



**HAL**  
open science

# Mesure de formes par corrélation multi-images : application à l'inspection de pièces aéronautiques à l'aide d'un système multi-caméras

Jacques Harvent

► **To cite this version:**

Jacques Harvent. Mesure de formes par corrélation multi-images : application à l'inspection de pièces aéronautiques à l'aide d'un système multi-caméras. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. Français. NNT : . tel-00579461

**HAL Id: tel-00579461**

**<https://theses.hal.science/tel-00579461>**

Submitted on 24 Mar 2011

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

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



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du  
**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

**Délivré par :**

Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)

**Discipline ou spécialité :**

Systèmes informatiques critiques

---

**Présentée et soutenue par :**

Jacques Harvent

**le :** vendredi 5 novembre 2010

**Titre :**

Mesure de formes par corrélation multi-images : application à l'inspection de pièces aéronautiques à l'aide d'un système multi-caméras

---

**Ecole doctorale :**

Systèmes (EDSYS)

**Unité de recherche :**

ICA-ALBI et LAAS CNRS Toulouse

**Directeur(s) de Thèse :**

Jean-José Orteu (Professeur Ecole Mines Albi)

Michel Devy (Directeur de Recherche CNRS)

**Rapporteurs :**

Jean-Marc Lavest (Professeur Univ. Blaise Pascal Clermont-Ferrand)

Fabrice Meriaudeau (Professeur Univ. Bourgogne)

**Autre(s) membre(s) du jury**

Bertrand Watrisse (Professeur Univ. Montpellier)

Jean-Pierre Jessel (Professeur UPS Toulouse)

Catherine Bosquet (EADS-IW)

Olivier Grellou (AIRBUS-FRANCE)









# Remerciements

---

Comme disait mon chef : « ce qui est fait, n'est plus à faire », je vais donc faire court...

Merci à tous !

Plus, sérieusement, j'ai passé de bons moments à Albi ainsi qu'à Toulouse dans mes deux laboratoires respectifs. Je tiens à remercier mes directeurs de thèse Jean José Orteu et Michel Devy, avec qui j'ai beaucoup appris, aussi bien humainement que professionnellement 😊 Merci aussi à tous les permanents de l'ICA, et en particulier à Florian Bugarin pour son soutien au travail, au café, en voiture, au badminton, dans la vie, aux toilettes...non ça c'est pas vrai! Merci à Laurent Robert et Thierry Sentenac avec qui j'ai eu le plaisir de discuter de nombreuses idées. Merci à notre super technicien Didier Ade pour son aide précieuse et sa bonne humeur. Merci à tous ceux avec qui j'ai pu me remplir de caféine : Mustafa, Momo, Séb, Pirc, Masood, Kaka, Nioc, Rémi, Thomas ... et bien sûr les autres car j'en oublie pleins !

Merci aux membres du groupe de travail GDR2519, à AIRBUS et EADS-IW pour avoir suivi mes travaux, et plus particulièrement à Catherine Bosquet avec qui j'ai toujours apprécié discuter.

Je finirais par remercier ma famille, mes parents, et ma chère Viki qui ont su endurer mes sautes d'humeur et les moments difficiles.



## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Problématique industrielle</b> .....	<b>5</b>
1.1 Cahier des charges.....	8
1.2 Quelques systèmes commerciaux existants.....	8
1.2.1 Système Tracker Xi de Faro .....	9
1.2.2 Système T-Scan de Leica.....	9
1.2.3 Systèmes HandyScan de Creaform.....	10
1.2.4 Système Optinum™ de Noomeo .....	10
1.2.5 Systèmes Breuckmann .....	11
1.2.6 Système Minolta vi-9i de Konica .....	11
1.2.7 Système Atos de GOM.....	12
1.2.8 Système Shapeview de NDTexpert.....	13
1.2.9 Système Vic3D Multi-Views de Correlated Solutions.....	13
1.3 Système proposé .....	14
1.3.1 Mise en place du système multi-caméras .....	15
1.3.2 Calibrage du système multi-caméras .....	15
1.3.3 Mise en correspondance de points par corrélation d'images.....	15
1.3.4 Reconstruction 3D euclidienne multi-vues de l'objet .....	16
1.3.5 Recalage de nuages de points 3D.....	16
1.4 Conclusion : un système multi-caméras, oui mais pourquoi ?.....	16
<b>2. Problématique multi-caméras</b> .....	<b>17</b>
2.1 Modélisation d'une caméra.....	18
2.1.1 Modèle sténopé .....	19
2.1.2 Modélisation des distorsions.....	21
2.1.2.1 Inversion du modèle.....	21
2.2 Géométrie épipolaire .....	22
2.2.1 Représentation .....	22
2.2.2 Matrice essentielle et matrice fondamentale .....	23
2.2.3 Extension de la géométrie épipolaire à plusieurs vues .....	23
2.3 Positionnement des caméras et des vidéoprojecteurs .....	24

2.4	Gestion des caméras.....	26
2.4.1	Bancs stéréos recalés.....	26
2.4.2	Grappes de caméras.....	27
2.4.3	Choix de gestion des caméras.....	29
2.5	Information a priori.....	32
2.5.1	Modèle CAO.....	32
2.5.1.1	Positionnement des caméras.....	32
2.5.1.2	Appariement d'images.....	33
2.5.1.3	Recalage de nuages de points 3D.....	33
2.5.2	Projection de mouchetis.....	33
2.5.2.1	Appariement d'images.....	33
2.5.2.2	Texture.....	34
2.6	Conclusion.....	34
2.7	Bibliographie.....	34
<b>3.</b>	<b>Corrélation d'images.....</b>	<b>37</b>
3.1	Critères de corrélation.....	40
3.1.1	Critère ZNCC (Zero Mean Normalized Cross Correlation).....	40
3.1.2	Critère SAD (Sum of Absolute Differences) – Norme L1.....	41
3.1.3	Critère SSD (Sum of Squared Differences) – Norme L2.....	41
3.2	Transformations de fenêtre.....	42
3.2.1	Méthodes classiques.....	42
3.2.1.1	Translation.....	42
3.2.1.2	Transformation affine.....	43
3.2.1.3	Homographie.....	43
3.2.2	Méthodes 3D.....	43
3.2.2.1	Relation entre deux points 2D.....	44
3.2.2.2	Transformation 3D, intersection et homographie.....	44
3.2.2.3	Distorsions.....	46
3.3	Corrélation sub pixel.....	47
3.3.1	Optimisation du critère.....	47
3.3.1.1	Approche additive.....	47
3.3.1.2	Approche par composition inverse.....	48
3.3.1.3	Evaluation.....	49
3.3.1.4	Interpolation parabolique.....	50



3.4	Interpolation et calcul du gradient de l'image .....	51
3.4.1	Interpolation.....	51
3.4.2	Gradient de l'image .....	52
3.5	Autres fonctions coûts.....	52
3.5.1	Critère croisé .....	52
3.5.1.1	Composition inverse.....	52
3.5.2	Fonctions robustes .....	54
3.6	Méthode globale : Programmation dynamique.....	55
3.6.1	Construction de la matrice et plus court chemin .....	56
3.6.2	Applications .....	57
3.7	Méthode locale mise en œuvre : Propagation de germe.....	58
3.7.1	Germe .....	58
3.7.2	Transfert des paramètres .....	58
3.7.2.1	Cas affine et homographique .....	59
3.7.2.2	Cas 3D.....	59
3.7.2.3	Choix du pas .....	60
3.7.3	Parcours de l'image .....	60
3.7.4	Critères d'arrêts.....	61
3.7.4.1	Distance à la droite épipolaire.....	61
3.7.4.2	Faces reconstruites.....	62
3.7.4.3	Contrainte de lissage .....	62
3.7.4.4	Score de corrélation .....	62
3.7.5	Post-traitement .....	63
3.8	Évaluation de notre moteur de corrélation .....	64
3.8.1	Images « sinus » .....	64
3.8.2	Images « translation » .....	65
3.8.3	Influence de la phase d'optimisation .....	68
3.8.4	Scène 3D.....	73
3.9	Conclusion .....	76
3.10	Bibliographie.....	77
<b>4.</b>	<b>Corrélation multi-images.....</b>	<b>81</b>
4.1	Extension du critère de la corrélation fine d'images.....	82
4.2	Image de référence .....	83
4.3	Utilisation du modèle CAO comme référence.....	85

4.3.1	Initialisation des paramètres .....	86
4.3.2	Modèle OpenGL et modèle de caméra.....	91
4.3.3	Détection des occultations .....	91
4.3.4	Détection des zones de fortes pentes .....	95
4.3.5	Carte de visibilité.....	95
4.3.6	Modèle CAO et pièce présentant des défauts .....	95
4.4	Reflets .....	97
4.5	Evaluation du critère 3D .....	99
4.6	Conclusion.....	100
4.7	Bibliographie .....	101
<b>5.</b>	<b>Recalage et reconstruction 3D .....</b>	<b>103</b>
5.1	Reconstruction 3D.....	103
5.1.1	Triangulation .....	104
5.1.2	Critère 3D .....	104
5.1.3	Evaluation du calibrage.....	104
5.1.4	Assistance au calibrage et au choix des grappes et bancs stéréo.....	105
5.1.5	Construction du maillage .....	106
5.1.5.1	Maillage d'un banc ou d'une grappe .....	106
5.1.5.2	Maillage après recalage .....	107
5.2	Recalage inter-vues.....	108
5.2.1	Recalage géométrique .....	111
5.2.2	Recalage photométrique .....	112
5.2.3	Comparaison du recalage géométrique au recalage photométrique.....	114
5.3	Comparaison avec d'autres systèmes de mesures .....	114
5.3.1	Système A.....	116
5.3.2	Système B.....	117
5.3.3	Système C.....	117
5.3.4	Nos méthodes de mesure basées sur un système multi-caméras .....	118
5.3.4.1	Stratégie bancs stéréo recalés .....	118
5.3.4.2	Stratégie grappe et bancs stéréo recalés.....	119
5.3.5	Conclusion sur les résultats.....	122
5.4	Autres pièces numérisées .....	124
5.5	Conclusion.....	128
5.6	Bibliographie .....	128

<b>Conclusion générale et perspectives.....</b>	<b>131</b>
<b>Annexe A : Images issues du groupe de travail GDR2519 .....</b>	<b>135</b>
A.1 Images « sinus » .....	135
A.2 Images « translation » .....	137
A.3 Bibliographie.....	138
<b>Annexe B : Génération de mouchetis .....</b>	<b>139</b>
B.1 Bruit de Perlin.....	139
B.1.1 Dimension 1.....	139
B.1.2 Dimension 2.....	140
B.2 Bruit Simplex.....	141
B.2.1 Grilles simplex.....	141
B.2.2 Sommation des gradients.....	142
B.3 Paramètres contrôlables et choix du mouchetis.....	142
B.4 Bibliographie.....	143
<b>Bibliographie générale.....</b>	<b>145</b>



## Liste des figures

Figure 1. 1- Système multi-caméras .....	5
Figure 1. 2- Configuration murale du système multi-caméras pour mesurer la 'banane' .....	6
Figure 1. 3- Configuration circulaire du système multi-caméras .....	7
Figure 1. 4- Laser Tracker Faro® .....	9
Figure 1. 5- Leica® T-Scan® .....	9
Figure 1. 6- HandyScan® .....	10
Figure 1. 7- Optinum™ de Noomeo® .....	10
Figure 1. 8- Opto Top-HE de Breuckmann® .....	11
Figure 1. 9- Minolta® vi-9i .....	12
Figure 1. 10- Système Atos® .....	12
Figure 1. 11- Shapeview® .....	13
Figure 1. 12- Bancs stéréo utilisé par le système Vic3D® .....	13
Figure 1. 13- Mire plane observée selon plusieurs positions pour calibrer les caméras .....	15
Figure 2. 1. Modèle de caméra pinhole.....	19
Figure 2. 2- Les paramètres extrinsèques assurent la relation entre le repère $O_w$ et $O_c$ . Les paramètres intrinsèques assurent la relation entre le repère $O_c$ et le repère $O_{px}$ (modèle pinhole).....	19
Figure 2. 3- Distorsions en coussinet (gauche) et en barillet (droite) .....	21
Figure 2. 4- Représentation de la géométrie épipolaire .....	23
Figure 2. 5- Gestion du système multi caméras par agrégation de bancs stéréo .....	26
Figure 2. 6- Pièce 'banane' fournie par AIRBUS.....	27
Figure 2. 7- Gestion des caméras par agrégation d'une grappe et de deux bancs stéréo .....	28
Figure 2. 8- Apport d'une reconstruction multi-caméras : diminution des zones d'incertitude ...	29
Figure 2. 9- Pièce composite A fournie par AIRBUS .....	30
Figure 2. 10- Pièce composite B fournie par AIRBUS .....	30
Figure 2. 11 - Pièce réalisée par formage incrémental à l'ENSM de Besançon.....	31
Figure 2. 12- Pièce réalisée par formage incrémental à l'ICA-Albi .....	31
Figure 3. 1- Modèle de transformation de fenêtre appliqué à différentes fenêtres de corrélation .....	42
Figure 3. 2- Représentation de l'homographie induite d'un plan. Les trois paramètres définissant le plan sont $Z$ , $\Delta Z1$ , et $\Delta Z2$ .....	46
Figure 3. 3- Erreur systématique et erreur aléatoire de nos algorithmes de corrélation comparées aux erreurs obtenues par simulation. Nous présentons les résultats issus de la corrélation des images $n=0, 8, 16$ de taille $1024 \times 1024$ pixels de la banque d'images GDR2519. ....	50
Figure 3. 4- Erreur systématique et erreur aléatoire de nos algorithmes de corrélation selon une interpolation par BSpline de degré 3, 5, 7, et 9. Nous présentons les résultats issus de la corrélation des images $n=0, 16$ de taille $1024 \times 1024$ pixels de la banque d'images GDR2519. ....	51

Figure 3. 5-Erreur systématique et erreur aléatoire du critère croisé comparées aux erreurs obtenues par simulation. ....	53
Figure 3. 6-Erreur systématique et erreur aléatoire des fonctions robustes comparées aux erreurs obtenues par simulation. ....	55
Figure 3. 7-Représentation du plus court chemin (rouge) au milieu de la matrice.....	56
Figure 3. 8-Images rectifiées d'un embouti moucheté.....	57
Figure 3. 9-Carte de disparité obtenue après corrélation par programmation dynamique. Le mauvais réglage des seuils (à gauche) entraîne l'apparition de lignes horizontales aberrantes. .	58
Figure 3. 10- Transfert des paramètres selon les 4 directions cardinales .....	59
Figure 3. 11-Transfert des paramètres pour un modèle de transformation de fenêtre affine .....	59
Figure 3. 12-Parcours positif des pixels d'une image et mise en évidence des modes de propagation. Les deux mêmes modes sont présents pour un parcours négatif. ....	61
Figure 3. 13-Résultat de la reconstruction 3D du temple après corrélation. Images haut gauche : seuil sur la contrainte épipolaire, haut droite : seuil sur la contrainte de lissage, bas gauche seuil sur le score de corrélation, bas droit : seuil sur les trois contraintes. ....	63
Figure 3. 14-RMS des différents logiciels de corrélation sur les images « sinus » du GDR2519. ..	65
Figure 3. 15-Erreur systématique (colonne de gauche) et erreur aléatoire (colonne de droite) des différents logiciels de corrélation sur les images translation du GDR2519.....	67
Figure 3. 16- Quelques fonctions coûts tracées autour du déplacement imposé.....	69
Figure 3. 17 : Erreur systématique et aléatoire simulées en fonction du niveau de bruit $n$ dans les images.....	70
Figure 3. 18-Erreur systématique et erreur aléatoire de différentes optimisations du critère de corrélation.....	72
Figure 3. 19 – Intégrale de l'écart type de l'erreur en fonction du niveau de bruit des images ...	72
Figure 3. 20 - Amplitude maximale de l'erreur systématique en fonction du bruit des images ...	73
Figure 3. 21- Haut : vue 3D du simulateur d'images. Bas : images générées et zones corrélables théoriques (noir). ....	74
Figure 3. 22- Zones corrélées (vert) .....	74
Figure 3. 23-Erreur de corrélation en pixel pour le critère affine et le critère 3D sur les images de la sphère.....	75
Figure 3. 24-Erreur de corrélation en pixel pour le critère affine et le critère 3D sur les images du plan .....	75
Figure 3. 25-Gauche : Erreur de corrélation en pixel pour le critère affine et une interpolation BSpline de degré 7 sur les images de la sphère. Droite : Erreur de corrélation suite à des erreurs d'arrondis lors de l'interpolation (image du plan). ....	76
Figure 4. 1- Appariement multi-images (image de référence à gauche) .....	83
Figure 4. 2 - Représentation de l'homographie induite d'un plan pour le critère de corrélation multi-caméras. ....	83
Figure 4. 3 - Illustration des problèmes liés à la corrélation multi-images (choix de l'image de référence).....	84
Figure 4. 4 - Pyramide réalisée par formage incrémentale .....	86
Figure 4. 5 - Pyramide reconstruite en 3D après corrélation d'images initialisée sur la position des points 2D .....	87

Figure 4. 6 - Fenêtres de corrélation déformées après initialisation des paramètres .....	88
Figure 4. 7 - Pyramide reconstruite en 3D après corrélation d'images initialisée sur tous ses paramètres .....	88
Figure 4. 8 - Pyramide reconstruite en 3D après corrélation d'images initialisée sur tous ses paramètres, et en introduisant la distorsion.....	89
Figure 4. 9 - Comparaison de la reconstruction 3D après corrélation par propagation et du modèle 3D obtenu par HandyScan® .....	90
Figure 4. 10 - Comparaison de la reconstruction 3D après corrélation initialisé à partir des points 3D et du modèle 3D obtenu par HandyScan® .....	91
Figure 4. 11- Modèle CAO (en blanc transparent) superposé aux images après recalage .....	93
Figure 4. 12 - Détection des occultations dans les images 0, 1, 2 et 3.....	94
Figure 4. 13 - Détection des zones de fortes pentes dans les images 0, 1, 2 et 3.....	96
Figure 4. 14 - Pièce composite fortement réfléchissante .....	97
Figure 4. 15 - Reconstruction 3D après corrélation entre les images 0 et 1 .....	98
Figure 4. 16 - Reconstruction 3D après corrélation entre les images 0 et 2 .....	98
Figure 4. 17 - Reconstruction 3D finale en utilisant les images 0,1 et 2 .....	99
Figure 4. 18- Distance euclidienne entre la sphère reconstruite et la vérité terrain .....	100
Figure 4. 19 - Distance euclidienne entre le plan reconstruit et la vérité terrain .....	100
Figure 5. 1- Images utilisées pour calculer le recouvrement entre les images .....	105
Figure 5. 2- Maillage 2D reporté au niveau 3D.....	107
Figure 5. 3- Stratégie de gestion du système multi caméras par un ensemble de bancs stéréo.	108
Figure 5. 4- Images associées aux caméras de la figure 5.2 .....	108
Figure 5. 5- Marqueurs fixes disposés autour de la pièce (Filet HandyScan®).....	109
Figure 5. 6- Texture artificielle vidéo projetée .....	110
Figure 5. 7- Pastilles autocollantes utilisées pour le recalage par le système HandyScan®.....	110
Figure 5. 8- Quatre nuages de points 3D indépendants doivent être recalés dans un même repère afin d'obtenir la pièce en entier .....	111
Figure 5. 9- Images utilisées pour le recalage photométrique du nuage vert avec le nuage jaune .....	112
Figure 5. 10- Zones corrélées colorées en fonction de la valeur du score de corrélation. Vert : score faible, rouge : score élevé.....	113
Figure 5. 11- Binarisation (à gauche) et fermeture (à droite) appliquées à la carte des scores de corrélation .....	113
Figure 5. 12- Comparaison du recalage géométrique et du recalage photométrique .....	114
Figure 5. 13- Comparaison entre le modèle CAO et la mesure fournie par le Laser Tracker Faro® .....	115
Figure 5. 14- Comparaison entre la mesure fournie par le système A et la mesure fournie pas le Laser Tracker Faro® .....	116
Figure 5. 15- Comparaison entre la mesure fournie par le système B et la mesure fournie pas le Laser Tracker Faro® .....	117
Figure 5. 16- Comparaison entre la mesure fournie par le système C et la mesure fournie pas le Laser Tracker Faro® .....	118
Figure 5. 17- Corrélation classique + triangulation multi-caméras .....	119



Figure 5. 18- Stratégie de gestion du système multi caméras par grappe et bancs stéréo recalés .....	120
Figure 5. 19- Comparaison entre la mesure obtenue par triangulation multi caméras dans une stratégie de gestion du système multi caméras par grappe et bancs stéréo recalés, et la mesure fournie pas le Laser Tracker Faro® .....	120
Figure 5. 20-Corrélation classique + triangulation multi-caméras + ajustement de faisceaux ...	121
Figure 5. 21-Corrélation multi-vues + reconstruction via les paramètres du critère .....	122
Figure 5. 22- Pourcentage de points en fonction de l'écart au modèle fourni par le Laser Tracker .....	124
Figure 5. 23- Vues et reconstruction 3D de la pièce composite A.....	125
Figure 5. 24- Vues et reconstruction 3D de la pièce réalisée par formage incrémental à l'ENSM de Besançon.....	125
Figure 5. 25- Vues et reconstruction 3D d'un capot métallique.....	125
Figure 5. 26- Vues et reconstruction 3D d'un capot métallique avec des défauts.....	126
Figure 5. 27- Configuration des caméras pour la mesure du 'bouclier' .....	127
Figure 5. 28-Exemple d'images utilisées lors de la mesure du 'bouclier' .....	127
Figure 5. 29- Reconstruction 3D du bouclier .....	128
Figure A. 1-Exemple d'images synthétiques, Image 0 : Référence, Image 1 : $p=130$ , $\alpha=0.02$ , Image 2 : $p=130$ , $\alpha=0.05$ , Image 3 : $p=130$ , $\alpha=0.1$ .....	134
Figure A. 2-Déplacements observés sur les images "sinus" à l'aide du logiciel Vic3D®.....	137
Figure A. 3- Exemple d'images synthétiques "translation", Image gauche : bruit = 0, Image droite : bruit = 16 .....	138
Figure B. 1- Gradients (droites rouges) associés aux points 1D entiers.....	139
Figure B. 2- Gradients associés aux points 2D entiers .....	140
Figure B. 3- Calcul de la valeur d'un point P quelconque .....	141
Figure B. 4- Grille simplex .....	142
Figure B. 5- Contribution des gradients au point P.....	142
Figure B. 6- Exemples de mouchetis utilisé pour la vidéo-projection de texture. Bruit de Perlin (deux images haut gauche et images du bas) et bruit 'simplex' (image haut droite).....	143

# Introduction générale

---

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes permettant d'évaluer les propriétés d'un matériau ou d'une structure sans altérer la surface inspectée. Les méthodes sont variées, allant du contrôle par ultrasons, à la radiographie, en passant par les systèmes optiques. Les domaines d'application sont tout aussi différents, citons le génie civil, la médecine, l'aéronautique, ou bien même la conservation du patrimoine artistique.

Dans le domaine de l'aéronautique, les pièces fabriquées peuvent être contrôlées à différents stades de leur vie. Lors de leur développement tout d'abord, leurs propriétés sont analysées afin de trouver la pièce répondant le mieux aux contraintes du cahier des charges. Pendant leur fabrication, les pièces sont parfois inspectées afin de réaliser les derniers ajustements nécessaires à leur assemblage. Après fabrication, les pièces sont vérifiées afin de contrôler leur conformité. Enfin après quelques heures de vols les avions sont inspectés, et certaines pièces contrôlées, afin de détecter de possibles déformations pouvant être dues à des impacts en vol, à une collision avec un véhicule sur le tarmac ou autre. Dans bien des cas les contrôles sont effectués visuellement par un ou plusieurs opérateurs et demandent énormément de temps. Nous allons dans cette thèse nous intéresser aux systèmes optiques basés sur l'utilisation de caméras dans le cadre de l'inspection de surfaces.

Les systèmes optiques sont bien sûr déjà utilisés dans ce domaine (Chambon et al., 2004). Les systèmes à projection de franges permettent par exemple de numériser les coins de malle afin de mieux pouvoir les ajuster avant assemblage, les systèmes basés sur la corrélation d'images permettent d'observer les déformations d'un matériau, la shearographie ou les méthodes de moiré permettent de détecter des défauts tels que des impacts ou des fissures. Chaque système est souvent adapté à un contexte de mesure différent.

A noter que les opérateurs chargés des opérations de CND sont certifiés par une partie tierce : la COFREND « Confédération française pour les essais non destructifs ». Cette association loi 1901 a pour mission de s'occuper de la certification des compétences du personnel effectuant les essais non destructifs. Elle s'investit aussi dans le développement de recherches scientifiques, et participe à la diffusion d'études, et de résultats en organisant des conférences, des expositions etc.

L'augmentation sans cesse du trafic aérien et le développement de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux ont permis de construire des avions toujours plus gros. L'A380 en est sûrement le symbole, avec des panneaux pouvant atteindre plusieurs mètres de long. Ces pièces sont particulièrement difficiles à inspecter de par leur taille, et demandent généralement la mise en œuvre de techniques complémentaires afin de les mesurer à partir de systèmes existants. L'article (Boorne, 2010) paru récemment est consacré au problème de la mesure sans contact de très grandes structures dans le domaine de l'aéronautique. Les systèmes optiques commerciaux possèdent un champ de vue souvent limité à 1 ou 2 mètres carrés, et requièrent souvent l'utilisation de méthodes photogramétriques afin de recalibrer entre elles les différentes prises de vue nécessaires à la numérisation complète de la pièce.

Le temps pour mesurer une pièce devient alors généralement long, et la mise en œuvre de la mesure fastidieuse. Chaque pièce, même de forme identique, nécessite un temps de préparation régi par la pose de cibles photométriques ou bien par la projection de bombe de ressuage afin de s'affranchir des reflets. A noter que lors de la numérisation d'objets de petite voire de moyenne taille, les cibles photométriques peuvent être collées sur un cadre fixé autour de la pièce.

Ces contraintes ne permettent pas la mesure rapide d'une ou de plusieurs grandes pièces identiques. Mesurer de grandes pièces sans devoir déplacer un capteur autour de l'objet présente un grand intérêt en terme de temps, et donc de coût.

Un projet industriel OSMoDD « Optical NDT Technique for Shape Monitoring and Defect Detection », financé par Airbus, est lié au développement de ce système, et sert de support à cette thèse. Ce projet vise à développer un système multi-caméras permettant de mesurer de grandes pièces aéronautiques, métalliques ou composites, en une prise de vue, afin de détecter d'éventuels défauts de formes. Le système comportera un nombre quelconque de caméras, et de vidéoprojecteurs. Il sera basé entièrement sur la corrélation d'images et devra s'affranchir de l'utilisation de marqueurs permettant le recalage des différentes prises de vues. Le modèle CAO pourra être disponible mais pas nécessairement.

L'objectif majeur de cette thèse est donc de développer un tel système. Les systèmes stéréo sont aujourd'hui bien maîtrisés, la plupart des systèmes commerciaux existants sont d'ailleurs des systèmes stéréo (nous en présenterons quelques un dans le chapitre 1). Dans ce contexte, notre contribution porte sur les méthodes mises en œuvre sur un système multi-caméras (de 4 à 8 dans nos travaux), afin d'améliorer les résultats de la numérisation 3D par rapport à un ou plusieurs systèmes stéréo recalés entre eux. Nous avons d'abord proposé une méthode de corrélation pour deux caméras, méthode qui a ensuite été généralisée pour être exploitée dans un contexte multi-caméras. Nous avons ensuite intégré ces méthodes avec un module de reconstruction 3D (dont la partie ajustement de faisceaux a été développée par l'ingénieur Florian Bugarin de l'ICA-Albi), afin de comparer la précision obtenue par notre système vis-à-vis des principaux systèmes commerciaux existants. Ces contributions sont exposées dans les chapitres 3, 4 et 5 du manuscrit.

Le chapitre 1 de cette thèse présente la problématique industrielle. Nous détaillerons le cahier des charges, présenterons quelques systèmes commerciaux existants et détaillerons l'approche que nous suivrons le long de ce manuscrit.

Le chapitre 2 expose la problématique multi-caméras. Après avoir rappelé la modélisation de caméra utilisée, ainsi que la géométrie épipolaire, nous discuterons des exploitations possibles d'un système multi-caméras, de la stratégie de gestion des caméras sous forme de grappes ou de bancs stéréo, des contraintes liées au positionnement d'un tel système et de l'utilisation des informations a priori telles que le mouchetis, le modèle CAO... A noter que nous testerons par la suite, à la fin du chapitre 5, les différentes stratégies de gestion des caméras.

Le chapitre 3 est consacré à la corrélation fine d'images. Nous présenterons les fonctions de corrélation, transformations de fenêtres et méthodes habituellement utilisées. Nous proposerons une approche par propagation de germe, permettant de contourner les zones non

corrélabes. Pour cela nous proposerons d'utiliser un ensemble de critères d'arrêt permettant de stopper la propagation de la corrélation dans une direction. Ces critères seront régis par des seuils dont nous proposerons un réglage aisé, grâce à l'utilisation simultanée de tous les critères d'arrêts disponibles. Nous proposerons deux sortes de critères de corrélation, les premiers ne tirant pas partie de la structure de la scène, les seconds s'appuyant sur les paramètres de calibrage des caméras. Nous proposerons de résoudre la minimisation du critère de corrélation par composition inverse afin de réduire les temps de calcul, tout en gardant les mêmes performances. Nous évaluerons ensuite notre moteur de corrélation sur un ensemble d'images synthétiques issues du groupe de travail GDR CNRS 2519 et sur des images synthétiques de scène 3D créées pour l'occasion.

Le chapitre 4 traite de la corrélation multi-images. Nous proposerons d'utiliser le modèle CAO quand cela est possible afin d'initialiser les algorithmes de corrélation via les projections des points du modèle sur les images. Nous détaillerons comment il est possible à l'aide de ce modèle et via une implémentation sur carte graphique de détecter les zones non corrélabes, occultées dans les images. Nous présenterons ensuite un critère basé sur l'homographie induite d'un plan permettant de garder un nombre de paramètres constant quelque soit le nombre de caméras utilisé, et de ce fait bien adapté au contexte multi-caméra. Nous évaluerons les performances de ce critère sur des images synthétiques et montrerons une amélioration des résultats après reconstruction 3D par rapport à un critère de corrélation stéréo.

Le chapitre 5 présente la reconstruction 3D et le recalage de nuages. Nous présenterons les méthodes utilisées afin de reconstruire les points 3D et présenterons comment nous avons effectué le recalage photométrique par corrélation d'images. Nous évaluerons ensuite nos résultats sur la mesure d'une pièce aéronautique test que nous avons fait mesurer par d'autres systèmes de mesure commerciaux. Nous testerons plusieurs de nos méthodes et montrerons alors que la création de grappes suivie de l'utilisation du critère multi-vues permet d'obtenir une incertitude de reconstruction proche des systèmes commerciaux, et meilleure que celle de plusieurs bancs stéréo recalés entre eux.

Le lecteur trouvera dans les annexes les détails concernant la génération des images synthétiques 2D utilisées afin d'évaluer les algorithmes de corrélation du chapitre 3 et 4 de ce manuscrit.



# 1. Problématique industrielle

---

La numérisation d'objets dans un contexte industriel trouve de nombreuses applications aussi bien dans la rétro-conception d'objets, dans le prototypage rapide, dans le contrôle qualité, dans la digitalisation de moules et d'outils, dans l'inspection de surfaces, ou bien encore dans la création de maquettes numériques, etc.

Concernant cette thèse, Airbus finance un projet de collaboration avec l'école des mines d'Albi et le LAAS CNRS de Toulouse, pour développer un système multi-caméras permettant l'inspection de pièces aéronautiques telles que des panneaux de fuselage (cf. figure 1.1) ou de voilure de type métalliques ou composites, en vue de la détection de défauts de forme de ces pièces. Le projet est donc basé sur l'utilisation de caméras : il nécessite plusieurs étapes essentielles à savoir, le calibrage des caméras, la mise en correspondance de points images, la reconstruction 3D, le recalage de données 3D acquises par différentes caméras et la détection de défauts.

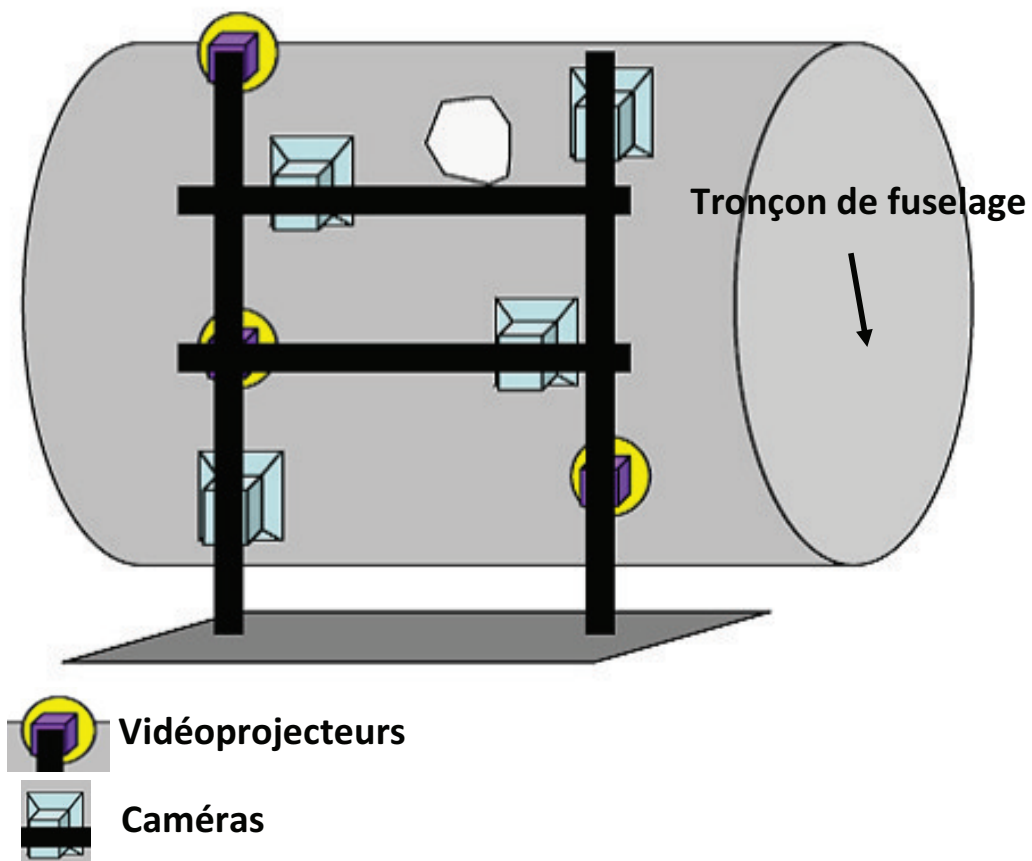


Figure 1. 1- Système multi-caméras

De manière générale, trois approches ont été proposées à AIRBUS afin de permettre l'inspection de pièces.

- La première approche consiste à disposer plusieurs caméras autour de l'objet. Cela peut être dans une configuration dite murale (cf. figures 1.1 et 1.2). Dans une telle configuration, les caméras sont fixes, et disposées faces à la pièce à numériser. Cette configuration possède l'avantage de permettre la numérisation de plusieurs pièces sans devoir recalibrer le système entre chaque mesure.



Figure 1. 2- Configuration murale du système multi-caméras pour mesurer la 'banane'

Un autre avantage de la configuration fixe est que la procédure d'acquisition est effectuée en 'one shot', ce qui permet d'avoir une acquisition instantané. Notons tout de même que les caméras sont généralement disposées en fonction d'une géométrie particulière. Le fait que le système soit fixe ne permet donc pas de pouvoir numériser n'importe quelle pièce de forme complexe. Une variante de la configuration murale est de disposer les caméras en cercle autour de l'objet (fig. 1.3). Cette configuration permet d'observer l'objet sous toutes ses faces. Nous l'avons utilisée pour mesurer les pièces de formage incrémentale dans le chapitre 4.



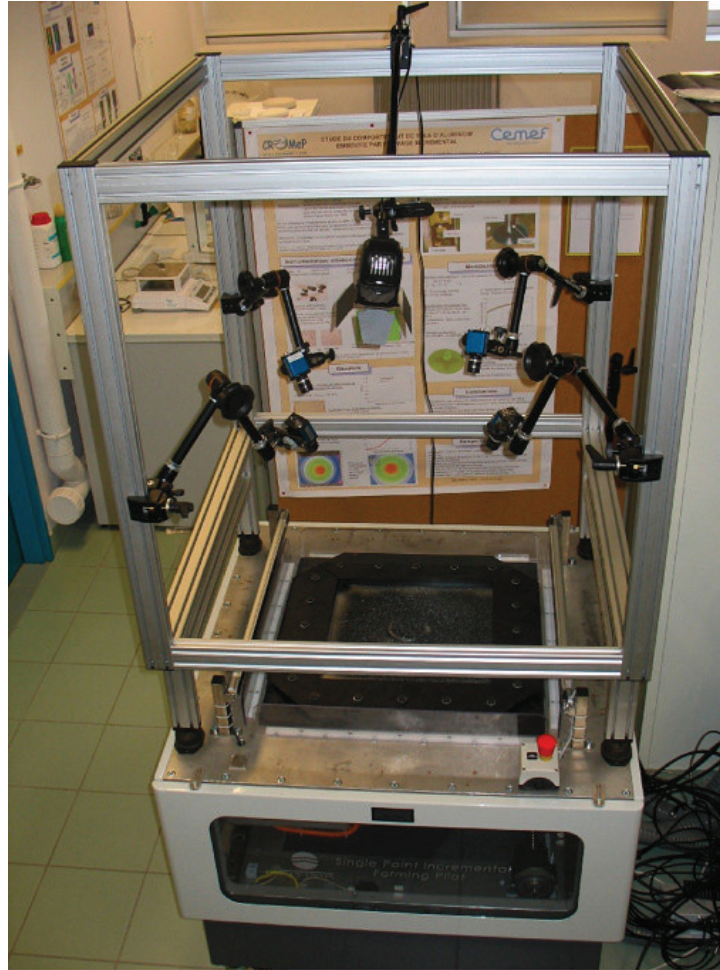


Figure 1. 3- Configuration circulaire du système multi-caméras

- La deuxième approche proposée consiste à disposer d'une caméra ou d'un capteur 3D, fixé à un bras robotique mobile. Dans une telle configuration, un nombre d'images 'illimité' peut être acquis selon un grand nombre de positions. Il est alors par exemple possible de prendre un plus grand nombre d'images afin de numériser une zone plus complexe de la pièce. Cette configuration nécessite d'estimer le mouvement du bras robotisé afin de déterminer le déplacement physique de la caméra. Cette opération peut être effectuée via les images acquises par la caméra ou bien via des capteurs présents sur le bras. Le temps de numérisation d'une pièce est bien sûr plus long dans cette configuration car il faut balayer l'ensemble de la surface de la pièce. Par ailleurs l'objet doit être rigide, puisque l'acquisition n'est pas 'one shot'. Cette configuration 'caméra mobile' est adoptée généralement dans les applications robotiques, pour lesquelles les besoins de précision sont moins primordiaux.
- La troisième approche consiste à déplacer l'objet devant un capteur. Les premiers systèmes de numérisation 3D (Minolta) fonctionnaient selon ce principe. L'objet peut être disposé sur un plateau tournant afin d'acquérir toutes ses faces. Ce procédé n'est cependant pas adapté à la mesure de grandes pièces.

La première approche a été retenue par Airbus, et fait l'objet de cette thèse. Elle permettra une mesure précise 'one shot' de la pièce observée. Nous présenterons le cahier des charges du système multi-caméras dans la section suivante.

### 1.1 Cahier des charges

Nous devons donc développer un système multi-caméras permettant d'inspecter de grandes pièces. Les contraintes de ce système sont les suivantes :

- Notre système devra être statique et sera composé d'un nombre quelconque de caméras (pas nécessairement pair). Il a été convenu avec AIRBUS que les tests en laboratoire seraient menés sur des pièces de 2 m<sup>2</sup> environ observées par 4 caméras au moins. Notre système de base est donc composé d'au moins quatre caméras (nous en avons utilisé jusqu'à huit dans certaines expérimentations).
- Il devra être basé entièrement sur la corrélation d'images (présentée dans les chapitres 3 et 4). Cette dernière nécessite des surfaces texturées pour fonctionner d'une manière optimale. Aussi des vidéoprojecteurs sont utilisés pour projeter un motif lumineux aléatoire (connus sous le nom « mouchetis ») sur les pièces non texturées. Nous utilisons jusqu'à deux vidéoprojecteurs simultanément afin d'apporter cette texture aux plus grandes pièces.
- Le système devra être capable de tirer parti des informations issues de plus de deux caméras, afin d'améliorer si possible les résultats. L'incertitude de mesure devra d'ailleurs se rapprocher de 50μm sur des pièces de 2 m<sup>2</sup> environ.
- Le modèle CAO de la pièce pourra être fourni ou non par AIRBUS.
- Le système devra s'affranchir de la pose de marqueurs permettant de recalibrer les différentes prises de vues.
- Il devra enfin permettre de détecter des défauts de forme (écarts à la forme nominale).

De nombreux systèmes commerciaux existant permettent d'obtenir une mesure précise d'un objet. Nous ferons une liste non exhaustive de certains d'entre eux, ce qui nous permettra d'avoir une idée des performances habituelles de ces systèmes, et de montrer en quoi le système multi-caméras est différent.

### 1.2 Quelques systèmes commerciaux existants

Nous ne considérons ici que les systèmes exploités pour les applications industrielles, donc recherchant une précision de l'ordre du  $\frac{1}{10}$ <sup>ième</sup> mm.

### 1.2.1 Système Tracker Xi de Faro

Le système Tracker Faro est un système de mesure par contact basé sur la technologie laser pour effectuer des mesures avec précision (jusqu'à  $3 \mu m$ ). La partie Tracker du système est composée d'un télémètre laser et de deux axes de rotation afin de suivre la position d'un réflecteur déplacé le long de l'objet à mesurer. Le réflecteur est composé de plusieurs miroirs disposés perpendiculairement les uns par rapport aux autres. Lorsque le Tracker émet un rayon laser en direction du réflecteur, le rayon est réfléchi et renvoyé à un capteur de position du Tracker. Le Tracker peut ainsi ajuster son angle de visée et déterminer la position précise du réflecteur grâce à la mesure de distance du télémètre laser. Nous avons fait numériser une de nos pièces (cf. chapitre 5) à l'aide de ce système. A noter que lors du contact, la pièce à numériser ne doit pas bouger ou se déformer, et il est important de bien la fixer afin de ne pas fausser la mesure. A noter que déplacer le réflecteur est relativement long, et a nécessité beaucoup plus de temps pour achever la mesure que pour les autres systèmes.



