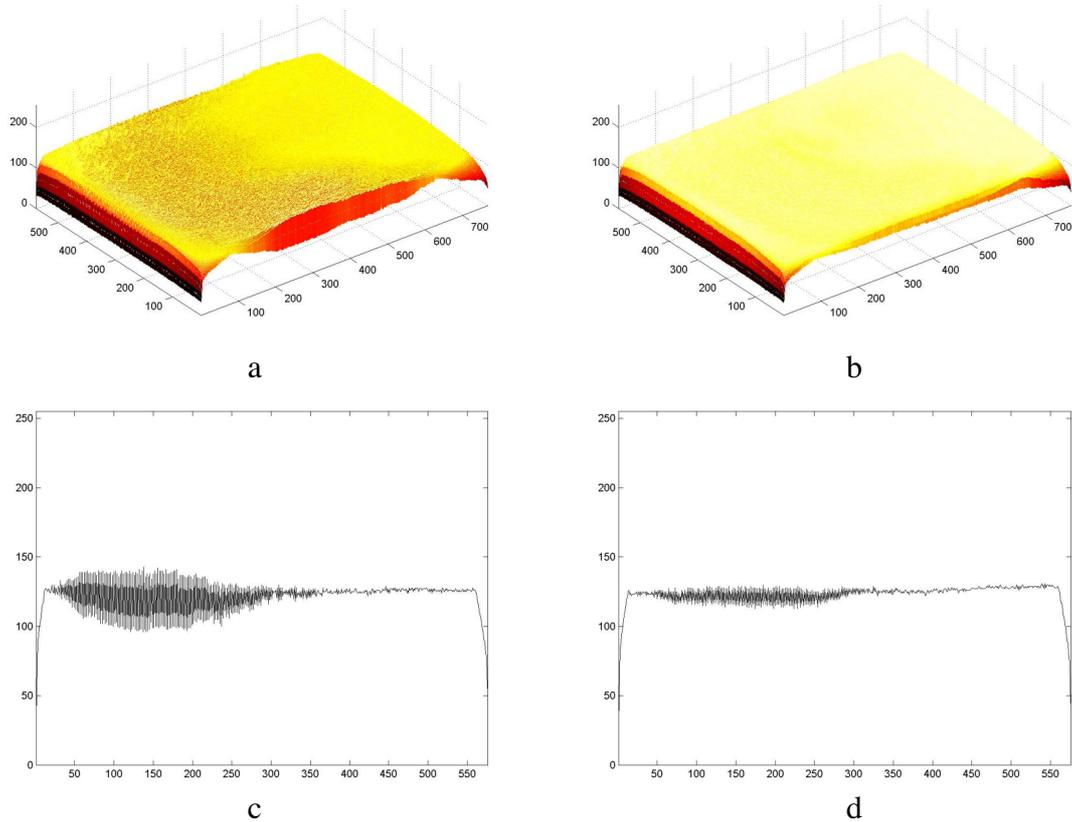


Figure 6.16 : Le filtrage médian améliore la correction de faisceau : à gauche est représenté le profil du faisceau corrigé sans filtrage médian et à droite, le même profil après passage du filtre médian sur le filtre de correction de faisceau.

Si nous récapitulons:

- la correction est efficace sur la fenêtre (cf. section 6.4.5),
- d'après la stratégie de traitement adoptée, c'est la fenêtre binaire qui est multiplexée,
- d'après le montage, l'asservissement doit avoir lieu sur le premier SLM.

Il faut donc que la fenêtre, contenant les multiples canaux, soit affichée sur le premier SLM qui sera asservi via la deuxième branche.

Cependant, l'asservissement sur l'image, qui est au vu des résultats meilleurs que la correction de faisceau, ne peut pas être opéré sur la fenêtre qui change à chaque itération. Le temps d'asservissement est trop long.

Comme la fenêtre est binaire, nous avons réalisé un pochoir sur le filtre qui corrige le faisceau. Le principe est de réaliser le filtre correcteur de faisceau par asservissement et de le mettre en mémoire. Ensuite, l'image binaire que doit afficher la fenêtre est multipliée à ce filtre. Dans la figure (6.17) nous comparons cette solution à l'asservissement sur l'image que doit afficher la fenêtre.

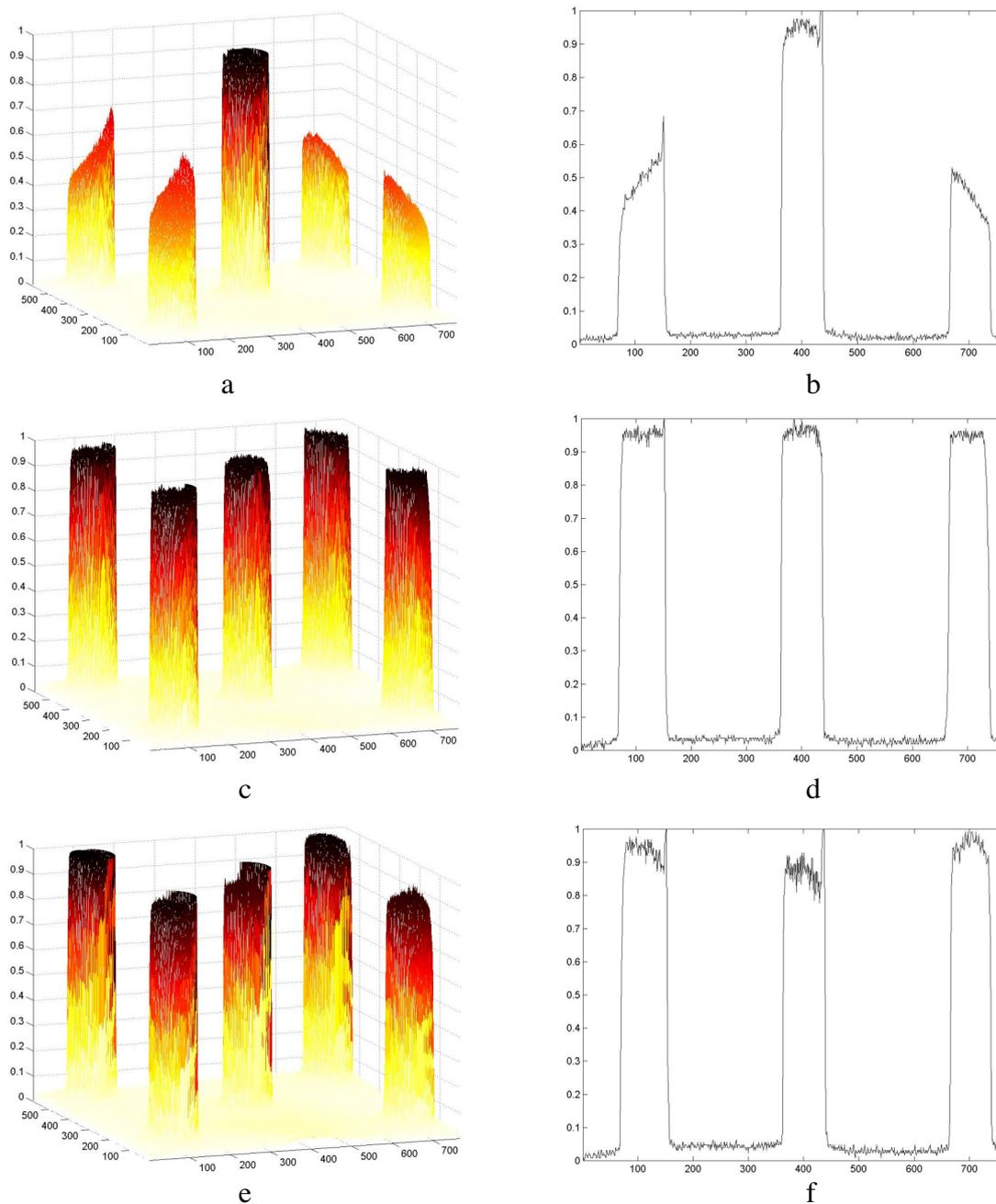


Figure 6.17 : Profil des faisceaux mesurés sur le premier SLM où est affichée une image binaire représentant 5 disques. Dans la colonne de gauche sont présentées les valeurs énergétiques des pixels, normalisés à 1, en fonction de leur position dans l'écran LCD (surface active de 768x576). Dans la colonne de droite sont présentées les coupes selon les diagonales des images de la colonne gauche. **(a-b)** : à cause de la forme gaussienne du faisceau laser l'image n'est pas reproduite fidèlement **(c-d)** : résultat d'un asservissement sur l'image à afficher **(e-f)** : résultat de la correction du faisceau associée au pochoir.

Nous constatons figure (6.17) que sans correction de faisceau, les canaux sur la périphérie de la surface active subiront une perte d'éclairement d'environ 50% par rapport au canal central et ne seront pas uniformes à l'intérieur (6.17a et b). En revanche, avec l'asservissement sur l'image que doit afficher la fenêtre, le résultat est quasiment parfait (6.17c et d). Avec la troisième solution qui consiste à corriger le faisceau source associée au pochoir, l'image à afficher est fidèlement reproduite. Le centre semble être légèrement trop atténué et les plateaux sont bruités.

Nous pouvons en conclure que la solution, qui consiste à réaliser le filtre correcteur de faisceau puis à afficher par pochoir la fenêtre, est amplement satisfaisante. Cependant, cette opération nécessite un passage sur l'image, ce qui ralentit de 15% le processus de segmentation.

Nous allons maintenant énoncer les avantages et les inconvénients qu'apportent la correction de faisceau.

