

THESE

présentée

pour obtenir le Titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

SPECIALITE : INFORMATIQUE

par

M. Vincent **RODIN**

STEREOVISION AXIALE: CALIBRAGE, APPARIEMENT et RECONSTRUCTION TRIDIMENSIONNELLE

APPLICATION EN CÉLIOCHIRURGIE

Soutenue publiquement le **8 Octobre 1993**, devant le Jury composé de :

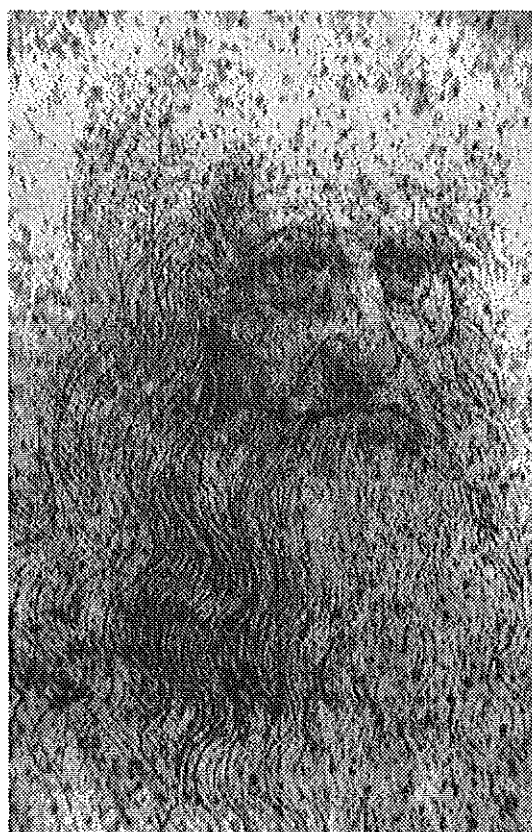
M.	Serge CASTAN	Président
MM.	Maurice BRIOT	Rapporteurs
	Robert MASSEN	
	Alain AYACHE	Membres
	Nicolas BERRENI	
	James L. CROWLEY	
	Jean Thierry LAPRESTE	

A ceux que j'aime et qui m'ont soutenu lors de la réalisation de ce travail,

A la mémoire de mes grand-parents,

A Louis Nolin, agrégé de philosophie et professeur d'informatique de l'université Paris 7, pour ses cours passionnants sur l'architecture des ordinateurs,

A Léonard de Vinci pour son génie universel.



Léonard de Vinci.
Autoportrait.

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur Serge **CASTAN**, Professeur à l'université Paul Sabatier de Toulouse, Directeur du laboratoire de Traitement d'Images et de Vision par Ordinateur de l'IRIT, qui me fait l'honneur de présider ce jury.

Je remercie sincèrement Messieurs Maurice **BRIOT**, Professeur à l'université Paul Sabatier de Toulouse, et Robert **MASSEN**, Professeur à l'université de Konstanz (Allemagne) et Directeur du Steinbeis Transferzentrum Konstanz Bilddatenverarbeitung, de m'avoir fait l'honneur d'être membres de mon jury et d'avoir accepté d'examiner ce travail en tant que rapporteurs.

Je remercie également Messieurs James L. **CROWLEY**, Professeur à L'Institut National Polytechnique de Grenoble et Jean Thierry **LAPRESTE**, Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure de Chimie de Clermont-Ferrand de m'avoir fait l'honneur d'être membres de mon jury.

Je remercie aussi le Docteur Nicolas **BERRENI**, Gynécologue-Obstétricien, pour sa collaboration et l'honneur qu'il me fait d'être membre de mon jury.

Je voudrais remercier Monsieur Alain **AYACHE**, Professeur à L'Institut National Polytechnique de Toulouse de m'avoir proposé un sujet de recherche et pour l'intérêt tout particulier qu'il a porté à mon travail.

Je tiens vivement à remercier Monsieur Bernard **THIESSE**, Maître de conférences à L'Institut National Polytechnique de Toulouse, pour son aide et ses remarques judicieuses lors du calibrage du zoom.

Je voudrais remercier Monsieur Philippe **MARTHON**, Maître de conférences à L'Institut National Polytechnique de Toulouse, pour nos discussions sur des sujets aussi variés que la Vision par Ordinateur, l'Histoire, les Mathématiques, la Philosophie, ...

Je remercie également tous les membres du Laboratoire de "Vision par Calculateur **André BRUEL**" pour l'ambiance très agréable qui y règne et qui permet des discussions toujours fructueuses.

TABLE DES MATIERES

Liste des Figures	xiii
Liste des Equations	xvii
PARTIE .- INTRODUCTION	1
PARTIE I.- PRESENTATION DE LA STEREOVISION AXIALE	5
CHAPITRE 1.- Présentation du modèle géométrique de la stéréovision axiale	7
1.- Introduction	9
2.- Rappels sur le modèle géométrique d'un système de stéréovision tridimensionnelle passive	9
3.- Modèle géométrique d'un système de stéréovision axiale	10
4.- Equations de triangulation dans un système de stéréovision axiale	11
5.- Systèmes axiaux particuliers	13
5.1.- Modèle à "déplacement de caméra"	14
5.2.- Modèle à "plan image fixe"	14
6.- Espace de recherche lors de la mise en correspondance	15
6.1.- Quelques définitions valables dans les systèmes de stéréovision binoculaires	16
6.1.1.- Plan épipolaire	16
6.1.2.- Droite épipolaire	16
6.1.3.- Epipôle	17
6.2.- Zone de recherche	17
6.3.- Les points principaux O_1 et O_2 se correspondent	17
7.- Etude bibliographique	18
7.1.- "Motion stereo using ego-motion logarithmic mapping". R. Jain, S.L. Barlett et N. O'Brien	18
7.2.- "Camera geometries for image matching in 3-D machine vision". N. Alvertos, D. Brzakovic et R.C. Gonzalez	19
7.3.- "Using camera motion to estimate range for robotic parts manipulation" D. Vernon et M. Tistarelli	19
7.4.- "Etude de la stéréovision axiale. Modélisation mathématique et résolution algorithmique" C. Carmona	19
7.5.- "Quantization errors in axial motion stereo on rectangular-tessellated image sensor" T.C. Nguyen et T.S. Huang	20
7.6.- "Parallel Depth Recovery by Changing Camera Parameters" M. Subbarao	20
7.7.- "Metric aspect of zoom vision" A.G. Wiley et K.W. Wong	21

7.8.- "Depth from zooming" J. Ma et S.I. Olsen	21
7.9.- "Utilisation d'un objectif à focale variable en vision monoculaire en vue de la reconstruction 3D" J.M. Lavest, G.Rives et M. Dhome	22
8.- Conclusion	22
CHAPITRE 2.- Etude théorique des erreurs dans un système de stéréovision axiale "GENERAL"	25
1.- Introduction	27
2.- Quelques mots sur la bibliographie dans ce domaine	27
3.- Rappels et conventions	28
4.- Erreurs de triangulation dues aux erreurs de mise en correspondance	29
4.1.- Discussion de l'équation présentée	30
4.2.- Représentations graphiques	31
5.- Erreurs de triangulation dues aux erreurs de calibrage	32
5.1.- Erreur sur l'estimation du point principal	33
5.1.1.- Discussion de l'équation présentée	33
5.1.2.- Représentation graphique	34
5.2.- Erreur sur l'estimation de ΔC (distance entre les centres optiques)	34
5.2.1.- Discussion de l'équation présentée	34
5.2.2.- Représentation graphique	35
5.3.- Erreur sur l'estimation des focales	35
5.3.1.- Discussion de l'équation présentée	36
5.3.2.- Représentation graphique	36
6.- Analyse des représentations graphiques	37
7.- Conclusion	37
PARTIE II.- CALIBRAGE D'UN SYSTEME DE STEREOVISION AXIALE	41
CHAPITRE 1.- Etat de l'art et choix réalisés dans ce mémoire	43
1.- Introduction	45
2.- Rappels sur le calibrage par projection centrale et conventions	45
3.- Quelques mots de la bibliographie sur le calibrage d'un système axial	47
3.1.- Les points de fuite	47
3.2.- Détermination du point principal	48
4.- Analyse des méthodes actuelles de calibrage d'un système axial	49
4.1.- Cas d'une caméra en mouvement sur un rail ou au bout du bras d'un robot	50
4.2.- Cas d'une caméra munie d'un zoom	50
4.3.- Conséquences de l'utilisation d'un système physiquement non axial.	50

5.- Conclusion et choix réalisés dans ce mémoire	51
CHAPITRE 2.- Calibrage d'une caméra munie d'un zoom ou se déplaçant sur un rail	53
1.- Introduction	55
2.- Description du processus de calibrage	55
2.1.- Acquisition des images	55
2.2.- Détection du centre des disques	55
2.3.- Estimation des paramètres de calibrage	56
3.- Calibrage d'une caméra munie d'un zoom	56
3.1.- Calibrage sténopé indépendant pour chaque focale	56
3.1.1.- Expérimentations	56
3.1.2.- Résultats du calibrage par projection centrale	57
3.2.- Interprétation des résultats	58
3.3.- Présentation d'un couple d'images	59
3.4.- Conclusion sur le calibrage d'une caméra munie d'un zoom	60
4.- Calibrage d'une caméra en mouvement sur un rail	61
4.1.- Calibrage de la caméra en plusieurs positions sur le rail	61
4.2.- Interprétation des résultats	62
4.3.- Conclusion sur le calibrage d'une caméra en mouvement sur un rail	63
5.- Conclusion: un système physiquement axial n'existe généralement pas	63
CHAPITRE 3.- Rectification d'images "pseudo-axiales" afin d'obtenir des images axiales	65
1.- Introduction	67
2.- Contraintes sur les nouvelles matrices de calibrage	68
3.- Détermination des nouvelles matrices	69
3.1.- Détermination de la matrice de rotation R	69
3.1.1.- Détermination du plan $P_{M'}$	69
3.1.1.a.- Détermination d'un vecteur normal à ce plan	69
3.1.1.b.- Détermination d'un point de ce plan	70
3.1.1.c.- Expression du plan $P_{M'}$	70
3.1.2.- Calcul de la matrice de rotation R	70
3.1.2.a.- Calcul de r_{11}, r_{12}, r_{13}	71
3.1.2.b.- Calcul de r_{21}, r_{22}, r_{23}	71
3.1.2.c.- Calcul de r_{31}, r_{32}, r_{33}	72
3.2.- Choix arbitraire de py et pz	73
4.- Résultats	74
5.- Conclusion	75

CHAPITRE 4.- Premières expériences dans un système axial	77
1.- Introduction	79
2.- Etude pratique des erreurs dans un système axial	79
2.1.- Expérimentation sur le zoom	80
2.2.- Expérimentation sur la caméra en mouvement sur le rail	81
3.- Reconstruction de deux plans distants d'environ 50 cm	82
4.- Conclusion	83
PARTIE III.- MISE EN CORRESPONDANCE ET RECONSTRUCTION 3D	85
CHAPITRE 1.- Mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale	87
1.- Etat de l'art	89
2.- Rappels sur l'espace de recherche d'homologues dans un système de stéréovision axiale	90
3.- Nos motivations et nos choix	90
3.1.- Idée clef: étude des profils d'intensité	91
3.2.- Utilisation et calcul des profils d'intensité	92
4.- Organisation générale de notre méthode de mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale	93
5.- Le processus de filtrage	94
5.1.- Définition du filtre médian "classique"	94
5.2.- Définition du filtre médian "seuillé"	94
5.3.- Comparaison entre le filtre médian classique et le filtre médian "seuillé"	95
5.4.- Organisation générale de notre processus de filtrage	96
6.- Algorithme de mise en correspondance de points dans des images noir et blanc	97
6.1.- Principes	97
6.2.- Appariement des points de fort gradient des profils	98
6.3.- Appariement des pics et des vallées des profils	100
6.3.1.- La segmentation grossière	100
6.3.2.- Appariement à partir des segmentations grossières	101
6.4.- Résultats de l'appariement des points de fort gradient, des pics et des vallées sur des images noir et blanc	103

7.-	Algorithme de mise en correspondance de points dans des images couleur	105
7.1.-	Choix du système de représentation de la couleur	105
7.2.-	Organisation de notre algorithme d'appariement couleur	107
7.3.-	Calcul et filtrage des profils sur les composantes R, V, B, I ₁ , I ₂ , I ₃	108
7.3.1.-	Résultat du calcul des profils	108
7.3.2.-	Résultat du filtrage des profils	110
7.4.-	Tri des profils extraits dans les différentes composantes de l'image	111
7.5.-	Appariement à partir des profils extraits dans les différentes composantes de l'image	112
7.6.-	Résultat de l'appariement couleur	112
8.-	Conclusion de la mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale	114
CHAPITRE 2.- Reconstruction 3D dans un système de stéréovision axiale et application médicale		115
1.-	Description des expériences	117
2.-	Reconstruction d'un parallélépipède	118
3.-	Reconstruction d'une scène naturelle	120
4.-	Application de la stéréovision axiale dans le domaine de l'endoscopie opératoire	127
5.-	Conclusion	128
PARTIE .- CONCLUSION		131
BIBLIOGRAPHIE		135

Liste des Figures

Figure 1	Images d'utérus et d'ovaires issues d'un endoscope. (Dr N. Berreni ; clinique Saint-Roch, Perpignan).	3
Figure 2	Modèle géométrique dans un système de vision tridimensionnelle passive.	10
Figure 3	Modèle géométrique d'un système axial "général".	10
Figure 4	Modèle géométrique réduit aux axes X,Z.	12
Figure 5	Modèle à "déplacement de caméra".	14
Figure 6	Modèle à "plan image fixe".	14
Figure 7	Deux configurations possibles de systèmes axiaux "généraux".	15
Figure 8	Modèle géométrique en stéréovision binoculaire.	16
Figure 9	Modèle du zoom selon [Ma et al., 1990].	21
Figure 10	Représentation de $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ quand une erreur δz est commise sur Z_1	31
Figure 11	Représentation de $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ quand une erreur $\delta z=0.02$ pixel est commise sur Z_1	31
Figure 12	Représentation de $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ quand une erreur $\delta z=0.02$ pixel est commise sur Z_1 . $Z_2 \in [50, 250]$ pixels	32
Figure 13	Représentation de $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ quand une erreur δz est commise sur la détermination du point principal.	34
Figure 14	Représentation de $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ quand une erreur δc est commise sur la distance entre les centres optiques.	35
Figure 15	Représentation de $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ quand une erreur δf est commise sur les distances focales f_1 et f_2 . $\delta f \in [0 \text{ mm}, 1 \text{ mm}]$	36
Figure 16	Représentation de l'erreur sur la profondeur quand de multiples sources d'erreur interviennent.	38
Figure 17	Représentation de l'erreur sur la profondeur quand de multiples sources d'erreur interviennent. $Z_2 \in [50, 250]$ pixels	38
Figure 18	Ensemble repères-caméra dans une modélisation par projection centrale.	46
Figure 19	Représentation des points de fuite à partir du mouvement d'une caméra.	47
Figure 20	Calcul du point principal par approximation aux moindres carrés.	48
Figure 21	Vue 2D d'un système physiquement axial.	49
Figure 22	Rail d'expérimentation d'une caméra en mouvement sur son axe (proche de l'axe optique).	49
Figure 23	Trajectoire d'une caméra proche de son axe optique.	50
Figure 24	Un zoom de qualité standard n'est pas, en général, un système de stéréovision physiquement axial.	50

Figure 25	Exemple de système physiquement non axial composé de 3 modèles sténopés.	51
Figure 26	Couple d'images prises avec les focales 15 et 25 mm. Les croix représentent les épipôles dans chacune des images. .	59
Figure 27	(a) Caméra en mouvement sur un axe proche de son axe optique. (b) Ensemble caméra-cible utilisé lors du calibrage.	61
Figure 28	Vue 2D d'un système où le déplacement de la caméra est rectiligne.	62
Figure 29	Modèles des systèmes de prise de vue avant rectification (a) et après rectification (b).	68
Figure 30	Le point principal peut être déterminé arbitrairement.	73
Figure 31	Couple d'images avant rectification.	74
Figure 32	Couple d'images de la figure 31 après rectification. La croix représente le point principal du système axial calculé.	74
Figure 33	Couple d'images représentant un même plan.	79
Figure 34	Répartition des erreurs de triangulation par rapport au point principal dans le cas d'un zoom.	80
Figure 35	Répartition des erreurs de triangulation par rapport au point principal dans le cas d'une caméra en mouvement sur son rail.	81
Figure 36	Deux plans situés "approximativement" à 50 cm l'un de l'autre.	82
Figure 37	Reconstruction de deux plans situés "approximativement" à 50 cm l'un de l'autre.	83
Figure 38	Espace de recherche d'homologues dans un système de stéréovision axiale.	90
Figure 39	Découpage, par approximation polygonale, d'un même contour à des échelles différentes.	91
Figure 40	Formation des images dans un système de stéréovision axiale.	91
Figure 41	Interpolation linéaire lors du calcul des profils.	92
Figure 42	Exemple de profils d'intensité le long de deux droites épipolaires qui se correspondent.	92
Figure 43	Organisation générale de notre méthode de mise en correspondance.	93
Figure 44	Comparaison filtre médian "classique"-filtre médian "seuillé". (a) profil original, (b) profil après application du filtre médian et (c) profil après application du filtre médian "seuillé".	95
Figure 45	Organisation générale de notre processus de filtrage. Ce schéma représente chaque FILTRAGE de la figure 43.	96
Figure 46	Profils de la figure 42 après filtrage.	96
Figure 47	Organisation de notre processus de mise en correspondance de points sur des profils lissés.	97

Figure 48	Réduction de l'espace de recherche grâce aux points de fort gradient.	98
Figure 49	Résultat de l'appariement des points de fort gradient.	99
Figure 50	Organisation du processus d'appariement des pics et des vallées des profils.	100
Figure 51	Résultat de la segmentation grossière des deux profils. . .	101
Figure 52	Résultat de l'appariement des pics et des vallées	103
Figure 53	Résultat de notre algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires. Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.	103
Figure 54	Résultat de notre algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires. Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.	104
Figure 55	Organisation de notre méthode de mise en correspondance de points sur des images couleur.	107
Figure 56	Profils extraits le long de deux droites épipolaires dans les composantes Rouge, Verte et Bleue.	108
Figure 57	Profils extraits le long de deux droites épipolaires dans les composantes I_1 , I_2 , I_3	109
Figure 58	Profils de la figure 56 après filtrage.	110
Figure 59	Profils de la figure 57 après filtrage.	111
Figure 60	Résultat de notre algorithme d'appariement couleur sur quelques droites épipolaires. Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.	112
Figure 61	Résultat de notre algorithme d'appariement noir et blanc sur quelques droites épipolaires. Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.	113
Figure 62	Couple d'images d'un parallélépipède.	118
Figure 63	Couple d'images de la figure 62 après rectification.	118
Figure 64	Résultat de l'algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires traversant le parallélépipède.	119
Figure 65	Résultats de la reconstruction 3D des plans visibles du paparrallélépipède: (a) de face, (b) de face et de dessus, et (c) de dessus.	120
Figure 66	Couple d'images d'une tête d'ail.	121
Figure 67	Couple d'images de la figure 66 après rectification.	121
Figure 68	Résultat de l'algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires traversant la tête d'ail.	122
Figure 69	Reconstruction de l'ail: vue de face	124
Figure 70	Reconstruction de l'ail: vue de face et de dessus	125
Figure 71	Reconstruction de l'ail: vue de dessus	126

Figure 72	Résultats de notre algorithme d'appariement couleur sur des images endoscopiques d'un utérus. (Dr N. Berreni ; clinique Saint-Roch, Perpignan).	128
-----------	---	-----

Liste des Equations

Equation 1	12
Equation 2	12
Equation 3	12
Equation 4	12
Equation 5	13
Equation 6	13
Equation 7	13
Equation 8	13
Equation 9	14
Equation 10	14
Equation 11	14
Equation 12	15
Equation 13	15
Equation 14	27
Equation 15	28
Equation 16	29
Equation 17	30
Equation 18	30
Equation 19	30
Equation 20	30
Equation 21	33
Equation 22	33
Equation 23	33
Equation 24	33
Equation 25	34
Equation 26	34
Equation 27	35
Equation 28	35
Equation 29	36
Equation 30	46
Equation 31	46
Equation 32	51
Equation 33	58
Equation 34	60
Equation 35	63
Equation 36	68
Equation 37	69
Equation 38	69
Equation 39	70
Equation 40	70
Equation 41	70

Equation 42	.....	71
Equation 43	.....	71
Equation 44	.....	71
Equation 45	.....	71
Equation 46	.....	72
Equation 47	.....	72
Equation 48	.....	72
Equation 49	.....	72
Equation 50	.....	73
Equation 51	.....	73
Equation 52	.....	73
Equation 53	.....	73
Equation 54	.....	91
Equation 55	.....	92
Equation 56	.....	94
Equation 57	.....	94
Equation 58	.....	111
Equation 59	.....	111

INTRODUCTION

La réalisation du travail présenté dans ce mémoire est justifiée par le désir d'améliorer l'efficacité et la précision d'un acte chirurgical, la coelioscopie opératoire, en limitant ses risques.

L'endoscopie a débuté durant les années soixante, cette technique fait désormais partie du quotidien des spécialistes tels que le Dr Nicolas Berreni, gynécologue-obstétricien à Perpignan. A cette époque, la fibroscopie avec des endoscopes à fibres de verre donnait des résultats de qualité acceptable, mais depuis sept ans, l'utilisation des endoscopes électroniques avec leurs capteurs CCD au bout de la sonde, permet de saisir l'image directement au sein du corps humain au lieu de simplement la transmettre avec toute la déperdition de résolution qui en résultait. Aujourd'hui, une image de très bonne qualité est renvoyée sur l'écran pour un travail en direct (voir figure 1).

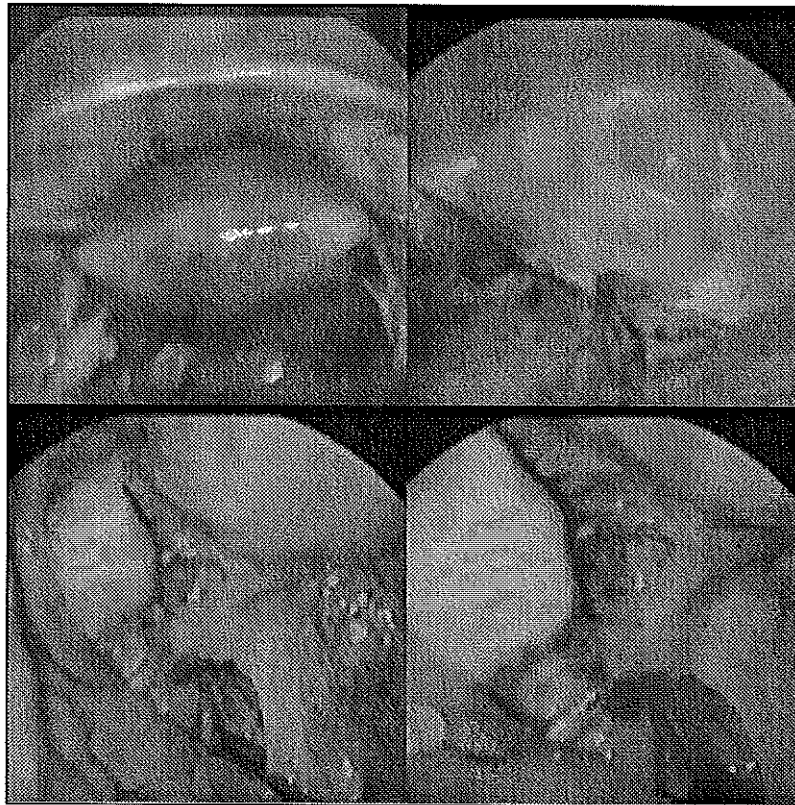


Figure 1.- Images d'utérus et d'ovaires issues d'un endoscope.
(Dr N. Berreni ; clinique Saint-Roch, Perpignan).

Cette technique, initialement exploratoire, permet aujourd'hui d'effectuer certaines opérations chirurgicales sans mettre d'organe directement au contact de l'air. Ce point est le principal avantage de l'endoscopie. En effet, une opération réalisée sous endoscopie est beaucoup moins traumatisante qu'une opération dite "à ciel ouvert".

La coeliochirurgie se fait par l'intermédiaire d'un écran, sans perception tactile et rend nécessaire une adaptation du chirurgien à un déplacement dans l'espace de trois en deux dimensions. L'accroissement de l'expérience du chirurgien augmente la sécurité de cette nouvelle technique.

Aussi, la reconstruction en trois dimensions de scènes endoscopiques pour la localisation spatiale d'organes, de lésions, d'outils, constituerait-elle un apport considérable aux actes chirurgicaux actuels. Elle transformerait radicalement l'acte chirurgical et l'endoscopie en général, en palliant certains inconvénients importants de l'endoscopie dus à ce que l'image proposée au chirurgien est une projection plane de scènes volumiques.

L'utilisation d'une seule caméra, en vue de reconstruire en trois dimensions une scène endoscopique, nous a conduits à utiliser les concepts de la stéréovision axiale.

En stéréovision binoculaire passive, on distingue généralement deux approches: la stéréovision latérale et la stéréovision axiale. Nous présentons dans ce mémoire une étude portant plus particulièrement sur la stéréovision axiale, qui consiste en l'utilisation d'une seule caméra en vue de restituer le relief. Cette caméra peut:

- . soit être munie d'un zoom, que nous supposons standard,
- . soit se déplacer sur son axe optique.

Ces dernières années, la stéréovision axiale a éveillé l'intérêt de nombreuses équipes de recherche qui ont considéré la possibilité de retrouver l'information de relief grâce à un mouvement du centre optique, le long de l'axe optique. Mais à notre connaissance, personne ne s'est demandé jusqu'à ce jour si un système physiquement axial existe vraiment.

Ce mémoire est composé de trois parties principales:

- . La première partie présente le modèle géométrique et l'étude des erreurs de triangulation dans un système de stéréovision axiale "général".
- . La deuxième partie présente le calibrage d'un système de stéréovision axiale et montre qu'un système physiquement axial n'existe généralement pas. Dans cette partie, nous proposons également une méthode de rectification permettant de transformer un système "presque" axial, en un système axial.
- . Enfin, la troisième partie expose un algorithme d'appariement original et présente les résultats de la reconstruction d'objets polyédriques et non-polyédriques. Dans cette partie, nous présentons également une application de la stéréovision axiale dans le domaine de l'endoscopie opératoire.

**PARTIE I.-
PRESENTATION DE LA
STEREOVISION AXIALE**

**CHAPITRE 1.-
Présentation du modèle géométrique
de la stéréovision axiale**

1.- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le modèle géométrique "général" d'un système de stéréovision axiale.

Nous avertissons le lecteur que ce modèle sera utilisé tout au long de ce mémoire et que la plupart des études menées jusqu'alors sur la stéréovision axiale ne sont que des cas particuliers de ce modèle général.

Nous présentons également les équations de triangulation fort simples qui découlent de ce modèle géométrique. Puis nous verrons les propriétés concernant l'espace de recherche d'homologues, lors de la mise en correspondance dans un système axial.

Nous terminerons par une étude bibliographique sur les principaux travaux menés sur la stéréovision axiale.

Mais avant de commencer cette étude sur la stéréovision axiale, rappelons le modèle géométrique d'un système de stéréovision tridimensionnelle passive.

2.- Rappels sur le modèle géométrique d'un système de stéréovision tridimensionnelle passive

De nombreuses études ont été réalisées sur les systèmes de stéréovision tridimensionnelle passive. Pour plus d'informations, nous renvoyons le lecteur intéressé aux travaux bibliographiques existants [Ayache, 1989, Larabi, 1991, de Saint Vincent, 1986, Skordas, 1988, ...].

Si l'on considère que la distance objets-caméra est importante par rapport aux longueurs focales utilisées, le modèle par projection centrale peut être adopté comme modèle du processus de formation des images. Rappelons que ce modèle est également appelé modèle sténopé (du grec sténos qui signifie étroit et ôpé qui signifie ouverture).

La modélisation géométrique d'un système stéréoscopique est présentée figure 2, où les éléments suivants sont définis:

- . Image 1 et Image 2 sont les plans de projection des caméras gauche et droite,
- . C_1 et C_2 sont les centres de projection des images,
- . O_1 et O_2 sont les projections orthogonales de C_1 et C_2 . O_1 et O_2 sont généralement appelés points principaux,
- . P est un point de l'espace,
- . P_1 et P_2 sont les projections du point P , sur les Images 1 et 2, par projection centrale.

Cette modélisation a été très largement utilisée afin de localiser des objets dans l'espace. En effet, si la géométrie du système de prises de vue est connue, la localisation des projections P_1 et P_2 d'un point P , sur chacune des images, permet de calculer la position de ce point dans l'espace par triangulation.

Ainsi, les deux principaux problèmes en stéréovision tridimensionnelle sont:

- . le calibrage du système de prises de vue,
- . la détermination de points homologues dans les images.

Dans un système de stéréovision axiale, nous retrouverons également ces deux problèmes, car les systèmes axiaux ne sont que des cas particuliers de systèmes de vision tridimensionnelle "classiques".

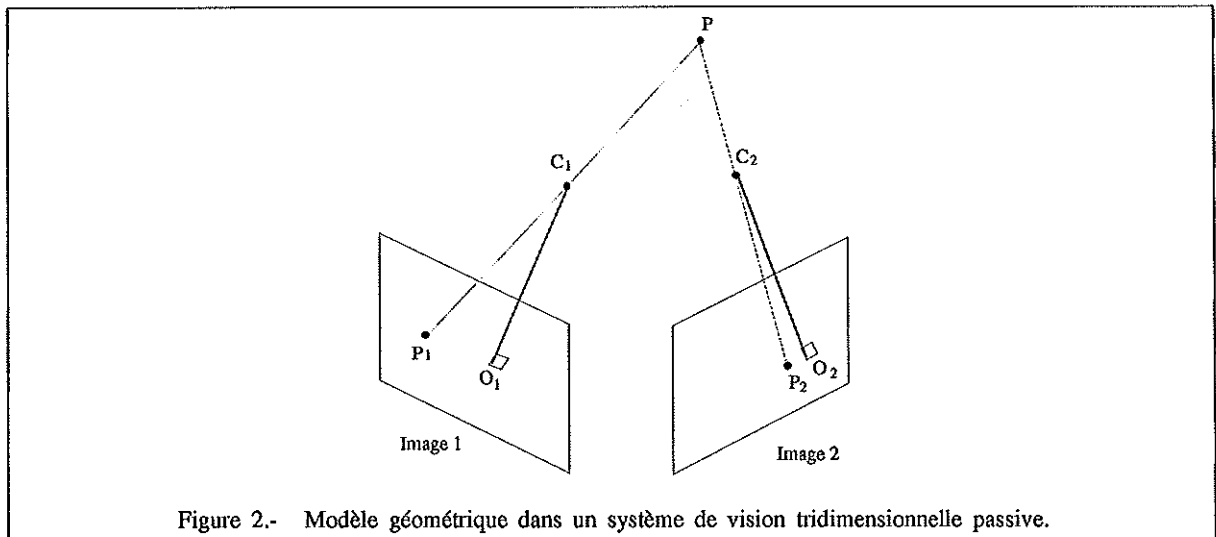


Figure 2.- Modèle géométrique dans un système de vision tridimensionnelle passive.

3.- Modèle géométrique d'un système de stéréovision axiale

Un système de stéréovision axiale est un système de stéréovision particulier, dans lequel les caméras ont leurs axes optiques en communs. La figure 3 représente un système de stéréovision axiale "général", qui peut être considéré comme deux caméras ayant leurs axes optiques confondus, leurs plans image parallèles étant séparés d'une distance ΔX .

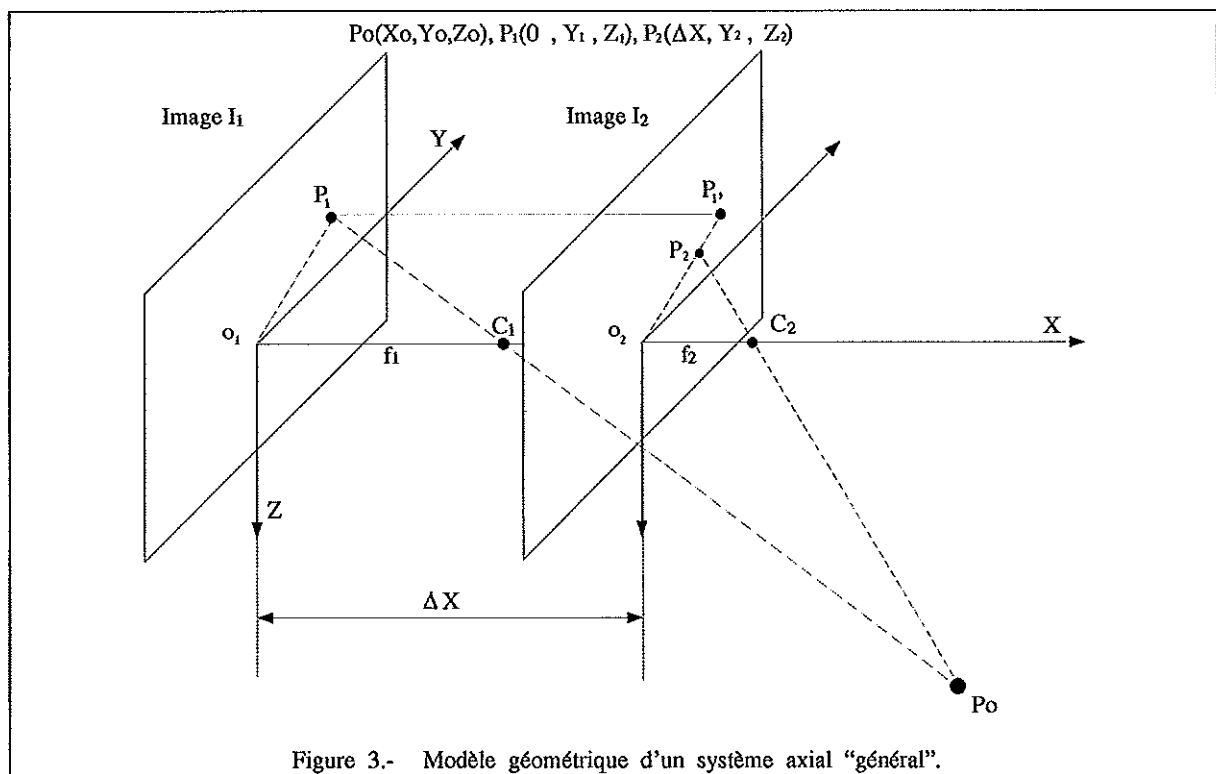


Figure 3.- Modèle géométrique d'un système axial "général".

Dans le reste du chapitre, nous adoptons les conventions suivantes (voir figure 3):

- . C_1 et C_2 sont les centres de projection des images I_1 et I_2 ,
- . O_1 et O_2 sont les points principaux des images I_1 et I_2 ,
- . P_0 est un point de l'espace,
- . P_1 et P_2 sont les projections de P_0 sur les images I_1 et I_2 . Nous utilisons ici les projections centrales de centres C_1 et C_2 .

Nous choisissons les axes du repère tels que:

- . l'axe des X coïncide avec l'axe optique du système axial,
- . l'axe des Y soit parallèle aux lignes image,
- . l'axe des Z soit parallèle aux colonnes image.

L'origine du repère peut, quant à elle, être fixée n'importe où sur l'axe optique. Sur la figure 3, nous avons fait coïncider l'origine du repère avec le point principal O_1 de l'image I_1 . Ainsi, le point $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ se projette en $P_1(0, Y_1, Z_1)$ sur l'image I_1 et en $P_2(\Delta X, Y_2, Z_2)$ sur l'image I_2 .

Dans les études menées jusqu'à présent, un système axial a été simulé de plusieurs façons:

- . par une caméra se déplaçant sur son axe optique,
- . par une caméra munie d'un zoom.

Dans cette partie, nous étudions l'aspect théorique des systèmes de stéréovision axiale. Nous verrons, dans les chapitres suivants, qu'il est très difficile d'affirmer que les systèmes optiques décrits ci-dessus sont réellement des systèmes axiaux, et comment il est toujours possible de se ramener à un système axial par rectification.

Sur la figure 3, nous remarquons que $P_0, P_1, P_2, O_1, O_2, C_1$ et C_2 sont coplanaires. Cette remarque est importante, car elle va permettre une analyse bidimensionnelle du processus de triangulation et simplifier les équations de triangulation permettant de calculer P_0 .

4.- Equations de triangulation dans un système de stéréovision axiale

Afin de simplifier les équations de triangulation, nous étudierons les deux modèles géométriques bidimensionnels suivants:

- . le modèle réduit aux axes X,Y et
- . le modèle réduit aux axes X,Z.

Cette simplification est rendue possible grâce à la remarque précédente.

Pour simplifier les calculs, nous allons situer le plan image entre le monde observé et le centre optique (voir figure 4). Cette convention évite le renversement des images.

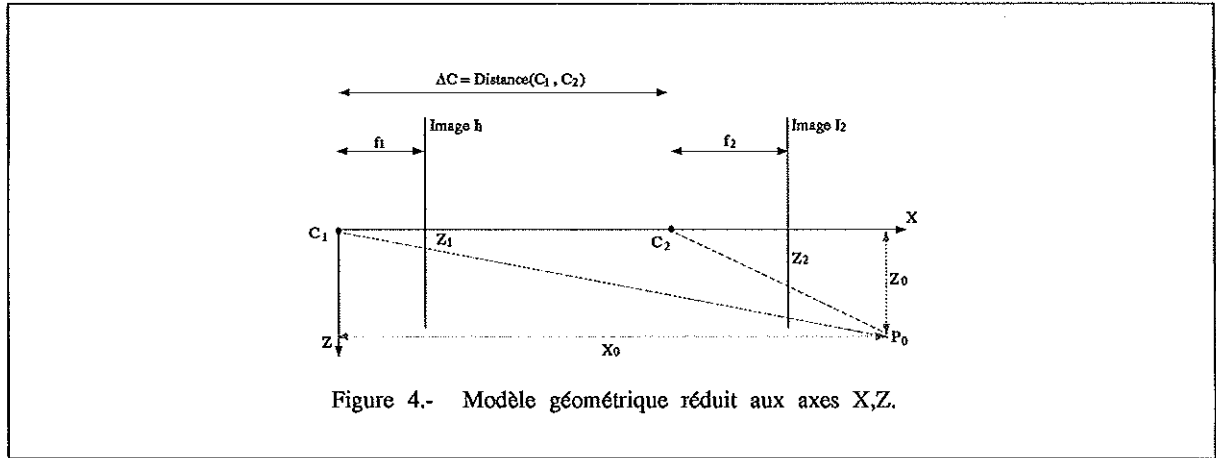


Figure 4.- Modèle géométrique réduit aux axes X,Z.

Nous fixerons ici le repère (X,Y,Z) qui sera centré sur C_1 , centre optique de l'image I_1 .

Afin de déterminer les équations de triangulation posons:

- . (Y_1, Z_1) est le projeté de P_0 sur le plan image I_1 ,
- . (Y_2, Z_2) est le projeté de P_0 sur le plan image I_2 ,
- . Y_1, Z_1, Y_2 et Z_2 sont exprimés en pixels dans les repères centrés sur les centres de projection, c'est-à-dire C_1 pour l'image I_1 et C_2 pour l'image I_2 ,
- . $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ est exprimé par rapport au repère lié à C_1 , centre optique de l'image I_1 .

En se limitant aux axes X,Z (voir figure 4) nous avons de façon immédiate:

$$\frac{Z_1}{f_1} = \frac{Z_0}{X_0} \quad (1)$$

et

$$\frac{Z_2}{f_2} = \frac{Z_0}{X_0 - \Delta C} \quad (2)$$

Où ΔC est la distance entre les centres optiques C_1 et C_2 .

A partir de (1) et (2) nous pouvons déduire que:

$$X_0 = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} \quad (3)$$

et que

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_2 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} \quad (4)$$

Ici, nous remarquons que:

- . X_0 est exprimé en mm,
- . pour exprimer Z_0 en mm, il faut multiplier Z_0 par ez (taille d'un pixel en Z),
- . le même raisonnement est, bien entendu, applicable aux axes X,Y.

Ainsi, nous pouvons résumer:

$$X_0 = \frac{Y_2 f_1 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2} = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} \quad (5)$$

$$Y_0 = \frac{Y_1 Y_2 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2} ey \quad (6)$$

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_2 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} ez \quad (7)$$

Nous voyons, à partir des équations obtenues, que X_0 , Y_0 et Z_0 ne sont pas définis lorsque $Y_2 f_1 - Y_1 f_2 = 0$ et $Z_2 f_1 - Z_1 f_2 = 0$. Physiquement, à quoi correspond ce cas?

A partir des équations (1) et (2), nous pouvons déduire que si $\frac{Z_1}{f_1} = \frac{Z_2}{f_2}$ alors nous avons:

$$\frac{Z_0}{X_0} = \frac{Z_0}{X_0 - \Delta C} \quad (8)$$

Ainsi, $Z_2 f_1 - Z_1 f_2 = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} Z_0 = 0 \\ \Delta C = 0 \end{cases}$. Etudions chaque cas plus précisément:

- . le cas où $Z_0 = 0$ correspond aux points se projetant sur l'axe des Y. Ils sont tels que $Z_0 = Z_1 = Z_2 = 0$,
- . le cas où $\Delta C = 0$ montre que le déplacement du centre optique est nécessaire pour calculer la position d'un point dans l'espace.

Ainsi, nous pouvons dégager trois cas particuliers:

- . Si $Y_2 f_1 = Y_1 f_2$ et $Z_2 f_1 = Z_1 f_2$: X_0 n'est pas défini pour les points situés sur l'axe optique,
- . Si $Y_2 f_1 = Y_1 f_2$ et $Z_2 f_1 \neq Z_1 f_2$: $X_0 = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2}$ et $Y_0 = 0$,
- . Si $Y_2 f_1 \neq Y_1 f_2$ et $Z_2 f_1 = Z_1 f_2$: $X_0 = \frac{Y_2 f_1 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2}$ et $Z_0 = 0$.

Nous remarquons que X_0 n'est pas défini pour les points se projetant sur l'axe optique.

Nous notons également la simplicité des formules de triangulation. Compte tenu de cette simplicité, nous devinons déjà que les erreurs de triangulation constitueront le problème majeur des systèmes axiaux. Nous ferons plus loin une étude théorique des erreurs de triangulation, dans un système axial "général".

5.- Systèmes axiaux particuliers

Jusqu'à présent, nous avons présenté le modèle géométrique "général" d'un système de stéréovision axiale. En fait, la plupart des études menées jusqu'alors ne sont que des cas particuliers de ce modèle axial "général". Voyons maintenant ces différents modèles axiaux particuliers.

5.1.- Modèle à “déplacement de caméra”

Ce modèle, étudié par divers auteurs [Alvertos *et al.*, 1989, Carmona, 1991, Carmona *et al.*, 1990, Nguyen *et al.*, 1992, ...], correspond à une caméra qui se déplace sur son axe optique. Ainsi, par rapport au modèle axial “général”, il faut considérer que $f_1=f_2$ (voir figure 5).

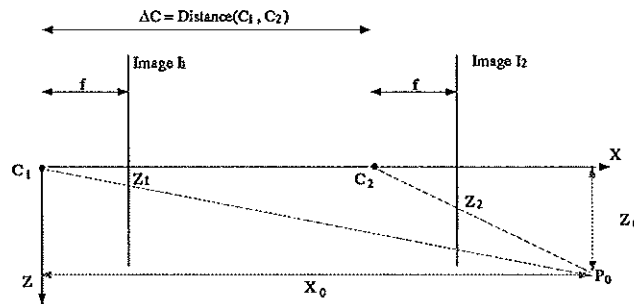


Figure 5.- Modèle à “déplacement de caméra”.

Si $f=f_1=f_2$, les équations de triangulation deviennent:

$$X_0 = \frac{Y_2 \Delta C}{Y_2 - Y_1} = \frac{Z_2 \Delta C}{Z_2 - Z_1} \quad (9)$$

$$Y_0 = \frac{Y_1 Y_2 \Delta C}{f(Y_2 - Y_1)} ey \quad (10)$$

$$Z_0 = \frac{Z_1 Z_2 \Delta C}{f(Z_2 - Z_1)} ez \quad (11)$$

Nous remarquons que X_0 est indépendant de la focale.

5.2.- Modèle à “plan image fixe”

Ce modèle, étudié par Ma [Ma *et al.*, 1990], correspond à un modèle axial “général”, où les plans image I_1 et I_2 sont confondus (voir figure 6).