Figure 1. 4- Laser Tracker Faro®

### 1.2.2 Système T-Scan de Leica

Le système T-Scan est un système portable laser permettant de mesurer des objets de petites comme de grandes tailles. Ce système ne requiert aucune cible photométrique afin de recalibrer les différentes prises et est a priori insensible aux changements d'illumination, l'intensité du laser se réglant automatiquement. L'incertitude de mesure annoncée est d'environ  $30 \mu m$ , pour une distance de mesure moyenne de  $8 cm$  et une profondeur de champ de  $7.5 cm$ .



Figure 1. 5- Leica® T-Scan®

### 1.2.3 Systèmes HandyScan de Creaform

Les systèmes HandyScan sont des systèmes de mesure sans contact portables basés sur la technologie laser. Ils permettent de mesurer des objets de petites et de grandes tailles en déplaçant le système à la main autour de l'objet. Afin de recalibrer les différentes prises de vue, un ensemble de cibles photométriques (habituellement constitué de pastilles autocollantes) doit être positionné sur ou autour de l'objet. Nous avons utilisé ce système (cf. chapitre 4) pour numériser une pièce en forme de pyramide et dans le chapitre 5 pour mesurer la pièce 'banane'. Nous avons dû recouvrir cette dernière pièce de poudre de ressuage afin d'éviter au maximum les reflets. L'incertitude annoncée est de  $50 \mu m$  pour une profondeur de champ de 30cm. La distance de prise de vue pour notre pièce était inférieure au mètre.



Figure 1. 6- HandyScan®

### 1.2.4 Système Optinum™ de Noomeo

Le système Optinum est un système de mesure sans contact portable basé sur la corrélation d'images stéréoscopiques. Il est particulièrement adapté à la mesure d'objets contenus dans de petits volumes, de l'ordre du  $m^3$ . Ce système ne requiert aucune cible photométrique pour recalibrer les différentes prises de vues. L'incertitude annoncée est de l'ordre de  $100 \mu m$  pour une distance de prise de vue de  $40 cm$ , et une profondeur de champ de quelques centimètres. Le

point fort de ce capteur concerne le recalage sans marqueur, obtenu à partir de mesures inertielles et visuelles.



Figure 1. 7- Optinum™ de Noomeo®

### 1.2.5 Systèmes Breuckmann

Les systèmes Breuckmann sont des systèmes de mesure sans contact basés sur la projection de franges. Ils sont composés d'un projecteur, et d'une ou deux caméras. Les différents écartements possibles permettent de mesurer de petits comme de larges volumes en une prise de vue. Afin de mesurer de larges surfaces, des cibles photométriques peuvent aussi être disposées sur ou autour de l'objet. Les incertitudes annoncées sont de l'ordre de  $30 \mu m$ . Du fait de la technique de projection de franges, plusieurs images sont acquises successivement pour pouvoir corrélérer. La scène doit donc être rigide.

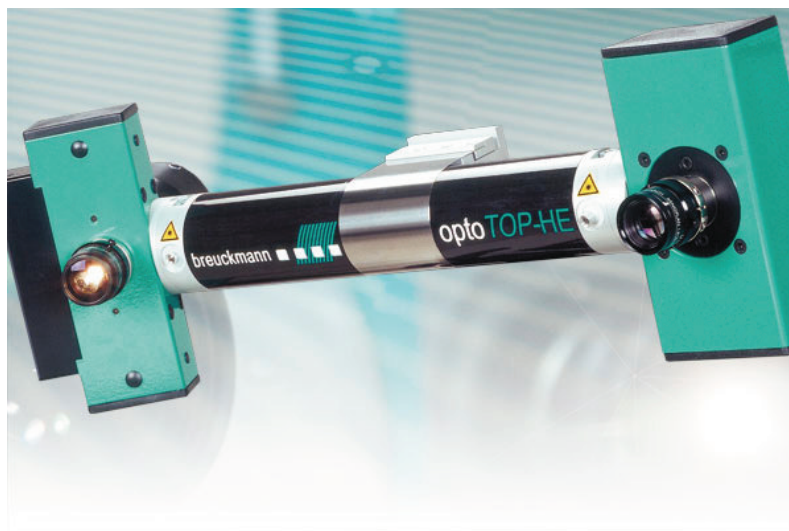


Figure 1. 8- Opto Top-HE de Breuckmann®

### 1.2.6 Système Minolta vi-9i de Konica

Le système Konica Minolta est un système de mesure sans contact basé sur la technologie laser. Il permet de mesurer la forme d'un objet par profilométrie. Le système doit être couplé à un

système photogrammétrique afin de numériser de plus larges pièces et un ensemble de cibles photométriques doivent être disposées sur ou autour de l'objet. L'incertitude de mesure annoncée est de  $50 \mu m$  pour une distance de mesure de  $60 cm$ .



Figure 1. 9- Minolta® vi-9i

### 1.2.7 Système Atos de GOM

Le système ATOS est un système de mesure sans contact basé sur la projection de franges. Il est composé de deux caméras et d'un projecteur, comme dans le cas du système HandyScan. Des cibles photométriques doivent être disposées sur ou autour de l'objet afin de recalibrer les différentes prises de vues lorsque l'on souhaite mesurer une pièce de grande taille. Le système est alors couplé au système photogrammétrique Tritop® pour évaluer la position de ces pastilles. La distance de mesure est comprise entre  $0.70$  et  $2 m$ . Aucune indication concernant l'incertitude de mesure n'est mentionnée. Nous avons fait numériser une de nos pièces (cf. chapitre 5) par ce système par l'IUT de Tarbes.



Figure 1. 10- Système Atos®



### 1.2.8 Système Shapeview de NDTexpert

Le système Shapeview est un système de mesure sans contact portable basé sur la corrélation d'images stéréoscopiques avec éclairage par un mouchetis. Sa principale utilisation est la caractérisation de défauts et d'écarts de formes. Il n'offre pas la possibilité de recalcr différentes prises de vues. Son incertitude de mesure est annoncée aux alentours de  $50 \mu m$  pour une zone observée de  $700 \times 900 \text{ mm}^2$ .



Figure 1. 11- Shapeview®

### 1.2.9 Système Vic3D Multi-Views de Correlated Solutions

Le système VIC3D est à l'origine dédié à la mesure sans contact de déplacements et de déformations, mais il fournit aussi le modèle 3D de la pièce numérisée. Il est basé sur la corrélation d'images stéréoscopiques avec éclairage par un mouchetis. Récemment, un module 'Multi-Views' permettant de recalcr les nuages issus de plusieurs bancs stéréo entre eux a été proposé. Le recalage est effectué de manière photométrique en utilisant la texture naturelle de l'objet ou une texture de type mouchetis apportée artificiellement. Ce système n'étant pas vendu dans une configuration rigide comme les autres, il est possible d'utiliser n'importe quelle optique et donc d'avoir de larges comme de petits champs de vues.



Figure 1. 12- Bancs stéréo utilisé par le système Vic3D®



Systèmes	Incertitude de mesure maximale annoncée	Type de pièce	Distance de fonctionnement	Portabilité	Procédure de mesure
Laser Tracker Faro	3 $\mu m$	Petites à grandes	Jusqu'à 70m	☆	Balayage de toute la pièce (avec un réflecteur dont la position est mesurée par télémétrie)
T-Scan	30 $\mu m$	Petites à moyennes	~8cm	☆☆☆☆	Déplacement du système de mesure autour de la pièce
HandyScan	50 $\mu m$	Petites à moyennes	~50cm	☆☆☆☆	Déplacement du système de mesure autour de la pièce
Optinum	100 $\mu m$	Petites à moyennes	~40cm	☆☆☆☆	Déplacement du système de mesure autour de la pièce
Syst. Breuckmann	30 $\mu m$	Petites à grandes	~40cm	☆☆	Acquisition de plusieurs images (projection de franges) + photogrammétrie
Minolta vi-9i	50 $\mu m$	Petites à grandes	~60cm	☆☆	Balayage laser (profilométrie)
Atos	Non disponible	Petites à grandes	~70-200cm	☆☆	Acquisition de plusieurs images (projection de franges) + photogrammétrie
Shapeview	50 $\mu m$	Petites	~100cm	☆☆☆	Acquisition 'One Shot'
Vic 3D Multi-Views	Non disponible	Petites à grandes	-	☆	Acquisition 'One Shot'

Tableau 1. 1- Tableau récapitulatif des différents systèmes de mesure mentionnés

### 1.3 Système proposé

Afin d'obtenir un modèle 3D de la pièce observée, plusieurs étapes sont nécessaires. Nous décrivons dans l'ordre d'application les étapes composant la numérisation d'une pièce.

### 1.3.1 Mise en place du système multi-caméras

La numérisation réussie d'une pièce dépend bien sûr de la performance des algorithmes utilisés mais dépend pour une grande partie du positionnement des caméras par rapport à l'objet. Bien que ce ne soit pas l'objectif de cette thèse, nous discuterons de la problématique du positionnement dans le chapitre 2, section 2.3. Nous présenterons également deux approches de gestion des caméras du système dans la section 2.4. Ces deux approches seront mises en œuvre dans le chapitre 5, section 5.3.4 pour la mesure d'une pièce aéronautique.

### 1.3.2 Calibrage du système multi-caméras

Le système est avant tout un système optique et a besoin d'être calibré afin de reconstruire la pièce dans un repère euclidien. Le calibrage consiste à estimer les paramètres extrinsèques des caméras, permettant de localiser les caméras dans un repère monde, et à estimer les paramètres intrinsèques des caméras permettant d'exprimer suivant le modèle de caméra choisi, la relation entre les coordonnées pixel dans une image, et les coordonnées du point 3D correspondant dans le repère de chaque caméra. Cette étape a été développée par l'ingénieur du laboratoire Florian Bugarin à partir des algorithmes déjà existants de l'ICA-Albi. Nous utilisons des mires planes dont le modèle a été développé par (Garcia, 2001)(fig.1.13).

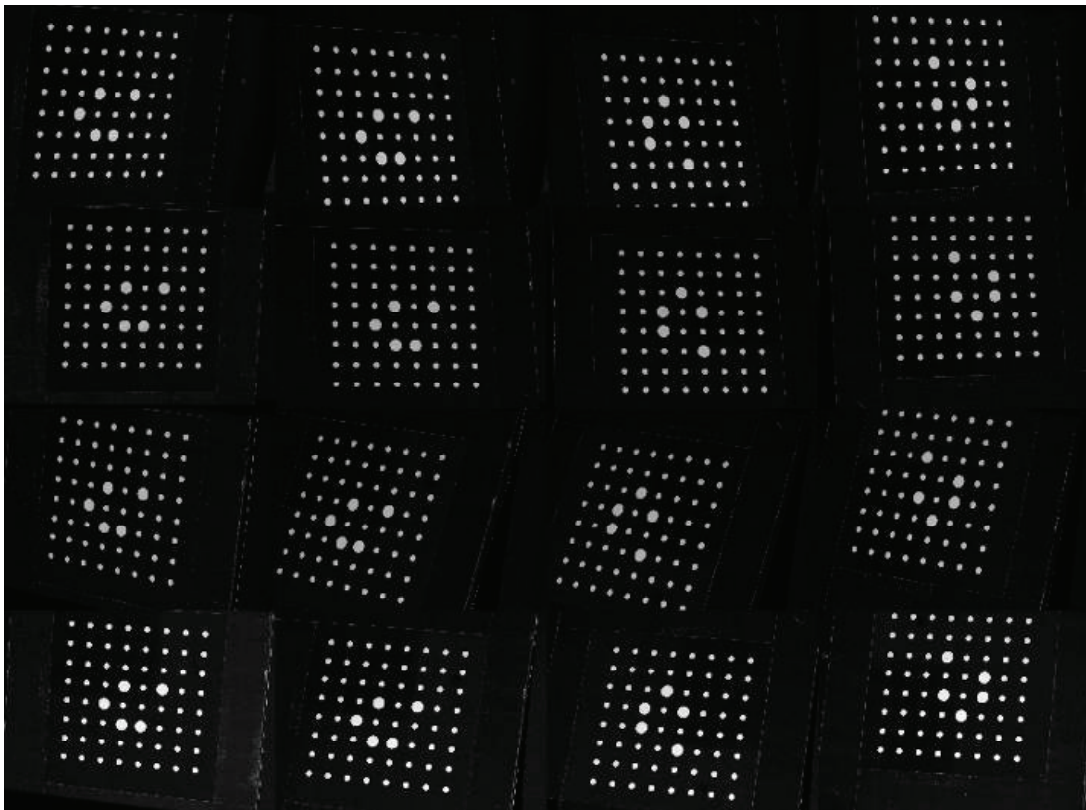


Figure 1. 13- Mire plane observée selon plusieurs positions pour calibrer les caméras

### 1.3.3 Mise en correspondance de points par corrélation d'images

La mise en correspondance de points est une tâche complexe que nous décrivons dans le chapitre 3 dans le cadre de deux vues et dans le chapitre 4 dans le cadre multi-vues. Nous proposons dans cette thèse une méthode de corrélation d'images par propagation de germe,

permettant de contourner des zones non corrélables, et de produire un résultat à la précision sub-pixel. Dans le chapitre 4, nous discuterons de l'extension de la corrélation d'images à plusieurs images, et présenterons une approche basée sur le modèle CAO de la pièce à numériser ainsi que l'introduction d'un critère de corrélation intégrant la structure de la scène.

### **1.3.4 Reconstruction 3D euclidienne multi-vues de l'objet**

La reconstruction 3D est la dernière étape pour obtenir la numérisation d'une pièce. Cette étape ne peut se faire que si le système est calibré et que si les points de différentes images correspondant à un même point 3D physique ont été mis en correspondance. Nous présenterons les algorithmes utilisés pour les reconstructions 3D de nos pièces dans le chapitre 5.

### **1.3.5 Recalage de nuages de points 3D**

Lorsque les caméras ne sont pas toutes calibrées entre elles, plusieurs nuages de points 3D exprimés dans des repères différents sont obtenus. Afin d'obtenir le modèle final de la pièce, il est nécessaire de recalibrer les modèles. Le recalage peut être effectué géométriquement comme être basé encore une fois sur la corrélation d'images (recalage photométrique). Nous présenterons le recalage dans le chapitre 5.

## **1.4 Conclusion : un système multi-caméras, oui mais pourquoi ?**

Les systèmes commerciaux présentés ne permettent pas d'avoir une mesure 'one shot' de toute la pièce observée, hormis le système Vic3D qui est plutôt dédié à la mesure de déformations. Ces systèmes nécessitent bien souvent un opérateur qui déplace le système autour de l'objet. Notre système, à travers l'utilisation de la corrélation d'images et la multiplication des caméras permettra d'acquérir toutes les images nécessaires à la reconstruction 3D de la pièce observée en une seule passe. La corrélation d'images qui permet d'obtenir des précisions d'appariements sub-pixels entre les images, permettra, couplée à l'utilisation de plusieurs caméras lors de la reconstruction 3D des objets, d'obtenir la meilleure incertitude possible. Nous présenterons dans la suite de ce manuscrit, les possibles exploitations du système (chapitre suivant), ainsi que les étapes essentielles à la numérisation d'une pièce (chapitres 3, 4, et 5).

## 2. Problématique multi-caméras

---

Le but des algorithmes de vision multi-caméras est de reconstruire en totalité ou en partie un objet 3D à partir d'un ensemble d'images. Ces dernières peuvent provenir de plusieurs caméras fixes, disposées autour de la scène observée, ou bien d'une caméra mobile se déplaçant autour de la pièce à numériser. Pour de petits objets, une seule caméra fixe est parfois utilisée. L'objet peut alors être posé sur un plateau tournant, l'acquisition se faisant à intervalles plus ou moins réguliers. Une seule caméra peut aussi être déplacée autour de l'objet ou à travers la scène à l'aide d'un bras robotique. L'utilisation de caméras pour obtenir une représentation euclidienne de la scène nécessite un calibrage précis des ou de la caméra. Bien que l'incertitude de reconstruction 3D d'une scène dépende fortement de la qualité du calibrage (Martinec, 2008), cette thèse n'aborde pas directement le sujet. Nous considérons que les caméras sont fortement calibrées (Hartley and Zisserman, 2004), à partir de mires planes (Lavest, Viala and Dhome, 1998) (Zhang, 2000) (Garcia, 2001). Néanmoins le modèle de caméra utilisé doit être introduit. Les paramètres issus du calibrage sont en effet utilisés dans de nombreuses méthodes décrites tout au long de ce manuscrit, à savoir lors de la mise en correspondance dans le chapitre 3, lors de l'utilisation du modèle CAO dans le chapitre 4, et lors de la reconstruction 3D dans le chapitre 5. Nous commencerons donc ce chapitre par une description du modèle de caméra utilisé.

Ces dernières années, de nombreuses méthodes multi-caméras ont émergé au sein de la communauté de vision par ordinateur (Seitz et al., 2006). Les systèmes stéréo étant de nos jours bien maîtrisés, les recherches ont davantage porté sur l'utilisation de plus de deux caméras. Notons que nous n'évoquons pas ici les systèmes multi-caméras hétérogènes (multi-spectrales, multi-focales...) qui font l'objet aussi d'un grand intérêt et disposent de techniques de fusion associées spécifiques. Deux avantages à l'utilisation de systèmes multi-caméras se dégagent naturellement.

- Le premier est lié à la taille de la scène ou de l'objet observés. Bien que pour numériser de grandes pièces, il soit possible de s'éloigner de celles-ci afin d'élargir le champ de vue et ainsi capturer une plus grande zone, cette option risque de diminuer la résolution spatiale et d'empêcher la numérisation de plus petits détails. De ce fait, un plus grand nombre de caméras est généralement utilisé afin de recouvrir la pièce dans sa totalité.
- La deuxième raison poussant au développement de méthodes multi-caméras est l'amélioration de l'incertitude de reconstruction apportée par la redondance d'informations. Cette dernière permet en effet d'utiliser des algorithmes de reconstruction multi-caméras tel que l'ajustement de faisceaux (Triggs et al., 2000) (chapitre 5). Elle permet aussi de s'affranchir partiellement des reflets (chapitre 4).

Les algorithmes existants varient selon de nombreux critères :

- **Selon la représentation 3D utilisée par l'algorithme.** Il existe de nombreuses façons pour modéliser une scène 3D et du coup de nombreux d'algorithmes. Citons par exemple : la représentation volumique par Voxels (Seitz and Dyer, 1999) (Slabaugh et al., 2004), les surfaces déformables (Level-Sets) (Faugeras and Keriven, 1998) (Pons, Keriven

and Faugeras, 2005), les cartes de profondeur (Zach, 2008) (Deng et al., 2010), les représentations par patches (Furukawa, 2008). Pour notre part, nous travaillons sur un nuage de points 3D, que l'on maillera à l'aide du maillage 2D issu de la corrélation d'images, ou bien via un algorithme de maillage (logiciel Geomagic®).

- **Selon la gestion des occultations et des faux appariements.** La gestion des occultations et des faux appariements dans un système multi-vues peut se faire généralement de façon géométrique en détectant des aberrations sur la surface de l'objet reconstruite, comme de façon photométrique grâce à l'appariement multi-vues qui apporte une plus grande robustesse sur les points appariés et les points 3D reconstruits. Nous présenterons une détection des occultations de manière photométrique dans le chapitre 3 et géométrique dans le chapitre 4.
- **Selon les contraintes appliquées aux algorithmes.** Suivant la scène observée, et la présence ou non d'une texture suffisante pour apparier les images, des contraintes sur la forme de l'objet peuvent être appliquées. Celles-ci peuvent porter sur la continuité de la surface, ou sur sa courbure et ainsi privilégier un type d'objet ou de scène à reconstruire. Dans notre cas, nous devons numériser des pièces aéronautiques, qui sont des surfaces continues peu texturées. Nous projetterons donc un motif lumineux pour créer une texture sur la surface et nous adopterons une méthode de propagation s'adaptant bien à celle-ci (cf. chapitre 3).

Notre système multi-caméras est composé de caméras et de vidéoprojecteurs. Avant toute numérisation il est nécessaire de les positionner correctement afin de réussir au mieux la mesure. Nous discuterons de ce point dans la section 2.3. Nous exposerons aussi dans la section 2.4 comment gérer les caméras dans ce système. Nous terminerons enfin en discutant de l'utilisation des informations disponibles a priori (mouchetis, modèle CAO) avant la mesure dans la section 2.5.

### 2.1 Modélisation d'une caméra

Une caméra est un dispositif de prises de vues. Celle-ci est composée d'un capteur photographique, de type CCD ou CMOS, d'une partie optique comprenant un objectif, et éventuellement un zoom.

Les caméras que nous utilisons, sont de bonne qualité et une modélisation simple est suffisante. Nous utilisons un modèle classique de vision par ordinateur : le modèle sténopé, dit « trou d'épingle » (Faugeras, 1993) (Horaud and Monga, 1995) auquel nous rajoutons la modélisation des distorsions radiales. Le modèle sténopé est une modélisation linéaire du processus de formation des images qui permet d'exprimer la relation mathématique entre les points 3D de la scène et leurs projections 2D sur le plan image. Ce modèle représente le centre optique de la caméra par un point de taille infiniment petite (le trou d'épingle) et pose l'hypothèse que le système ne comporte pas de lentilles. Celui-ci ne permet pas d'exprimer les aberrations géométriques telles que les distorsions, ou bien le flou d'un objet hors champ. D'autres modèles (modèle de lentille mince et modèle de lentille épaisse (Garcia, 2001)) permettent de

représenter des systèmes optiques spécifiques (systèmes comprenant un zoom, systèmes optique de microscope). Nous présentons le modèle sténopé dans la section suivante.

### 2.1.1 Modèle sténopé

Ce modèle simple est issu de la géométrie projective (Hartley and Zisserman, 2004). Nous allons décrire comment passer d'un point 3D  $P(x, y, z)^t$  exprimé en coordonnées réelles à un point 2D  $p(u, v)^t$  exprimé en coordonnées pixels. Afin de pouvoir placer ou bien mesurer des objets dans un espace il est nécessaire de fixer un référentiel qui sera valable pour tous les points de la scène observée. Ce référentiel est généralement appelé « repère monde », et noté  $O_w$  (figure 2.1). Tout point 3D  $P$  est donc exprimé dans ce repère.

Toute caméra présente dans ce même espace possède aussi un référentiel, dénommé  $O_c$  appelé aussi le repère caméra. La relation entre ces deux référentiels est exprimée à travers les paramètres extrinsèques de la caméra (figure 2.2). Ceux-ci sont au nombre de six et permettent de localiser la caméra dans l'environnement. Trois paramètres modélisent la translation  $(tx, ty, tz)$  entre  $O_w$  et  $O_c$  et trois modélisent la rotation  $(\alpha, \beta, \gamma)$ . Sous forme matricielle, la transformation d'un point  $\tilde{P}(x, y, z, 1)^t$  de  $O_w$  exprimé en coordonnées homogènes vers un point  $\tilde{P}_c(x, y, z, 1)^t$  de  $O_c$  s'exprime par :

$$\tilde{P}_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r1 & r2 & r3 & tx \\ r4 & r5 & r6 & ty \\ r7 & r8 & r9 & tz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0^t & 1 \end{pmatrix} \tilde{P} = E_c \tilde{P} \quad (2.1)$$

avec  $R$ , la matrice de rotation associée aux paramètres  $(\alpha, \beta, \gamma)$  et  $t$  le vecteur de translation associé aux paramètres  $(tx, ty, tz)$ .

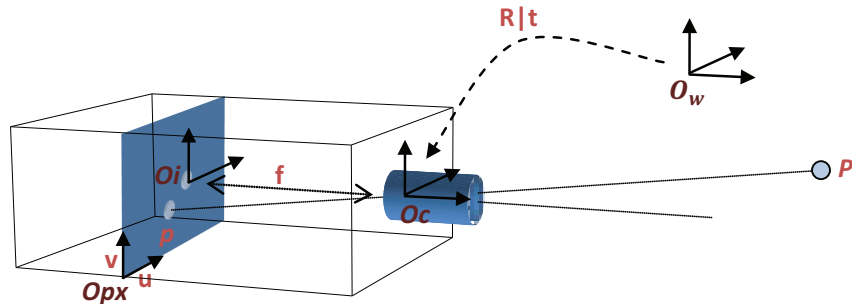


Figure 2. 1. Modèle de caméra pinhole

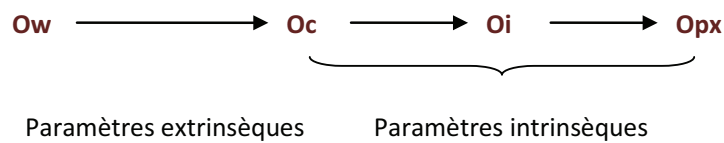


Figure 2. 2- Les paramètres extrinsèques assurent la relation entre le repère  $O_w$  et  $O_c$ . Les paramètres intrinsèques assurent la relation entre le repère  $O_c$  et le repère  $O_{px}$  (modèle pinhole).

Les paramètres intrinsèques permettent eux de modéliser la partie interne de la caméra et font le lien entre le repère  $O_c$  et le repère  $O_{px}$  (figure 2). Ils sont composés de deux transformations. La première exprime la projection d'un point 3D  $P_c$  du repère  $O_c$  sur le plan image de la caméra, de référentiel  $O_i$ . Elle permet de passer de coordonnées 3D métriques à des coordonnées 2D métriques. Le facteur d'échelle de la projection est représenté par la focale de la caméra, notée  $f$ .

$$P_i = \begin{pmatrix} f x_c \\ f y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} P_c \quad (2.2)$$

$$p_i = \begin{pmatrix} f x_r \\ f y_r \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f x_c}{z_c} \\ \frac{f y_c}{z_c} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

avec les coordonnées définies dans le plan rétinien, du point  $P_c$ :

$$\begin{aligned} x_r &= \frac{x_c}{z_c} \\ y_r &= \frac{y_c}{z_c} \end{aligned} \quad (2.4)$$

La deuxième transformation exprime une transformation affine au sein du plan image. C'est la transformation permettant d'exprimer les coordonnées en pixel. Elle permet de passer du référentiel  $O_i$  au référentiel  $O_{px}$ . Les paramètres  $m_x$  et  $m_y$  représentent le nombre de pixels par unité de mesure (habituellement exprimé en  $px/mm$ ) suivant les directions  $u$  et  $v$ . Le paramètre  $s$  ou « skew » permet d'exprimer la non orthogonalité entre les axes  $u$  et  $v$  du repère  $O_{px}$ . Sa valeur est généralement considérée nulle. Le point  $(u_0, v_0)$  est appelé le point principal et correspond à la projection du centre optique sur le plan image. Sa position est normalement proche du centre de l'image.

$$p = \begin{pmatrix} m_x & s & u_0 \\ 0 & m_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} p_i \quad (2.5)$$

La composition des deux transformations précédentes génère ce que l'on appelle les paramètres intrinsèques d'une caméra.

$$K = \begin{pmatrix} \alpha_u & sf & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_x & s & u_0 \\ 0 & m_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

avec

$$\begin{aligned} \alpha_u &= m_x * f \\ \alpha_v &= m_y * f \end{aligned} \quad (2.7)$$

La relation entre un pixel de l'image  $p(u, v)$  et un point 3D  $P_c(x_c, y_c, z_c)$  dans le repère caméra s'écrit :

$$\begin{aligned} u &= u_0 + \alpha_u x_r + s y_r \\ v &= v_0 + \alpha_v y_r \end{aligned} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 Modélisation des distorsions

Le modèle linéaire sténopé ne permet pas d'inclure les distorsions. Il existe plusieurs types de déformations : les distorsions radiales, prismatiques, et celles de décentrage (Garcia, 2001). Nous nous contenterons de présenter les distorsions radiales bien que des modèles paramétriques existent pour représenter les autres types de distorsion. Les valeurs de ces dernières qui peuvent être déterminées lors du calibrage sont généralement très faibles, et nous les avons négligées.

Les distorsions radiales sont habituellement de deux types :

- En coussinet (image gauche de la figure 2.3), le grossissement de l'image augmente quand la distance au centre optique de l'image augmente.
- En barillet (image droite de la figure 2.3), le grossissement de l'image diminue quand la distance au centre optique de l'image augmente.



Figure 2. 3- Distorsions en coussinet (gauche) et en barillet (droite)

En présence de distorsion radiale, la relation entre un pixel de l'image  $p(u_d, v_d)$  et un point 3D  $P_c(x_c, y_c, z_c)$  dans le repère caméra s'écrit :

$$\begin{aligned} u_d &= u_0 + \alpha_u x_d + s y_d \\ v_d &= v_0 + \alpha_v y_d \end{aligned} \quad (2.9)$$

avec

$$\begin{aligned} x_d &= x_r + x_r R = x_r (1 + R) \\ y_d &= y_r + y_r R = y_r (1 + R) \end{aligned} \quad (2.10)$$

et

$$R = r_1 D + r_2 D^2 + r_3 D^3 \dots \quad (2.11)$$

et

$$D = x_r^2 + y_r^2 \quad (2.12)$$

Les distorsions sont ici prises en compte au niveau métrique de l'image.



### 2.1.2.1 Inversion du modèle

Dès que l'on souhaite reconstruire un modèle 3D à partir d'images, il est nécessaire de faire le lien entre le repère du plan image et le repère monde. Il faut pour cela inverser le modèle de distorsion. Nous avons choisi la méthode polynomiale qui consiste à résoudre une équation du 7<sup>ème</sup> degré. A noter que le facteur skew (s) est considéré égal à zéro. En utilisant les égalités suivantes :

$$x_d = \frac{u_d - u_0}{\alpha_u} \quad (2.13)$$

$$y_d = \frac{v_d - v_0}{\alpha_v} \quad (2.14)$$

$$x_r = \frac{u - u_0}{\alpha_u} \quad (2.15)$$

$$y_r = \frac{v - v_0}{\alpha_v} \quad (2.16)$$

On pose :

$$\frac{x_d}{y_d} = \frac{x_r}{y_r} \Rightarrow x_r = \frac{x_d}{y_d} y_r = \frac{u_d - u_0}{v_d - v_0} \frac{\alpha_v}{\alpha_u} y_r \quad (2.17)$$

En introduisant (2.17) dans (2.12), on obtient :

$$D = \left( \frac{u_d - u_0}{v_d - v_0} \frac{\alpha_v}{\alpha_u} \right)^2 y_r^2 + y_r^2 \quad (2.18)$$

Puis en utilisant les équations (2.18), (2.10) et (2.11), nous obtenons l'équation polynomiale en  $y_r$  suivante :

$$y_d = y_r \left( 1 + r_1 y_r^2 \left( 1 + \left( \frac{u_d - u_0}{v_d - v_0} \frac{\alpha_v}{\alpha_u} \right)^2 \right) + r_2 y_r^4 \left( 1 + \left( \frac{u_d - u_0}{v_d - v_0} \frac{\alpha_v}{\alpha_u} \right)^2 \right)^2 \right) \dots \quad (2.19)$$

Nous pouvons alors corriger la distorsion radiale pour un pixel  $(u_d, v_d)$  via l'équation 2.9 ou au niveau métrique via l'équation 2.19. Nous dénommerons la fonction de correction de la distorsion radiale  $d^{-1}(x_d, y_d)$  pour un point de l'image en coordonnées métriques.

## 2.2 Géométrie épipolaire

La géométrie épipolaire (Horaud and Monga, 1995) (Hartley and Zisserman, 2004) est issue des propriétés de la géométrie projective quand on les applique à deux vues. Elle n'est pas liée à la structure de la scène, et ne dépend que des paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras. C'est un outil très utilisé en vision par ordinateur, car il apporte des contraintes fortes dans de nombreux algorithmes, dans les étapes de calibrage, de reconstruction, ou bien même d'appariement. Elle s'applique aussi bien dans le cas d'un système multi-caméras statique que pour une seule caméra mobile.

### 2.2.1 Représentation

La géométrie épipolaire entre deux vues peut être vue comme l'intersection du plan image avec tous les plans contenant la 'baseline' des caméras et un point 3D  $P$  quelconque. La 'baseline' est

définie comme étant la droite joignant les centres optiques des caméras (figure 2.4). Le correspondant du point  $p_1$  de  $I_{m1}$  ne peut être que sur la droite  $l_2$  de  $I_{m2}$ . Cette droite est appelée « droite épipolaire » et est l'intersection du plan  $(p_1, O_{c1}, O_{c2})$  avec  $I_{m2}$ . De manière analogue, un point  $p_2$  de  $I_{m2}$  se trouve sur la droite  $l_1$  de  $I_{m1}$  et est l'intersection du plan  $(p_2, O_{c1}, O_{c2})$  avec  $I_{m1}$ . Le plan  $(p_1, O_{c1}, O_{c2})$  ou  $(p_2, O_{c1}, O_{c2})$  est appelé « plan épipolaire ». Nous décrivons dans la section suivante les équations faisant le lien entre un point dans une image et une droite dans une autre image.

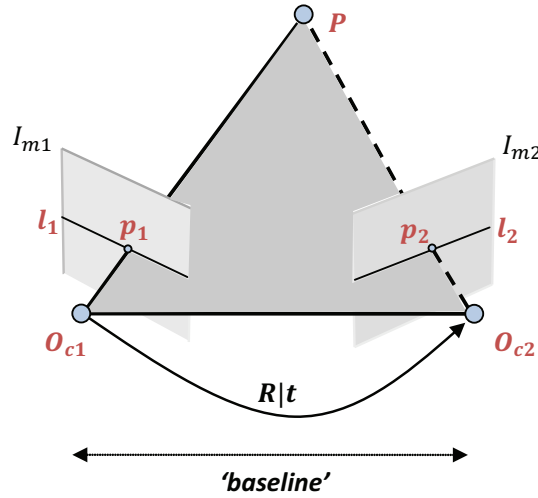


Figure 2. 4- Représentation de la géométrie épipolaire

### 2.2.2 Matrice essentielle et matrice fondamentale

Un point de l'image  $I_{m2}$  peut être exprimé en fonction d'un point de l'image  $I_{m1}$  et des paramètres extrinsèques des caméras. Soit la transformation rigide entre  $O_{c1}$  et  $O_{c2}$  exprimée par la composition des paramètres extrinsèques des deux caméras.

$$E_{c_1c_2} = E_{c_1}^{-1}E_{c_2} \quad (2.20)$$

La relation entre un point de l'image gauche et un point de l'image droite (Horaud and Monga, 1995) est définie par :

$$x' = \frac{Zr_1p_1 + t_x}{Zr_3p_1 + t_z} \quad (2.21)$$

$$y' = \frac{Zr_2p_1 + t_y}{Zr_3p_1 + t_z} \quad (2.22)$$

En supprimant  $Z$  dans l'équation précédente, on obtient l'équation linéaire :

$$(t_zr_2p_1 - t_yr_3p_1)x' + (t_xr_3p_1 - t_zr_1p_1)y' = t_xr_2p_1 - t_yr_1p_1 \quad (2.23)$$

Qui n'est autre qu'une équation de droite de la forme :

$$a'x' + b'y' + c' = 0 \quad (2.24)$$

avec :

$$a' = (t_y r_{31} - t_z r_{21})x + (t_y r_{32} - t_z r_{22})y + (t_y r_{33} - t_z r_{23}) \quad (2.25)$$

$$b' = (t_z r_{11} - t_x r_{31})x + (t_z r_{12} - t_x r_{32})y + (t_z r_{13} - t_x r_{33}) \quad (2.26)$$

$$c' = (t_x r_{21} - t_y r_{11})x + (t_x r_{22} - t_y r_{12})y + (t_x r_{23} - t_y r_{13}) \quad (2.27)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = [t]_{\times} R p_1 = E p_1 \quad (2.28)$$

Où  $E$  est la matrice essentielle liant un point en coordonnées réelles d'une image à une droite en coordonnées réelles dans une autre image.

La matrice fondamentale est la représentation algébrique de la géométrie épipolaire. Elle permet de faire le lien entre n'importe quel point  $p_1$  dans le plan image  $I_{m1}$  et une droite dans le plan image  $I_{m2}$ .

$$l_1 = F p_1 \quad (2.29)$$

Elle s'écrit comme la composition des paramètres intrinsèques et de la matrice essentielle. C'est une matrice 3x3, de rang 2.

$$F = K_2^t [t]_{\times} R K_1 \quad (2.30)$$

Cette contrainte permet de limiter la recherche de points correspondants à une droite dans une image ou bien de déterminer si un couple de points correspondants est correct. Elle permet aussi lors du calibrage d'avoir un indicateur sur la qualité du calibrage en calculant la distance à la droite épipolaire pour des points de mires extraits dans les images.

### 2.2.3 Extension de la géométrie épipolaire à plusieurs vues

Nous avons vu que la géométrie épipolaire permet de lier un point d'une image à une droite dans une image correspondante et que l'outil mathématique assurant cette liaison était exprimé par la matrice fondamentale. Il a été montré que des relations similaires existent pour trois et quatre vues représentées par les tenseurs trifocal et quadrifocal (Hartley and Zisserman, 2004). Nous n'avons pas utilisé ces outils dans notre travail.

Nous avons présenté le modèle d'une caméra. Chaque capteur est localisé vis-à-vis d'un repère de l'environnement dans lequel les mesures 3D seront exprimées. Ces données restent valables tant que les caméras ne sont pas dégradées. La position des caméras est un élément essentiel à une bonne numérisation. Nous présenterons donc le positionnement des caméras dans la partie suivante.

## 2.3 Positionnement des caméras et des vidéoprojecteurs

Notre système est composé d'un ensemble de caméras et d'un ensemble de vidéoprojecteurs. Nous pourrions aussi y inclure l'opérateur qui a un rôle clef dans le positionnement du matériel. Avant toute numérisation, il est nécessaire de placer correctement celui-ci. Cette tâche peut

paraître triviale pour un opérateur averti mais peut se révéler complexe pour une personne novice dans le domaine.

Les objectifs d'une numérisation sont généralement, d'une part de pouvoir numériser toute la pièce, et d'autre part de la numériser avec une incertitude suffisamment faible en fonction de la précision recherchée. Nous rappelons que les pièces aéronautiques observées, bien que généralement planes, peuvent générer des occultations dans certaines vues ou bien des pentes observées très élevées. De plus, leur matériau, qu'il soit mat ou brillant, entraîne irrémédiablement la création de reflets spéculaires. Tout ceci complique grandement les étapes ultérieures d'appariement et de reconstruction 3D. Passer un peu de temps à préparer une numérisation permet donc d'en économiser par la suite, voire de simplifier les traitements postérieurs.

Les reflets spéculaires sont principalement engendrés par la vidéo-projection de mouchetis. Une façon de les éviter est de projeter le mouchetis avec un angle rasant par rapport à la pièce. Malheureusement si la projection n'est pas fronto-parallèle à la surface observée, le mouchetis formé habituellement de taches isotropes sera déformé. Dans le cas d'une trop grande déformation, il devient impossible d'obtenir un résultat correct lors de la phase d'appariement. Les vidéos projecteurs sont donc positionnés en privilégiant la direction fronto-parallèle à la surface et en recouvrant toute la surface. Dans notre système, les vidéoprojecteurs ne sont utilisés que pour projeter de la texture. Nous n'effectuons aucune étape d'appariement entre le motif projeté et les images et n'avons donc pas besoin de calibrer les vidéoprojecteurs.

En ce qui concerne les caméras, celles-ci sont positionnées de façon à recouvrir toute la surface de la pièce observée et afin que chaque partie de la pièce soit observée par au moins deux caméras. On cherchera ensuite à minimiser les reflets spéculaires engendrés par les projecteurs, et plus particulièrement dans les zones observées par deux caméras. En effet lorsque l'on ne dispose que de deux vues pour reconstruire une partie d'un objet, toute zone présentant un reflet dans l'une des images ne peut être reconstruite. Ce n'est pas toujours le cas lorsque le nombre de caméras observant la même zone est supérieur à deux. Il suffit que la partie d'un objet soit visible par au moins deux caméras pour être reconstruite, l'utilisation de ce que nous appellerons grappe de caméras dans la section suivante permet donc une plus grande souplesse de positionnement à ce niveau.

Lorsque l'opérateur définira plusieurs sous-systèmes au sein du système multi-caméras et effectuera plusieurs calibrages afin de l'exploiter, il veillera à laisser des zones de recouvrements suffisantes entre les différents sous-systèmes afin de permettre le recalage dans un même repère des futurs nuages de points 3D. On veillera aussi à ne pas laisser trop d'angle entre les caméras, ce qui pourrait rendre plus difficile les étapes de calibrage et d'appariement.

Les choix de positionnement des caméras dépendent aussi de la façon dont les images seront traitées par la suite. Aussi plusieurs choix de gestion des caméras sont envisageables. Nous présenterons ces choix dans la section suivante 2.4. A noter que cette étape de positionnement pourrait être guidée en utilisant les informations *a priori* dont nous disposons (notamment le modèle CAO de la pièce à inspecter) ; nous en discuterons dans la section 2.5.

## 2.4 Gestion des caméras

Nous disposons d'un système multi-caméras positionné par un expert, afin de numériser des pièces de différentes géométries. En fonction de la géométrie de l'objet à observer mais aussi des choix de l'opérateur quant au positionnement des caméras, plusieurs stratégies de gestion des caméras sont envisageables.

Rappelons que la reconstruction euclidienne d'un objet ou d'une partie d'un objet n'est possible qu'à partir de deux vues calibrées et plus. Les caméras doivent donc au minimum être calibrées par deux, formant ainsi des bancs stéréo.