6.4.6.1 Inconvénients

- Le SLM SVGA fenêtre, étant asservi pixel à pixel sur une caméra CCIR ayant une résolution de 768x576, voit sa surface active réduite en nombre de pixels à celle de la caméra. On perd donc 32 colonnes et 24 lignes.
- La méthode proposée assombrit le centre de l'image affichée sur le premier SLM. La perte de contraste¹ occasionnée, de 190 à 90, se traduit par une diminution de dynamique, on passe de 8 à 6 bits (0-255 à 0-120). Comme la correction s'applique à la fenêtre binaire, il n'y a pas de perte de codage. En ce qui concerne la puissance lumineuse, on peut se permettre cette légère perte car la puissance du laser utilisé reste néanmoins suffisante. La correction spatiale du faisceau lumineux est un compromis entre une bonne uniformité et un bon contraste.
- Alors que les contraintes d'alignement étaient assez lâches jusqu'à présent dans le montage, l'asservissement pixel à pixel demande maintenant un alignement précis, du moins dans la deuxième branche. Cependant, une technique faisant appel à une mire au départ semblerait pouvoir être une solution pour assouplir cette contrainte.
- En uniformisant le faisceau et en prenant en compte de plus grandes surfaces, la sensibilité au bruit ambiant est accrue.
- La correction ralentit de 15% le processus de segmentation.

6.4.6.2 Avantages

- L'énergie est uniforme à l'intérieur de chaque canal et à peu de choses près entre les différents canaux. Ceci permet de travailler avec une caméra dans la même plage de fonctionnement pour tous les canaux.
- Le canal central est moins intense et moins de lumière est diffractée sur les autres canaux. Ces derniers sont maintenant plus lumineux et donc moins sensibles aux variations des uns des autres.
- Le filtre correcteur de faisceau étant calculé dans une boucle d'asservissement, l'intensité lumineuse en sortie du premier SLM est désormais asservie à une valeur donnée (160). Auparavant, cette intensité changeait avec le temps de chauffe du SLM fenêtre et les fluctuations du laser. Ceci nous permet de travailler comme si nous avions une source stable dans le temps. Les conditions des expérimentations en sont donc améliorées et la reproductibilité des snakes accrue.

¹ Le contraste se définit ici par le rapport entre l'intensité maximale mesurée et l'intensité minimale.

6.4.7 Conclusion

La restitution de l'image dans le faisceau d'informations a été améliorée en réduisant l'intensité des données au centre, en les "voilant" avec un filtre. Ainsi la qualité de traitement optique sur les données extérieures augmente, tout en réduisant la dynamique des données au centre, ce qui n'est pas dérangeant puisque c'est la fenêtre où est appliquée la correction.

Le pochoir associé au filtre correcteur de faisceau s'est révélé être le meilleur compromis entre les différentes solutions proposées. Un asservissement sur la fenêtre est certes d'excellente qualité, mais comme la fenêtre change à chaque itération, la perte de temps risque d'être considérable. D'ailleurs le pochoir donne des résultats de qualité presque équivalente à un asservissement sur l'image que doit afficher la fenêtre.

Nous avons présenté une technique originale pour transformer le profil gaussien du faisceau laser en un profil carré adapté à la taille de notre premier SLM. Elle fait appel à une modulation de polarisation intégrée dans une boucle d'asservissement. Elle est efficace en lumière incohérente, mais peut donner des résultats équivalents en lumière cohérente avec un modulateur fonctionnant en amplitude pure. De plus, cette technique adaptative, indépendante de la longueur d'onde utilisée, fonctionnerait aussi efficacement en lumière blanche.

Alors que les meilleures corrections de faisceau par absorption ne dépassent pas 37% d'efficacité [18], notre solution présente une efficacité¹ de 54% pour une surface importante. De plus, notre système est bouclé et donc adaptatif. De fait, la correction de faisceau lumineux par modulation de polarisation était une solution provisoire qui s'est révélé être largement suffisante pour notre processeur parallèle. Une configuration différente pourrait être envisagée par la suite avec asservissement par modulation de phase, solution qui absorberait encore moins d'énergie.

Cette correction de faisceau est réalisée en moins de 2 secondes, ce qui correspond plutôt aux temps de l'optique adaptative et qu'à ceux relevant de l'optique active (>10 secondes) [30]. L'implantation prochaine de cette méthode avec le modulateur ferroélectrique nous laisse espérer une correction de faisceau de l'ordre de la centaine de millisecondes.

¹ Obtenue en comparant l'énergie mesurée par la caméra de correction avant et après l'asservissement.

6.5 Résultats

Grâce à cette correction par modulation de polarisation, nous avons réussi à uniformiser le profil du faisceau source, nous permettant ainsi de profiter davantage de l'espace utile. Dans ces conditions, nous avons pu réaliser un corrélateur ombroscopique multicanal comprenant 4 voies¹ qui sont traitées en parallèle.

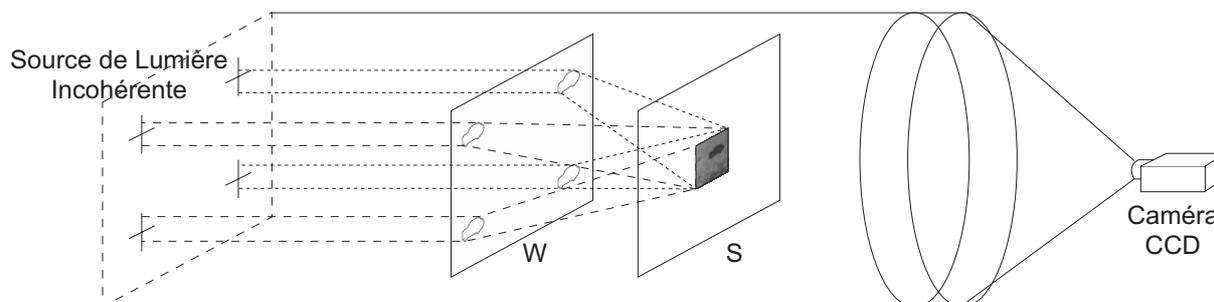


Figure 6.18 : Schéma du processeur parallèle exploitant 4 canaux différents.

Nous avons adapté la stratégie numéro 6 (cf. section 6.2), qui accélère de la manière la plus certaine les segmentations, à la configuration optique (fig. 6.18) comme suit :

- 4 nœuds sont déplacés dans la même direction aléatoire : dans chaque canal est affiché un pochoir avec un des 4 nœuds déplacé,
- un critère est calculé pour chaque canal,
- le contour actif est actualisé avec toutes les déformations minimisant le critère,
- si aucune amélioration n'est apportée en ayant parcouru une fois l'ensemble des sommets du contour, la segmentation s'arrête.

Comme il y a 8 nœuds en tout, le contour est entièrement parcouru en 2 opérations de corrélation multicanal.

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, le critère J évolue de manière particulière avec le processeur optoélectronique. De surcroît, le critère J évolue différemment selon la position du canal dans l'espace. Chaque canal étant indépendant, le nouveau contour, conçu grâce à la participation des 4 canaux, doit être affiché dans chaque canal pour calculer le critère J propre à chaque canal (fig. 6.19). Cette opération requiert l'affichage du nouveau pochoir entre deux itérations, ce qui divise par 2 la vitesse du processus. Cependant, il faut souligner que de cette manière il n'y a pas de perte de qualité. La moyenne de qualité est de 77%, comme en monocanal (cf. section 4.2).

Notre nouvelle version processeur optique, qui exploite le parallélisme inhérents aux architectures optiques, est finalement deux fois plus rapide que la version précédente. En

¹ Nous avons exploité 4 voies parce qu'avec 6 voies les canaux sont juxtaposés et la diffraction provoque un recouvrement inter-canaux.

outre, ce résultat valide, ce qui est à notre connaissance, le premier corrélateur optique multicanal capable de réaliser des opérations quantitatives exactes (fig. 6.20).