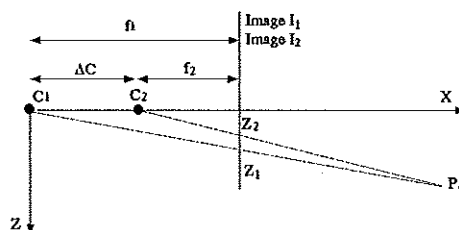


Figure 6.- Modèle à “plan image fixe”.

Travaillant sur des images de synthèse, il pensait qu'un zoom pouvait se modéliser de cette façon. Comme nous le verrons plus tard, le plan image bouge lorsque la focale varie.

Nous remarquons que les équations de triangulation sont les mêmes que pour le modèle axial "général". En effet, à partir de la figure 6, nous avons:

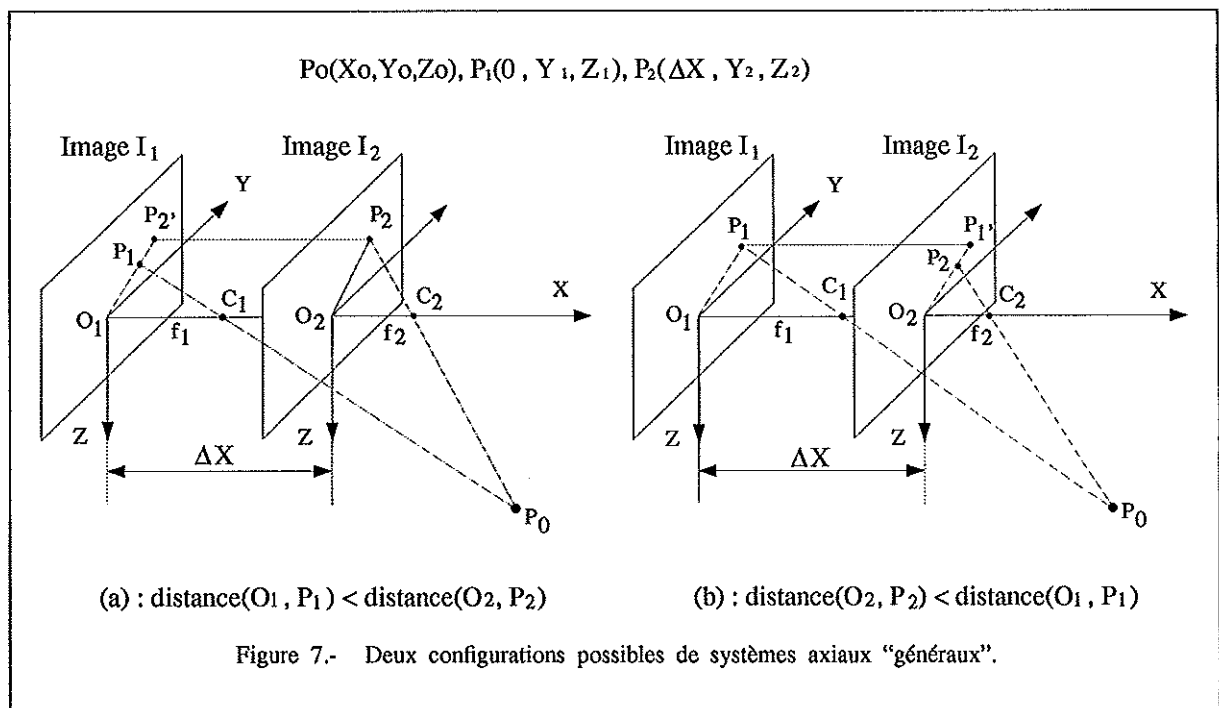
$$\frac{Z_1}{f_1} = \frac{Z_0}{X_0} \quad (12)$$

et

$$\frac{Z_2}{f_2} = \frac{Z_0}{X_0 - \Delta C} \quad (13)$$

6.- Espace de recherche lors de la mise en correspondance

Dans un système de vision tridimensionnelle, le calcul de la position d'un point P_0 ne peut se faire que si ses projections P_1 et P_2 , sur les images I_1 et I_2 , sont connues (voir figure 7). Généralement, connaissant P_1 , on cherche à déterminer son homologue P_2 . La limitation de l'espace de recherche de l'homologue d'un point diminue la complexité de la mise en correspondance.



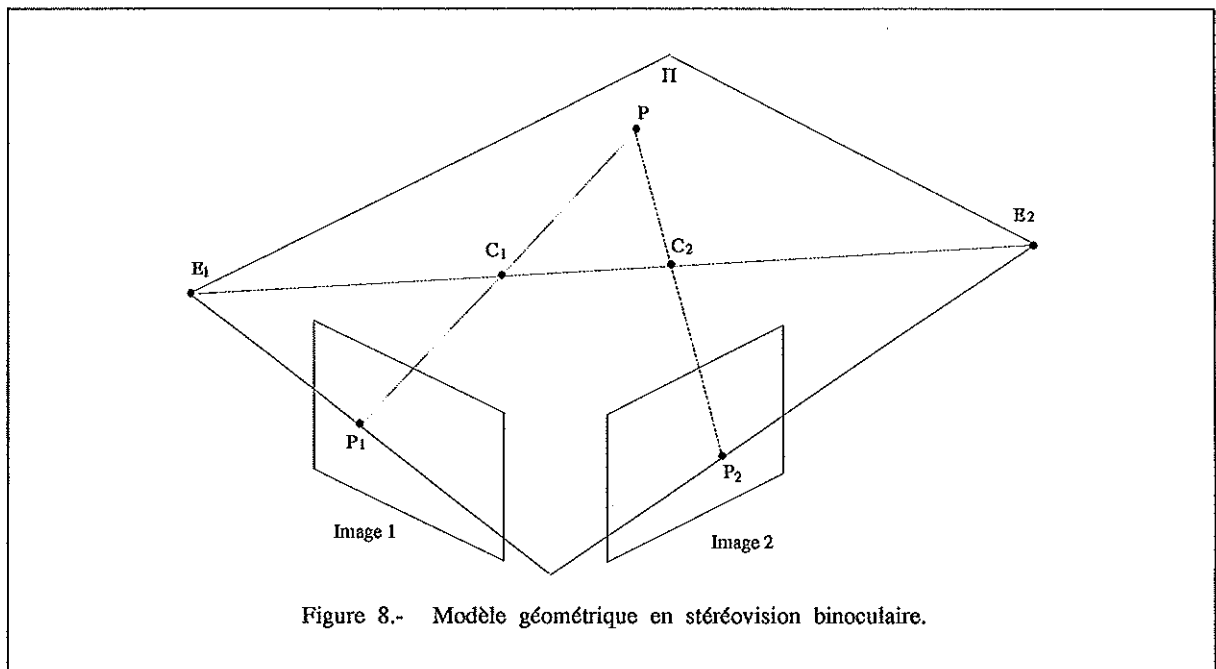
Deux configurations de systèmes axiaux sont possibles (voir figure 7). En effet, une des deux images paraîtra "zoomée" par rapport à l'autre. Nous nous placerons dans le cas où l'image I_2 est "zoomée" par rapport à l'image I_1 (voir figure 7.(a)). Le raisonnement est identique dans l'autre cas.

Plusieurs auteurs [Alvertos *et al.*, 1989, Carmona, 1991, ...] ont étudié les propriétés géométriques des systèmes axiaux, afin de déterminer l'espace de recherche d'homologues

lors de la phase d'appariement. Nous rappellerons, dans ce qui suit, les particularités de l'espace de recherche des systèmes axiaux. Nous développerons également une propriété fondamentale, propre aux systèmes axiaux. Mais donnons tout d'abord quelques définitions valables dans n'importe quel système de stéréovision binoculaire.

6.1.- Quelques définitions valables dans les systèmes de stéréovision binoculaires

La figure 8 représente la géométrie d'un système de stéréovision binoculaire quelconque.



A partir de cette figure, nous pouvons définir:

6.1.1.- Plan épipolaire

Le plan épipolaire Π , associé à un point P_1 de l'image 1, est défini comme le plan qui contient les deux centres optiques C_1 et C_2 et le point P_1 .

6.1.2.- Droite épipolaire

La droite épipolaire, associée à un point P_1 de l'image 1, est la droite de l'image 2 définie comme l'intersection du plan image 2 avec le plan épipolaire Π .

Une des propriétés les plus importantes d'une telle droite est qu'elle contient l'homologue de P_1 [Ayache, 1989, Larabi, 1991].

6.1.3.- Epipôle

Nous remarquons que toute droite épipolaire de l'image 2 passe par le point E_2 . Ainsi, les droites épipolaires forment un faisceau de droites de centre E_2 . Symétriquement, les droites épipolaires de l'image 1 forment un faisceau de droites de centre E_1 . E_1 et E_2 sont appelés les épipôles. Nous pouvons calculer ces points très simplement car:

- . E_1 est la projection de C_2 sur le plan image 1, par projection centrale de centre C_1 ,
- . E_2 est la projection de C_1 sur le plan image 2, par projection centrale de centre C_2 .

Dans la plupart des systèmes de stéréovision binoculaires, ces points sont situés en-dehors des images. C'est la différence fondamentale entre les systèmes latéraux et les systèmes axiaux. En effet, dans un système axial, les épipôles se situent dans les images et coïncident avec les points principaux. Comme nous le verrons plus loin, cette propriété fondamentale constituera la force et la faiblesse des systèmes axiaux.

6.2.- Zone de recherche

Des études ont été menées par [Alvertos *et al.*, 1989, Carmona, 1991], afin de restreindre l'espace de recherche dans un système axial. Les systèmes axiaux n'étant que des cas particuliers des systèmes de stéréovision binoculaires, nous pouvons associer au point P_2 de l'image I_2 , une droite de l'image I_1 . Cette droite contient l'homologue de P_2 . De plus, compte tenu de la géométrie des systèmes axiaux (voir figures 3 ou 7.(a)), nous constatons que:

- . (O_1P_2') est la droite épipolaire associée à P_2 (où P_2' est la projection orthogonale de P_2 sur le plan image I_1),
- . $(O_1P_2') \parallel (O_2P_2)$,
- . $\|O_1\vec{P}_1\| \leq \|O_1\vec{P}_2'\|$.

Ainsi, l'espace de recherche de l'homologue d'un point P_2 se limitera au segment $[O_1, P_2']$.

Tout ceci a été démontré mathématiquement dans [Carmona, 1991]. Les rares cas d'occlusions ont été étudiés dans [Alvertos *et al.*, 1989]. Ils peuvent être résolus en utilisant la contrainte d'ordre.

6.3.- Les points principaux O_1 et O_2 se correspondent

Dans un système binoculaire classique (voir figure 8), les points se trouvant sur la droite 3D (C_1C_2) se projettent en E_1 sur le plan image 1 et en E_2 sur le plan image 2. Ainsi, les épipôles E_1 et E_2 se correspondent. Lors de la mise en correspondance, il est dommage que ces points soient, la plupart du temps, en dehors des images.

Dans un système axial, les épipôles E_1 et E_2 se confondent avec les points principaux O_1 et O_2 . De plus, ils sont contenus dans les images. Pour l'appariement, cette particularité des systèmes axiaux est un avantage très net, par rapport aux systèmes classiques.

En effet, les points principaux appartiennent à toutes les droites épipolaires et peuvent donc constituer le point de départ de la phase d'appariement. Nous détaillerons cet aspect plus loin, lors de l'étude d'un algorithme de mise en correspondance que nous avons développé.

7.- Etude bibliographique

Dans cette section, nous présentons les publications traitant de la stéréovision axiale qui ont le plus attiré notre attention. Certaines d'entre elles seront commentées au cours des chapitres suivants.

Parmi ces publications, [Carmona, 1991, Nguyen *et al.*, 1992] traitent du problème majeur des systèmes axiaux: les erreurs de triangulation, qui peuvent être dues à des erreurs de calibrage ou à des erreurs de mise en correspondance. Ces travaux montrent que les systèmes axiaux sont des systèmes de stéréovision binoculaires "délicats", malgré leurs modèles géométriques très simples.

La plupart des autres publications évoquent le problème de la mise en correspondance dans un système axial. Malheureusement, bon nombre de ces études ne sont menées que sur des images de synthèse. De ce fait, elles ne prennent pas en compte les problèmes pratiques qui se posent tels que:

- . les conditions d'éclairage qui ne sont que très rarement connues,
- . le modèle du système d'acquisition des images qui n'est pas toujours axial,
-

Signalons que les articles publiés par l'auteur de ce mémoire [Rodin *et al.*, 1992a, Rodin *et al.*, 1992b, Rodin *et al.*, 1993, Rodin *et al.*, 1994] ne sont pas présentés dans cette section. En effet, le lecteur trouvera dans cet ouvrage tous les travaux rapportés dans ces articles.

7.1.- "Motion stereo using ego-motion logarithmic mapping".

R. Jain, S.L Barlett et N. O'Brien [Jain *et al.*, 1987]

Dans cet article, les auteurs présentent un algorithme qui transforme un ensemble d'images prises par une caméra en mouvement. Cet algorithme permet d'exprimer ces images dans un espace qu'ils nomment Ego-Motion Complex Logarithmic Space (CLS) [O'Brien *et al.*, 1984].

Dans le cas d'un mouvement selon l'axe optique, les droites épipolaires radiales sont transformées en droites épipolaires qui coïncident avec les lignes de l'image. Cette transformation n'est pas sans rappeler celle qui permet de passer d'un système binoculaire quelconque à un système binoculaire à axes optiques parallèles [Ayache, 1989]. L'implantation de cet algorithme doit permettre une mise en correspondance un peu plus simple.

L'avantage principal de cette transformation est son invariance par rotation. Mais l'application d'un filtre ou d'un détecteur de contours doit être réalisée avant la transformation dans CLS. En effet, la transformation modifie la structure des images. Il est à signaler que la transformation dans CLS est facilement réalisable par matériel.

Les expérimentations ont montré que, plus le mouvement était important entre deux images, plus l'erreur sur le calcul de la position était faible. Cette constatation paraît normale. Utilisant une caméra en mouvement sur son axe optique, les auteurs ont pu calculer la profondeur sans utiliser la focale de la caméra. Nous avons montré, dans le paragraphe consacré aux équations de triangulation (voir équation (9)), que X_0 est indépendant de la focale, dans le cas du déplacement axial d'une caméra.

7.2.- “Camera geometries for image matching in 3-D machine vision”. **N. Alvertos, D. Brzakovic et R.C. Gonzalez [Alvertos *et al.*, 1989]**

Cet article présente une comparaison des systèmes de stéréovision latéraux et axiaux. Les auteurs montrent que, dans les systèmes axiaux, la probabilité de déterminer des correspondances non ambiguës est significativement plus importante que pour les autres systèmes de stéréovision. En effet, le champ de vision de la caméra en position arrière recouvre complètement, à quelques exceptions près, le champ de vision de la caméra en position avant. Quelques cas d'occlusion sont possibles mais ils peuvent être facilement résolus, en utilisant la contrainte d'ordre.

Un algorithme de mise en correspondance est présenté. Il est basé sur les contraintes géométriques d'un système axial et sur le modèle de radiance de la scène. En pratique, le modèle de radiance de la scène est malheureusement peu souvent connu. Les auteurs ont réalisé quelques expériences sur des images de synthèse (dans ce cas, le modèle de radiance de la scène est connu!).

7.3.- “Using camera motion to estimate range for robotic parts manipulation” **D. Vernon et M. Tistarelli [Vernon *et al.*, 1990]**

Cet article présente l'étude de deux mouvements simples d'une caméra:

- . mouvement le long de son axe optique,
- . rotation autour d'un point fixe.

A partir de ces mouvements simples, les auteurs utilisent le flot optique pour calculer une carte de profondeur. La simplicité de calcul du flot optique, dans le cas de ces mouvements, revêt un intérêt tout particulier pour des applications industrielles. En effet, ces mouvements simples peuvent être intégrés dans des systèmes binoculaires classiques, afin de les guider lors de la mise en correspondance, en fournissant une première estimation de la profondeur de façon simple et rapide.

Les résultats obtenus montrent une grande imprécision. En effet, les auteurs assimilent le centre des images au point principal. De plus, ils ne sont pas sûrs du mouvement axial de leur caméra.

7.4.- “Etude de la stéréovision axiale. Modélisation mathématique et résolution algorithmique” **C. Carmona [Carmona, 1991]**

L'intérêt principal de cette thèse est de réaliser une étude théorique approfondie de l'erreur, dans un système axial à déplacement de caméra. Pour résumer cette étude très complète, notons les points suivants:

- . Plus un point se projettera près du point principal, plus l'erreur commise sur le calcul de ce point sera importante. Ainsi, toute une zone autour du point principal n'est pas utilisable.
- . Pour diminuer l'erreur, il faut augmenter le déplacement de la caméra selon l'axe optique.

Ainsi, de façon pratique, les meilleurs résultats seront obtenus à la périphérie de l'image pour des déplacements de caméra importants.

Dans cette thèse, nous trouvons également une bonne étude du zoom présenté comme un système de stéréovision axiale intégré. L'auteur fournit notamment une démonstration très claire de l'équivalence entre les différents modèles optiques connus: le modèle sténopé, le modèle lentille mince et le modèle lentille épaisse. Il conclut que l'utilisation du modèle sténopé est préférable en raison de sa simplicité géométrique.

7.5.- "Quantization errors in axial motion stereo on rectangular-tessellated image sensor"

T.C. Nguyen et T.S. Huang [Nguyen *et al.*, 1992]

Les auteurs de cet article analysent les erreurs dans un système de stéréovision axiale à mouvement de caméra. Ils font également une comparaison entre les systèmes latéraux et axiaux. Pour chacun des systèmes, ils évaluent le rapport $\frac{\text{rapidité}}{\text{précision}}$.

A partir de leur analyse de l'erreur dans un système axial, les auteurs arrivent aux mêmes conclusions que [Carmona, 1991].

La comparaison faite entre les systèmes axiaux et latéraux n'a rien d'étonnant:

- . un système axial a peu de problèmes d'occlusion, mais l'erreur de triangulation est importante,
- . un système latéral a des erreurs de triangulation faibles, mais souffre d'occlusions importantes.

Ne disposant pas d'un système axial, Nguyen et al. concluent qu'ils n'ont pas vérifié leurs analyses par la pratique. Dans la partie consacrée au calibrage, nous apportons une solution à ce problème.

7.6.- "Parallel Depth Recovery by Changing Camera Parameters"

M. Subbarao [Subbarao, 1988]

Dans cet article, M.Subbarao présente un modèle mathématique permettant de retrouver l'information tridimensionnelle, en changeant les paramètres d'une caméra:

- . la distance entre le CCD et l'objectif,
- . la longueur focale,
- . l'ouverture.

Afin de faire un parallèle entre son modèle et la vision humaine, il cite [Weale, 1982]. D'après R.A.Weale, pour obtenir deux images, l'oeil humain effectue de petits mouvements afin de "changer de focale". L'oeil peut ainsi obtenir une information sur la profondeur.

7.7.- "Metric aspect of zoom vision"

A.G. Wiley et K.W. Wong [Wiley *et al.*, 1990]

Cet article présente une expérience menée dans le cadre de la stéréovision latérale binoculaire. Le but de cette expérience est de savoir s'il est préférable de doter les caméras de zooms ou d'objectifs simples.

Dans le cadre de la stéréovision axiale, l'intérêt principal de cet article est de montrer, lors du calibrage d'un zoom, que le point principal varie lorsque l'on change de focale.

Les auteurs pensent que la variation du point principal est probablement due à un mauvais alignement de l'axe optique par rapport au plan image. Cette conclusion nous paraît peu sérieuse. En effet, le modèle sténopé est composé:

- . d'un plan image π ,
- . d'un centre de projection C.

Le point principal P est la projection orthogonale du centre de projection sur le plan image. La droite (CP) correspond alors à l'axe optique. Ainsi, l'axe optique est toujours perpendiculaire au plan image. Nous pensons que les variations de la position du point principal sont plutôt dues au fait qu'un zoom est un système optique complexe.

7.8.- "Depth from zooming" J. Ma et S.I. Olsen [Ma *et al.*, 1990]

Dans cet article, les auteurs présentent une série d'expériences, menées sur des images de synthèse, en vue d'obtenir une information tridimensionnelle à partir d'une caméra munie d'un zoom. Malheureusement, ils utilisent un modèle mathématique trop simpliste pour caractériser un zoom. En effet, ils considèrent un modèle sténopé, ayant un plan image fixe pour toutes les focales (voir figure 9).

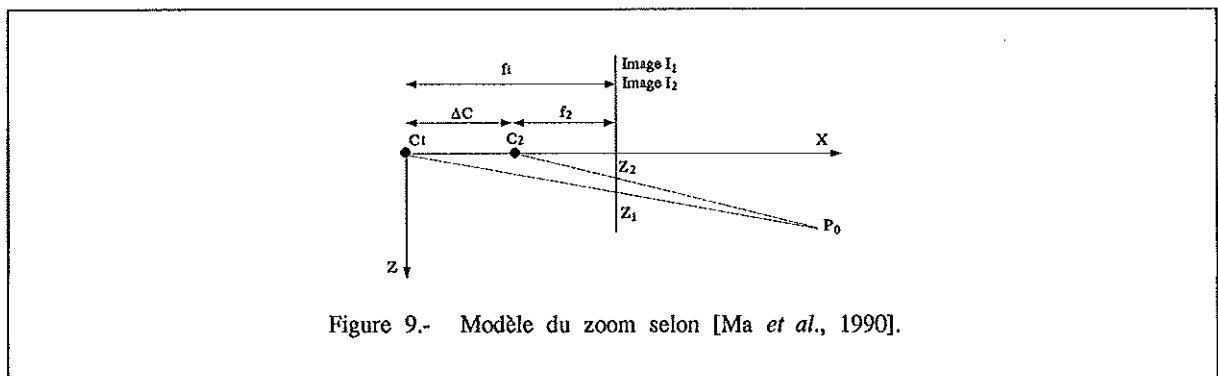


Figure 9.- Modèle du zoom selon [Ma *et al.*, 1990].

Dans le chapitre consacré notamment au calibrage d'un zoom, nous verrons que le plan image bouge lorsque la focale varie.

Les auteurs présentent également deux méthodes de mise en correspondance:

- . l'une basée sur l'étude du flot optique. Malheureusement, cette méthode n'est valable que pour des changements de focale faibles. De plus, elle est très sensible aux erreurs de détermination du flot optique;

- . l'autre approche utilise les passages par zéro du laplacien de gaussienne et les segments de l'approximation polygonale. Cette méthode ne permet qu'une localisation approximative des objets de la scène.

Afin de résoudre le problème des erreurs de triangulation près du point principal, ils proposent:

- . de concevoir des caméras CCD ayant des pixels de taille variable: plus on se rapproche du point principal, plus les pixels doivent être petits;
- . de calculer la profondeur des points se projetant près du point principal, par interpolation.

7.9.- "Utilisation d'un objectif à focale variable en vision monoculaire en vue de la reconstruction 3D"

J.M. Lavest, G.Rives et M. Dhome [Lavest *et al.*, 1992]

Dans cet article, Les auteurs analysent un zoom haut de gamme [Angénieux, 1956] en vue de la reconstruction 3D. Tout d'abord, ils effectuent un calibrage de la façon suivante:

- . Détermination des coordonnées (u_0, v_0) du point principal, en utilisant les propriétés des points de fuite en projection perspective [Lenz *et al.*, 1987]. Pour cela, ils prennent des images d'une grille à des focales différentes. Ainsi, si le centre optique se déplace sur l'axe optique, ils pensent calculer de façon simple et robuste l'intersection de l'axe optique et du plan image.
- . Une fois le point principal calculé, ils déterminent les autres paramètres de calibrage pour chaque focale.

En analysant les résultats du calibrage, ils constatent que le modèle du zoom présenté dans [Ma *et al.*, 1990] est faux. En effet, ils observent:

- . un déplacement linéaire du centre optique,
- . un déplacement du plan image (rappel: dans [Ma *et al.*, 1990] le plan image était fixe).

Les auteurs trouvent l'explication de ce phénomène par l'étude du modèle de la lentille épaisse. Ils pensent que le déplacement linéaire du centre optique doit être dû à la qualité du zoom utilisé (changement de focale effectué par translation pure de deux blocs mobiles de lentilles).

Ils terminent par la reconstruction d'objets polyédriques, sur lesquels des traits sont tracés. Ils précisent que l'utilisation d'un zoom n'est possible, que si les distorsions des lentilles sont corrigées. Dans leurs expériences, les distorsions des lentilles sont fournies par le constructeur.

8.- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle géométrique d'un système axial "général". Dans un tel système, nous avons montré que les équations de triangulation sont

très simples. La simplicité de ces équations laisse présager le problème majeur des systèmes axiaux: les erreurs de triangulation. Le chapitre suivant fera une brève étude de ce problème.

A la fin de ce chapitre, nous avons résumé les principales publications traitant de la stéréovision axiale, à travers l'utilisation d'une caméra munie d'un zoom ou en mouvement sur son axe optique. Compte tenu des erreurs de triangulation importantes près du point principal, l'étude de ces publications soulève un certain nombre de questions:

- . quelle est la taille de la zone à ne pas utiliser autour du point principal?
- . un système physiquement axial existe-t-il vraiment?
 - Un zoom est-il un système axial parfait?
 - Une caméra en mouvement peut-elle se déplacer parfaitement sur son axe optique?

Dans les chapitres suivants, nous répondrons à ces questions.

CHAPITRE 2.-
Etude théorique des erreurs dans un
système de stéréovision axiale "GENERAL"

1.- Introduction

Dans ce chapitre, nous étudions le comportement d'un système axial "général" face aux différentes sources d'erreurs de triangulation. Parmi ces sources, nous distinguons les erreurs de mise en correspondance et les erreurs de calibrage.

Quelques auteurs [Carmona, 1991, Nguyen *et al.*, 1992] ont étudié ce problème, dans le cas de systèmes axiaux à "déplacement de caméra".

Nous généraliserons ici les formules d'évaluation de l'erreur dans un système axial "général". Nous compléterons notre étude par la discussion et la représentation graphique des formules présentées.

2.- Quelques mots sur la bibliographie dans ce domaine

Parmi les publications sur la stéréovision axiale, nous trouvons [Carmona, 1991, Nguyen *et al.*, 1992] qui traitent du problème des erreurs de triangulation, dans le cas du déplacement axial d'une caméra.

Dans [Carmona, 1991], nous trouvons une étude théorique du comportement d'un système axial à "déplacement de caméra" face aux erreurs de calibrage et de mise en correspondance. Nous trouvons notamment une étude sur la variabilité des erreurs en fonction de certains paramètres du système:

- . déplacement de la caméra,
- . modification de la longueur focale.

Pour résumer cette étude très complète, notons les points suivants:

- . si le déplacement de la caméra augmente, l'erreur d'estimation de la profondeur diminue,
- . plus un point se projette près du point principal, plus l'erreur commise sur le calcul de ce point est importante.

[Nguyen *et al.*, 1992] réalisent également une étude des erreurs dans un système axial. Leur analyse de l'erreur dans un système axial aboutit à l'expression suivante:

$$E[\varepsilon_z] = \frac{e X(X - \Delta C)}{R f \Delta C} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{12} \left(\frac{X - \Delta C}{\Delta C} \right)^2 \right) \quad (14)$$

où:

- . $E[\varepsilon_z]$ est l'erreur sur le calcul de la profondeur,
- . e est la taille des pixels,
- . R est la distance radiale,
- . X est la profondeur du point considéré,
- . ΔC est le déplacement subi par la caméra,
- . f est la longueur focale.

A partir de l'équation (14), les auteurs concluent que, pour diminuer l'erreur de triangulation dans un système axial, il faut:

- . réduire la taille des pixels,
- . ne pas utiliser les points trop proches du point principal,
- . augmenter le produit $f \times \Delta C$. En effet, lorsque le déplacement ou la focale de la caméra augmente, la précision augmente.

Les auteurs précisent qu'ils n'ont pu vérifier leur analyse par la pratique, car ils ne disposaient pas d'un système de stéréovision axiale réel.

Comme nous l'avons déjà signalé, le but de ce chapitre est de généraliser l'expression des erreurs de triangulation dans un système axial quelconque.

3.- Rappels et conventions

Dans ce chapitre, nous étudions les erreurs commises sur la détermination d'un point $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$. Celles-ci peuvent provenir d'erreurs:

- . soit dans le processus d'appariement,
- . soit dans le processus de calibrage:
 - a. erreur sur la détermination du point principal,
 - b. erreur sur l'estimation de ΔC , distance entre les centres optiques,
 - c. erreur sur le calcul des focales f_1 et f_2 .

Nous n'étudierons ici que l'expression de l'erreur sur la profondeur, car X_0 est la composante de P_0 sur laquelle il y a généralement le plus d'erreur. Rappelons tout d'abord l'expression de la profondeur X_0 . Pour cela, supposons que P_0 se projette en (voir la figure 3 présentée au chapitre I):

- . (Y_1, Z_1) sur l'image I_1 , par projection centrale de centre C_1 ,
- . (Y_2, Z_2) sur l'image I_2 , par projection centrale de centre C_2 .

Supposons également que:

- . ΔC est la distance entre C_1 et C_2 ,
- . f_1 et f_2 sont les focales du système axial "général".

X_0 s'exprime alors:

$$X_0 = \frac{Y_2 f_1 \Delta C}{Y_2 f_1 - Y_1 f_2} = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} \quad (15)$$

A partir de la formule (15), nous remarquons que l'analyse des erreurs peut être réduite aux axes X,Z (l'analyse selon les axes X,Y apporterait les mêmes résultats).

Pour calculer l'erreur commise sur X_0 , nous calculerons l'expression de $X_{\text{erreur}} - X_0$, où X_{erreur} est l'expression de X_0 lorsqu'une source d'erreur intervient. Afin d'exprimer

$X_{\text{erreur}} - X_0$ uniquement en fonction de Z_0 , des données de calibrage et de Z_2 , nous utiliserons la formule:

$$Z_1 = \frac{Z_0 Z_2 f_1}{f_2 Z_0 + Z_2 \Delta C} \quad (16)$$

Signalons que la formule (16) peut très facilement être déduite des équations (1) et (3).

Pour chaque type d'erreur, nous donnons une représentation graphique de la fonction $X_{\text{erreur}} - X_0$. Afin de représenter le comportement de l'erreur de profondeur, nous ferons varier:

- . Z_2 , la position par rapport au point principal,
- . δ_{erreur} , l'erreur commise sur une des variables dont dépend X_0 (f_1 , f_2 , Z_1 , Z_2 et ΔC).

Nous fixerons f_1 , f_2 , ΔC et Z_0 . Les valeurs attribuées à ces variables correspondent à des valeurs issues de la phase de calibrage d'un zoom monté sur une MICAM [Conter *et al.*, 1984] (voir le chapitre 2 de la partie II). Bien entendu, ces valeurs peuvent être entachées d'erreurs.

Ainsi, pour représenter la fonction $X_{\text{erreur}} - X_0$, nous fixerons:

- . $f_1 = 32.6$ mm
- . $f_2 = 18.4$ mm
- . $\Delta C = 50.1$ mm,
- . $Z_0 = 10000$ pixels. Après échantillonnage, la taille d'un pixel est de 0.028 mm en Y et 0.015 mm en Z. Ainsi, nous avons $Z_0 = 10000 \times 0.015 = 150$ mm

Dans la suite de ce chapitre, pour chaque type d'erreur considéré, nous adopterons la démarche suivante:

- . détermination de la fonction $X_{\text{erreur}} - X_0$,
- . analyse de cette fonction afin de déterminer les cas où l'erreur est soit infinie, soit nulle.
- . représentation graphique de la fonction $X_{\text{erreur}} - X_0$. Afin de représenter cette fonction lorsque la position par rapport au point principal varie, nous ferons varier Z_2 entre 0 et 512 pixels.

Pour chaque type d'erreur, nous ferons varier l'erreur δ_{erreur} sur un ensemble de valeurs qui nous semblent refléter des conditions d'expérimentations réelles.

Afin de ne pas ennuyer le lecteur, les commentaires sur les différentes représentations graphiques obtenues seront donnés à la fin de ce chapitre.

4.- Erreurs de triangulation dues aux erreurs de mise en correspondance

Dans cette section, nous étudions les erreurs commises sur le calcul de la composante X_0 d'un point $P_0(X_0, Y_0, Z_0)$ lorsqu'une erreur de mise en correspondance intervient.

Pour simuler une erreur de mise en correspondance, nous supposerons qu'une erreur δz est commise sur l'estimation de la projection de P_0 sur l'axe des Z de l'image I_1 . Ainsi,

nous supposons que $Z_1 + \delta z$ et Z_2 ont été appariés (rappel: la vraie correspondance aurait dû être Z_1 et Z_2).

Si nous calculons X_{erreur} à partir des points appariés $Z_1 + \delta z$ et Z_2 , nous avons:

$$X_{\text{erreur}} = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - (Z_1 + \delta z) f_2} \quad (17)$$

Ainsi, $X_{\text{erreur}} - X_0$ s'exprime:

$$X_{\text{erreur}} - X_0 = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - (Z_1 + \delta z) f_2} - \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} \quad (18)$$

A partir des formules (16) et (18), nous obtenons:

$$X_{\text{erreur}} - X_0 = \frac{\delta z f_2 (f_2 Z_0 + Z_2 \Delta C)^2}{Z_2 (f_1 \Delta C Z_2^2 - \delta z \Delta C f_2 Z_2 - \delta z f_2^2 Z_0)} \quad (19)$$

4.1.- Discussion de l'équation présentée

A partir de la formule (19), nous constatons que:

. L'erreur est infinie si:

- $Z_2 = 0$. Ce cas correspond aux points situés sur l'axe optique.
- $f_1 \Delta C Z_2^2 - \delta z \Delta C f_2 Z_2 - \delta z f_2^2 Z_0 = 0$. Le discriminant de cette équation est: $(\delta z \Delta C f_2)^2 + 4 f_1 f_2^2 \delta z \Delta C Z_0 \geq 0$. Comme ce discriminant est toujours positif, nous avons:

$$Z_2 = \frac{\delta z f_2}{2 f_1} \pm \frac{f_2 \sqrt{(\delta z \Delta C)^2 + 4 f_1 \delta z \Delta C Z_0}}{2 f_1 \Delta C} \quad (20)$$

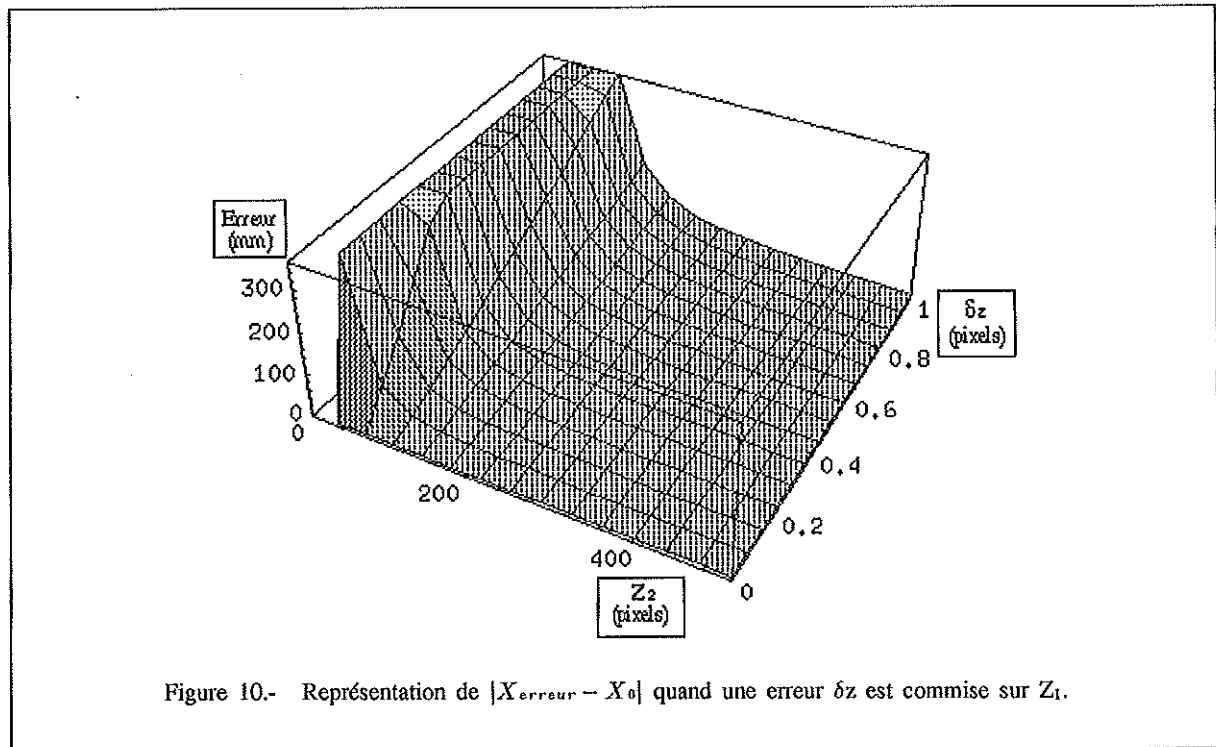
La formule (20) définit une zone, autour du point principal, où les erreurs de triangulation sont très importantes. Nous remarquons que plus δz est grand, plus le rayon de cette zone est important.

. L'erreur est nulle si:

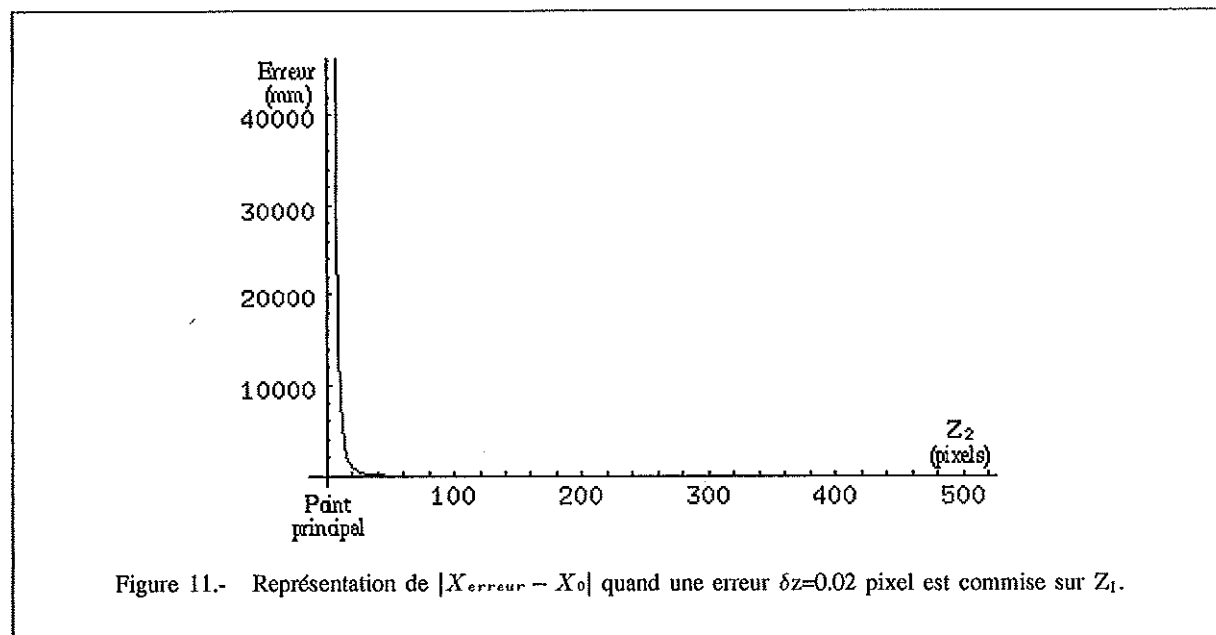
- $\delta z = 0$. Si on ne commet pas d'erreur sur Z_1 , l'erreur sur la profondeur est évidemment nulle.
- $f_2 = 0$. C'est un cas impossible.
- $Z_0 f_2 + Z_2 \Delta C = 0$. Ce cas est également impossible. En effet, Z_0 et Z_2 sont de même signe et f_2 et ΔC sont positifs.

4.2.- Représentations graphiques

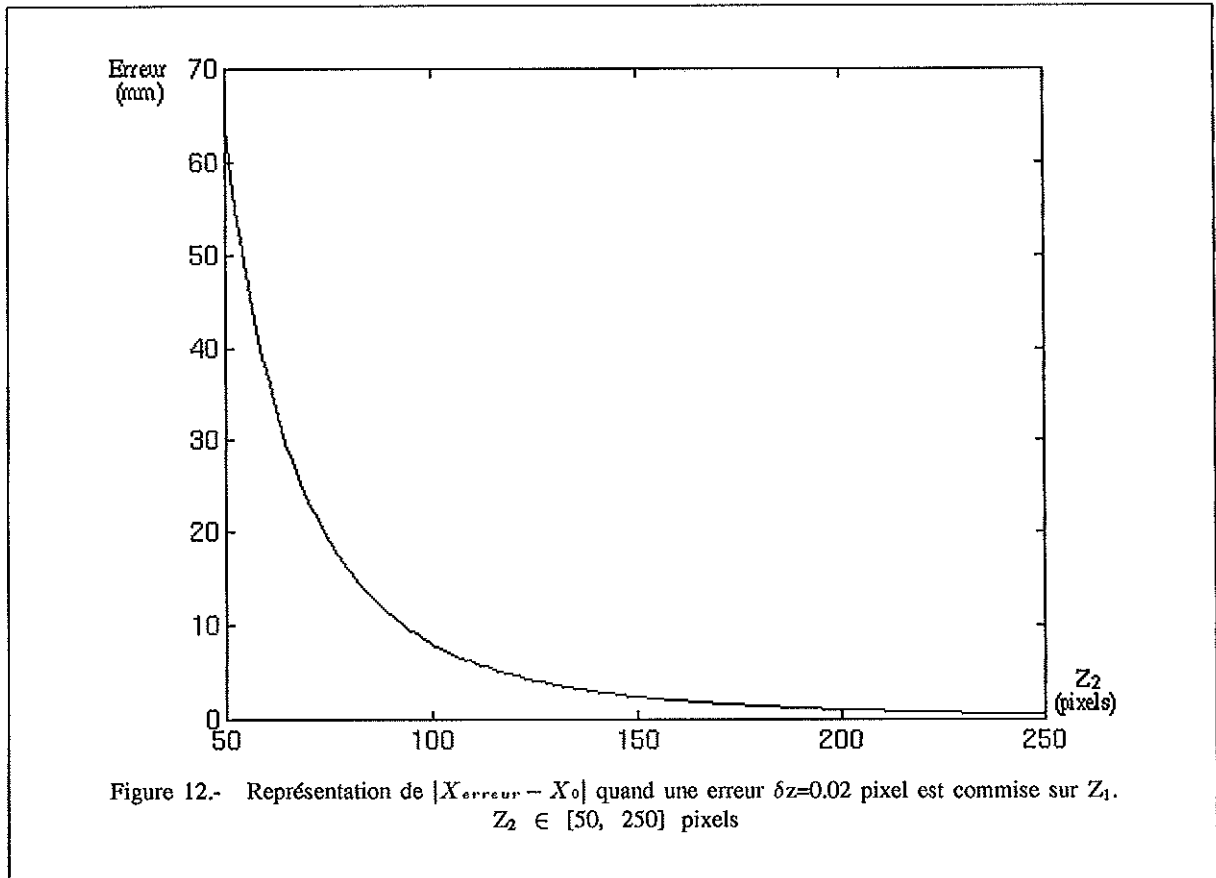
Afin de représenter l'équation (19), nous faisons varier δz entre 0 et 1 pixel. Pour voir le comportement de l'erreur en fonction de la position radiale, nous faisons également varier Z_2 entre 0 et 512 pixels.



La figure suivante, représente l'équation (19), lorsqu'une erreur théorique de 0.02 pixel se produit. Cette erreur de 0.02 pixel correspond à la précision actuelle des méthodes de calibrage [Abi-Ayad, 1989, Beyer, 1992].



La figure 11 montre que l'erreur est très importante au voisinage du point principal. Afin de mieux apprécier la décroissance de l'erreur de triangulation lorsque la distance radiale augmente, représentons la fonction $|X_{\text{erreur}} - X_0|$ pour les valeurs de Z_2 comprises entre 50 et 250 pixels.



La figure 12 montre clairement que, pour une erreur théorique de mise en correspondance très faible, l'erreur de triangulation devient inférieure à 1 mm lorsque la distance radiale est supérieure à 200 pixels.