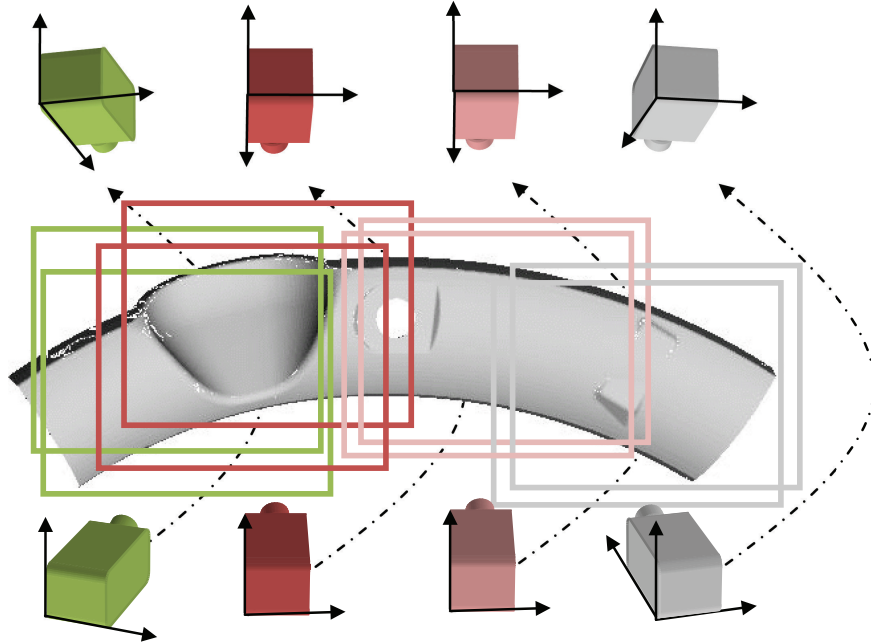


Figure 2. 5- Gestion du système multi caméras par agrégation de bancs stéréo

### 2.4.1 Bancs stéréos recalés

La première stratégie de gestion des caméras sera donc de composer des bancs stéréo (gestion des caméras par paire) afin de numériser les différentes parties de l'objet. La figure 2.5 présente une pièce aéronautique que nous appellerons la banane, visible aussi sur la figure 2.6. Cette pièce mesure environ 160\*50cm et est utilisée plusieurs fois dans ce manuscrit pour illustrer nos propos. C'est une pièce complexe, non plane, possédant une concavité importante (visible sur sa partie gauche) que nous dénommerons « cuvette » par la suite.

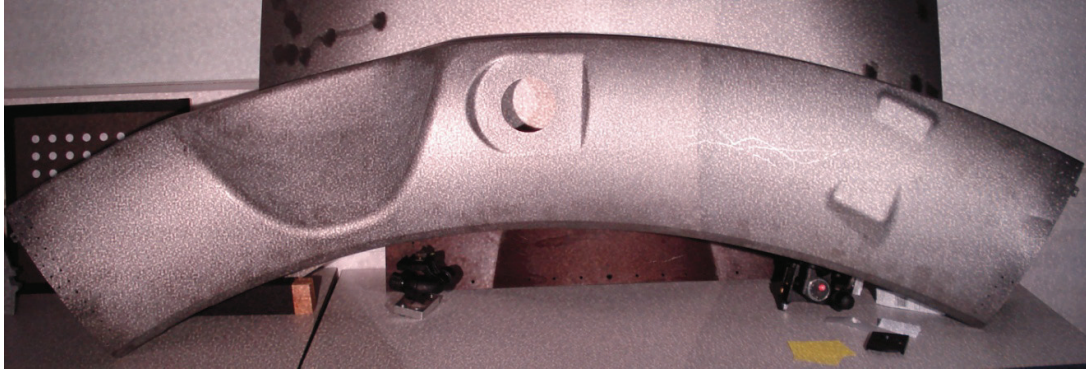


Figure 2. 6- Pièce 'banane' fournie par AIRBUS

Huit caméras ont été positionnées autour et quatre bancs stéréo ont été formés : le banc vert, le banc rouge, le banc rose, et le banc gris (cf. Figure 2.5). Les bancs sont calibrés indépendamment les uns des autres et aucune relation les liant n'est connue avant la numérisation. Les différents bancs stéréo permettront chacun de reconstruire un nuage de points 3D dans un repère différent. Les nuages devront être recalés géométriquement ou de manière photométrique par la suite en utilisant les zones de recouvrement présentes entre les bancs. Nous développerons ce point dans le chapitre 5.

Notons que le banc stéréo vert et le banc stéréo rouge présentent une grande zone de recouvrement. Les quatre caméras formant ces deux bancs stéréos pourraient être calibrées ensemble afin de former ce que l'on appellera par la suite une grappe de caméras, c'est-à-dire un ensemble de plus de deux caméras calibré fortement (fig. 2.7).

#### 2.4.2 Grappes de caméras

La deuxième stratégie de gestion des caméras sera de former des grappes constituées de  $N$  caméras (avec  $N > 2$  et pouvant être pair ou impair). La figure 2.7 présente une grappe de caméras observant la partie gauche de la pièce. Ces quatre caméras ont été calibrées entre elles, c'est-à-dire que leurs paramètres intrinsèques et extrinsèques par rapport à un même référentiel sont connus. La grappe de caméras permettra de reconstruire un seul nuage de point 3D. Les quatre autres caméras de droite (caméras roses et grises) restent dans la même configuration que précédemment, et permettent d'obtenir deux nuages correspondant aux parties qu'elles observent. Comme précédemment, il sera nécessaire de recalibrer les nuages de points 3D provenant de la grappe et des bancs entre eux.

La grappe de caméras rouges que nous avons décidé de créer observe la cuvette, qui est finalement la zone la plus complexe de la pièce. Ce choix n'est bien sûr pas anodin. Avoir plus de deux caméras observant la même partie d'un objet apporte une redondance d'informations qu'il est possible d'utiliser afin d'améliorer la phase d'appariement, ce que nous exposerons dans le chapitre 4, et d'améliorer la phase de reconstruction (chapitre 5).

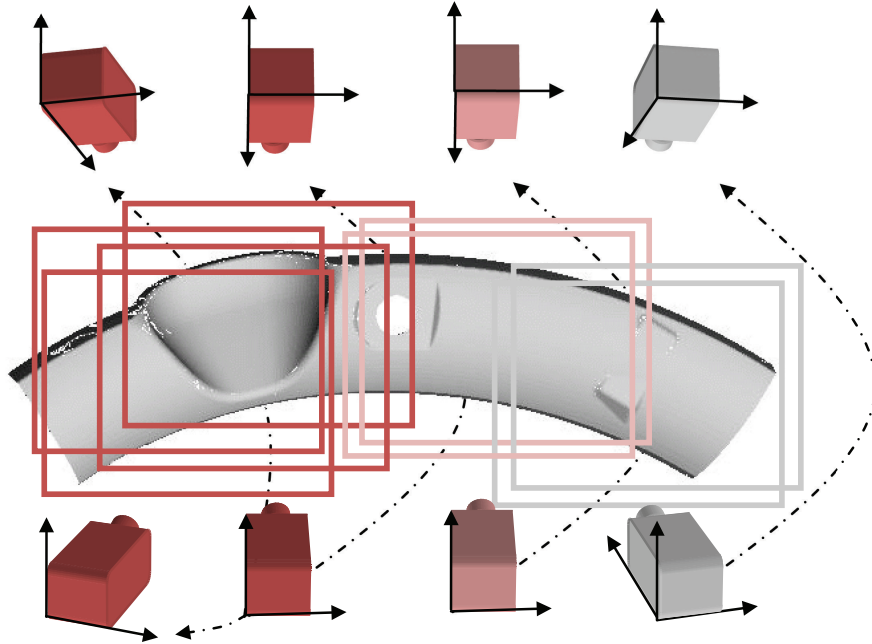


Figure 2. 7- Gestion des caméras par agrégation d'une grappe et de deux bancs stéréo

Il est généralement admis au sein de la communauté vision que l'utilisation de plus de deux caméras lors de la reconstruction d'un objet 3D conduit à un meilleur résultat. Ceci permet en effet d'utiliser une triangulation multi vues puis d'initialiser un algorithme d'ajustement de faisceaux (Triggs et al., 2000) afin d'affiner le résultat. Rappelons qu'un point 3D est perçu par une caméra, sur un rayon (ou faisceau) optique. Vu l'incertitude, ce rayon est en fait un cône. Intuitivement, rajouter des caméras permet de réduire la zone de l'espace 3D dû aux incertitudes de calibrage, de corrélation, dans lequel se trouve le point 3D recherché. Cet espace est défini par l'intersection des cônes d'incertitudes issus de chaque caméra. Il est coloré en gris sur la figure 2.8 en 2D.

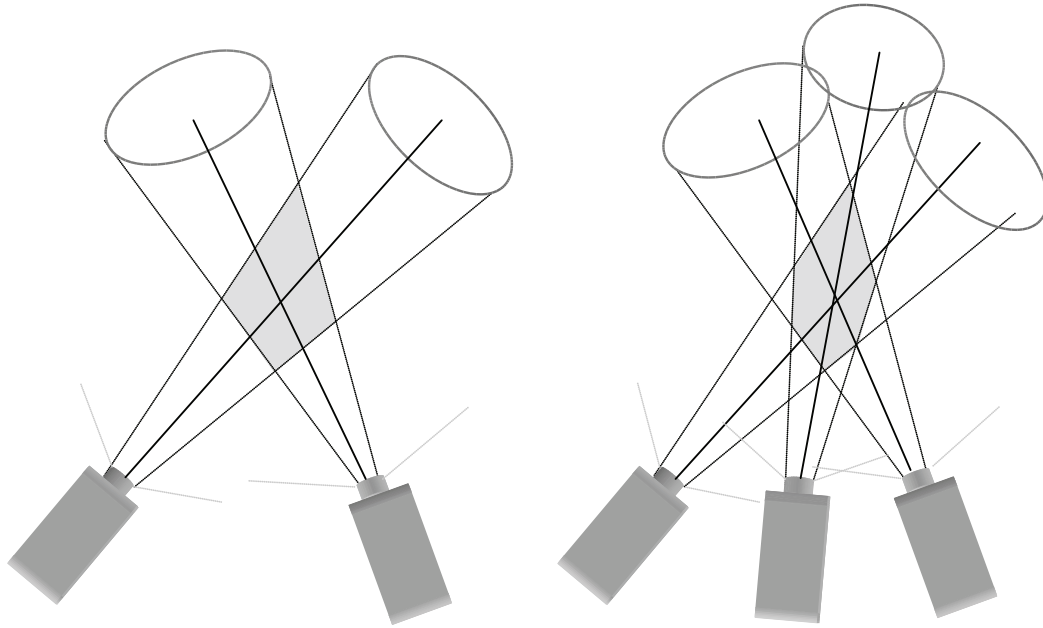


Figure 2. 8- Apport d'une reconstruction multi-caméras : diminution des zones d'incertitude

De plus, disposer d'un plus grand nombre d'appariements avant d'effectuer une reconstruction 3D permet d'écarter ceux qui présentent un caractère aberrant. Nous proposons dans le chapitre 3 un ensemble de critères basés sur différents seuils permettant d'écarter de mauvais appariements.

### 2.4.3 Choix de gestion des caméras

Nous allons aborder quelques points permettant de choisir quelle configuration adopter suivant la pièce observée.

Une des raisons poussant à la création d'une multitude de bancs stéréos est la taille de l'objet observé par rapport au nombre de caméras disponibles. En effet, si l'on souhaite observer une pièce de grande taille dans sa totalité et avec une résolution spatiale suffisante, il est souvent nécessaire de former des bancs stéréos plutôt que des grappes afin d'économiser le nombre de caméras.

Lorsque la taille de la pièce est plus petite et que l'on dispose de suffisamment de caméras, on privilégiera la création de grappes de caméras afin de profiter de la redondance d'informations. Nous avons choisi cette configuration pour nos deux pièces composites (figures 2.9 et 2.10) ainsi que pour nos deux pièces réalisées par formage incrémental (figures 2.11 et 2.12) présentées dans les chapitres suivants.





Figure 2. 9- Pièce composite A fournie par AIRBUS



Figure 2. 10- Pièce composite B fournie par AIRBUS



Figure 2. 11 - Pièce réalisée par formage incrémental à l'ENSM de Besançon

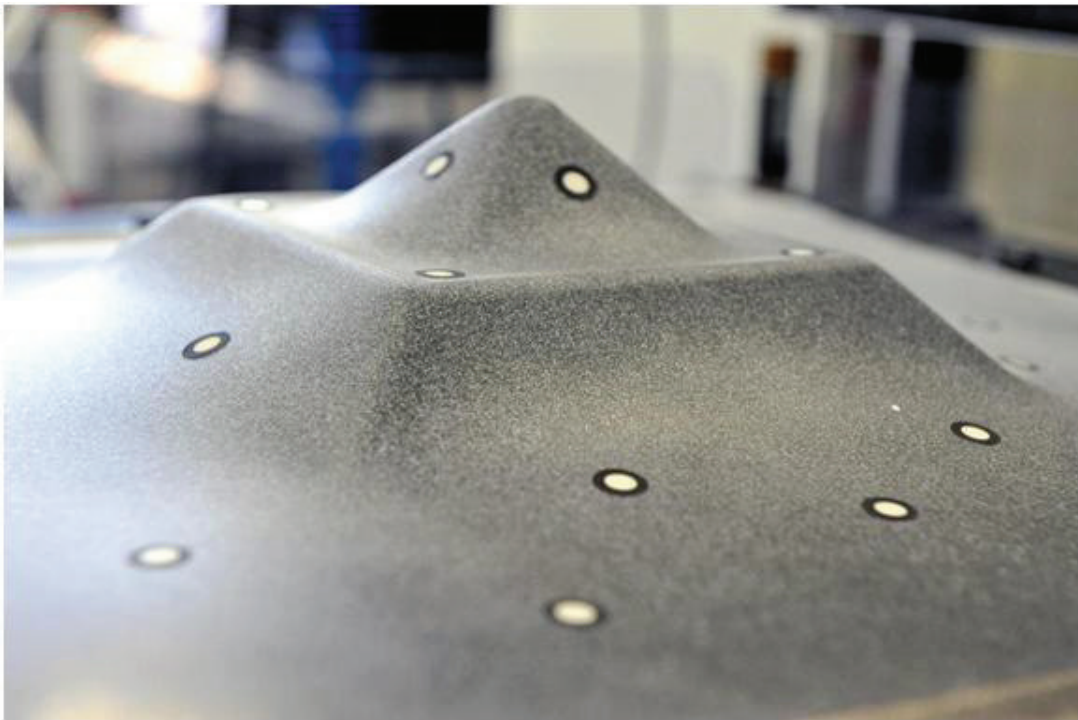


Figure 2. 12- Pièce réalisée par formage incrémental à l'ICA-Albi

A noter cependant qu'une grappe de caméras est souvent plus difficile à calibrer qu'un banc stéréo, tout du moins avec les méthodes du laboratoire basées sur le déplacement et la rotation



dans l'espace d'une mire plane. Il peut être en effet compliqué de bouger correctement la mire dans le champ de vue des caméras composant la grappe, en particulier lorsque certaines caméras sont séparées par un angle important. Une méthode basée sur un objet 1D (Zhang, 2004) tel qu'un bâton équipé de quelques amers (Pribanic, Sturm and Cifrek, 2007) permettrait d'éviter ce désagrément. De nombreux systèmes de motion capture proposent d'ailleurs cette méthode : (MotionAnalysis, 2010) (Vicon, 2010) (Innovision-Systems, 2010).

Tous ces choix nécessitent une connaissance du système, et nécessitent un opérateur 'expert'. Une aide pourrait être tout de même apportée par ce que l'on nommera un module d'assistance au calibrage et à la gestion des caméras. Ce module exploitera la corrélation d'images pour identifier les grappes et les bancs en fonction du pourcentage de recouvrement entre les images. Nous développerons cette partie dans le chapitre 5.

## 2.5 Information a priori

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le cahier des charges apportait plusieurs contraintes sur le système. Mais certaines connaissances peuvent apporter une aide au cours de la phase de numérisation.

- Le modèle CAO de la pièce à numériser est parfois disponible. Son utilisation peut se révéler utile lors du positionnement des caméras, du choix du mouchetis à projeter, de l'appariement, du recalage de nuages 3D, et lors de la détection de défauts.
- Le mouchetis que nous projetons est quant à lui contrôlable dans le sens où nous avons une relative liberté de positionnement des vidéo projecteurs et un total contrôle sur ses caractéristiques (texture, intensité, taille de grain...) car il est généré synthétiquement (Annexe B).

Nous présentons ci-dessous les possibles exploitations du modèle CAO (section 2.5.1) et de la projection de mouchetis (section 2.5.2) lors des étapes de configuration d'un système multi-caméras exploité pour la numérisation d'un objet.

### 2.5.1 Modèle CAO

Quand le modèle CAO est fourni, son utilisation peut s'avérer avantageuse avec quelques précautions. Nous supposons que la pièce que nous souhaitons numériser est relativement proche géométriquement de son modèle CAO, c'est-à-dire qu'elle n'a pas subi de déformations majeures telles que des pliages, ou voilages. Si le modèle réel et le modèle CAO sont trop éloignés, ce dernier ne peut être utilisé.

#### 2.5.1.1 Positionnement des caméras

Nous avons vu que le positionnement des caméras était une étape importante réalisée par l'opérateur seul. Il n'est pas possible de disposer de façon optimale les caméras et les vidéoprojecteurs à moins de connaître la géométrie de la scène et donc d'avoir numérisé la pièce. C'est d'ailleurs ce dont se sert un opérateur dit expert à travers la vision humaine. Il sera plus facile pour un opérateur expert de disposer le système multi-caméras d'une manière optimale, en fonction de la géométrie de la pièce qu'il observe et du comportement des algorithmes qu'il connaît, que pour un opérateur novice. Ce handicap pourrait être comblé via l'utilisation du modèle CAO, qui donne une information sur la géométrie de la pièce avant de

l'avoir numérisée. Il serait ainsi possible de simuler l'expérience et de disposer le système de façon optimale avant d'effectuer la numérisation. Cet outil de simulation pourrait permettre aussi de proposer différentes configurations à l'opérateur en fonction par exemple de l'incertitude de reconstruction ou de la résolution désirées au final. Cette exploitation du modèle CAO sort du contexte de la thèse. Elle peut être traitée comme un problème de planification du 'Next Best View Point' (Restrepo-Specht, 2005).

### 2.5.1.2 Appariement d'images

L'étape d'appariement comme nous le verrons dans le chapitre 3 permet de mettre en correspondance des points 2D de différentes images. Dans le chapitre 4, nous nous servirons du modèle CAO afin de guider la corrélation multi-images. Le modèle nous permettra d'avoir une première estimée initiale de la position des points correspondants dans les images mais nous permettra aussi de détecter et d'écarter les occultations lors de l'étape d'appariement. D'une manière plus générale, le modèle CAO nous permettra de faire le lien entre tous les points correspondants 2D des images et nous permettra d'utiliser efficacement les algorithmes de reconstruction 3D tels que la triangulation multi-caméras et l'ajustement de faisceaux.

### 2.5.1.3 Recalage de nuages de points 3D

Lorsque l'opérateur choisi d'exploiter un système multi-caméras comme un ensemble de bancs stéréos, il est nécessaire de recalibrer les nuages de points 3D, une fois la reconstruction 3D achevée pour chaque système stéréo. Le modèle CAO peut être une bonne référence afin d'effectuer cette étape. Chaque nuage de points 3D peut être recalé au modèle CAO, et ce dans n'importe quel ordre. Les zones de recouvrements entre les nuages peuvent de plus être nulles ou quasi nulles, ce qui simplifie la disposition des caméras. Bien sûr, si la pièce CAO est légèrement différente de la pièce réelle, le recalage ne sera pas satisfaisant. Néanmoins il pourrait être utilisé comme estimée initiale d'un recalage direct par ICP entre les différents nuages.

## 2.5.2 Projection de mouchetis

La projection de mouchetis est effectuée à l'aide d'une source lumineuse permettant d'afficher une texture en niveaux de gris. Nous utilisons pour notre part des rétroprojecteurs ou des vidéoprojecteurs, ces derniers offrant une luminosité et un contraste plus élevés. A noter la combinaison flash diapositive, qui peut aussi faire office de projecteur mais qui nécessite une synchronisation avec les caméras. Cette technique est exploitée par exemple dans plusieurs systèmes (ShapeView, Optinum) déjà présentés dans le chapitre 1. La projection de mouchetis peut nous apporter deux indications utilisables lors de la numérisation. La première doit exploiter la position du ou des projecteurs dans la scène et nécessitera un calibrage même faible de ces derniers. La deuxième concerne le caractère connu du mouchetis.

### 2.5.2.1 Appariement d'images

Projeter du mouchetis ou toute autre source lumineuse sur un objet brillant entraîne irrémédiablement la création d'effets spéculaires. Ces zones où la lumière est saturée sont très gênantes, et il est très difficile d'y appairer avec précision des points. Il serait intéressant de les détecter avant de démarrer la numérisation afin de ne pas biaiser les algorithmes de corrélation. Pour se faire il est nécessaire de connaître la position des projecteurs dans l'espace, et donc de les calibrer un minimum. Il est aussi nécessaire d'avoir une idée de la géométrie de la pièce

observée afin de calculer le chemin de la lumière projetée, de calculer les rebonds sur la pièce et de calculer les reflets présents dans les images.

### 2.5.2.2 Texture

Le mouchetis utilisé est un mouchetis pseudo aléatoire, et sa génération est totalement contrôlée (Annexe B). Il est en effet possible de générer le même mouchetis pour chaque mesure effectuée. Nous pouvons en tirer plusieurs intérêts. Nous connaissons sa fonction mathématique, et pouvons jouer sur ses caractéristiques. Son intensité, ses gradients, sa courbure, sa taille de grain, sa couleur sont autant d'indices qui peuvent à la fois nous donner une idée sur la corrélabilité des images (Lecompte et al., 2006) (Lecompte, 2007) (Pan, 2009) (Hua et al., 2010) ou bien nous permettre de contrôler la projection en fonction de la scène numérisée. Nous pourrions par exemple adapter la forme du mouchetis en fonction de la pente observée afin d'avoir toujours des taches isotropes. Nous pourrions aussi adapter sa taille de grain en fonction de la distance des projecteurs à l'objet afin d'optimiser la phase d'appariement.

## 2.6 Conclusion

Nous avons exposé lors de ce chapitre la problématique multi-caméras. Nous avons fait des rappels sur le modèle de caméra utilisé et sur la géométrie épipolaire. Nous avons ensuite abordé le problème du positionnement des caméras ainsi que la gestion des caméras. Nous avons vu que plusieurs stratégies de gestion d'un système multi-caméras étaient possibles, nous exploiterons ces stratégies dans le chapitre 5. Enfin nous avons exposé quelles pouvaient être les utilisations des informations a priori, une utilisation du modèle CAO étant développée dans le chapitre 4. Nous n'avons pas tiré parti dans cette thèse, de la forme du mouchetis. Dans le chapitre suivant, nous allons présenter la corrélation d'images permettant d'assurer la correspondance entre les points images.

## 2.7 Bibliographie

Deng, Y., Lin, Y., Dai, Q. and Zhang, Z. (2010) 'Depth maps for multi-view stereo via matrix completion', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*.

Faugeras, O. (1993) 'Three dimensional computer vision :A geometric viewpoint', *The MIT press*, ISBN 0-262-06158-9.

Faugeras, O. and Keriven, R. (1998) 'Variational principles, surface, PDE's, level set methods, and the stereo problem', *IEEE Transaction on Image Processing*, pp. 336-344.

Furukawa, Y. (2008) 'High-fidelity image-based modeling', *Thèse de doctorat, University of Illinois*.

Garcia, D. (2001) 'Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images', *Thèse de doctorat, Ecole Mines Albi*.

Hartley, R. and Zisserman, A. (2004) 'Multiple View Geometry', *Cambridge University Press*, ISBN 0-521-54051-8.

- Horaud, R. and Monga, O. (1995) 'Vision par ordinateur : outils fondamentaux', *Hermès, ISBN 2866014812*.
- Hua, T., Xie, H., Simon, W., Zhenxing, H., Pengwan, C. and Qinqming, Z. (2010) 'Evaluation of the quality of a speckle pattern in digital image correlation method by mean subset fluctuation', *Optics and Laser Technology*.
- Innovision-Systems (2010) '<http://www.innovision-systems.com>'.
- Lavest, J.-M., Viala, M. and Dhome, M. (1998) 'Do We Really Need an Accurate Calibration Pattern to Achieve a Reliable Camera Calibration?', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1406, pp. 158-174.
- Lecompte, D. (2007) 'Elastic and elasto-plastic material parameter identification by inverse modeling of static tests using digital image correlation', *Thèse de doctorat, Université de Bruxelles*.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hermelrijck, D. and A.M, H. (2006) 'Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation', *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 1132-1145.
- Martinec, D. (2008) 'Robust Multiview Reconstruction', *Thèse de doctorat, University of Prag*.
- MotionAnalysis (2010) '<http://www.motionanalysis.com>'.
- Pan, B. (2009) 'Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement', *Applied Optics*, pp. 1535-1542.
- Pons, J.-P., Keriven, R. and Faugeras, O. (2005) 'Modelling dynamic scenes by registering multi-view image sequences', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 822-827.
- Pribanic, T., Sturm, P. and Cifrek, M. (2007) 'Calibration of 3D kinematic systems using orthogonality constraints', *Machine Vision and Applications*, pp. 367-381.
- Restrepo-Specht, J.A. (2005) 'Modélisation d'objets 3D par construction incrémentale d'un maillage triangulaire, dans un contexte robotique', *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse*.
- Seitz, S., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. and Szeliski, R. (2006) 'A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 519-526.
- Seitz, S.M. and Dyer, C.M. (1999) 'Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring', *International Journal of Computer Vision*, pp. 1-23.
- Slabaugh, G., Culbertson, B., Malzbender, T. and Stevens, M. (2004) 'Methods for volumetric reconstruction of visual scenes', *International Journal of Computer Vision*, pp. 179-199.

Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R.I. and Fitzgibbon, A.W. (2000) 'Bundle adjustment - A modern synthesis', *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 298-372.

Vicon (2010) '<http://www.vicon.com>'.

Zach, C. (2008) 'Fast and high quality fusion of depth maps', *3D Data Processing, Visualization and Transmission*.

Zhang, Z. (2000) 'A flexible new technique for camera calibration', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 1330-1334.

Zhang, Z. (2004) 'Camera calibration with one dimensional objects', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 892-899.

## 3. Corrélation d'images

---

La corrélation d'images est une technique issue de la communauté vision qui trouve aujourd'hui sa place dans de nombreuses applications industrielles et académiques (Lucas and Kanade, 1981) (Sutton et al., 1983). Elle est utilisée aussi bien pour reconstruire en 3D une scène, que pour suivre des points à travers une séquence d'images, ou encore pour détecter le mouvement d'une personne ou d'un objet. La corrélation d'images est avant tout une méthode de mise en correspondance de pixels qui permet d'associer à tout ou partie des pixels d'une image, leurs correspondants dans une ou plusieurs images. Les points ainsi appariés sont les projections d'un même point 3D sur les plans images des caméras. La différence entre les coordonnées pixels d'un point image 2D et celles de son correspondant est généralement appelée la disparité. L'ensemble des différences de tous les pixels forme une carte de disparité. La mise en œuvre de la corrélation d'images se résume souvent à estimer la carte de disparité représentant la scène observée.

Ce n'est bien sûr pas la seule méthode de mise en correspondance, mais c'est celle qui a été retenue dans le cadre de la thèse pour deux raisons : (1) elle fait partie du cahier des charges du projet industriel lié à cette thèse, (2) elle permet d'obtenir une carte dense d'appariements et donc par la suite un nuage dense de points 3D. Les autres méthodes d'appariements comprennent l'appariement de primitives (lignes, cercles, motifs connus...), les méthodes de flot optique (Horn and Schunck, 1981), (Brox et al., 2004), les méthodes basées sur l'extraction d'amers particuliers et sur la création de descripteurs attachés à des points invariants (Lowe, 2004) (Bay et al., 2008).

La corrélation d'images exploite la valeur des niveaux de gris des pixels des images, et nécessite des scènes présentant une texture avec de forts contrastes pour aboutir à de bons résultats. Quand les objets à numériser présentent une texture uniforme, on essaye généralement de leur rajouter une texture adaptée à la corrélation d'images pour améliorer la performance des algorithmes. Ceci peut être fait entre autres, par apport de pastilles autocollantes (idéal pour la détection de primitives) ou ajout de peinture de type mouchetis (idéal pour la corrélation d'images). Une autre solution consiste à projeter des motifs lumineux, qui peuvent être codés (lumière structurée) ou aléatoires. La lumière structurée a fait l'objet de nombreuses publications ces dernières années car elle permet d'effectuer la mise en correspondance de primitives rapidement et donne de bons résultats. Pour plus d'approfondissements, (Salvi, Pagès and Batle, 2004) présentent différentes stratégies concernant le codage de la lumière structurée. Les motifs lumineux aléatoires sont quant à eux moins répandus. Ils sont basés sur une fonction de bruit telle que la fonction bruit de Perlin, ou la fonction bruit 'Simplex noise' (Gustavson, 2005) (Perlin, 2001) ou bien une fonction de bruit blanc gaussien. Ils permettent d'apporter une texture aléatoire sur l'intégralité de l'objet et de ce fait sont particulièrement bien adaptés à la corrélation d'images. Contrairement aux motifs lumineux, ils ne sont pas directement liés à cette dernière, les algorithmes de corrélation restent les mêmes quel que soit le motif projeté.



Plusieurs états de l'art issus de la communauté de vision par ordinateur présentent les méthodes de corrélation d'images existantes, et se proposent de les classifier et de les comparer. Les travaux menés par (Scharstein and Szeliski, 2002), proposent de comparer différents algorithmes de corrélation d'images stéréoscopiques à partir de plusieurs banques d'images dont la vérité terrain est connue. Ces travaux, ainsi que ceux de (Brown, Burschka and Hager, 2003), (Chambon, 2005) classifient les algorithmes selon différents critères, à savoir leur fonction de similarité, leur mode de fonctionnement, leur gestion des occultations etc. Nous n'allons pas présenter de nouveau tous ces critères, nous expliquerons seulement ceux liés à la structure et à la compréhension de ce chapitre.

### Critère de similarité

Nous avons dit que la corrélation d'images permettait d'associer à un pixel d'une image des pixels correspondants appartenant à d'autres images acquises sur la même scène. Cette opération est effectuée à l'aide d'une fonction de similarité, appelée encore fonction de corrélation, ou encore critère de corrélation que l'on cherche à minimiser. Cette fonction considère généralement une fenêtre de pixels plutôt qu'un seul pixel et exploite un voisinage centré autour du pixel à appairer. Elle fournit une mesure de similitude appelée score de corrélation qui permet d'évaluer *a posteriori* la qualité de l'appariement.

Nous présenterons les différents critères de corrélation que nous avons utilisés dans cette thèse dans la section 3.1. Lorsqu'une précision sub-pixel est recherchée, la fonction de corrélation peut être associée à un modèle de déformation de fenêtre, aussi appelé transformation de fenêtre. Celui-ci permet de modéliser la distorsion projective subie par la fenêtre courante entre les images acquises depuis deux points de vue différents. L'introduction d'un modèle de transformation implique la détermination des paramètres de ce modèle par optimisation. Nous présenterons les transformations utilisées dans la section 3.2 et l'optimisation du critère dans la section 3.3. Cette façon d'obtenir une précision sous pixel est généralement appelée corrélation fine d'images. Elle est utilisée aussi bien en vision par ordinateur, qu'en mécanique expérimentale (Sutton et al., 1983) (Devernavy, 1997) (Garcia, 2001) (Wang and Cuitino, 2002).

La corrélation fine d'images a fait l'objet d'une étude réalisée par le groupe de travail GR2519 – Mesures de champs et identification en mécanique des solides<sup>1</sup>, visant à étudier le comportement des algorithmes de corrélation fine d'images pour des applications de mesure de champs de déplacements. Une banque d'images synthétiques fournissant une vérité terrain connue (Orteu et al., 2006) (Bornert et al., 2009) a été créée dans ce but (Annexe A). Nous nous appuyons sur ces images pour évaluer nos algorithmes plusieurs fois dans ce chapitre et en particulier dans la section 3.8.

### Mode de fonctionnement

Nous allons expliciter maintenant ce que nous appelons le mode de fonctionnement de la corrélation d'images. Deux modes sont habituellement décrits dans les études citées ci-dessus, à savoir l'un reposant sur une approche globale et l'autre reposant sur une approche locale de résolution du problème de corrélation. Nous avons choisi de tester les deux approches dans

---

<sup>1</sup> GDR2519 : <http://www.ifma.fr/lami/gdr2519>

notre application et en donnons ici un aperçu. Nous présentons plus en détail une méthode locale et une méthode globale dans les sections 3.6 et 3.7 respectivement.

### Approches globales

Nous distinguerons deux types d'approches dites globales. La première est liée à la minimisation par optimisation globale du problème de mise en correspondance. La deuxième est liée à la modélisation globale de la transformation entre les images.

Le premier type d'approches globales tient son nom de l'optimisation globale de la fonction coût qu'elles tentent de minimiser. Cette fonction coût représente une énergie associée à l'ensemble des pixels de l'image et s'écrit généralement :

$$E_{global} = (1 - \lambda)E_{local} + \lambda E_{contraintes}$$

Avec  $\lambda$  permettant de gérer la pondération entre les deux termes,  $E_{local}$  étant le score résultat de la fonction de similarité, et  $E_{contraintes}$  permettant d'intégrer des contraintes telle que la discontinuité ou les occultations dans les images. Les méthodes globales rencontrent un succès grandissant ces dernières années pour plusieurs raisons. Une première, plutôt technique, est directement liée à la puissance des ordinateurs qui permet maintenant de les utiliser à des vitesses convenables et donc dans un grand nombre d'applications. La seconde se rapporte aux avantages d'une résolution globale du problème de mise en correspondance. En effet, ces méthodes permettent :

- D'apporter une cohérence globale des appariements
- De gérer facilement les occultations et les discontinuités
- De générer une carte dense de disparité

Ces méthodes possèdent aussi des inconvénients. Elles reposent sur la contrainte épipolaire et nécessitent que les images soient rectifiées (Bugarin et al., 2010). La rectification est un problème résolu en vision par ordinateur mais néanmoins délicat. En effet, le fait de redresser les images entraîne dans tous les cas un biais qui peut s'il est important augmenter l'incertitude de reconstruction. La seconde contrainte est que les cartes de disparités obtenues sont généralement au pixel près. Hors la précision recherchée dans notre application est supérieure, et il est nécessaire d'obtenir des appariements à la précision sub-pixel. L'affinement de la corrélation se fait *a posteriori*, ce qui entraîne une étape supplémentaire qui n'est pas forcément présente dans les approches locales décrites dans la section suivante. De nombreux algorithmes sont utilisés dans le but de résoudre cette formulation globale du problème de corrélation : les coupures de graphe (Boykov, Veksler and Zabih, 1999) (Kolmogorov and Zabih, 2001), la programmation dynamique (Criminisi et al., 2003) (Leung, 2006) (Wang et al., 2006), la propagation de croyance (Felzenszwalb and Huttenlocher, 2006) (Klaus, Sormann and Karner, 2006) (Yang et al., 2009),...

Nous présenterons une méthode fondée sur la programmation dynamique que nous avons implémentée, dans la section 3.6.

Le deuxième type d'algorithmes dit globaux consiste à utiliser une transformation non rigide pour déformer l'image de référence. (Rueckert et al., 1999) utilisent une transformation de type 'Free Form Deformation'. (Hild and Roux, 2006) (Réthoré, Hild and Roux, 2008) utilisent un

maillage élément fini. Comme pour l'approche précédente un coût supplémentaire associé au modèle de la transformation est ajouté au coût de similarité. Ces méthodes sont généralement résolues par optimisation locale du critère. Elles ne sont pas bien adaptées à des scènes complexes, et sont d'ailleurs principalement utilisées pour recalibrer des images entre elles (Rohlfing et al., 2003), pour suivre des objets ou bien observer la déformation d'un matériau (Bornert, Orteu and Roux, A paraître).

### Approches locales

Les approches locales ont la particularité de calculer un critère de similarité sans tenir compte des résultats environnants. Elles reposent sur un calcul de la transformation sur chaque fenêtre de corrélation de façon indépendante. A l'origine, ces méthodes étaient implémentées par 'force brute', c'est-à-dire qu'elles testaient tous les correspondants possibles afin de trouver le minimum de la fonction de corrélation. Ce type d'approche est généralement coûteux en temps de calcul, et quelques améliorations sont possibles. Quand la géométrie de la scène est connue, une réduction de l'espace de recherche est possible en s'appuyant sur la contrainte épipolaire. Une autre amélioration consiste à utiliser une pyramide d'images sous-échantillonnées. Cette dernière permet d'accroître la vitesse de calcul en sous échantillonnant la première image un certain nombre de fois, et en remontant un niveau de la pyramide à la fin de chaque corrélation.

Une autre méthode dite locale est ce que l'on appelle la corrélation par propagation de germe. Cette méthode se base sur un ou plusieurs points appelés germes et permet d'obtenir une carte d'appariements dense ou clairsemée de la scène observée. La corrélation se fait par expansion d'une zone constituée de pixels autour d'un point initial.

Nous avons implémenté cette méthode et la décrivons plus amplement dans la section 3.7.

## 3.1 Critères de corrélation

Afin de mesurer la similarité entre deux zones appartenant à deux images, on utilise différentes fonctions bien connues en vision par ordinateur. La zone sur laquelle la mesure est effectuée est généralement appelée fenêtre de corrélation. Une fenêtre de corrélation d'une image de référence  $T$  est comparée à une fenêtre de corrélation d'une image  $D$ . La fenêtre est composée d'un ensemble  $j$  de pixels centrés autour du centre  $j_0$  de la fenêtre. Nous ne ferons pas une présentation exhaustive des critères existants, voir (Chambon, 2005) pour une liste plus complète. Nous présenterons ceux utilisés au cours de ce mémoire.

### 3.1.1 Critère ZNCC (Zero Mean Normalized Cross Correlation)

Les critères basés sur la Cross Correlation font partie des plus utilisés en vision par ordinateur en raison de leur robustesse et de leur rapidité. ZNCC est une fonction qui mesure la similarité entre deux régions différentes. Ce critère est relativement insensible aux différences d'illuminations entre les images. Soit  $T(j)$  l'intensité du pixel  $j$  dans l'image  $T$ . Soit  $\overline{T(j)}$  l'intensité moyenne des intensités des pixels  $j$  de la fenêtre courante. Les mêmes notations s'appliquent pour  $D(j)$  et  $\overline{D(j)}$ . La valeur  $d(d_x, d_y)$  appelée aussi disparité ou déplacement, représente la différence entre les coordonnées du centre de la fenêtre de corrélation de l'image de référence  $T$  et les coordonnées du centre de la fenêtre de l'image déformée  $D$ . Le critère ZNCC s'écrit :

$$ZNCC(j, d) = \frac{cov(T(j), D(j + d))}{\sqrt{var(T(j))var(D(j + d))}} \quad (3.1)$$

Avec

$$cov(T, D) = \sum_j (T(j) - \overline{T(j)})(D(j + d) - \overline{D(j + d)}) \quad (3.2)$$

$$var(T) = \sum_j (T(j) - \overline{T(j)})^2 \quad (3.3)$$

$$var(D) = \sum_j (D(j + d) - \overline{D(j + d)})^2 \quad (3.4)$$

Cette écriture du critère n'est pas optimale. Nous utilisons la version simplifiée du critère (Leung, 2006), avec  $N$  nombre de pixels de la fenêtre :

$$cov(T, D) = \sum_j (T(j)D(j + d)) - (NT(j)\overline{D(j + d)}) \quad (3.5)$$

$$var(T) = \sum_j (T(j))^2 - NT(j)^2 \quad (3.6)$$

$$var(D) = \sum_j (D(j + d))^2 - ND(j + d)^2 \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Critère SAD (Sum of Absolute Differences) – Norme L1

Le critère SAD, bien que moins robuste que le précédent est nettement moins coûteux en temps de calcul. Il correspond à la norme  $L1$  et est défini par :

$$SAD(j) = \sum_j |T(j) - D(j + d)| \quad (3.8)$$

### 3.1.3 Critère SSD (Sum of Squared Differences) – Norme L2

Le critère SSD correspond à la norme  $L2$ , et est définie par:

$$SSD(j) = \sum_j (T(j) - D(j + d))^2 \quad (3.9)$$

Nous utilisons la version normalisée de ce dernier critère lors de la corrélation fine :

$$NSSD(j) = \sum_j \left( \frac{T(j)}{\sqrt{\sum_j (T(j))^2}} - \frac{D(j + d)}{\sqrt{\sum_j (D(j + d))^2}} \right)^2 \quad (3.10)$$

### 3.2 Transformations de fenêtre

Comme nous l'avons dit, la corrélation fine d'images nécessite le choix d'un modèle de déformation de la fenêtre de corrélation. Nous séparerons les méthodes dites 'classiques', c'est-à-dire n'utilisant pas d'informations connues de la scène observée, des méthodes dites '3D' tirant partie de ces dernières.

En prenant comme critère de corrélation la norme  $L_2$  présentée précédemment, le modèle de transformation général est introduit comme ceci :

$$\sum_j (T(j) - D(W(j;p)))^2$$

avec  $W$  la transformation appliquée aux pixels  $j$  en fonction des paramètres  $p$ . Il existe une transformation  $W$  pouvant être différente pour chaque fenêtre de corrélation. La figure 3.1 présente plusieurs fenêtres de corrélation (en bleu) dans l'image référence  $T$  et leurs fenêtres correspondantes (en jaune) dans l'image  $D$ .

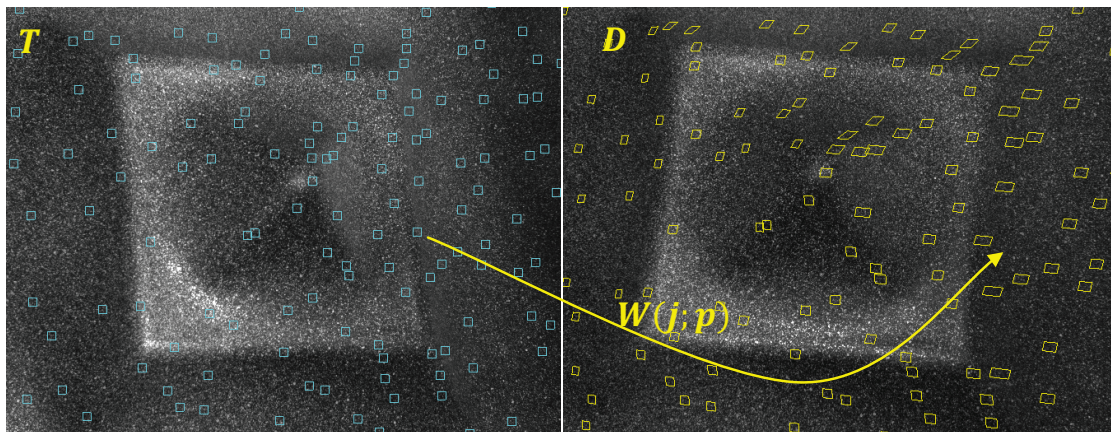


Figure 3.1- Modèle de transformation de fenêtre appliqué à différentes fenêtres de corrélation

#### 3.2.1 Méthodes classiques

Les méthodes classiques sont des modèles de transformation de fenêtre ne faisant pas intervenir explicitement d'informations sur la structure de la scène. (Lucas and Kanade, 1981) ont introduit un modèle affine ou homographique pour représenter la transformation. En mécanique expérimentale, où l'on s'intéresse à la mesure de champs de déplacements et de déformations, on parlera plus volontiers de développement de Taylor à l'ordre  $n$  au voisinage du centre de la fenêtre (Sutton et al., 1983), (Wang and Cuitino, 2002) (Sutton, Orteu and Schreier, 2009). La translation est ainsi une transformation d'ordre 0, le modèle affine d'ordre 1. D'autres transformations d'ordre supérieur peuvent également être utilisées (Lu and Cary, 2000), (Lu and Ganesan, 2002). Nous n'avons pas implémenté ces transformations d'ordre supérieur du fait qu'elles modélisent surtout une déformation de l'objet et non une déformation projective due à un changement de point de vue d'observation.