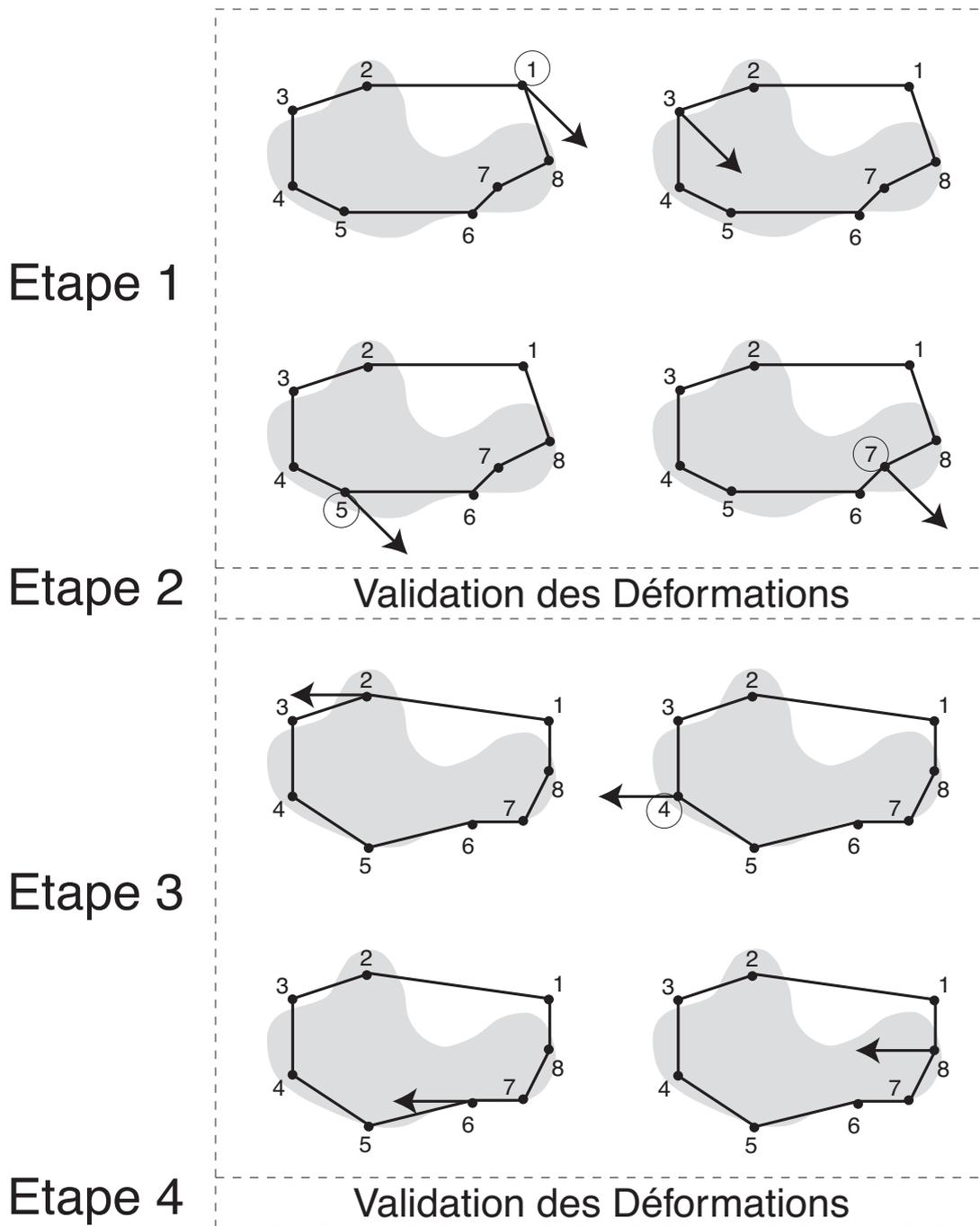


Figure 6.19 : Stratégie de convergence adaptée au montage multicanal. Etape 1 : Les nœuds impairs sont déplacés dans une même direction choisie aléatoirement. Etape 2 : Les déformations qui ont occasionné une minimisation du critère (les nœuds 1, 5 et 7) sont conservées et le nouveau pochoir est affiché dans les 4 canaux pour y mesurer leur critère. Etape 3 : Les nœuds pairs sont déplacés dans une même direction aléatoire. Etape 4 : identique à l'étape 2 avec la validation de la déformation provoquée par le déplacement du nœud numéro 4.

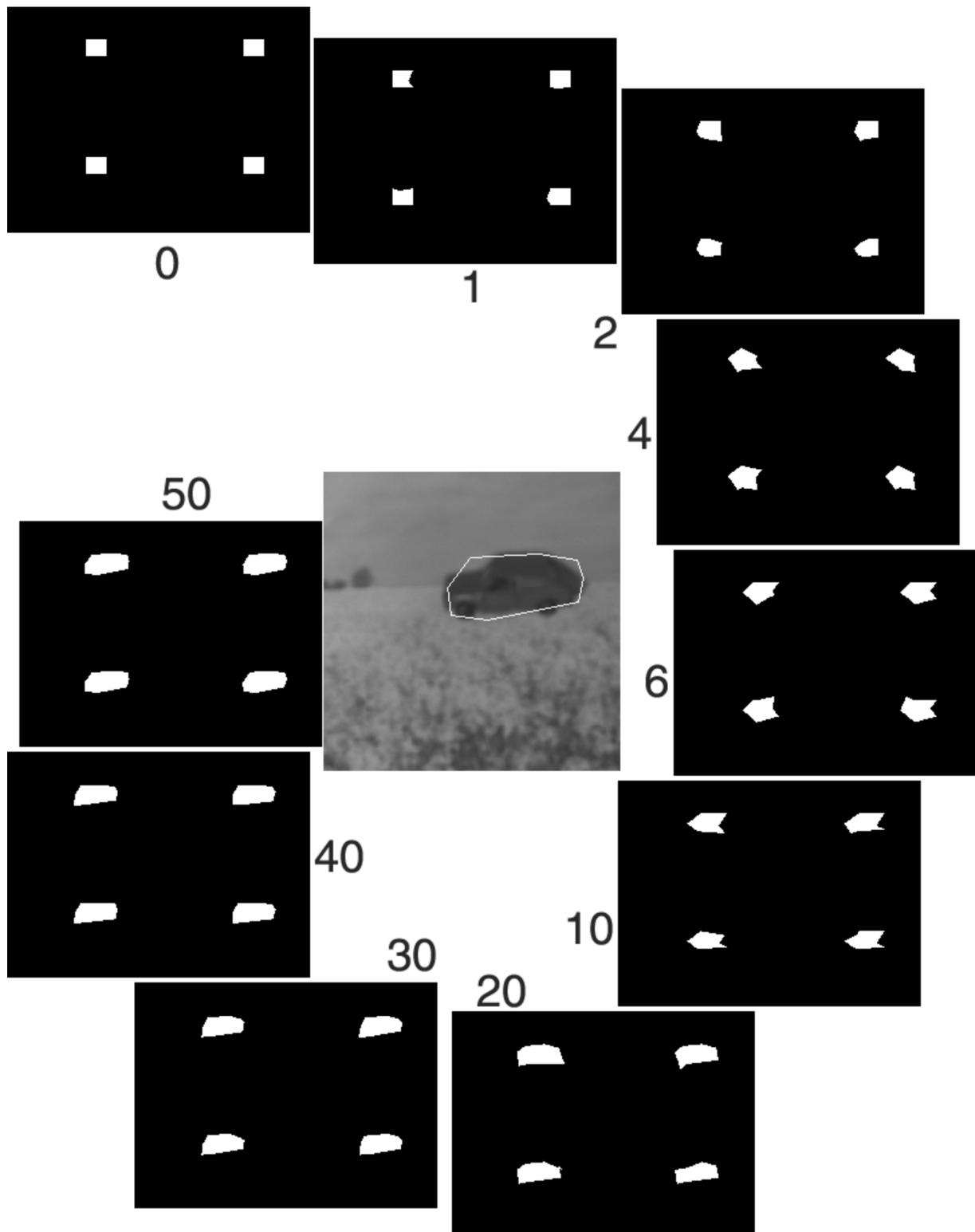


Figure 6.20 : Evolution de la fenêtre multicanal lors d'une expérimentation. Seulement quelques fenêtres ont été représentées et sélectionnées dans les 50 itérations qu'il a fallu effectuer pour obtenir la segmentation. La qualité correspondant à cette expérimentation est de 82%.

6.5.1 Accélérations possibles

A l'heure actuelle, notre processeur optique est bien loin de pouvoir segmenter des images en temps réel. Afin d'opérer un snake optoélectronique en quelques centaines de millisecondes, nous allons proposer une solution réaliste, ne remettant pas en cause l'architecture : il suffirait de changer certains composants.

D'après nos précédentes expériences, nous savons maintenant que nous aurons besoin d'une source lumineuse stable et incohérente. La solution du diffuseur tournant ne suffira plus à décoherer le signal, à moins d'accélérer sensiblement la vitesse de rotation du diffuseur. Il existe sur le marché de puissantes sources en lumière blanche collimatées, uniformes et stabilisées qui n'ont pas besoin de diffuseur tournant pour décoherer le faisceau. Ces sources ont cependant l'inconvénient d'être blanches, ce qui introduira un bruit supplémentaire dû à la dispersion (chute de contraste, flou).

En ce qui concerne les modulateurs spatiaux de lumière, nous nous sommes récemment équipés d'un dispositif à cristaux liquides ferroélectriques [31] [32]. Cet écran LCD, fonctionnant en réflexion (fig. 6.21), devrait nous permettre d'accroître la cadence de fonctionnement du processeur d'un facteur 100 à 200¹ grâce à sa fréquence de fonctionnement à 1 kHz.

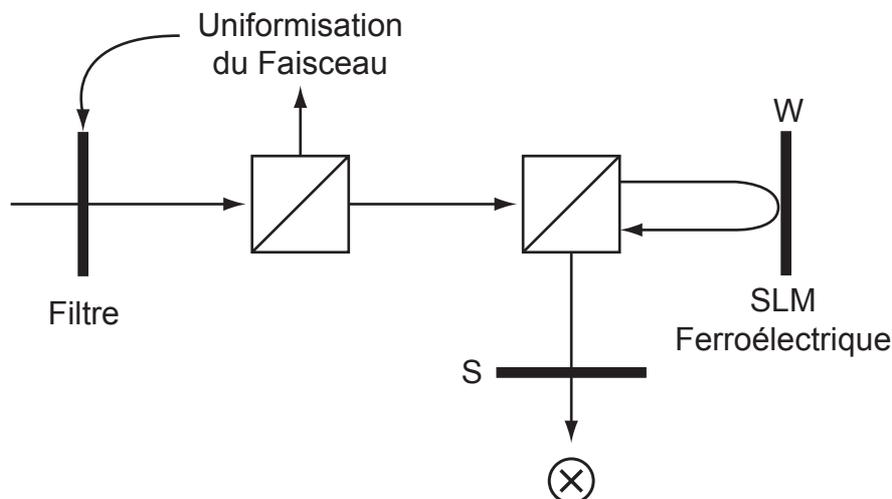


Figure 6.21 : Une des architectures envisagées avec le SLM ferroélectrique.

Pour remplacer la caméra, qui est un autre facteur limitant, plusieurs photodiodes pourraient être placées aux centres des corrélations des différents canaux. Une autre possibilité serait d'utiliser des imageurs CMOS qui de par leur accès aléatoire permettent d'accélérer les vitesses de lecture tout en garantissant des résolutions satisfaisantes.

Nos photodiodes ont été pour l'instant peu exploitées, mis à part les essais de correction des fluctuations et les mesures de fonctions de transfert de certains éléments (cf. chapitre 5). En fait, elles souffraient d'une trop grande sensibilité aux variations rapides du laser. Avec une source de lumière plus stable, elles conviendraient sûrement mieux pour mesurer la valeur

¹ Nous avons vu au chapitre 5 que la fréquence de rafraîchissement effective des images est actuellement de 4Hz.

centrale de la corrélation. En outre, nos photodiodes doivent être très sensibles, car la puissance du centre de la corrélation ne dépasse pas la centaine de nanowatts avec les composants optiques actuels. Cependant, avec le SLM ferroélectrique, le centre de la corrélation pourrait être plus lumineux. En effet, le SLM ferroélectrique restitue 65% de la lumière alors que les SLM que nous utilisons actuellement n'en transmettent que 10%.

Si nous récapitulons, avec une source de lumière blanche stable et collimatée, le SLM ferroélectrique et les photodiodes, nous pouvons envisager des segmentations optoélectroniques en quelques centaines de millisecondes.