5.- Erreurs de triangulation dues aux erreurs de calibrage

Parmi les erreurs de calibrage, nous distinguons:

- . l'erreur sur l'estimation du point principal,
- . l'erreur sur l'estimation de ΔC , distance entre les centres optiques,
- . la mauvaise estimation des focales f_1 et f_2 .

5.1.- Erreur sur l'estimation du point principal

Nous étudions ici les erreurs de triangulation quand la position du point principal est erronée, à l'issue du processus de calibrage.

Pour simuler une erreur δz sur la position du point principal, nous considérons que les points appariés sont $Z_1 + \delta z$ et $Z_2 + \delta z$ (rappel: la vraie correspondance aurait dû être Z_1 et Z_2). Ainsi, si nous calculons $X_{\text{erreur}} - X_0$ à partir des équations (15) et (16), nous obtenons:

$$X_{\text{erreur}} - X_0 = \frac{\delta z f_2 ((f_2 - f_1)Z_0 + Z_2 \Delta C) (f_2 Z_0 + Z_2 \Delta C)}{Z_2 (f_1 \Delta C Z_2^2 + (f_1 - f_2) \delta z \Delta C Z_2 + (f_1 - f_2) \delta z Z_0 f_2)} \quad (21)$$

5.1.1.- Discussion de l'équation présentée

A partir de la formule (21), on constate que:

. L'erreur est infinie si:

- $Z_2 = 0$. Ce cas correspond aux points situés sur l'axe optique.
- $f_1 \Delta C Z_2^2 + (f_1 - f_2) \delta z \Delta C Z_2 + (f_1 - f_2) \delta z Z_0 f_2 = 0$. Le discriminant de cette équation est:

$$(\delta z \Delta C (f_1 - f_2))^2 - 4 f_1 f_2 \delta z (f_1 - f_2) \Delta C Z_0 \begin{cases} \geq 0 & \text{si } f_2 \geq f_1 \\ < 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (22)$$

Dans le cas où $f_2 \geq f_1$, nous avons:

$$Z_2 = \frac{(f_2 - f_1) \delta z}{2 f_1} \pm \frac{\sqrt{(\delta z \Delta C (f_1 - f_2))^2 - 4 f_1 f_2 \delta z (f_1 - f_2) \Delta C Z_0}}{2 f_1 \Delta C} \quad (23)$$

La formule (23) définit, autour du point principal, une zone où les erreurs sont très importantes. Le rayon de cette zone dépend de δz .

. L'erreur est nulle si:

- $\delta z = 0$. Si on ne commet pas d'erreur sur le point principal, l'erreur sur la profondeur est évidemment nulle.
- $Z_0 f_2 + Z_2 \Delta C = 0$. Ce cas est impossible.
- $(f_2 - f_1) Z_0 + Z_2 \Delta C = 0$. A partir de l'équation (4), nous déduisons facilement que ce cas correspond à une configuration particulière où un point de l'espace se projette aux mêmes endroits sur les deux images ($Z_1 = Z_2$).

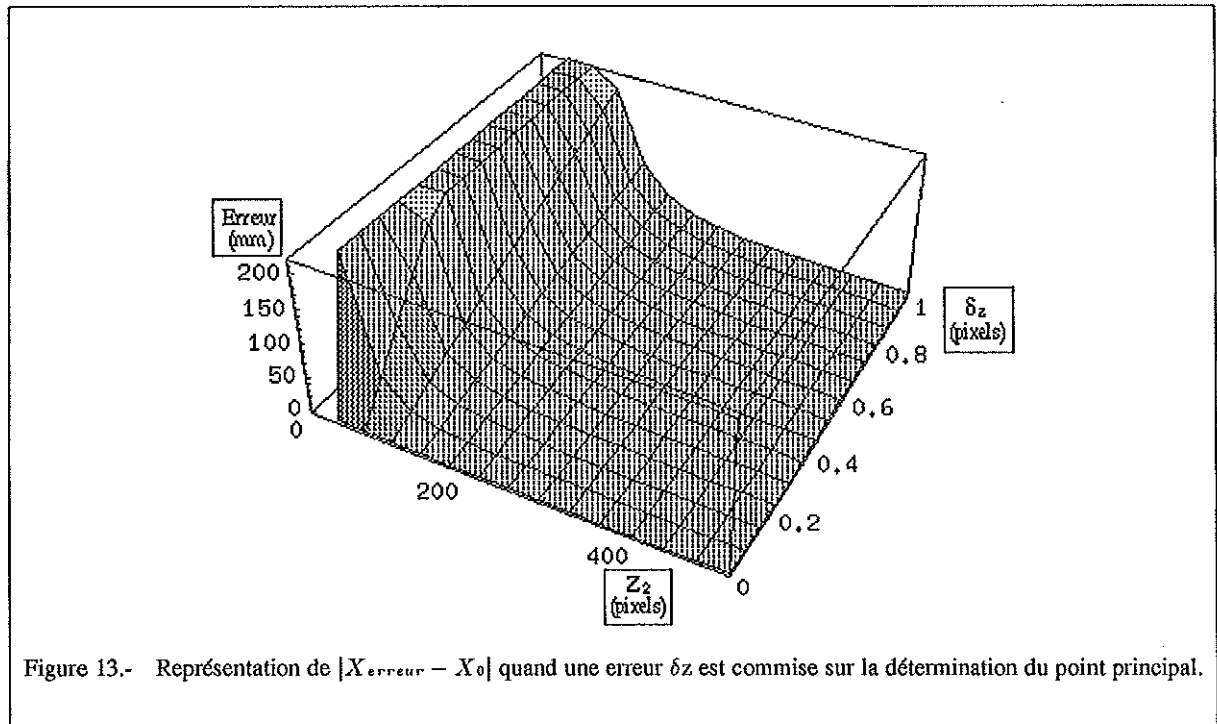
Lorsque $Z_1 = Z_2$, nous avons:

$$X_0 = \frac{(Z_2 + \delta z) f_1 \Delta C}{(Z_2 + \delta z) f_1 - (Z_1 + \delta z) f_2} = \frac{Z_2 f_1 \Delta C}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} = \frac{f_1 \Delta C}{f_1 - f_2} \quad (24)$$

Dans ce cas X_0 est indépendant de l'erreur δz .

5.1.2.- Représentation graphique

Afin de représenter l'équation (21), nous faisons varier δz entre 0 et 1 pixel.



5.2.- Erreur sur l'estimation de ΔC (distance entre les centres optiques)

Maintenant, nous étudions le comportement des erreurs de triangulation quand une erreur sur l'estimation de ΔC survient. Supposons que l'erreur sur ΔC soit δc , alors nous obtenons:

$$X_{erreur} = \frac{Z_2 f_1 (\Delta C + \delta c)}{Z_2 f_1 - Z_1 f_2} \quad (25)$$

Ainsi, à partir des équations (16) et (25), nous obtenons la formule suivante:

$$X_{erreur} - X_0 = \frac{\delta c}{Z_2 \Delta C} (f_2 Z_0 + Z_2 \Delta C) \quad (26)$$

5.2.1.- Discussion de l'équation présentée

A partir de la formule (26), on constate que:

. L'erreur est infinie si:

- $Z_2 = 0$. Ce cas correspond aux points situés sur l'axe optique.
- $\Delta C = 0$. Dans ce cas, il est impossible de calculer la position d'un point dans l'espace.

. L'erreur est nulle si:

- $\delta c = 0$. Si on ne commet pas d'erreur sur ΔC , l'erreur sur la profondeur est évidemment nulle.
- $Z_0 f_2 + Z_2 \Delta C = 0$. Ce cas est impossible.

5.2.2.- Représentation graphique

Afin de représenter l'équation (26), nous faisons varier l'erreur δc entre 0 et 10 mm.

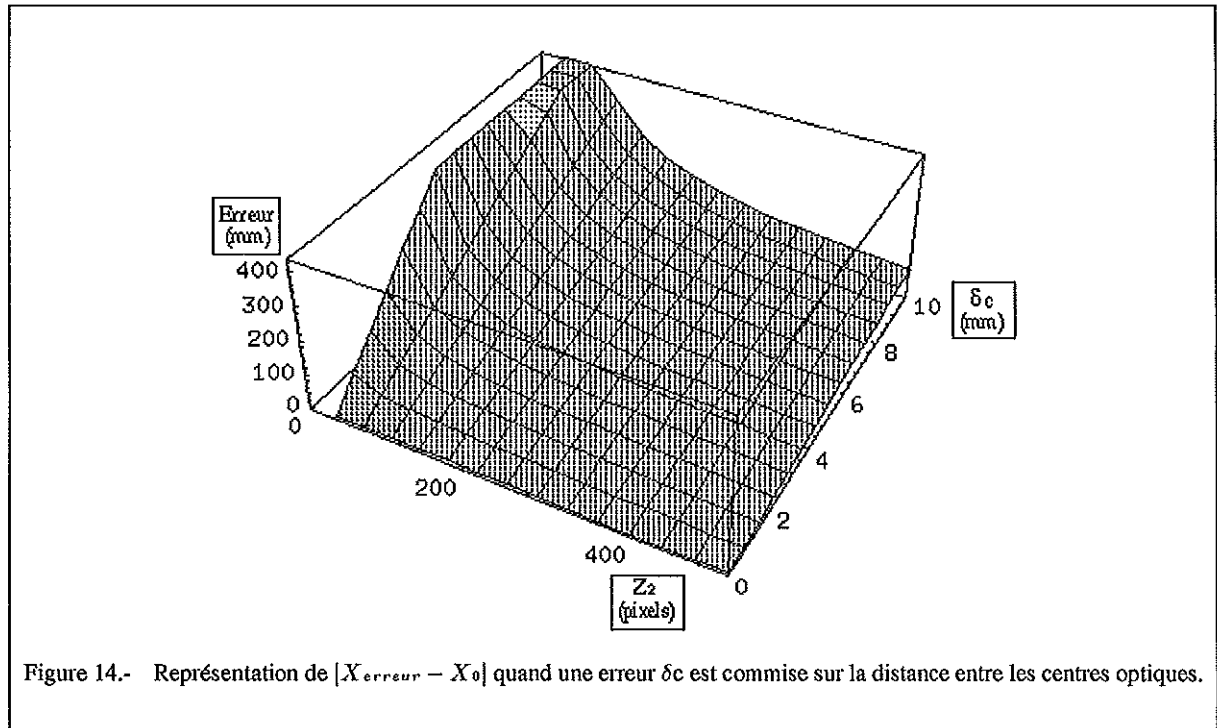


Figure 14.- Représentation de $|X_{erreur} - X_0|$ quand une erreur δc est commise sur la distance entre les centres optiques.

5.3.- Erreur sur l'estimation des focales

Dans cette dernière section, nous étudions le comportement des erreurs de triangulation quand une erreur sur l'estimation des focales survient. Nous supposons que la même erreur δf est commise sur chacune des focales. Cette erreur peut correspondre, lors de la phase de calibrage, à de mauvaises conditions d'éclairage, un défaut du numériseur, Ainsi, nous avons:

$$X_{erreur} = \frac{Z_2 (f_1 + \delta f) \Delta C}{Z_2 (f_1 + \delta f) - Z_1 (f_2 + \delta f)} \quad (27)$$

Ainsi, à partir des équations (16) et (27), nous obtenons la formule suivante:

$$X_{erreur} - X_0 = \frac{\delta f Z_0 (f_1 - f_2) (f_2 Z_0 + Z_2 \Delta C)}{Z_2 ((f_2 - f_1) Z_0 \delta f + Z_2 \Delta C (\delta f + f_1))} \quad (28)$$

5.3.1.- Discussion de l'équation présentée

A partir de la formule (28), nous constatons que:

. L'erreur est infinie si:

- $Z_2 = 0$. Ce cas correspond aux points situés sur l'axe optique.
- $(f_2 - f_1) Z_0 \delta f + Z_2 \Delta C (\delta f + f_1) = 0$. A partir de l'égalité précédente, nous avons:

$$Z_2 = \frac{(f_1 - f_2) Z_0 \delta f}{(\delta f + f_1) \Delta C} \quad (29)$$

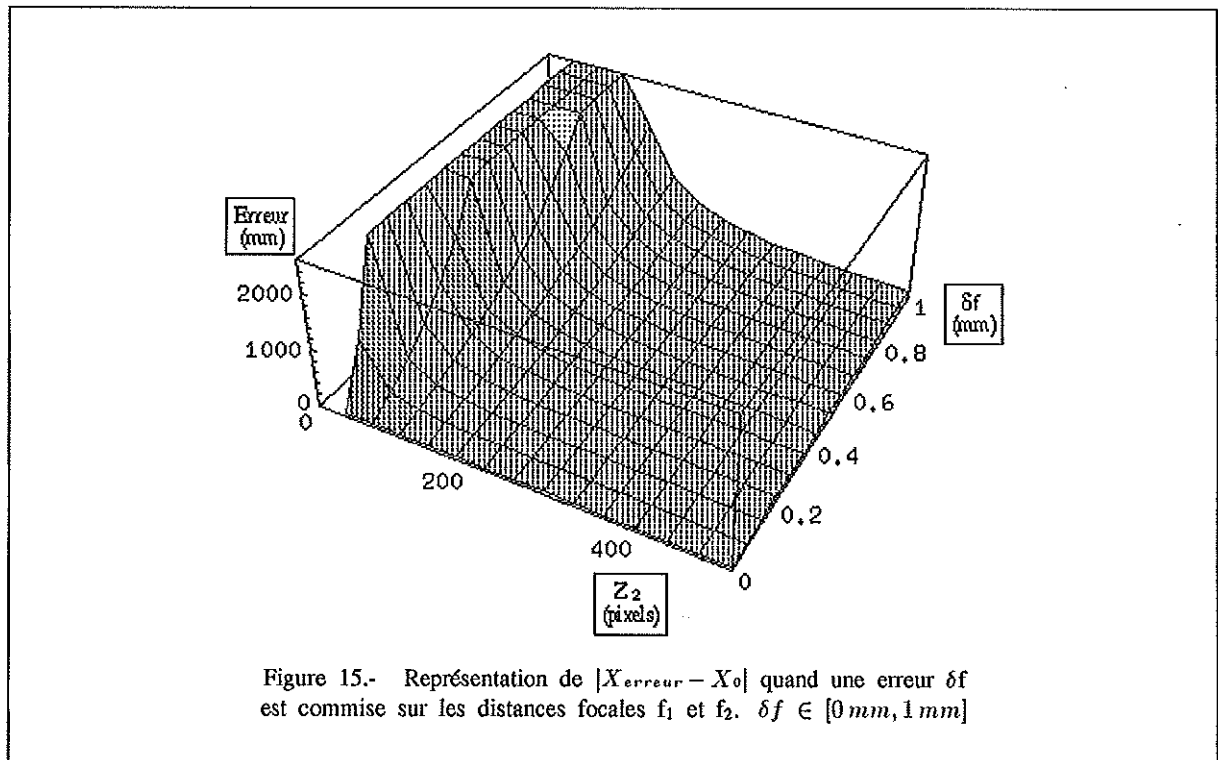
L'équation (29) définit une zone autour du point principal, où les erreurs sont très importantes. Plus δf est grand, plus la surface de cette zone est importante.

. L'erreur est nulle si:

- $\delta f = 0$. Si l'erreur commise sur les focales est nulle, l'erreur sur le calcul de la profondeur est nulle.
- $Z_0 = 0$. Ce cas n'est pas à prendre en compte car nous savons que, pour les points situés sur l'axe optique, l'erreur est infinie.
- $f_1 = f_2$. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que, lors du déplacement axial d'une caméra, X_0 est indépendant de la focale (voir équation (9)).
- $Z_0 f_2 + Z_2 \Delta C = 0$. Ce cas est impossible.

5.3.2.- Représentation graphique

Afin de représenter l'équation (28), nous faisons varier l'erreur δf entre 0 et 1 mm.



6.- Analyse des représentations graphiques

A partir des figures 10 à 15, représentant la variation de l'erreur de triangulation en fonction de différentes sources d'erreurs et de la position par rapport au point principal, nous constatons que:

- . Plus on s'éloigne du point principal, plus l'erreur est faible. Ceci est valable pour toutes les erreurs considérées.
- . Une erreur de correspondance inférieure au pixel engendre des erreurs importantes, surtout près du point principal.
- . Une faible erreur sur l'estimation des focales engendre des erreurs de triangulation importantes.
- . Une erreur sur la position des centres optiques a peu de conséquences, car l'erreur sur le calcul de la profondeur diminue rapidement quand la distance radiale augmente.

Notons que ces résultats, valables dans un système axial "général", confirment les conclusions de [Carmona, 1991, Nguyen *et al.*, 1992], concernant les erreurs dans un système axial "à déplacement de caméra".

7.- Conclusion

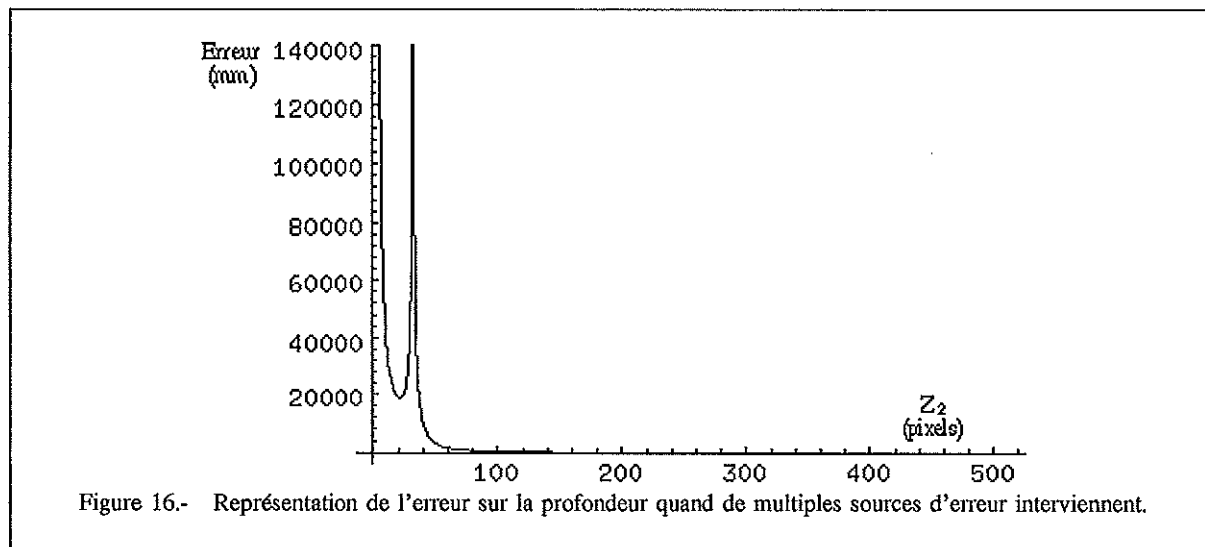
Dans ce chapitre, nous avons réalisé une étude théorique des erreurs de profondeur dans un système axial "général". Nous avons étudié le comportement de ces erreurs face aux erreurs de correspondance et aux erreurs de calibrage.

Dans cette étude, nous n'avons considéré qu'une seule source d'erreur à la fois. Mais en pratique, plusieurs types d'erreurs peuvent survenir en même temps. Afin de représenter la variation de l'erreur en fonction de la position radiale lorsque plusieurs sources d'erreurs sont présentes, nous avons fixé arbitrairement:

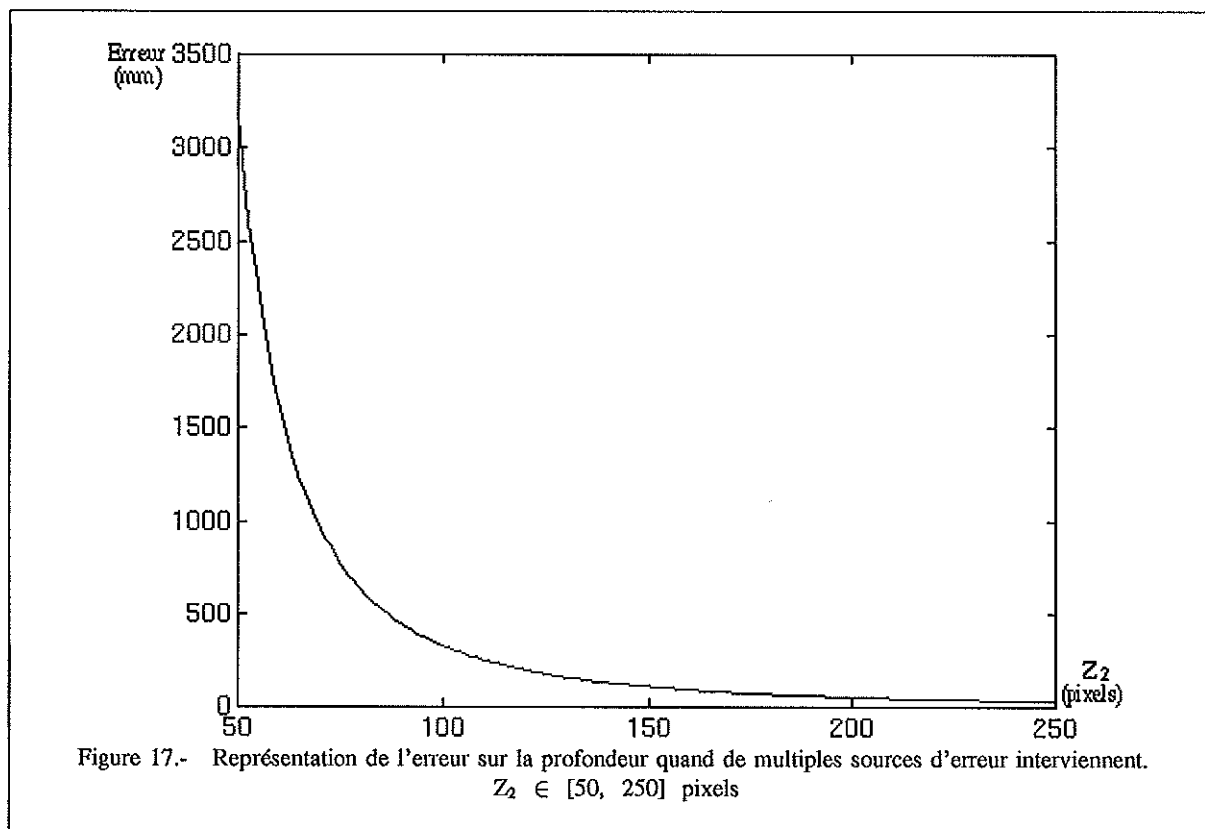
- . l'erreur de mise en correspondance à 0.5 pixel,
- . l'erreur sur la position du point principal à 0.05 pixel,
- . l'erreur sur la distance entre les centres optiques à 0.05 mm,
- . l'erreur sur chaque focale à 0.05 mm.

Nous pensons que les valeurs fixées représentent les erreurs généralement commises sur la détermination des différentes variables dont dépend la profondeur.

La figure 16 représente l'erreur de triangulation quand de multiples sources d'erreur interviennent.



Afin de mieux apprécier la décroissance de l'erreur de triangulation lorsque la distance radiale augmente, représentons la même fonction pour les valeurs de Z_2 comprises entre 50 et 250 pixels (voir figure 17).



A partir des figures 16 et 17, nous voyons clairement que:

- . L'erreur est inférieure à 50 mm pour les points situés au-delà de 250 pixels du point principal.
- . Deux pics, où l'erreur est infinie, sont visibles.

Le premier pic correspond aux points situés sur l'axe optique.

Nous n'avons pu donner de signification physique au deuxième pic.

Signalons tout de même que la zone située entre ces deux pics correspond à une erreur d'environ 20000 mm.

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent qu'un certain nombre de conditions doivent être réunies, lors de l'utilisation d'un système axial "général". Il faut notamment:

- . obtenir un calibrage haute précision [Abi-Ayad, 1989, Beyer, 1992, Tsai, 1986, ...],
- . réaliser une mise en correspondance avec une précision inférieure au pixel [Hyde *et al.*, 1983, Overington *et al.*, 1987, ...],
- . éviter les points trop proches du point principal,
- . augmenter le nombre de pixels par image.

Dans les expérimentations présentées dans la suite de ce mémoire, nous avons tenu compte de ces conclusions.

**PARTIE II.-
CALIBRAGE D'UN SYSTEME
DE STEREOVISION AXIALE**

CHAPITRE 1.-
Etat de l'art et choix réalisés dans ce mémoire

1.- Introduction

Le calibrage d'un système de vision tridimensionnelle est une étape obligatoire. En effet, la connaissance de la géométrie du système de prise de vues permet:

- . de restreindre à une droite l'espace de recherche de l'homologue d'un point. Cette droite est appelée droite épipolaire;
- . de calculer la position d'un point de l'espace à partir de ses projections dans chacune des images.

Dans le cas d'un système axial, ce calibrage doit être très précis. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 de la partie I, de faibles erreurs de calibrage engendrent des erreurs importantes sur la calcul de la position d'un point.

Dans ce chapitre, nous étudions la bibliographie sur le calibrage d'un système axial. Nous verrons notamment que les principales publications font état d'un calibrage en deux phases:

- . détermination du point principal,
- . calcul des autres paramètres du système de prise de vues.

Nous analyserons cette méthode de calibrage et nous verrons les problèmes qui peuvent survenir si le système étudié n'est pas véritablement axial.

Nous détaillerons alors les choix que nous avons faits, afin de calibrer une caméra en mouvement sur son axe physique ou munie d'un zoom.

2.- Rappels sur le calibrage par projection centrale et conventions

Afin de modéliser le processus de formation des images, différents modèles ont été généralement utilisés. Parmi ces modèles, nous trouvons le modèle par projection centrale (appelé également modèle sténopé), le modèle lentille mince et le modèle lentille épaisse. L'équivalence de ces trois modèles a été démontrée dans [Carmona, 1991].

Lors de nos expériences, nous avons choisi le modèle par projection centrale en raison de sa simplicité géométrique.

Réaliser un calibrage par projection centrale consiste à évaluer la transformation \mathbb{C} permettant de passer des coordonnées 3D d'un point $P(x_{3d}, y_{3d}, z_{3d})$ de la scène observée, aux coordonnées 2D (y_{2d}, z_{2d}) de l'image de ce point, exprimées dans le repère image. Les coordonnées 2D homogènes sont données ainsi:

$$\begin{pmatrix} w \cdot y_{2d} \\ w \cdot z_{2d} \\ w \end{pmatrix} = \mathbb{C} \times \begin{pmatrix} x_{3d} \\ y_{3d} \\ z_{3d} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (30)$$

où C est une matrice de dimension $[3,4]$ appelée matrice de calibrage et définie de la façon suivante:

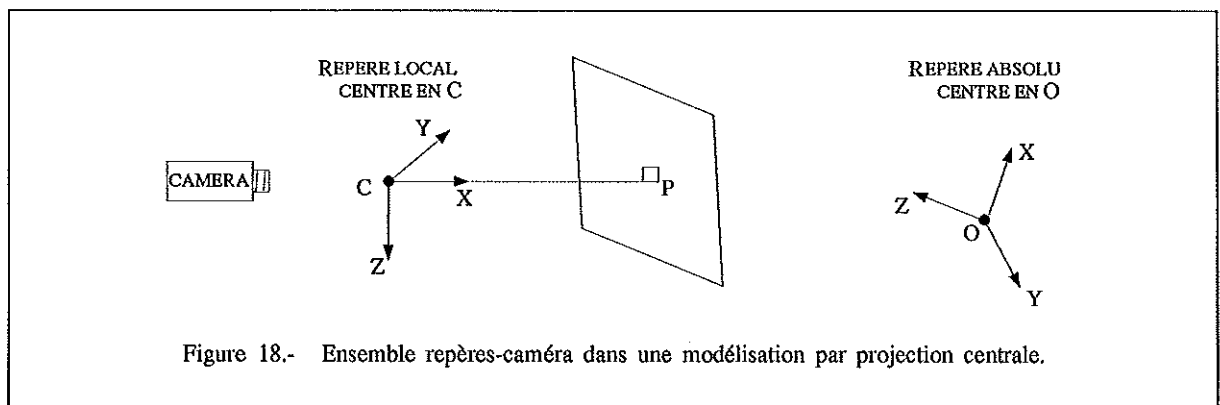
$$\left\{ \begin{array}{l} c_{11} = py.r_{11} + f.ey.r_{21} \\ c_{12} = py.r_{12} + f.ey.r_{22} \\ c_{13} = py.r_{13} + f.ey.r_{23} \\ c_{14} = -py.(r_{11}.lx + r_{12}.ly + r_{13}.lz) - f.ey.(r_{21}.lx + r_{22}.ly + r_{23}.lz) \\ c_{21} = pz.r_{11} + f.ez.r_{31} \\ c_{22} = pz.r_{12} + f.ez.r_{32} \\ c_{23} = pz.r_{13} + f.ez.r_{33} \\ c_{24} = -pz.(r_{11}.lx + r_{12}.ly + r_{13}.lz) - f.ez.(r_{31}.lx + r_{32}.ly + r_{33}.lz) \\ c_{31} = r_{11} \\ c_{32} = r_{12} \\ c_{33} = r_{13} \\ c_{34} = -(r_{11}.lx + r_{12}.ly + r_{13}.lz) \end{array} \right. \quad (31)$$

où (voir figure 18) :

- (py, pz) sont les coordonnées du point principal P dans le repère image.
- $R(r_{ij}; i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3)$ est la matrice de rotation permettant de passer du repère absolu au repère local centré sur le centre optique.
- (lx, ly, lz) sont les coordonnées du centre optique C dans le repère absolu.
- f est la longueur focale ($f = \|\vec{CP}\|$)
- (ey, ez) sont les dimensions d'un pixel.

Le repère local centré en C est tel que (voir figure 18):

- . l'axe des X est orienté vers le plan image,
- . l'axe des Y est parallèle aux lignes de l'image,
- . l'axe des Z est parallèle aux colonnes de l'image.



Dans ce mémoire, toutes les expériences menées sur le calibrage ont été réalisées grâce aux outils disponibles dans notre laboratoire [Abi-Ayad, 1989, Ragi, 1989].

Nous avons notamment utilisé un logiciel d'estimation de paramètres au sens de la régression en distance orthogonale (O.D.R: Orthogonal Distance Regression). La meilleure précision obtenue sur le modèle mathématique est de l'ordre de 2/100 de pixel.

3.- Quelques mots de la bibliographie sur le calibrage d'un système axial

Afin de calibrer un système axial, divers auteurs ont étudié les propriétés des points de fuite. En effet, la géométrie particulière des systèmes axiaux permet de confondre les points de fuite et les points principaux. Ainsi, [Carmona, 1991, Lavest *et al.*, 1992, Lenz *et al.*, 1987, ...] proposent un calibrage en deux phases:

- . détermination du point principal,
- . calcul des autres paramètres de calibrage.

Dans cette section, nous n'étudierons que la phase de calcul du point principal P_p . En effet, le calcul des autres paramètres de calibrage se fait de façon classique en fixant les coordonnées (py, pz) des points principaux [Abi-Ayad, 1989].

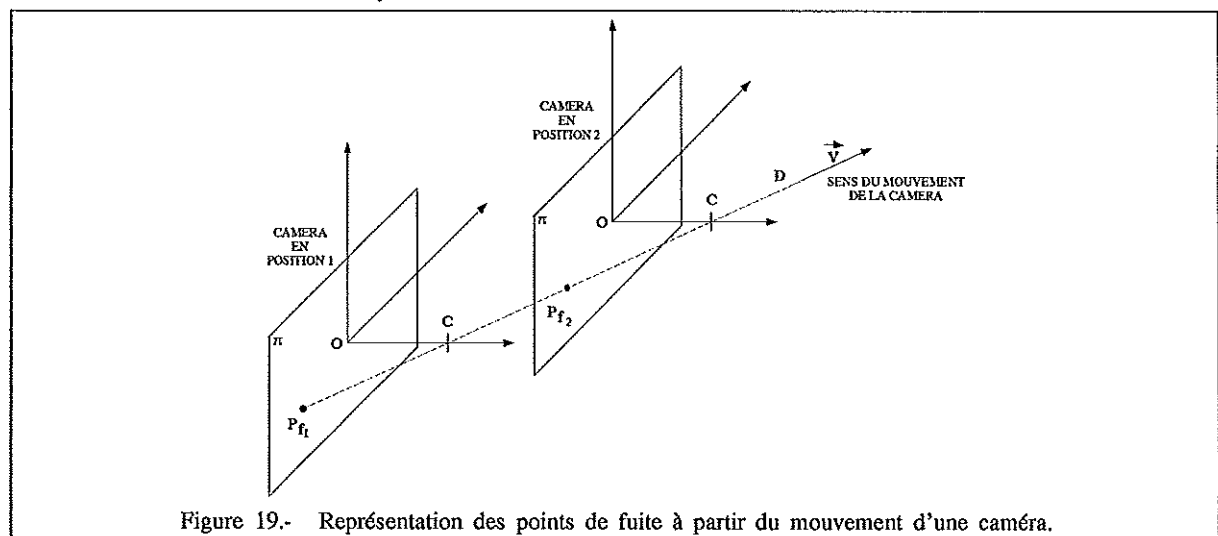
Mais donnons tout d'abord la définition des points de fuite.

3.1.- Les points de fuite

La notion de point de fuite a été utilisée dans [Jain, 1983] afin de modéliser le mouvement d'une caméra de façon simple et rapide. Dans le cas d'une caméra en mouvement, le point de fuite P_f se définit de la façon suivante:

- . soit \vec{V} un vecteur représentant la direction du mouvement de la caméra,
- . soit C le centre optique de l'objectif de la caméra,
- . soit D la droite 3D définie par \vec{V} et C ,
- . soit π le plan de projection de la caméra.

Le point de fuite est $P_f = \pi \cap D$ (voir figure 19).



Remarquons que, lors d'un mouvement de la caméra le long de l'axe optique, le point de fuite coïncide avec le point principal. Signalons enfin que les points de fuite sont aux caméras en mouvement, ce que les épipôles sont aux systèmes binoculaires classiques.

3.2.- Détermination du point principal

Le calcul du point principal est réalisé à partir de n images prises par une caméra:

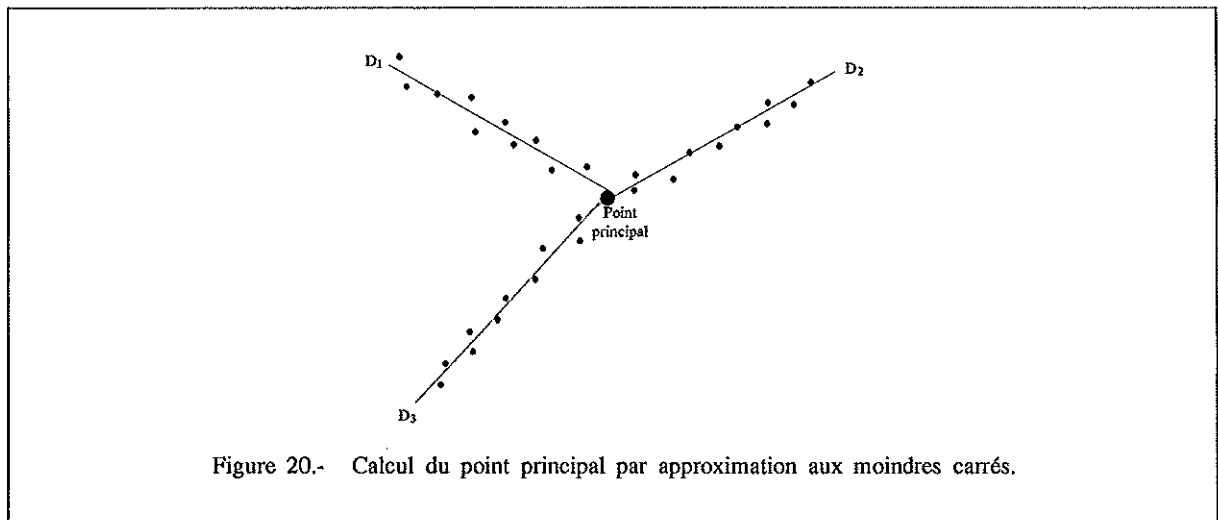
- . soit en mouvement sur son axe optique,
- . soit munie d'un zoom. Dans ce cas, les n images sont acquises par variation de la distance focale.

Les auteurs ont utilisé divers types d'images:

- . un plan contenant des disques à surfaces mates uniformes [Carmona, 1991]. Les centres de ces disques peuvent être calculés avec une grande précision [Ragi, 1989];
- . une grille où toutes les intersections des lignes et des colonnes sont considérées comme des points caractéristiques [Lavest *et al.*, 1992].

Après détection, dans les n images, des projections des points caractéristiques (centres de disques ou points d'intersection de la grille), nous constatons que, pour un point caractéristique donné, ses projections sont approximativement alignées. Ainsi, le point principal peut être calculé de la façon suivante:

Pour chaque point caractéristique P_i , un calcul aux moindres carrés permet de déterminer la droite D_i , passant par ses projections p_j dans chacune des images (voir figure 20).

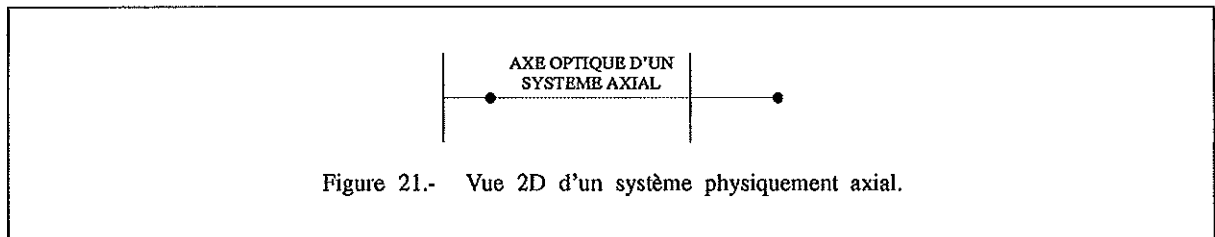


Le calcul de l'intersection des droites D_i , au sens des moindres carrés, permet d'estimer les coordonnées du point principal (voir figure 20).

Au cours des expériences décrites dans [Lenz *et al.*, 1987], un mouvement en spirale du point principal a été observé. [Carmona, 1991, Lavest *et al.*, 1992] ont montré que la stabilité des coordonnées du point principal dépend du nombre d'images et du nombre de points caractéristiques par image.

4.- Analyse des méthodes actuelles de calibrage d'un système axial

Lors du calibrage d'un système physiquement axial, la méthode présentée précédemment permet de calculer très facilement la position du point principal. En effet, si le système est parfaitement axial, nous pouvons confondre les points de fuite, les épipôles et les points principaux (voir figure 21).



L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle suppose que le système est axial avant de le calibrer. La question clef est donc de savoir si un système physiquement axial existe. A notre connaissance, les trois systèmes pouvant être axiaux sont:

- . une caméra en mouvement sur un rail (voir figure 22) ou au bout du bras d'un robot,
- . une caméra munie d'un zoom.

Dans la suite de ce chapitre, nous étudierons les systèmes optiques décrits ci-dessus et nous verrons qu'ils ne sont généralement pas physiquement axiaux. A partir de cette constatation, nous analyserons les erreurs commises sur le calcul du point principal avec la méthode exposée précédemment.

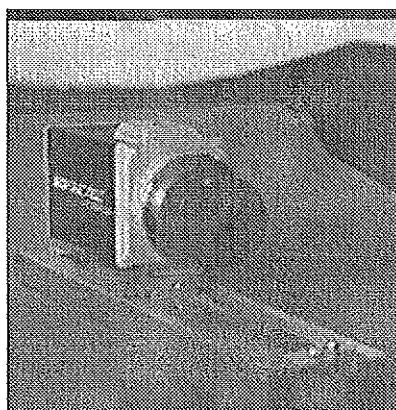
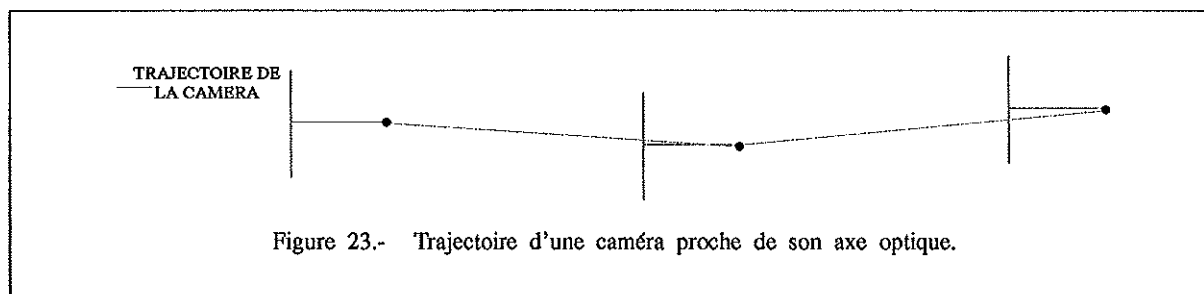


Figure 22.- Rail d'expérimentation d'une caméra en mouvement sur son axe (proche de l'axe optique).

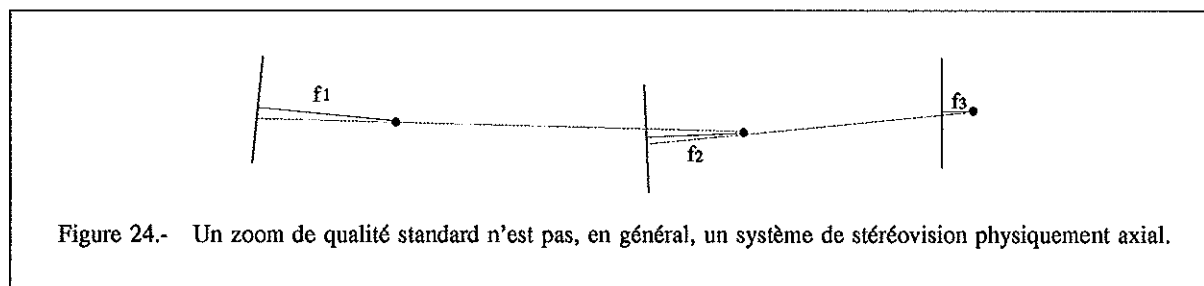
4.1.- Cas d'une caméra en mouvement sur un rail ou au bout du bras d'un robot

La condition pour qu'une caméra en mouvement forme un système physiquement axial est que sa trajectoire soit confondue avec son axe optique. Si ceci est possible en théorie, en pratique, le mouvement ne se fait pas parfaitement selon l'axe optique mais s'en approche (voir figure 23). En effet, des problèmes mécaniques subsistent toujours et ne permettent pas un mouvement parfait selon l'axe optique.



4.2.- Cas d'une caméra munie d'un zoom

Dans un zoom de qualité standard, le changement de focale est réalisé par rotation-translation d'un ou plusieurs blocs de lentilles. Ainsi, deux focales distinctes d'un zoom doivent être considérées comme deux systèmes optiques complètement différents [Wiley *et al.*, 1990]. En effet, il n'y a pas de raison que les axes optiques soient identiques d'une focale à l'autre (voir figure 24).

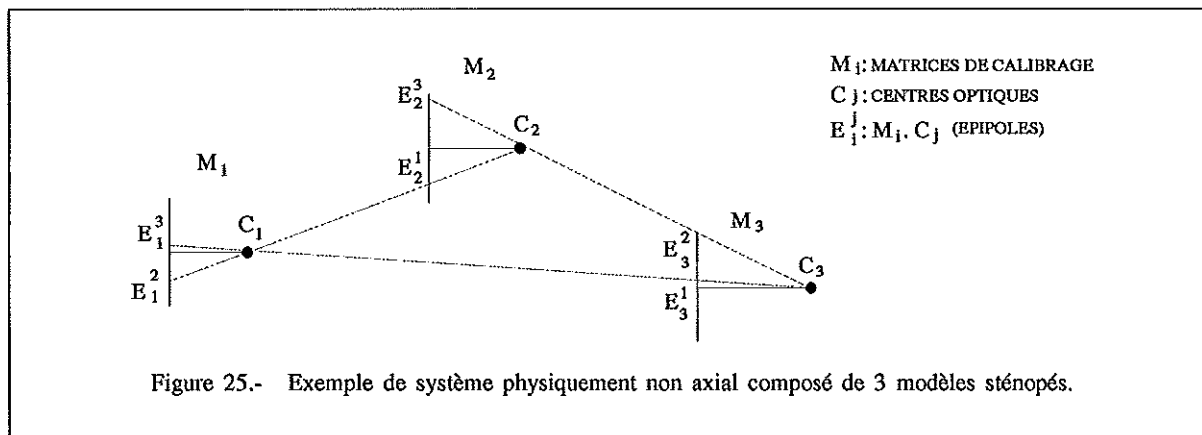


Nous avons pu vérifier cette hypothèse en calibrant indépendamment un certain nombre de focales de notre zoom (voir chapitre 2 de la partie II).