##### 3.2.1.1 Translation

La translation est définie par deux paramètres  $(d_x, d_y)$  représentant aussi la disparité et s'écrit :

$$W(j; p) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_x \\ j_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Avec :

$$p = [d_x \quad d_y]^t \quad (3.12)$$

Cette formulation revient à effectuer l'opération  $j + d$  comme dans l'équation (3.9).

### 3.2.1.2 Transformation affine

La translation affine est définie par six paramètres. C'est une transformation linéaire qui correspond au développement de Taylor au voisinage du centre  $j_0$  de la fenêtre :

$$j' = j_0 + (A + I)(j - j_0) + d \quad (3.13)$$

Sous forme matricielle :

$$j' = (A + I)j - Aj_0 + d \quad (3.14)$$

$$W(j; p) = \begin{bmatrix} a_1 + 1 & a_2 & -a_1 * j_{0x} - a_2 * j_{0y} + d_x \\ a_3 & a_4 + 1 & -a_3 * j_{0x} - a_4 * j_{0y} + d_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_x \\ j_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

avec :

$$p = [d_x \quad d_y \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4]^t \quad (3.16)$$

### 3.2.1.3 Homographie

L'homographie est une transformation non linéaire permettant de modéliser la déformation projective entre deux fenêtres dans deux images. Cette transformation peut être exprimée de deux façons ; liées à l'utilisation ou non de la structure de la scène. Dans le cas où l'homographie ne tire partie d'aucune information 3D, nous l'avons classifiée comme transformation 2D et décrite ci-dessous. Elle est définie par huit paramètres :

$$W(j; p) = \begin{bmatrix} a_1 + 1 & a_2 & -a_1 * j_{0x} - a_2 * j_{0y} + d_x \\ a_3 & a_4 + 1 & -a_3 * j_{0x} - a_4 * j_{0y} + d_y \\ b_1 & b_2 & -b_1 * j_{0x} - b_2 * j_{0y} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_x \\ j_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

avec :

$$p = [d_x \quad d_y \quad a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad b_1 \quad b_2]^t \quad (3.18)$$

## 3.2.2 Méthodes 3D

Les méthodes dites '3D' introduisent dans leur modélisation des informations relatives à la structure de la scène. (Okutomi, 1993) modélisent la transformation entre l'image gauche et l'image droite grâce à la profondeur  $z$  associée à la disparité. Les caméras sont alignées sur le même axe  $x$ , et les images rectifiées. (Habbecke and Kobbelt, 2006) utilisent une homographie induite par le plan 3D (trois paramètres). (Furukawa and Ponce, 2007) modélisent la transformation par des patches associés à leur normale. Enfin (Xu and Roy-Chowdhury, 2008),

utilisent une transformation exprimée par la position et l'orientation d'une surface 3D (six paramètres). Ces méthodes, en plus de s'appuyer sur la structure de la scène, peuvent permettre d'effectuer les étapes de corrélation et de reconstruction en une seule passe.

### 3.2.2.1 Relation entre deux points 2D

Soit une caméra  $i$ , sa matrice de projection associée, de dimension 3x4 est exprimée par :

$$M_i = K_i[R_i|t_i] \quad (3.19)$$

La relation entre un point 3D  $\tilde{P} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}$  et un point 2D  $\tilde{J}_i = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$  en coordonnées homogènes s'écrit :

$$\begin{pmatrix} sx' \\ sy' \\ s \end{pmatrix} = M_i \tilde{P} \quad (3.20)$$

$$\tilde{J}_i = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Avec  $s$ , la profondeur du point dans le repère caméra.

Nous choisissons pour la suite que le repère monde et le repère de la caméra 0 sont confondus. On a donc :

$$M_0 = K_0[I|0] = K_0 \quad (3.22)$$

La relation entre un point 2D  $\tilde{J}_0$  de la caméra 0 et un point 3D  $P$  s'écrit :

$$P = K_0^{-1} \tilde{J}_0 Z \quad (3.23)$$

En introduisant l'équation (3.23) dans (3.20), un point 3D projeté dans la caméra 1 peut s'écrire :

$$\tilde{J}_1 = K_1[R_1|t_1][K_0^{-1} \tilde{J}_0 Z | 1]^t \quad (3.24)$$

Cette formulation revient à déterminer l'inconnue  $Z$  en utilisant la structure de la scène. Ce problème est équivalent à déterminer la disparité le long de la droite épipolaire. Sur le même principe, nous allons introduire l'homographie induite d'un plan, qui tire partie de la structure de la scène.

### 3.2.2.2 Transformation 3D, intersection et homographie

L'équation d'un plan peut être déterminée à partir de trois points de l'espace. Ceux-ci seront modélisés à partir de la projection de trois pixels de la fenêtre, à savoir le centre  $J_0$ , ainsi que deux coins de la fenêtre (fig. 3.2). Le point 3D  $P$  issu du centre est décrit par l'équation (3.23) et est associé au paramètre  $Z$ . De manière analogue, nous définissons deux points  $P_1$  et  $P_2$  associés aux paramètres  $\Delta Z_1$  et  $\Delta Z_2$  de sorte que :

$$P_i = K_0^{-1} \tilde{J}_i (Z + \Delta Z_i) \quad (3.25)$$

A partir des trois points  $P, P_1$  et  $P_2$ , nous calculons le plan induit.

L'équation du plan est donnée par :

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.26)$$

Avec :

$$[A \ B \ C]^t = [P_1 - P]_{\times} [P_2 - P]^t \quad (3.27)$$

Et :

$$D = -([P_1 - P]_{\times} [P_2 - P]^t \cdot P) \quad (3.28)$$

Un point 3D  $\tilde{P}_i$  représentant l'intersection entre le plan et un rayon issu du centre optique de la caméra 0 et passant par un pixel  $\tilde{j}_i$  de la fenêtre s'écrit :

$$\tilde{P}_i = \begin{bmatrix} -D & 0 & 0 \\ 0 & -D & 0 \\ 0 & 0 & -D \\ A & B & C \end{bmatrix} K_0^{-1} \tilde{j}_i \quad (3.29)$$

Les coordonnées des pixels correspondants sont alors calculées comme précédemment en utilisant l'équation (3.20). La transformation permettant de passer d'un point  $j_0$  à un point  $j_1$  s'écrit sous la forme d'une homographie induite du plan.

$$W(\cdot; p) = K_1 [R_1 | t_1] \begin{bmatrix} -D & 0 & 0 \\ 0 & -D & 0 \\ 0 & 0 & -D \\ A & B & C \end{bmatrix} K_0^{-1} \quad (3.30)$$

Avec

$$p = [Z \ \Delta Z_1 \ \Delta Z_2]^t \quad (3.31)$$



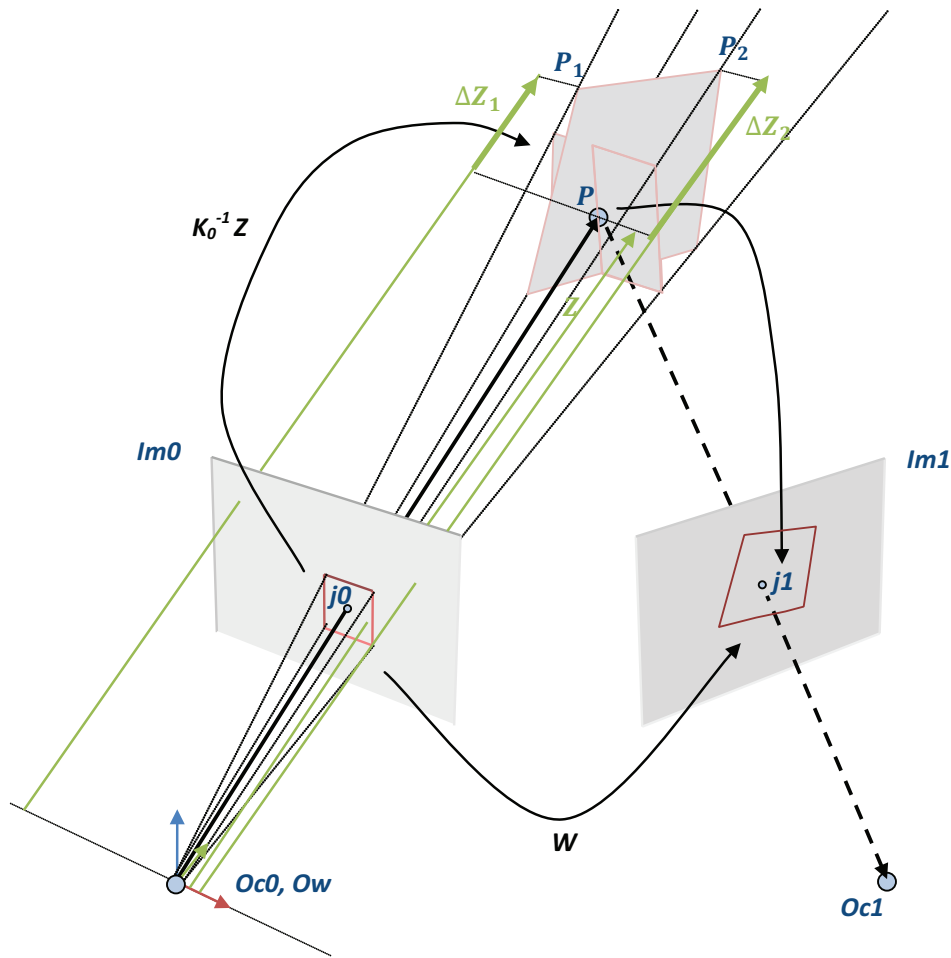


Figure 3. 2- Représentation de l'homographie induite d'un plan. Les trois paramètres définissant le plan sont  $Z, \Delta Z_1$ , et  $\Delta Z_2$

### 3.2.2.3 Distorsions

Nous remarquons que ce modèle de déformation de fenêtre cherche un point 3D fonction de  $Z$  sur le rayon issu de la caméra 0. Le plan formé par le centre optique de la caméra 0, le centre optique de la caméra 1 et le point 3D est le plan épipolaire. Ce critère applique donc fortement la contrainte épipolaire, et celle-ci n'est jamais violée. Notons qu'en présence de distorsions, la contrainte  $j_1^t F j_0 = 0$  peut ne pas être valide. Le modèle précédent ne prenant pas en compte les distorsions, et forçant le respect de la contrainte épipolaire, la mise en correspondance de deux pixels distordus n'est pas garantie. Il est donc nécessaire de modéliser les distorsions dans les équations (3.24) et (3.30) afin d'assurer le fonctionnement du critère. Pour la première équation il suffit d'appliquer le modèle de distorsions choisi. Pour la seconde, il est nécessaire d'inverser le modèle, ce qui peut être fait par résolution d'un polynôme de degrés 7 (lors de distorsions radiales), ou bien itérativement par résolution aux moindres carrés (Garcia, 2001).

### 3.3 Corrélation sub pixel

Dans notre application, il est nécessaire d'avoir une précision accrue lors de la phase de mise en correspondance afin de ne pas répercuter les erreurs d'appariements sur la reconstruction 3D. C'est l'étape d'affinage des résultats. Nous avons vu qu'elle peut être effectuée a posteriori ou lors de la corrélation. Il existe plusieurs méthodes pour arriver à une précision sub pixel. La première utilise une interpolation des scores de corrélation. La seconde considère l'image comme une fonction continue de niveau de gris et utilise une interpolation des niveaux de gris lors de la minimisation du critère de corrélation. Cette minimisation est effectuée par des méthodes de descente de gradient.

#### 3.3.1 Optimisation du critère

Les paramètres du modèle de fenêtre sont déterminés par optimisation. Nous avons implémenté deux méthodes couramment utilisées en vision par ordinateur aussi bien en recalage d'images, qu'en suivi de points, qu'en détection de mouvements. La première est l'algorithme de (Lucas and Kanade, 1981) qui est une approche additive de la minimisation par descente de gradient d'un moindre carré. La deuxième est issue de (Baker and Matthews, 2004) et propose une approche compositionnelle de la minimisation aux moindres carrés.

Soit une image référence  $T$  et une image  $D$  ayant subi une déformation projective ou autre. Quelle que soit la méthode, le critère à minimiser est exprimé par :

$$\sum_j (T(j) - D(W(j; p)))^2 \quad (3.32)$$

avec  $j$  l'ensemble des pixels de la fenêtre de corrélation.

##### 3.3.1.1 Approche additive

Le fait d'appliquer une transformation aux points de l'image  $D$  implique d'interpoler cette dernière. La minimisation de l'équation (3.32) est non linéaire même si la fonction  $W$  est linéaire en  $p$ , du fait de la non-linéarité de l'intensité de l'image  $D$ . L'algorithme de (Lucas and Kanade, 1981) considère donc que les paramètres initiaux  $p$  sont connus et tente de résoudre l'équation (3.32) sur un incrément  $\Delta p$ . L'expression (3.32) devient :

$$\sum_j (T(j) - D(W(j; p + \Delta p)))^2 \quad (3.33)$$

et sa règle de mise à jour :

$$p \leftarrow p + \Delta p \quad (3.34)$$

L'approche additive doit son nom à la règle de mise à jour qui ne fait qu'additionner les paramètres courants  $p$  avec un incrément  $\Delta p$ .

##### 3.3.1.1.1 Dérivation de l'algorithme

L'expression non-linéaire (3.33) est d'abord linéarisée par un développement de Taylor du premier ordre au voisinage de  $p$ .

$$\sum_j \left( T(j) - D(W(j; p)) - \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p \right)^2 \quad (3.35)$$

$\nabla D$  exprime le gradient de l'image  $D$  évalué en  $W(j; p)$ .

$\frac{\partial W}{\partial p}$  exprime la matrice Jacobienne de la transformation de fenêtre.

La dérivée de l'expression (3.35) en fonction de  $\Delta p$  est donnée par :

$$\sum_j \left[ \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ T(j) - D(W(j; p)) - \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p \right] \quad (3.36)$$

En imposant que l'expression (3.36) soit nulle, on obtient l'expression de  $\Delta p$  :

$$\Delta p = - \left[ \sum_j \left[ \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \right] \right]^{-1} \sum_j \left[ \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t [D(W(j; p)) - T(j)] \quad (3.37)$$

Dans une telle approche, de nombreux auteurs ont souligné que le calcul des dérivées de la fonction coût et de l'inverse de la matrice Hessienne était très lourd. (Baker and Matthews, 2004) ont proposé une reformulation du problème permettant le pré calcul de ces éléments et accélérant ainsi les temps de calcul.

### 3.3.1.2 Approche par composition inverse

L'équation à minimiser (3.32) n'est plus résolue en cherchant un incrément  $\Delta p$ . Une transformation  $W(j; \Delta p)$  est maintenant calculée afin de déterminer les nouvelles valeurs de  $p$ . L'expression (3.32) devient donc :

$$\sum_j \left( T(W(j; \Delta p)) - D(W(j; p)) \right)^2 \quad (3.38)$$

et sa règle de mise à jour :

$$W(., p) \leftarrow W(., p) \circ W(., \Delta p)^{-1} \quad (3.39)$$

A noter que cette formulation implique que la transformation  $W$  soit inversible.

#### 3.3.1.2.1 Dérivation de l'algorithme

Comme précédemment, l'équation (3.38) est linéarisée par un développement de Taylor du premier ordre.

$$\sum_j \left( T(W(j; 0)) + \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p - D(W(j; p)) \right)^2 \quad (3.40)$$

Les dérivées partielles de la fonction par rapport à  $\Delta p$  sont obtenues :

$$\sum_j \left[ \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ T(W(j; 0)) - D(W(j; p)) + \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p \right] \quad (3.41)$$

avec  $\nabla T$  gradient de l'image  $T$  aux coordonnées entières et  $\frac{\partial W}{\partial p}$  matrice Jacobienne de la transformation  $W$  en 0 (c'est-à-dire  $W=I$ ). Ces termes sont constants au cours des itérations, et sont donc pré calculés.

Le vecteur  $\Delta p$  est donné par :

$$\Delta p = - \left[ \sum_j \left[ \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \right] \right]^{-1} \sum_j \left[ \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ T(W(j; 0)) - D(W(j; p)) \right] \quad (3.42)$$

L'équivalence entre les deux formulations est décrite dans (Baker and Matthews, 2004).

### 3.3.1.3 Evaluation

L'avantage de la formulation par composition inverse du problème (3.32) est son faible temps de calcul. En effet, le pré calcul des matrices Jacobienne et Hessienne et du gradient de l'image de référence permet un gain non négligeable lors de l'affinement de la corrélation. L'équivalence entre les deux algorithmes, bien que démontrée dans (Baker and Matthews, 2004), n'est pas évidente et n'est de plus vraie qu'en l'absence de bruit sur les images. Des images sans bruit n'existent pas dans le monde réel. Afin de s'assurer de l'influence minimale du bruit sur la corrélation d'images, nous avons comparé l'algorithme de composition inverse à l'algorithme de descente classique, à un algorithme sans dérivée (Powell, 2004), et à la solution simulée. La simulation de la solution est décrite dans la section 3.8.3. Cette comparaison a été effectuée à partir de la banque d'images « translation » du groupe de travail GDR2519 présentée dans l'annexe A. Nous présentons l'erreur systématique et l'erreur aléatoire sur les images de taille 1024\*1024 pixels de niveau de bruit 0, 8 et 16 sur la figure 3.3. La courbe de l'erreur systématique, appelée aussi courbe en S, présente une symétrie au déplacement de 0.5 pixels. L'erreur systématique ou erreur moyenne, ou encore biais représente la moyenne des différences entre le déplacement estimé et le déplacement imposé (la vérité terrain). Il a été montré que cette symétrie est due à l'interpolant des niveaux de gris utilisé. Nous remarquons que quel que soit le niveau de bruit utilisé, les différents algorithmes d'optimisation donnent sensiblement le même résultat et donc convergent tous a priori vers la même solution. La différence vient du temps de calcul nécessaire pour réaliser l'optimisation. L'algorithme sans dérivée est le plus lent et met environ 45 minutes à traiter les 50 images, vient ensuite la méthode classique qui calcule les courbes en moins d'une dizaine de minutes, et enfin la formulation par composition inverse pour environ deux à trois minutes. L'erreur aléatoire représente l'écart type de la dispersion des déplacements estimés autour de la moyenne précédemment calculée.

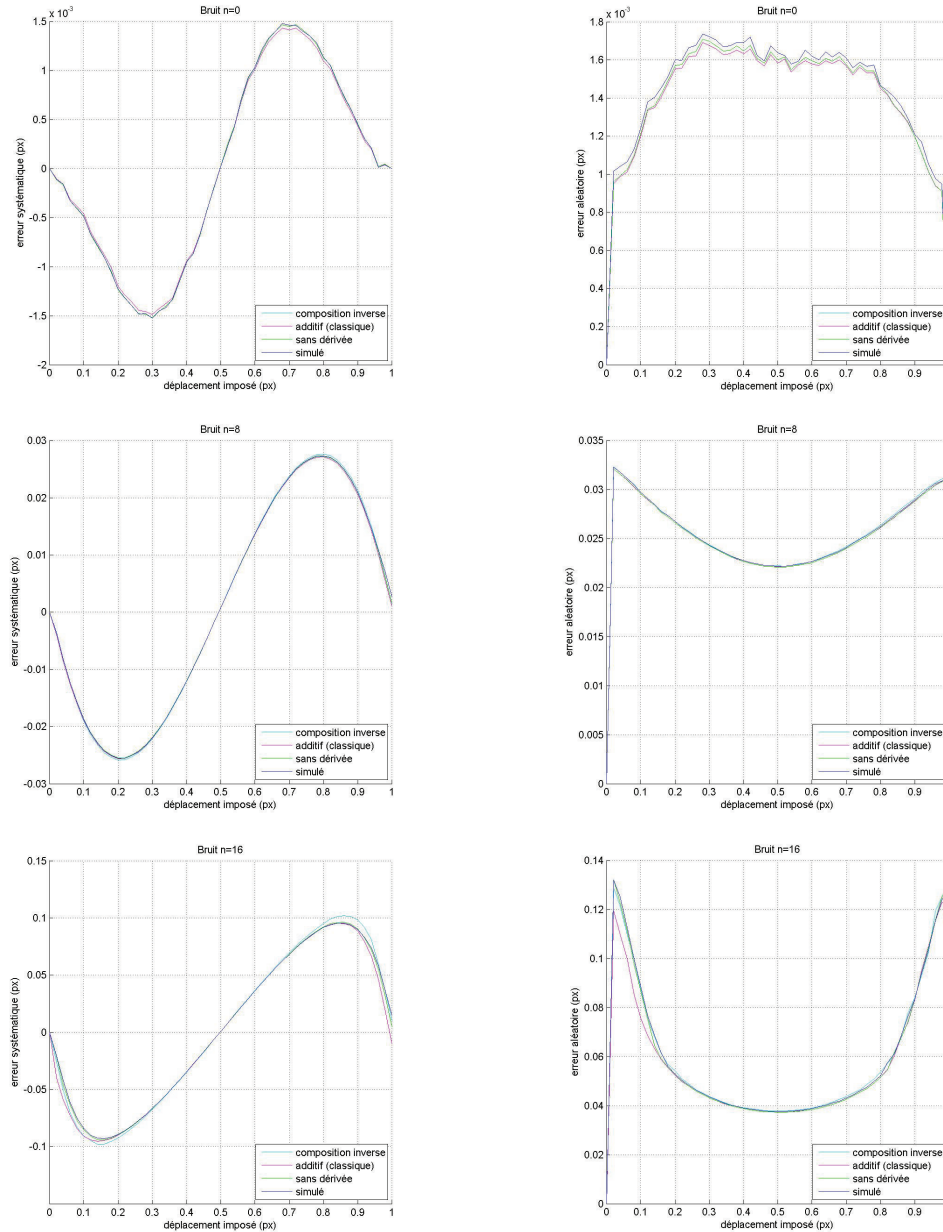


Figure 3. 3- Erreur systématique et erreur aléatoire de nos algorithmes de corrélation comparées aux erreurs obtenues par simulation. Nous présentons les résultats issus de la corrélation des images  $n=0, 8, 16$  de taille  $1024 \times 1024$  pixels de la banque d'images GDR2519.

### 3.3.1.4 Interpolation parabolique

Nous avons observé que la fonction coût décrit un paraboloïde autour de la solution. Dans le cas 1D, ce phénomène peut être observé sur la figure 3.16 de la section 3.8.3. Les algorithmes de descente exposés ci-dessus ont parfois du mal à se rapprocher du minimum lorsque la pente est proche de 0. Une manière efficace d'obtenir une bonne estimée initiale pour les paramètres de translation est d'utiliser l'interpolation parabolique successive, autrement dit d'approximer la fonction coût par une parabole et d'en chercher le minimum. Nous avons donc appliqué cette méthode dans le cadre des critères classiques sur les deux paramètres représentant la disparité  $(d_x, d_y)$ .

## 3.4 Interpolation et calcul du gradient de l'image

### 3.4.1 Interpolation

Les coordonnées de l'image  $D$  sont transformées par  $W(j;p)$ , et l'intensité de l'image est évaluée pour des positions non entières. Afin d'obtenir ces valeurs de niveaux de gris, il est nécessaire d'interpoler l'image. De nombreuses méthodes d'interpolation existent, (Meijering, 2002) a retracé sous forme chronologique le développement de la plupart de ces méthodes. Il n'existe généralement pas de méthode idéale pour tout type d'images, chacune possède ses avantages et ses inconvénients. Nous ne citerons que les plus couramment utilisées dans les applications de vision par ordinateur, à savoir, l'interpolation linéaire qui malgré ses faibles performances reste la méthode d'interpolation d'images la plus rapide, l'interpolation polynomiale, et l'interpolation par 'spline' (Thévenaz, Blu and Unser, 2000). L'influence de la méthode d'interpolation en corrélation fine d'images a été étudiée par (Schreier, Braasch and Sutton, 2000) et montre que lorsque l'on utilise une 'spline' d'interpolation, plus son degré est élevé et plus l'erreur systématique est faible.

Nous avons utilisé les images du GDR2519 (Annexe A) pour nos tests. Des surfaces spline de degré 3, 5, 7 et 9 ont été successivement évaluées. Pour les images fortement bruitées, l'erreur systématique (erreur moyenne) diminue avec des degrés de spline élevés (fig. 3.4).

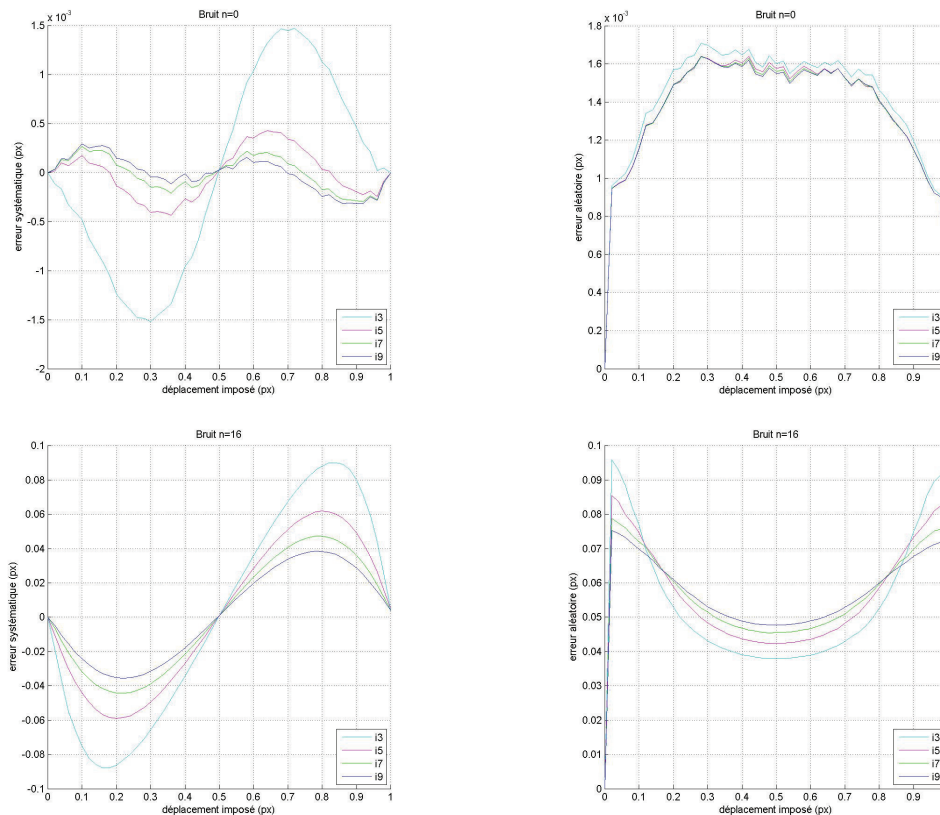


Figure 3. 4- Erreur systématique et erreur aléatoire de nos algorithmes de corrélation selon une interpolation par BSpline de degré 3, 5, 7, et 9. Nous présentons les résultats issus de la corrélation des images n=0, 16 de taille 1024x1024 pixels de la banque d'images GDR2519.

### 3.4.2 Gradient de l'image

Nous avons vu que dans la résolution classique du moindre carré, la dérivée de la fonction coût (eq. 3.43) faisait intervenir le gradient  $\nabla D$  de la fonction intensité d'un pixel pour l'image . Les fenêtres de corrélation de l'image  $D$  ont subi une déformation  $W$  et la valeur de l'intensité ainsi que le gradient doivent être calculés à des positions sub-pixels. Nous avons donc utilisé la dérivée de la 'spline' en ces positions comme définie dans (Thévenaz, Blu and Unser, 2000).

$$\sum_j \left[ \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ T(j) - D(W(j; p)) - \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p \right] \quad (3.43)$$

Dans le cas d'une résolution par composition inverse, la dérivée de la fonction coût ne fait intervenir que les gradients  $\nabla T$  de l'image de référence  $T$  (eq. 3.44). Les positions de pixels dans cette image sont des positions entières et le gradient utilisé reste donc constant au cours des itérations. Celui-ci peut être pré-calculé.

$$\sum_j \left[ \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \right]^t \left[ T(W(j; 0)) - D(W(j; p)) + \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} \Delta p \right] \quad (3.44)$$

Il existe de nombreuses façons de dériver une image dans la littérature. Il est possible comme précédemment de dériver une 'spline'. Nous pouvons aussi appliquer une convolution d'un filtre gradient. L'introduction d'une réduction de bruit par un filtre gaussien est aussi couramment utilisée.

## 3.5 Autres fonctions coûts

Nous allons présenter dans cette section d'autres fonctions coûts basées sur les moindres carrés, à savoir un critère croisé, et l'utilisation des fonctions robustes en corrélation.

### 3.5.1 Critère croisé

Dans le domaine de la vision par ordinateur, lorsque l'on recherche des appariements au pixel près, il est courant de vérifier la cohérence de l'appariement trouvé en mesurant la similarité des fenêtres en partant de l'image référence vers l'image déformée et de l'image déformée vers l'image référence. Nous allons faire de même en introduisant la transformation inverse de  $W$  dans le critère afin de modéliser la correspondance image déformée image référence. Nous considérons le modèle de transformation affine et définissons le critère suivant :

$$\sum_{j, j'} (T(W(j'; p)^{-1}) - D(j'))^2 + (T(j) - D(W(j; p)))^2 \quad (3.45)$$

Le fait d'ajouter une relation entre les pixels de l'image déformée et de l'image référence double le nombre d'équations du système. Nous pouvons nous attendre à une meilleure précision.

#### 3.5.1.1 Composition inverse

Considérant l'hypothèse de Gauss-Newton, il est possible d'exprimer ce critère sous la forme d'une composition inverse. Nous écrivons :

$$\sum_{j,j'} (T(W(j'; p)^{-1}) - D(W(j'; \Delta p))^{-1})^2 + (T(W(j; \Delta p)) - D(W(j; p)))^2 \quad (3.46)$$

La dérivée de la fonctionnelle est évaluée pour  $\Delta p = 0$ , d'où :

$$J = \begin{bmatrix} J_j \\ J_{j'} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

avec :

$$J_j = \nabla T \frac{\partial W}{\partial p} = \nabla T \begin{bmatrix} 1 & 0 & j_x - j_{x0} & j_y - j_{y0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & j_x - j_{x0} & j_y - j_{y0} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$$J_{j'} = \nabla D \frac{\partial W}{\partial p} = \nabla D \begin{bmatrix} 1 & 0 & j'_x - j'_{x0} & j'_y - j'_{y0} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & j'_x - j'_{x0} & j'_y - j'_{y0} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

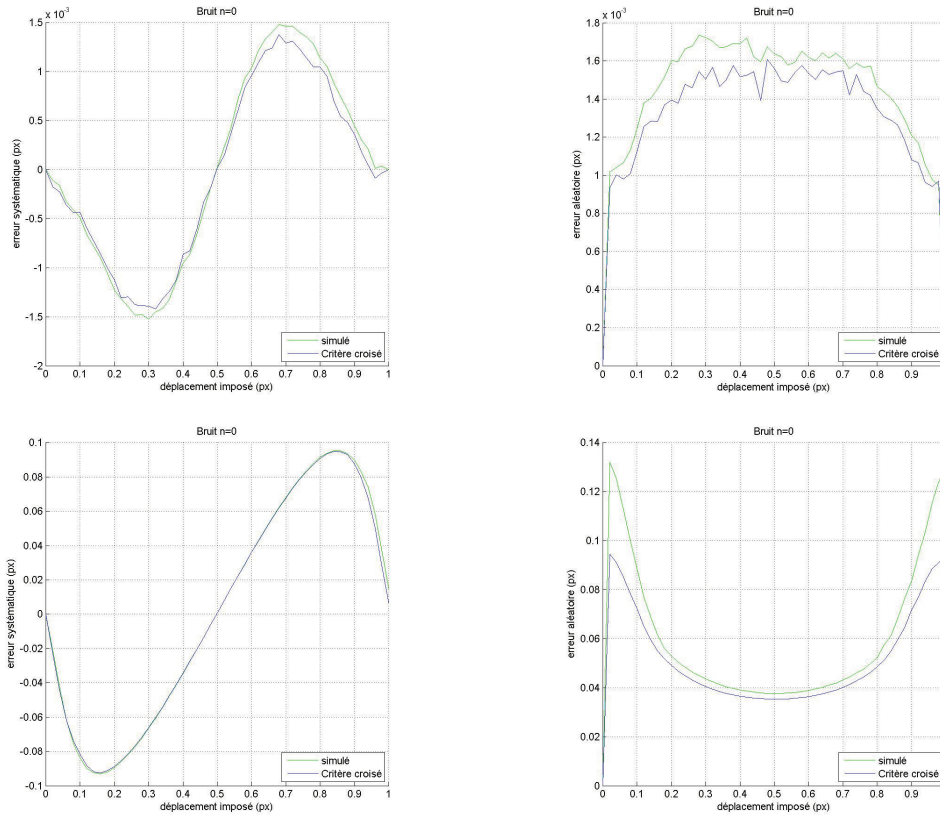


Figure 3. 5-Erreur systématique et erreur aléatoire du critère croisé comparées aux erreurs obtenues par simulation.

Les résultats obtenus (fig.3.5) montrent une légère diminution de l'erreur aléatoire. Le temps d'exécution supplémentaire de cette méthode ne justifie pas cet apport, de l'ordre de quelques centièmes de pixels.



### 3.5.2 Fonctions robustes

La norme  $L2$  est peu robuste au bruit présent dans les images (Baker and Matthews, 2003). Pour pallier ce problème il est parfois préférable d'utiliser d'autres types de fonctions, appelés fonctions robustes. L'équation (3.32) est réécrite selon :

$$\sum_j \rho(T(j) - D(W(j; p)); \sigma) \quad (3.50)$$

avec  $\rho(f; \sigma)$  est une fonction robuste et  $\sigma$  est un vecteur de mise à l'échelle. Il existe de nombreuses fonctions  $\rho$ . Nous avons utilisé la fonction de Huber suivante :

$$\rho(f; \sigma) = \begin{cases} \frac{1}{2}\sigma^2 & \text{si } |f| \leq \sigma \\ \sigma|f| - \frac{1}{2}\sigma^2 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.51)$$

Nous avons aussi appliqué la transformation habituellement utilisée en vision par ordinateur afin de revenir à un problème de moindre carré, à savoir :

$$\varrho(f) = \rho(\sqrt{f}) \quad (3.52)$$

D'où :

$$\sum_j \varrho\left(\left(T(j) - D(W(j; p))\right)^2\right) \quad (3.53)$$

Dans la formulation par fonction robuste, la matrice Hessienne et la Jacobienne doivent être recalculées à chaque itération, ce qui va à l'encontre de l'idée apportée par l'algorithme de composition inverse. Afin d'éviter ce désagrément, nous utilisons le H-Algorithm qui fait l'hypothèse que la Hessienne issue de la fonction robuste et la Hessienne normale sont relativement proches et considérons celles-ci comme identiques.

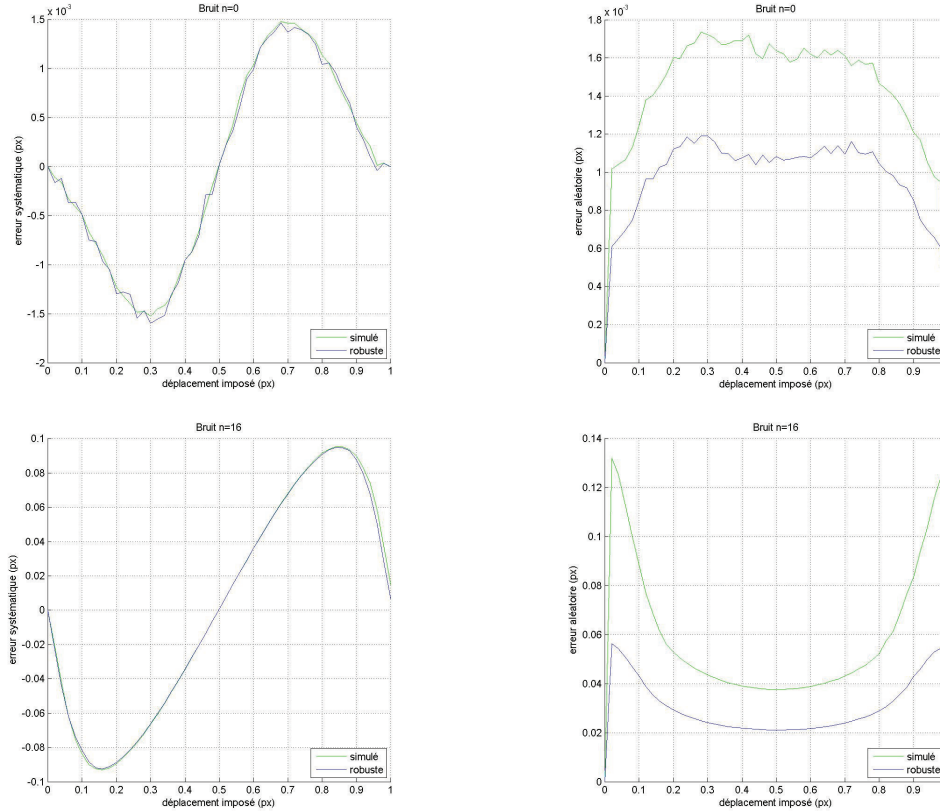


Figure 3. 6-Erreur systématique et erreur aléatoire des fonctions robustes comparées aux erreurs obtenues par simulation.

Les résultats obtenus (fig.3.6) montrent une importante diminution de l’erreur aléatoire pour des images « translations » de niveau de bruit  $n=0$  et  $n=16$ . La courbe simulée ne tient pas compte d’une approche robuste. Ces résultats, bien que semblant prometteurs n’ont pas été retenus par la suite, car entraînant parfois des erreurs de corrélation visibles sur les reconstructions 3D de scènes réelles. Nous avons trouvé par la suite que les fonctions robustes perturbent la gestion des seuils (section 3.7.3) permettant le contournement de zones non corrélables de la méthode de propagation de germe.

### 3.6 Méthode globale : Programmation dynamique

Nous avons choisi la programmation dynamique pour sa simplicité et sa rapidité. La programmation dynamique est une méthode dite globale, même si elle ne permet pas de trouver le minimum global de la fonction d’énergie. En effet le problème global est divisé en un ensemble de sous problèmes, chacun rattaché à une droite épipolaire. Le minimum global est donc atteint pour chacun de ces sous problèmes et permet, en outre d’obtenir un meilleur résultat que pour les méthodes dites locales. La programmation dynamique tente de résoudre le problème de plus court chemin sur une matrice contenant tous les scores de corrélation des appariements possibles d’un pixel. La construction de cette matrice peut se faire de plusieurs manières suivant les contraintes et pénalités choisies. Certaines permettent de privilégier de faibles mouvements entre les pixels tandis que d’autres encouragent de larges disparités. Ces dernières ont l’avantage de permettre tous les déplacements possibles mais ont tendance à

lisser la carte de profondeur dans le cas de faibles différences de disparité. Dans notre application, les surfaces numérisées sont relativement lisses et ne présentent pas ou peu d'occultations et/ou de discontinuités (c'est-à-dire de larges mouvements). Nous privilégierons donc une matrice possédant des connectivités fortes entre les plus proches voisins. Nous intégrerons de plus une dépendance entre les lignes épipolaires comme dans (Forstmann et al., 2004) afin de renforcer la connectivité verticale entre les pixels.

La programmation dynamique s'effectue habituellement en deux étapes. La première consiste à construire une matrice pour chaque droite épipolaire c'est-à-dire à associer un coût à chacun de ses nœuds, c'est l'étape d'accumulation des coûts. La deuxième consiste à trouver le chemin optimal de la matrice, correspondant au minimum global de la fonction énergie.

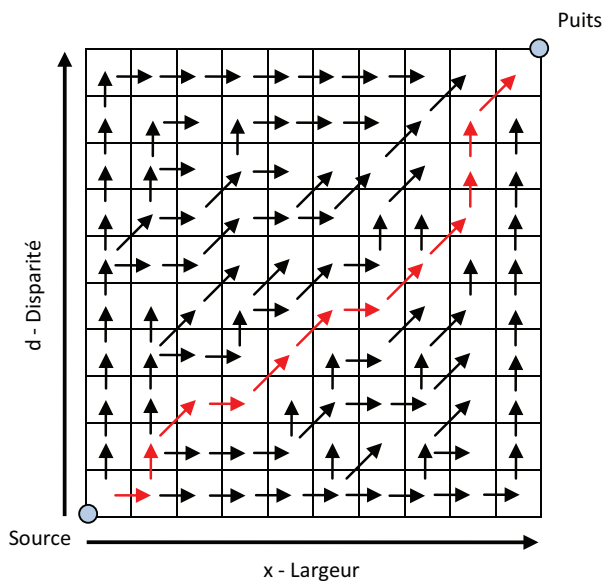


Figure 3. 7- Représentation du plus court chemin (rouge) au milieu de la matrice

### 3.6.1 Construction de la matrice et plus court chemin

Pour illustrer cette partie, nous présentons une méthode simple d'accumulation des coûts décrite dans (Criminisi et al., 2003). Une matrice de taille (largeur (x) \* disparité (d)) correspondant à chaque ligne de l'image rectifiée (donc à chaque droite épipolaire) est d'abord créé. Celle-ci va permettre de stocker les coûts de chaque appariement possible de pixels. La matrice est remplie successivement du coin bas gauche au coin haut droit en obéissant à trois mouvements possibles. L'accumulation peut se faire de bas en haut, de gauche à droite, ou le long de la diagonale. Le remplissage de la matrice se fait toujours en évaluant une fonction de discontinuité appliquée aux voisins précédents. Cette fonction permet d'évaluer la présence d'occultations dans les images et est régi par des seuils. En considérant la fonction de corrélation ZNCC, un élément  $(x, d)$  de la matrice est rempli de la façon suivante :

$$(x, d) = \min \begin{cases} ZNCC(x-1, d) + 0.3 \rightarrow \text{discontinuité} \\ ZNCC(x, d-1) + 0.3 \rightarrow \text{discontinuité} \\ ZNCC(x-1, d-1) + ZNCC(x, d) \end{cases} \quad (3.54)$$

Une fois la matrice construite, la carte de disparité est calculée en suivant le plus court chemin. La figure 3.7 présente la direction de remplissage de chaque élément de la matrice. Le plus court chemin (chemin rouge) correspond à l'énergie globale la plus faible et fait le lien entre le puits (dernier élément calculé) et la source (premier élément calculé) de la matrice.