6.5.2 Opérations optiques complémentaires pour le snake

L'algorithme de minimisation de critère ne se limite pas à une corrélation, d'autres opérations sont nécessaires. Comme nous avons montré que le processeur optique fonctionne, ces opérations peuvent maintenant aussi bénéficier de l'architecture optique en place afin de gagner du temps.

Pour calculer N_a (nombre de pixels à l'intérieur de l'intérieur du contour (éq. 2.9)) à chaque itération, le processeur électronique numérique effectue un passage entier sur l'image, ce qui dure 1,5 ms[♦]. Au lieu de calculer N_a numériquement, il est possible de placer un capteur qui mesure l'intensité lumineuse passant à travers le SLM qui affiche la fenêtre. Une lentille doit être placée devant le capteur pour récupérer toute l'énergie lumineuse de la fenêtre. Le résultat de cette acquisition, une fois normalisé, correspondrait à N_a . Une telle acquisition dure 0,31ms avec notre matériel (capteur + carte d'acquisition + ordinateur), ce qui correspondrait à une opération approximativement 5 fois plus rapide, faisant gagner environ 240 ms sur 200 itérations (~50 s).

Avant de traiter une nouvelle scène (toutes les 40 ms en temps réel), l'algorithme a besoin de connaître la somme des valeurs des pixels de la scène, Σ_s . Comme pour la mesure de N_a , cette valeur peut être mesurée simplement en plaçant une lentille et un capteur derrière le SLM représentant la scène. Ceci ferait passer le temps de calcul de 4,2 ms[♦] à 0,31 ms, mais seulement une fois pour chaque nouvelle image et pas à chaque itération comme pour le calcul de N_a .

Dans la configuration actuelle, ces accélérations du processus de segmentation spécifiques à la mise en œuvre optique expérimentale sont négligeables, correspondant à un gain de 240 ms sur plusieurs dizaines de secondes. Cependant, dans un système intégrant le SLM ferroélectrique où l'on peut raisonnablement espérer une segmentation en 400 ms, le temps cumulé des opérations complémentaires (N_a et Σ_s) serait important : 244,2 ms (pour 200 itérations). Ce temps pourrait être ramené à 62 ms grâce aux solutions optoélectroniques proposées, et pourrait même encore être davantage réduit avec un système d'acquisition (déjà

[♦] Pour la scène avec la voiture, donc 249 x 249 pixels. Si la scène avait une taille plus grande, ce temps de calcul serait plus grand.

utilisé au laboratoire par ailleurs) fonctionnant à une fréquence plus élevée que celle actuellement disponible (~ 330 kHz au lieu de $\sim 3,3$ kHz).

6.6 Diverses Applications du Processeur Optique

Tout au long de cette thèse, nous avons travaillé avec deux opérations traditionnelles en reconnaissance des formes à savoir : la *segmentation* et la *corrélation*. A présent, nous proposons deux applications associant ces opérations. Dans le premier cas nous étudions une application où la segmentation aide la corrélacion, et dans le second cas l'inverse.

6.6.1 Reconnaissance de formes

La discrimination entre plusieurs objets en tenant compte de leur silhouette est un problème qui bénéficie d'une littérature relativement dense [33]. Les approches les plus récentes utilisent des contours actifs pour obtenir le contour préalable de l'objet [34]. Après la détection du contour, l'objectif est de déterminer à quoi correspond la forme segmentée en la comparant à une base de données de différentes formes. Une méthode associant les snakes et les distances de Hausdorff a été proposé par Ruch [35].

Cependant, l'information du contour pourrait être complétée par les informations contenues à l'intérieur du contour. Avec le corrélacion optique actuel, il serait possible de comparer la région de l'objet segmenté à une base de données, alors que les techniques citées ci-dessus se limitent à la comparaison des formes. L'opération peut être effectuée en une opération de corrélacion traditionnelle, par exemple avec un filtre SDF. Il serait donc tout à fait réaliste d'effectuer, en plus de la segmentation, une opération de discrimination sur la région de l'objet. Avec le SLM ferroélectrique, il est possible de calculer la corrélacion d'une image avec une base de donnée de 4000 images 256x256 en 1 seconde.

Dans ce cas de figure, la corrélacion aide la segmentation. La segmentation détecte l'objet et supprime le fond, puis la corrélacion permet de reconnaître l'objet¹.

6.6.2 Suivi de cible et corrélacion

Afin d'augmenter l'efficacité d'un corrélacion optique de poursuite de cible, Matwyschuk [36] a développé une méthode de segmentation basée sur les snakes. Cette opération permet d'extraire la cible dans la fenêtre référence du corrélacion. Mais elle permet surtout d'obscurcir le fond de l'objet, grâce à un diaphragme à iris, pour éviter son influence perturbatrice dans la poursuite. Même si la segmentation n'est pas parfaitement ajustée à l'objet, elle contient suffisamment de détails pour qu'il soit reconnu rapidement et suivi fidèlement sans être perturbé par le fond.

¹ On pourrait également imaginer que la base de données soit sélectionnée en fonction de la forme de l'objet.

Avec notre corrélateur multicanal, nous pourrions espérer accélérer, voire améliorer cette application de poursuite. Mais au delà de la poursuite, la segmentation peut améliorer d'autres processeurs optiques effectuant des corrélations.

La corrélation optique est très efficace pour la détection de formes et leur localisation dans une scène. Cependant, cette technique reste sensible à toute déformation¹ de l'objet par rapport à sa référence. Une segmentation préalable de la cible permettrait d'atténuer ce problème.

Lorsqu'ils sont représentés dans l'espace objet (opposé à l'espace de Fourier) (i.e., comme une réponse impulsionnelle) la plupart des filtres linéaires utilisés en traitement optique de l'information sont des filtres en valeurs réelles [37]. Ceci concerne, par exemple, les filtres inverses, de phase (POF), adaptés, à compromis optimaux (OT), à fonctions discriminantes synthétiques (SDF), à minimum d'énergie moyenne de corrélation (MACE), et bien d'autres encore (cf. [38] pour une description de ces filtres de corrélation). Afin de représenter leurs valeurs réelles positives et négatives, une implantation optique avec un corrélateur en lumière incohérente a été proposée [37]. Nous pourrions donc réaliser tous ces filtres linéaires avec notre corrélateur incohérent, et un snake optoélectronique pourrait servir de pré-traitement pour améliorer ces filtres linéaires. En effet, la segmentation supprime le fond de la scène traitée. Une corrélation, utilisant un filtrage linéaire, effectuée sur l'image préalablement segmentée verrait sa qualité nettement améliorée.

Cette application mettrait en coopération le résultat d'une segmentation avec celui d'une corrélation. La segmentation isole l'objet pour l'extraire du bruit ambiant et la corrélation est ensuite facilitée. En quelque sorte, la segmentation aide la corrélation.

6.7 Conclusion

Le processeur optique multicanal présenté dans ce chapitre offre de multiples possibilités pour améliorer le snake optoélectronique. Parmi les nombreuses stratégies proposées, nous avons opté pour l'accélération du processus, mais certaines solutions seront peut-être approfondies par la suite. Cette évolution de notre processeur nous permet de justifier pleinement l'implantation optique du snake SIRS.

Nous avons proposé une correction de faisceau originale, adaptative, relativement économique et indépendante de la longueur d'onde utilisée. Cette correction nous a permis d'obtenir un éclairage uniforme du premier plan et de réaliser des corrélations dans plusieurs canaux simultanément.

Nous avons terminé ce chapitre en proposant plusieurs applications intéressantes qui pourraient être envisagées prochainement avec notre processeur optique.

¹ Homothéties, rotations 2 et 3D, occlusions, ...

6.8 Références Bibliographiques

1. F.T.S. Yu et Q.H. Zhou, "A multichannel optical correlator", *Opt. Commun.* **64** (2), 111-114 (1987).
2. J.H. Feng, G.F. Chin, S.H. Yan et Y.B. Yan, "Multiobject recognition in a multichannel joint-transform correlator", *Opt. Lett.* **20**, 82-84 (1995).
3. G. Keryer et J.L. de Bougrenet de la Tocnaye, "A multichannel joint transform correlator", *Opt. Commun.* **118**, 102-113 (1995).
4. A. Vargas, J. Campos, M.J. Yzuel, C. Iemmi et S. Ledesma, "One-step multichannel pattern recognition based on the pixelated structure of a spatial light modulator", *Appl. Opt.* **37** (11), 2063-2066 (1998).
5. R. Thapliya et T. Kamiya, "Optimization of multichannel parallel joint transform correlator for accelerated pattern recognition", *Appl. Opt.* **39** (29), 5309-5317 (2000).
6. G. Li et L. Liu, "Complex-valued matrix-vector multiplication using twos complement representation", *Opt. Commun.* **105**, 161-166 (1994).
7. H. Liu, M. Wu, G. Jin, G. Cheng et Q. He, "Real-time optoelectronic morphological processor for human face recognition", *Opt. Eng.* **37** (1), 151-157 (1998).
8. S.R. Gunn et M.S. Nixon, "A robust implementation; a dual active contour", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **19** (1), 63-68 (1997).
9. H.H. Arsenault, "Conditions for space invariance in optical data processors used with coherent or noncoherent light", *Appl. Opt.* **11** (10), 2228-2233 (1972).
10. Y. Belvaux et S.P.S. Viridi, "A method for obtaining a uniform non-gaussian laser illumination", *Opt. Commun.* **15** (2), 193-195 (1975).
11. M.A. Karim, *et al.*, "Realization of a uniform circular source using a two-dimensional binary filter", *Opt. Lett.* **10**, 470-471 (1985).
12. C.-Y. Han, Y. Ishii et K. Murata, "Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles", *Appl. Opt.* **22** (22), 3644-3647 (1983).
13. T. Dresel, M. Beyerlein et J. Schwinder, "Design and fabrication of computer-generated beam shaping holograms", *Appl. Opt.* **35** (23), 4615-4621 (1996).
14. M.R. Wang et X.G. Huang, "Subwavelength-resolvable focused non-Gaussian beam shaped with a binary diffractive optical element", *Appl. Opt.* **38** (11), 2171-2176 (1999).
15. M. Duparré, *et al.*, "Investigation of computer-generated diffractive beam shapers for flattening of single-modal CO2 laser beams", *Appl. Opt.* **34** (14), 2489-2497 (1995).
16. T.H. Bett, *et al.*, "Binary phase zone-plate arrays for laser-beam spatial-intensity distribution conversion", *Appl. Opt.* **34** (20), 4025-4029 (1995).