A notre connaissance, seul J.M.Lavest a pu s'approcher d'un système axial [Lavest *et al.*, 1992], en utilisant un zoom haut de gamme [Angénieux, 1956] (changement de focale réalisé par translation pure de deux blocs mobiles de lentilles).

4.3.- Conséquences de l'utilisation d'un système physiquement non axial.

Une caméra en mouvement ou munie d'un zoom de qualité standard n'est pas, en général, un système physiquement axial. Ainsi, le calcul aux moindres carrés du point principal à partir de n images, ne peut fournir le bon résultat. Ceci se comprend très bien car, dans ce cas, les points principaux et les points de fuite ne sont pas confondus (voir figure 25).



Le calcul du point principal aux moindres carrés revient approximativement à calculer la position moyenne des points de fuite (épipôles). La formule (32) exprime la position moyenne \bar{E} des épipôles dans un système composé de n modèles sténopés.

$$\begin{aligned}
 \bar{E} &= \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{i-1} E_i^j + \sum_{j=i+1}^n E_i^j \right) \\
 &= \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{i-1} M_i C_j + \sum_{j=i+1}^n M_i C_j \right)
 \end{aligned} \tag{32}$$

où:

- . M_i est la matrice de calibration associée au modèle sténopé i ,
- . C_i est le centre optique associé au modèle sténopé i ,
- . $E_i^j = M_i C_j$, E_i^j est l'épipôle du modèle sténopé i associé au modèle sténopé j .

A partir de l'équation (32), nous comprenons les raisons pour lesquelles Lenz a observé diverses positions du point principal. En effet, en fonction des valeurs de n , les valeurs de \bar{E} peuvent être très différentes. Nous comprenons également que l'augmentation du nombre d'images (augmentation de n) tend à stabiliser \bar{E} autour d'une position moyenne.

5.- Conclusion et choix réalisés dans ce mémoire

Contrairement aux approches de [Carmona, 1991, Lavest *et al.*, 1992], nous ne supposons plus qu'un système de stéréovision est physiquement axial pour le calibrer. Cette démarche évite les erreurs dues à un mauvais déplacement du centre optique le long de l'axe optique.

Ainsi, dans la suite de cette partie consacrée au calibration d'un système axial, nous présenterons:

- . Le calibration d'un zoom de qualité standard. Le zoom sera considéré comme un ensemble de focales discrètes qui seront calibrées indépendamment les unes des autres;

- . Le calibrage d'une caméra en mouvement dont la trajectoire est proche de son axe optique. Nous considérerons le cas d'une caméra en mouvement sur un rail. La caméra sera calibrée en un certain nombre de positions sur le rail. Signalons que chaque calibrage réalisé sera indépendant des autres.

A l'aide des résultats de calibrage, nous montrerons que les systèmes optiques considérés ne sont pas des systèmes physiquement axiaux. Nous arrivons donc à la conclusion suivante:

Une caméra munie d'un zoom de qualité standard ou se déplaçant sur son axe n'est pas, en général, un système véritablement axial: elle doit se modéliser comme un système de stéréovision classique.

Ainsi, dans ce qui suit, nous présenterons une méthode permettant d'obtenir un vrai système de stéréovision axiale par rectification géométrique à partir d'un système presque axial.

La rectification proposée sera utilisée lors de la phase de mise en correspondance afin de:

- . simplifier les calculs des droites épipolaires,
- . utiliser les propriétés de l'espace de recherche, propres aux systèmes de stéréovision axiale, qui ont été décrites au chapitre 1 de la partie I.

Rappelons que, dans un système de stéréovision axiale, les droites épipolaires sont radiales et émergent du point principal.

Signalons que les matrices de calibrage obtenues par rectification sont utilisées afin de calculer la position d'un point dans l'espace.

**CHAPITRE 2.-
Calibrage d'une caméra munie d'un
zoom ou se déplaçant sur un rail**

1.- Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le calibrage par projection centrale de deux systèmes optiques:

- . une caméra munie d'un zoom de qualité standard,
- . une caméra se déplaçant sur un rail.

Le but de ce chapitre est de montrer que les systèmes optiques considérés ne sont pas véritablement des systèmes de stéréovision axiaux. Il devront donc être modélisés comme des systèmes de stéréovision classiques.

Rappelons que dans tout ce chapitre les conventions adoptées sont conformes à la figure 18 présentée page 46.

2.- Description du processus de calibrage

Pour calibrer un système stéréoscopique, un grand nombre de points non coplanaires, détectables de façon précise, est indispensable. En effet, les paramètres de calibrage sont généralement déterminés par l'intermédiaire de méthodes d'optimisation, nécessitant la connaissance de points connus par leurs positions dans l'espace et leurs projections sur le plan image. La coplanarité des points introduit des incohérences lors de l'estimation des paramètres du système.

2.1.- Acquisition des images

Afin d'obtenir des points non coplanaires, nous utilisons un ensemble de disques, situés sur des plans "parallèles" au plan image et à plusieurs profondeurs. Ces points constituent les données 3D utilisées pour le calibrage. Signalons que les erreurs sur les données 3D sont introduites comme inconnues dans le problème d'estimation de paramètres [Abi-Ayad, 1989].

2.2.- Détection du centre des disques

Afin de déterminer l'ensemble des points 2D utilisés pour le calibrage, nous avons calculé le centre des disques sur le plan image grâce à la méthode proposée dans [Ragi, 1989].

Cette méthode, valable dans le cas où le plan contenant les disques est presque parallèle au plan image de la caméra, permet de calculer le centre d'un disque de la façon suivante:

- . calcul de la moyenne et de l'écart type d'un ensemble de points image n'appartenant pas au disque;
- . calcul du niveau moyen du bruit à partir de la moyenne et de l'écart type précédemment calculés: $BRUIT = (Moyenne - 3 \times \text{Ecart type})$.
Ce bruit va permettre de sélectionner les points de l'image appartenant au disque et ceux n'y appartenant pas;
- . sélection des points image p appartenant au disque tels que $p < BRUIT$ (si le disque est noir et le fond blanc);
- . calcul du barycentre de tous les points sélectionnés. Ce barycentre peut être assimilé au centre du disque car l'erreur ainsi commise est négligeable.

2.3.- Estimation des paramètres de calibrage

Les points 2D et 3D acquis sont utilisés afin de résoudre l'équation (31), décrite au chapitre 1 de la partie II, par l'intermédiaire d'un logiciel d'estimation de paramètres. Ce logiciel utilise le module fortran OdrPack qui permet de résoudre des problèmes d'estimation de paramètres au sens de la Régression en Distance Orthogonale (ODR). La meilleure précision obtenue sur le modèle mathématique est de l'ordre de 2/100 de pixel sur le système N.O.I.S.I.V [Ragi, 1989].

3.- Calibrage d'une caméra munie d'un zoom

Dans cette section, nous présentons le calibrage d'une caméra munie d'un zoom de qualité standard. Dans ce qui suit, nous considérons qu'un zoom est un ensemble de focales discrètes que nous calibrons indépendamment les unes des autres.

Nous présenterons et discuterons les résultats du calibrage, par projection centrale, de plusieurs focales du zoom utilisé. Nous verrons notamment que notre zoom n'est pas un système de stéréovision physiquement axial et qu'il doit donc être considéré comme un système de stéréovision classique.

Au cours de nos expériences, nous avons utilisé une caméra CCD noir et blanc (MICAM [Conter *et al.*, 1984]) munie d'un zoom CANON (CANON TV ZOOM; lens $j6 \times 12; 12.5-75\text{mm}; 1:1.8$). La taille des pixels est de $0.028 \times 0.015 \text{ mm}^2$ après échantillonnage et ils sont répartis en 202 colonnes et 286 lignes après numérisation.

3.1.- Calibrage sténopé indépendant pour chaque focale

Nous avons calibré le zoom avec quatre focales différentes (15, 17, 20 et 25 mm, valeurs données par le constructeur).

3.1.1.- Expérimentations

Les calibrages effectués pour chacune des focales sont valables pour une mise au point et une ouverture données. Ainsi, avant la phase de calibrage, il faut régler la mise au point et l'ouverture, qui seront conservées lors de l'acquisition d'images faite en vue de la reconstruction tridimensionnelle. Signalons que, pour un zoom, si la caméra est au point pour la focale la plus longue, elle le sera également pour la focale la plus courte.

Pour chaque focale, la phase de calibrage se décompose de la façon suivante:

- . relevé des points 3D (x_{3d}, y_{3d}, z_{3d}) ;
- . relevé des points 2D (y_{2d}, z_{2d}) dans les images. Ces points correspondent aux projections des points 3D précédemment cités;
- . détermination, par estimation de paramètres (ODR), des valeurs $lx, ly, lz, \theta, \Phi, \Psi, py, pz, f.ey, f.ez$ permettant de calculer la matrice de calibrage. Rappelons que:
 - a. (lx, ly, lz) sont les coordonnées du centre optique dans le repère absolu,
 - b. θ, Φ, Ψ sont les trois angles définissant la matrice de rotation $R(r_{ij}; i = 1..3, j = 1..3)$,

- c. (py, pz) sont les coordonnées du point principal dans le repère image,
- d. f est la focale,
- e. (ey, ez) sont les dimensions d'un pixel.

3.1.2.- Résultats du calibrage par projection centrale

A partir des points 3D et des points 2D acquis, nous obtenons les résultats de l'estimation des paramètres de calibrage suivants:

paramètres de calibrage	focale 15 mm constructeur	focale 17 mm constructeur	focale 20 mm constructeur	focale 25 mm constructeur
lx (mm)	3.19	2.36	3.76	2.5
ly (mm)	22.72	23.6	23.46	23.28
lz (mm)	857.3	869.84	885.96	907.37
θ (degrés)	93.07	92.71	92.82	93.09
ϕ (degrés)	0.64	0.63	0.63	0.63
ψ (degrés)	-91.27	-91.45	-91.24	-91.13
py (pixels)	55.53	48.09	47.48	38.71
pz (pixels)	69.62	65.74	49.62	14.82
f (mm)	18.4	21.44	25.33	32.6
erreur YZ2D (pixels)	5.64×10^{-2}	4.69×10^{-2}	7.83×10^{-2}	9.32×10^{-2}

Tableau 1.- Résultats du calibrage de quatre focales du zoom.

L'erreur YZ2D est l'erreur moyenne commise sur le modèle mathématique. Elle se calcule de la façon suivante:

Soient:

- . $P_{3d}(X_{3d}, Y_{3d}, Z_{3d})$; un point de l'espace.
- . $P_{2d}(Y_{2d}, Z_{2d})$ sa projection observée sur l'image.
- . $P'_{2d}(Y'_{2d}, Z'_{2d})$ sa projection sur l'image, calculée à partir du modèle mathématique.

L'erreur YZ2D correspond à la distance entre P_{2d} et P'_{2d} .

Le tableau 1 montre que la précision moyenne du modèle mathématique est de 7/100 de pixel. Nous remarquons que l'erreur sur le modèle croît lorsque la focale augmente. Nous pensons que ceci est dû aux distorsions, d'autant plus importantes que la focale est grande.

3.2.- Interprétation des résultats

Une première analyse du tableau 1 montre que:

- . les valeurs des points principaux sont très différentes d'une focale à l'autre.
- . le déplacement du centre optique est important lorsque la focale varie. Remarquons, par exemple, que le centre optique se déplace d'environ 50 mm, quand on passe de la focale 18.4 à la focale 32.6.
- . Les valeurs des angles θ , ϕ , ψ ne sont pas identiques pour toutes les focales.

A partir de cette analyse, nous voyons que les résultats du calibrage tendent à prouver que notre zoom n'est pas un système de stéréovision physiquement axial.

Afin de vérifier rigoureusement que le zoom ne forme pas un système physiquement axial, nous allons:

- . calculer la position dans l'espace du point principal de chaque modèle,
- . vérifier que tous les centres optiques et tous les points principaux ne sont pas alignés.

Pour une focale donnée, le calcul de la position du point principal dans l'espace se fait très simplement, à partir des coordonnées du centre optique et de la matrice de rotation R. Rappelons que cette matrice peut être calculée à partir des angles θ , ϕ , ψ . Cette matrice de rotation permet notamment de passer du repère local, centré sur le centre optique, au repère absolu. En coordonnées homogènes, le passage du repère local au repère absolu s'écrit:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{local} \\ Y_{local} \\ Z_{local} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{absolu} \\ Y_{absolu} \\ Z_{absolu} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (33)$$

Dans le repère local, nous savons que le point principal a pour coordonnées $\begin{pmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. Ainsi, la détermination de la position du point principal dans l'espace est immédiate. Le tableau ci-après donne pour chaque focale les coordonnées du point principal et du centre optique, exprimées dans le repère absolu.

	focale 15 mm constructeur	focale 17 mm constructeur	focale 20 mm constructeur	focale 25 mm constructeur
coordonnées du centre optique	$\begin{pmatrix} 3.19 \\ 22.72 \\ 857.3 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.36 \\ 23.6 \\ 869.84 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.76 \\ 23.46 \\ 885.96 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2.5 \\ 23.28 \\ 907.37 \end{pmatrix}$
coordonnées du point principal	$\begin{pmatrix} 2.77 \\ 23.7 \\ 838.93 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.81 \\ 24.6 \\ 848.43 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 3.21 \\ 24.7 \\ 860.65 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1.86 \\ 25.03 \\ 874.88 \end{pmatrix}$

Tableau 2.- Coordonnées du centre optique et du point principal pour les différentes focales utilisées.

A partir du tableau 2, il est maintenant très facile de voir que le zoom utilisé n'est pas un système de stéréovision axiale.

Afin de vérifier cela, prenons par exemple:

$$C_{15} \begin{pmatrix} 3.19 \\ 22.72 \\ 857.3 \end{pmatrix}, P_{15} \begin{pmatrix} 2.77 \\ 23.7 \\ 838.93 \end{pmatrix} \text{ et } C_{17} \begin{pmatrix} 2.36 \\ 23.6 \\ 869.84 \end{pmatrix}.$$

La droite 3D passant par C_{15} et P_{15} a pour équation $O\vec{P} = O\vec{C}_{15} + t \cdot C_{15}\vec{P}_{15}$. Si C_{17} appartient à la droite (C_{15}, P_{15}) , C_{17} doit être tel que $O\vec{C}_{17} = O\vec{C}_{15} + t \cdot C_{15}\vec{P}_{15}$.

Un calcul rapide montre que t n'a pas une valeur unique et donc que $C_{17} \notin (C_{15}, P_{15})$. Le système optique composé d'une caméra munie d'un zoom n'est donc pas un système de stéréovision physiquement axial.

3.3.- Présentation d'un couple d'images

Nous présentons ici un couple d'images d'une nature morte (voir figure 26). Les focales utilisées pour saisir ces images sont les focales 15 et 25 mm constructeur.

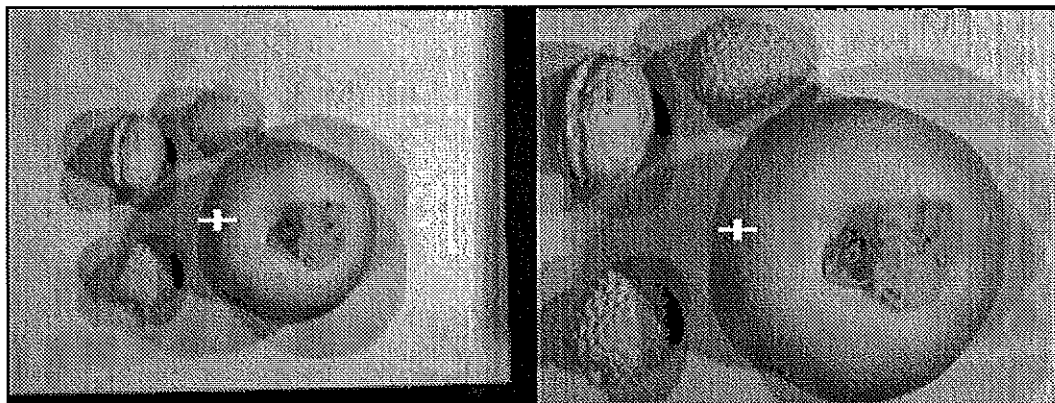


Figure 26.- Couple d'images prises avec les focales 15 et 25 mm. Les croix représentent les épipôles dans chacune des images.

A partir des matrices de calibrage des focales utilisées, nous avons déterminé les épipôles de la façon suivante:

- . soit M_{15} la matrice de calibrage correspondant à la focale 15 mm constructeur,
- . soit C_{15} le centre optique du modèle mathématique correspondant à la focale 15 mm constructeur,
- . soit M_{25} la matrice de calibrage correspondant à la focale 25 mm constructeur,
- . soit C_{25} le centre optique du modèle mathématique correspondant à la focale 25 mm constructeur.

Les épipôles E_{15} et E_{25} des images prises avec les focales 15 et 25 mm s'écrivent:

$$\begin{cases} E_{15} &= M_{15} \times C_{25} \\ E_{25} &= M_{25} \times C_{15} \end{cases} \quad (34)$$

Ainsi, les valeurs obtenues pour E_{15} et E_{25} , en coordonnées homogènes, sont:

$$E_{15} \begin{pmatrix} w \times 78.58 \\ w \times 149.64 \\ w \end{pmatrix} \text{ et } E_{25} \begin{pmatrix} w' \times 76.68 \\ w' \times 156.99 \\ w' \end{pmatrix}$$

Sur chacune des images, nous avons matérialisé les épipôles par une croix.

3.4.- Conclusion sur le calibrage d'une caméra munie d'un zoom

Dans cette section, nous avons présenté les résultats du calibrage d'un zoom de qualité standard. Nous avons montré qu'il ne constitue pas un système de stéréovision physiquement axial. En effet, un zoom doit être considéré comme un système de stéréovision classique, car tout changement de focale entraîne une modification de la position et de l'orientation du plan image.

Nous voulons attirer l'attention du lecteur sur quelques précautions à prendre, lors de l'utilisation d'un zoom.

Un zoom est un système optique complexe où plusieurs blocs de lentilles sont utilisés. Ainsi, de nombreuses distorsions y sont présentes, notamment sur les bords de l'image. L'utilisation d'un zoom en vue de la reconstruction tridimensionnelle n'est possible que si les distorsions, pour chacune des focales utilisées, sont corrigées. Par manque de temps, nous n'avons pu calibrer les distorsions de notre zoom. Citons tout de même [Mansbach, 1986, Wolf, 1983] où le lecteur trouvera diverses solutions concernant le calibrage des distorsions d'un objectif.

Un autre problème très important, en relation avec l'utilisation d'un zoom, est celui du retour mécanique en des positions précises de la bague de réglage de la longueur focale. En effet, un retour manuel ne peut être fiable. Nous pensons que l'utilisation d'un zoom motorisé permettrait de résoudre ce problème. Encore faut-il que l'ensemble zoom-moteur soit fiable...

4.- Calibrage d'une caméra en mouvement sur un rail

Dans cette section, nous présentons le calibrage d'une caméra en mouvement sur un rail (voir figure 27.a). Le mouvement de la caméra se fait sur un axe proche de son axe optique.

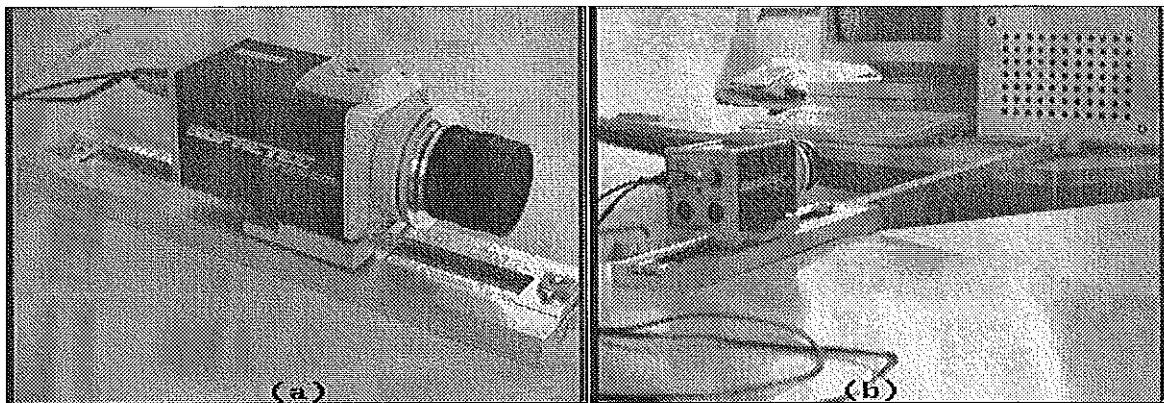


Figure 27.- (a) Caméra en mouvement sur un axe proche de son axe optique.
(b) Ensemble caméra-cible utilisé lors du calibrage.

Dans ce qui suit, nous calibrons la caméra en deux positions sur le rail. Les deux calibrages sont réalisés indépendamment l'un de l'autre.

Au cours de nos expériences, nous avons utilisé une caméra CCD (SOPRETEC CF 200 CCD) munie d'un objectif SONY 16 mm. La taille des pixels est de $0.017 \times 0.011 \text{ mm}^2$ après échantillonnage et la taille des images est de 512×512 pixels après numérisation par une carte DATACUBE.

4.1.- Calibrage de la caméra en plusieurs positions sur le rail

Nous avons calibré la caméra en deux positions sur le rail. Ces deux positions, espacées de 20 cm, correspondent aux butées avant et arrière du rail. Il n'y a donc pas d'imprécision de remplacement de la caméra en ces positions, lors de la phase d'acquisition d'images en vue de la reconstruction tridimensionnelle.

La détermination des paramètres de calibrage est réalisée avec la même méthode que lors du calibrage du zoom. Les données 3D utilisées pour le calibrage sont situées sur des plans "parallèles" au plan image. Le repère absolu de la scène observée est situé approximativement à un mètre devant la caméra (voir figure 27.b).

A partir des points 3D et des points 2D acquis, l'estimation des paramètres de calibrage fournit les résultats suivants:

paramètres de calibrage	position avant sur le rail	position arrière sur le rail
l_x (mm)	25.01	25.01
l_y (mm)	120.10	120.10
l_z (mm)	-865.65	-1065.65
θ (degrés)	-87.30	-87.30
ϕ (degrés)	1.13	1.13
ψ (degrés)	-89.25	-89.25
p_y (pixels)	271.64	271.64
p_z (pixels)	216.58	216.58
f	16.73	16.73
erreur YZ2D (pixels)	9.57×10^{-2}	9.74×10^{-2}

Tableau 3.- Résultats du calibrage de la caméra en deux positions sur le rail.

Nous remarquons que la plupart des paramètres de calibrage sont identiques d'une position à l'autre. Ceci est dû à l'utilisation des mêmes données 2D lors de la phase d'estimation de paramètres. En effet, les différents plans "parallèles" au plan image nécessaires au calibrage, sont acquis par déplacement de la caméra sur le rail. Ainsi, les données 2D ont été obtenues en plusieurs positions intermédiaires sur le rail, espacées de 2 cm.

4.2.- Interprétation des résultats

Nous remarquons que le centre optique se déplace de 200 mm le long de l'axe des Z du repère absolu. Ce déplacement correspond au mouvement rectiligne de la caméra sur son rail.

Une analyse trop rapide du tableau 3 laisserait à penser que le système est axial. En effet, l'égalité de θ , ϕ , ψ , p_y et p_z , dans chacune des positions, n'est pas une condition nécessaire et suffisante pour que le système soit axial (voir la figure 28).

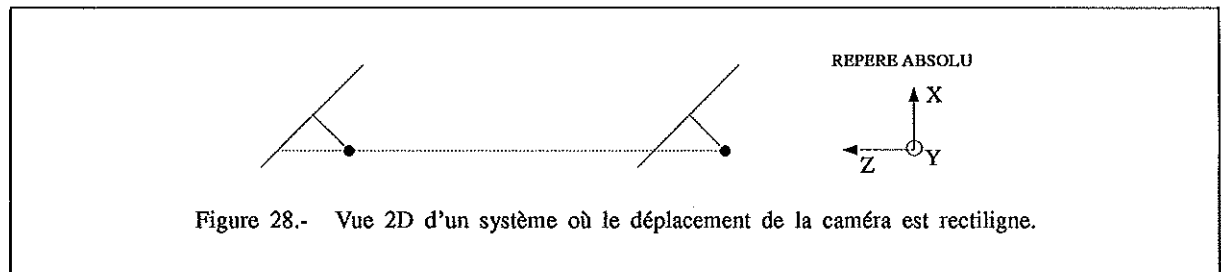


Figure 28.- Vue 2D d'un système où le déplacement de la caméra est rectiligne.

Afin de savoir si le système obtenu est axial, nous allons calculer les épipôles dans chacune des images. En effet, une condition nécessaire et suffisante pour que le système

soit axial est que les épipôles et les points principaux soient confondus. Pour calculer les épipôles, posons:

- . M_{av} la matrice de calibrage obtenue en position avant,
- . M_{ar} la matrice de calibrage obtenue en position arrière,
- . C_{av} et C_{ar} les deux centres optiques,
- . E_{av} l'épipôle sur l'image avant,
- . E_{ar} l'épipôle sur l'image arrière.

E_{av} et E_{ar} se calculent de la façon suivante:

$$\begin{cases} E_{av} = M_{av}.C_{ar} \\ E_{ar} = M_{ar}.C_{av} \end{cases} \quad (35)$$

A partir des données de calibrage, nous obtenons en coordonnées homogènes:

$$E_{av} \begin{pmatrix} w \times 257.75 \\ w \times 288.27 \\ w \end{pmatrix} \text{ et } E_{ar} \begin{pmatrix} w' \times 257.75 \\ w' \times 288.27 \\ w' \end{pmatrix}$$

Nous remarquons que les épipôles sont identiques dans chacune des images.

A partir des résultats obtenus, nous constatons que les épipôles et les points principaux ne sont pas confondus. De ce fait, le système optique composé d'une caméra en mouvement sur son rail n'est pas, en général, un système de stéréovision axiale.

4.3.- Conclusion sur le calibrage d'une caméra en mouvement sur un rail

Dans cette section, nous avons présenté les résultats du calibrage d'une caméra en mouvement sur un rail. Nous avons montré que le système optique considéré n'est pas physiquement axial, car le déplacement de la caméra ne se fait généralement pas parfaitement le long de l'axe optique. En effet, pour des raisons mécaniques, la trajectoire de la caméra ne peut être confondue avec l'axe optique.

Ainsi, une caméra en mouvement sur un rail doit être considérée comme un système de stéréovision classique.

5.- Conclusion: un système physiquement axial n'existe généralement pas

Dans les deux sections précédentes, nous avons montré, à l'aide des résultats de calibrage que, ni une caméra munie d'un zoom, ni une caméra en mouvement sur un rail ne sont des systèmes de stéréovision physiquement axiaux.

Les deux systèmes optiques étudiés doivent donc être considérés comme des systèmes de stéréovision classiques. De ce fait, il n'est pas possible de les calibrer en les supposant physiquement axiaux.

Aussi avons-nous donc décidé de mettre en œuvre une rectification géométrique permettant de passer d'un système "presque" physiquement axial à un système de stéréovision axiale.

Cette rectification va nous permettre:

- . d'utiliser les propriétés des systèmes axiaux lors de la mise en correspondance,
- . de calculer la position d'un point dans l'espace grâce aux matrices de calibrage obtenues par rectification.

**CHAPITRE 3.-
Rectification d'images "pseudo-axiales"
afin d'obtenir des images axiales**

1.- Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré qu'une caméra munie d'un zoom de qualité standard ou se déplaçant sur son axe n'est pas, en général, un système de stéréovision véritablement axial. La caméra doit donc se modéliser comme un système de stéréovision classique.

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de rectification permettant d'obtenir un vrai système de stéréovision axiale, par rectification géométrique à partir d'un système "presque" axial. Cette rectification sera utilisée lors de la phase d'appariement afin de:

- . simplifier le calcul des droites épipolaires,
- . utiliser les propriétés de l'espace de recherche d'homologues dans les systèmes de stéréovision axiaux (voir chapitre 1 de la partie I).

La rectification proposée va transformer deux images "presque axiales" en deux images axiales.

Supposons tout d'abord que nous ayons calibré :

- . soit deux focales de notre zoom,
- . soit notre caméra en deux positions différentes sur son rail.

Ce calibrage étant réalisé, nous avons deux matrices de calibrage M et N modélisant les systèmes de prise de vue (voir figure 29).

M (resp. N) est définie par:

- . le centre optique C_1 (resp. C_2),
- . le plan de projection P_M (resp. P_N),
- . le point principal P_1 (resp. P_2),
- . les coordonnées du point principal dans le repère image (py_1, pz_1) (resp. (py_2, pz_2)),
- . la focale f_1 (resp. f_2).

Le principe de rectification que nous proposons définit deux nouvelles matrices M' et N' conservant respectivement les deux centres optiques C_1 et C_2 , mais modifiant les plans de projection, de façon à obtenir un système axial (voir figure 29). L'idée principale de notre rectification est que l'axe optique du système axial formé par M' et N' sera la droite 3D passant par les centres optiques de M et N (C_1 et C_2).

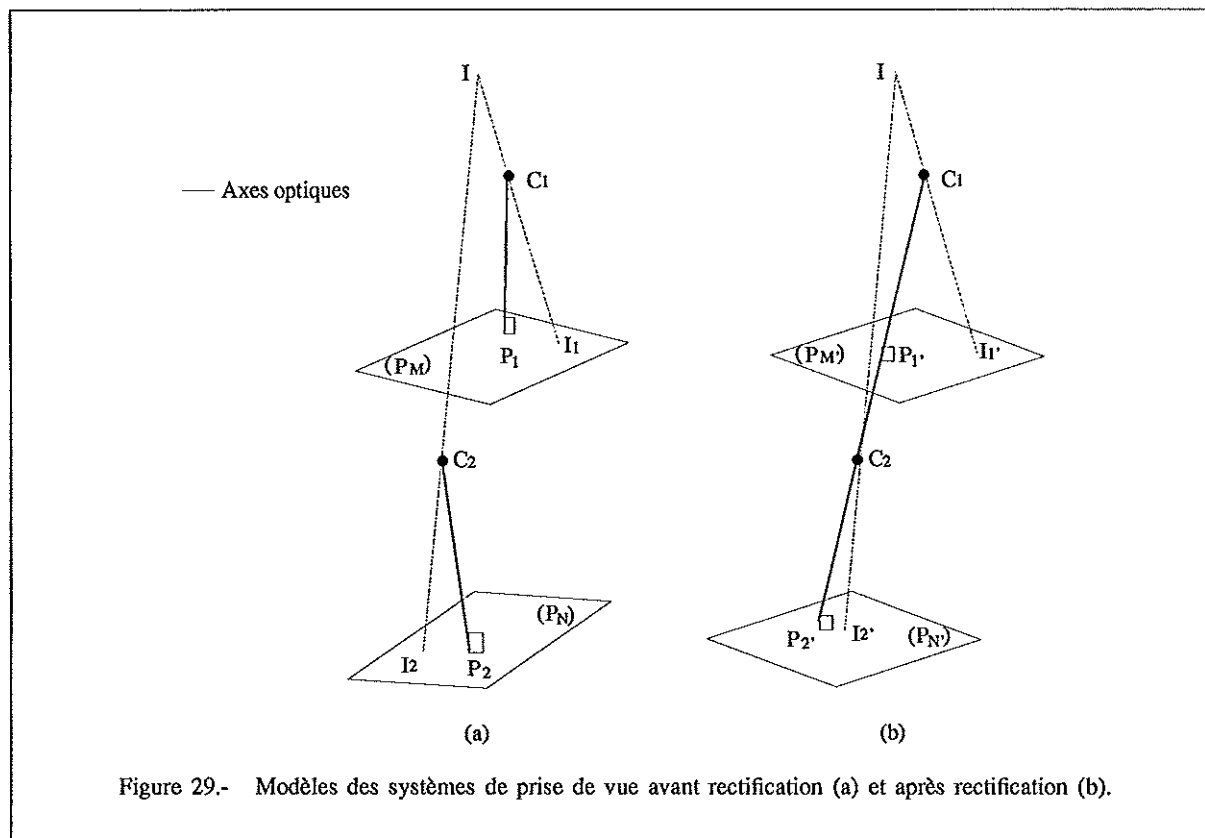


Figure 29.- Modèles des systèmes de prise de vue avant rectification (a) et après rectification (b).

2.- Contraintes sur les nouvelles matrices de calibrage

Précisons les contraintes sur les nouvelles matrices M' et N' à partir des matrices M et N :

1. les centres optiques C_1 et C_2 restent inchangés.
2. si $P_{M'}$ est le plan focal de M'
et $P_{N'}$ est le plan focal de N' ,
alors on doit avoir $P_{M'} \parallel P_{N'}$.
3. si $P_{1'}$ est la projection orthogonale de C_1 sur $P_{M'}$ ($P_{1'}$ point principal)
et $P_{2'}$ est la projection orthogonale de C_2 sur $P_{N'}$ ($P_{2'}$ point principal),
alors on doit avoir $C_1, C_2, P_{1'}$ et $P_{2'}$ alignés (ces points sont sur l'axe optique du système axial).

On peut remarquer que 2.) est une conséquence de 3.) et que si on ne veut pas changer les focales, on doit avoir:

$$\|C_1 \vec{P}_{1'}\| = \|C_1 \vec{P}_1\| = f_1 \text{ et } \|C_2 \vec{P}_{2'}\| = \|C_2 \vec{P}_2\| = f_2 \quad (36)$$

3.- Détermination des nouvelles matrices

Pour déterminer les matrices M' et N' , à partir de M et N , on va évaluer les paramètres py, pz, f, R, lx, ly et lz de chaque matrice. Pour chacune des matrices M' et N' on connaît:

- . f (la longueur focale reste inchangée),
- . lx, ly, lz (même centre optique avant et après rectification),
- . py, pz (ils seront identiques dans les deux matrices et peuvent être déterminés arbitrairement comme nous le verrons plus loin).

Il reste donc à déterminer la matrice de rotation R qui doit être identique dans les matrices M' et N' (car $P_{M'} // P_{N'}$).

Dans cette section, nous utilisons deux repères différents (voir la figure 18 décrite page 46):

- . un repère local, centré sur le centre optique,
- . le repère absolu de la scène.

3.1.- Détermination de la matrice de rotation R

Pour déterminer la matrice de rotation R , nous ne considérons que la matrice de calibrage M' . En effet M' et N' ont la même matrice de rotation, R .

Nous chercherons tout d'abord l'expression du plan focal de M' . Puis nous calculerons les coefficients de la matrice de rotation R .

3.1.1.- Détermination du plan $P_{M'}$

Pour déterminer le plan $P_{M'}$, nous chercherons un vecteur normal à ce plan et un point de ce plan.

a.- Détermination d'un vecteur normal à ce plan

Le vecteur $C_1\vec{P}_{1'}$ est tout naturellement un vecteur normal au plan $P_{M'}$. Le point C_1 étant connu, il faut déterminer le point $P_{1'}$ qui est tel que:

- . $P_{1'}$ se trouve sur la droite (C_1C_2) ,
- . $\|C_1\vec{P}_{1'}\| = f_1$ où f_1 est la focale associée à la matrice M (afin de conserver la longueur focale).

Ainsi, nous avons:

$$O\vec{P}_{1'} = O\vec{C}_1 + tC_1\vec{C}_2 \quad (37)$$

et

$$\|C_1\vec{P}_{1'}\| = f_1 \quad (38)$$

A partir de (37) et (38) on peut déduire que:

$$O\vec{P}_{1'} = O\vec{C}_1 \pm \frac{f_1}{\|C_1\vec{C}_2\|} C_1\vec{C}_2 \quad (39)$$

Une seule des valeurs du point $P_{1'}$ est à considérer (cette valeur est fonction de la position du plan image par rapport au centre optique). Nous avons donc les coordonnées 3D du point

$$P_{1'}: \begin{pmatrix} P_{1'x} \\ P_{1'y} \\ P_{1'z} \end{pmatrix} \text{ (dans le repère absolu).}$$

b.- Détermination d'un point de ce plan

Par construction, nous savons que $P_{1'} \in P_{M'}$.

c.- Expression du plan $P_{M'}$

Maintenant, le plan $P_{M'}$ est parfaitement défini, puisque nous connaissons un vecteur normal à ce plan et un point de ce plan. Ainsi, à partir du vecteur $C_1\vec{P}_{1'} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$ et du point

$$P_{1'} \begin{pmatrix} P_{1'x} \\ P_{1'y} \\ P_{1'z} \end{pmatrix}, \text{ l'équation du plan s'écrit:}$$

$$x_1.X + y_1.Y + z_1.Z - (P_{1'x}.x_1 + P_{1'y}.y_1 + P_{1'z}.z_1) = 0 \quad (40)$$

A partir du plan focal $P_{M'}$, nous allons déterminer la matrice de rotation R .

3.1.2.- Calcul de la matrice de rotation R

La matrice de rotation R ainsi que lx, ly, lz permettent de passer du repère absolu au repère local et inversement. Dans le cas du passage du repère local au repère absolu nous avons, en coordonnées homogènes:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{local} \\ Y_{local} \\ Z_{local} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{absolu} \\ Y_{absolu} \\ Z_{absolu} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (41)$$

Dans ce qui suit, nous allons déterminer les coefficients r_{ij} . Ceci revient à évaluer l'orientation du nouveau repère local.

a.- Calcul de r_{11} , r_{12} , r_{13}

Dans le nouveau repère local, $P_{1'}$ s'écrit : $\begin{pmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ car $P_{1'}$ est le point principal du nouveau système. Connaissant $P_{1'}$ dans le repère local et dans le repère absolu, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{1'x} \\ P_{1'y} \\ P_{1'z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (42)$$

On a de façon immédiate:

$$\begin{cases} r_{11} = \frac{P_{1'x} - lx}{f_1} \\ r_{12} = \frac{P_{1'y} - ly}{f_1} \\ r_{13} = \frac{P_{1'z} - lz}{f_1} \end{cases} \quad (43)$$

b.- Calcul de r_{21} , r_{22} , r_{23}

Connaissant l'équation du plan P_M , il est toujours possible de déterminer un point Y_2 ($Y_2 \neq P_{1'}$) appartenant à ce plan. Soient $\begin{pmatrix} Y_{2x} \\ Y_{2y} \\ Y_{2z} \end{pmatrix}$ les coordonnées de Y_2 dans le repère absolu. Le point Y_2 choisi détermine la nouvelle orientation des lignes de l'image (le vecteur $P_{1'}\vec{Y}_2$ est parallèle au nouvel axe des Y). Dans le repère local, le point Y_2 aura pour coordonnées: $\begin{pmatrix} f_1 \\ \left\| P_{1'}\vec{Y}_2 \right\| \\ 0 \end{pmatrix}$.

Connaissant Y_2 dans le repère local et dans le repère absolu, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ \left\| P_{1'}\vec{Y}_2 \right\| \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{2x} \\ Y_{2y} \\ Y_{2z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (44)$$

On a de façon immédiate:

$$\begin{cases} r_{21} = \frac{Y_{2x} - lx - r_{11} f_1}{\left\| P_{1'}\vec{Y}_2 \right\|} \\ r_{22} = \frac{Y_{2y} - ly - r_{12} f_1}{\left\| P_{1'}\vec{Y}_2 \right\|} \\ r_{23} = \frac{Y_{2z} - lz - r_{13} f_1}{\left\| P_{1'}\vec{Y}_2 \right\|} \end{cases} \quad (45)$$

c.- Calcul de r_{31} , r_{32} , r_{33}

Pour le moment, nous avons déterminé $P_{1'}$ et Y_2 qui sont tels que $C_1 \vec{P}_{1'} \perp P_{1'} \vec{Y}_2$. Pour déterminer le nouvel axe des Z, il faut calculer le vecteur $P_{1'} \vec{Z}_2$ tel que:

$$C_1 \vec{P}_{1'} \perp P_{1'} \vec{Z}_2 \text{ et } P_{1'} \vec{Y}_2 \perp P_{1'} \vec{Z}_2 \quad (46)$$

Ce vecteur détermine la nouvelle orientation des colonnes de l'image, puisqu'il est parallèle au nouvel axe des Z.

Les points $P_{1'}$, Y_2 et C_1 étant parfaitement définis, Z_2 est également défini puisque

$$P_{1'} \vec{Z}_2 = P_{1'} \vec{Y}_2 \wedge C_1 \vec{P}_{1'} \quad (47)$$

Soient $\begin{pmatrix} Z_{2x} \\ Z_{2y} \\ Z_{2z} \end{pmatrix}$ les coordonnées de Z_2 dans le repère absolu.

Dans le repère local, le point Z_2 aura pour coordonnées : $\begin{pmatrix} f_1 \\ 0 \\ \parallel P_{1'} \vec{Z}_2 \parallel \end{pmatrix}$.

Connaissant Z_2 dans le repère local et dans le repère absolu, on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & lx \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & ly \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & lz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} f_1 \\ 0 \\ \parallel P_{1'} \vec{Z}_2 \parallel \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{2x} \\ Z_{2y} \\ Z_{2z} \end{pmatrix} \quad (48)$$

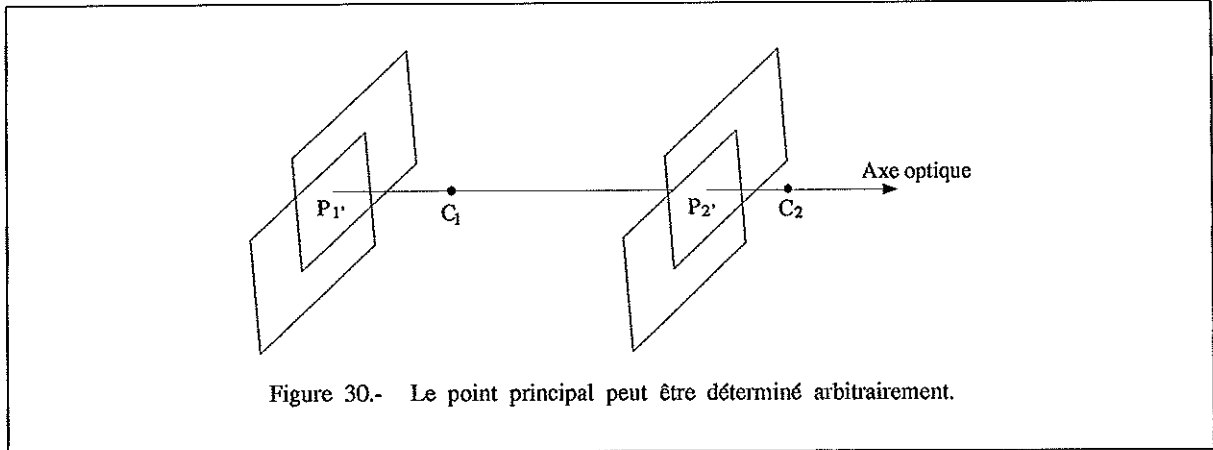
On a de façon immédiate:

$$\begin{cases} r_{31} = \frac{Z_{2x} - lx - r_{11} f_1}{\parallel P_{1'} \vec{Z}_2 \parallel} \\ r_{32} = \frac{Z_{2y} - ly - r_{12} f_1}{\parallel P_{1'} \vec{Z}_2 \parallel} \\ r_{33} = \frac{Z_{2z} - lz - r_{13} f_1}{\parallel P_{1'} \vec{Z}_2 \parallel} \end{cases} \quad (49)$$

Nous avons donc calculé la matrice de rotation R. Ainsi, si on fixe les coordonnées (py, pz) du point principal, les matrices de calibrage M' et N' sont parfaitement définies. Maintenant, nous allons étudier les raisons pour lesquelles le point principal peut être fixé arbitrairement.

3.2.- Choix arbitraire de py et pz

Les points P_1 et P_2 sont désormais fixés dans l'espace 3D. Ainsi, les coordonnées image du point principal peuvent être fixées arbitrairement. En effet une modification de py et pz ne fait que déplacer l'image sur le nouveau plan de projection (voir figure 30).



Cependant, lors de la rectification des images, le point principal choisi doit minimiser la perte de l'image par rapport aux coordonnées des images en machine.