### 3.6.2 Applications

Nous avons d'abord testé l'implémentation de (Scharstein and Szeliski, 2002) sur nos images. Les résultats étaient peu convainquant, ce qui était surprenant compte tenu des résultats que produisent ces algorithmes sur les images tests. Nous avons donc implémenté notre propre version en s'inspirant de (Forstmann et al., 2004) et (Criminisi et al., 2003). Les images ont été rectifiées par la méthode de (Fusiello, Trucco and Verri, 2000) (fig. 3.8).

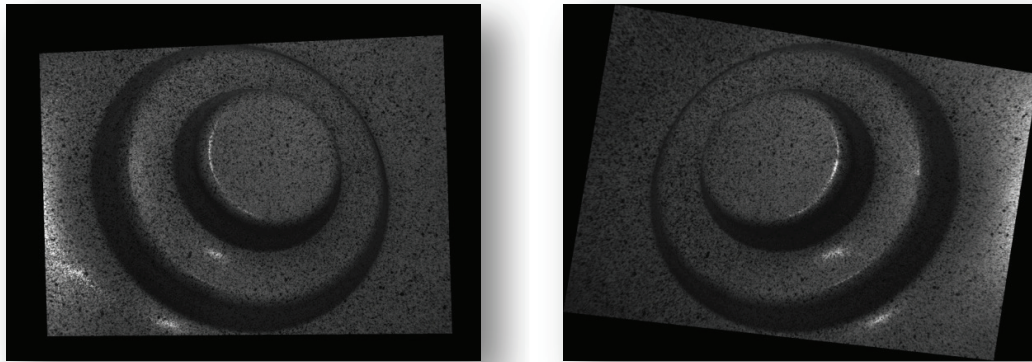


Figure 3. 8-Images rectifiées d'un embouti moucheté

Les différentes vues d'une scène pouvant varier d'une expérience à une autre. Il s'est avéré plus difficile de régler ce type d'algorithmes que la propagation de germe (méthode présentée dans la section suivante). Un mauvais réglage des seuils provoque l'apparition de lignes horizontales aberrantes créant des erreurs au niveau des pixels, et empêchant une initialisation correcte de la corrélation fine (fig. 3.9). Compte tenu du fait que l'autre méthode développée donnait de bons résultats et était plus souple d'utilisation, nous n'avons pas poursuivi le développement de cette méthode.

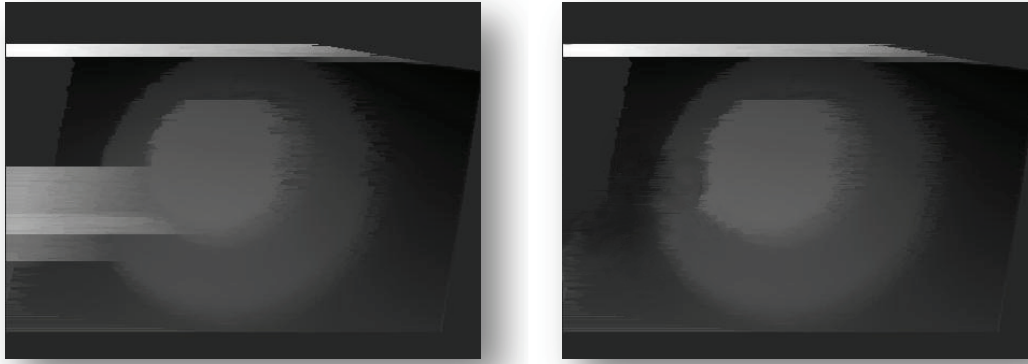


Figure 3. 9-Carte de disparité obtenue après corrélation par programmation dynamique. Le mauvais réglage des seuils (à gauche) entraîne l'apparition de lignes horizontales aberrantes.

### 3.7 Méthode locale mise en œuvre : Propagation de germe

Nous allons présenter plus en détail la propagation de germe que nous avons implémentée. Dans les étapes qui suivent, nous prenons par défaut le modèle de transformation affine afin d'optimiser le critère de corrélation entre l'image de référence et l'image déformée. La méthode de corrélation par propagation de germe se divise en deux étapes : (1) le choix d'un ou plusieurs germes, (2) le transfert (propagation) des paramètres.

Le transfert des paramètres est associé à un ensemble de méthodes permettant d'améliorer la qualité des points appariés. Nous présenterons comment nous parcourons l'image dans la section 3.7.3 et comment nous pouvons avoir un contrôle sur la qualité des points appariés dans la section 3.7.4.

#### 3.7.1 Germe

Comme son nom l'indique, cette méthode de corrélation est initialisée à partir d'un ou plusieurs germes qui sont choisis automatiquement ou manuellement. Ces points peuvent être issus d'un extracteur ( (Harris, 1988), DoG (Lowe, 2004)...), ou peuvent être choisis par l'utilisateur (appariement visuel grossier). L'algorithme étant initialisé à partir de ces derniers, une attention particulière doit leur être apportée. En fait, il faut que le point soit correctement apparié, et donc privilégier une zone fronto-parallèle, où les algorithmes sont les plus performants, à une zone de forte pente. La mise en correspondance du germe utilise par défaut le critère de corrélation ZNCC car il est à la fois robuste et rapide, mais les autres critères sont disponibles.

#### 3.7.2 Transfert des paramètres

Un pixel dans une image possède un total de huit voisins qui peuvent être adjacents ou distants d'un pas. Le transfert de paramètres peut donc se faire dans huit directions différentes : vers la droite, vers la gauche, vers le haut, vers le bas, suivant la diagonale haut gauche, suivant la diagonale haut droite, suivant la diagonale bas droite, et suivant la diagonale bas gauche (fig. 3.10). Les quatre mouvements diagonaux peuvent être obtenus par composition des quatre premiers mouvements, seuls ces derniers sont indispensables à la propagation des paramètres.

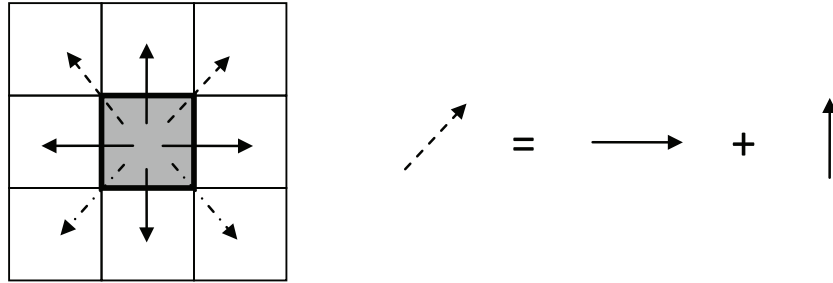


Figure 3. 10- Transfert des paramètres selon les 4 directions cardinales

### 3.7.2.1 Cas affine et homographique

Nous considérons que le modèle de transformation de fenêtre choisi est correct pour les pixels voisins du centre de la fenêtre. De ce fait, nous pouvons appliquer la transformation (3.17) du pixel courant aux pixels voisins, et calculer une position initiale pour ces pixels. Prenons pour exemple la figure 3.11. Le pixel rouge  $j$  et sa fenêtre carrée rouge associée sont transformés par la transformation de fenêtre  $W$  selon les paramètres  $p$ . Nous choisissons de transférer les paramètres de la fenêtre rouge au pixel bleu clair voisin de coordonnées  $j+pas$ . La transformation  $W$  de paramètres  $p$  est appliquée à ce point. Nous obtenons alors une estimée initiale de ses coordonnées (point bleu clair) et lui transférons les paramètres  $p$  tels quels. Le point et la fenêtre bleu foncé illustrent le correspondant du pixel de coordonnées  $j+pas$  et sa transformation associée après optimisation. La forme de la fenêtre a donc changé.

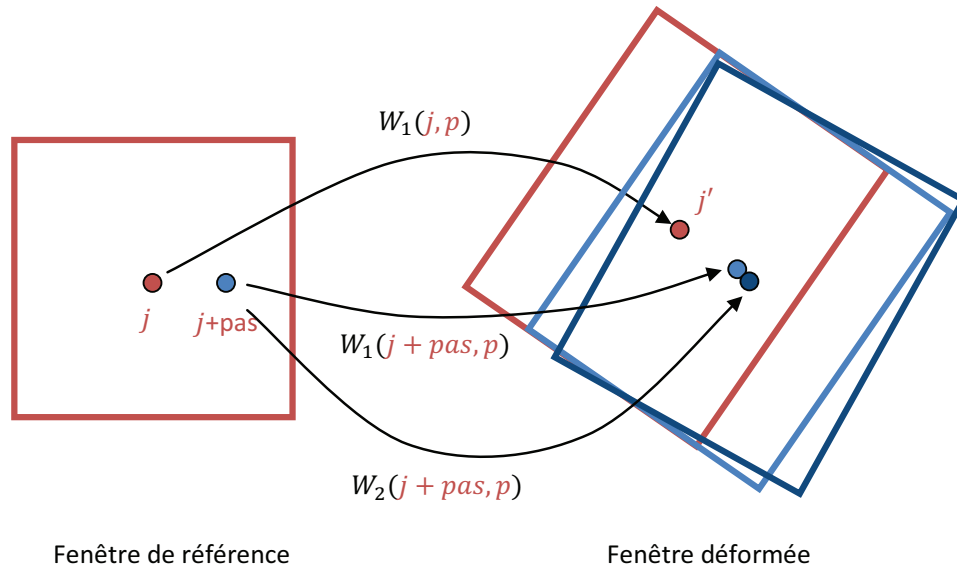


Figure 3. 11-Transfert des paramètres pour un modèle de transformation de fenêtre affine

### 3.7.2.2 Cas 3D

Dans le cas de la transformation 3D de fenêtre par intersection, nous calculons l'intersection du rayon formé par le centre optique et le pixel voisin, avec le plan courant afin de déterminer la

valeur du paramètre  $Z$  pour le point voisin. Les autres paramètres  $\Delta Z_1$  et  $\Delta Z_2$  sont transférés directement du pixel courant au pixel voisin.

### 3.7.2.3 Choix du pas

Le pas n'est pas un critère déterminant de l'algorithme de propagation, son rôle ne réside pas dans l'amélioration des performances de l'algorithme mais plutôt dans la rapidité de son exécution et dans la quantité de points appariés désirés. En effet, il n'est pas toujours indispensable d'effectuer une corrélation dense avec un pas très fin, en particulier si l'on souhaite obtenir une ébauche de numérisation 3D ou bien si l'on désire obtenir un modèle 3D de taille plus réduite. Néanmoins augmenter le pas dans ce but peut dans certains cas dégrader la transmission des paramètres. Ceci s'observe sur des pièces présentant de fortes irrégularités et s'explique du fait de la validité limitée du modèle de transformation de fenêtre. Les modèles présentés ici ne sont valides qu'au voisinage du centre de la fenêtre, et utiliser un large pas par rapport à la taille de la fenêtre de corrélation ne doit se faire que pour des images de scènes relativement planes.

### 3.7.3 Parcours de l'image

Une image est un tableau de pixels, et comme tout tableau, peut être parcouru de différentes façons. Nous considérons que le repère image se situe dans le coin bas gauche, avec l'axe  $u$  horizontal, et l'axe  $v$  vertical. Nous avons choisi deux directions de parcours, à savoir du coin bas gauche au coin haut droit et du coin haut droit au coin bas gauche afin d'effectuer la propagation. Le choix de différents parcours avec des directions différentes permet de gérer les occultations, d'éviter et/ou de traverser les zones de fortes pentes et courbures, d'éviter et/ou de traverser les zones spéculaires. Eviter une zone implique de la qualifier et de quantifier sa difficulté de franchissement. Ces dernières étapes sont effectuées via des seuils ou critères d'arrêts décrits dans la section suivante.

Notons que les deux directions proposées impliquent soit un déplacement positif en  $u$  et  $v$ , soit un déplacement négatif en  $u$  et  $v$ . Nous avons vu dans la section précédente que les paramètres d'un pixel courant sont transférés à quatre voisins. Deux voisins possèdent des coordonnées strictement positives en  $u$  et  $v$  par rapport au pixel courant. Les deux autres possèdent des coordonnées strictement négatives. En combinant les directions avec les voisins positifs ou négatifs, nous pouvons déduire deux modes de propagation distincts (fig. 3.12), Un mode 'illimité', dans le sens où la propagation sera stoppée aux bornes de l'image ou dans les zones difficiles. Un mode 'pas à pas' où la propagation ne s'effectuera que sur une rangée de pixels autour des pixels déjà corrélés.

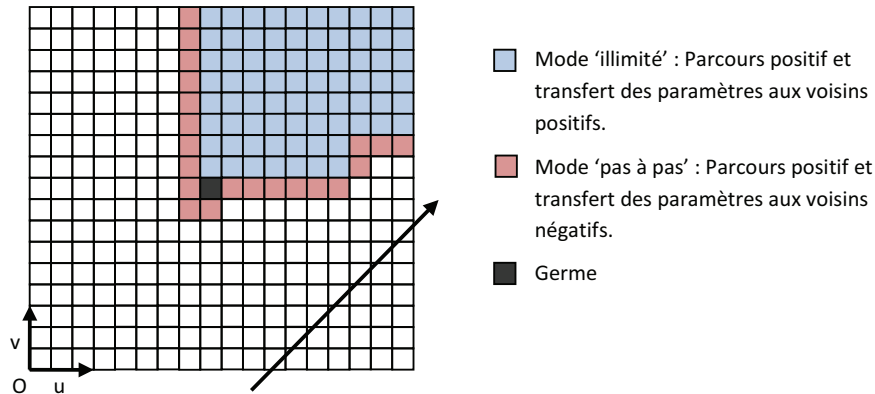


Figure 3. 12-Parcours positif des pixels d'une image et mise en évidence des modes de propagation. Les deux mêmes modes sont présents pour un parcours négatif.

Ces deux modes s'inscrivent dans une stratégie de propagation itérative où les seuils sont évolutifs. Un seuil trop bas risque d'écarter trop de pixels qui auraient pu être considérés comme corrects. A l'inverse, un seuil trop haut aura tendance à laisser des appariements aberrants et à dégrader par la suite la forme reconstruite. La marche à suivre est la suivante :

1. Les critères d'arrêts sont d'abord fixés sur des valeurs relativement faibles.
2. La propagation s'effectue ensuite en mode 'illimité', un maximum de points est corrélé.
3. Les valeurs des critères d'arrêts sont alors augmentées.
4. La propagation s'effectue en mode 'pas à pas'. On tente de traverser les zones difficiles en étant plus permissif.
5. Les valeurs des critères sont abaissées. On retourne à l'étape 2.

La propagation s'arrête lorsque tous les pixels de l'image ont été corrélés ou bien lorsqu'un nombre maximum d'itérations est atteint. Cette approche permet de propager avec de meilleurs seuils, d'éliminer les zones difficiles ou de les traverser quand elles sont peu larges. Les valeurs des seuils pour chaque jeu de paramètres transféré peuvent être stockées et permettent d'obtenir un critère de qualité sur les points corrélés. Ceci permet par la suite de tenir compte ou pas de certains pixels lors de calculs postérieurs, lors du calcul d'une transformation rigide notamment (Chapitre 5).

### 3.7.4 Critères d'arrêts

Les critères d'arrêts permettent comme expliqué précédemment de stopper la propagation dans les zones difficiles. Ceux-ci peuvent être liés à la géométrie de la scène (distance à la droite épipolaire, faces reconstruites), peuvent être directement issus de la propagation (contrainte de lissage) ou bien de la phase d'optimisation (score de corrélation). Ils nécessitent de déterminer un seuil, souvent de manière empirique, ce qui peut s'avérer difficile ou bien trop discriminant. Pour ces raisons, il est préférable de combiner plusieurs critères entre eux avec des seuils un peu plus larges ou bien de faire évoluer les seuils lors de la propagation (section précédente).

#### 3.7.4.1 Distance à la droite épipolaire

Nous avons présenté la géométrie épipolaire au cours du chapitre 2. En utilisant la matrice fondamentale, la distance d'un point  $p$  à la droite épipolaire est définie par :



$$dist(j, Fj')^2 \quad (3.55)$$

Et le critère d'arrêt associé par :

$$dist(j, Fj')^2 < seuil \quad (3.56)$$

### 3.7.4.2 Faces reconstruites

Lors de la corrélation par propagation de germe, les pixels appariés forment un maillage triangulaire 2D (chapitre 5). Ce dernier devient un maillage 3D après la phase de reconstruction. Nous supposons dans le cas de surfaces continues qui ne présentent pas de trop fortes pentes, que le périmètre des faces du maillage varie peu. Nous pouvons en déduire un périmètre moyen pour les faces, et une valeur maximale acceptable pour celles-ci. Ce critère d'arrêt permet d'éliminer des appariements aberrants, qui corrompent la géométrie de la scène. Nous l'avons utilisé après la phase de corrélation plutôt que pendant, pour des raisons de temps de calcul. A noter qu'il aurait été aussi possible de considérer l'aire des faces ou bien même leur forme.

### 3.7.4.3 Contrainte de lissage

La contrainte de lissage est déterminée à partir de deux pixels voisins par une opération de vérification. Nous prenons la transformation affine pour illustrer l'exemple. Soit un pixel  $j'$  lié à son correspondant  $j$  par l'équation (3.13) :

$$j' = j_0 + (A_1 + I)(j - j_0) + d_1 \quad (3.57)$$

En considérant que le modèle affine est valide dans l'entourage du centre de la fenêtre, on obtient pour un pixel distant d'un pas l'équation :

$$j'' = j_0 + (A_1 + I)(j + pas - j_0) + d_1 \quad (3.58)$$

Les paramètres  $A_1$  et  $d_1$  sont raffinés par optimisation. Nous obtenons alors un nouveau jeu de paramètres  $A_2$  et  $d_2$ , et le pixel  $j''$  est alors relié à  $j+pas$  par l'équation :

$$j'' = j_0 + (A_2 + I)(j + pas - j_0) + d_2 \quad (3.59)$$

En réalisant la démarche inverse, c'est-à-dire en utilisant l'équation (3.57) afin de calculer les coordonnées de  $j'$ , nous obtenons un pixel proche de  $j'$ , que l'on nommera  $j'_2$  :

$$j'_2 = j_0 + (A_2 + I)(j - j_0) + d_2 \quad (3.60)$$

Ces deux pixels bien que proches, sont distants d'une valeur susceptible de satisfaire à un seuil. Le critère d'arrêt associé à la contrainte de lissage s'exprime alors par :

$$\|j' - j'_2\| < seuil \quad (3.61)$$

### 3.7.4.4 Score de corrélation

Le score de corrélation est exprimé par le résidu de la minimisation de la fonction coût. En reprenant l'équation (3.32), le critère associé s'écrit :

$$\sum_j (T(j) - D(W(j; p)))^2 < \text{seuil} \quad (3.62)$$

Afin d'illustrer l'influence des critères d'arrêt de la propagation et plus particulièrement l'influence des seuils, nous avons choisi un objet un peu plus complexe géométriquement que les pièces aéronautique qui nous ont été données. Cet objet représente une version réduite du temple de Dioskouroi en Sicile (Seitz et al., 2006). La corrélation a été exécutée avec différents seuils sur la contrainte à la droite épipolaire, sur la contrainte de lissage et sur la contrainte du score de corrélation. La figure 3.13 présente différentes reconstruction 3D du temple selon les différentes contraintes. La vue haut gauche présente la reconstruction 3D après une contrainte insuffisante portée sur la droite épipolaire. La vue haut droite présente la reconstruction 3D après une contrainte insuffisante portée sur le lissage de la scène. La vue bas gauche présente la reconstruction 3D après une contrainte insuffisante portée sur le score de corrélation. La vue bas droite présente la combinaison des trois contraintes et montre un résultat beaucoup plus propre visuellement. Il est donc préférable de combiner les différentes contraintes tout en gardant des seuils faibles plutôt que de chercher les seuils optimums pour chacune d'elles.

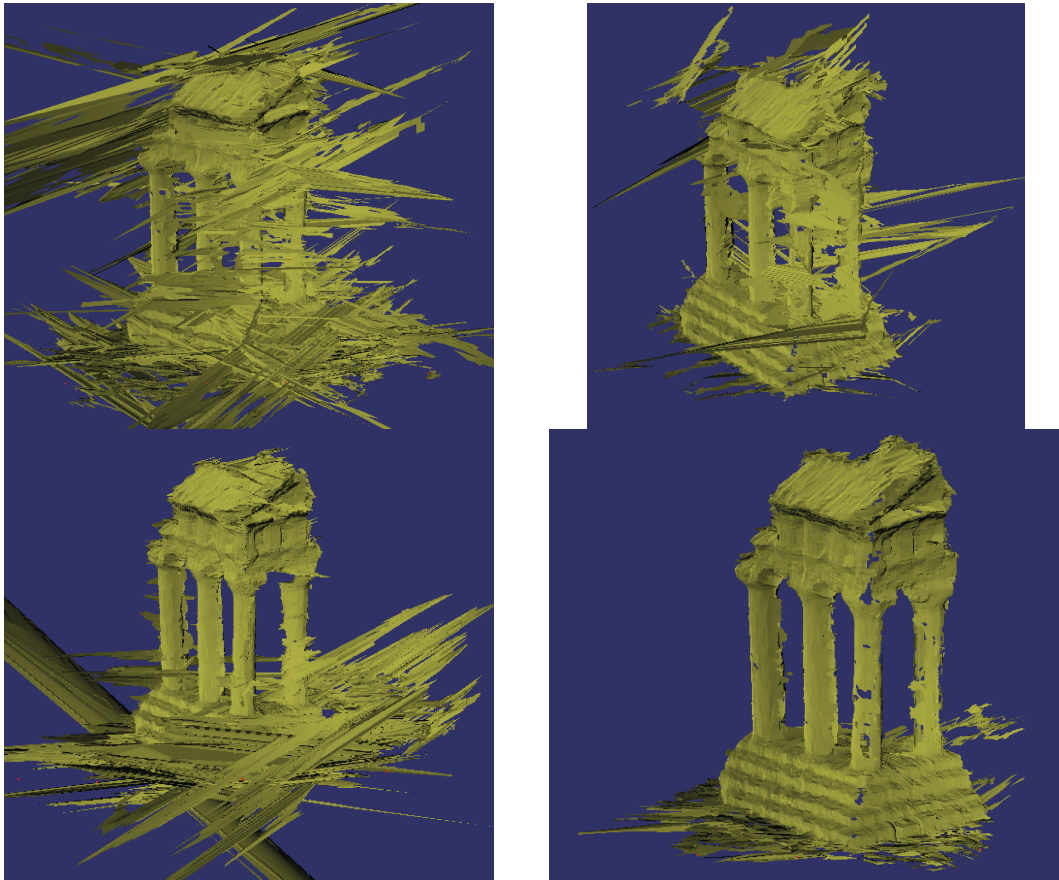


Figure 3. 13-Résultat de la reconstruction 3D du temple après corrélation. Images haut gauche : seuil sur la contrainte épipolaire, haut droite : seuil sur la contrainte de lissage, bas gauche seuil sur le score de corrélation, bas droit : seuil sur les trois contraintes.

### 3.7.5 Post-traitement

Nous avons vu dans les sections précédentes que la corrélation par propagation de germe s'appuie sur une transmission des paramètres d'une transformation locale de fenêtre et est régi

par des critères d'arrêts associés à des seuils. Il peut être intéressant de conserver les valeurs des paramètres et des seuils de chaque pixel dans le but d'affiner les résultats, de les modifier ou bien simplement de visualiser les paramètres. L'affinage des résultats peut se traduire par une nouvelle corrélation comportant une taille de fenêtre différente (en général plus petite afin d'obtenir une meilleure résolution spatiale). Nous avons testé cette approche sur le temple, ce qui permet d'améliorer l'aspect visuel dans un grand nombre de zones. En contre partie, certaines zones se voient dégradées par la diminution de fenêtre. Un critère permettant de contrôler la taille de la fenêtre (analyse de la texture locale par exemple) et ainsi l'affinage devrait être implémenté pour l'exploiter pleinement.

### 3.8 Évaluation de notre moteur de corrélation

Nous avons évalué notre moteur de corrélation à la fois sur des images 2D et sur des images de scènes 3D. Pour la partie 2D, nous avons utilisé les images générées par le groupe de travail GDR2519 (Bornert et al., 2009) (Annexe A). Nous avons aussi pu nous comparer aux logiciels académiques ou commerciaux existants, l'étude du GDR2519 ayant comparé plusieurs d'entre eux. Les images ont été créées synthétiquement en utilisant une variante du bruit de Perlin (Orteu et al., 2006). Elles ont subi une déformation de type sinus ou translation, et la vérité terrain (le déplacement théorique sub pixel) est connue. Nous allons présenter les résultats pour les images « sinus », puis pour les images « translation ». Enfin nous discuterons de l'influence de l'optimisation du critère de corrélation et de l'interprétation des résultats sur ces images tests. Pour la partie 3D, nous avons créé un simulateur d'images de scènes 3D, nous présenterons les résultats en fin de chapitre.

#### 3.8.1 Images « sinus »

Nous avons testé nos algorithmes sur les images « sinus » de la banque d'images du GDR2519 (fig. 3.14). Notre logiciel correspond aux courbes rouges, les autres courbes correspondent à des logiciels académiques ou commerciaux existants. Les courbes expriment le RMS de l'erreur de corrélation en fonction de la période ( $p$ ) du sinus, pour différentes amplitudes ( $a$ ) de sinus et différentes tailles de fenêtres (10, 16, 32px). Le RMS est normalisé par le produit de la dérivée seconde maximale du déplacement imposé et de la taille de la fenêtre comme dans (Bornert et al., 2009). Nous retrouvons le même comportement que celui qui est décrit dans l'article collectif publié par les membres du GDR (Bornert et al., 2009) : à savoir que pour une faible déformation ( $a=0.001$ ), de nombreuses courbes différentes sont observées. La taille de la fenêtre permet de stabiliser les courbes vers une valeur asymptotique de 0.03 appelée l'erreur ultime. Cette erreur est de plus atteinte plus facilement pour de larges périodes. Comme pour les autres logiciels, il n'est pas possible d'observer un déplacement pour des périodes  $p$  trop petites.

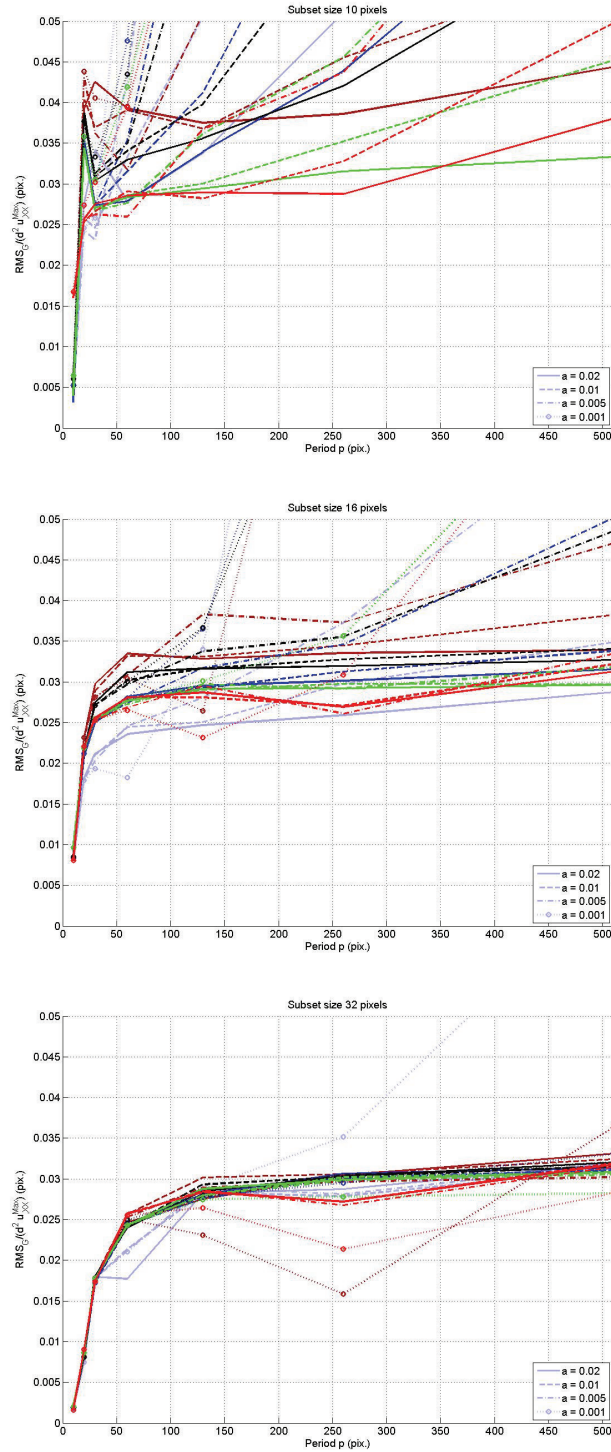


Figure 3. 14-RMS des différents logiciels de corrélation sur les images « sinus » du GDR2519.

### 3.8.2 Images « translation »

Nous présentons sur la figure 3.15, l'erreur systématique et l'erreur aléatoire obtenues sur les images translation 1024\*1024 pixels de bruit  $n=0, 2, 8, 16$  issues du benchmark du groupe de travail GDR 2519. Notre logiciel est représenté par la courbe rose. Ces images ne possédant qu'une déformation de type translation, le modèle de transformation translation à deux

paramètres a été utilisé pour tous les logiciels, lorsque celui-ci était disponible. Les fenêtres de corrélation sont de 15 ou 16 pixels selon la possibilité du logiciel (certains logiciels imposent des tailles de fenêtre paire, d'autres des tailles de fenêtres impaire).

Les courbes représentant les erreurs systématiques possèdent comme nous l'avons dit auparavant une symétrie au niveau du déplacement de 0.5 pixels. Le signe de ces courbes dépend de l'interpolant utilisé, c'est-à-dire que celles-ci peuvent être positives du déplacement 0 au déplacement 0.5 puis négatives pour le reste, comme l'inverse. C'est pourquoi nous observons les courbes bleu ciel, rouges, violettes, roses, vertes, et noires variant du signe positif au signe négatif et les courbes jaunes, bleues, beiges variant du signe négatif au signe positif.

Pour les images de bruit  $n=16$ , une courbe d'erreur systématique bleu foncé se différencie des autres de par sa forme. Elle possède une cassure au niveau de la symétrie (autour du déplacement de 0.55px). Ce type de courbe est spécifique aux logiciels basés sur la corrélation par transformée de Fourier, nous n'en avons pas présenté d'autres car ces courbes possèdent un comportement totalement différent de celles issues des autres logiciels. Pour l'erreur aléatoire, elle présente un pic au niveau de déplacement de 0,5 pixels.

Les courbes d'erreurs systématiques ayant une forte amplitude correspondent généralement à des logiciels utilisant un interpolant peu performant (bi-linéaire) tandis que les courbes avec une faible amplitude correspondent à des interpolations de type (bi-cubique, bi-quintique). Lorsque le bruit augmente, l'erreur systématique a tendance à augmenter avec le niveau de bruit des images pour tous les logiciels, excepté pour les logiciels représentés par les courbes jaunes, bleues, rouges, et beiges. Pour ces derniers, l'erreur systématique tend à être constante et indépendante du niveau de bruit observé. Ceci pose un problème pour comparer les différentes courbes. En effet deux tendances concernant l'erreur systématique se dessinent. La première regroupe des logiciels dont l'erreur systématique est indépendante du bruit. La seconde regroupe des logiciels donc l'erreur systématique est dépendante du bruit. Notre logiciel se place (cf. figure 3.15) parmi ceux ayant une dépendance au bruit.

Concernant l'erreur aléatoire, nous observons de plus fortes erreurs pour les courbes rouges et beiges. Quel que soit le logiciel utilisé, plus le niveau de bruit augmente, et plus l'erreur aléatoire augmente. En présence de niveaux de bruits élevés, les courbes ont tendance à adopter une forme de puits avec une erreur faible pour des déplacements compris entre 0.2 et 0.8 pixels et une erreur plus forte pour des déplacements compris entre 0 et 0.2, et entre 0.8 et 1 pixels. La courbe la plus basse (violette) correspond à un logiciel n'ayant pas pris en compte tous les points imposés. Notre logiciel produit une erreur parmi les plus faibles.



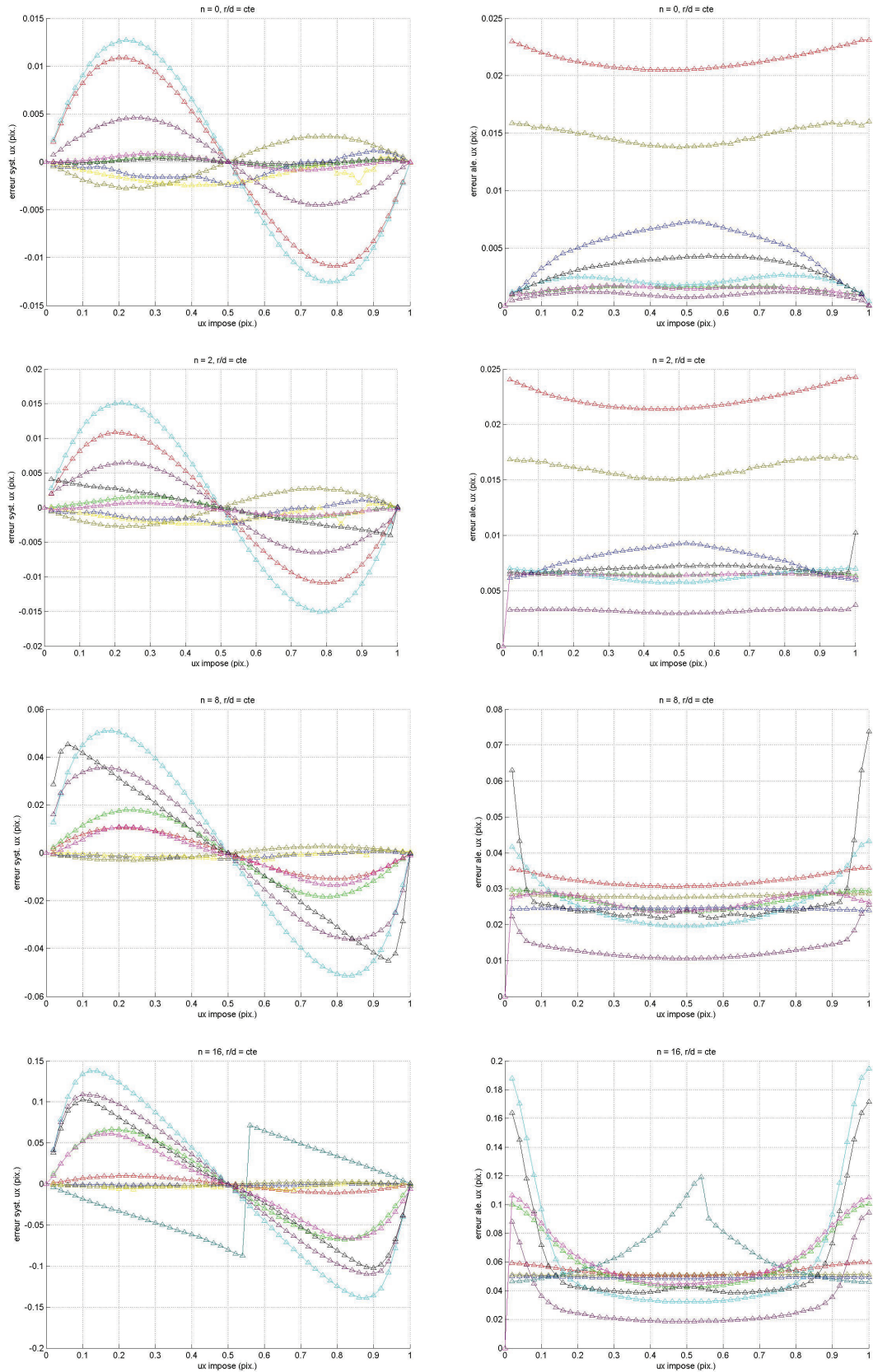


Figure 3. 15-Erreur systématique (colonne de gauche) et erreur aléatoire (colonne de droite) des différents logiciels de corrélation sur les images translation du GDR2519.

Après discussion avec les membres du GDR2519, nous avons trouvé qu'une cause possible à la dépendance de l'erreur systématique au bruit venait de la phase de l'optimisation et avons pu reproduire avec notre logiciel les deux tendances observées. Nous présenterons dans la section suivante l'influence de l'optimisation sur notre logiciel.

### 3.8.3 Influence de la phase d'optimisation

La vérité terrain habituellement considérée pour les images de translations est le déplacement imposé de la fonction. Le déplacement imposé, que nous appellerons solution vraie correspond rarement à la solution trouvée par minimisation. Ceci est dû aussi bien à l'interpolation des niveaux de gris de l'image, qu'à la linéarisation de la fonctionnelle lors de sa minimisation. Bien que cela soit coûteux en temps de calcul, il est tout à fait possible de simuler une corrélation et de trouver le minimum global de chaque fonctionnelle optimisée, c'est-à-dire le minimum que devraient trouver nos algorithmes. Pour cela, nous avons limité la translation à un paramètre et évalué pour chaque pixel la fonction coût autour de la solution idéale (du déplacement imposé). Plusieurs fonctions coûts sont présentées sur la figure 3.16 en fonction de différents déplacements imposés. A noter que suivant le niveau de bruit, l'intervalle autour de la solution idéale a été choisi plus ou moins grand (Tableau 3.1). Les minimums des fonctions coûts sont en effet plus éloignés de la solution idéale pour des niveaux de bruit élevés.

Niveau de gris $n$ du bruit	Intervalle (px)
0	0,05
2	0,05
4	0,05
8	0,1
16	0,4

Tableau 3. 1- Largeur en pixel de l'intervalle utilisé pour évaluer la fonction coût autour du déplacement imposé en fonction du niveau de gris  $n$  du bruit.

Les fonctions coûts ont été évaluées tous les 0,001 pixels. Cette valeur arbitraire a été choisie relativement grande pour des raisons de temps de calcul. Elle reste tout de même inférieure à l'erreur aléatoire présente dans les images pour tout niveau de bruit. Des tests avaient été réalisés avec de plus petites valeurs, de l'ordre de  $10^{-6}$  ; les courbes étaient identiques et ne présentaient pas de minimum local.

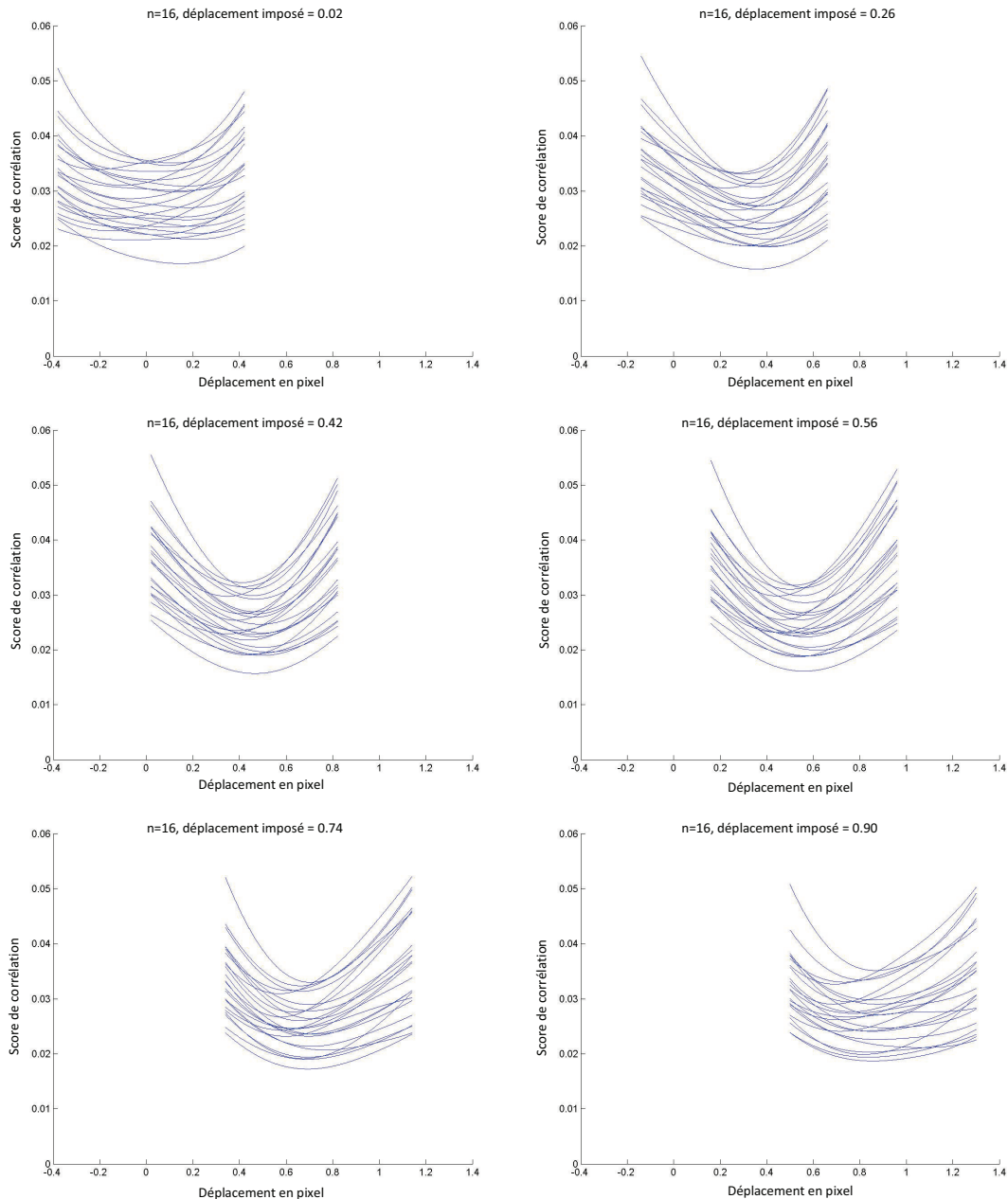


Figure 3. 16- Quelques fonctions coûts tracées autour du déplacement imposé

Nous remarquons que les courbes sont convexes (fig. 3.16) et nous pouvons pour chacune d'elles extraire facilement un minimum et calculer le biais et l'écart type simulés (fig.3.17). L'erreur systématique obtenue est dépendante du bruit et l'erreur aléatoire forme des puits centrés en 0,5 pour des niveaux de bruits importants. Les fonctions coûts pour des déplacements proches de 0 et de 1 sont parfois très aplaties et présentent des minimums éparpillés. Les fonctions autour de 0,5 présentent un minimum plus marqué, proche de la solution idéale. L'erreur est donc généralement plus faible autour de cette valeur, ce qui explique la formation de puits sur les courbes de l'erreur aléatoire.