17. J. Bengtsson, "Kinoform-only Gaussian-to-rectangle beam shaper for a semiconductor laser", *Appl. Opt.* **35** (20), 3807-3814 (1996).
18. J.A. Hoffnagle et C.M. Jefferson, "Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to flattop beam", *Appl. Opt.* **39** (30), 5488-5499 (2000).
19. R.K. Tyson, "Principles of adaptive optics", Academic Press, New York, 345 p. (1998).
20. D.M. Pepper, C.J. Gaeta et P.V. Mitchell, "Real-time holography, innovative adaptive optics, and compensated optical processors using spatial light modulators", in *Spatial light modulator technology: materials, devices, and applications*, édité par U. Efron, Marcel Dekker, Inc., 585-654 (1995).
21. A.D. Fisher et C. Warde, "Simple closed-loop system for real-time optical phase measurement", *Opt. Lett.* **4** (5), 131-133 (1979).
22. A.D. Fisher et C. Warde, "Technique for real-time high-resolution adaptive phase compensation", *Opt. Lett.* **8** (7), 353-356 (1983).
23. M.A. Vorontsov, "High-resolution adaptive phase distortion compensation using a diffractive-feedback system : experimental results", *J. Opt. Soc. Am. A* **16** (10), 2567-2573 (1999).
24. T. Shirai, T.H. Barnes et T.G. Haskell, "Real-time restoration of a blurred image with a liquid-crystal adaptive-optics system based on all-optical feedback interferometry", *Opt. Commun.* **188**, 275-282 (2001).
25. T. Shirai, T.H. Barnes et T.G. Haskell, "Surface-profile measurement by means of a polarization Sagnac interferometer with parallel optical feedback", *Opt. Lett.* **24** (5), 297-299 (1999).
26. G.L. Rogers, "Noncoherent optical processing", S.B. Stanley éd., Wiley, New York, 169 p. (1977).
27. V. Laude, "Corrélation optique optimale et application aux architectures cohérentes et incohérentes", Thèse, Paris XI Orsay (1994).
28. M. Gedziorowski et J. Garcia, "Programmable opticaldigital processor for rank order and morphological filtering", *Opt. Commun.* **119**, 207-217 (1995).
29. M. Coster et J.-L. Chermant, "Précis d'analyse d'images", Presses du CNRS, Paris, 560 p. (1989).
30. R.N. Wilson, F. Franza et L. Noethe, *J. Mod. Opt.* **34** (4), (1987).
31. K.A. Bauchert et S.A. Serati, "High-speed multi-level 512x512 spatial light modulator", in *Optical Pattern Recognition XI*, Orlando, édité par D.P. Casasent & T.-H. Chao, SPIE **4043**, 59-65 (2000).
32. P. Ambs et L. Bigué, "Characterization of an analog ferroelectric spatial light modulator. Application to dynamic diffractive optical elements and optical information processing", in *Optics for Information Systems, 4th Euro-American workshop on*

- optoelectronic Information Processing*, Valencia, édité par B. Javidi, P. Réfrégier, C. Ferreira & S. Vallmitjana, SPIE Critical Review **CR81**, 365-393 (2001).
33. O. Ruch, "Reconnaissance des formes par contour actif statistique - application à l'imagerie optronique active", Thèse, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III (2001).
 34. M.-P. Dubuisson Jolly, S. Lakshmanan et A.K. Jain, "Vehicle segmentation and classification using deformable templates", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **18** (3), 293-308 (1996).
 35. O. Ruch et P. Réfrégier, "Comparison of Hausdorff distances performance in dissimilarity measurements for silhouette discrimination", in *Automatic Target Recognition XI*, Orlando, édité par F.A. Sadjadi, SPIE **4379**, 454-465 (2001).
 36. A. Matwyschuk, P. Ambs et F. Christnacher, "Improvement of the optical target tracking using a snake-based segmentation", in *IOG 2002*, Mannheim, Germany, édité par K.-H. Brenner & P. Ambs, EOS, 75-78 (2002).
 37. V. Laude, P. Chavel et P. Réfrégier, "Implementation of arbitrary real-valued correlation filters for the shadow-casting incoherent correlator", *Appl. Opt.* **35** (26), 5267-5274 (1996).
 38. B.V.K. Vijaya Kumar, C. Hendrix et D.W. Carlson, "Tradeoffs in the design of correlation filters", in *Optical Pattern Recognition*, édité par J.L. Horner & B. Javidi, SPIE Optical Engineering Press **CR 40**, 191-215 (1992).

Conclusion

Alors que depuis bientôt 40 ans, les corrélateurs optiques, utilisés dans le domaine de la reconnaissance des formes, servent à localiser dans une scène un objet de forme *a priori* connue, cette thèse présente un processeur optoélectronique novateur effectuant l'opération inverse : à partir de la localisation d'un objet, il le segmente pour obtenir sa forme. Ce processeur optique est, à notre connaissance, le premier capable de réaliser une opération de segmentation par contour actif, ce qui élargit le domaine d'application des processeurs optiques.

En outre, cette nouvelle fonction des processeurs optiques est bien plus souple que les classiques détections de position qui nécessitent de nombreuses connaissances *a priori*. De surcroît, le snake SIRS optoélectronique est peu sensible aux bruits contenus dans l'image à traiter, aux perturbations telles que des poussières, à l'état de surface des éléments optiques et au centrage de ces éléments sur l'axe optique. C'est pourquoi notre processeur pourrait être attractif pour des systèmes embarqués ou des applications industrielles utilisant déjà des corrélateurs optiques.

Cette thèse porte sur des sujets en perpétuelle évolution qui bénéficient d'une littérature récente et abondante (cf. Bibliographie). Pendant ces trois années, nous avons notamment pu apprécier la naissance d'un nouvel algorithme permettant d'opérer des segmentations par contour actif en quelques centaines de millisecondes [1], et de nouveaux SLM ferroélectriques pouvant fonctionner en amplitude pure sur 8 bits [2] alors qu'ils avaient l'inconvénient, au début de ma thèse, de n'être que binaires.

Alors que les corrélateurs multicanaux traditionnels en lumière cohérente sont limités en résolution, et particulièrement le JTC cohérent, nous avons montré qu'il est possible de traiter des images de grande résolution avec un corrélateur ombroscopique. Il faut disposer d'un bon contraste dans le premier plan et éloigner les plans à corrélérer, tout en étant conscient qu'un flou affecte alors la scène, à cause des effets de la diffraction élevée. Nous avons aussi justifié le choix d'une architecture incohérente grâce à l'ajout de canaux. En outre, nous pensons avoir réalisé le premier calculateur optique analogique parallèle avec une architecture incohérente.

Le faisceau de lumière délivré par notre source de lumière incohérente est de profil gaussien, ce qui défavorise sensiblement les informations contenues sur les bords des SLM. Par conséquent, nous avons dû élaborer une uniformisation spatiale du faisceau éclairant le plan où sont affichées les différentes images. Le faisceau lumineux incident du SLM affichant les multiples canaux est imagé sur une caméra. Sa mesure effectuée et analysée, nous adaptons en conséquence la transmission du SLM via une boucle d'asservissement originale. Grâce à cette correction par modulation de polarisation, nous avons réussi à uniformiser le profil du faisceau, nous permettant ainsi de profiter davantage de l'espace utile. Dans ces conditions, nous avons pu réaliser un corrélateur ombroscopique multicanal comprenant 4 voies qui sont traitées en parallèle. Cette amélioration permet d'accélérer sensiblement les performances des segmentations opérées jusque là. De plus, nous prévoyons l'utilisation d'un SLM rapide de technologie différente qui permettra d'opérer des segmentations à 5 Hz.

Si on cumule toutes les opérations nécessaires pour obtenir le calcul du critère à minimiser, l'optique peut s'avérer compétitive face aux solutions numériques. En outre, le processeur optique proposé ici présentera encore plus d'intérêt lorsque des pré-traitements optiques temps réel (point fort de l'optique) lui auront été associés.

Dans la configuration multicanal actuelle, nous sommes en mesure de réaliser 4 corrélations simultanément, ce qui permet d'opérer 50 corrélations par seconde (cf. section 5.8). Un PC performant donne des résultats légèrement plus rapides. Cependant, le SLM ferroélectrique va nous permettre d'opérer 500 corrélations par seconde, voire 2000 en multicanal. L'optique est donc une solution qui reste encore aujourd'hui attractive en termes de rapidité de calcul. En revanche, la précision est affectée par le bruit inhérent aux systèmes optiques. Pour trancher entre une mise en œuvre optique ou numérique, il faut être conscient des limitations de chaque technologie.

En l'état actuel, notre laser défectueux ne nous laisse pas envisager techniquement un processeur plus rapide. Si nous disposions d'une source lumineuse stable, des temps de segmentation de l'ordre de la centaine de millisecondes seraient alors envisageables, comparables à ceux des architectures tout électroniques pour lesquelles le snake a été plus particulièrement optimisé.

Perspectives

Ce travail préliminaire montre la faisabilité d'un processeur optique capable de segmenter une image par contour actif. Il met aussi en valeur une nouvelle utilisation possible de tels processeurs, généralement cantonnés à des corrélations pures et simples. Les résultats prometteurs obtenus nous laissent espérer une solution temps réel grâce à un SLM ferroélectrique haute cadence à niveaux de gris, une architecture multicanal et une source lumineuse mieux adaptée.