Plusieurs stratégies sont alors possibles:

a. Comme nous avons:

(py_1, pz_1) les coordonnées du point principal P_1 (dans la matrice M) et
 (py_2, pz_2) les coordonnées du point principal P_2 (dans la matrice N),
 nous pouvons calculer (py, pz) de la façon suivante:

$$\begin{cases} py = \frac{py_1 + py_2}{2} \\ pz = \frac{pz_1 + pz_2}{2} \end{cases} \quad (50)$$

b. Soient E_1 l'épipôle de l'image 1, de coordonnées (ey_1, ez_1) définies par

$$\begin{pmatrix} w.ey_1 \\ w.ez_1 \\ w \end{pmatrix} = M \times \begin{pmatrix} C_{2x} \\ C_{2y} \\ C_{2z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (51)$$

et E_2 l'épipôle de l'image 2, de coordonnées (ey_2, ez_2) définies par

$$\begin{pmatrix} w.ey_2 \\ w.ez_2 \\ w \end{pmatrix} = N \times \begin{pmatrix} C_{1x} \\ C_{1y} \\ C_{1z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (52)$$

A partir des épipôles, nous pouvons définir (py, pz) de la façon suivante:

$$\begin{cases} py = \frac{ey_1 + ey_2}{2} \\ pz = \frac{ez_1 + ez_2}{2} \end{cases} \quad (53)$$

Bien entendu, d'autres stratégies de calcul de (py, pz) peuvent être envisagées.

4.- Résultats

Nous avons appliqué cette rectification à un couple d'images (voir figure 31) prises avec la caméra en mouvement sur le rail. En utilisant un filtre interpolateur bicubique [Nack, 1976], nous obtenons les images rectifiées présentées figure 32.

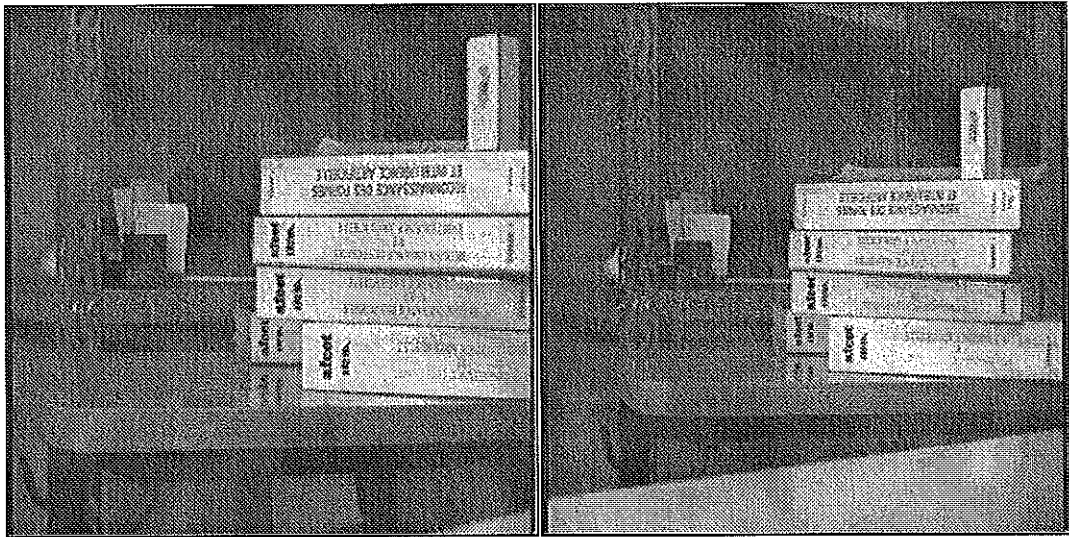


Figure 31.- Couple d'images avant rectification.

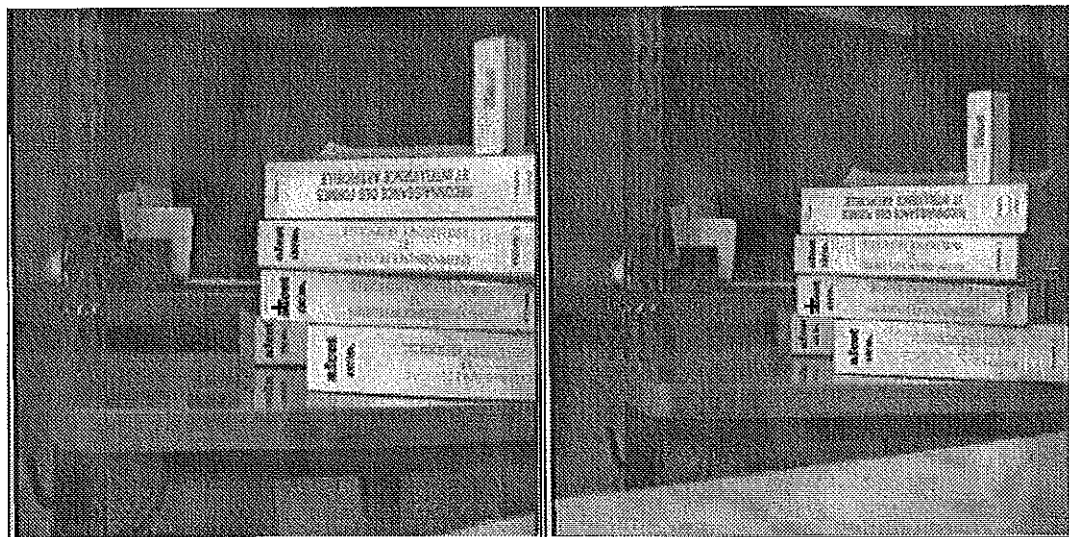


Figure 32.- Couple d'images de la figure 31 après rectification.
La croix représente le point principal du système axial calculé.

Il y a peu de différences visibles entre les deux couples d'images. Néanmoins, nous pouvons constater un décalage de quelques pixels sur le bord gauche des images rectifiées (visible en blanc sur la figure 32). Ce décalage n'est pas le même pour l'image de gauche et l'image de droite. Il correspond à la transformation permettant de passer des images initiales aux images rectifiées.

5.- Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode permettant d'obtenir un vrai système de stéréovision axiale par calibrage puis rectification géométrique.

L'idée clef de cette rectification est de former un système axial ayant pour axe optique la droite passant par les centres optiques de deux systèmes calibrés indépendamment (deux focales d'un zoom, une caméra en deux positions sur un rail, ...).

Lors de la mise en correspondance, nous allons utiliser deux images rectifiées. Ceci va nous permettre de profiter des propriétés, concernant l'espace de recherche d'homologues, qui sont propres aux systèmes de stéréovision axiale.

Mais avant cela, réalisons quelques expériences afin de vérifier qu'il est effectivement possible de calculer une information tridimensionnelle à partir d'un système de stéréovision axiale.

CHAPITRE 4.- Premières expériences dans un système axial

1.- Introduction

Le but de ce chapitre est de vérifier qu'un système de stéréovision axiale permet de calculer une information tridimensionnelle. Pour cela, nous avons réalisé deux expériences:

- . une étude pratique des erreurs dans un système axial,
- . une reconstruction de plans 3D.

2.- Etude pratique des erreurs dans un système axial

Dans [Carmona, 1991, Nguyen *et al.*, 1992], nous trouvons des études théoriques sur les erreurs dans un système de stéréovision axiale. Ces études n'ont pu être vérifiées par la pratique, leurs auteurs ne disposant pas de vrais systèmes axiaux. Pour résumer leurs travaux, nous pouvons dire que, plus un point se projettera près du point principal, plus l'erreur sur le calcul de ce point sera importante.

Il nous a semblé intéressant de réaliser une étude pratique des erreurs de triangulation, dans un système de stéréovision axiale créé par rectification. En effet, le but de cette étude est d'évaluer la taille de la zone se trouvant près du point principal, où les erreurs de triangulation sont très importantes.

Nous avons réalisé un ensemble expériences en prenant des images d'un plan contenant des disques à surface mate uniforme (voir figure 33). La position dans l'espace du centre de chaque disque est supposée connue.

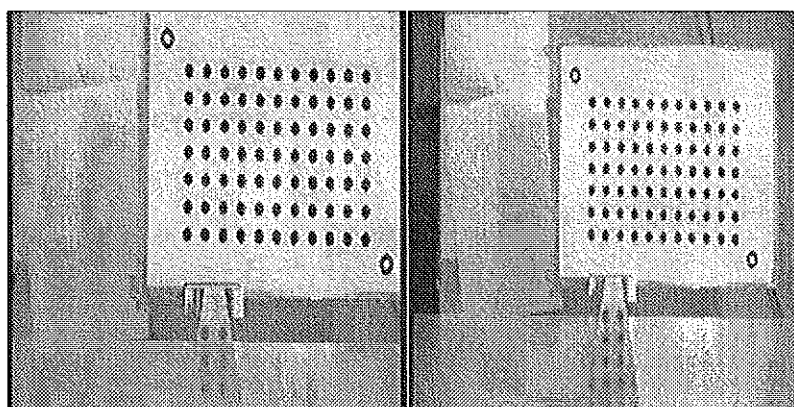


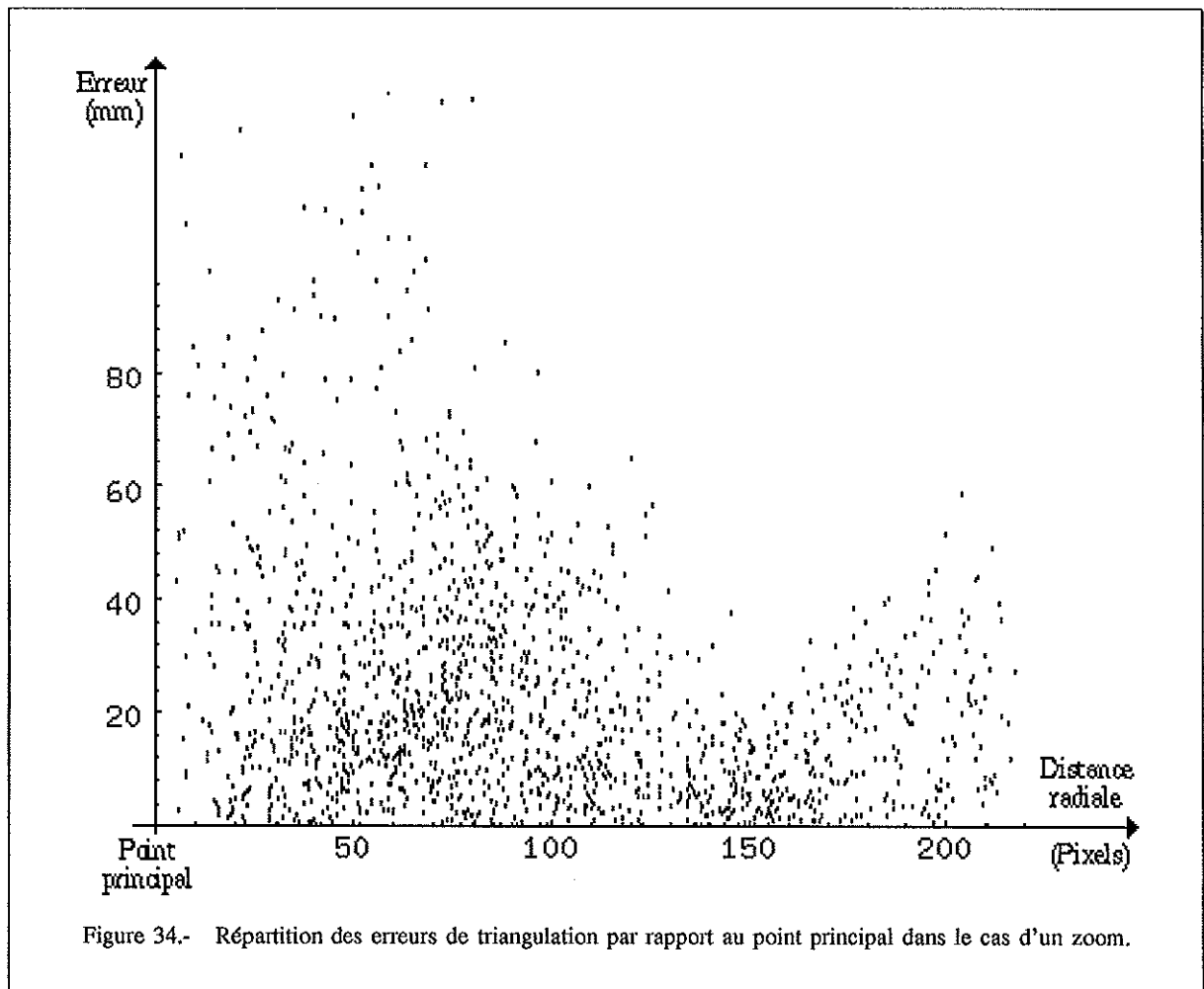
Figure 33.- Couple d'images représentant un même plan.

Les centres des disques, calculés dans chacune des images par la méthode proposée dans [Ragi, 1989], sont assimilés à des points 3D que l'on essaye de calculer. Le calcul de ces points permet d'évaluer l'erreur commise en fonction de la distance radiale. Nous avons réalisé cette expérience avec les deux systèmes optiques que nous avons calibrés (une caméra munie d'un zoom ou se déplaçant sur un rail).

2.1.- Expérimentation sur le zoom

Afin de réaliser cette étude pratique, nous avons utilisé les quatre focales calibrées de notre zoom (15, 17, 20 et 25 mm). Ainsi, en combinant les focales deux à deux, nous obtenons six mesures pour chaque point 3D.

La figure 34 représente la répartition des erreurs de triangulation par rapport au point principal.

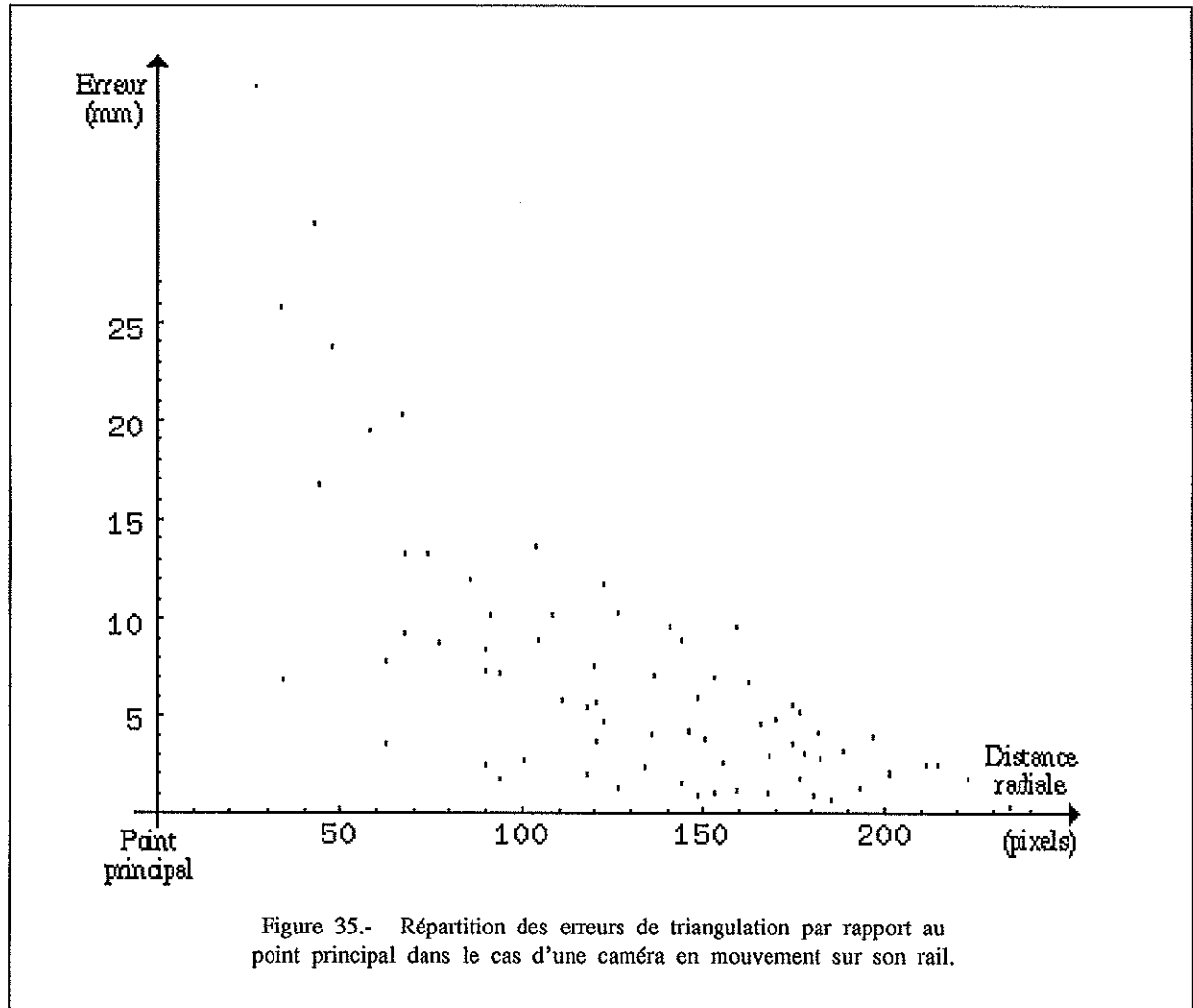


A partir de la figure 34, nous constatons que, lors de l'utilisation d'une caméra munie d'un zoom, la répartition des erreurs par rapport au point principal est conforme à la théorie, jusqu'à une certaine distance de ce point. Au-delà de cette distance, les erreurs de triangulation augmentent au lieu de diminuer. Nous pensons que ceci est très certainement dû aux distorsions géométriques qui sont importantes dans un zoom. Il faut donc corriger les distorsions radiales des lentilles pour utiliser un zoom.

2.2.- Expérimentation sur la caméra en mouvement sur le rail

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons utilisé notre caméra dans les deux positions où elle avait été calibrée. Rappelons que ces deux positions sont distantes de 20 cm.

La figure 35 représente la répartition des erreurs de triangulation par rapport au point principal.



Dans le cas d'une caméra en mouvement, la répartition des erreurs par rapport au point principal est conforme à la théorie. Ainsi, pour obtenir une précision "acceptable", il ne faut considérer que les points qui sont à une distance de plus de 200 pixels du point principal.

3.- Reconstruction de deux plans distants d'environ 50 cm

Nous réalisons ici une expérience permettant de vérifier que le calcul de profondeur est possible en pratique, malgré les erreurs importantes de triangulation près du point principal.

Pour cela, nous avons utilisé deux plans "approximativement" parallèles situés à "environ" 50 cm l'un de l'autre (voir figure 36).

Les images ont été acquises avec la caméra en mouvement sur son rail, car nous n'avons pas eu le temps de calibrer les distorsions géométriques du zoom.

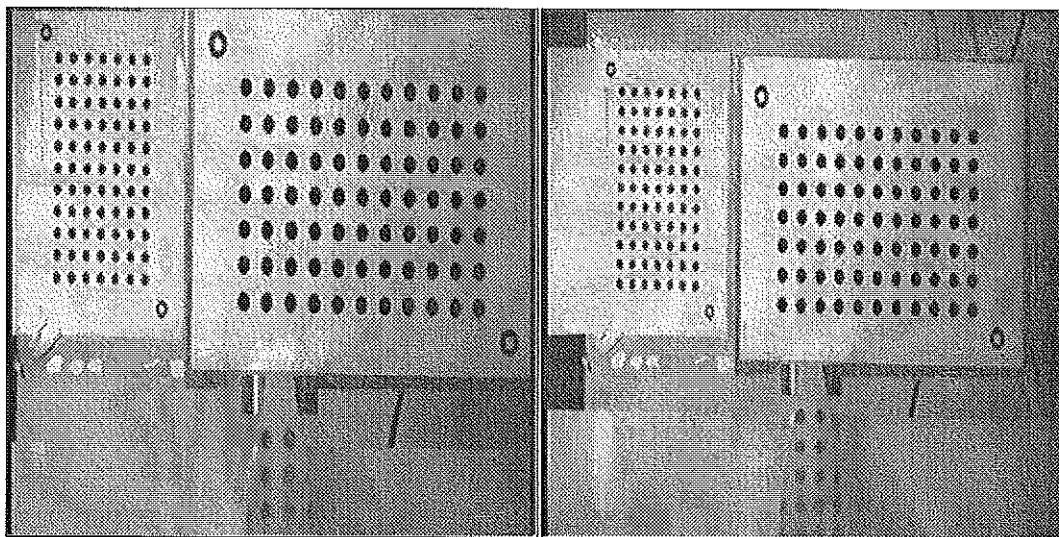
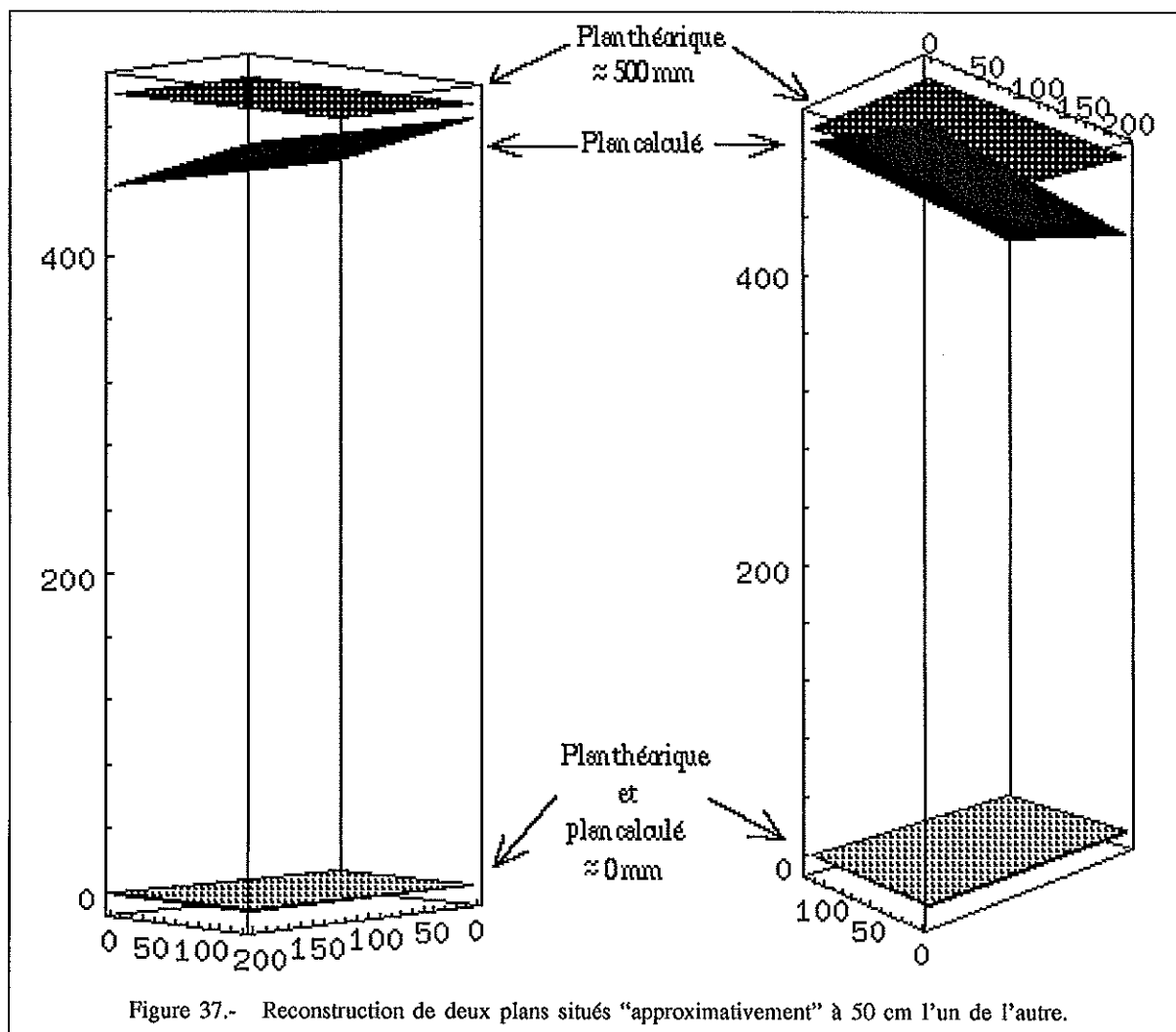


Figure 36.- Deux plans situés "approximativement" à 50 cm l'un de l'autre.

Afin de calculer chacun des plans 3D, nous avons dû éliminer les points aberrants se trouvant généralement près du point principal. La méthode adoptée est la suivante:

- . calcul de la profondeur moyenne \overline{prof} ,
- . calcul de l'écart type de la profondeur σ_{prof} ,
- . élimination des points ayant une profondeur P telle que $|P - \overline{prof}| > \sigma_{prof}$.

Une fois les points aberrant éliminés, nous avons calculé chaque plan 3D par une approximation aux moindres carrés. Le résultat de la reconstruction de ces plans est présenté figure 37 sous deux angles de vue. Nous présentons également sur cette figure les plans théoriques, correspondant aux plans calculés.



Les résultats obtenus montrent qu'il est effectivement possible de calculer une information tridimensionnelle à partir d'un système de stéréovision axiale et ce malgré les erreurs induites par l'utilisation d'un tel système.

4.- Conclusion

A partir de l'étude pratique des erreurs, nous pensons que, pour obtenir une meilleure précision de reconstruction, il faut :

- . Utiliser un matériel plus adapté, c'est-à-dire un ensemble caméra-numériseur haute résolution. En effet, avec le matériel actuel, si l'on élimine un disque de 200 pixels de rayon autour du point principal, la zone utile de l'image sera très petite. Ainsi, pour augmenter la précision, le nombre de pixels par image doit croître et leur taille doit diminuer.
- . Eliminer les points trop proches du point principal. Ceci permet d'éviter la zone où les erreurs sur le calcul 3D sont trop importantes.

**PARTIE III.-
MISE EN CORRESPONDANCE
ET RECONSTRUCTION 3D**

CHAPITRE 1.-
Mise en correspondance dans un
système de stéréovision axiale

1.- Etat de l'art

Afin de résoudre le problème de la mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale, diverses solutions ont été proposées. Citons, par exemple, les travaux de [Alvertos *et al.*, 1989, Carmona, 1991, Ma *et al.*, 1990].

Dans [Alvertos *et al.*, 1989], nous trouvons un algorithme de mise en correspondance de points dans les images, basé sur les contraintes géométriques d'un système axial et sur l'étude de la radiance de la scène. Cet algorithme nécessite la connaissance des caractéristiques d'éclairage ainsi que des propriétés de réflectance des objets contenus dans la scène. Donc l'algorithme proposé par Alvertos *et al.* n'est applicable qu'à:

- . des images de synthèse,
- . des images issues d'un environnement industriel contrôlé.

Dans [Carmona, 1991], C.Carmona présente deux types de mise en correspondance. Pour cela, il réalise tout d'abord, dans chaque image, une extraction de contours suivie d'une approximation polygonale [Ramer, 1972]. Puis il met en œuvre deux méthodes d'appariement:

- . l'une travaillant sur les sommets de l'approximation polygonale,
- . l'autre travaillant sur les segments de l'approximation polygonale.

J.Ma présente également deux méthodes de mise en correspondance, utilisées sur des images de synthèse [Ma *et al.*, 1990]:

- . l'une basée sur l'étude du flot optique. Malheureusement, cette méthode n'est valable que pour de faibles changements de longueur focale, et elle est très sensible aux erreurs de détermination du flot optique.
- . l'autre approche utilise deux types de mise en correspondance:
 - l'appariement des passages par zéro du laplacien de gaussienne,
 - la mise en correspondance de segments issus de l'approximation polygonale.

Ces méthodes ne lui permettent qu'une localisation approximative des objets.

Signalons qu'aucune des publications citées précédemment ne fait état d'une reconstruction tridimensionnelle. A notre connaissance, seul J.M.Lavest a pu, dans des conditions très particulières, reconstruire des objets en trois dimensions:

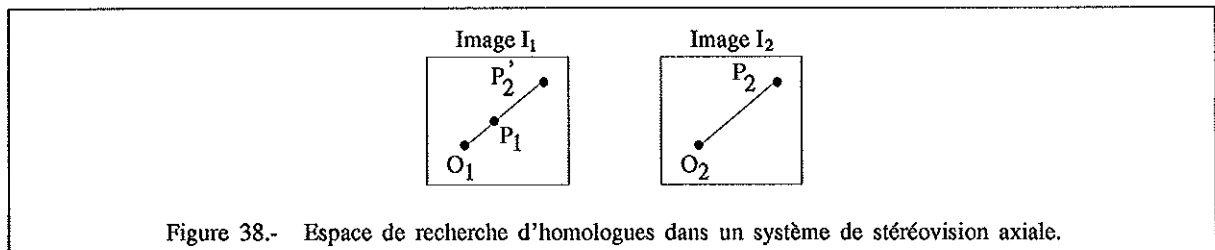
- . un cube sur lequel des traits sont dessinés [Lavest *et al.*, 1992],
- . un objet de révolution [Lavest *et al.*, 1993]. Dans ce cas, il procède de la façon suivante:
 - détection des contours de l'objet dans chacune des images,
 - à partir des contours obtenus, il localise, dans chaque image, l'axe de révolution,
 - en utilisant les axes de révolution obtenus dans chacune des images, il obtient, par triangulation, l'axe de révolution de l'objet dans l'espace,
 - enfin, il reconstruit l'objet à partir de cet axe de révolution.

Signalons que l'aspect "mise en correspondance" n'a pas été abordé lors de la reconstruction de ces objets.

Aucune des publications présentées ici ne nous a semblé apporter réellement une solution au problème de l'appariement, dans un système de stéréovision axiale. Nous avons donc décidé de mettre en œuvre notre propre méthode de mise en correspondance, en vue de la reconstruction tridimensionnelle.

2.- Rappels sur l'espace de recherche d'homologues dans un système de stéréovision axiale

Dans le chapitre 1 de la partie I, nous avons présenté deux propriétés fondamentales concernant l'espace de recherche d'homologues, dans un système de stéréovision axiale. La figure 38 résume ces deux propriétés.



Sur cette figure, nous avons:

- . O_1 et O_2 , les points principaux dans chacune des images,
- . P_2 , le point de l'image I_2 dont on cherche l'homologue P_1 sur l'image I_1 ,
- . P'_2 , la projection orthogonale de P_2 sur l'image I_1 .

Les propriétés propres aux systèmes de stéréovision axiale sont les suivantes:

- . les points principaux O_1 et O_2 se correspondent,
- . l'espace de recherche de l'homologue de P_2 est réduit au segment $[O_1 P'_2]$

3.- Nos motivations et nos choix

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2 de la partie I, la mise en correspondance doit être aussi précise que possible, afin de minimiser l'erreur de triangulation, qui peut être très importante dans un système de stéréovision axiale.

Ainsi, il ne nous a pas semblé correct d'utiliser les attributs de régions et de segments afin de résoudre le problème de l'appariement. En effet, ces attributs sont généralement très instables d'une image à l'autre.

Prenons par exemple le cas des segments issus de l'approximation polygonale. Compte tenu du changement d'échelle d'une image à l'autre, le découpage d'un contour par approximation polygonale ne peut assurer une correspondance bi-univoque entre deux sommets ou deux segments présents dans les images (voir figure 39).

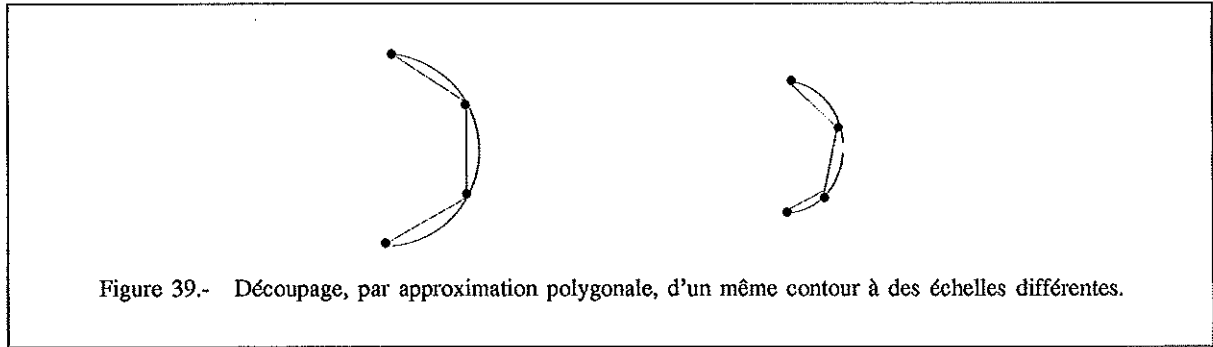


Figure 39.- Découpage, par approximation polygonale, d'un même contour à des échelles différentes.

Compte tenu de l'instabilité des primitives généralement utilisées, nous avons préféré travailler directement au niveau des profils d'intensité, le long de droites épipolaires, sans utiliser d'approximation des contours ou de segmentation en régions.

3.1.- Idée clef: étude des profils d'intensité

Dans un système de stéréovision axiale, si la distance entre les deux centres optiques est faible par rapport à la distance objets-caméra, les valeurs en niveau de gris de deux points homologues sont très proches l'une de l'autre.

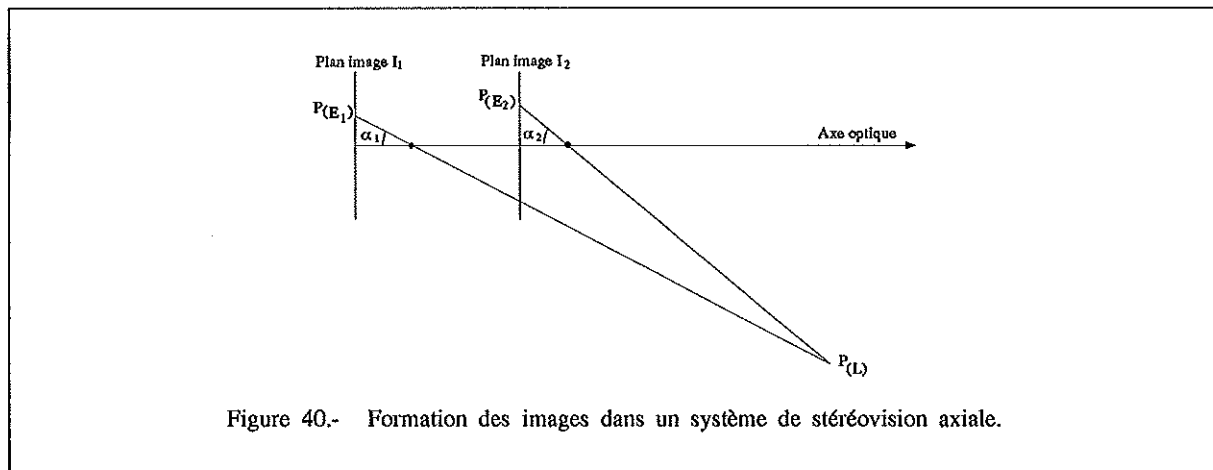


Figure 40.- Formation des images dans un système de stéréovision axiale.

Ceci se déduit de la figure 40 et de l'équation (54) décrivant le processus de formation des images [Horn, 1986].

$$E = L \frac{\Pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha \quad (54)$$

où:

- . L est la quantité de lumière émise par un point P de la scène,
- . E est la valeur en niveau de gris de la projection du point P sur le plan image,
- . d est le diamètre de l'ouverture de l'objectif,
- . f est la longueur focale de l'objectif,
- . α est l'angle compris entre l'axe optique et la droite passant par le point P et le centre optique.

Si un point P de la scène émet une quantité de lumière L, et se projette sur les plans image 1 et 2 (voir figure 40), les valeurs de ses projections sont:

$$E_1 = L \frac{\Pi}{4} \left(\frac{d_1}{f_1} \right)^2 \cos^4 \alpha_1 \quad \text{et} \quad E_2 = L \frac{\Pi}{4} \left(\frac{d_2}{f_2} \right)^2 \cos^4 \alpha_2 \quad (55)$$

En pratique, ces valeurs étant très proches dans un système axial, l'idée clef de notre méthode d'appariement est basée sur l'étude des profils d'intensité le long de droites épipolaires qui se correspondent.

3.2.- Utilisation et calcul des profils d'intensité

Nous proposons un calcul des profils d'intensité, le long de droites épipolaires, par interpolation linéaire. Rappelons tout d'abord que, dans un système de stéréovision axiale, les droites épipolaires sont radiales et convergent au niveau des points principaux.

Lors du calcul d'une droite épipolaire, la plupart des points de cette droite ne correspondent pas exactement aux pixels de l'image. Ainsi, avons-nous décidé de calculer la valeur d'un tel point sur le profil par interpolation linéaire, entre ses pixels voisins (voir figure 41).

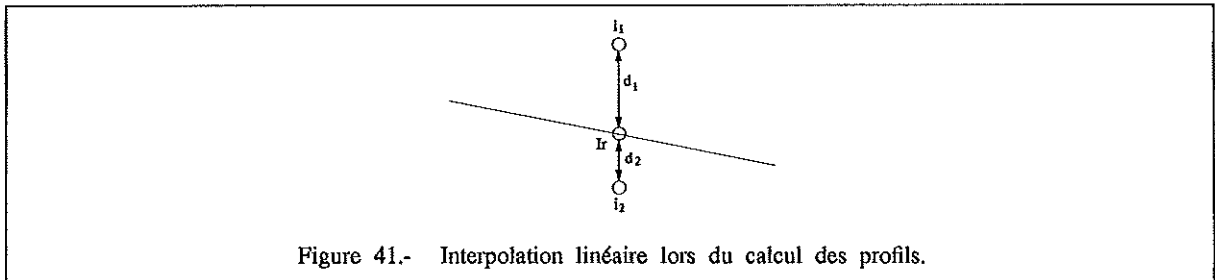


Figure 41.- Interpolation linéaire lors du calcul des profils.

Soient i_1 et i_2 deux pixels voisins ayant les valeurs V_{i1} et V_{i2} . Le point réel I_r , se trouvant entre V_{i1} et V_{i2} , a pour valeur $V_r = (1 - d_1) \cdot V_{i1} + (1 - d_2) \cdot V_{i2}$, avec $d_1 + d_2 = 1$.

Cette interpolation est indispensable lorsque les droites épipolaires traversent des frontières d'objets.

La figure 42 présente le résultat du calcul des profils, le long de deux droites épipolaires.

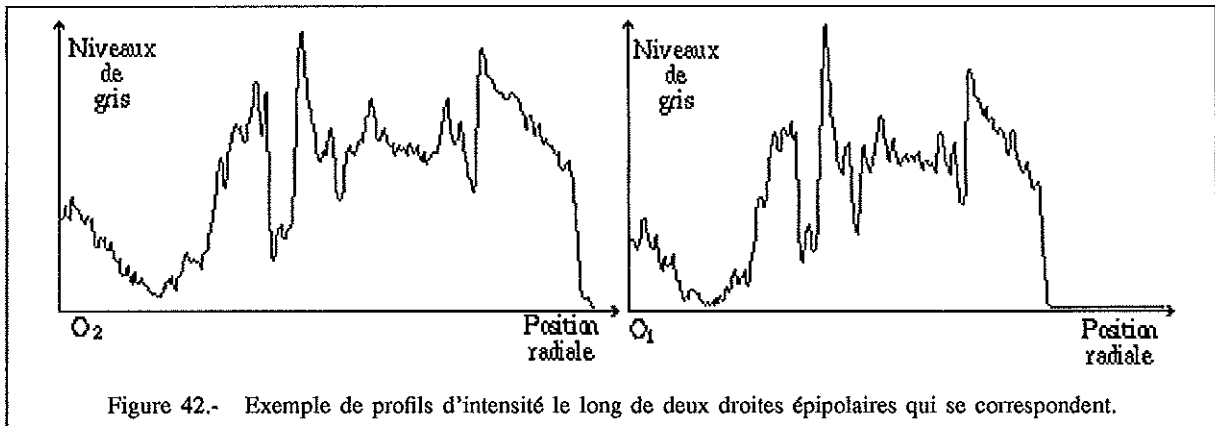


Figure 42.- Exemple de profils d'intensité le long de deux droites épipolaires qui se correspondent.

A partir des profils obtenus, remarquons que:

- . un des deux profils semble "dilaté" par rapport à l'autre,
- . les points principaux O_1 et O_2 se correspondent,
- . les profils ont beaucoup de points caractéristiques communs. Ces points sont des pics, des vallées et des points de fort gradient des profils,
- . ces profils sont bruités.

Notre méthode de mise en correspondance va permettre d'apparier des points caractéristiques des profils d'intensité.

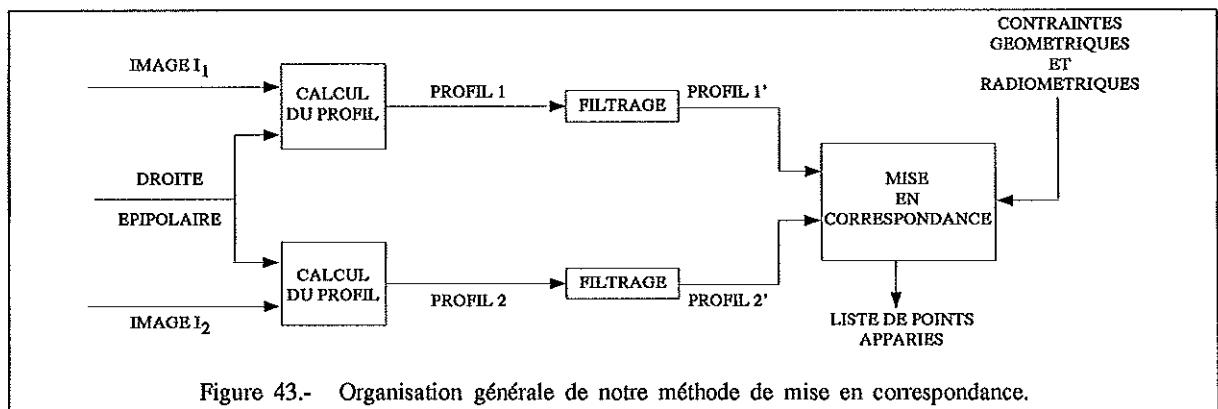
4.- Organisation générale de notre méthode de mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale

Nous proposons une méthode originale de mise en correspondance de points sur les profils d'intensité, le long de droites épipolaires qui se correspondent. Cette méthode comporte deux phases principales:

- . Un filtrage des profils basé essentiellement sur une variante du filtre médian: le filtre médian "seuillé". Ce filtrage est nécessaire car, en éliminant le bruit des profils, il permet ensuite d'apparier "facilement" les points caractéristiques de ces profils.
- . Un algorithme d'appariement permettant de mettre en correspondance les points caractéristiques à partir des profils d'intensité filtrés.

Signalons qu'un algorithme de corrélation classique n'est pas applicable dans le cas présent. En effet, le facteur de dilatation n'est pas constant sur toute la longueur des profils, car il dépend de la profondeur à laquelle se trouvent les objets présents dans l'image.

La figure 43 représente l'enchaînement des traitements de notre méthode d'appariement.



Travaillant directement sur les profils d'intensité, cette méthode de mise en correspondance permet d'apparier de petits détails présents dans les images. Cette particularité est fort intéressante car elle permet la reconstruction 3D d'objets non polyédriques, notamment grâce à l'appariement de points de surface des objets.

5.- Le processus de filtrage

Dans cette section, nous proposons un processus de filtrage des profils d'intensité, basé essentiellement sur une variante du filtre médian: le filtre médian "seuillé". Cette variante a la propriété de lisser les profils d'intensité, tout en conservant les impulsions étroites et significatives de ces profils. Cette propriété est fondamentale, car nous proposons un algorithme d'appariement des pics et des vallées des profils d'intensité.

Le filtre médian, introduit pour la première fois dans [Tukey, 1974], a été très largement utilisé afin de réduire le bruit d'un signal mono ou bidimensionnel. L'utilisation fréquente de ce filtre s'explique par sa simplicité, son filtrage efficace et sa conservation des contours. Dans [Bovik *et al.*, 1987], le lecteur peut trouver une étude très complète concernant les conséquences de l'application de ce filtre sur l'estimation et la préservation des contours.

5.1.- Définition du filtre médian "classique"

Soit un ensemble fini de variables aléatoires $X = (X_1, X_2, \dots, X_m, \dots, X_{2m+1})$, $m \geq 0$. Nous pouvons associer à X un vecteur $X_{(.)}$ tel que:

$$X_{(.)} = (X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(m)}, \dots, X_{(2m+1)}), \text{ où } X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(m)} \leq \dots \leq X_{(2m+1)} \quad (56)$$

La valeur médiane "classique" V_m de X est telle que: $V_m = X_{(m)}$.