Il a été observé lors de l'étude menée par le GDR2519 que deux tendances pour l'effet du bruit des images sur l'erreur systématique et sur l'erreur aléatoire existaient. L'erreur systématique



peut être en effet dépendante (première tendance) ou indépendante (seconde tendance) au bruit. Dans le cas d'une erreur dépendante au bruit, un puits est observé pour l'erreur aléatoire, en particulier pour des niveaux de bruit élevés (courbe verte de la figure 3.17). Dans le cas d'une erreur indépendante au bruit, l'erreur aléatoire reste constante en fonction du déplacement imposé.

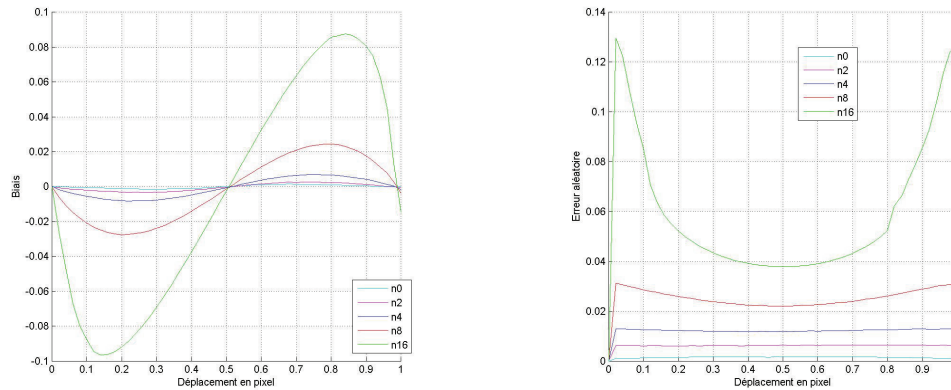
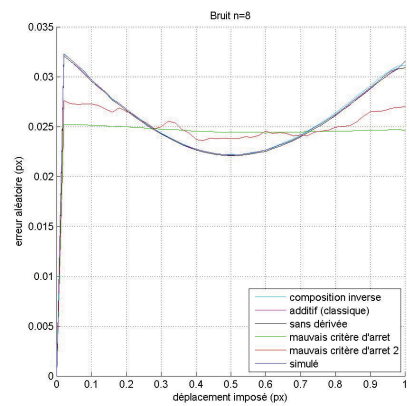
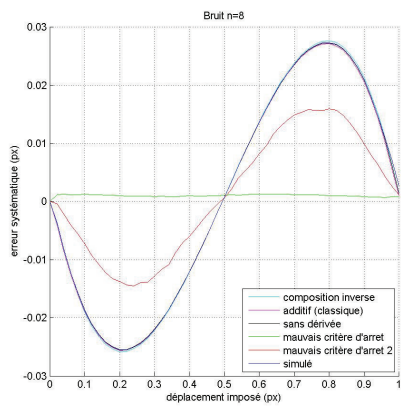
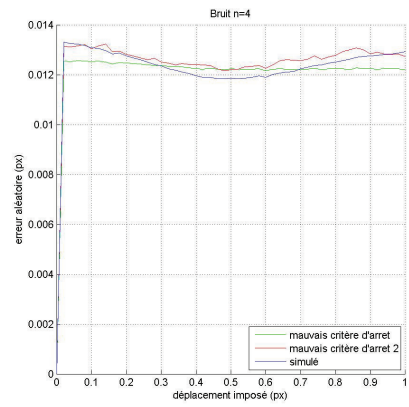
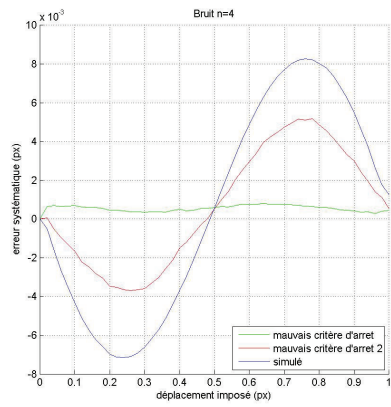
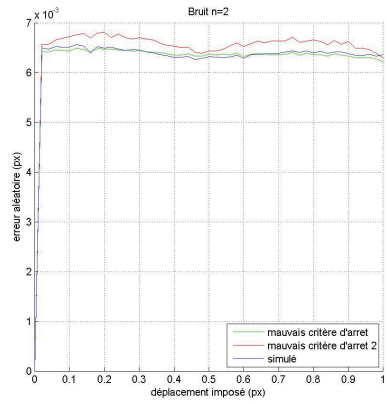
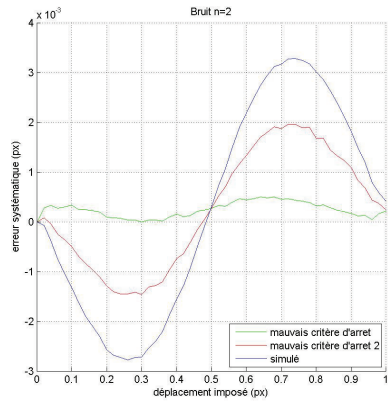
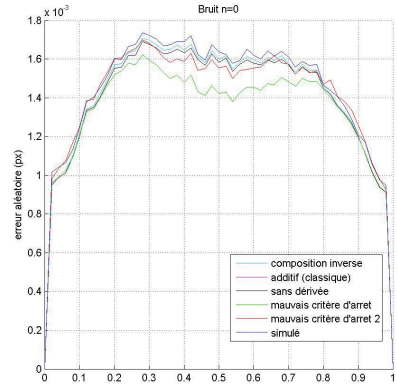
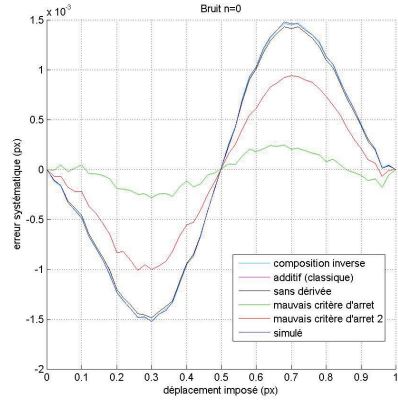


Figure 3.17 : Erreur systématique et aléatoire simulées en fonction du niveau de bruit  $n$  dans les images.

La première tendance confirme les études théoriques de (Wang et al., 2009) et correspond aux courbes simulées obtenues précédemment (fig. 3.17). La seconde tendance va à l'encontre de ces résultats.

Nous allons utiliser la vérité terrain simulée pour analyser le comportement de notre algorithme de corrélation, et plus particulièrement sa partie optimisation. En observant la progression de la minimisation de la fonction coût, il a été observé que l'algorithme d'optimisation pouvait s'arrêter assez loin de la solution simulée, en particulier dans les zones aplaties. La conséquence directe est que cet arrêt prématuré, qui peut avoir lieu aussi bien à gauche qu'à droite de la solution (l'algorithme a statistiquement autant de chance de se tromper d'un côté que de l'autre) va entraîner une erreur systématique nulle quel que soit le niveau de bruit des images. La figure 3.18 illustre bien ce phénomène. La courbe verte qui correspond à une mauvaise optimisation du critère donne une erreur systématique nulle quel que soit le niveau de bruit des images. La courbe rouge correspondant à une implémentation optimisant un peu mieux est légèrement influencée par le niveau de bruit des images. A l'inverse les algorithmes convergeant correctement, présentent une erreur systématique avec de larges amplitudes et sont dépendants du niveau de bruit dans les images. Ils sont de plus équivalents à la courbe simulée. En jouant sur les réglages des critères d'arrêts de l'algorithme d'optimisation, nous avons pu retrouver le comportement correspondant à la première tendance ; c'est-à-dire qu'avec une minimisation correcte, l'erreur systématique est dépendante du bruit. Il est possible que les logiciels suivant la deuxième tendance possèdent eux aussi une implémentation 'défaillante' de la partie optimisation du critère de corrélation. Nous n'avons pas pu le vérifier.



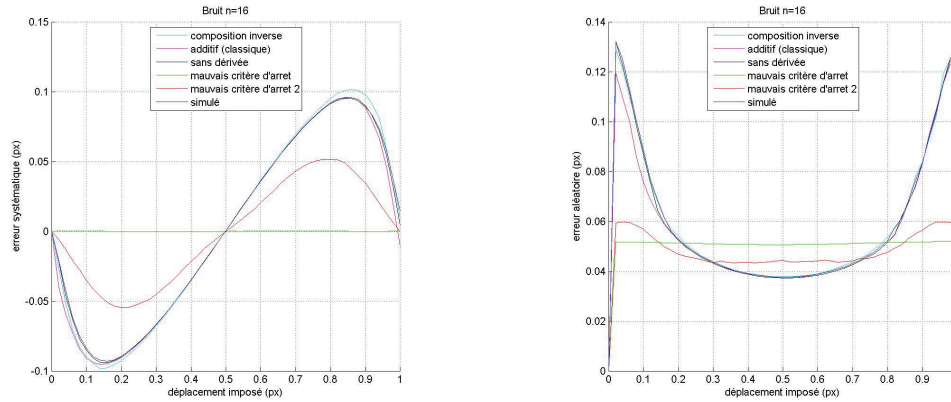


Figure 3. 18-Erreur systématique et erreur aléatoire de différentes optimisations du critère de corrélation.

Nous avons vu qu’une faible erreur systématique ne correspondait pas nécessairement à un résultat de corrélation correct. De ce fait, ces courbes deviennent difficiles à interpréter sans connaissance a priori sur la qualité d’optimisation des logiciels. Il faut être prudent lorsque l’on souhaite inter-comparer des logiciels différents car bien qu’il soit possible d’observer des tendances, il peut être trompeur de conclure sur les performances des algorithmes en s’appuyant précisément sur les valeurs. Les courbes 3.19 et 3.20 illustrent bien ce phénomène, à savoir que tout laisse à croire que les mauvaises optimisations liées aux courbes rouge et verte sont meilleures que les résultats de la courbe bleue, qui n’est rien d’autre que l’erreur simulée.

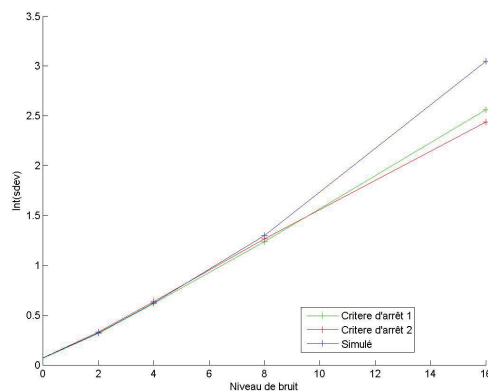


Figure 3. 19 – Intégrale de l’écart type de l’erreur en fonction du niveau de bruit des images

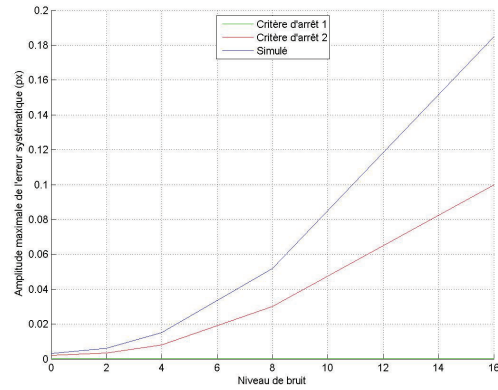


Figure 3. 20 - Amplitude maximale de l'erreur systématique en fonction du bruit des images

### 3.8.4 Scène 3D

Les tests précédents ont permis d'évaluer nos algorithmes de corrélation au niveau 2D et de nous comparer à d'autres logiciels. Nos mesures étant effectuées sur des scènes 3D réelles, nous avons besoin d'évaluer nos algorithmes de corrélation sur des objets 3D. Nous avons donc développé un générateur d'images synthétiques représentant des scènes 3D. Ces images sont obtenues par la technique dite de lancer de rayons couramment utilisée en synthèse d'images afin de rendre des scènes réalistes. Nous nous sommes contentés de primitives simples pour nos comparaisons, à savoir des plans et des sphères. Pour apporter une texture aux primitives, nous avons utilisé la deuxième version du bruit 3D de Perlin (Perlin, 2001) ainsi que l'algorithme du simplex noise. Nous avons pu confronter les résultats issus de nos algorithmes de corrélation en faisant varier les différents paramètres, à savoir la transformation de fenêtre et l'interpolation.

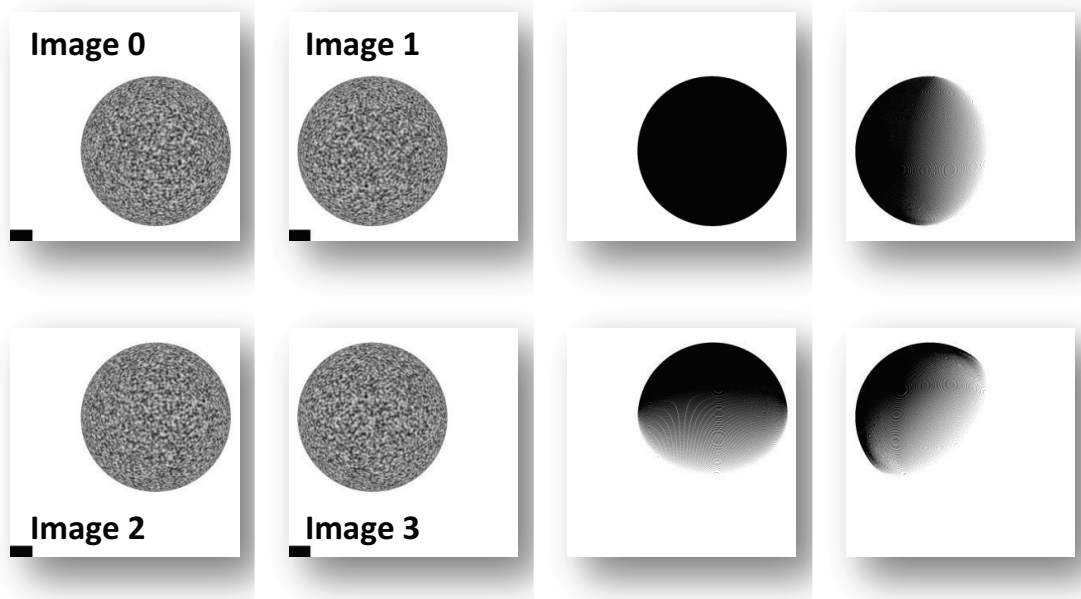
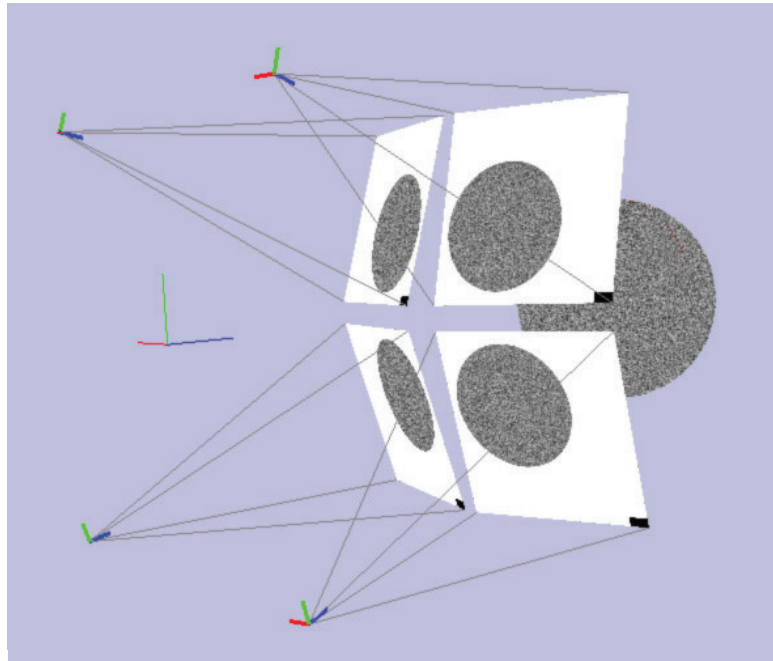


Figure 3. 21- Haut : vue 3D du simulateur d'images. Bas : images générées et zones corrélables théoriques (noir).

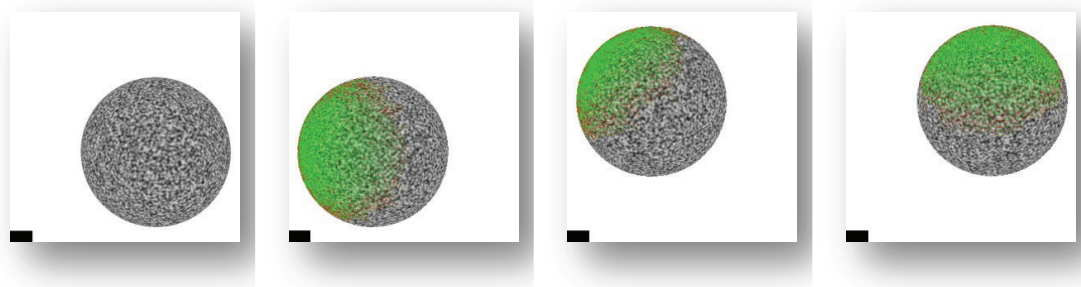


Figure 3. 22- Zones corrélées (vert)

Nous nous servons des images comme vérité terrain pour évaluer nos algorithmes. La figure 3.21 présente la géométrie de la scène, les images générées. La figure 3.22 présente les cartes de corrélation théoriques si l'on choisit l'image de référence 0, et les cartes de corrélation obtenues (contenant du vert et rouge).

Nous présentons pour le critère affine et le critère 3D, les cartes d'erreurs associées (fig.3.23 distance euclidienne en pixels). Dans les zones fronto-parallèles à la caméra, nous observons une plus faible erreur pour le modèle 3D que pour le critère affine. Bien que la surface de la sphère ne soit pas plane, le critère 3D permet de mieux modéliser la déformation entre les différentes vues et donc de diminuer l'erreur.

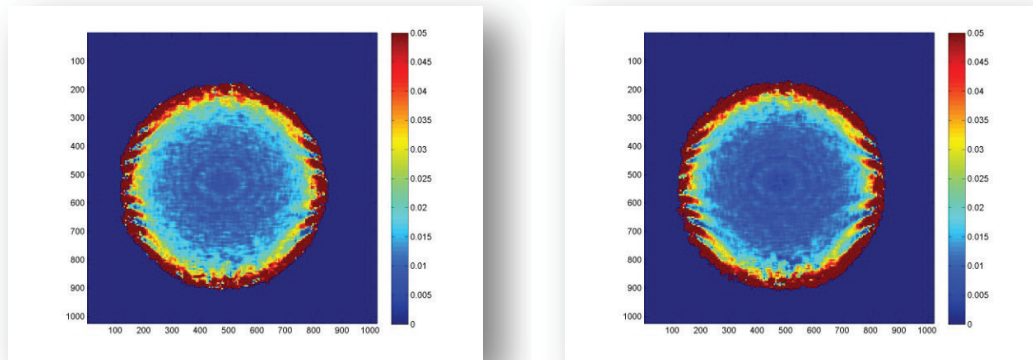


Figure 3. 23-Erreur de corrélation en pixel pour le critère affine et le critère 3D sur les images de la sphère

Le même résultat est observé pour le plan (fig. 3.24).

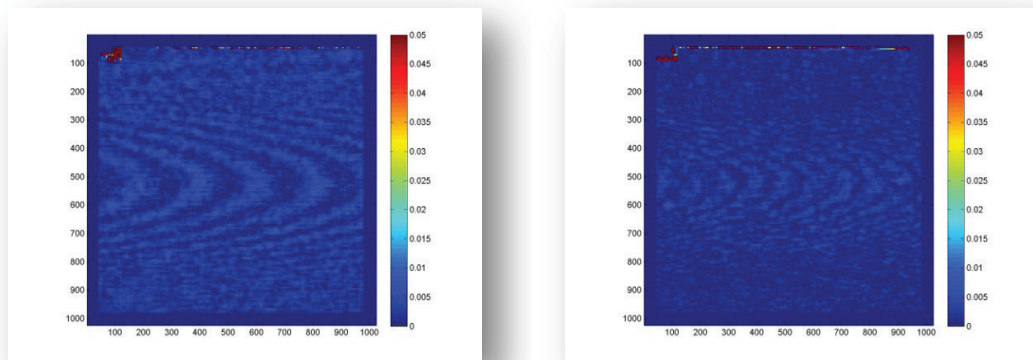


Figure 3. 24-Erreur de corrélation en pixel pour le critère affine et le critère 3D sur les images du plan

Les valeurs supérieures à environ 0.025 correspondent à des zones que l'on qualifiera de non corrélables soit à cause d'une déformation du mouchetis trop importante, d'une pente trop forte de la surface observée (bord de la sphère), soit à cause des effets de bords de l'image (bord supérieur de l'image du plan). Les moyennes et écarts types de l'erreur d'appariement sont calculés sans ces valeurs (Tableau 3.2).



Erreur (px) . 10 <sup>-3</sup>	Sphère		Plan	
	affine	Plan 3D	affine	Plan 3D
<b>Moyenne</b>	13.9	12.05	2.32	1.31
<b>Ecart type</b>	4.40	4.74	1.44	1.09

Tableau 3. 2- Erreur moyenne et écart-type calculés sur les images de la sphère et du plan

Sur les images de la sphère et du plan, nous pouvons observer des motifs elliptiques (des cercles sur la sphère, et des arcs sur le plan). Nous avons observé que ces motifs peuvent être atténués ou renforcés suivant le degré de l'interpolation utilisé ou suivant la façon dont les fonctions d'arrondis sont implémentées dans l'interpolation. La figure 3.25 présente la carte d'erreur de la sphère après une corrélation comprenant une BSpline de degré 7 et la carte d'erreur du plan soumise à des erreurs d'arrondis lors de l'interpolation.

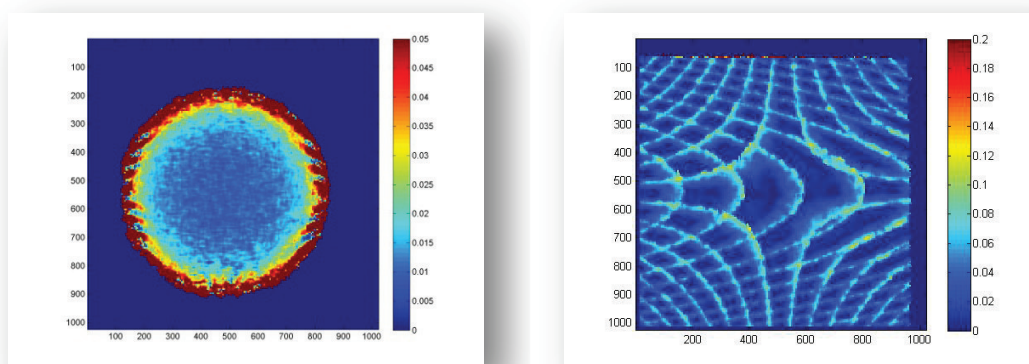


Figure 3. 25-Gauche : Erreur de corrélation en pixel pour le critère affine et une interpolation BSpline de degré 7 sur les images de la sphère. Droite : Erreur de corrélation suite à des erreurs d'arrondis lors de l'interpolation (image du plan).

### 3.9 Conclusion

Nous avons présenté les outils nécessaires au développement d'une application de corrélation d'images. Nous avons testé l'approche globale ainsi que l'approche locale en corrélation d'images pour finalement nous tourner complètement vers l'approche locale et la propagation de germe qui étaient bien adaptées aux pièces que nous avons à numériser. Nous proposons une description complète de cette dernière méthode, dont une approche basée sur des seuils capable de contourner les zones non corrélables. La combinaison de ces seuils permet de s'affranchir d'un réglage précis de chaque seuil, et permet de garder les valeurs par défauts dans la plupart des expériences. Notre implémentation, basée sur la minimisation du critère de corrélation par la méthode de composition inverse permet de réduire les temps de calcul tout en gardant les mêmes performances qu'une méthode basée sur une formulation classique.

Nous avons enfin évalué nos algorithmes aussi bien au niveau 2D sur les images du groupe de travail du GDR2519 qu'au niveau 3D à l'aide de nos propres images, et avons mis en évidence de bons résultats concernant la qualité d'appariement. Nous avons présenté l'influence de la phase d'optimisation du critère de corrélation sur les images de type « translation », et montré que l'interprétation de ces courbes pouvait être délicate.

Il est bien sûr possible d'améliorer la propagation de germe aussi bien au niveau de sa rapidité qu'au niveau de sa qualité d'appariements. En ce qui concerne la rapidité, une implémentation sur carte graphique permettrait probablement un gain non négligeable en temps de calcul. Concernant la précision de la corrélation, il existe de meilleures méthodes d'interpolation (Schar, 2000) utilisés dans certains logiciels commerciaux qu'il serait intéressant de tester.

### 3.10 Bibliographie

- Baker, S. and Matthews, I. (2003) 'Lucas-Kanade 20 years on:a unifying framework: part2', *Technical Report*.
- Baker, S. and Matthews, I. (2004) 'Lucas-Kanade 20 years on:a unifying framework: part1', *International Journal of Computer Vision*, vol. 56, no. 3, pp. 221-255.
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. and Van Gool, L. (2008) 'Spedded-up robust features (SURF)', *Computer Vision and Intelligence Understanding*, vol. 110, no. 3, pp. 346-359.
- Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J.-C., Fazzini, M., Grédiac, M., Hild, F., Mistou, S., Molimard, J., Orteu, J.-J., Robert, L., Surrel, Y., Vacher, P. and Wattrisse, B. (2009) 'Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: methodology and results', *Experimental Mechanics*, vol. 49, no. 3, pp. 353-370.
- Bornert, M., Orteu, J.J. and Roux, S. (A paraître) 'Chapitre 6. Corrélation d'images', *Mesures de champs et identification*, Hermès.
- Boykov, Veksler and Zabih (1999) 'Fast approximate energy minimization via graph cuts', *IEEE International Conference on Computer Vision*.
- Brown, Burschka and Hager (2003) 'Advances in Computational Stereo', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, no. 8, pp. 993-1008.
- Brox, Bruhn, Papenberg and Weickert (2004) 'High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping', *IEEE European Conference on Computer Vision*.
- Bugarin, F., Henrion, D., Sentenac, T., Lasserre, J.B. and Orteu, J.J. (2010) 'Optimisation globale polynomiale appliquée à la rectification projective d'images non calibrées', *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*.
- Chambon, S. (2005) 'Mise en correspondance stéréoscopique d'images couleur en présence d'occultations', *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse*.
- Criminisi, Shotton, Blake, Rother and Torr. (2003) 'Efficient dense stereo and novel view synthesis for gaze manipulation in one to one teleconferencing', *Technical Report*.
- Devernay, F. (1997) 'Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces', *Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique*.
- Felzenszwalb and Huttenlocher (2006) 'Efficient belief propagation for early vision', *International journal of computer vision*, vol. 70, no. 1, pp. 41-54.



Forstmann, S., Kanou, Y., Ohya, J., Thuring, S. and Schmitt, A. (2004) 'Real-time stereo by using Dynamic Programming', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 3.

Furukawa, Y. and Ponce, J. (2007) 'Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.

Fusiello, Trucco and Verri (2000) 'A compact algorithm for rectification of stereo pairs', *Machine Vision and Applications*, vol. 12, no. 1, pp. 16-22.

Garcia, D. (2001) 'Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images', *Thèse de doctorat, Ecole Mines Albi*.

Gustavson, S. (2005) 'Simplex noise demystified', *Note* : <http://www.itn.liu.se/~stegu/simplexnoise/simplexnoise.pdf>.

Habbecke, M. and Kobbelt, L. (2006) 'Iterative multi-view plane fitting', *International Workshop in Vision, Modeling, and Visualization*, pp. 73-80.

Harris, C.S.M. (1988) 'A combined corner and edge detector', *4th Alvey vision conference*, pp. 147-151.

Hild, F. and Roux, S. (2006) 'Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties', *Strain*, vol. 42, no. 2, pp. 69-80.

Horn and Schunck (1981) 'Determining optical flow', *Artificial intelligence*, vol. 17, pp. 185-203.

Klaus, Sormann and Karner (2006) 'Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure', *International Conference on Pattern Recognition*.

Kolmogorov and Zabih (2001) 'Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts', *IEEE International Conference on Computer Vision*.

Leung, C.W.Y. (2006) 'Efficient methods for 3D reconstruction from multiple images', *Thèse de doctorat, University of Queensland*.

Lowe, D. (2004) 'Distinctive image features from scale-invariant keypoints', *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2.

Lu, H. and Cary, P.D. (2000) 'Deformation Measurements by Digital Image Correlation: Implementation of a Second-order Displacement Gradient', *Experimental Mechanics*, vol. 40, no. 4, pp. 393-400.

Lucas, B.D. and Kanade, T. (1981) 'An iterative image registration technique with an application to stereo vision', *International Joint Conferences on Artificial Intelligence*.

Lu, H. and Ganesan, B. (2002) 'Implementation of Third-order Displacement Gradient in Digital Image', *International Conference on Computational Engineering and Sciences*.

Meijering, E. (2002) 'A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing', *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 3, pp. 319-342.

- Okutomi, M. (1993) 'A multiple-baseline stereo', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 4, pp. 353-363.
- Orteu, J.J., Garcia, D., Robert, L. and Bugarin, F. (2006) 'A speckle-texture image generator', *Speckle06*.
- Perlin, K. (2001) 'Noise hardware', *Real-time shading SIGGRAPH Courses Notes*.
- Powell (2004) 'The NEWUOA software for unconstrained optimization without derivatives', *The 40th Workshop on Large Scale Nonlinear Optimization*.
- Réthoré, J., Hild, F. and Roux, S. (2008) 'Extended digital image correlation with crack shape optimization', *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 73, pp. 248-272.
- Rohlfing, T., Maurer, C.R., Bluemke, D.A. and Jacobs, M.A. (2003) 'Volume-preserving nonrigid registration of MR breast images using free-form deformation with an incompressibility constraint', *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 22, no. 6, pp. 730-741.
- Rueckert, D., Sonoda, L.I., Hayes, C., Hill, D.L.G., Leach, M.O. and Hawkes, D.J. (1999) 'Nonrigid registration using free-form deformations: application to breast MR images', *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 18, no. 8, pp. 712-721.
- Salvi, J., Pagès, J. and Batle, J. (2004) 'Pattern codification strategies in structured light systems', *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827-849.
- Scharr, H. (2000) 'Optimal Operators in Digital Image Processing', *Thèse de doctorat, University of Heidelberg*.
- Scharstein and Szeliski (2002) 'A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms', *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, no. 1, pp. 7-42.
- Schreier, H.W., Braasch, J.R. and Sutton, M.A. (2000) 'Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation', *Optical engineering*, vol. 39, no. 11.
- Seitz, S., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. and Szeliski, R. (2006) 'A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 519-526.
- Sutton, M.A., Orteu, J.J. and Schreier, H. (2009) 'Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basics concepts, theory and applications', *Springer, ISBN 978-0-387-78746-6*.
- Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F. and McNeill, S.R. (1983) 'Determination of displacements using an improved digital correlation method', *Image and Vision Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 133-139.
- Thévenaz, P., Blu, T. and Unser, M. (2000) 'Interpolation revisited', *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 19, no. 7, pp. 739-758.

Wang and Cuitino (2002) 'Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation', *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, no. 13, pp. 3777-3796.

Wang, Liao, Gong, Yang and Nistér (2006) 'High-quality real-time stereo using adaptive cost aggregation and dynamic programming', *3D Data Processing, Visualization and Transmission*.

Wang, Y.Q., Sutton, M.A., H.A., B. and Schreier, H.W. (2009) 'Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements', *Strain*, vol. 45, no. 2, pp. 160-178.

Xu, Y. and Roy-Chowdhury, A. (2008) 'Inverse compositional estimation of 3D pose and lighting in dynamic scenes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 7, pp. 1300-1307.

Yang, Wang, Yang, Stewénus and Nistér (2009) 'Stereo matching with color-weighted correlation, hierarchical belief propagation and occlusion handling', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 3, pp. 492-504.

## 4. Corrélation multi-images

---

La corrélation multi-images consiste à apparier des points dans plusieurs images. La figure 4.1 présente plusieurs points associés à une fenêtre de corrélation bleue et leurs points correspondants associés chacun à une fenêtre de corrélation dans deux autres images. Les centres de chaque fenêtre représentent les points apparifiés. Cette étape peut être réalisée temporellement (appariement d'images acquises à des instants différents) comme spatialement (appariement d'images acquises au même instant par plusieurs caméras). Dans ce manuscrit, elle est utilisée afin d'initialiser les algorithmes de reconstruction 3D multi-caméras tel que la triangulation et l'ajustement de faisceaux (Triggs et al., 2000). Nous parlerons donc uniquement de corrélation spatiale. Ce que nous présentons dans ce chapitre s'applique essentiellement aux grappes de caméras préalablement calibrées présentées dans le chapitre 2, c'est-à-dire à plus de deux caméras.

Comme pour la corrélation stéréo, la corrélation multi-images nécessite un critère de corrélation pour apparier les points. Ce critère peut être multi-caméras comme dans (Okutomi, 1993), (Habbeke and Kobbelt, 2006), (Furukawa and Ponce, 2007), mais peut aussi être un critère stéréo classique et être appliqué aux images deux à deux. Nous présenterons en première partie l'extension du critère stéréo à plusieurs images. Nous verrons que l'utilisation des critères de corrélation implique le choix d'une image de référence. Lorsque le critère stéréo est utilisé dans un contexte multi-caméras, la même image de référence doit être conservée si l'on souhaite par la suite utiliser des algorithmes de reconstruction multi-images. Le choix de cette image peut être difficile dans un système multi-caméras, aussi nous proposerons d'utiliser les points 3D du modèle CAO ou les points 3D d'une autre numérisation comme référence quand l'un de ces derniers est disponible. L'introduction du modèle CAO apporte d'autres avantages comme la détection des occultations ou des zones difficilement corrélables telles que les zones de fortes pentes. Nous présenterons comment éliminer ces zones avant d'initialiser la corrélation via l'utilisation de méthodes implémentées sur les cartes graphiques.

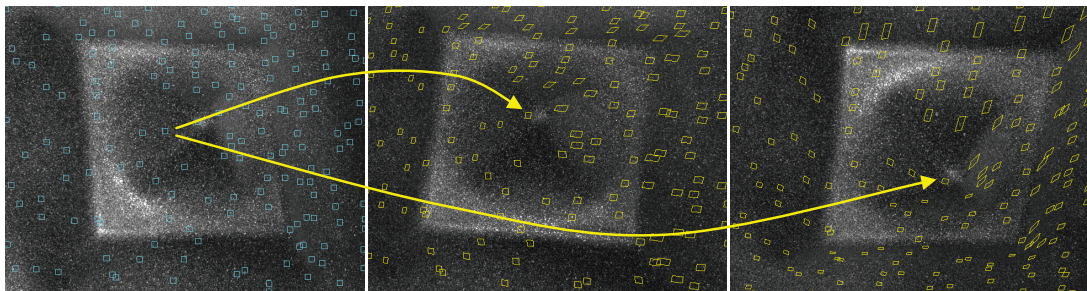


Figure 4. 1- Appariement multi-images (image de référence à gauche)

Nous montrerons ensuite l'avantage à utiliser un système multi-caméras sur une pièce réfléchissante, et terminerons de chapitre par la présentation des performances du critère multi-caméras sur des images générées synthétiquement, ceci afin de prouver avec une vérité terrain, que le critère multi-caméras améliore les résultats par rapport au critère stéréo.

## 4.1 Extension du critère de la corrélation fine d'images

Nous avons décrit dans le chapitre précédent un ensemble de méthodes permettant d'apparier avec précision des points dans deux images acquises simultanément. En prenant la transformation homographique  $W$  comme modèle de fenêtre, l'extension du critère de corrélation fine au critère de corrélation multi-images s'écrit :

$$\sum_i \sum_j (T(j) - D_i(W_i(j; p)))^2 \quad (4.1)$$

avec  $i$  l'ensemble des fenêtres déformées par une distorsion projective et  $j$  l'ensemble des pixels de la fenêtre de référence  $T$ . En considérant la figure 4.2 nous avons une image de référence  $I_{m0}$ , et deux images acquises sous des points de vue différents  $I_{m1}$  et  $I_{m2}$ . Nous avons donc  $i = 2$  fenêtres subissant une distorsion projective et  $i + 1$  images utilisées.

Comme pour le cas stéréo, l'homographie peut se formuler de deux façons, en ne prenant pas ou en prenant en compte les paramètres de calibrage du système.

Dans le premier cas, elle comporte huit inconnues et implique une homographie différente pour chaque image  $i$ .  $W_i$  s'écrit alors :

$$W_i = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Utiliser la première forme de l'homographie revient alors à résoudre  $i$  fois une corrélation stéréo car les équations sont indépendantes. Les images sont donc corrélées deux à deux, le critère n'est pas multi-caméras, mais la corrélation l'est.

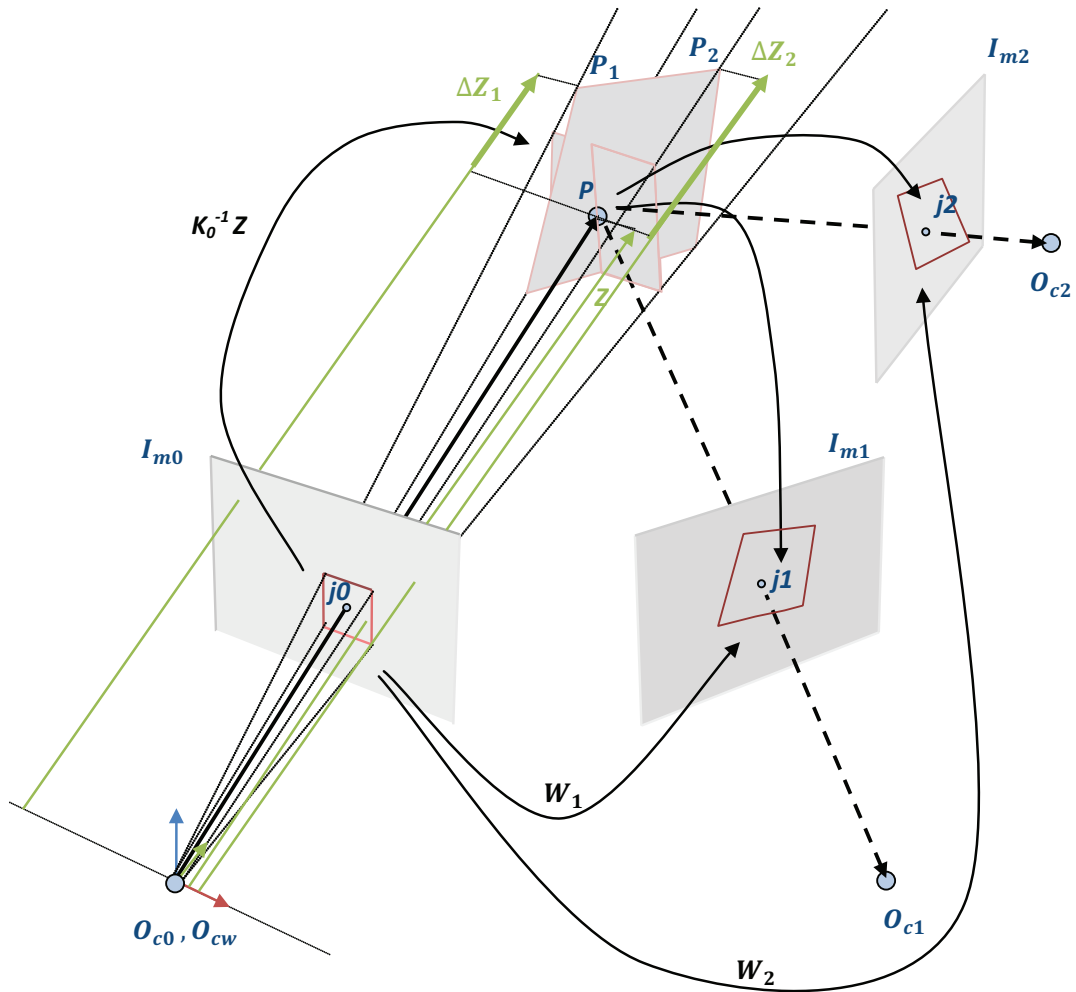


Figure 4.2 - Représentation de l'homographie induite d'un plan pour le critère de corrélation multi-caméras.

Dans le deuxième cas, il est nécessaire d'utiliser un élément fédérateur ou commun à toutes les images. Nous utilisons le plan de l'homographie à travers le critère 3D comme dans (Habbecke and Kobbelt, 2006). Celui-ci est défini par un plan exprimé dans le repère monde et est associé à chaque fenêtre de corrélation de l'image de référence (fig. 4.2). Il tire partie des paramètres de calibrage du système de caméras. Quelque soit le nombre d'images, il est exprimé par les paramètres  $(Z, \Delta Z_1, \Delta Z_2)$  permettant de calculer les points  $(P, P_1, P_2)$  associés au plan. Son nombre de paramètres reste donc constant quelque soit le nombre de vues.  $W$  s'écrit de la même forme que pour le critère stéréo (équation 3.29) :

$$W_i = K_i [R_i | t_i] \begin{bmatrix} -D & 0 & 0 \\ 0 & -D & 0 \\ 0 & 0 & -D \\ A & B & C \end{bmatrix} K_0^{-1} \quad (4.3)$$

## 4.2 Image de référence

Au-delà du critère multi-caméras, l'extension des algorithmes de corrélation d'images n'est pas chose triviale. En effet ceux-ci effectuent généralement l'appariement en partant d'une image



de référence pour aller vers plusieurs images. Pour les algorithmes que nous utilisons, le choix de l'image de référence, influence directement le nuage de points 3D reconstruit. Ce sont en effet les points 3D liés aux points 2D de l'image de référence qui sont reconstruits. De plus les points non visibles dans l'image de référence ne sont pas corrélés même s'ils sont visibles dans au moins deux autres images.