Nous envisageons de modifier l'architecture et de passer en lumière blanche pour pouvoir exploiter les différentes longueurs d'onde afin de multiplexer les opérations optiques [3] [4]. En effet, l'optique a la capacité de pouvoir traiter simultanément l'information contenue dans plusieurs longueurs d'ondes. En lumière blanche, chaque longueur d'onde véhicule une information dans un canal indépendant, ce qui permettrait de réaliser un processeur multicanal-multi-longueurs-d'ondes. La manière la plus simple d'exploiter les multiples longueurs d'ondes serait d'utiliser une caméra couleur (RGB) et de moyenniser le résultat des corrélations sur les 3 canaux de couleur, ce qui améliorerait certainement la qualité des segmentations. Le principe de base date du Kodacolor des années 30 [5] et fait simplement appel à l'optique géométrique où des filtres de couleur servent à séparer différents canaux. En plaçant des filtres de couleur dans des canaux contigus, les problèmes de recouvrements inter-canaux par diffraction seraient probablement réduits. Une autre possibilité serait d'ajouter des scènes à la configuration multicanal présentée au dernier chapitre, en leur adjoignant un filtre de couleur par canal scène. On obtiendrait alors un corrélateur avec 4 canaux multiplexés en 3 canaux de longueurs d'ondes différentes (RGB), donc 12 canaux au total.

Cependant, toutes ces perspectives amélioreraient la qualité des segmentations alors que nous avons insisté sur le fait que le passage en lumière blanche la dégraderait à cause de la dispersion. Néanmoins, nous avons de bonnes raisons d'espérer en ces possibilités grâce aux améliorations récentes apportées à des corrélateurs en lumière blanche dans lesquels la dispersion est compensée [6].

Un processeur optoélectronique opérant des segmentations en lumière blanche serait aussi l'occasion de traiter des images de couleur qui contiennent des informations facilitant la segmentation [7]. Il existe d'ailleurs des contours actifs adaptés aux images en couleur [8].

Depuis que le laboratoire a caractérisé le nouveau modulateur ferroélectrique, il serait maintenant possible d'effectuer un snake en lumière cohérente. Avec un modulateur en amplitude pure, le plan de corrélation contiendrait des valeurs exactes puisqu'il n'y a pas de déphasage en entrée. Comme nous n'avons qu'un seul modulateur de ce type, nous serions dans l'obligation d'utiliser un montage JTC. Or le produit espace-bande d'un tel montage limiterait les dimensions des images à 170x512 pixels. De plus, nous serions alors soumis au bruit cohérent et le faisceau serait plus difficilement corrigé avec la méthode présentée ici. Cependant, l'algorithme du snake SIRS s'est révélé robuste lors de segmentations d'objets en présence de tavelure [9] et il se pourrait donc que le snake optoélectronique hérite de cette robustesse comme il en a hérité dans le cas de l'image bruitée du chapitre 4.

La correction de faisceau lumineux est un problème qui a été soulevé durant cette thèse, mais qui est éloigné de notre sujet. Les premiers résultats sont concluants, malgré la faible efficacité lumineuse. Au-delà de la correction de faisceau en boucle fermée, l'asservissement par modulation de polarisation pourrait se transposer dans d'autres domaines (en imagerie polarimétrique par exemple), se conjuguer avec d'autres applications (calcul et reconstruction de fronts d'onde) et évoluer pour fonctionner en tenant compte d'une modulation de phase

plutôt que d'amplitude. L'approfondissement futur de cette partie de notre travail est envisagé, d'autant plus que le laboratoire MIPS-FOTI est spécialisé dans la reconstruction d'onde lumineuse et leur mise en œuvre optique.

On pourrait aussi imaginer effectuer des segmentations optiques tridimensionnelles où plusieurs snakes SIRS seraient opérés sur différentes tranches de l'objet (fig. C.1). Chacune des tranches serait alors affichée dans un canal différent.

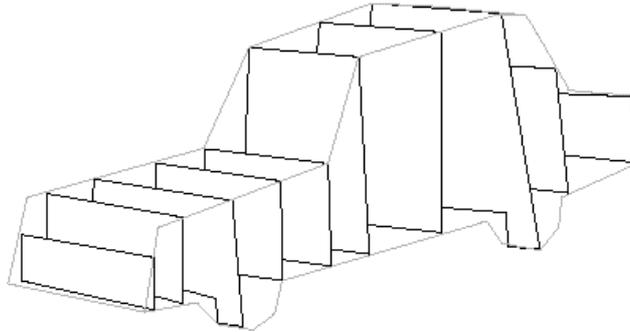


Figure C.1 : Snakes associés dans l'espace pour segmenter un objet en 3D.

Nous avons aussi envisagé l'application de notre snake optoélectronique à des corrélateurs optiques déjà opérationnels. Une fois le fond supprimé, ceci permettrait d'améliorer les corrélations, la détection et la reconnaissance des formes. Enfin, nous avons aussi évoqué la possibilité de poursuivre des contours de cibles, lorsque notre processeur sera suffisamment rapide.

Références Bibliographiques

1. C. Chesnaud, P. Réfrégier et V. Boulet, "Statistical region snake-based segmentation adapted to different physical noise models", *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **21** (11), 1145-1157 (1999).
2. K.A. Bauchert et S.A. Serati, "High-speed multi-level 512x512 spatial light modulator", in *Optical Pattern Recognition XI*, Orlando, édité par D.P. Casasent & T.-H. Chao, *SPIE* **4043**, 59-65 (2000).
3. J. Bescos et T.C. Strand, "Optical pseudocolor encoding of spatial frequency information", *Appl. Opt.* **17** (16), 2524-2531 (1978).
4. L.M. Zerbino et J.P. Goedgebuer, "2-D wavelength multiplex correlator", *Opt. Commun.* **55** (4), 248-252 (1985).
5. G.L. Rogers, "Noncoherent optical processing", S.B. Stanley éd., Wiley, New York, 169 p. (1977).

6. P. Andrés, *et al.*, "All-incoherent dispersion-compensated optical correlator", *Opt. Lett.* **24** (19), 1331-1333 (1999).
7. A. Li et P. Lennie, "Importance of color in the segmentation of variegated surfaces", *J. Opt. Soc. Am. A* **18** (6), 1240-1251 (2001).
8. G. Sapiro, "Color snakes", *CVGIP: Image Understanding* **68** (2), 247-253 (1997).
9. P. Réfrégier, O. Germain et T. Gaidon, "Optimal snake segmentation of target and background with independent Gamma density probabilities, application to speckled and preprocessed images", *Opt. Commun.* **137**, 382-388 (1997).

Annexe

Calcul de l'Angle Solide

L'angle solide que nous désirons calculer est inscrit dans un cône qui a pour sommet un point dans le plan du premier écran LCD et pour base les limites rectangulaires du second écran LCD. Il correspond [1] à la surface d'intersection entre le cône d'éclairage de la surface rectangulaire et la surface de la sphère centrée au point "source" considéré dans le premier écran. En réalité, le cône qui coupe la surface de la sphère est une pyramide dont la base est la surface rectangulaire du second écran LCD et dont les quatre faces correspondent aux plans passant par les quatre bords du rectangle et le centre de la sphère.

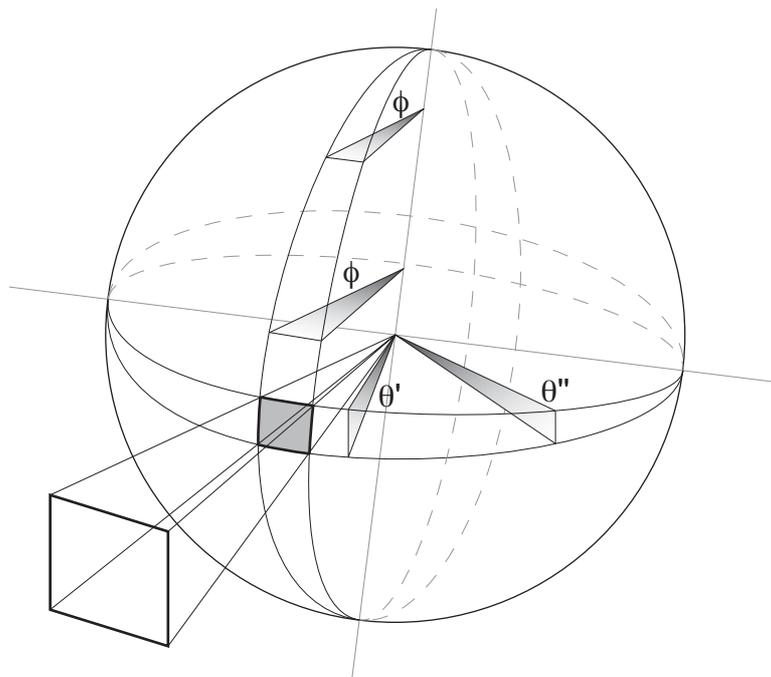


Figure A.1 : Angle solide, Ω , matérialisé par la surface grisée correspondant à l'intersection entre le cône d'éclairage de la surface rectangulaire et la surface de la sphère de rayon unitaire centrée au point considéré.

Le point courant, M , qui se déplace à la surface de la sphère, a pour coordonnées :

$$\mathbf{M} \begin{cases} x = r \cdot \sin \theta \cdot \cos \phi \\ y = r \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi \\ z = r \cdot \cos \theta \end{cases}$$

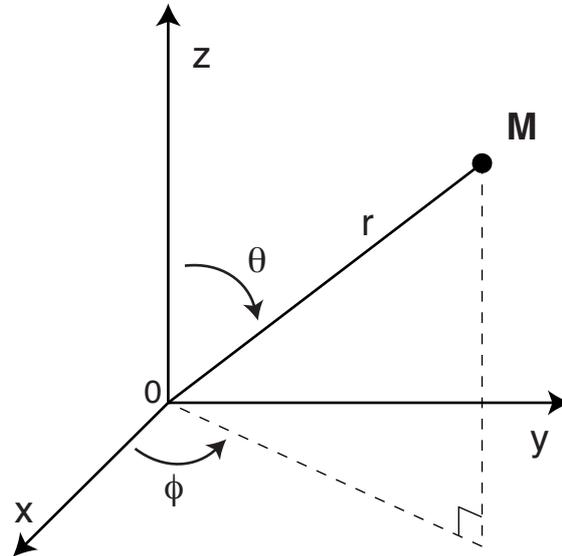


Figure A.2 : Coordonnées cartésiennes et sphériques du point courant M .