Ce filtre a la particularité d'éliminer les impulsions dont la largeur est inférieure ou égale à m . Afin de bien comprendre l'action de ce filtre, prenons un exemple numérique. Fixons pour cela $m = 2$. Soit la suite de valeurs à filtrer:

3 5 4 6 7 30 32 7 6 8

Le résultat de l'application du filtre médian est le suivant:

3 5 5 6 7 7 7 8 6 8

Sur cet exemple, nous voyons que les valeurs 30 et 32 ont été supprimées. Elles correspondaient à une impulsion de largeur m . A la suite de ces résultats, on peut se demander si les valeurs supprimées étaient significatives, bien qu'elles aient été supprimées. C'est pour cette raison que nous avons défini une variante du filtre médian: le filtre médian "seuillé".

5.2.- Définition du filtre médian "seuillé"

Ce filtre se définit très facilement à partir du filtre médian classique. En effet, la valeur médiane "seuillée" V_{ms} est définie à partir de X et de la valeur médiane "classique" V_m , de la façon suivante:

$$V_{ms} = \begin{cases} X_m & \text{Si } |X_m - V_m| \geq \text{Seuil} \\ X_{(m)} & \text{Sinon} \end{cases} \quad (57)$$

En utilisant un seuil très faible ($\text{Seuil} = 4$), l'application de ce filtre, sur la suite numérique précédemment étudiée, fournit les résultats suivants:

3 5 5 6 7 30 32 8 6 8

A partir de ces résultats, nous constatons que la suite de valeurs a été filtrée et que les valeurs 30 et 32 ont été conservées. Ces deux valeurs correspondaient à une impulsion significative.

5.3.- Comparaison entre le filtre médian classique et le filtre médian "seuillé"

La figure 44 présente le résultat de ces deux filtres sur un même profil d'intensité.

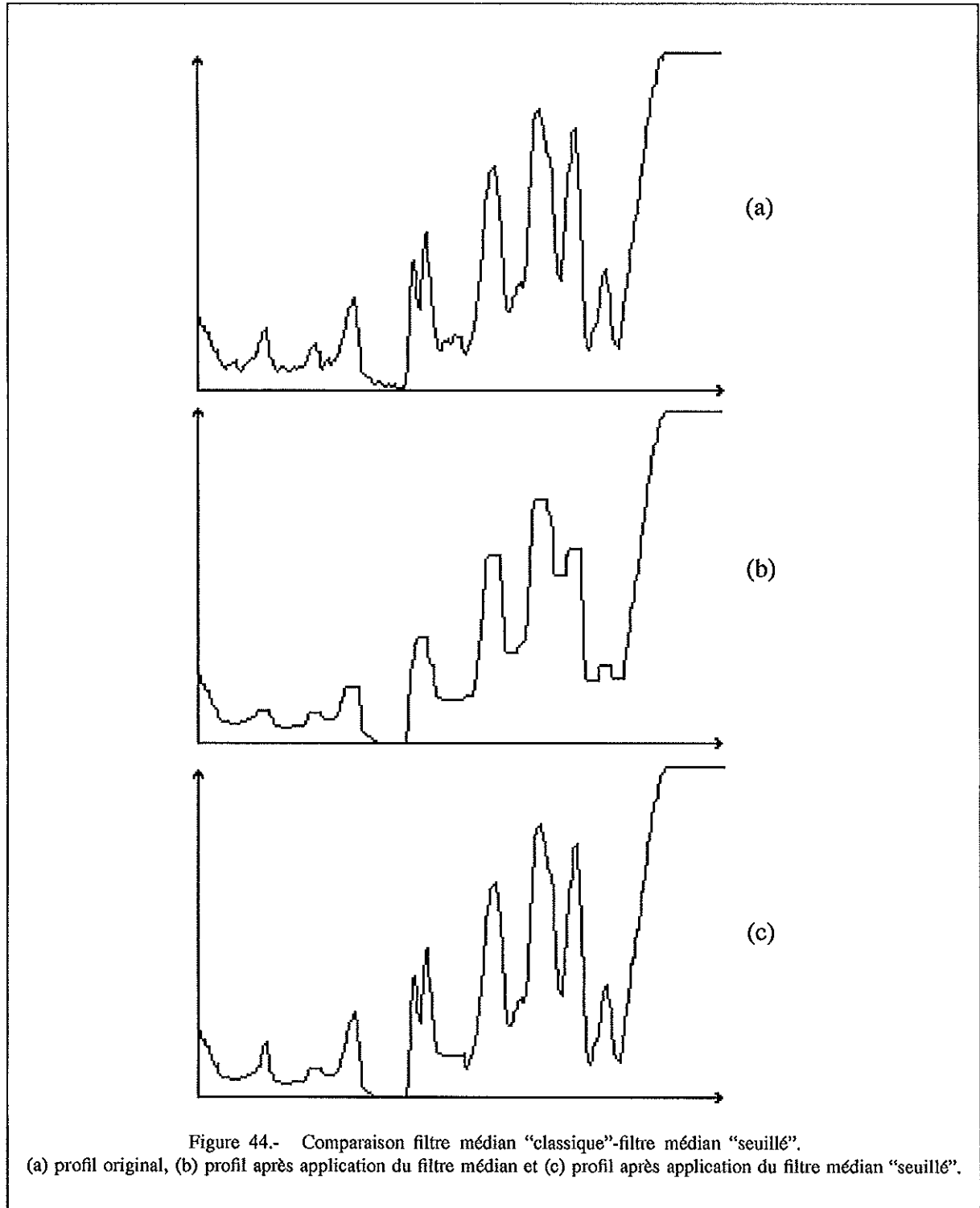


Figure 44.- Comparaison filtre médian "classique"-filtre médian "seuillé".
(a) profil original, (b) profil après application du filtre médian et (c) profil après application du filtre médian "seuillé".

Nous voyons très nettement que le filtre médian classique supprime les pics et les vallées

du profil. Par contre, nous constatons que le filtre médian "seuillé" permet, tout en lissant le profil, de conserver les impulsions étroites et significatives.

Ce filtre médian "seuillé" est donc un point clef de notre méthode d'appariement.

5.4.- Organisation générale de notre processus de filtrage

Les profils utilisés lors de la mise en correspondance sont lissés au préalable par une succession de filtres simples. La figure 45 présente l'organisation générale de notre processus de filtrage.

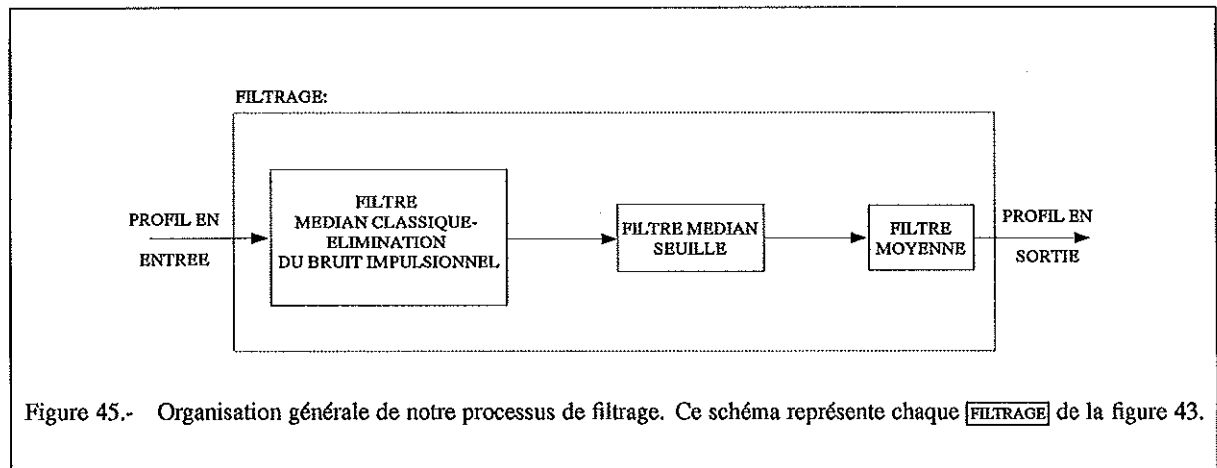


Figure 45.- Organisation générale de notre processus de filtrage. Ce schéma représente chaque **FILTRAGE** de la figure 43.

Le résultat de l'application de notre processus de filtrage, sur des profils d'intensité obtenus le long de deux droites épipolaires qui se correspondent, est présenté figure 46.

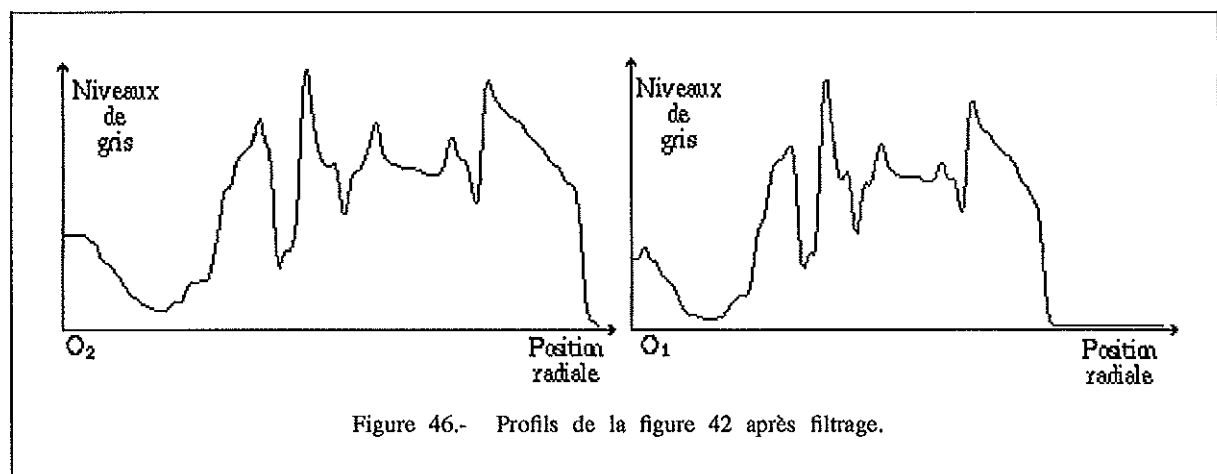


Figure 46.- Profils de la figure 42 après filtrage.

Nous constatons que de nombreux points communs sont "facilement" détectables sur les profils d'intensité filtrés. Nous constatons également que certains points caractéristiques, communs aux deux profils originaux (voir figure 42), ont disparu. De ce fait, l'algorithme d'appariement mis en œuvre doit prendre en compte les différences qui peuvent exister entre deux profils qui se correspondent.

Les profils obtenus, à la suite du processus de filtrage, vont être utilisés lors de la phase de mise en correspondance.

6.- Algorithme de mise en correspondance de points dans des images noir et blanc

6.1.- Principes

Dans cette section, nous proposons un algorithme de mise en correspondance de points dans des images. Pour cela, nous filtrons tout d'abord les profils d'intensité, obtenus le long de droites épipolaires qui se correspondent. Puis nous mettons en correspondance des points sur ces profils filtrés.

Les points mis en correspondance sont des pics, des vallées et des points de fort gradient des profils.

Notre algorithme de mise en correspondance comporte deux phases essentielles:

- . appariement des points de fort gradient,
- . appariement des pics et des vallées.

La figure 47 présente l'organisation de notre algorithme de mise en correspondance.

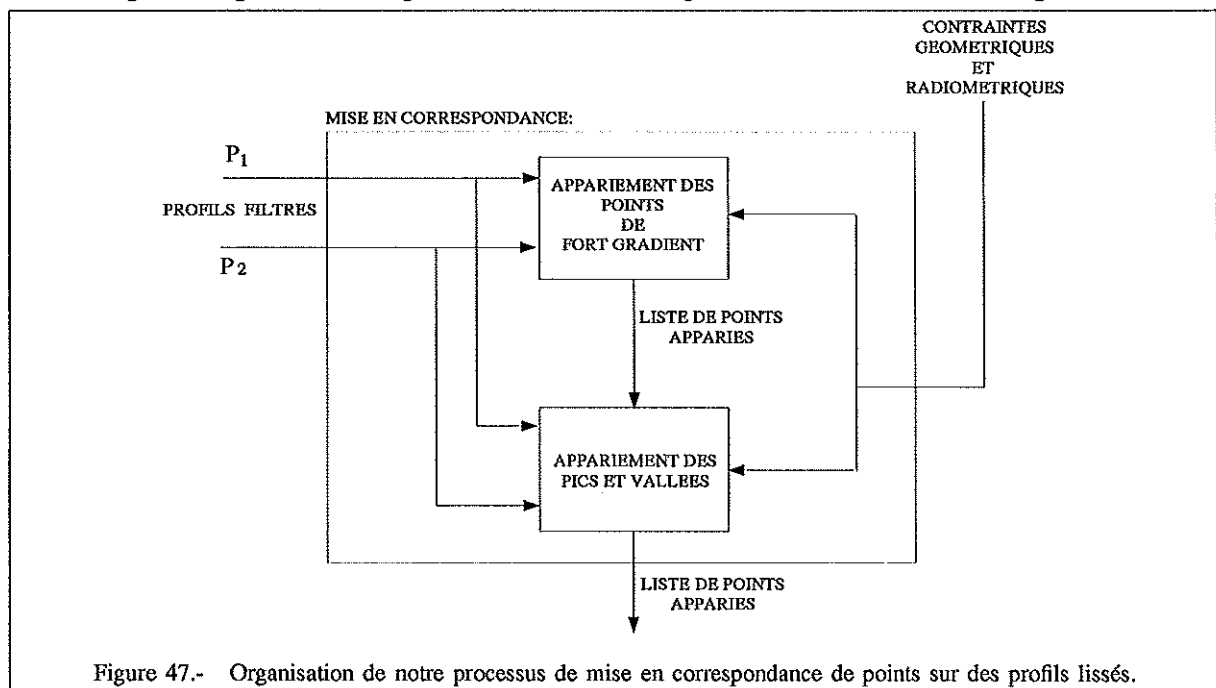
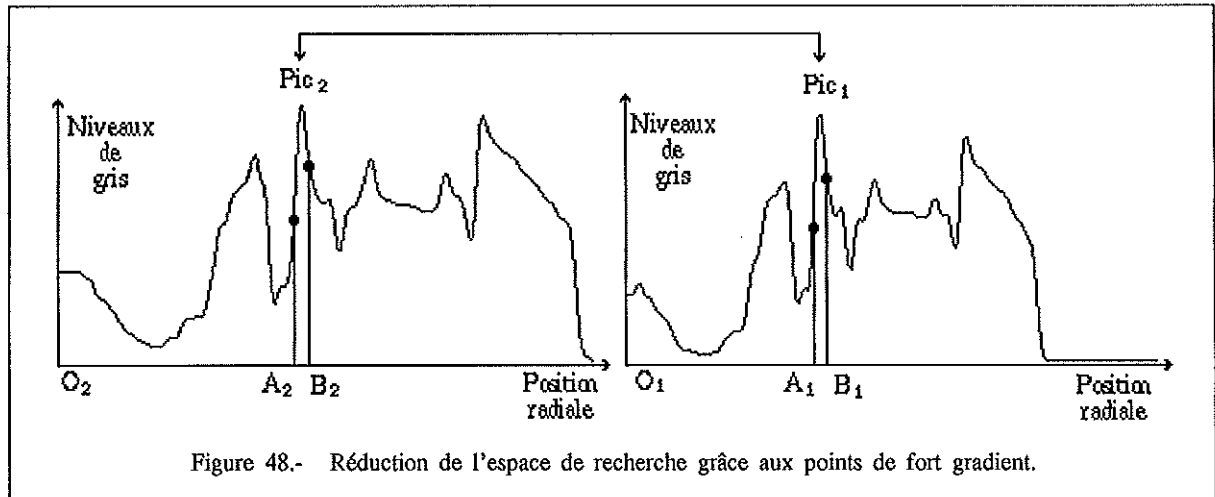


Figure 47.- Organisation de notre processus de mise en correspondance de points sur des profils lissés.

L'appariement des points de fort gradient est tout d'abord réalisé à partir des profils filtrés. Les points mis en correspondance sont alors utilisés, afin de réduire l'espace de recherche d'homologues lors de la phase d'appariement des pics et des vallées des profils (voir figure 48).

Nous avons préféré appairier en premier les points de fort gradient, car nous avons constaté expérimentalement que ces points engendraient moins de faux appariements que les pics et les vallées.



A partir de la figure 48, nous constatons que si nous avons (A_1, A_2) et (B_1, B_2) , deux couples de points mis en correspondance, l'espace de recherche de l'homologue du point Pic_2 est réduit à l'intervalle $[A_1, B_1]$.

Dans la suite de ce chapitre, nous considérerons deux profils, P_1 et P_2 , et nous utiliserons les conventions suivantes:

- . Les profils P_1 et P_2 sont issus de deux droites épipolaires qui se correspondent. Les profils P_1 et P_2 sont supposés filtrés.
- . f_1 est la fonction associée au profil P_1 ,
- . f_2 est la fonction associée au profil P_2 .
- . Le profil P_2 est "dilaté" par rapport au profil P_1 , c'est-à-dire que P_2 est issu de l'image qui a été prise:
 - soit avec la focale la plus longue (dans le cas d'une caméra munie d'un zoom),
 - soit avec la caméra dans la position la plus en avant (dans le cas d'une caméra qui se déplace sur un rail),
- . Si un point x_1 du profil P_1 doit être apparié avec un point x_2 du profil P_2 , alors nous avons $x_1 \leq x_2$.

6.2.- Appariement des points de fort gradient des profils

Nous présentons ici un algorithme d'appariement de points de fort gradient appartenant à deux profils qui se correspondent.

Dans ce qui suit, nous cherchons, sur le profil P_1 , l'homologue x_1 d'un point x_2 appartenant au profil P_2 . Pour cela, posons:

- . C_1 , l'ensemble des maxima locaux de $\left| \frac{\delta f_1}{\delta x} \right|$,
- . C_2 , l'ensemble des maxima locaux de $\left| \frac{\delta f_2}{\delta x} \right|$,
- . $Homologues_{x_2}$, l'ensemble des homologues possibles de x_2 et
- . S , un seuil.

Notre algorithme d'appariement peut s'exprimer de la façon suivante:

1. Calculer

- $C_1^+ = \left\{ x / \left| \frac{\delta f_1(x)}{\delta x} \right| > S \text{ et } \frac{\delta f_1(x)}{\delta x} \geq 0 \right\}$, $C_1^- = \left\{ x / \left| \frac{\delta f_1(x)}{\delta x} \right| > S \text{ et } \frac{\delta f_1(x)}{\delta x} < 0 \right\}$,
où x est un maximum local de $\frac{\delta f_1}{\delta x}$,
- $C_2^+ = \left\{ x / \left| \frac{\delta f_2(x)}{\delta x} \right| > S \text{ et } \frac{\delta f_2(x)}{\delta x} \geq 0 \right\}$, $C_2^- = \left\{ x / \left| \frac{\delta f_2(x)}{\delta x} \right| > S \text{ et } \frac{\delta f_2(x)}{\delta x} < 0 \right\}$,
où x est un maximum local de $\frac{\delta f_2}{\delta x}$,
- $C_1 = C_1^+ \cup C_1^-$, $C_2 = C_2^+ \cup C_2^-$.

2. Trier C_2 par ordre croissant.

3. Pour chaque élément x_2 de C_2 pris par ordre croissant:

Si $x_2 \in C_2^+$ alors

$$\text{Homologues}_{x_2} = \left\{ x_1 / x_1 \in C_1^+, x_1 \leq x_2, f_1(x_1) \simeq f_2(x_2) \text{ et } \left| \frac{\delta f_1(x_1)}{\delta x} \right| \simeq \left| \frac{\delta f_2(x_2)}{\delta x} \right| \right\}$$

sinon

$$\text{Homologues}_{x_2} = \left\{ x_1 / x_1 \in C_1^-, x_1 \leq x_2, f_1(x_1) \simeq f_2(x_2) \text{ et } \left| \frac{\delta f_1(x_1)}{\delta x} \right| \simeq \left| \frac{\delta f_2(x_2)}{\delta x} \right| \right\}$$

Si $\text{Card}(\text{Homologues}_{x_2}) = 0$ alors x_2 n'a pas d'homologue,
 Si $\text{Card}(\text{Homologues}_{x_2}) = 1$ alors x_2 a un seul homologue,
 Si $\text{Card}(\text{Homologues}_{x_2}) \geq 2$ alors x_2 a plus d'un homologue possible.

Pour choisir le meilleur, nous minimisons le critère:

$$|f_1(x_1) - f_2(x_2)| + \left| \left| \frac{\delta f_1(x_1)}{\delta x} \right| - \left| \frac{\delta f_2(x_2)}{\delta x} \right| \right|$$

Si x_2 a un homologue x_1 alors

- enlever tous les $x \in C_1^+$ tels que $x_1 \geq x$,
- enlever tous les $x \in C_1^-$ tels que $x_1 \geq x$.

La figure 49 présente le résultat de cet algorithme sur deux profils lissés.

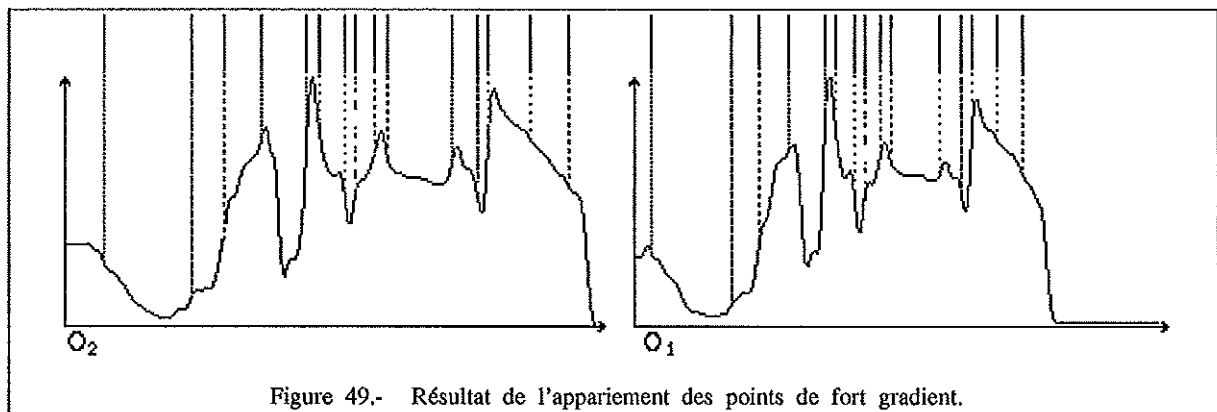


Figure 49.- Résultat de l'appariement des points de fort gradient.

Nous constatons qu'un grand nombre de points sont mis en correspondance sur les profils. Ces points correspondent aux maxima locaux de la dérivée.

Une étude rapide de la complexité de cet algorithme montre qu'il est en $O(n^3)$. En effet:

- . la phase 1 est en $O(n)$, lors du calcul de C_1 et C_2 ,
- . la phase 2 est en $O(n \log n)$, lors du tri de C_2 ,
- . la phase 3 est en $O(n^3)$, lors de l'appariement. En effet, il y a trois parcours imbriqués d'ensembles: C_2 , C_1 et $Homologues_{x_2}$.

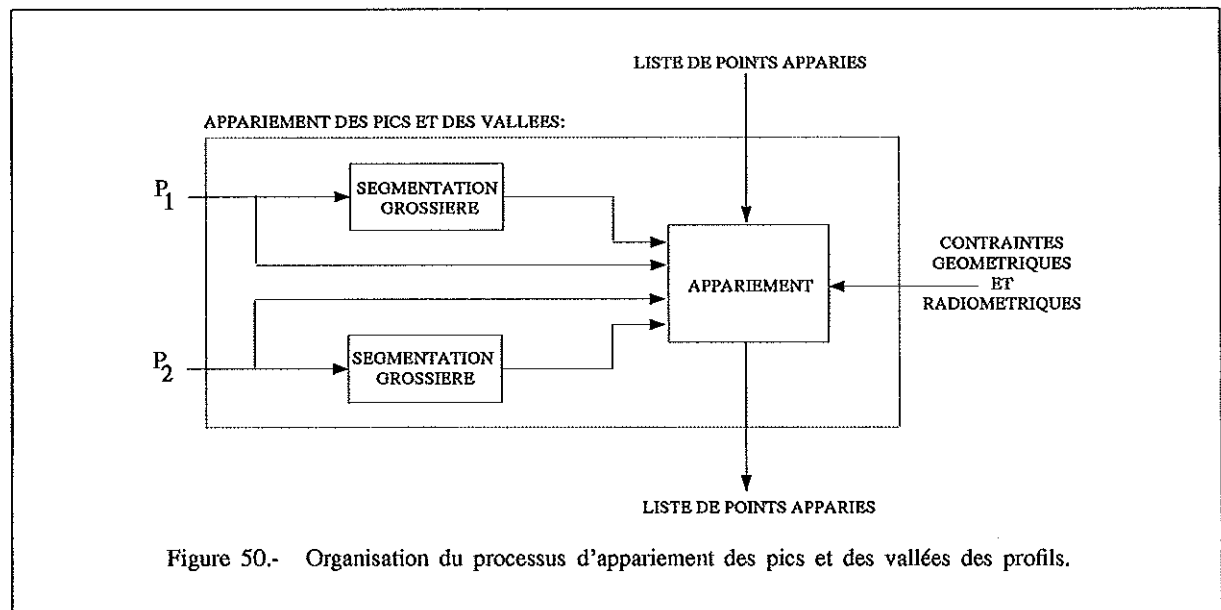
6.3.- Appariement des pics et des vallées des profils

Nous présentons ici un algorithme de mise en correspondance des maxima et minima locaux de deux profils qui se correspondent.

Rappelons que cet algorithme est appliqué entre deux couples de points de contour déjà mis en correspondance sur les profils (voir figure 48).

Notre algorithme d'appariement des pics et des vallées des profils se décompose en deux phases (voir figure 50):

- . la segmentation grossière de chaque profil,
- . l'appariement réalisé à partir des segmentations grossières des deux profils.



6.3.1.- La segmentation grossière

Le but de cette segmentation est de:

- . séparer les zones croissantes et décroissantes des profils d'intensité,
- . mettre en évidence les changements de signe de la dérivée le long des profils.

La figure 51 présente le résultat de cette segmentation grossière le long de deux profils.

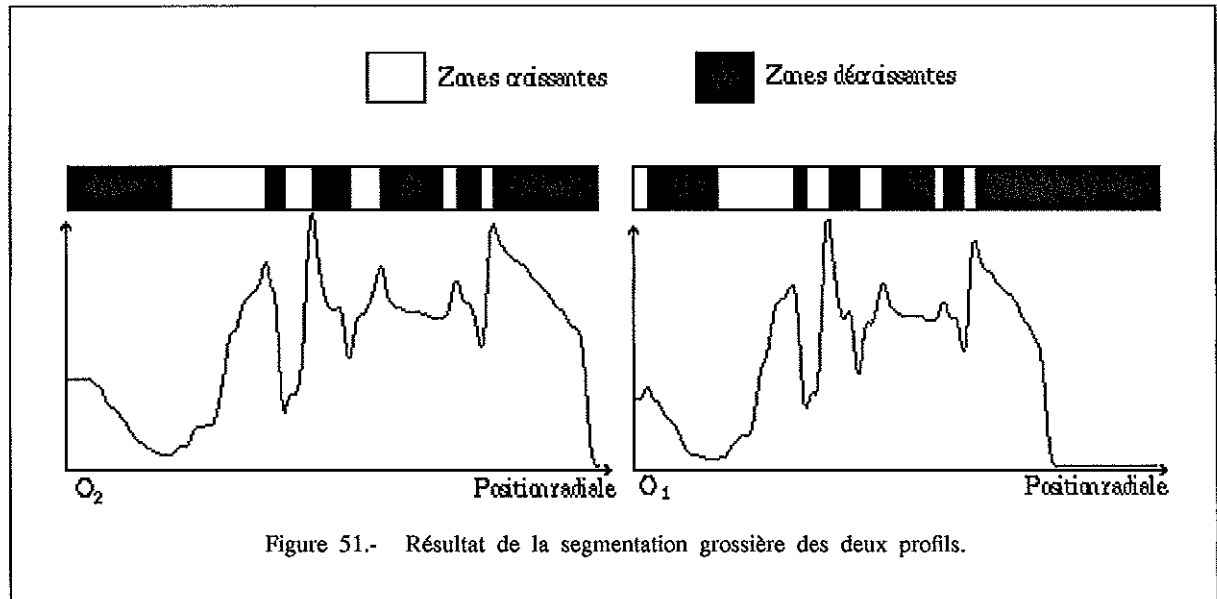


Figure 51.- Résultat de la segmentation grossière des deux profils.

Sur cette figure, nous constatons que:

- . les segmentations obtenues sont différentes, quoique très semblables,
- . des zones du profil P_2 correspondent à des zones du profil P_1 ,
- . les points séparant ces zones se correspondent.

6.3.2.- Appariement à partir des segmentations grossières

Nous présentons ici un algorithme d'appariement des pics et de vallées de deux profils, sur lesquels nous avons au préalable réalisé une segmentation grossière.

Dans ce qui suit, nous cherchons sur le profil P_1 , l'homologue x_1 d'un point x_2 appartenant au profil P_2 . Pour cela, posons que:

- . $Z(P, x)$ est une fonction qui renvoie une zone croissante ou décroissante du profil P . Cette zone est telle que le point x du profil lui appartienne,
- . $Moyenne(Z)$ est une fonction qui renvoie la moyenne des niveaux de gris de la zone Z ,
- . $Max_Min(Z)$ est une fonction qui renvoie l'amplitude des niveaux de gris de la zone Z ,
- . $Apparie(Z_1, Z_2)$ est une fonction qui renvoie vrai si les zones Z_1 et Z_2 sont telles que:
 - $Moyenne(Z_1) \simeq Moyenne(Z_2)$ et
 - $Max_Min(Z_1) \simeq Max_Min(Z_2)$,
- . $Homologues_{x_2}$ est l'ensemble des homologues possibles de x_2 .

Notre algorithme d'appariement peut s'exprimer de la façon suivante:

1. Calculer

$$\begin{aligned} C_1^+ &= \left\{ x/x \in P_1, \frac{\delta f_1(x-1)}{\delta x} < 0 \text{ et } \frac{\delta f_1(x+1)}{\delta x} > 0 \right\}, \\ C_1^- &= \left\{ x/x \in P_1, \frac{\delta f_1(x-1)}{\delta x} > 0 \text{ et } \frac{\delta f_1(x+1)}{\delta x} < 0 \right\}, \\ C_2^+ &= \left\{ x/x \in P_2, \frac{\delta f_2(x-1)}{\delta x} < 0 \text{ et } \frac{\delta f_2(x+1)}{\delta x} > 0 \right\}, \\ C_2^- &= \left\{ x/x \in P_2, \frac{\delta f_2(x-1)}{\delta x} > 0 \text{ et } \frac{\delta f_2(x+1)}{\delta x} < 0 \right\}, \\ C_2 &= C_2^+ \cup C_2^-. \end{aligned}$$

2. Trier C_2 dans l'ordre croissant.

3. Pour chaque élément x_2 de C_2 pris dans l'ordre croissant:

Si $x_2 \in C_2^+$

alors

$$Homologue_{x_2} = \left\{ x_1/x_1 \in C_1^+, \left\{ \begin{array}{l} x_1 \leq x_2 \\ f_1(x_1) \simeq f_2(x_2) \\ Apparie(Z(P_1, x_1 - 1), Z(P_2, x_2 - 1)) \\ Apparie(Z(P_1, x_1 + 1), Z(P_2, x_2 + 1)) \end{array} \right\} \right\}$$

sinon

$$Homologue_{x_2} = \left\{ x_1/x_1 \in C_1^-, \left\{ \begin{array}{l} x_1 \leq x_2 \\ f_1(x_1) \simeq f_2(x_2) \\ Apparie(Z(P_1, x_1 - 1), Z(P_2, x_2 - 1)) \\ Apparie(Z(P_1, x_1 + 1), Z(P_2, x_2 + 1)) \end{array} \right\} \right\}$$

Si $\text{Card}(Homologues_{x_2}) = 0$ alors x_2 n'a pas d'homologue,

Si $\text{Card}(Homologues_{x_2}) = 1$ alors x_2 a un seul homologue,

Si $\text{Card}(Homologues_{x_2}) \geq 2$ alors x_2 a plus d'un homologue possible.

Pour choisir le meilleur, nous minimisons le critère:

$$\begin{aligned} &|f_1(x_1) - f_2(x_2)| + \\ &|Moyenne(Z(P_1, x_1 - 1) - Moyenne(Z(P_2, x_2 - 1)))| + \\ &|Moyenne(Z(P_1, x_1 + 1) - Moyenne(Z(P_2, x_2 + 1)))| \end{aligned}$$

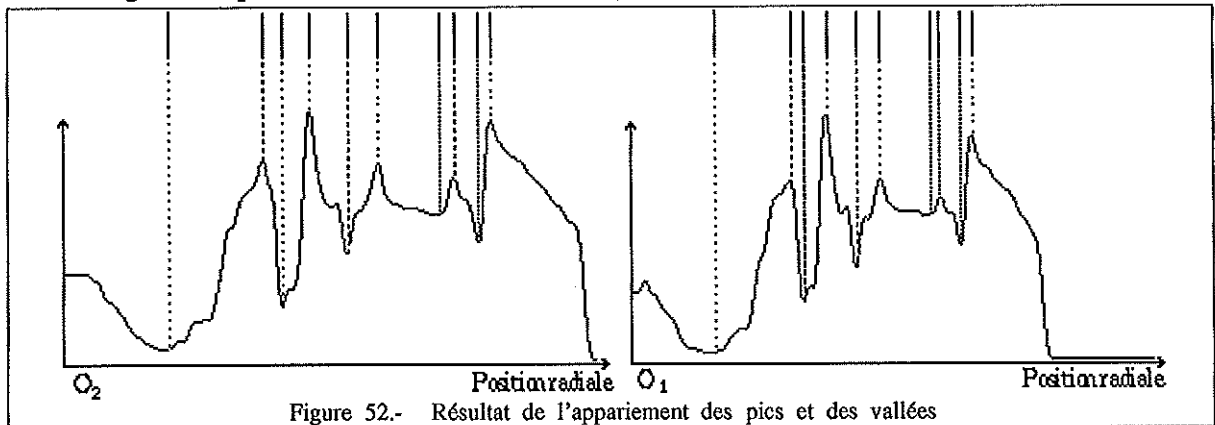
Si x_2 a un homologue x_1 alors

- enlever tous les $x \in C_1^+$ tels que $x_1 \geq x$,
- enlever tous les $x \in C_1^-$ tels que $x_1 \geq x$.

La complexité de cet algorithme est $O(n^3)$, En effet:

- . la présegmentation des profils est en $O(n)$,
- . la phase 1 est en $O(n)$, lors du calcul de C_1 et C_2 ,
- . la phase 2 est en $O(n \log n)$, lors du tri de C_2 ,
- . la phase 3 est en $O(n^3)$, lors de l'appariement. En effet, il y trois parcours imbriqués d'ensembles: C_2 , C_1 et $Homologues_{x_2}$.

La figure 52 présente le résultat de cet algorithme sur deux profils.



Les points appariés correspondent aux maxima et minima locaux des profils d'intensité. Dans les images, ces points sont situés à la surface des objets.

6.4.- Résultats de l'appariement des points de fort gradient, des pics et des vallées sur des images noir et blanc

Nous présentons ici le résultat de notre méthode de mise en correspondance sur quelques droites épipolaires de couples d'images noir et blanc (voir figures 53 et 54).

Signalons qu'en considérant un grand nombre de droites épipolaires, il est possible de couvrir toutes les zones de l'image, et donc d'obtenir une carte tridimensionnelle, assez dense et non uniformément répartie, de la scène.

Le choix du nombre de ces droites dépend de la qualité de la reconstruction tridimensionnelle que l'on désire obtenir.

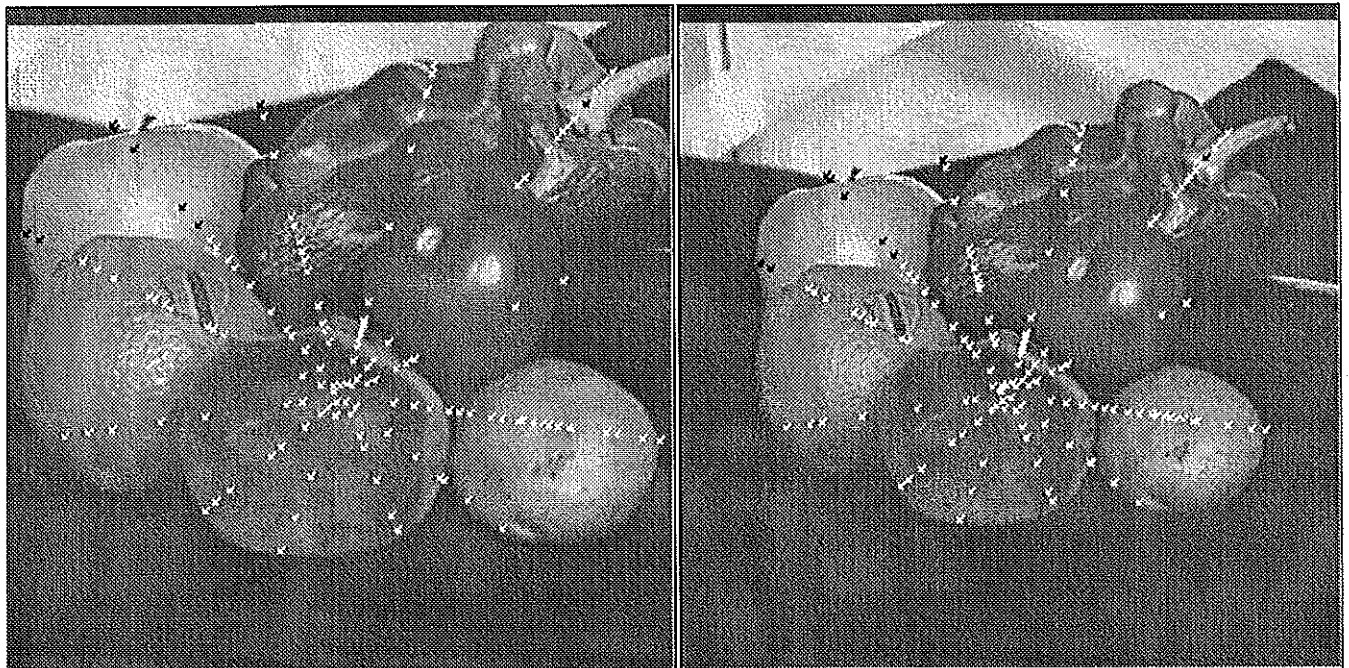


Figure 53.- Résultat de notre algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires. Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.

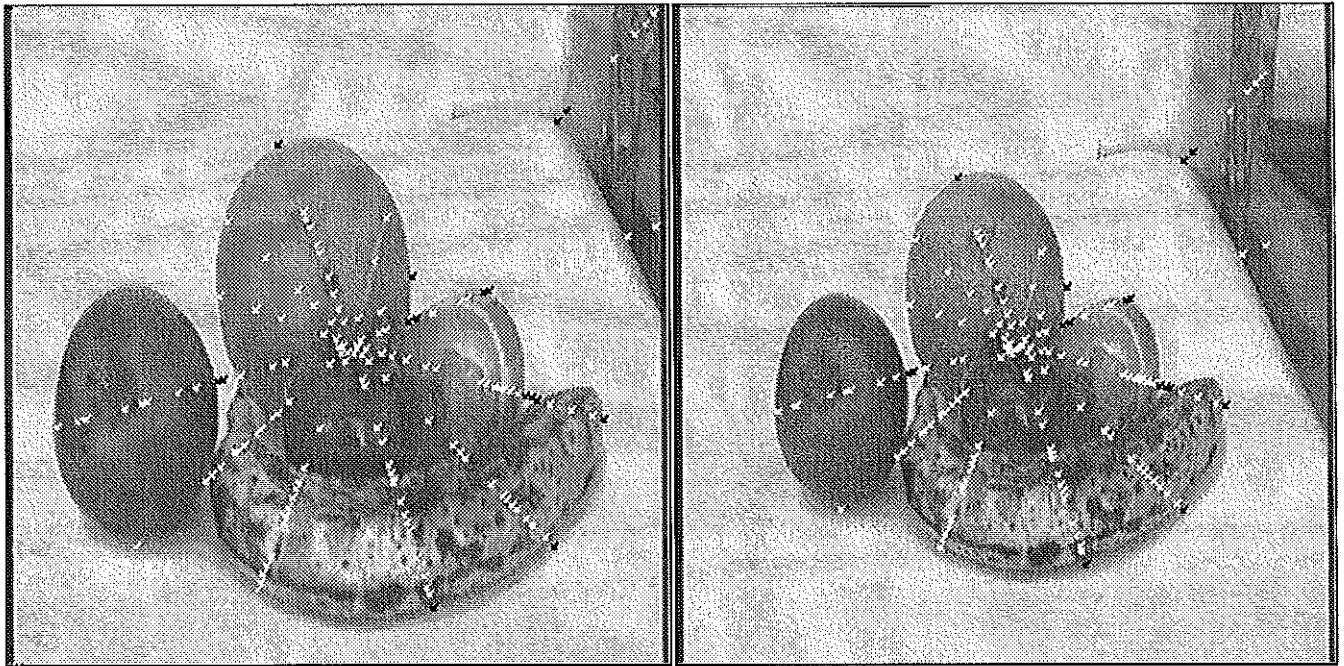


Figure 54.- Résultat de notre algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires.
Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.

A partir de ces images, nous constatons que:

- . aux endroits où les techniques classiques d'appariement de segments et de régions n'auraient pas donné de résultat, notre méthode d'appariement permet de mettre en correspondance de petits détails présents dans les images,
- . un grand nombre de points mis en correspondance sont des points qui appartiennent aux surfaces des objets,
- . les points mis en correspondance ne sont pas uniformément répartis à la surface des objets,
- . sur les surface peu texturées, quelques points sont mis en correspondance.

Pour chaque couple d'images, le tableau 4 présente:

- . le nombre total de points appariés sur les quelques droites épipolaires considérées,
- . le nombre moyen de points appariés par droite épipolaire.

	Figure 53	Figure 54
Nombre total de points appariés	138	143
Nombre moyen de points appariés sur chaque droite	11.5	11.9
Nombre moyen de points sur chaque droite épipolaire	309	309

Tableau 4.- Nombre moyen de points appariés sur chaque droite épipolaire.

Sur le tableau 4, nous constatons que le nombre moyen de points appariés, sur chaque droite épipolaire, est sensiblement le même d'un couple d'images à l'autre. Bien entendu, ce nombre moyen de points appariés par droite épipolaire dépend, très étroitement, de la texture des objets contenus dans la scène.

Les points mis en correspondance, notamment à la surface des objets, vont nous permettre de reconstruire en trois dimensions des objets non polyédriques. Le calcul des surfaces doit être réalisé par un processus d'interpolation, tenant compte du fait que les points ne soient pas uniformément répartis sur les objets.

7.- Algorithme de mise en correspondance de points dans des images couleur

Les travaux rapportés dans ce mémoire ont été menés dans le cadre d'un projet médical, en rapport avec la coelioscopie opératoire. Le chirurgien utilisant, au cours de ses opérations, un endoscope au bout duquel une caméra vidéo couleur est placée, il nous a semblé intéressant d'étudier l'apport de l'information colorimétrique dans notre méthode d'appariement.

Ainsi, dans cette section, nous présentons une variante de notre méthode d'appariement. Cette variante permet de mettre davantage de points en correspondance, grâce à la couleur.

Nous proposons un algorithme d'appariement basé sur l'analyse des profils extraits dans les différentes composantes de l'image (Rouge, Vert, Bleu, ...).

Le choix du système de représentation de la couleur est un point important, car il détermine la qualité de la mise en correspondance. Il est en effet nécessaire que deux points homologues soient représentés par une couleur voisine, même si leurs valeurs dans le système (R,V,B) ne sont pas rigoureusement identiques.