Pour illustrer ce problème, nous utilisons un jeu d'images représentant une pièce circulaire réalisée par formage incrémental à l'ENSM de Besançon (fig. 4.3). Les caméras sont disposées autour de la pièce, à environ 1,5m. La pièce est vue de dessus, et les focales utilisées sont de 25mm.

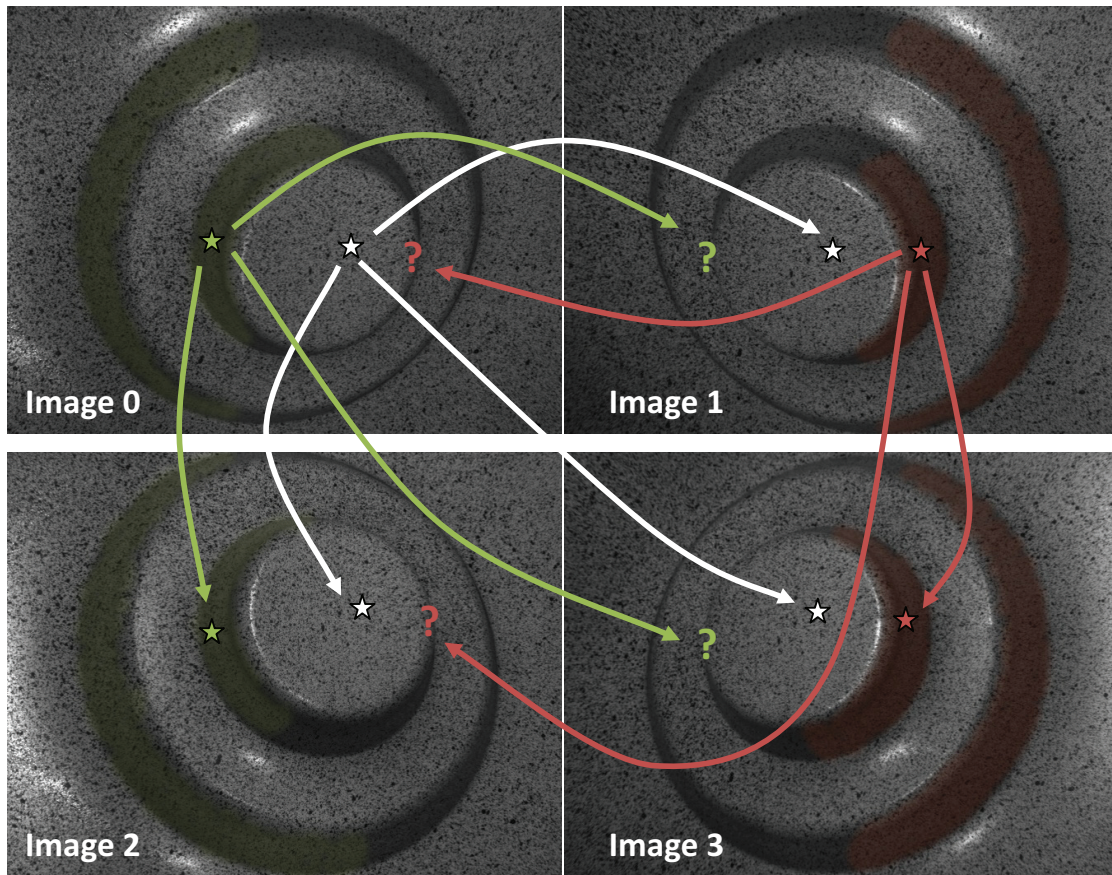


Figure 4. 3 - Illustration des problèmes liés à la corrélation multi-images (choix de l'image de référence)

Les zones grises non colorées sont vues dans les quatre images. Si l'on considère le point marqué par une étoile blanche dans l'image 0, ses correspondants sont visibles dans les images 1, 2 et 3. Quelle que soit l'image de référence, ces zones peuvent être reconstruites en 3D. Le point marqué par une étoile verte n'est présent que dans les images 0 et 2. La partie de l'objet correspondante ne peut être reconstruite que si une de ces deux images est choisie comme référence. De manière analogue, le point marqué par une étoile rouge n'est vu que dans les images 1 et 3, et la partie de l'objet correspondante ne peut être reconstruite que si l'une de ces deux images est choisie comme référence.

Pour reconstruire la totalité de l'objet en 3D, il est donc nécessaire de démarrer plusieurs fois les algorithmes de corrélation à partir d'une image différente. Dans le cas de la figure 4.3, pour reconstruire tout le tour de l'objet, il faut effectuer une corrélation entre l'image 0 et 1, une corrélation entre 0 et 2, une corrélation entre 2 et 3, puis une corrélation entre 1 et 3. Il faut au minimum choisir deux images de références : 0 et 3, ou bien 1 et 2. La détermination des images de référence n'est pas chose aisée pour l'ordinateur. En effet, bien qu'un opérateur puisse facilement identifier un nombre de corrélation minimale à effectuer, et donc choisir les images de référence en conséquence, la tâche se révèle plus complexe à réaliser automatiquement, et nécessite bien souvent d'accomplir de manière exhaustive toutes les corrélations possibles. Des zones semblables sont alors corrélées plusieurs fois bien que les points appariés les composant soient différents. Une corrélation entre 0 et 1 et une corrélation entre 2 et 3 permettra de reconstruire par exemple le haut de l'objet à partir de points différents. Ceci allonge excessivement le temps de calcul, et de plus crée une résolution inégale du nuage de points 3D reconstruit ; les zones visibles dans les quatre images sont représentées par un nuage plus dense que les zones vues par deux ou trois caméras, car reconstruites plusieurs fois. De plus l'utilisation d'algorithmes de reconstruction 3D tel que l'ajustement de faisceaux se révèle délicat de par le nombre de points, et du fait d'un nombre d'inconnues trop important. Exploiter au mieux les grappes de caméras implique que la corrélation multi-caméras permette d'utiliser une reconstruction multi-caméras telle que l'ajustement de faisceaux. Dans cette optique, nous proposons d'introduire le modèle CAO quand celui-ci est disponible afin de lever le problème du choix de l'image de référence.

### 4.3 Utilisation du modèle CAO comme référence

Afin de supprimer l'étape de choix de l'image de référence, nous proposons d'utiliser le modèle CAO comme référence quand celui-ci est disponible. La première étape à effectuer dans cette optique est d'assurer la concordance entre le repère monde et le repère du modèle CAO. Pour cela nous avons besoin de recalcr le modèle CAO à un modèle 3D temporaire. Celui-ci peut être un modèle grossier acquis avec une faible résolution (un pas de corrélation plus large peut être choisi pour accélérer le traitement) ou bien n'être qu'un morceau de la pièce, présentant assez d'amers géométriques pour être recalcr. Le recalcr est effectué par l'algorithme ICP à l'aide du logiciel Geomagic©. Avoir un recalcr non parfait n'est pas handicapant dans la mesure où le modèle numérisé final repose uniquement sur la corrélation d'images. Le modèle CAO ne fait qu'apporter une estimée initiale à l'étape de corrélation.

Il est possible de tirer parti de plusieurs éléments du modèle CAO avant de lancer la phase de corrélation. Ce dernier peut être utilisé pour obtenir une estimée initiale de la position des points à apparier mais peut aussi donner une estimée initiale des paramètres de la transformation de fenêtre.

Une autre utilisation du modèle consiste à détecter les occultations et les zones de fortes pentes afin de les écarter lors de la phase de corrélation.

Dans notre cas nous utilisons tous ces éléments dans l'ordre suivant :

1. Acquisition d'un modèle 3D grossier ou d'une partie de la pièce



2. Le modèle CAO est recalé dans le repère monde
3. Les occultations possibles sont détectées dans les images
4. Les points 3D sont projetés dans les zones non occultées des différentes images
5. Les points ainsi projetés permettent d'initialiser la corrélation d'images, d'obtenir des correspondants à travers les images en vue d'une reconstruction 3D

### 4.3.1 Initialisation des paramètres

Afin d'illustrer l'initialisation des paramètres de la corrélation d'images, nous utilisons un jeu d'images représentant une pyramide réalisée à l'ICA-Albi par formage incrémental (Orteu et al., soumis). Celle-ci a aussi été numérisée par le système Handyscan© et nous disposons donc d'un modèle de comparaison qui nous permettra d'évaluer notre approche. Quatre caméras ont été disposées autour de la pièce et l'observent de dessus sous quatre points de vues différents (cf. figure 1.3). La focale utilisée est de 16mm, les caméras sont à environ 1,5m de l'objet. La pyramide a reçu un mouchetis de type peinture afin d'apporter la texture nécessaire aux algorithmes de corrélation d'images (fig. 4.4). Les caméras ont été fortement calibrées via les outils de calibrage de l'ICA-Albi. Une mire de calibrage composée de 64 points a été déplacée à travers le champ de vue des caméras. 10 positions de mires ont été utilisées afin de calibrer le système, ce qui a conduit à estimer 302 paramètres et 1280 équations. L'erreur de reprojection de ce calibrage multi-caméras est de 0,021 pixels. La distance moyenne des points de mires non utilisées lors du calibrage est également de 0,049 pixels.

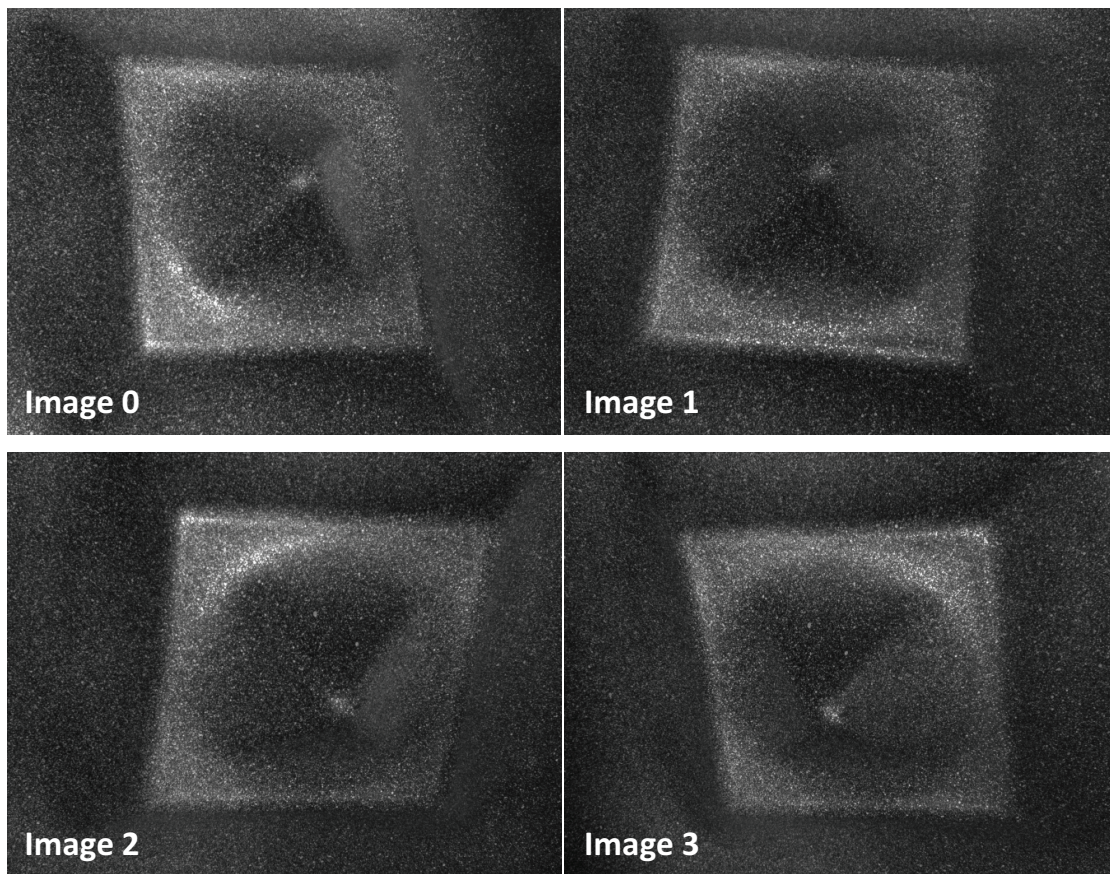


Figure 4. 4 - Pyramide réalisée par formage incrémentale

Dans un premier temps, nous initialisons juste les coordonnées des points à apparier. La taille de la fenêtre de corrélation est de 21 pixels pour une résolution spatiale de 3.48 pixels/mm. Après corrélation puis reconstruction, les résultats sont visuellement corrects pour les surfaces suffisamment fronto-parallèles aux caméras (fig. 4.5). Quand la pente est trop forte, le résultat final se voit fortement dégradé et de nombreuses irrégularités apparaissent lors de la reconstruction 3D. L'initialisation des coordonnées à elle seule ne permet pas de démarrer correctement la corrélation.

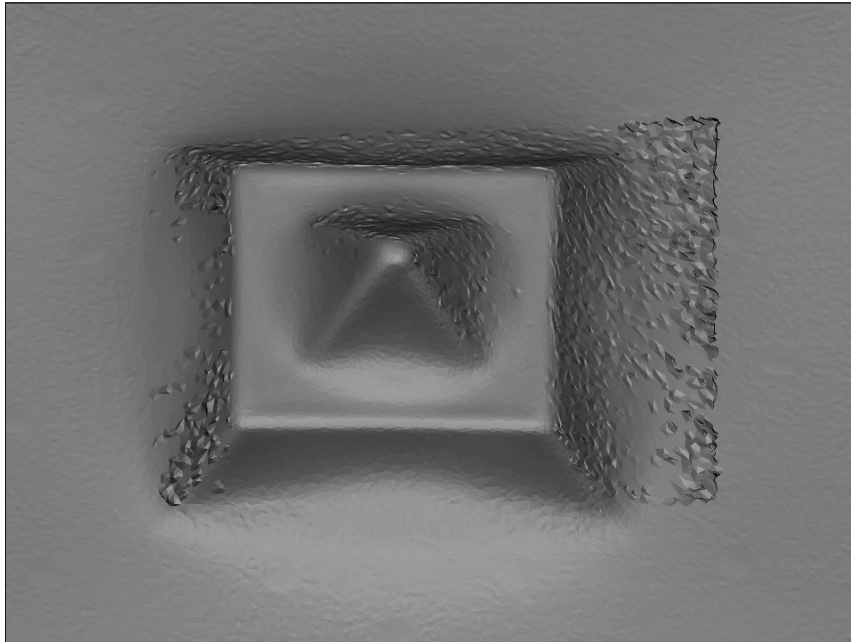


Figure 4.5 - Pyramide reconstruite en 3D après corrélation d'images initialisée sur la position des points 2D

Pour améliorer le précédent résultat, nous initialisons ensuite tous les paramètres du modèle de fenêtre. Nous utilisons pour cela l'équation de l'homographie induite d'un plan.

Sur la figure 4.6, nous pouvons voir les fenêtres de corrélation déformées lors de l'initialisation en jaune et les fenêtres de référence en bleue. Nous observons que les erreurs présentes sur la reconstruction 3D de la figure 4.7 correspondent principalement aux fenêtres largement déformées.



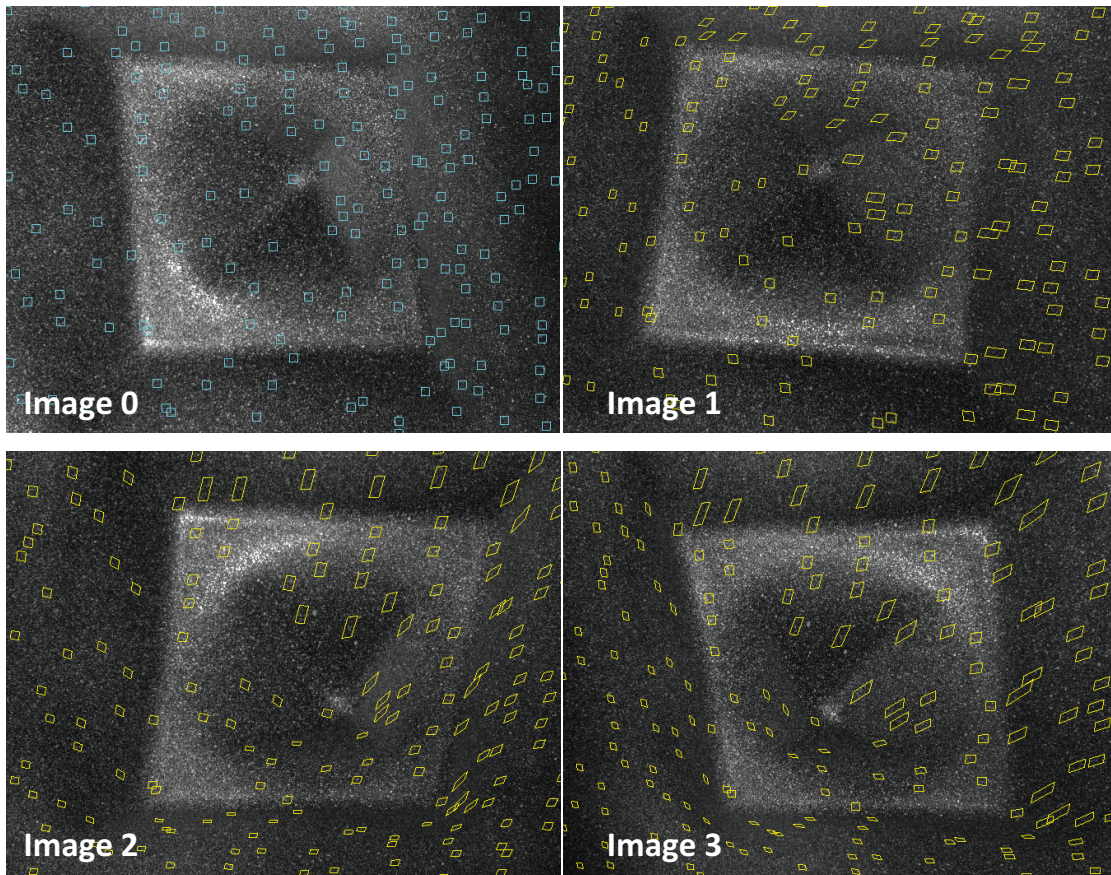


Figure 4. 6 - Fenêtres de corrélation déformées après initialisation des paramètres

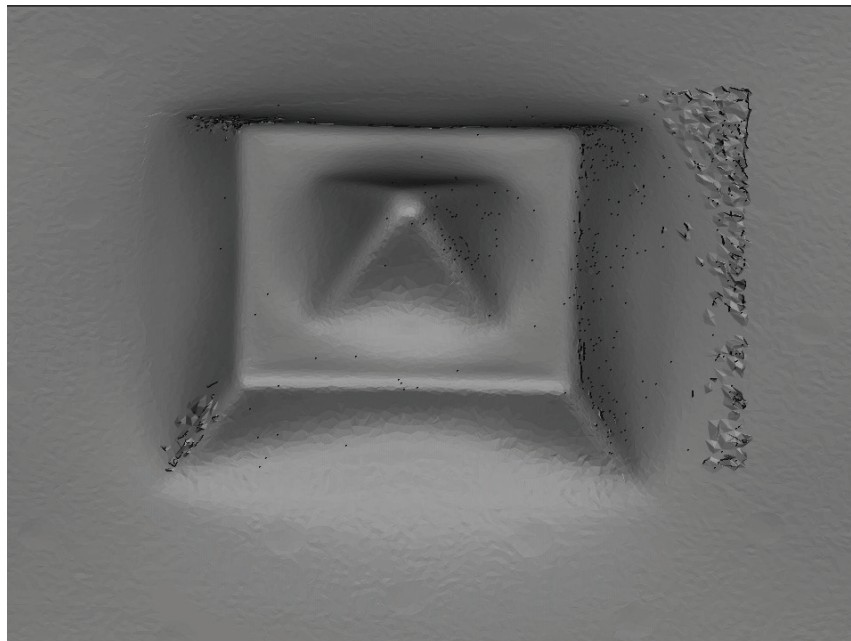


Figure 4. 7 - Pyramide reconstruite en 3D après corrélation d'images initialisée sur tous ses paramètres

Les résultats obtenus sont visuellement meilleurs mais présentent toujours de nombreuses irrégularités sur les arêtes gauches de la pièce et sur les bords de l'image (fig. 4.7). L'erreur des bords, de forme légèrement arrondie fait fortement penser à une erreur liée aux distorsions radiales. Nous introduisons donc la correction de la distorsion dans l'équation de l'homographie. La surface du modèle obtenu est alors complètement lisse et ne présente plus d'irrégularité (fig. 4.8).

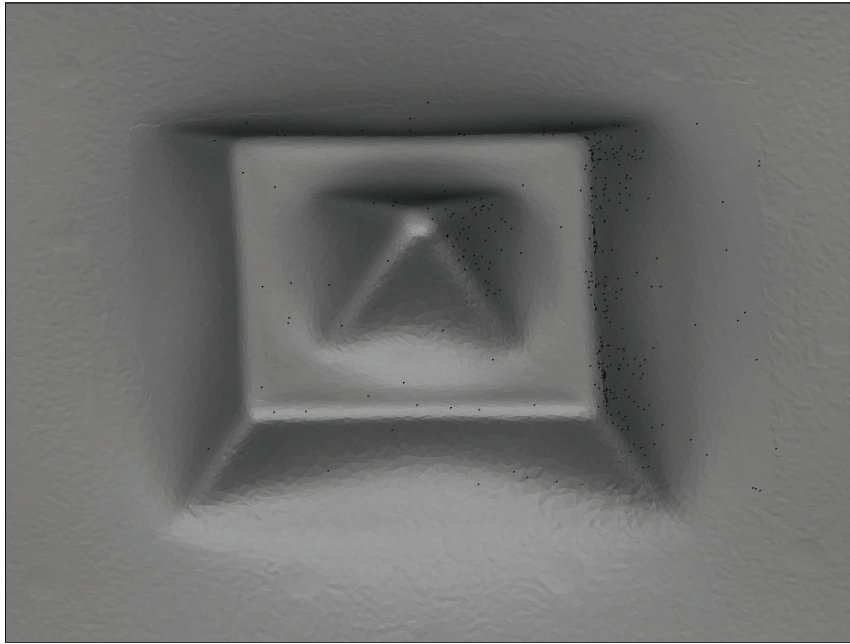


Figure 4. 8 - Pyramide reconstruite en 3D après corrélation d'images initialisée sur tous ses paramètres, et en introduisant la distorsion

Nous comparons maintenant à l'aide du logiciel Geomagic®, la forme de la pyramide numérisée en utilisant la corrélation par propagation de germe à la mesure réalisée par Handyscan©. Nous rappelons que l'incertitude de ce système est d'environ 0,05mm. Les résultats obtenus (fig 4.9) montrent une erreur moyenne et un écart-type faibles de l'ordre de 0,05 mm. Les multiples taches circulaires qui provoquent de fortes erreurs sur le tour de la pièce correspondent aux pastilles autocollantes utilisées par le système HandyScan® afin de recalibrer les différentes prises de vues. Les pastilles ont été retirées avant la mesure par corrélation multi-images.



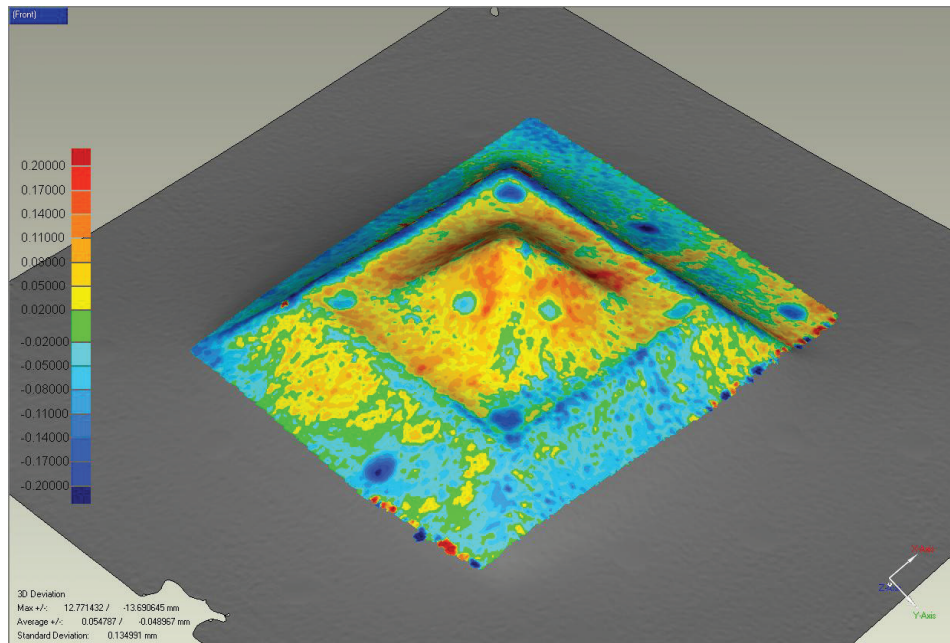


Figure 4. 9 - Comparaison de la reconstruction 3D après corrélation par propagation et du modèle 3D obtenu par HandyScan®

Nous comparons ensuite la forme de la pyramide numérisée en utilisant la corrélation à partir du nuage de points 3D et la mesure faite par HandyScan® (fig 4.10). La moyenne et l'écart-type sont aussi de l'ordre de 0,05mm.

Les résultats obtenus en utilisant le nuage de points 3D sont globalement identiques aux résultats obtenus par propagation de germe. Les erreurs liées aux occultations sont tout de même évitées et les contours plus précis. La détection des occultations est en général plus précise en partant du modèle CAO, qu'en utilisant des seuils lors de la propagation. De ce fait, l'erreur moyenne et l'écart type sont légèrement plus faibles lorsque nous partons du modèle 3D (Tableau 4.1).

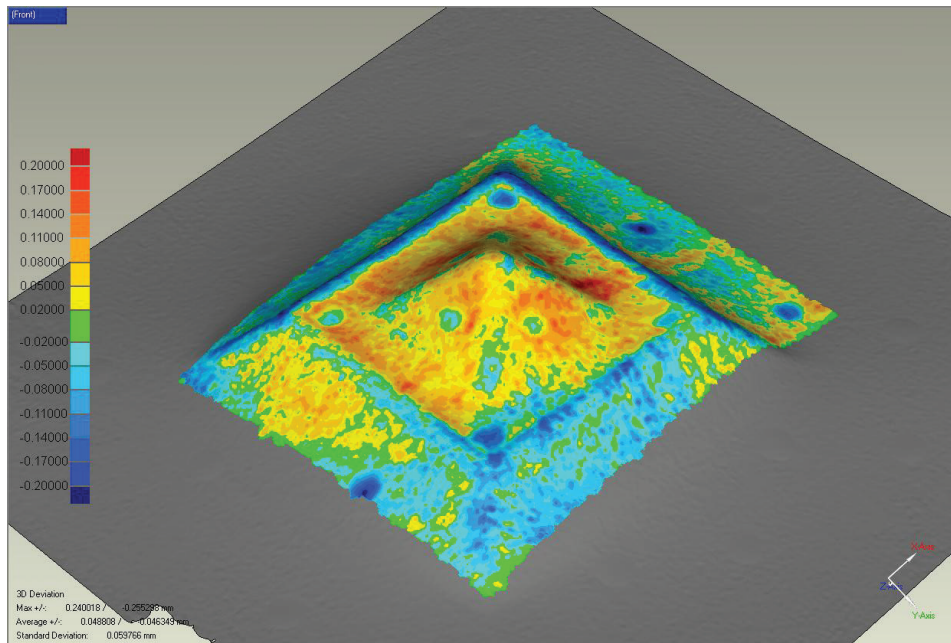


Figure 4.10 - Comparaison de la reconstruction 3D après corrélation initialisé à partir des points 3D et du modèle 3D obtenu par HandyScan®

Erreur (mm)	Corrélation	
	A partir de la propagation	A partir du modèle 3D
<b>Moyenne</b>	+0.054 / -0.049	+0.049 / -0.046
<b>Ecart type</b>	0.135	0.060

Tableau 4.1-Erreur moyenne et écart type issus de la comparaison entre les modèles 3D issus de la corrélation et le modèle HandyScan®

### 4.3.2 Modèle OpenGL et modèle de caméra

Bien que la librairie OpenGL permette de gérer facilement la visualisation 3D, les conventions utilisées vis-à-vis du modèle de visualisation diffèrent du modèle standard pinhole utilisé dans cette thèse (Ming, 2001), (Suqi, Guangjun and Zhenzhong, 2006). Nous n’entrerons pas dans le détail des calculs, mais il est à noter que quelques transformations sont nécessaires afin de pouvoir utiliser les paramètres de calibrage des caméras et donc de pouvoir détecter les occultations.

### 4.3.3 Détection des occultations

Nous allons maintenant présenter la détection des occultations à travers l’utilisation de fonctions implémentées sur cartes graphiques. Nous rappelons que le modèle CAO a préalablement été recalé dans le repère monde comme sur la figure 4.11.

La détection des occultations est une opération très utilisée en synthèse d’images, en particulier dans les moteurs 3D afin de s’affranchir du calcul de l’affichage des objets non visibles à l’écran. Plus connue sous l’appellation d’ « occlusion culling » que l’on pourrait traduire par « écarteur d’occultations », cette opération a été implémentée depuis quelques années sur de nombreuses cartes graphiques. Deux algorithmes sont généralement disponibles pour réaliser cette tâche : l’ « early-z-rejection » et l’ « occlusion query » (Nvidia, 2004).

L' « early-z-rejection » peut être appliquée lors de l'étape de rendu afin de comparer la valeur de profondeur de l'élément 3D courant avec les valeurs déjà présentes dans le z-buffer. Elle s'effectue lors de la « rasterisation ». Nous n'avons pas cherché à l'utiliser car la fonctionnalité décrite ci-après que nous avons essayée en premier, répondait correctement à nos besoins.

L' « occlusion query » est une extension implémentée dans OpenGL ou dans DirectX 9+ qui permet, par l'intermédiaire d'une requête adressée à la carte graphique, de savoir combien de pixels, pour un élément donné, sont arrivés à l'écran. « Arrivés à l'écran » signifie que ces pixels ont passé avec succès les tests habituels présents sur les cartes graphiques, à savoir : le test de champ de vue, le test sur la zone dessinée, le test de profondeur, le test sur le masque, et le test sur la composante alpha de la couleur. En ce qui nous concerne, nous nous sommes contentés du test de profondeur car seules les occultations liées à la géométrie du modèle nous intéressent. L'utilisation de l'« occlusion query » dans le but de détecter les occultations peut se schématiser comme suit :

1. Création d'une requête
2. Désactivation du rendu de l'écran
3. Rendu offline des faces du modèle
4. Désactivation du buffer de profondeur
5. Initialisation du début de la requête
6. Rendu offline des points 3D du modèle
7. Fin de la requête
8. Pour chaque point 3D de la requête : si le nombre de pixels  $> 0$  : le point 3D est visible

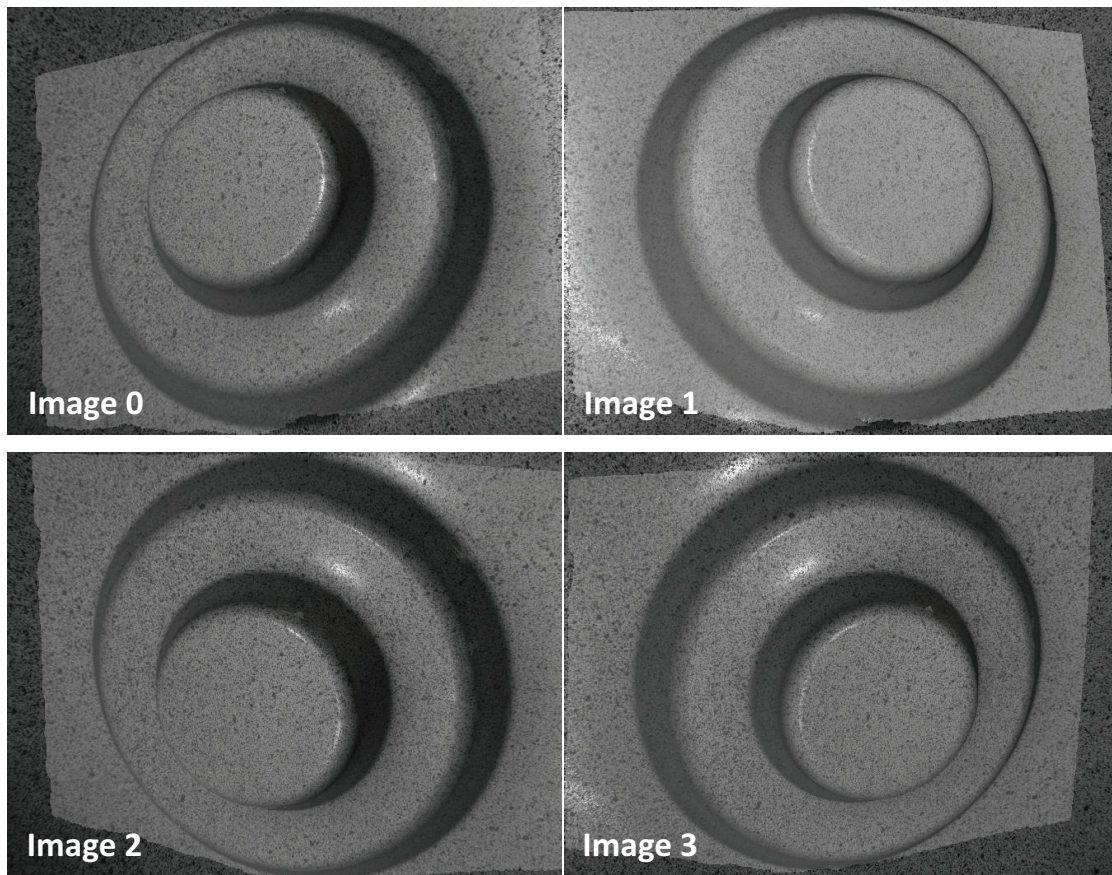


Figure 4. 11- Modèle CAO (en blanc transparent) superposé aux images après recalage

A noter que l'utilisation de l'« occlusion query » nécessite que les primitives à dessiner soient triées de la plus proche à la plus éloignée selon l'axe z. Nous avons contourné cet inconvénient en stockant d'abord les faces dans le z-buffer puis en appliquant ensuite la requête aux points 3D. Cette méthode n'est sûrement pas optimale en temps de calcul mais néanmoins suffisamment rapide pour notre application. A noter que les faces et les points 3D sont confondus, ce qui peut perturber légèrement le résultat de la requête. Pour pallier ce problème, un offset a été ajouté à chaque point 3D dans la direction de sa normale afin de le séparer de ses faces. Nous présentons sur la figure 4.12 les occultations détectées (en rouge) pour chacune des images du système multi-caméras.



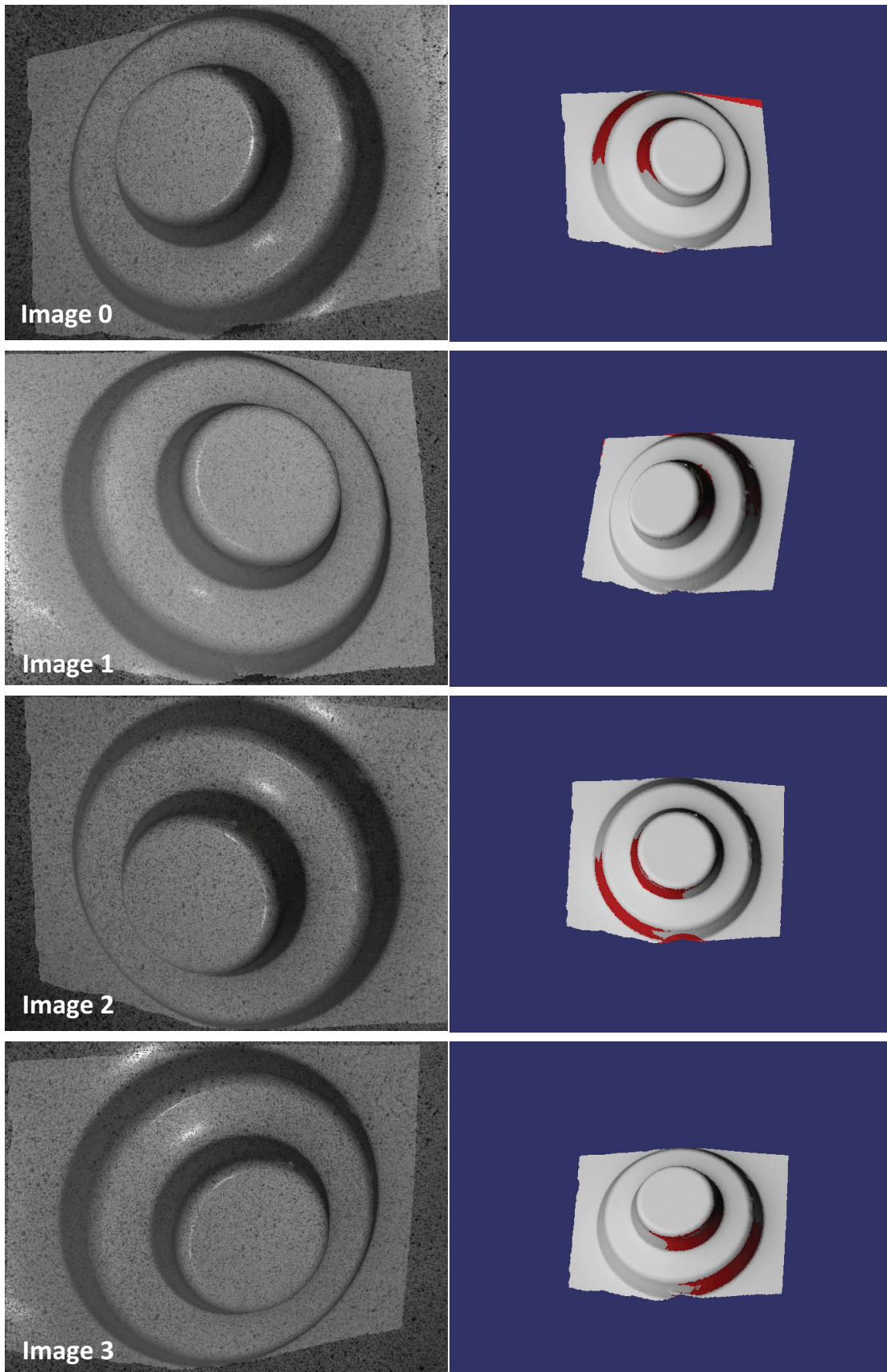


Figure 4. 12 - Détection des occultations dans les images 0, 1, 2 et 3

#### 4.3.4 Détection des zones de fortes pentes

La corrélation fine d'images, bien que permettant aux fenêtres de se déformer afin de compenser la distorsion projective de la scène, possède quelques limites. Il est admis que plus la surface observée est fronto-parallèle aux caméras plus la corrélation aura de chance de réussir, ce qui implique que plus la surface observée est inclinée par rapport aux caméras, et plus les résultats issus de la corrélation sont dégradés. Afin d'écarter la projection de ces surfaces (zones de fortes pentes) dans les images, nous avons mis en œuvre une procédure simple de détection basée sur l'angle formé par la normale d'un point 3D et le rayon optique d'une caméra. Nous avons fixé cet angle empiriquement autour de  $20^\circ$  et considérons donc une zone de fortes pentes comme possédant un angle supérieur à  $20^\circ$ . Les zones de fortes pentes sont considérées par la suite de la même façon que les occultations.

Nous présentons sur la figure 4.13 les zones de fortes pentes détectées (en rouge) pour chacune des images du système multi-caméras. Nous observons que ces zones sont bien plus larges que les zones d'occultations.

#### 4.3.5 Carte de visibilité

A partir d'un ensemble de caméras calibrées et d'un modèle CAO recalé dans le repère des caméras, nous sommes capables pour chaque image de dire si un point 3D est occulté ou dans une zone de forte pente. Nous pouvons donc pour chaque point dans une image savoir s'il est visible ou non. Ceci nous permet de construire une carte de visibilité de l'ensemble des points 3D. Autrement dit, nous pouvons étiqueter chaque point 3D, le projeter dans chaque image où il est visible en utilisant les paramètres de calibrage des caméras et lui associer un correspondant 2D. C'est avec cette carte de visibilité que nous initialisons la position des points 2D avant de lancer la corrélation.

#### 4.3.6 Modèle CAO et pièce présentant des défauts

Bien que l'utilisation du modèle CAO permette de lever l'ambiguïté du choix de l'image de référence, elle suscite un inconvénient qui peut se révéler handicapant quant à la détection de défauts. Une pièce comportant des défauts peut avoir subi de légères déformations : dans ce cas le modèle CAO et la forme à numériser sont relativement proches. La carte de visibilité permet alors d'obtenir des estimées initiales suffisantes pour démarrer la phase de corrélation. Mais la pièce peut aussi avoir subi des déformations plus importantes comme de profonds impacts ou un large pliage : dans ce cas le modèle CAO et la forme numérisée peuvent être éloignés après la phase de recalage ou bien, dans le pire des cas, peuvent ne pas être recalés du tout. L'initialisation de la corrélation devient alors insuffisante voire impossible, la prédiction des occultations ou des zones de fortes pentes peut alors être totalement erronée, et la carte de visibilité inutilisable.