Avec les coordonnées de ce point, la surface "grisée" dans la figure (A.1) s'exprime en géométrie différentielle comme suit [2] :

$$S = \iint_{\mathbf{D}} \mathbf{H}(\theta, \phi) \, d\theta d\phi$$

où \mathbf{D} est le domaine sur lequel on intègre \mathbf{H} qui correspond :

$$\mathbf{H}^2 = \mathbf{A}^2 + \mathbf{B}^2 + \mathbf{C}^2$$

avec les \mathbf{A} , \mathbf{B} et \mathbf{C} suivants :

$$\mathbf{A} = \text{dét} \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial \phi} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial \phi} \end{pmatrix} = \text{dét} \begin{pmatrix} \cos \theta \cdot \sin \phi & \sin \theta \cdot \cos \phi \\ -\sin \theta & 0 \end{pmatrix} = \sin^2 \theta \cdot \cos \phi$$

$$\mathbf{B} = \text{dét} \begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial \theta} & \frac{\partial z}{\partial \phi} \\ \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial \phi} \end{pmatrix} = \text{dét} \begin{pmatrix} -\sin \theta & 0 \\ \cos \theta \cdot \cos \phi & -\sin \theta \cdot \sin \phi \end{pmatrix} = \sin^2 \theta \cdot \sin \phi$$

$$\mathbf{C} = \text{dét} \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta} & \frac{\partial x}{\partial \phi} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta} & \frac{\partial y}{\partial \phi} \end{pmatrix} = \text{dét} \begin{pmatrix} \cos \theta \cdot \cos \phi & -\sin \theta \cdot \sin \phi \\ \cos \theta \cdot \sin \phi & \sin \theta \cdot \cos \phi \end{pmatrix} = \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos^2 \phi + \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \sin^2 \phi$$

$$= \cos \theta \cdot \sin \theta$$

Si l'on récapitule :

$$\mathbf{H}^2 = \mathbf{A}^2 + \mathbf{B}^2 + \mathbf{C}^2 = \sin^4 \theta \cdot \cos^2 \phi + \sin^4 \theta \cdot \sin^2 \phi + \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta = \sin^2 \theta$$

et l'intégrale de surface sur le domaine \mathbf{D} vaut donc :

$$S = \iint_{\mathbf{D}} \mathbf{H}(\theta, \phi) \, d\theta d\phi = \iint_{\mathbf{D}} \sin \theta \, d\theta d\phi$$

Le domaine \mathbf{D} est défini comme suit :

$$\mathbf{D} \begin{cases} \phi_1 \leq \phi \leq \phi_2 \\ \theta_1(\phi) \leq \theta \leq \theta_2(\phi) \end{cases}$$

Les angles peuvent être exprimés en fonction de la géométrie du problème, qui est représentée dans la figure (A.3).

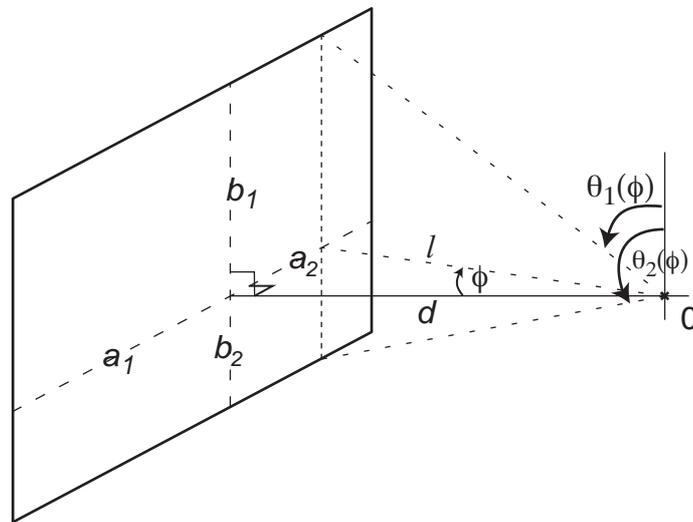


Figure A.3 : Paramètres géométriques nécessaires à l'obtention de l'angle solide.

On peut maintenant écrire : $\phi_1 = -\text{Arctg} \frac{a_1}{d}$ $\phi_2 = \text{Arctg} \frac{a_2}{d}$

et
$$\left. \begin{array}{l} \text{tg} \theta = \frac{l}{b_1} \\ \cos \phi = \frac{d}{l} \end{array} \right\} \theta = \text{Arctg} \frac{d}{b_1 \cos \phi}$$

D'après sa définition [1], l'angle solide est égal à la portion de surface de la sphère divisée par le rayon au carré de celle-ci. Or notre sphère est de rayon unitaire, ce qui revient à écrire l'angle solide, Ω , de la manière suivante :

$$\Omega = \int_{-\text{Arctg} \frac{a_1}{d}}^{+\text{Arctg} \frac{a_2}{d}} \left(\int_{\text{Arctg} \frac{d}{b_1 \cos \phi}}^{\pi - \text{Arctg} \frac{d}{b_2 \cos \phi}} \sin \theta \, d\theta \right) d\phi$$

$$\Omega = \int_{-\text{Arctg} \frac{a_1}{d}}^{\text{Arctg} \frac{a_2}{d}} \left[\cos \left(\text{Arctg} \frac{d}{b_1 \cos \phi} \right) - \cos \left(\pi - \text{Arctg} \frac{d}{b_2 \cos \phi} \right) \right] d\phi$$

comme $\cos(\text{Arctg } t) = \frac{1}{\sqrt{1+t^2}}$

alors

$$\Omega = \int_{-\text{Arctg} \frac{a_1}{d}}^{\text{Arctg} \frac{a_2}{d}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d^2}{b_1^2 \cos^2 \phi}}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d^2}{b_2^2 \cos^2 \phi}}} \right) d\phi$$

$$\Omega = \int_{-\text{Arctg} \frac{a_1}{d}}^{\text{Arctg} \frac{a_2}{d}} \left(\frac{b_1 \cos \phi}{\sqrt{b_1^2 \cos^2 \phi + d^2}} + \frac{b_2 \cos \phi}{\sqrt{b_2^2 \cos^2 \phi + d^2}} \right) d\phi$$

A ce niveau du développement, nous devons préciser le passage à l'étape suivante en calculant le premier membre de l'intégrale précédente :

$$\int \frac{b \cdot \cos \phi}{\sqrt{b^2 \cos^2 \phi + d^2}} d\phi = \int \frac{b}{\sqrt{b^2(1 - \sin^2 \phi) + d^2}} d(\sin \phi) = \int \frac{b}{\sqrt{b^2 + d^2 - b^2 \sin^2 \phi}} d(\sin \phi)$$

en effectuant le changement de variable suivant : $t = \sin \phi$

on obtient :

$$\int \frac{b \cdot dt}{\sqrt{b^2 + d^2 - b^2 t^2}} = \int \frac{b \cdot dt}{\sqrt{b^2 + d^2} \sqrt{1 - \frac{b^2}{b^2 + d^2} t^2}} = \text{Arcsin} \frac{b}{\sqrt{b^2 + d^2}} t$$

ce qui nous donne pour le premier membre :

$$\int \frac{b \cdot \cos \phi}{\sqrt{b^2 \cdot \cos^2 \phi + d^2}} d\phi = \operatorname{Arctg} \frac{b}{\sqrt{b^2 + d^2}} \sin \phi$$

En intégrant ce résultat dans le calcul de l'angle solide on peut passer à l'étape suivante :

$$\Omega = \left[\operatorname{Arctg} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \sin \phi + \operatorname{Arctg} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \sin \phi \right]_{-\operatorname{Arctg} \frac{a_1}{d}}^{\operatorname{Arctg} \frac{a_2}{d}}$$

comme $\sin(\operatorname{Arctg} t) = \frac{t}{\sqrt{1+t^2}}$

alors l'angle solide vaut :

$$\begin{aligned} \Omega = & \operatorname{Arctg} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \frac{\frac{a_2}{d}}{\sqrt{1 + \frac{a_2^2}{d^2}}} + \operatorname{Arctg} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \frac{\frac{a_1}{d}}{\sqrt{1 + \frac{a_1^2}{d^2}}} \\ & + \operatorname{Arctg} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \frac{\frac{a_2}{d}}{\sqrt{1 + \frac{a_2^2}{d^2}}} + \operatorname{Arctg} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \frac{\frac{a_1}{d}}{\sqrt{1 + \frac{a_1^2}{d^2}}} \end{aligned}$$

ou plus simplement :

$$\begin{aligned} \Omega = & \operatorname{Arctg} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + d^2}} + \operatorname{Arctg} \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 + d^2}} \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + d^2}} \\ & + \operatorname{Arctg} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + d^2}} + \operatorname{Arctg} \frac{b_2}{\sqrt{b_2^2 + d^2}} \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + d^2}} \end{aligned}$$

Cette équation contient quatre membres correspondant aux quatre parties de la surface grisée de la figure (A.1) séparée par la droite horizontale ($a_1 + a_2$) et la droite verticale ($b_1 + b_2$) (cf. fig. A.3).

Références Bibliographiques

- 1 A. Ryer, "Light Measurement Handbook", International Light Inc., 29 (1998).
- 2 G. Valiron, "Théorie des fonctions", Masson, Paris, 294-295 (1948).