7.1.- Choix du système de représentation de la couleur

La plupart des systèmes de numérisation d'images couleur fournissent la valeur d'un pixel selon trois composantes: Rouge, Vert, Bleu. Malheureusement, ces composantes ne représentent pas la valeur chromatique d'un pixel. Un grand nombre de transformations des coordonnées R,V,B ont été proposées [Gordillo, 1987, Kender, 1977, Kowaliski, 1990, Ohta *et al.*, 1980, ...]. Citons, par exemple, les transformations suivantes:

- . Luminance, Teinte, Saturation (L,T,S) défini dans [Claramont, 1984] de la façon suivante:

$$\begin{aligned}
 - L &= \frac{R+V+B}{3}, \\
 - T &= \begin{cases} \frac{B-R}{3(V+B-2R)} + \frac{1}{3} & \text{Si } \text{Min}(R, V, B) = R \\ \frac{R-V}{3(R+B-2V)} + \frac{2}{3} & \text{Si } \text{Min}(R, V, B) = V \\ \frac{V-B}{3(R+V-2B)} & \text{Si } \text{Min}(R, V, B) = B \end{cases}, \\
 - S &= 1 - \frac{3\text{Min}(R,V,B)}{R+V+B}.
 \end{aligned}$$

La luminance correspond au niveau de gris, la teinte à la couleur et la saturation à la quantité de blanc.

Remarquons que la transformation permettant de passer du système (R,V,B) au système (L,T,S) n'est pas linéaire. De ce fait, cette transformation est très instable [Kender, 1977]. C'est-à-dire que deux pixels ayant des valeurs proches dans le système (R,V,B) n'ont pas forcément des valeurs proches dans le système (L,T,S).

. (I_1, I_2, I_3) défini dans [Ohta *et al.*, 1980]:

- $I_1 = \frac{R+V+B}{3}$,
- $I_2 = \frac{R-B}{2}$,
- $I_3 = \frac{2V-R-B}{4}$.

I_1 correspond à la luminance, et I_2 et I_3 sont des approximations de la teinte et de la saturation. I_2 et I_3 ne correspondent pas exactement à la teinte et à la saturation car, ils comprennent le facteur de luminance.

Afin de représenter la couleur, nous avons choisi le système (I_1, I_2, I_3) en raison de sa simplicité, de sa rapidité de calcul et surtout pour sa linéarité selon les composantes R,V,B.

Cette notion de linéarité est très importante. En effet, elle permet à deux pixels, ayant des valeurs proches dans le système (R,V,B), d'avoir également des valeurs proches dans le système (I_1, I_2, I_3) . Ohta *et al.* ont démontré que les composantes I_1 et I_2 sont généralement suffisantes pour obtenir une bonne segmentation.

7.2.- Organisation de notre algorithme d'appariement couleur

Notre méthode d'appariement sur des images couleur utilise les concepts décrits dans le cas des images noir et blanc. L'idée principale est d'appliquer le même algorithme sur les différents profils extraits dans les composantes R,V,B, I_1, I_2, I_3 .

Notre algorithme est composé de quatre phases principales (voir figure 55):

- . calcul des profils, le long de droites épipolaires qui se correspondent, dans les différentes composantes de l'image,
- . filtrage des profils extraits,
- . tri des profils afin de déterminer leur ordre d'utilisation,
- . appariement des points caractéristiques des profils, en utilisant l'ordre précédemment déterminé.

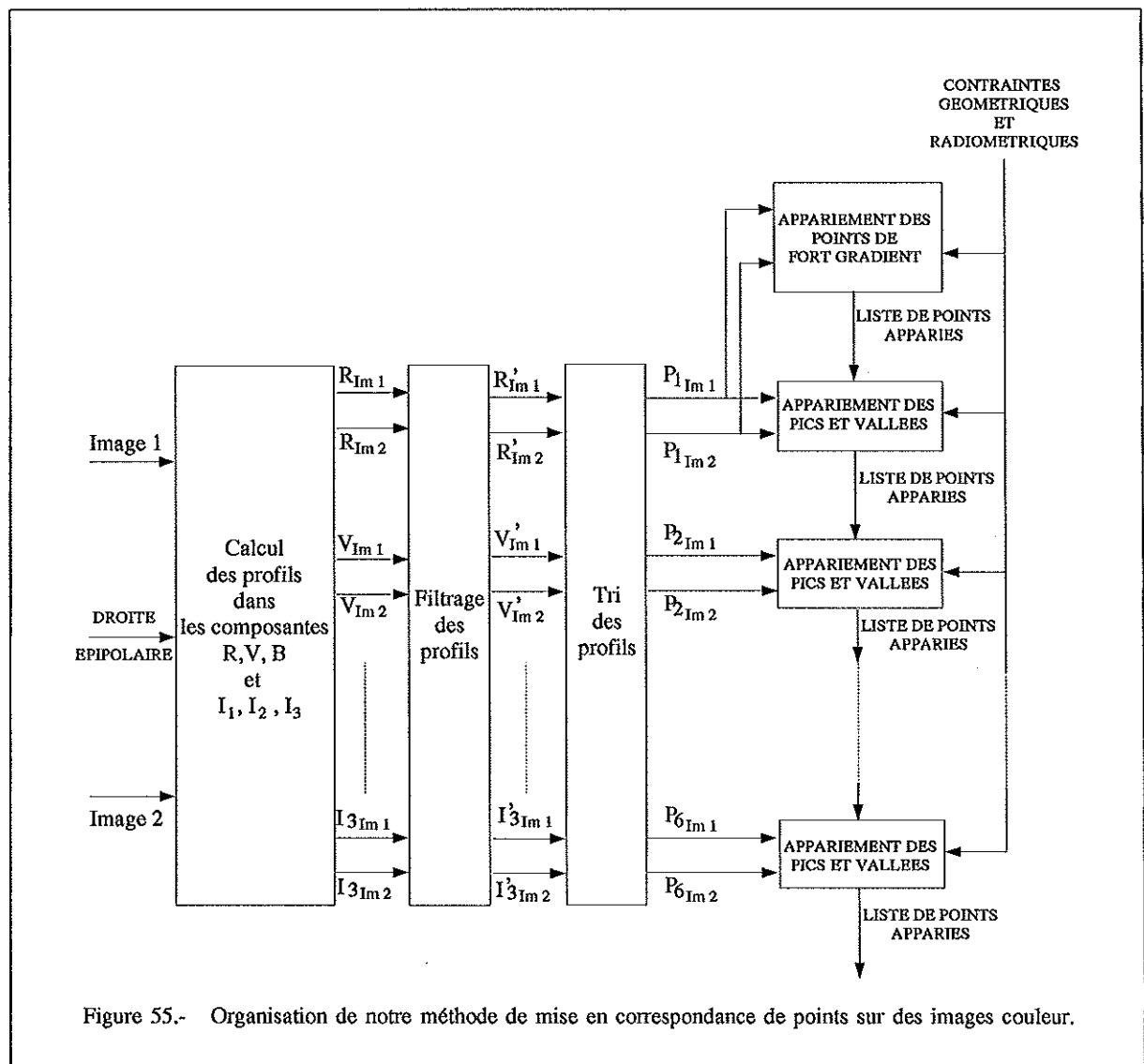


Figure 55.- Organisation de notre méthode de mise en correspondance de points sur des images couleur.

Remarquons que toutes les entités utilisées dans la figure 55 ont été décrites lors de l'étude de notre méthode d'appariement dans des images noir et blanc.

Remarquons également qu'à chaque étape de l'appariement, les points précédemment mis en correspondance sont utilisés afin de réduire l'espace de recherche des homologues (voir la figure 48 page 98). Ceci permet donc de limiter les faux appariements.

7.3.- Calcul et filtrage des profils sur les composantes R, V, B, I_1 , I_2 , I_3

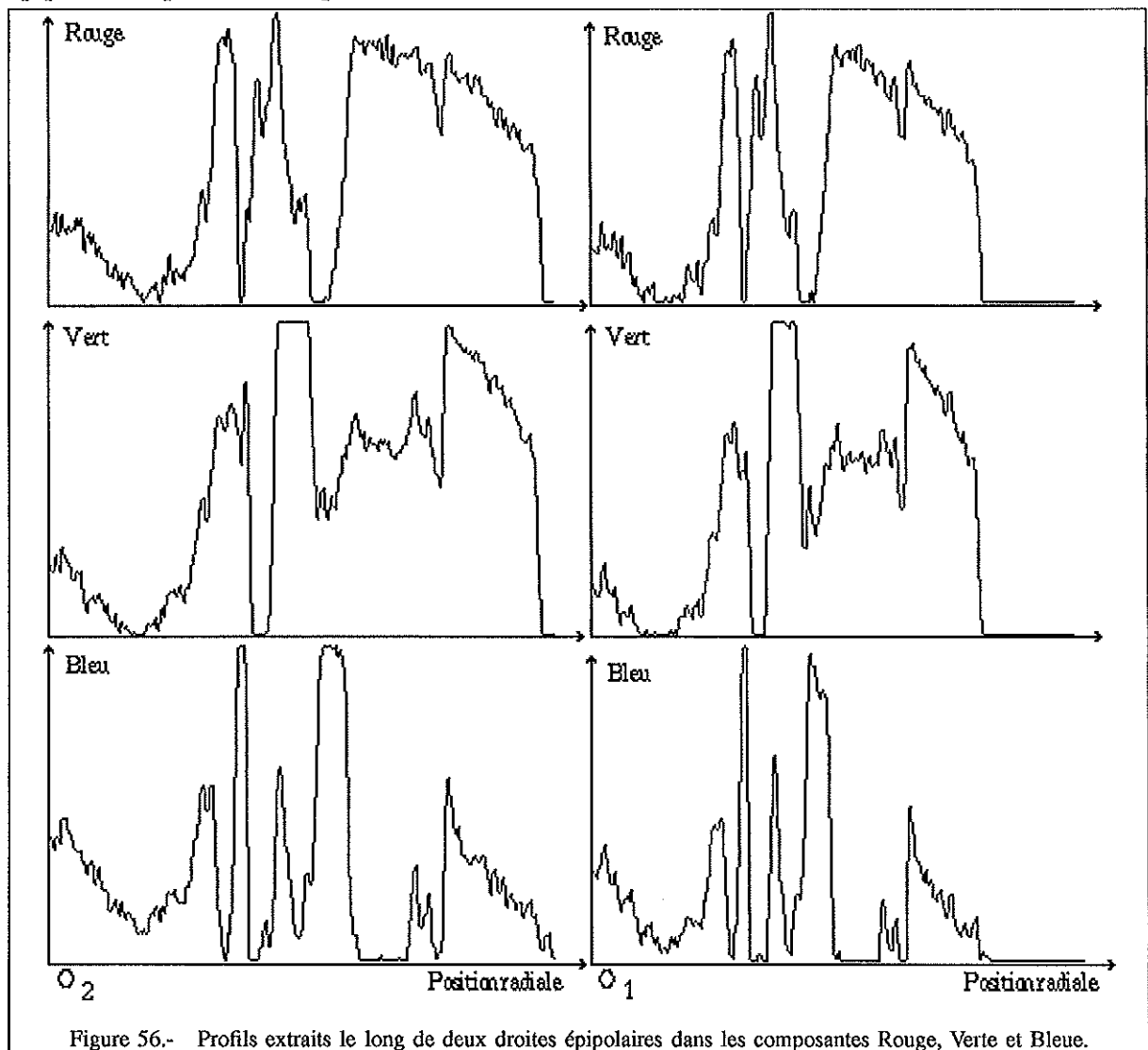
Nous ne décrivons pas ici les méthodes de calcul et de filtrage des profils, car cela a déjà été fait précédemment (voir sections 3 et 5).

Nous donnons pour chaque composante les résultats:

- . de l'extraction des profils le long de deux droites épipolaires qui se correspondent,
- . du filtrage de ces profils.

7.3.1.- Résultat du calcul des profils

Les figures 56 et 57 présentent le résultat du calcul des profils le long de deux droites épipolaires qui se correspondent.



Remarquons que, lors de l'étude de l'algorithme d'appariement dans les images noir et blanc, nous avons déjà présenté les profils extraits dans la composante I_1 (niveau de gris).

Dans ce qui suit, nous dirons qu'un profil est "découpé" ou "accentué", s'il y a de nombreuses variations de niveau dans ce profil.

Nous constatons que les profils extraits dans les composantes Rouge, Verte et Bleue sont beaucoup plus accentués que les profils obtenus dans la composante I_1 . Ceci est dû au fait que I_1 correspond à l'information noir et blanc, c'est-à-dire à la moyenne des composantes R, V et B. Le fait que les profils soient très découpés est fort intéressant, car le nombre de points caractéristiques (pics, vallées, points de fort gradient) est d'autant plus important que les profils sont accentués.

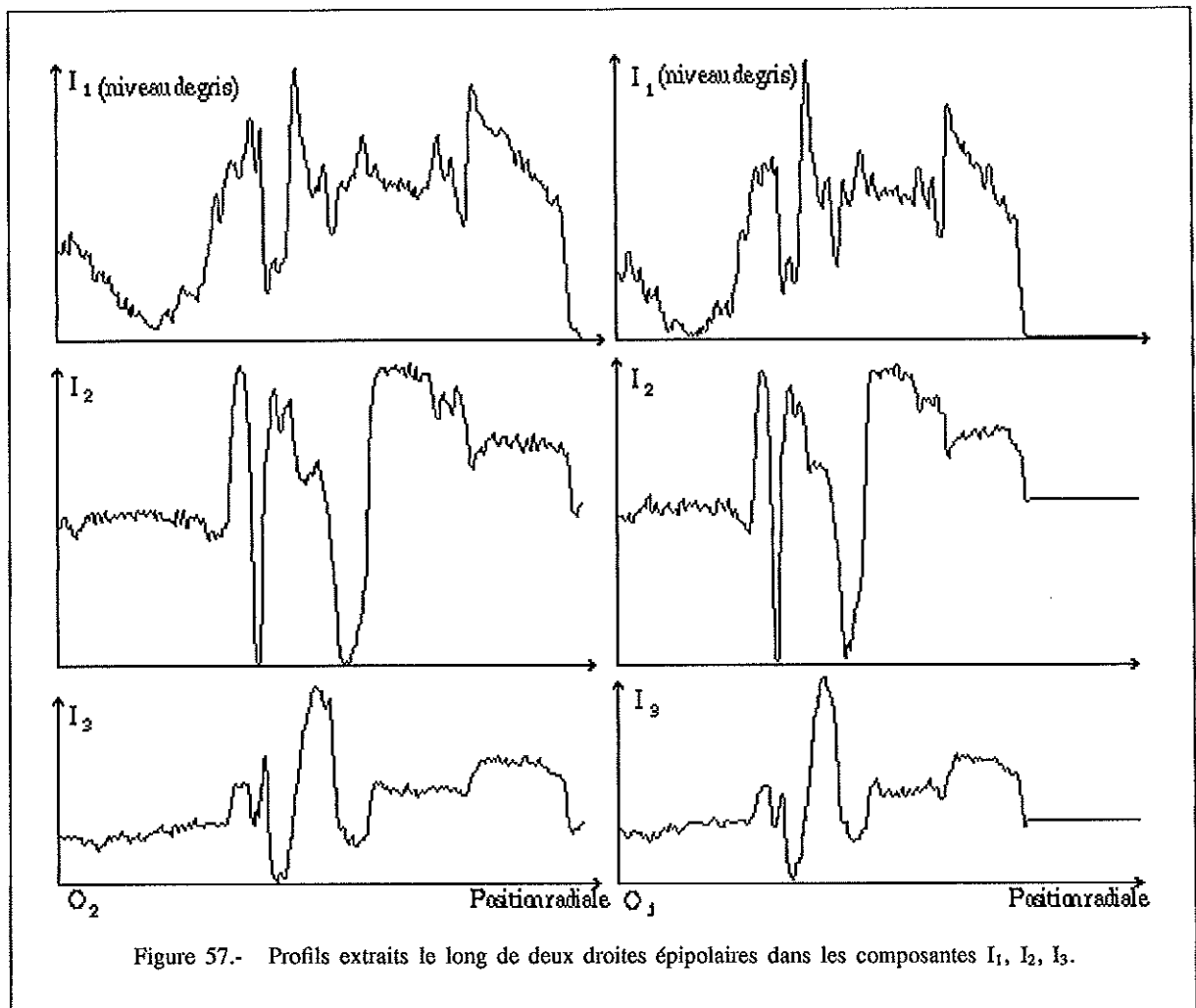


Figure 57.- Profils extraits le long de deux droites épipolaires dans les composantes I_1 , I_2 , I_3 .

Nous constatons également que les points caractéristiques ne sont pas les mêmes pour tous les profils extraits. Ils diffèrent d'une composante à l'autre. Ainsi, l'analyse de tous ces profils va permettre d'apparier un plus grand nombre de points dans les images.

7.3.2.- Résultat du filtrage des profils

Les figures 58 et 59 présentent les résultats du filtrage des profils extraits dans les composantes R, V, B, I_1 , I_2 et I_3 . Les profils filtrés sont utilisés lors de l'appariement couleur.

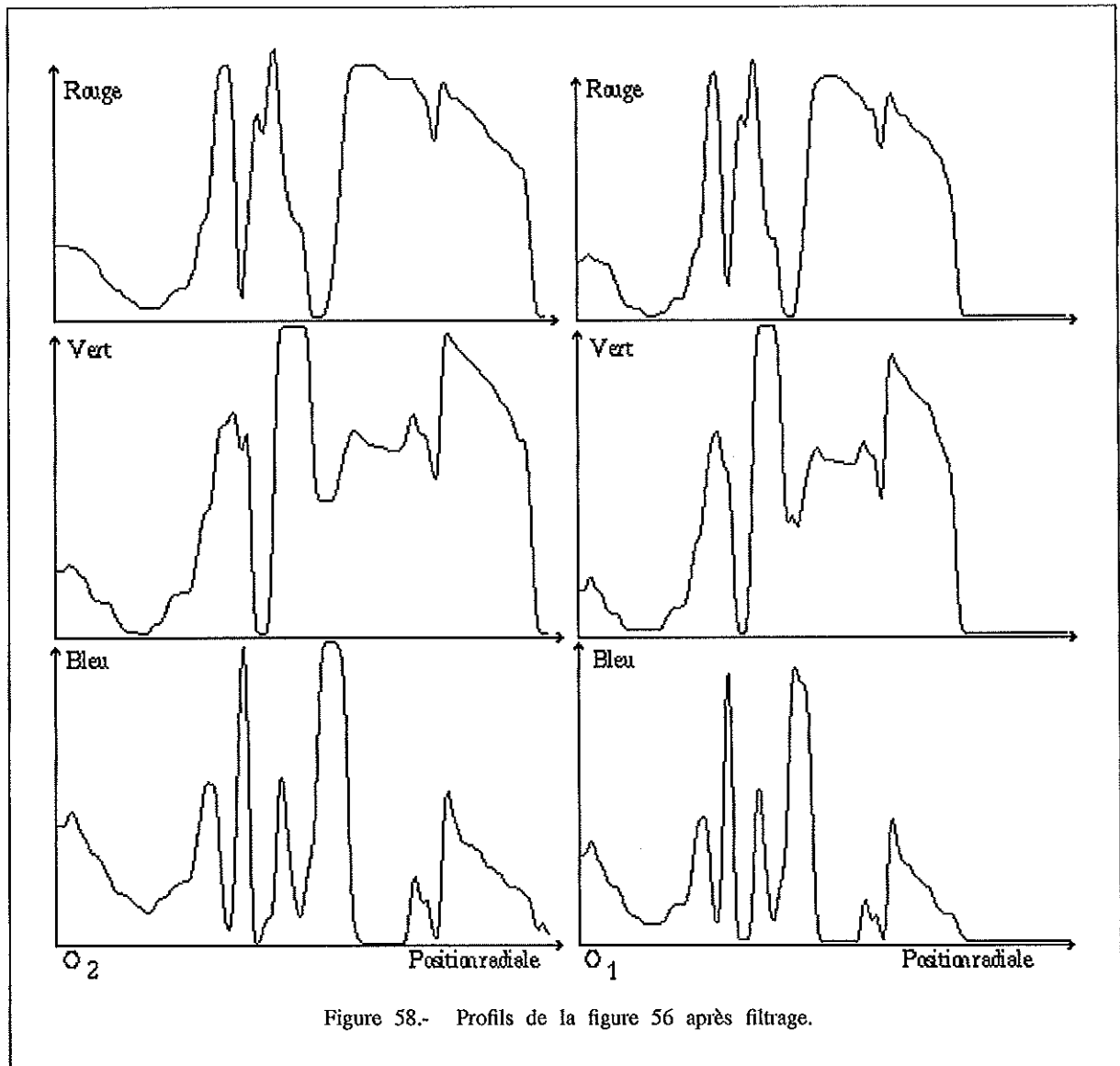
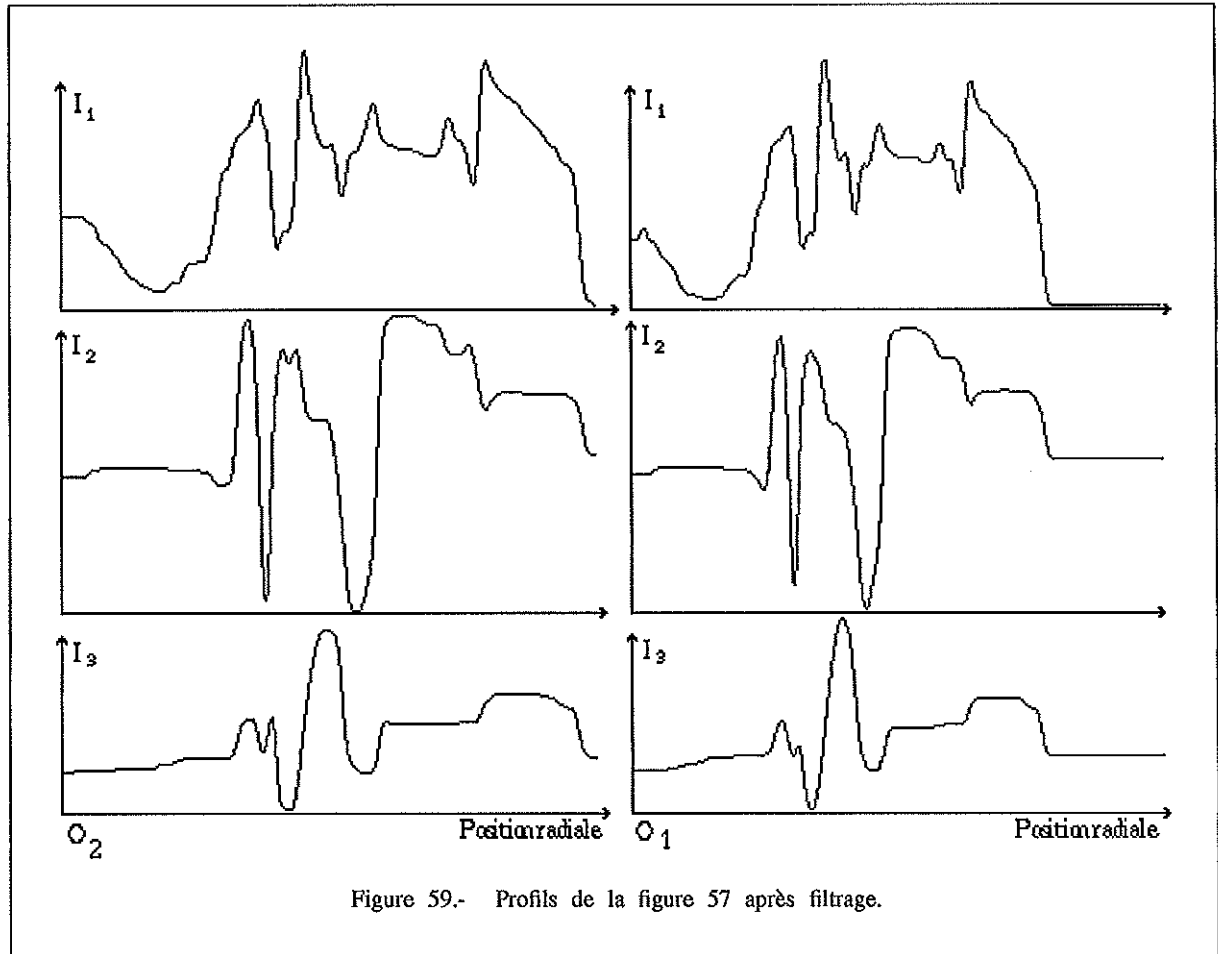


Figure 58.- Profils de la figure 56 après filtrage.

A partir de ces profils filtrés, nous constatons que chaque couple de profils a ses propres points caractéristiques. Ainsi, l'étude des profils de chaque composante va permettre d'apparier des points différents sur les droites épipolaires. L'information colorimétrique permettra donc de mettre en correspondance davantage de points que la seule information noir et blanc.



7.4.- Tri des profils extraits dans les différentes composantes de l'image

Afin d'assurer le plus grand nombre de mises en correspondance correctes, nous utilisons les profils filtrés, du plus accentué au moins accentué.

Pour cela, nous avons défini l'amplitude d'un profil P:

$$\text{Amplitude}(P) = \sum_i \left| \frac{\delta P_i}{\delta x} \right| \quad (58)$$

Plus un profil est découpé, plus son amplitude est importante.

L'ordre d'utilisation des couples de profils $(R'_{Im1}, R'_{Im2}), (V'_{Im1}, V'_{Im2}), \dots, (I'_{3Im1}, I'_{3Im2})$ est défini de la façon suivante:

Soient $P_k \in \{R', V', B', I'1, I'2, I'3\}$ et

$$S(P_k) = \text{Amplitude}(P_{kIm1}) + \text{Amplitude}(P_{kIm2}) \quad (59)$$

Si $S(P_1) \geq S(P_2) \geq \dots \geq S(P_6)$ alors l'ordre d'utilisation des couples de profils est $(P_{1Im1}, P_{1Im2}), (P_{2Im1}, P_{2Im2}), \dots, (P_{6Im1}, P_{6Im2})$.

L'ordre trouvé pour les profils présentés figures 58 et 59 est:

$$S(B') \geq S(R') \geq S(V') \geq S(I'2) \geq S(I'1) \geq S(I'3).$$

7.5.- Appariement à partir des profils extraits dans les différentes composantes de l'image

Notre méthode d'appariement couleur utilise les mêmes algorithmes que ceux utilisés dans le cas des images noir et blanc (voir figure 55):

- . appariement des points de fort gradient,
- . appariement des pics et des vallées.

Après avoir trié les profils filtrés, du plus significatif au moins significatif, nous appliquons notre algorithme d'appariement des points de fort gradient sur le premier couple de profils. Ceci nous permet d'éviter au maximum les faux appariements, car le premier couple de profils est celui qui a les variations les plus marquées.

Les points mis en correspondance sont utilisés afin de réduire l'espace de recherche lors de la phase d'appariement des pics et des vallées de tous les profils (voir figures 48 et 55).

A chaque nouveau couple de profils étudié, les points mis en correspondance permettent de limiter l'espace de recherche d'homologues, et donc de limiter le nombre de faux appariements.

7.6.- Résultat de l'appariement couleur

Nous avons appliqué notre algorithme d'appariement couleur sur un couple d'images (voir figure 60).

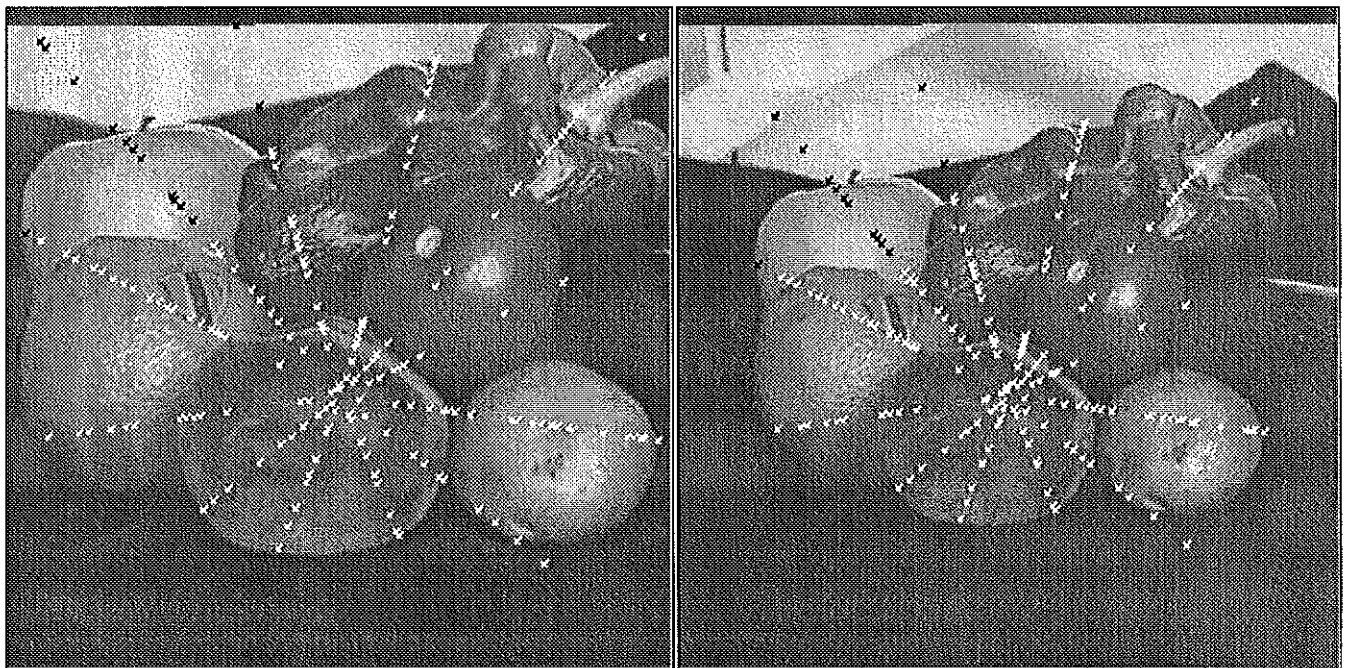


Figure 60.- Résultat de notre algorithme d'appariement couleur sur quelques droites épipolaires. Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.

Rappelons que nous avons déjà considéré ce couple d'images lors de l'appariement dans des images noir et blanc. Nous avons utilisé l'information de luminance, c'est-à-dire $\frac{R+V+B}{3}$.

Pour comparer facilement les résultats entre l'algorithme couleur et l'algorithme noir et blanc, nous redonnons, à la figure 61, le résultat de notre méthode d'appariement sur des images noir et blanc.

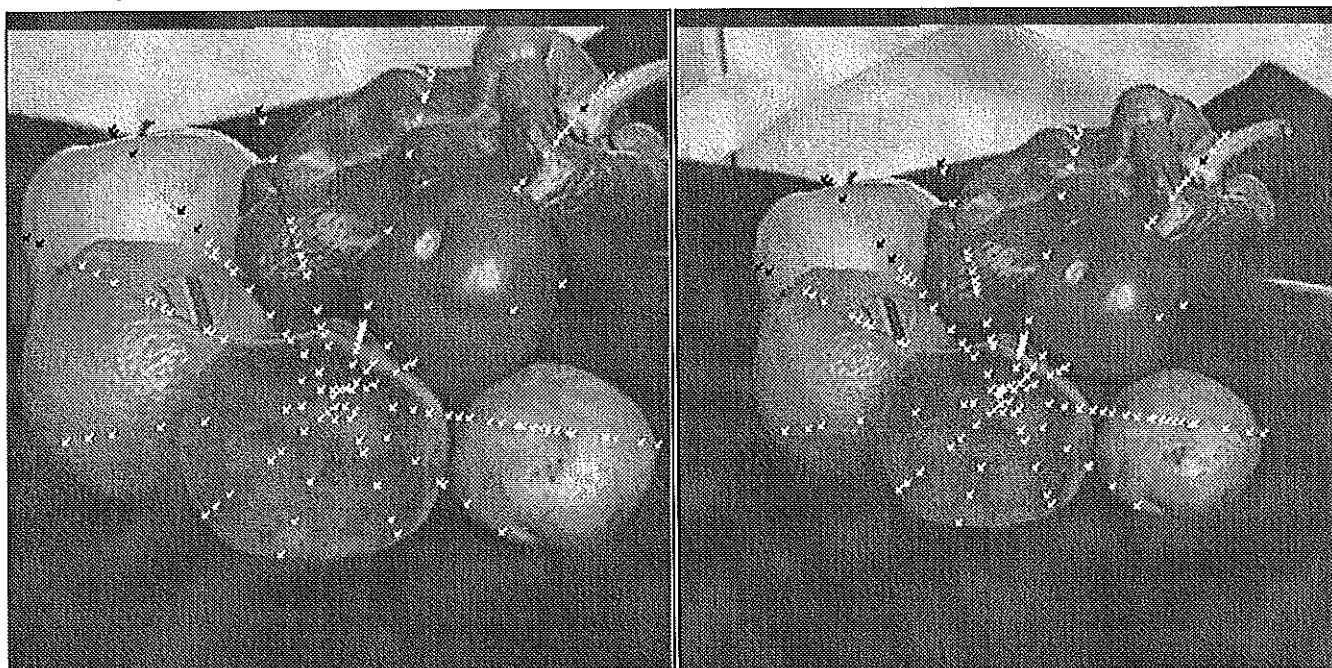


Figure 61.- Résultat de notre algorithme d'appariement noir et blanc sur quelques droites épipolaires.
Les pointes des flèches représentent les points mis en correspondance.

A partir des images présentées figures 60 et 61, nous constatons que:

- . l'utilisation de l'information colorimétrique permet de mettre en correspondance davantage de points que la seule utilisation de l'information noir et blanc. Néanmoins, l'information noir et blanc fournit un grand nombre de mises en correspondance.
- . aux endroits où les changements de niveau de gris sont très faibles, la couleur permet de mettre des points en correspondance. Ces points, généralement sur les surfaces, vont considérablement aider lors de la reconstruction des surfaces d'objets non polyédriques.

Le tableau 5 présente une comparaison entre les résultats de l'appariement couleur et les résultats de l'appariement noir et blanc.

	Appariement couleur	Appariement noir et blanc
Nombre de points appariés	167	138
Nombre moyen de points appariés sur chaque droite épipolaire	13.9	11.5
Nombre moyen de points sur chaque droite épipolaire	309	309

Tableau 5.- Comparaison appariement couleur - appariement noir et blanc.

L'algorithme d'appariement couleur fournit des résultats intéressants, mais il nécessite plus de calculs que l'appariement noir et blanc. La complexité reste néanmoins en $O(n^3)$.

8.- Conclusion de la mise en correspondance dans un système de stéréovision axiale

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode d'appariement basée sur l'étude des profils extraits le long de deux droites épipolaires qui se correspondent.

Cette méthode évite les erreurs induites par l'utilisation de primitives comme les segments et les régions.

Nous avons présenté deux versions de notre algorithme:

- . l'une utilisant des images noir et blanc,
- . l'autre utilisant des images couleur.

L'utilisation de la couleur permet de mettre davantage de points en correspondance, mais nécessite un temps de calcul plus important.

Notre algorithme permet d'apparier de petits détails présents dans les images, en analysant deux profils qui ont un grand nombre de points communs "facilement" détectables. Les points appariés sont des points de contour et des points de surface. C'est là un point fort de notre méthode. En effet, les points de surface vont permettre la reconstruction d'objets non polyédriques, par un processus d'interpolation de surfaces, que nous présentons dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE 2.-
Reconstruction 3D dans un système de
stéréovision axiale et application médicale**

1.- Description des expériences

Le but de ce chapitre est de montrer que la reconstruction tridimensionnelle d'objets est possible dans un système de stéréovision axiale.

Au cours des expériences décrites dans ce chapitre, nous avons utilisé une caméra noir et blanc, munie d'un objectif simple, en mouvement sur un rail. Nous avons préféré ce système optique à une caméra munie d'un zoom, car les distorsions géométriques sont beaucoup plus faibles dans un objectif simple que dans un zoom.

L'étude des erreurs dans un système de stéréovision axiale a montré que, si l'on veut reconstruire un objet dans les meilleures conditions possibles, il faut qu'il soit éloigné du point principal. Aussi avons-nous placé les objets à reconstruire dans un coin de l'image, lors de nos expériences.

Chaque expérience réalisée comporte cinq étapes:

- . acquisition d'un couple d'images,
- . rectification des images afin d'obtenir des images axiales,
- . appariement de points dans les images,
- . calcul des points 3D à partir des points mis en correspondance,
- . reconstruction de surfaces à partir des points 3D calculés.

Rappelons que les images sont prises en deux positions du rail. Ces deux positions, espacées de 20 cm, correspondent aux butées avant et arrière du rail. Il n'y a donc pas d'imprécision de remplacement de la caméra en ces positions, lors de la saisie d'images.

Le calcul des points 3D est réalisé, comme dans un système de stéréovision classique, à partir:

- . des points appariés,
- . des matrices de calibrage.

Nous n'avons pas utilisé les équations de triangulation décrites au chapitre 1 de la partie I. En effet, l'emploi de ces équations entraîne des erreurs d'environ 2 mm. Nous pensons qu'elles sont dues à une précision limitée de la machine.

Dans la suite de ce chapitre, nous présentons les résultats de deux expériences:

- . la reconstruction d'un objet polyédrique: un parallélépipède,
- . la reconstruction d'un objet naturel, non polyédrique: une tête d'ail.

Le terme "reconstruction" correspond ici à la visualisation en trois dimensions de points de l'espace.

A notre connaissance, personne n'a reconstruit en trois dimensions un objet non polyédrique et naturel, en utilisant un système de stéréovision axiale.

Rappelons que ce travail a été réalisé afin de fournir au chirurgien une représentation tridimensionnelle de scènes endoscopiques, comportant des organes qui sont des "objets" naturels par définition.

2.- Reconstruction d'un parallélépipède

Afin de reconstruire un parallélépipède en trois dimensions, nous l'avons placé dans un coin de l'image (voir figure 62).

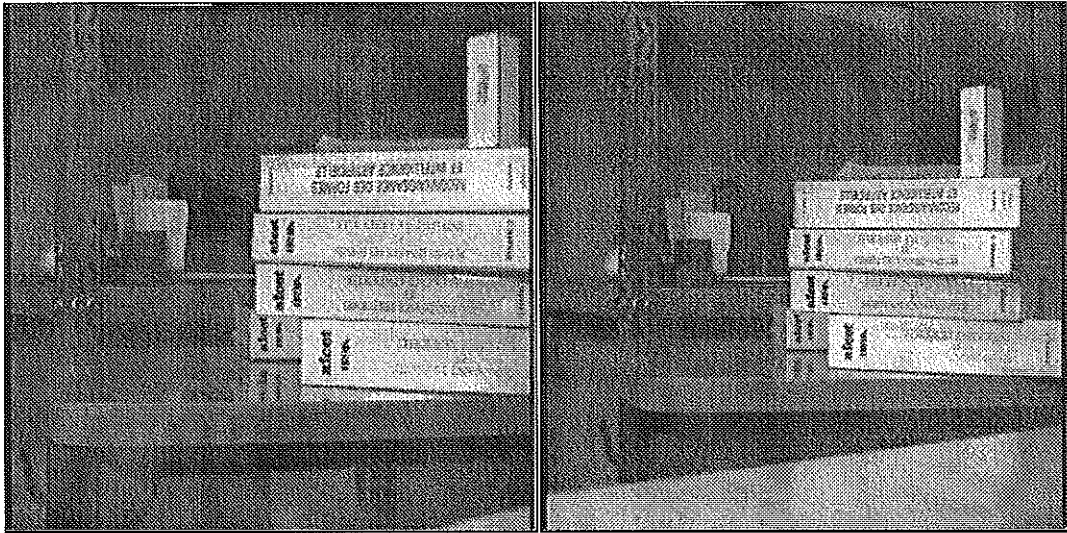


Figure 62.- Couple d'images d'un parallélépipède.

En vue d'utiliser notre algorithme d'appariement, nous rectifions ces images afin d'obtenir des images axiales. Le résultat de la rectification est présenté figure 63.

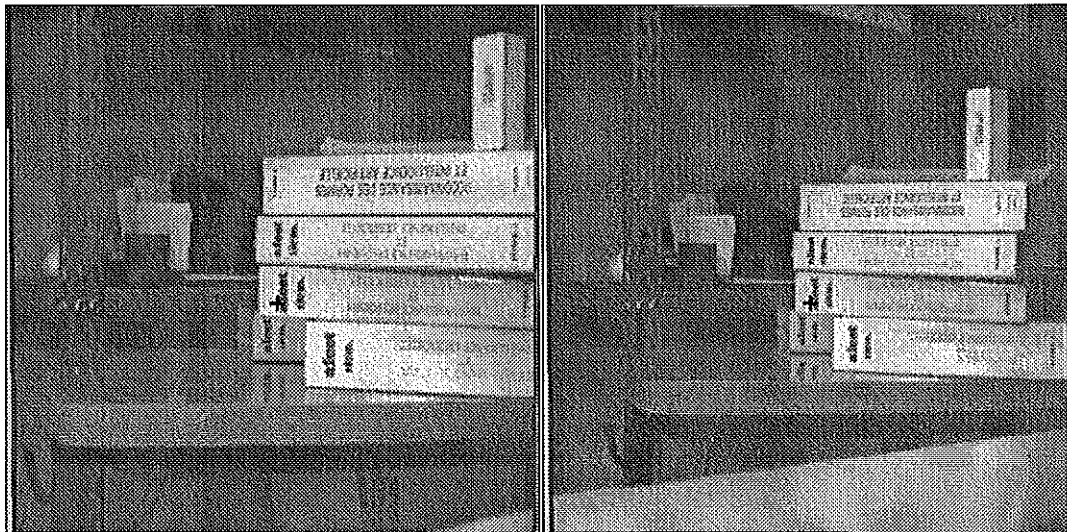


Figure 63.- Couple d'images de la figure 62 après rectification.

A partir des images rectifiées, nous appliquons notre algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires traversant le parallélépipède.

En se limitant aux points mis en correspondance sur le parallélépipède, la figure 64 présente le résultat de notre algorithme d'appariement.

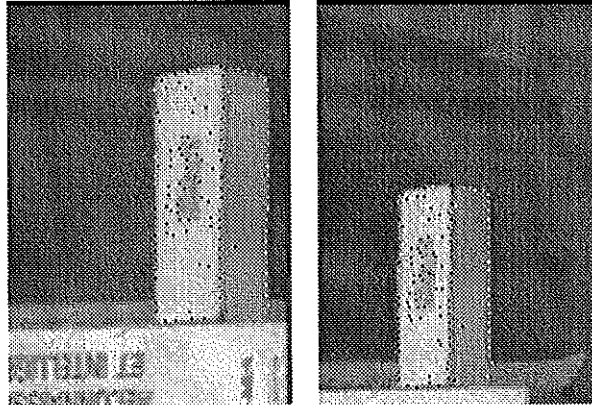


Figure 64.- Résultat de l'algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires traversant le parallélépipède.

Le tableau ci-après présente le nombre de droites épipolaires considérées et le nombre de points appariés sur le parallélépipède à partir de ces droites.

Les droites épipolaires considérées sont celles qui traversent le parallélépipède. L'intervalle choisi entre les droites est de 5 pixels sur les bords de l'image.

Nombre de droites épipolaires	33
Nombre de points appariés sur le parallélépipède	112

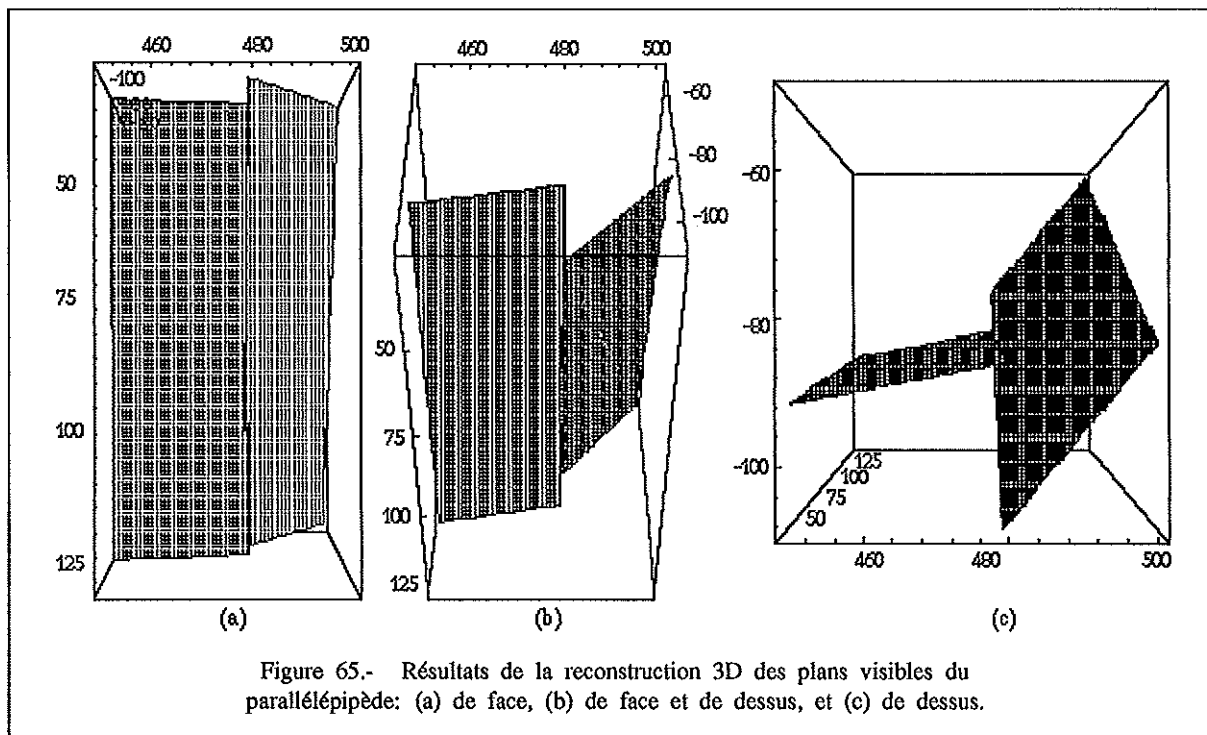
Tableau 6.- Nombre de droites épipolaires-nombre de points appariés sur le parallélépipède.

A partir de la figure 64, nous constatons que les points appariés sur le parallélépipède sont à la fois des points de contour et des points de surface.

Nous remarquons que les points de surface mis en correspondance sont essentiellement répartis sur la face du parallélépipède comportant une tache. Sur l'autre face visible du parallélépipède, pratiquement aucun point n'est mis en correspondance. Cette constatation montre que l'absence de texture ne permet pas d'apparier des points sur les surfaces des objets.

Dans le cas d'objets polyédriques, même si peu de points sont appariés sur les surfaces, il est possible de calculer les faces de ces objets à partir des points de contour mis en correspondance.

A partir des points appariés et des matrices de calibrage obtenues par rectification, nous calculons les points 3D. Ces points nous permettent de reconstruire les deux plans visibles du parallélépipède, par un calcul aux moindres carrés. Les résultats de cette reconstruction sont présentés figure 65.



Les figures 65.a et 65.b fournissent une bonne représentation du relief du parallélépipède. L'orientation des deux plans l'un par rapport à l'autre semble être conservée. Ces résultats montrent que, malgré quelques imperfections, notre méthode de reconstruction donne des résultats très intéressants.

La figure 65.c présente les plans reconstruits vus de dessus. Cette position est celle qui montre le plus les défauts de reconstruction, car l'information de profondeur est pratiquement la seule information visualisée. L'angle compris entre les deux plans reconstruits est d'environ 50° . Signalons que le plan qui correspond à la face texturée est beaucoup mieux reconstruit que le plan sur lequel il y avait très peu de points mis en correspondance.

3.- Reconstruction d'une scène naturelle

Ici, nous présentons une expérience permettant de vérifier que la reconstruction d'un objet non polyédrique est possible dans un système de stéréovision axiale, grâce à notre méthode d'appariement.

Pour cela, nous avons pris deux images d'une tête d'ail située à environ un mètre devant la caméra (voir figure 66).

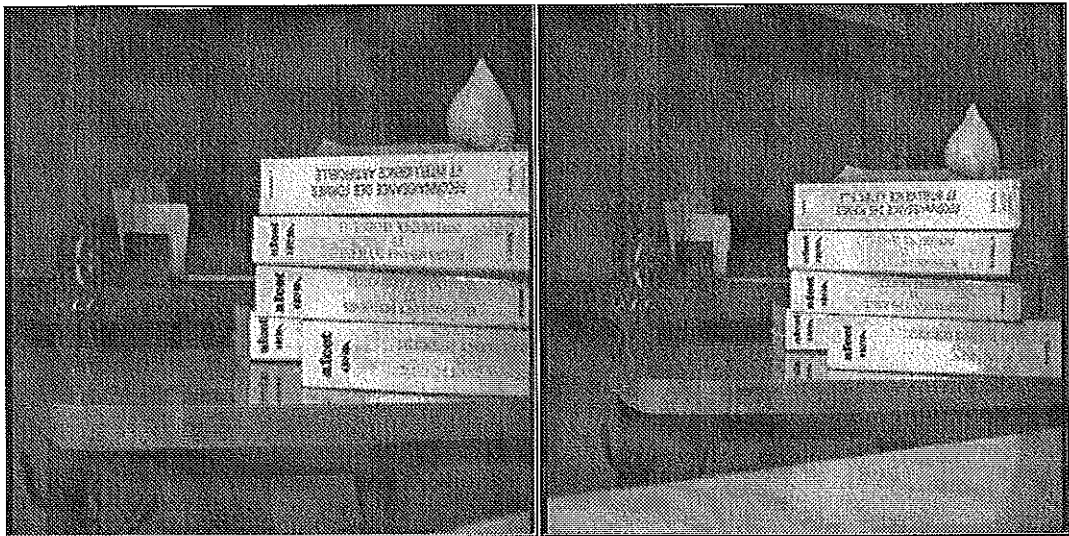


Figure 66.- Couple d'images d'une tête d'ail.

Le résultat de la rectification de ces images est présenté figure 67.

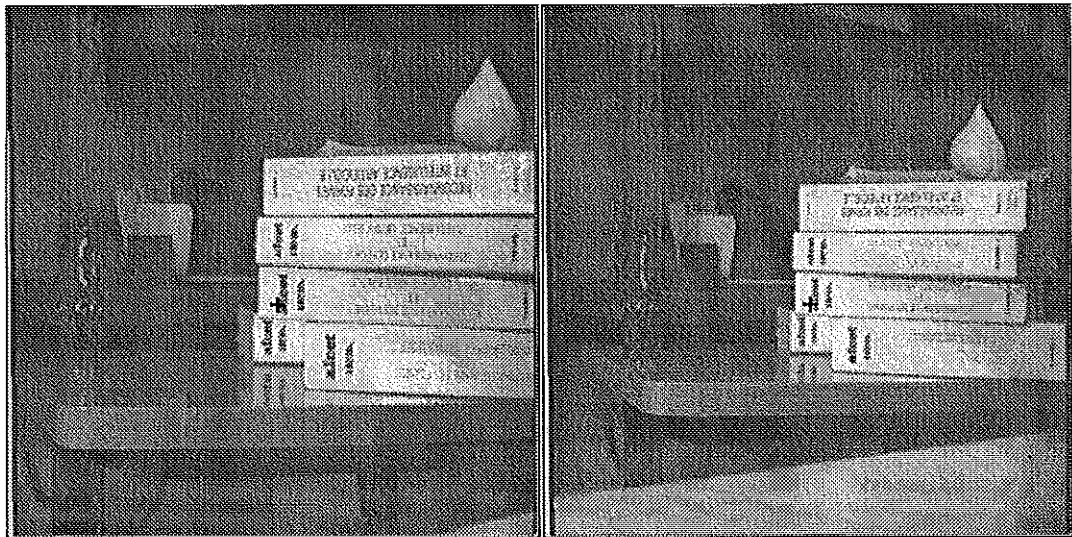


Figure 67.- Couple d'images de la figure 66 après rectification.

En utilisant les images rectifiées, nous avons appliqué notre algorithme d'appariement sur des droites épipolaires traversant la tête d'ail. En se limitant aux points appariés sur la tête d'ail, la figure 68 présente le résultat de notre algorithme.

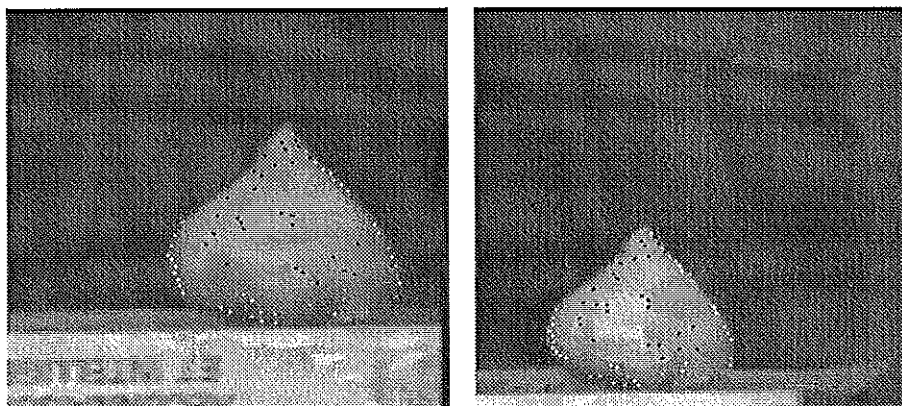


Figure 68.- Résultat de l'algorithme d'appariement sur quelques droites épipolaires traversant la tête d'ail.

A partir de la figure 68 nous constatons que quelques points ont été mis en correspondance sur la surface de l'ail. Ces points doivent nous permettre de reconstruire la surface étudiée.

Nous constatons également que certains points ont été mal appariés. Les points 3D calculés à partir de ces points seront donc faux. De ce fait, le processus d'interpolation de surfaces doit prendre en compte que certains points 3D peuvent être faux et il doit, autant que possible, les éliminer.

A partir des points 3D calculés, nous avons éliminé les points aberrants dus aux mauvaises mises en correspondance. La méthode permettant de supprimer ces points est la suivante:

- . calcul de la profondeur moyenne \overline{prof} ,
- . calcul de l'écart-type de la profondeur σ_{prof} ,
- . élimination des points ayant une profondeur P telle que $|P - \overline{prof}| > \sigma_{prof}$.

Le tableau 7 présente le nombre de points appariés, le nombre de points aberrants éliminés et le nombre de points restants qui seront utilisés lors de la reconstruction. Ce tableau permet une analyse grossière de la qualité de la mise en correspondance.

Nombre de droites épipolaires considérées	25
Nombre de points appariés sur l'ail	67
Nombre de points aberrants éliminés	15
Nombre de points conservés pour la reconstruction	52

Tableau 7.- Evaluation grossière de la qualité de la mise en correspondance.

Nous constatons que, lors de l'élimination des points aberrants, la majorité des points est conservée. Il reste en effet environ 80 % des points appariés. Ceci montre que notre algorithme de mise en correspondance donne des résultats satisfaisants sur des objets naturels. Néanmoins, la validité de la mise en correspondance doit être corroborée par la reconstruction tridimensionnelle.

Afin de reconstruire la surface de l'ail, nous utilisons une méthode très simple. En effet, le but de notre méthode de reconstruction est de montrer la validité de nos résultats et non de réaliser un processus d'interpolation de surfaces très performant. La méthode employée est la suivante:

Soit E_{3d} l'ensemble des points 3D calculés

Pour chaque point 3D P appartenant à E_{3d} :

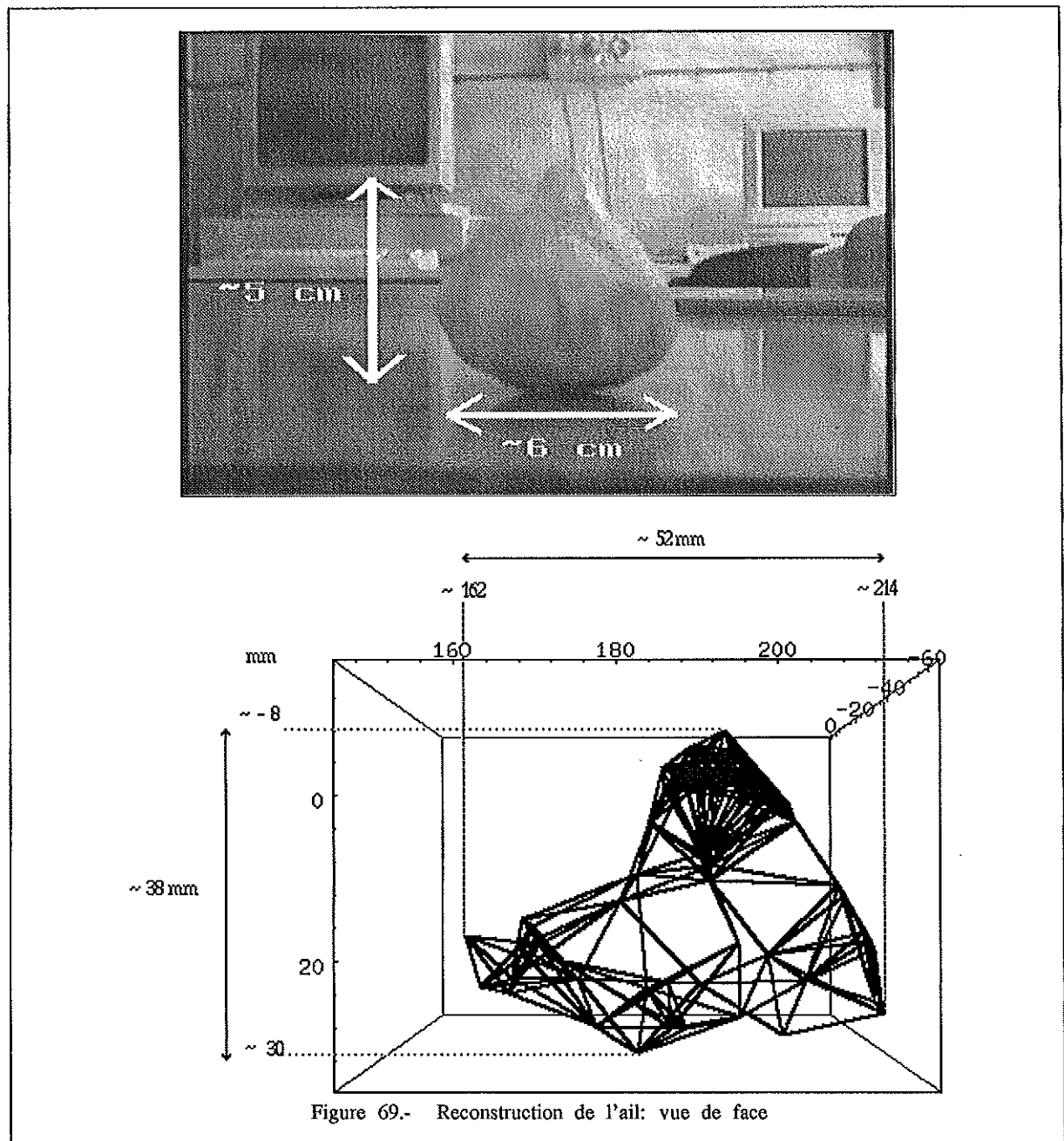
- chercher ses n plus proches voisins dans E_{3d} ,
- relier P à chacun de ses n plus proches voisins par un segment.

Cette méthode fournit un maillage grossier de la surface des objets, à partir des points 3D calculés. Ce maillage suffit en général pour visualiser les résultats de la reconstruction tridimensionnelle.

Afin de mieux comprendre les représentations obtenues, nous avons saisi des images de la tête d'ail, dans les positions selon lesquelles elle sera visualisée. Ainsi, il sera aisé de comparer l'objet réel et sa reconstruction.

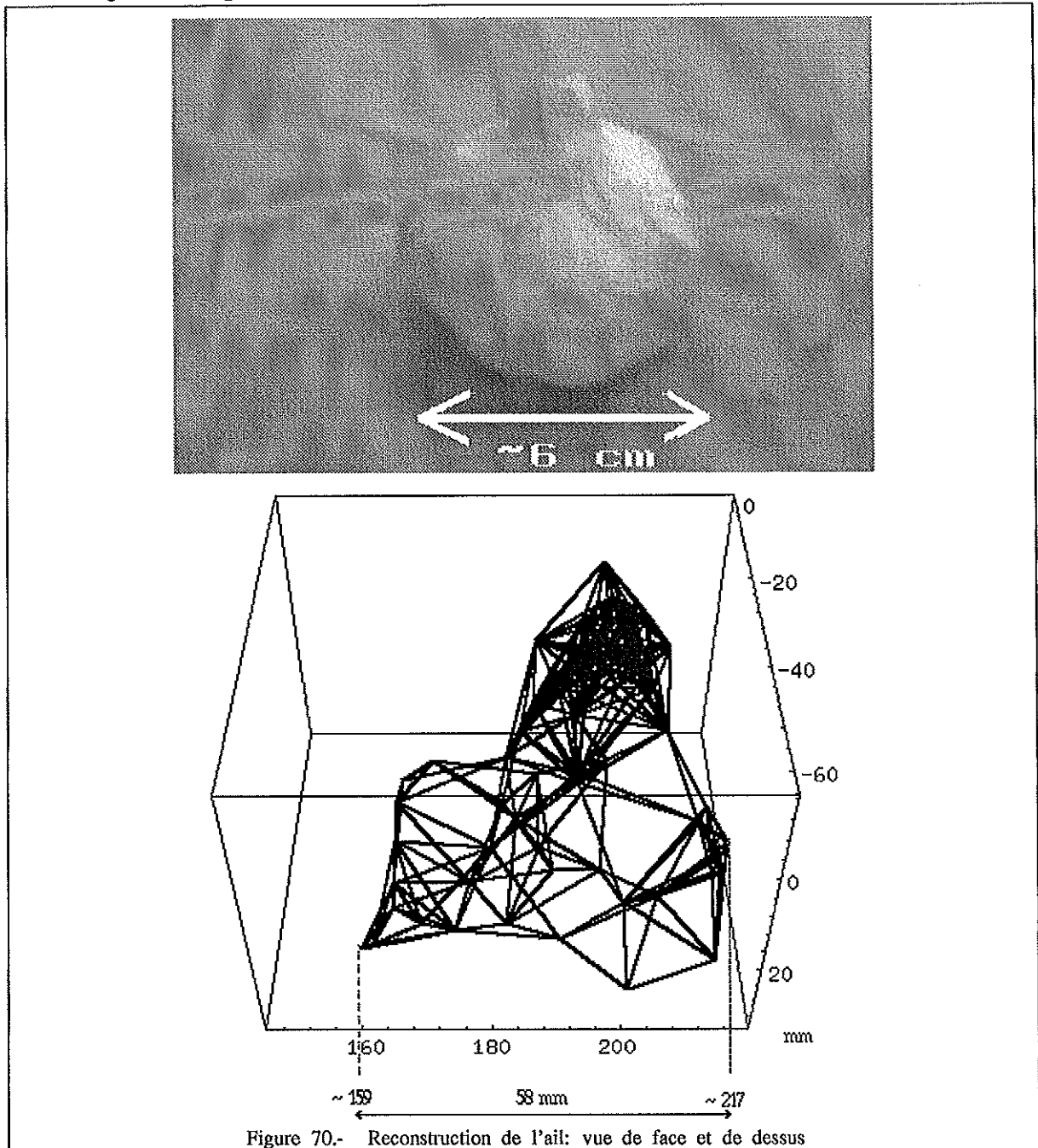
Pour évaluer la qualité de la reconstruction, nous avons mesuré notre tête d'ail. Signalons qu'il est très difficile de mesurer correctement une tête d'ail, car sa forme est irrégulière. Il faut donc considérer les mesures données sur les images en niveau de gris, comme étant des mesures approximatives des cotes de la tête d'ail.

La figure 69 représente l'ail vu de face, c'est-à-dire dans la position de prise de vue initiale.



La reconstruction, présentée figure 69, montre que la forme générale de l'ail est conservée. Nous constatons que la hauteur et la largeur de l'ail calculées par triangulation correspondent, à quelques millimètres près, aux cotes de l'ail (mesurées approximativement!). Les résultats de reconstruction sont très satisfaisants. Cette vue étant très proche du point de vue initial, il est normal que la reconstruction soit correcte.

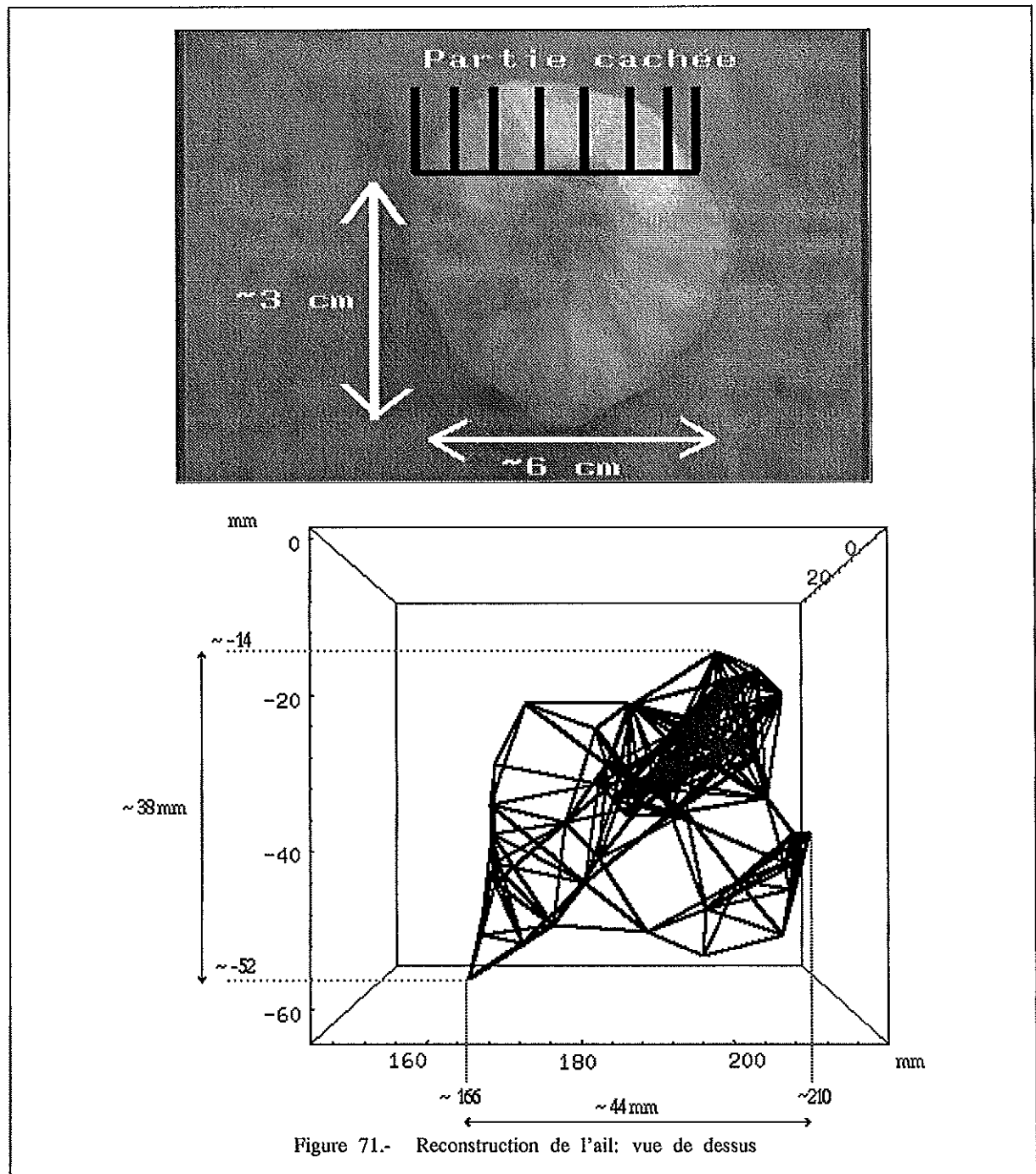
La figure 70 représente l'ail vu de face et de dessus.



Cette reconstruction permet d'apprécier la forme 3D de l'ail. En effet, nous constatons que le "sommet" de l'ail est plus éloigné que sa partie arrondie. Nous percevons notamment une décroissance de la profondeur, au niveau des contours principaux de l'ail, par rapport à ceux du "sommet".

Malgré les imperfections dues au maillage, le résultat de la reconstruction semble très bon. En effet, la largeur de la base de l'ail, calculée par triangulation, correspond pratiquement à ce qui avait été mesuré manuellement. La vue suivante va permettre de mieux apprécier la qualité de la reconstruction.

La figure 71 représente l'ail vu de dessus. Cette position est celle qui montre, de la façon la plus nette, les erreurs de reconstruction.



A partir de la figure 71, nous constatons que:

- . la courbure de l'ail est approximativement conservée,
- . la décroissance de la surface, à partir du sommet, est visible,
- . des erreurs de reconstruction sont présentes, mais la forme de l'ail est approximativement restituée.

De plus, les résultats de reconstruction montrent que l'ail est "profond" d'environ 38 mm. Rappelons que la valeur mesurée directement sur l'ail était approximativement de 30 mm.

Ces résultats confirment la validité de notre méthode et la précision de la reconstruction. Nous voyons que l'erreur approximative de reconstruction est inférieure à 1 cm lorsque les objets sont placés à environ 1 m de la caméra.

Afin d'évaluer les résultats de reconstruction, le tableau suivant regroupe les différentes cotes mesurées directement sur l'ail et celles calculées par triangulation.

	cotes mesurées directement sur l'ail	cotes calculées par triangulation
Vue de face	largeur: ~ 60 mm hauteur : ~ 50 mm	largeur: ~ 52 mm hauteur: ~ 38 mm
Vue de face et de dessus	largeur: ~ 60 mm	largeur: ~ 58 mm
Vue de dessus	profondeur: ~ 30 mm largeur: ~ 60 mm	profondeur: ~ 38 mm largeur: ~ 44 mm

Tableau 8.- Evaluation des résultats de reconstruction de la tête d'ail.

4.- Application de la stéréovision axiale dans le domaine de l'endoscope opératoire

Dans cette section, nous présentons une application de la stéréovision axiale dans le domaine de la coeliochirurgie. Lors de ses opérations, le chirurgien utilise un endoscope et une caméra vidéo couleur incapables de lui donner la moindre information 3D. Une information de relief rendrait pourtant le geste médical beaucoup plus précis. Le fait que le chirurgien ne puisse utiliser plus d'une seule caméra, nous a conduits à utiliser les concepts de la stéréovision axiale, afin de restituer le relief de cavités internes.

Les travaux rapportés dans ce mémoire étant destinés à fournir une représentation tridimensionnelle de scènes endoscopiques, il nous a semblé intéressant de vérifier la validité de notre algorithme d'appariement sur des images médicales couleur.

Afin de réaliser cette expérience, nous avons demandé au Docteur N. Berreni d'utiliser un zoom au cours de ses opérations. Les résultats de notre algorithme d'appariement couleur sur des images endoscopiques sont présentés figure 72.

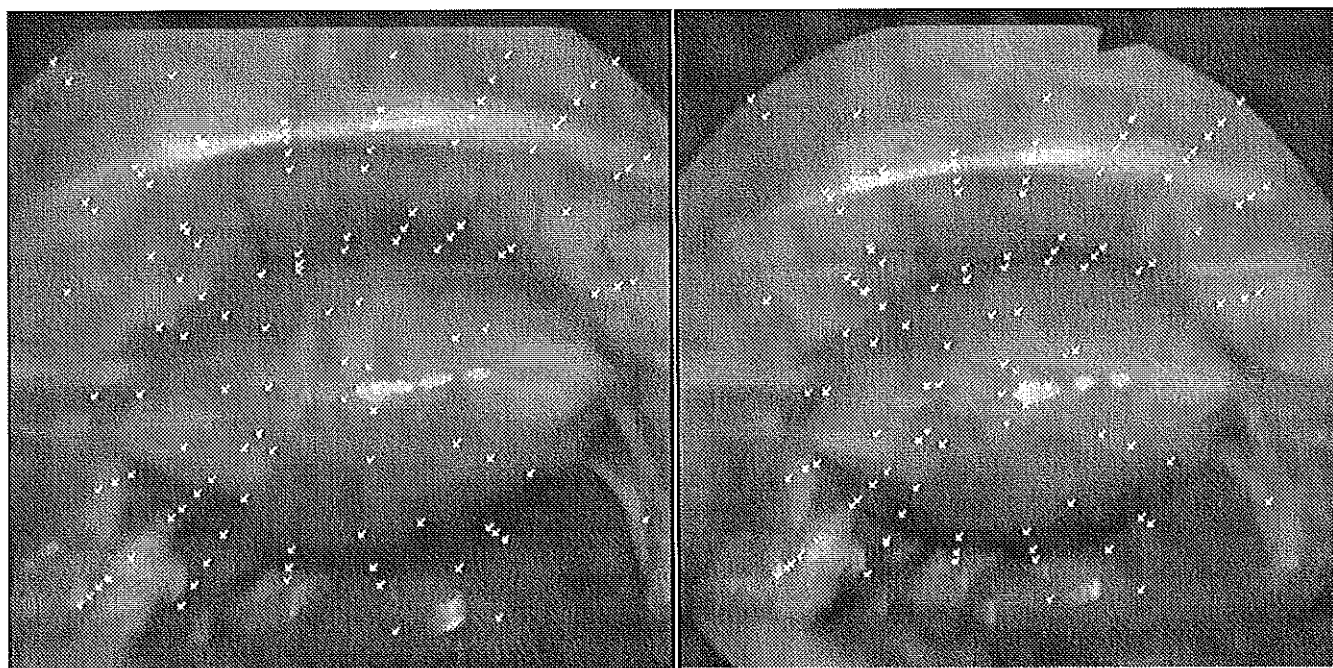


Figure 72.- Résultats de notre algorithme d'appariement couleur sur des images endoscopiques d'un utérus.

(Dr N. Berreni ; clinique Saint-Roch, Perpignan).

Nous n'avons pas reconstruit cette scène endoscopique car d'une part, nous n'avons pas calibré précisément le zoom utilisé et d'autre part, un certain nombre de problèmes surviennent lors de la saisie des images:

- . la scène est modifiée d'une image à l'autre, car la patiente respire,
- . des jets de sang peuvent modifier la scène,
- . l'utérus bouge car l'infirmière, qui tient l'utérus par le vagin, bouge.

Ces problèmes courants, lors d'une opération, ne peuvent être résolus que par utilisation d'un nouveau capteur, permettant la saisie simultanée de deux images.

5.- Conclusion

Les reconstructions 3D d'objets réalisées dans ce chapitre montrent qu'il est possible de reconstruire des objets naturels, grâce à notre méthode. Rappelons encore une fois que, à notre connaissance, personne n'avait jusqu'à ce jour obtenu des résultats de reconstruction d'objets naturels en utilisant un système de stéréovision axiale. Le travail présenté dans ce mémoire est donc particulièrement novateur dans ce domaine.

La qualité des reconstructions obtenues est très satisfaisante, malgré les imperfections dues au maillage grossier et aux points erronés. La forme des objets reconstruits est bien conservée, même si notre méthode d'appariement ne fournit que quelques points des objets étudiés.

Nous pensons que la qualité de la reconstruction peut être améliorée grâce à un appariement beaucoup plus global de tous les points de l'image. Un appariement point par point doit permettre de corriger globalement les erreurs de triangulation.

Compte tenu des résultats obtenus, nous pensons que la stéréovision axiale peut devenir une réalité industrielle si un matériel spécifique est développé. Nous pensons que ce nouveau matériel doit avoir les caractéristiques suivantes:

- . Le nombre de pixels par image doit être beaucoup plus important que dans les caméras actuelles. Ceci doit limiter la zone d'erreurs importantes induites par l'utilisation d'un capteur de stéréovision axiale.
- . Les images axiales doivent être saisies simultanément afin de permettre un traitement "temps réel" et éviter que la scène soit modifiée lors de la saisie des images.

Un tel capteur est actuellement en cours de réalisation dans notre laboratoire [Puech, 1993]. Il permet, grâce à des chemins optiques différents, de saisir simultanément deux images "axiales". Ce capteur, dont la conception et la réalisation est l'œuvre de Philippe Puech, ingénieur de recherche au C.N.R.S, doit être appliqué dans le domaine de l'endoscopie opératoire.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons présenté une étude portant sur la stéréovision axiale, qui permet de retrouver l'information tridimensionnelle, à partir d'une seule caméra, grâce à un mouvement du centre optique le long de l'axe optique. Un système de stéréovision axiale est généralement simulé par une caméra:

- . soit munie d'un zoom,
- . soit se déplaçant sur son axe physique.

Nous avons tout d'abord décrit le modèle géométrique d'un système de stéréovision axiale "général". Nous avons ensuite montré que toute une zone de l'image se trouvant près du point principal est inutilisable, car les erreurs de triangulation y sont trop importantes. Ainsi, si l'on veut reconstruire un objet dans les meilleures conditions, il faut qu'il soit disposé dans un coin de l'image.

Afin d'accroître la précision, nous pensons utiliser un ensemble caméra-numériseur haute résolution. En effet, une augmentation du nombre de pixels doit faire diminuer les erreurs de triangulation.

Une grande partie de ce mémoire concerne le calibrage d'un système axial. Contrairement aux approches utilisées par d'autres équipes de recherche travaillant sur ce sujet, nous n'avons pas supposé qu'un système est physiquement axial pour le calibrer. Cette démarche évite les erreurs dues à un mauvais déplacement du centre optique le long de l'axe optique.

Résultats de calibrage à l'appui, nous montrons qu'un système physiquement axial n'existe généralement pas. Une caméra se déplaçant sur un rail ou munie d'un zoom doit donc être considérée comme un système de stéréovision classique.

Nous avons donc décidé de mettre en œuvre une rectification géométrique permettant de passer d'un système "presque" physiquement axial à un système de stéréovision axiale.

L'idée clef de cette rectification est de former un système axial ayant pour axe optique la droite passant par les centres optiques de deux systèmes calibrés indépendamment (deux focales d'un zoom, une caméra en deux positions sur un rail, ...).

Cette rectification nous permet:

- . d'utiliser les propriétés des systèmes axiaux lors de la mise en correspondance,
- . de calculer la position d'un point dans l'espace grâce, aux matrices de calibrage obtenues par rectification.

Nous avons ensuite présenté un algorithme d'appariement, permettant de mettre en correspondance de petits détails présents dans les images. Cet algorithme est réalisé grâce à l'étude des profils d'intensité extraits le long de droites épipolaires qui se correspondent.

Les points appariés sont à la fois des points de contour et des points de surface. C'est là un point fort de notre méthode. En effet, les points de surface nous permettent de reconstruire des objets non polyédriques, par un processus d'interpolation. La qualité des reconstructions obtenues est très satisfaisante, malgré les imperfections dues au maillage grossier et aux points erronés.

Notre travail est particulièrement novateur car, à notre connaissance, personne n'avait jusqu'à ce jour obtenu des résultats de reconstruction d'objets naturels et non polyédriques, en utilisant un système de stéréovision axiale.

Cette étude a permis de réaliser un capteur de stéréovision axiale [Puech, 1993]. Ce capteur permet, grâce à des chemins optiques différents, de saisir simultanément deux images "axiales".

Nous pensons que ce nouveau capteur sera utilisé dans le domaine de l'endoscopie opératoire, afin de fournir au chirurgien une représentation tridimensionnelle de son espace de travail.

BIBLIOGRAPHIE

- [Abi-Ayad, 1989] A. Abi-Ayad. *Calibrage Statique et Dynamique de Caméras. Application à la Manipulation d'Objets Polyédriques par un Robot sous le Contrôle d'une Tête de Vision Stéréoscopique*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse. ENSEEIHT. 14-Novembre, 1989.
- [Alvertos *et al.*, 1989] N. Alvertos, D.Brzakovic, and R.C.Gonzalez. Camera geometries for image matching in 3d machine vision. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligent*, Vol. 11 N°2, 1989.
- [Angénieux, 1956] P. Angénieux. Objectif à longueur focale variable. *Brevet d'invention N° 1.120.271, G 02 b, Juillet 56*, 1956.
- [Ayache, 1989] N. Ayache. *Vision Stéréoscopique et Perception Multisensorielle: Application à la robotique mobile*. Collection Science Informatique. InterEditions. Paris, 1989.
- [Beyer, 1992] H Beyer. *Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Zürich, 1992.
- [Bovik *et al.*, 1987] A.C Bovik, T.S.Huang, and Jr D.C.Munson. The effect of median filtering on edge estimation and detection. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 9 N° 2, Mars, 1987.
- [Carmona *et al.*, 1990] C. Carmona, A.Ayache, and Ch.Krey. A study of an axial stereovision system. In *Proc. IEEE. ICARCV '90. Singapore*, September 1990.
- [Carmona, 1991] C. Carmona. *Etude de la stéréovision axiale. Modélisation mathématique et résolution algorithmique*. PhD thesis, INP-ENSEEIHT.informatique, 1991.
- [Claramont, 1984] G Claramont. *Développement de techniques de segmentation chromatique et implantation dans un module de vision*. Thèse de Docteur de l'INPT Toulouse, 1984.
- [Conter *et al.*, 1984] J. Conter, Ph.Puech, and A.Bruel. Microcaméra. *Brevet 84-19597. Industrialisation Système Sud.*, 1984.
- [de Saint Vincent, 1986] A.Robert de Saint Vincent. *Perception et modélisation de l'environnement d'un robot mobile: une approche par stéréovision*. Thèse de Docteur de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1986.
- [Gordillo, 1987] J-L Gordillo. Caicou: l'analyse d'images couleur. *Traitement du signal Vol. 4 N°3*, 1987.
- [Horn, 1986] B.K.P. Horn. *Robot Vision*. The MIT Press. McGRAW-HILL Book Company., 1986.

- [Hyde *et al.*, 1983] P.D. Hyde, L.S Davis, and a. Subpixel edge estimation. *Pattern Recognition Vol. 16 N°4*, pages 413–420, 1983.
- [Jain *et al.*, 1987] R. Jain, S.L.Bartlett, and N.O'Brien. Motion stereo using egomotion complex logarithmic mapping. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligent, Vol. 9 N°3*, pp 356–369, 1987.
- [Jain, 1983] R. Jain. Direct computation of focus of expansion. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligent, Vol 12 N°1*, 1983.
- [Kender, 1977] J.R Kender. Instabilities in color transformation. In *IEEE Pattern Recognition and Image Processing*, 1977.
- [Kowaliski, 1990] P Kowaliski. *Vision et mesure de la couleur*. Masson, 1990.
- [Larabi, 1991] S. Larabi. *Utilisation de la Géométrie Projective en Vision Stéréoscopique Binoculaire*. Thèse de Docteur de l'INPT. Toulouse, 1991.
- [Lavest *et al.*, 1992] J.M Lavest, G.Rives, and M.Dhome. Utilisation d'un objectif à focale variable en vision monoculaire en vue de la reconstruction 3d. *Traitement de signal Vol 9 N°6*, 1992.
- [Lavest *et al.*, 1993] J.M Lavest, G.Rives, and M.Dhome. Modelling an object of revolution by zooming. *Proceedings of the 8th Scandinavian Conference on Image Analysis, Vol II*, 1993.
- [Lenz *et al.*, 1987] R.K Lenz, R.Y.TSAI, and a. *Techniques for calibration of the scale factor and image Center for hight accuracy 3D machine vision metrology*, pages 68–75. IEEE Robotics and Automation, Raleigh, 1987.
- [Ma *et al.*, 1990] J. Ma, S.I.Olsen, and a. Depth from zooming. In *Journal of the Optical Society of America-1930. Vol. 7 N°10, October*, pages 1883–1890, 1990.
- [Mansbach, 1986] P. Mansbach. Calibration of a camera and light source by fitting to a physical model. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1986.
- [Nack, 1976] M.L Nack. Final report on image registration research. In *Contrat NAS-5-11999-Nov*, 1976.
- [Nguyen *et al.*, 1992] T.C. Nguyen, T.S Huang, and a. Quantization errors in axial motion stereo on rectangular-tessellated image sensors. In *11th International Conference on Pattern Recognition, The Hague, Vol. 1*, 1992.
- [O'Brien *et al.*, 1984] N. O'Brien, R.Jain, and a. Axial motion stereo. In *Proc. IEEE Workshop Computer Vision*, pp 88–92, April, 1984.
- [Ohta *et al.*, 1980] Y-I Ohta, T.Kanade, and T.Sakai. Color information for region segmentation. *Computer Graphics and Image Processing, Vol. 13*, 1980.

- [Overington *et al.*, 1987] I. Overington, Ph.Greenway, and a. Practical first-difference edge detection with subpixel accuracy. *Image and Vision Computing*, Vol.5 N°5, pages 217–224, 1987.
- [Puech, 1993] Ph Puech. Appareil et objectif de prise de vues en stéréovision axiale. *Brevet d'invention N° 93-02276*, 1993. C.N.R.S.
- [Ragi, 1989] C. Ragi. *NOISIV*. PhD thesis, Institut Natinal Polytechnique de Toulouse. ENSEEIHT, 1989.
- [Ramer, 1972] U. Ramer. An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves. *Computer Vision, Graphics and Image Processing (CVGIP)*. Vol. 1, pages 244–256, 1972.
- [Rodin *et al.*, 1992a] V. Rodin, A. Ayache, and a. A medical robotics application of monocular stereovision- filtering and matching techniques. In *International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision (ICARCV'92) Singapore*, 1992.
- [Rodin *et al.*, 1992b] V. Rodin, A. Ayache, and a. Monocular stereovision — a medical robotics application. the use of color. In *Proc. SPIE's OE/TECHNOLOGY'92. Machine Vision Applications, Architectures, and System Integration*. Boston, 1992.
- [Rodin *et al.*, 1993] V. Rodin, A. Ayache, and Doctor N.Berreni. Aspect of computer vision in surgical endoscopy. In *Proc. SPIE's Medical Imaging VII. Image processing*. Newport Beach, 1993.
- [Rodin *et al.*, 1994] V. Rodin, A. Ayache, and a. Modélisation d'un système de stéréovision axiale. In *AFCET — RFIA (à paraître)*, January 1994.
- [Skordas, 1988] T. Skordas. *Mise en correspondance et reconstruction stéréo utilisant une description structurelle des images*. Thèse de Docteur de l'INPG. Grenoble, 1988.
- [Subbarao, 1988] M Subbarao. Parallel depth recovery by changing camera parameters. In *Second IEEE International Conference on Computer Vision*, pages 149–155, New York, 1988.
- [Tsai, 1986] R.Y. Tsai. An efficient and accurate camera calibration technique for 3d machine vision. In *Computer Vision, Pattern Recognition*. Miami, 1986.
- [Tukey, 1974] J.W Tukey. Nonlinear (nonsuperposable) methods for smoothing data. In *Conf. Rec. EASCON*, p.673, 1974.
- [Vernon *et al.*, 1990] D. Vernon, M.Tistarelli, and a. Using camera motion to estimate range for robotic parts manipulation. In *IEEE Transactions on Robotics and Automotion*, Vol. 6 n°5. October, 1990.
- [Weale, 1982] R.A Weale. *Focus on Vision*. Harvard University Press, Cambridge, Massachetts, 1982.

- [Wiley *et al.*, 1990] A.G. Wiley, K.W. Wong, and a. Metric aspects of zoom vision. In *SPIE, vol. 1395. Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision. Zurich, Swisse*, pages 112-118, 1990.
- [Wolf, 1983] Paul R. Wolf. *Elements of Photogrammetry*. McGRAW-HILL, 1983.

RESUME :

Cette thèse présente une étude sur la stéréovision axiale qui permet de retrouver l'information tridimensionnelle, à partir d'une seule caméra, grâce à un mouvement du centre optique le long de l'axe optique. Un tel système est généralement simulé par une caméra soit munie d'un zoom, soit se déplaçant sur son axe physique.

Nous étudions d'une part le calibrage d'un système de stéréovision axiale. Résultats de calibrage à l'appui, nous montrons qu'un système physiquement axial n'existe généralement pas. Nous montrons également qu'il est toujours possible de transformer par rectification géométrique, un système "presque" axial en un système axial.

Nous présentons d'autre part un algorithme d'appariement basé sur l'étude des profils d'intensité extraits le long de droites épipolaires. Les points mis en correspondance rendent possible la reconstruction d'objets non polyédriques. Des reconstructions d'objets naturels sont présentées.

Cette étude a abouti à la réalisation d'un capteur spécialisé qui doit être utilisé dans le domaine de l'endoscopie opératoire.

MOTS CLES :

Calibrage, Capteur Axial, Mouvement Axial, Reconstruction 3D, Rectification, Stéréovision axiale, Zoom.



ABSTRACT :

This thesis presents a study on axial stereovision which allows to recover the tridimensional information, from a single camera, thanks to a motion of the optic center along the optical axis. Such a system is generally simulated by a camera either with a zoom or moving along its physical axis.

On one hand, we are studying the axial stereovision system calibration. Supported by the calibration results, we show that a physically axial system generally doesn't exist. We also point out that it is always possible to transform by geometrical rectification an "almost" axial system into an axial system.

On the other hand we present a matching algorithm based on the study of the intensity profiles gotten along epipolar lines. The matched points make possible the reconstruction of non polyhedral objects. Results of natural objects reconstructions are brought up.

This study has led to the realisation of a specialized sensor which can be used in the field of surgical endoscopy.

KEY WORDS :

Axial Motion, Axial Sensor, Axial Stereovision, Calibration, 3D Reconstruction, Rectification, Zoom.