PERSONNES HABILITEES A DIRIGER LES RECHERCHES
Au 1er JANVIER 2003

NOMS, PRENOMS	Section CNU	INTITULE	UFR
ADOLPHE Dominique	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
DREAN Jean Yves	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
DUPUIS Dominique	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
RENNER Marc	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
VIALLIER-RAYNARD Pierre	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ENSITM
AMBS Pierre	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
AUBRY Evelyne	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	ESSAIM
BINDER Gérard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
GISSINGER Gérard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
HASSENFORDE Michel	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
METZGER Gérard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal (Emérite 1/9/02)	ESSAIM
SCHMITT François-Marie	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
THIRION Bernard	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	ESSAIM
BOLMONT Dominique	28	Milieux denses et matériaux	FST
BORDEMANN Martin	25	Mathématiques	FST
BRILLARD Alain	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques	FST
BRIGHI Bernard	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques	FST
BRILHAC J.François	62	Energétique, génie des procédés	FST
BROGLY Maurice	33	Chimie des matériaux	FST
CHEZEAU Jean-Michel	31	Chimie theorique, physique, analytique	FST
DELFOSSÉ Lucien	62	Energétique , génie des procédés	FST
DURAND Bernard	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil	FST
EHRBURGER Pierre	62	Energétique , génie des procédés	FST
GABELICA Zelimir	32	Chimie organique, minérale, industrielle	FST
GEWINNER Gérard	28	Milieux denses et matériaux	FST
GILOT Patrick	62	Energétique, génie des procédés	FST
GOZE Michel	25	Mathématiques	FST
GRESSER Julien	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	FST
GUTH Jean-Louis	33	Chimie des matériaux	FST
HANGAN Théodore	25	Mathématiques (EMERITE 1/9/2002)	FST
KALT André	35	Structure et évolution de la Terre et des autres planètes	FST
KHAKIMDJANOV You	25	Mathématiques	FST
KUBLER Lucien	28	Milieux denses et matériaux	FST
LAVILLE-SAINT-MARTIN Bernard	30	Milieux dilués et optique	FST
LE DRED Ronan	35	Structure et évolution de la Terre et des autres planètes	FST
LOEGEL Bernard	28	Milieux denses et matériaux	FST
LUTZ Robert	25	Mathématiques	FST
PIRRI Carmelo	28	Milieux denses et matériaux	FST
ROTH Jean-Pierre	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques	FST
MUCKENSTURM Bernard	32	Chimie organique, minérale, industrielle (EMERITE 01/9/02)	FST
SARI Tewfi	25	Mathématiques	FST
SCHULTZ Jacques	33	Chimie des matériaux	FST
SPEHNER Jean-Claude	27	Informatique	FST
STAUFFER Louise	28	Milieux denses et matériaux	FST
URBAN Jean-Philippe	61	Génie informatique, automatique Traitement signal	FST
WENDLING Serge	27	Informatique	FST
WETZEL Patrick	28	Milieux denses et matériaux	FST
ACCARY Armand	62	Energétique, Génie des procédés	ENSCMu
CAULLET Philippe	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
DONNET Jean-Baptiste	33	Chimie des matériaux (EMERITE 1/09/2002)	ENSCMu
DUMAS Philippe	33	Chimie des matériaux	ENSCMu
EUSTACHE Jacques	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
FLEURY Jean-Pierre	32	Chimie organique, minérale, industrielle (EMERITE 1/09/2002)	ENSCMu
FOUASSIER Jean-Pierre	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
GOSPODINOVA Natalia	33	Chimie des matériaux	ENSCMu
JACQUES Patrice	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
LE DRIAN Claude	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
LOUATI Alain	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
NEUNLIST Serge	32	Chimie organique, minérale, industrielle	ENSCMu
PENIGAUULT Edouard	31	Chimie, théorique, physique, analytique	ENSCMu
STREITH Jacques	32	Chimie organique, minérale, industrielle (EMERITE 1.9.2002)	ENSCMu
RIESS Gérard	33	Chimie des matériaux (EMERITE 1.9.2001)	ENSCMu
WALTER Serge	31	Chimie théorique, physique, analytique	ENSCMu

NOMS, PRENOMS	Section CNU	INTITULE	UFR
BLAES Rainer	29	Constituants élémentaires	IUTC
BROGLY Sophie	33	Chimie des Matériaux	IUTM
CHARLES François	29	Constituants élémentaires	IUTM
FABRE Bernard	62	Energétique, génie des procédés	IUTC
JACQUEY Serge	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	IUTM
LIENHARD Claude	1	Droit Privé et Sciences Criminelles	IUTC
MERCKLE Jean	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	IUTM
MEYER Jean-Marie	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	IUTM
SCHULTZ Guy	63	Electronique, optronique et systèmes	IUTM
TUILIER Marie Hélène	28	Milieux denses et matériaux	IUTM
WALTER Bernard	65	Biologie Cellulaire	IUP BIOL

1.2 Professeurs d'Université LETTRES - DROIT

BLOCH Peter	12	Langues et littératures germaniques et scandinaves	FLSH
COUDRY Marianne	21	Histoire et civilisations : mondes anciens et mondes médiévaux de l'art.	FLSH
DE POLI Luigi	14	Langues et littératures romanes : italien (Habileté)	FSES
FAURE Michel	11	Langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes	FLSH
FLUCK Pierre	72	Epistémologie, histoire des Sc.et Techniques	FLSH
FREYBURGER M.Laure	8	Langues et littératures anciennes	FLSH
HOANG Patrice	1	Droit Privé et Sciences Criminelles	FSES
HUDLETT Albert	12	Langues et littératures germaniques et Scandinaves	FLSH
KAMMERER Odile	21	Histoire et civilisations : mondes anciens et mondes médiévaux de l'art.	FLSH
KELLER André	5	Sciences Economiques	FSES
LYSOE Eric	10	Littératures comparées	FLSH
MOSSER François	11	Langues et Littératures anglaises et anglo-saxonnes - EMERITE 1/9/2001	FLSH
REMORQUET Jack	70	Sciences de l'Education	IUPC
ROUSVOAL Jacques	70	Sciences de l'Education (Habileté)	CUFEF
SALMON Gilbert	9	Langues et littératures françaises	FLSH
SCHMITT Evelyne	12	Langues et littératures germaniques et Scandinaves	FSES
SCHNYDER Peter	9	Langues et littératures françaises	FLSH

1.3 Assimilés Professeurs d'Université

BRENDLE Marcel		Tribologie	CNRS
NARDIN Michel		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
REITER Gunter		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
VIDAL Alain		Systèmes moléculaires complexes	CNRS

DECKER Christian		Systèmes moléculaires complexes	ENSCMu
LOUGNOT Daniel Joseph		Molécules,structures et interactions	ENSCMu
PATARIN Joël		Chimie minérale	ENSCMu

1.4 Maîtres Conférences (Docteurs d'Etat ou habilités)

APERY François	25	Mathématiques (Habileté)	FST
BIGUE-BUENO Marie-Ange	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil (Habileté)	ENSITM
BISCHOFF Jean-Luc	28	Milieux denses et matériaux (Habileté)	FST
BRENDLE Jocelyne	32	Chimie organique, minérale, industrielle (Habileté)	FST
BURGET Dominique	31	Chimie théorique, physique, analytique (Habileté)	FST
CHEVALLIER Nicolas	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques (Habileté)	FST
HAMIEH Tayssir	33	Chimie des Matériaux (Habileté)	FST
KLEIN Robert	61	Génie informatique, automatique et traitement du signal	FST
LALLAM Abdelaziz	33	Chimie des matériaux	ENSITM
AKESBI Samir	26	Mathématiques appliquées et applications des mathématiques (Habileté)	FST
GADIOU Roger	62	Energétique, génie des procédés (Habileté)	FST
MARTZ Pierre	33	Chimie des Matériaux	FST
SCHACHER Laurence	60	Mécanique, génie mécanique, génie civil (Habileté)	ENSITM
TROUVE Gwenaëlle	62	Energétique, génie des procédés (Habileté)	FST

ANDERSON Patrick	7	Sciences du langage : linguistique et phonétique générales (Habileté)	FLSH
CONSIDERE Marie-Claire	11	Langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes (Habileté)	FSEJ
LEMAITRE Alain	22	Histoire et Civilisations : histoire des mondes modernes	FLSH
POLIZZI Gilles	9	Langues et littératures françaises (Habileté)	FLSH
SCHEUBEL Joseph	5	Sciences Economiques	FSEJ

NOMS, PRENOMS	Section CNU	INTITULE	UFR
ALEBOYEH Azam	62	Energétique, Génie des procédés	ENSCMu
ALEBOYEH Hamied	62	Energétique, Génie des procédés	ENSCMu
ALLONAS Xavier	31	Chimie théorique, physique, analytique (Habilitation)	ENSCMu
HURTREZ Guy	33	Chimie des matériaux	ENSCMu
RONDEAU Céline	32	Chimie organique, minérale, industrielle (Habilitation)	ENSCMu
ABADIE Jean-Pierre	6	Sciences de gestion	IUTC
FEUERBACH Marie-France	1	Droit privé et sciences criminelles (Habilitation)	IUTC
LEBEAU Thierry	68	Biologie des Organismes (Habilitation)	IUTC
LORENTZ Pascal	61	Génie Informatique, automatique, traitement signal (Habilitation)	IUTC
NOSAL Claude	71	Sciences de l'Information et de la communication (Habilitation)	IUTC
ECKENSCHWILLER Michèle	70	Sciences de l'Education	SERFA

1.5 Assistants et autres enseignants (Docteurs d'Etat ou habilités)

JUNG Paul	2	Droit public	IUTC
WANG Tong Kuan	33	Chimie des matériaux (Habilitation)	ENSCM

2. Chargés de Recherche, Ingénieurs d'Etudes, etc
(Docteurs d'Etat ou habilités)

2.1 C.N.R.S

BALARD Henri		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
H AidAR Bassel		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
HAIDARA Hamidou		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
JADA Amane		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
VALLAT Marie France		Systèmes moléculaires complexes	CNRS
VIX Cathie		Elements de transition, interfaces et catalyse	CNRS

2.2 ENSCMu

BARON Jacques		Sciences Terre et Synthèse minérale ; Chimie Anal.	ENSCMu
BISSERET Philippe		Chimie organique	ENSCMu
DEFOIN Albert		Chimie organique	ENSCMu
MORLET-SAVARY Christiane		Chimie physique (Habilitation)	ENSCMu
SOULARD Michel		Elements de transition, Interface et Catalyse	ENSCMu
TSCHAMBER Théophile		Chimie organique	ENSCMu