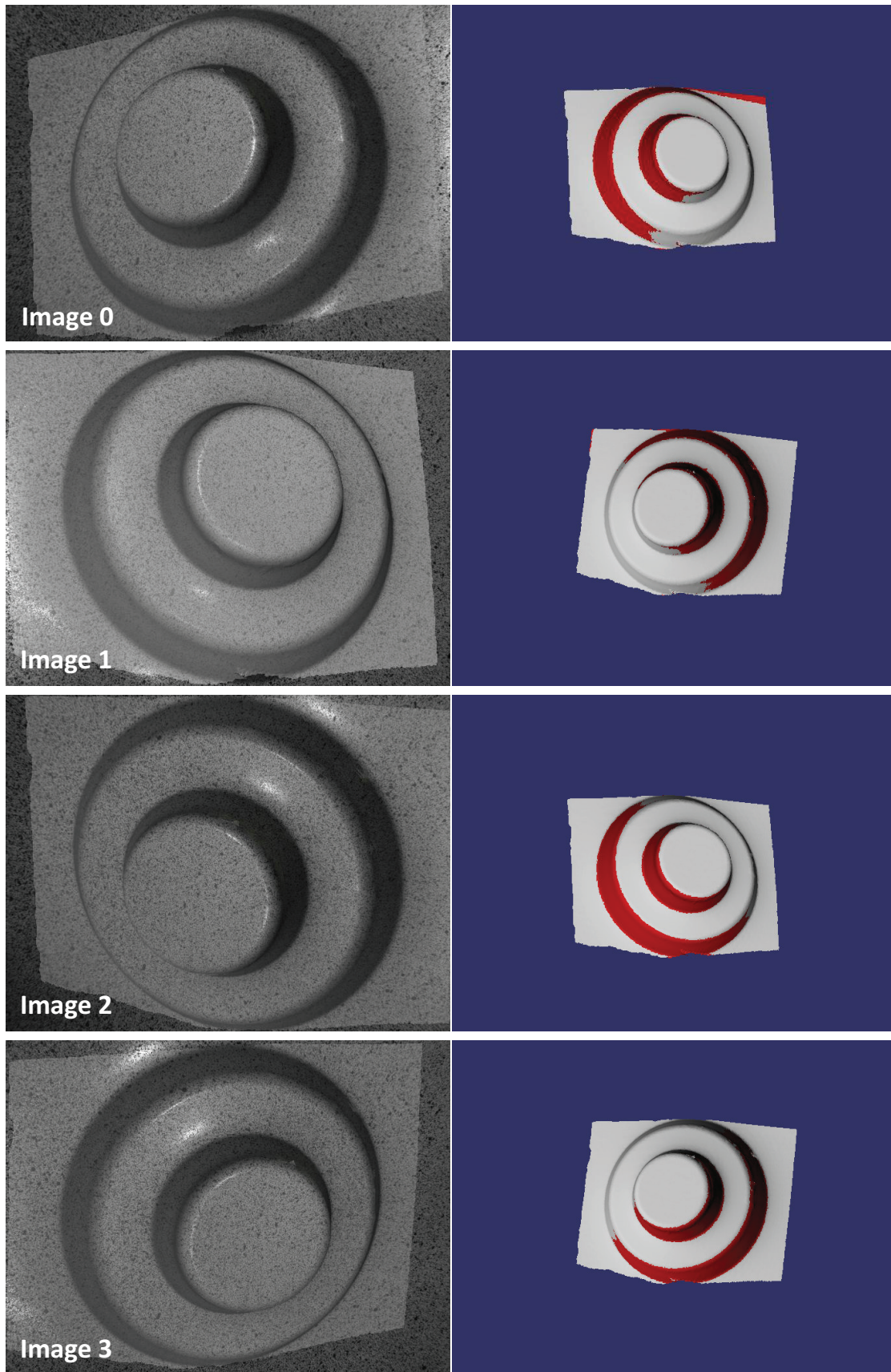


Figure 4. 13 - Détection des zones de fortes pentes dans les images 0, 1, 2 et 3

## 4.4 Reflets

Les pièces que nous numérisons peuvent être métalliques ou composites, ce qui en combinaison avec la vidéo-projection de mouchetis peut générer d'importants reflets spéculaires. Ces reflets peuvent être atténués en utilisant de la lumière polarisée (Morel et al., 2006), mais cette dernière peut être difficile à mettre en place pour des objets de grandes tailles. Dans notre cas, si la pièce est numérisée par un simple banc stéréo, le moindre reflet spéculaire empêchera la reconstruction 3D de la zone où celui-ci est présent. L'utilisation d'un système multi-caméras où les caméras sont disposées selon des points de vue différents permet de s'affranchir de ce problème et de reconstruire la pièce en totalité.

Pour illustrer nos propos, nous utilisons une pièce composite non peinte (fig. 4.14). Cette pièce est de couleur noire, et les fibres de carbone tissées forment une sorte de texture en damier à sa surface. En plus d'être fortement réfléchissante, cette pièce possède des orientations différentes de fibres qui modifient l'importance de la réflexion. Nous avons utilisé une fenêtre de corrélation de 19 pixels. La résolution spatiale est de 2 pixels / mm.

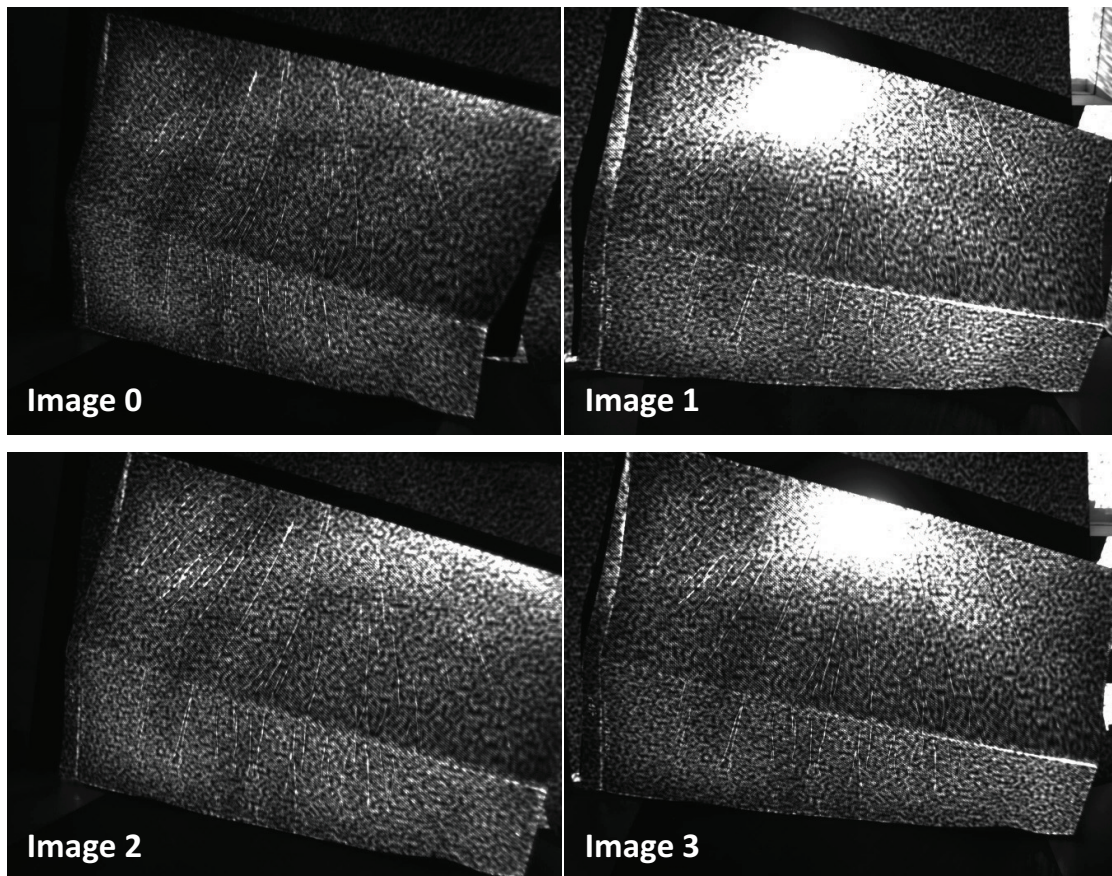


Figure 4. 14 - Pièce composite fortement réfléchissante

Nous présentons les résultats issus de la corrélation entre l'image 0 et l'image 1. Nous observons que le modèle ne peut être reconstruit au niveau de la tache spéculaire présente sur l'image 1 (fig. 4.15).



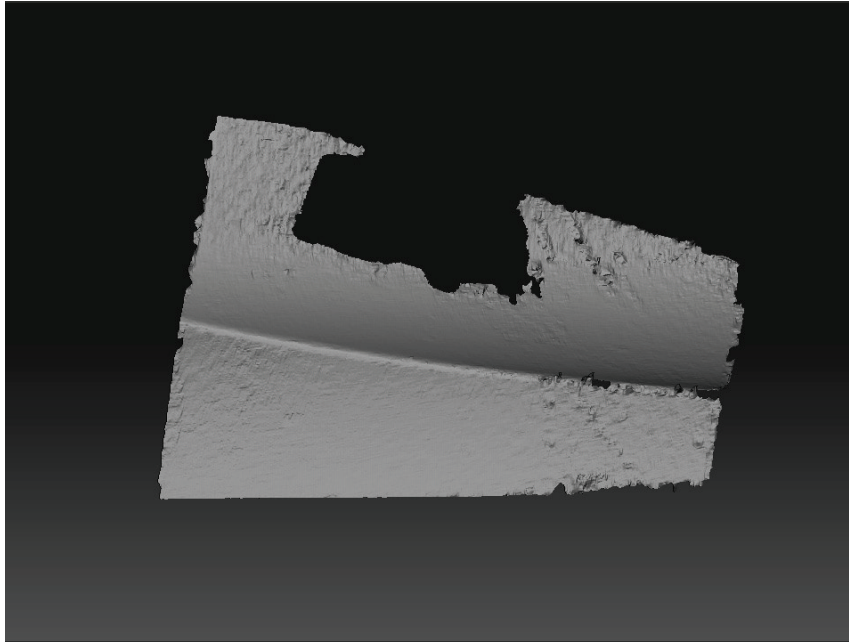


Figure 4. 15 - Reconstruction 3D après corrélation entre les images 0 et 1

Pour la corrélation entre l'image 0 et l'image 2, c'est le coin supérieur droit de la pièce qui ne peut être reconstruit à cause d'un petit reflet spéculaire et d'une partie de la pièce non visible sur l'image (fig. 4.16).

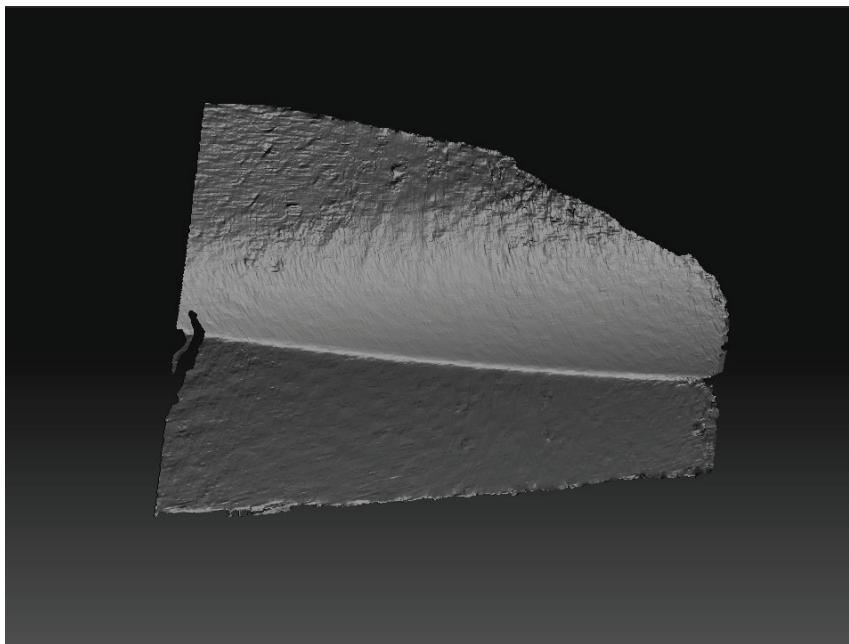


Figure 4. 16 - Reconstruction 3D après corrélation entre les images 0 et 2

En utilisant au moins les images 0, 1 et 2, nous pouvons reconstruire en totalité la pièce (fig. 4.17). Le modèle final obtenu peut paraître visuellement dégradé. En réalité la pièce n'est pas lisse et possède un grand nombre d'irrégularités de surface (sur le haut de la pièce par exemple). La résolution spatiale de 2 pixels/mm n'est pas suffisante pour toutes les observer. De plus, l'état très réfléchissant de la pièce nous empêche de réduire la fenêtre de corrélation pour

observer plus de détails. La corrélation tend à échouer pour des fenêtres de taille inférieure à 19 pixels.

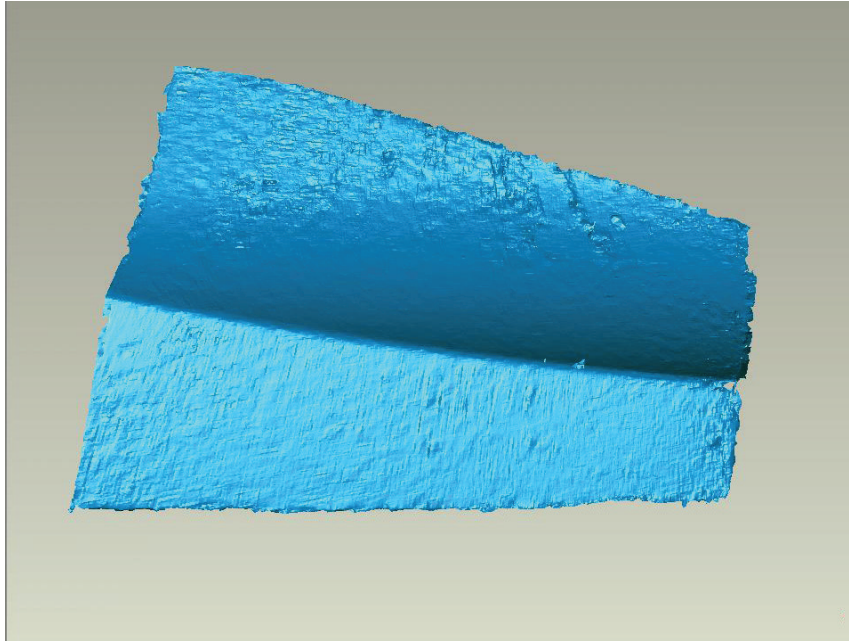


Figure 4. 17 - Reconstruction 3D finale en utilisant les images 0,1 et 2

#### 4.5 Evaluation du critère 3D

Comme pour le chapitre précédent, nous utilisons les images synthétiques 3D afin d'évaluer nos critères. Nous comparons ici le critère 3D multi-images au critère 3D stéréo utilisé dans un contexte multi-caméras (en gardant la même image de référence). Nous présentons cette fois, l'erreur correspondant à la distance euclidienne entre les points 3D de la scène synthétique et les points 3D obtenus après reconstruction 3D plutôt que l'erreur de corrélation dans chaque image. Les images tests utilisées sont les images de la sphère de la figure 3.21 et d'un plan tous deux mouchetés par bruit de Perlin (Annexe B). Les quatre caméras (symbolisées chacune par un repère) sont disposées face à la sphère et légèrement inclinées vers elle. Pour générer les images du plan nous avons remplacé la sphère par un plan coplanaire au plan (x,y). L'image de référence choisie est l'image 3 (l'origine du repère Matlab® des figures 4.18 et 4.19 est inversé verticalement).

Afin de calculer les erreurs moyennes et l'écart type sur les images de la sphère, nous avons éliminé les valeurs aberrantes correspondant aux bords de la sphère.

Erreur (mm)	Sphère		Plan	
	Plan 3D	Plan 3D Multi	Plan 3D	Plan 3D Multi
<b>Moyenne</b>	0.077	0.042	0.02	0.017
<b>Ecart type</b>	0.026	0.027	0.012	0.013

Tableau 4. 2-Erreur moyenne et écart type issus de la comparaison entre la sphère reconstruite, le plan et leur vérité terrain synthétique

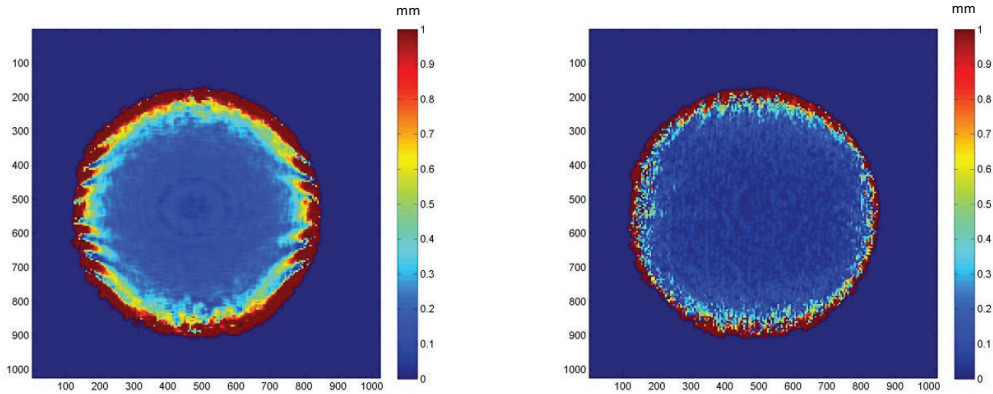


Figure 4. 18- Distance euclidienne entre la sphère reconstruite et la vérité terrain

Sur les images de la sphère, l'utilisation du critère 3D diminue presque par 2 l'erreur moyenne. L'écart type reste quant à lui constant. L'amélioration se porte essentiellement au centre de la sphère, les bords restent dans les deux cas une source importante d'erreurs (fig. 4.18).

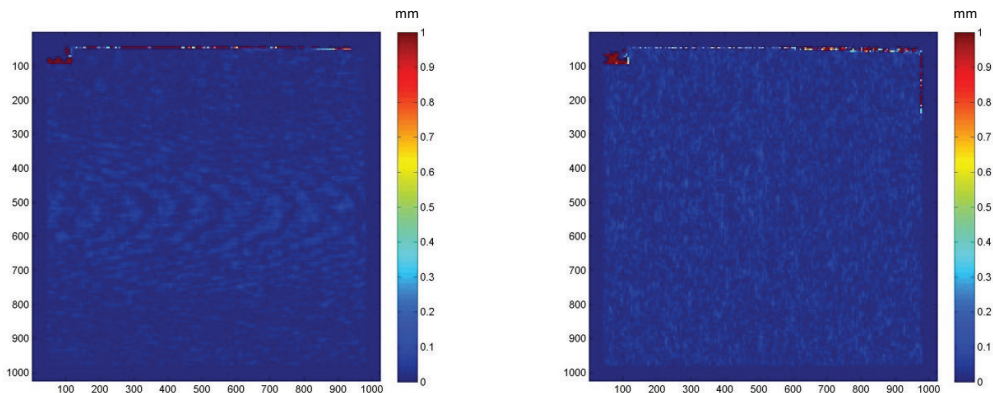


Figure 4. 19 - Distance euclidienne entre le plan reconstruit et la vérité terrain

Sur les images du plan (fig. 4.19), l'utilisation du critère 3D diminue également l'erreur moyenne mais de façon négligeable. L'écart type reste constant.

L'utilisation du critère 3D multi-images permet d'améliorer l'erreur moyenne de reconstruction, en particulier sur les images de la sphère, tout en gardant un écart type constant (Tableau. 4.2). Ceci pousse à la création de grappe de caméras afin de profiter du critère multi-caméras.

## 4.6 Conclusion

Nous avons présenté comment étendre les algorithmes de corrélation d'images à un contexte multi-caméras, tant au travers du critère de corrélation que dans le choix de la référence utilisée pour initialiser les algorithmes de corrélation. L'utilisation du modèle CAO lorsqu'il est disponible permet de s'affranchir des occultations avant l'étape de corrélation et fournit des résultats semblables à la méthode par propagation de germe lorsque les paramètres sont correctement initialisés.

Nous avons vu qu'un système multi-caméras pouvait permettre de s'affranchir des reflets spéculaires dus en partie à la projection par vidéoprojecteur de mouchetis synthétique. Enfin le critère multi-caméras 3D permet d'améliorer de façon non négligeable les résultats dans les zones non planes. L'utilisation de ce critère implique que les caméras soient calibrées entre elles et forment des grappes de caméras.

## 4.7 Bibliographie

- Furukawa, Y. and Ponce, J. (2007) 'Accurate,dense,and robust multi-view stereopsis', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Habbecke, M. and Kobbelt, L. (2006) 'Iterative multi-view plane fitting', *International Workshop in Vision, Modeling, and Visualization*, pp. 73-80.
- Ming, L. (2001) 'Correspondence Analysis Between The Image Formation Pipelines of Graphics and Vision', *IX Spanish Symposium on Pattern Recognition and Image Processing*.
- Morel, O., Stolz, C., Meriaudeau, F. and Gorria, P. (2006) 'Active Lighting Applied to 3D Reconstruction of Specular Metallic Surfaces by Polarization Imaging', *Applied Optics*, vol. 45, no. 17, pp. 4062-4068.
- Nvidia (2004) 'GPU Gems: Programming Techniques, Tips, and Tricks for Real-Time Graphics', [http://developer.nvidia.com/object/gpu\\_gems\\_home.html](http://developer.nvidia.com/object/gpu_gems_home.html).
- Okutomi, M. (1993) 'A multiple-baseline stereo', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 353-363.
- Orteu, J.-J., Bugarin, F., Harvent, J., Robert, L. and Velay, V. (soumis) 'Multiple-camera instrumentation of a single point incremental forming process pilot for shape and 3D displacement measurements : methodology and results', *Experimental Mechanics*.
- Suqi, L., Guangjun, Z. and Zhenzhong, W. (2006) 'The determination of the intrinsic and extrinsic parameters of virtual camera based on OpenGL', *Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control, and Computer Simulation*.
- Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R.I. and Fitzgibbon, A.W. (2000) 'Bundle adjustment - A modern synthesis', *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 298-372.





# 5. Recalage et reconstruction 3D

---

Nous avons décrit dans les chapitres 3 et 4 les étapes permettant d'obtenir des appariements 2D à travers les images. Ces points-images correspondants vont permettre de retrouver l'information de profondeur, autrement dit la troisième dimension à travers l'étape de reconstruction 3D. La méthode de reconstruction est décrite dans la section 5.1. La qualité de reconstruction des points 3D dépendant des paramètres de calibrage utilisés, nous présenterons comment nous avons évalué le calibrage en section 5.1.3 et présenterons un module d'assistance au choix des bancs stéréo et grappes en section 5.1.4. Les points 3D reconstruits forment un nuage de points 3D qu'il est nécessaire de transformer en une surface continue si l'on souhaite l'utiliser a posteriori, pour des comparaisons de formes par exemple. Nous présenterons comment nous avons maillé nos pièces dans la section 5.1.5. Selon la manière dont le système multi-caméras a été disposé et calibré, plusieurs nuages de points 3D peuvent être obtenus. Nous présenterons dans la section 5.2, l'étape de recalage permettant de ramener tous les nuages de points 3D dans un même repère. Enfin nous comparerons dans la section 5.3 nos méthodes de mesure à d'autres systèmes de mesure à travers la numérisation de la pièce 'banane'.

## 5.1 Reconstruction 3D

Afin de reconstruire nos points 3D, nous utiliserons deux approches différentes selon la façon dont les points ont été appariés, c'est-à-dire suivant que l'on a utilisé un critère de corrélation classique (type affine) ou bien un critère 3D (homographie induite d'un plan). Le critère affine contrairement à l'homographie induite d'un plan n'utilise pas d'information concernant la structure de la scène, et nécessite donc d'utiliser des algorithmes dédiés à la reconstruction 3D. Nous présentons les deux approches ci-dessous :

La première approche est l'étape bien connue de triangulation et sera choisie lorsqu'un critère classique de corrélation est utilisé. Il existe plusieurs méthodes de triangulation basées sur une résolution linéaire d'un système aux moindres carrés (Hartley and Zisserman, 2004). Nous présenterons l'une d'elle dans la section 5.1.1. Ces méthodes ne sont malheureusement pas optimales et ne modélisent pas les aberrations géométriques telles que les distorsions. Une approche courante et non linéaire est alors de minimiser la norme  $L_2$  de l'erreur de reprojection. Cette étape dans le cadre multi vues est généralement résolue en deux phases, consistant à la résolution non linéaire du problème par un ajustement de faisceaux initialisé par une méthode linéaire (Triggs et al., 2000). Nous utiliserons cette approche et l'ajustement de faisceaux développé au laboratoire par Florian Bugarin pour le calibrage. A noter que cette méthode n'est pas optimale dans le sens où elle ne trouve qu'un minimum local au problème et démarre de l'estimée initiale obtenue par un premier moindre carré. Pour obtenir un optimum global, une résolution polynomiale a été proposée par (Hartley and Sturm, 1997) pour deux vues et plus récemment par (Stewénius, Schaffalitzky and Nistér, 2005) pour trois vues. Une approche par 'branch and bound' a été proposée par (Agarwaj et al., 2005) et une par minimisation de la norme  $L_\infty$  par (Kahl, 2005).

La deuxième approche consistera à utiliser le premier paramètre du critère 3D. En effet, l'information liée à la structure de la scène est déjà comprise dans le critère de corrélation, et le premier paramètre de l'homographie induite d'un plan est la profondeur  $Z$  du point 3D recherché. Il est donc possible de retrouver les coordonnées d'un point 3D physique à partir de ce paramètre. Nous présentons ce point dans la section 5.1.2.

### 5.1.1 Triangulation

Pour chaque caméra  $i$ , sa matrice associée  $M_i$  est exprimée par :

$$M_i = K_i[R_i|t_i] \quad (5.1)$$

La relation entre un point 3D  $\tilde{P}(X, Y, Z, 1)$  et un point image  $p(u, v)$  s'écrit:

$$p = \begin{pmatrix} \frac{M_i^1 \tilde{P}}{M_i^3 \tilde{P}} \\ \frac{M_i^2 \tilde{P}}{M_i^3 \tilde{P}} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

En passant le dénominateur à gauche, chaque point 3D donne lieu à  $2 * i$  équations. Nous obtenons le système linéaire suivant :

$$\begin{aligned} (uM_i^3 - M_i^1)\tilde{P} &= 0 \\ (vM_i^3 - M_i^2)\tilde{P} &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

### 5.1.2 Critère 3D

Quand le critère 3D est utilisé lors de la corrélation, trois paramètres permettant de définir le plan de l'homographie sont optimisés. Le premier de ces paramètres est la coordonnée  $Z$  du point 3D recherché. Pour reconstruire le point 3D entièrement, il suffit de trouver les coordonnées  $X$  et  $Y$ , ce qui s'effectue comme suit, en projetant au niveau 3D les points 2D à l'aide du paramètre  $Z$  :

$$P = d^{-1}(K_0^{-1}p) Z \quad (5.4)$$

avec  $d^{-1}()$  la fonction d'inversion du modèle de distorsion, comme présentée dans la section 2.1.2.1.

### 5.1.3 Evaluation du calibrage

La qualité de reconstruction d'un nuage de points 3D dépend fortement de la qualité du calibrage des caméras. La procédure de calibrage utilisée a été développée par Florian Bugarin, ingénieur de recherche au laboratoire, comme extension des travaux de (Garcia, 2001). Afin de s'assurer de la qualité du calibrage de nos expériences, nous avons comparé celui-ci à des systèmes existants (VIC3D®) et l'avons évalué par rapport à plusieurs critères qui sont :

- L'erreur de reprojection issue de la phase d'ajustement de faisceaux qui exprime en pixel une erreur dépendant des paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras. Plus cette erreur est élevée et moins le calibrage est précis.

- La distance en pixel entre des points de mires et leur droite épipolaire associée, calculée sur des images n’ayant pas servi à calibrer. L’erreur exprimée dépend des paramètres intrinsèques et extrinsèques des caméras et une erreur faible indique généralement un calibrage correct.
- La somme des distances euclidiennes entre les points de chaque mire et leur barycentre. Cette mesure comparée à celle de la mire théorique permet de vérifier si la métrique a été correctement estimée.

### 5.1.4 Assistance au calibrage et au choix des grappes et bancs stéréo

Nous proposons dans cette partie un module simple d’assistance au calibrage permettant d’orienter les choix de l’opérateur quant à la détection de bancs stéréo et de grappes de caméras. Ce module est entièrement basé sur la corrélation d’images, et permet pour chaque couple d’images de calculer le pourcentage de recouvrement entre ces images. Par exemple, si l’on prend l’image 1 comme image de référence, la corrélation n’aura pas lieu pour les images 0 et 5, et une valeur de 0% de recouvrement sera attribuée à ces deux paires. Si l’on corrèle entre l’image 1 et l’image 4, une large zone de recouvrement est détectée (cf. figure 5.1) et son score correspondant de 65% calculé (cf. tableau 5.1). Le pourcentage est calculé à partir du nombre de points corrélés, avec la possibilité comme lors du recalage photométrique d’écarter des points peu fiables à l’aide des cartes de seuils (cf. figure 5.10) issues de la corrélation.

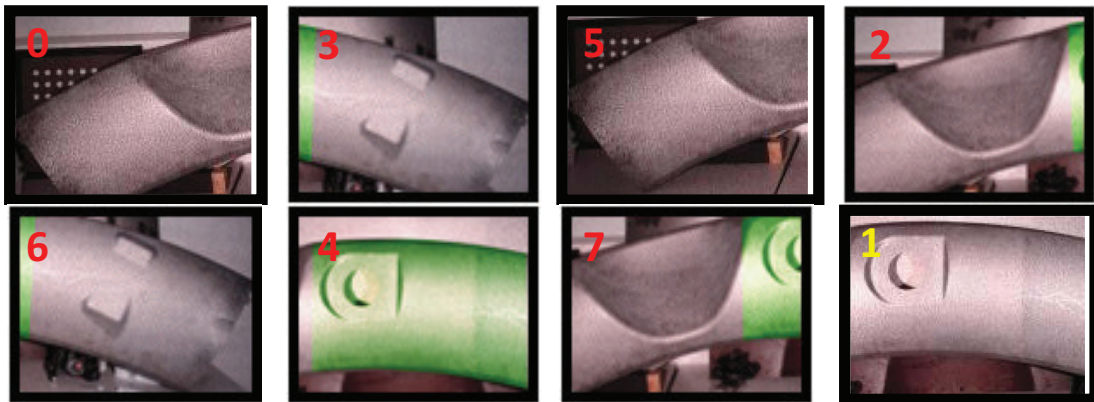


Figure 5. 1- Images utilisées pour calculer le recouvrement entre les images

%	0	1	2	3	4	5	6	7
0	-	0	35	0	0	65	0	36
1		-	8	7	67	0	6	15
2			-	0	10	42	0	62
3				-	5	0	64	0
4					-	0	9	10
5						-	0	37
6							-	0
7								-

Tableau 5. 1- Pourcentage de recouvrement entre chaque paire d’images

Une fois tous les couples évalués, l’opérateur peut calibrer les caméras par grappe ou bien par bancs stéréo en se référant au tableau 5.1. Par exemple, si l’opérateur considère qu’au dessus d’une valeur de 35% il est utile de créer des grappes de caméras, celui-ci formera la grappe (0, 2, 5,7), et les bancs stéréo (1,4), (3,6).

## 5.1.5 Construction du maillage

Le maillage d'un nuage de points 3D issu de la triangulation permet d'obtenir une surface continue de la scène observée plutôt qu'un simple nuage de points. Celui-ci est nécessaire pour comparer deux formes 3D par les méthodes du logiciel Geomagic® que nous utilisons. Ce maillage n'a cependant pas besoin d'être continu pour effectuer la comparaison. Nous présentons les différentes façons de mailler nos pièces.

### 5.1.5.1 Maillage d'un banc ou d'une grappe

La corrélation d'images par propagation de germe parcourt l'image de voisins en voisins. Les points sont en fait déjà maillés en deux dimensions au niveau de l'image de référence lors de la corrélation. Ce maillage peut donc être utilisé au niveau 3D pour mailler notre objet. La figure 5.2 présente le maillage 2D superposé à l'image de référence. Ce maillage est alors reporté au niveau 3D afin d'obtenir une surface continue.

A noter que lorsque la surface est très inclinée par rapport au point de vue des caméras, les faces peuvent être extrêmement étendues. Ces faces ne représentent généralement pas correctement la géométrie de la pièce observée. Nous avons la possibilité, comme expliqué dans le chapitre 3, de calculer leur périmètre afin de rejeter celles dépassant un seuil maximum. Une manière efficace de choisir ce seuil est de le fixer au dessus de la moyenne du périmètre des faces. La raison pour laquelle nous nous permettons parfois de ne pas construire ces faces part du principe que si une face est extrêmement allongée, alors elle aurait mérité d'être observée d'une position plus fronto-parallèle afin d'être reconstruite avec une meilleure précision.

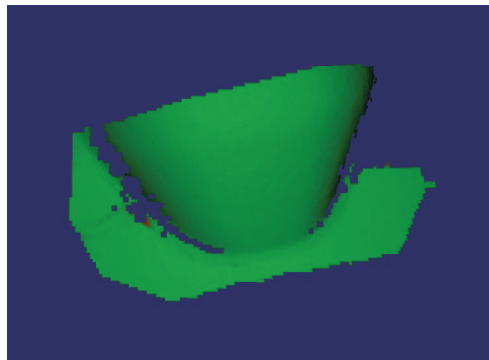
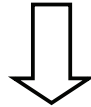
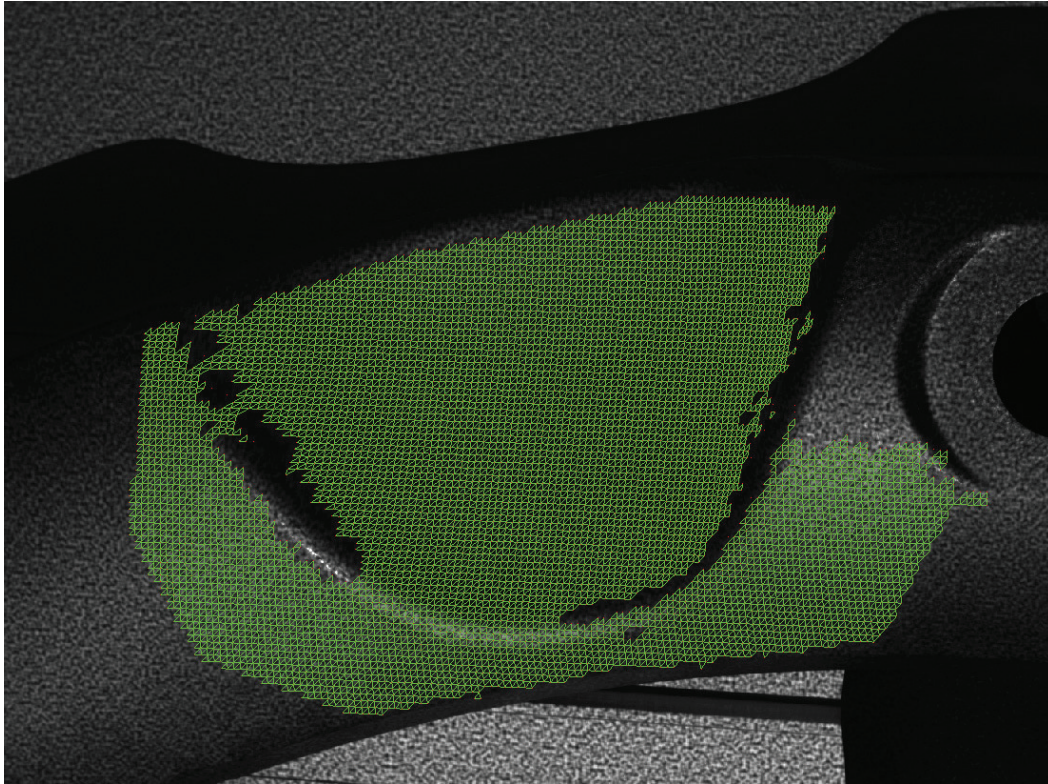


Figure 5. 2- Maillage 2D reporté au niveau 3D

### 5.1.5.2 Maillage après recalage

Le maillage d'un seul bloc de l'objet final après recalage n'est pas forcément une étape essentielle pour les opérations suivantes que nous allons effectuer. La comparaison de modèles par exemple n'est pas limitée à un seul maillage. Nous pouvons nous contenter de plusieurs nuages de points 3D qui une fois maillés et recalés dans le même repère sont suffisants pour calculer des écarts de distances entre deux formes.

Néanmoins, si l'on souhaite avoir un objet 'propre' en un seul morceau, il est toujours possible d'effectuer une triangulation de Delaunay sur le nuage 3D final sans tenir compte des maillages



issus de l'étape de corrélation. Nous avons choisi de ne pas traiter cette problématique, et utilisons le logiciel Géomagic® pour effectuer cette opération.

## 5.2 Recalage inter-vues

Lorsque nous numérisons un objet de grande taille, les caméras ne sont pas nécessairement toutes calibrées entre elles et forment ce que nous avons appelé dans le chapitre 2 des bancs et grappes de caméras. La figure 5.3 ci-dessous illustre quatre bancs stéréo (représentés par des ellipses) observant une même pièce. La figure 5.4 illustre les images acquises par les caméras.

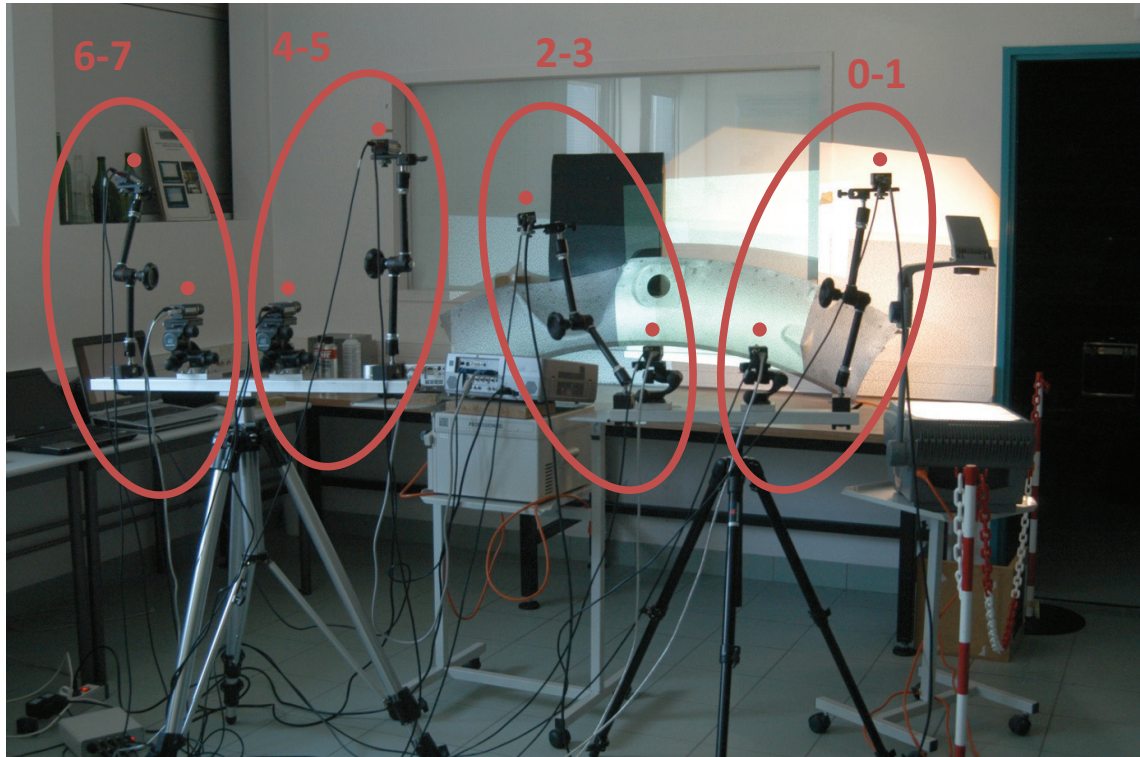


Figure 5. 3- Stratégie de gestion du système multi caméras par un ensemble de bancs stéréo

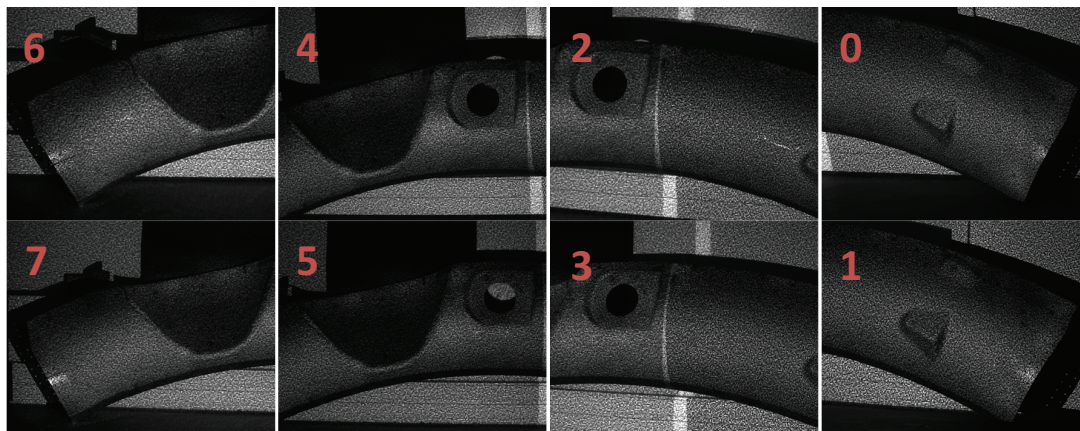


Figure 5. 4- Images associées aux caméras de la figure 5.2



Les caméras 0 et 1 sont calibrées entre elles, ainsi que 2 et 3, 4 et 5, 6 et 7. En utilisant les méthodes décrites dans les sections 5.1.1 ou 5.1.2, chaque banc stéréo permet de reconstruire un nuage de points 3D. Comme nous pouvons le voir sur la figure 5.8, quatre formes 3D sont obtenues. La taille de fenêtre de corrélation utilisée est de 21 pixels. La résolution spatiale est de 1.8 pixels/mm. Afin de n'avoir qu'un seul modèle, il est nécessaire de ramener toutes les formes dans un même repère et pour cela d'effectuer ce que l'on appelle l'étape de recalage. Le recalage peut s'effectuer de deux façons. La première consiste à recaler de manière exclusivement géométrique et n'utilise que l'information 3D, c'est-à-dire les nuages de points 3D reconstruits. La deuxième consiste à recaler de manière photométrique en s'aidant de points caractéristiques 2D. Cette seconde méthode est la plus couramment utilisée dans les systèmes commerciaux de numérisation existants, que cela soit sous la forme de pastilles autocollantes (HandyScan®, Atos®+Tritop®) (fig 5.7), de marqueurs fixes disposés autour de la pièce (HandyScan®) (fig 5.5), ou bien de la texture artificielle (fig 5.6) ou naturelle de l'objet (Vic3D®). Dans notre cas nous utiliserons la texture artificielle de l'objet apportée par projection de mouchetis.



Figure 5. 5- Marqueurs fixes disposés autour de la pièce (Filet HandyScan®)

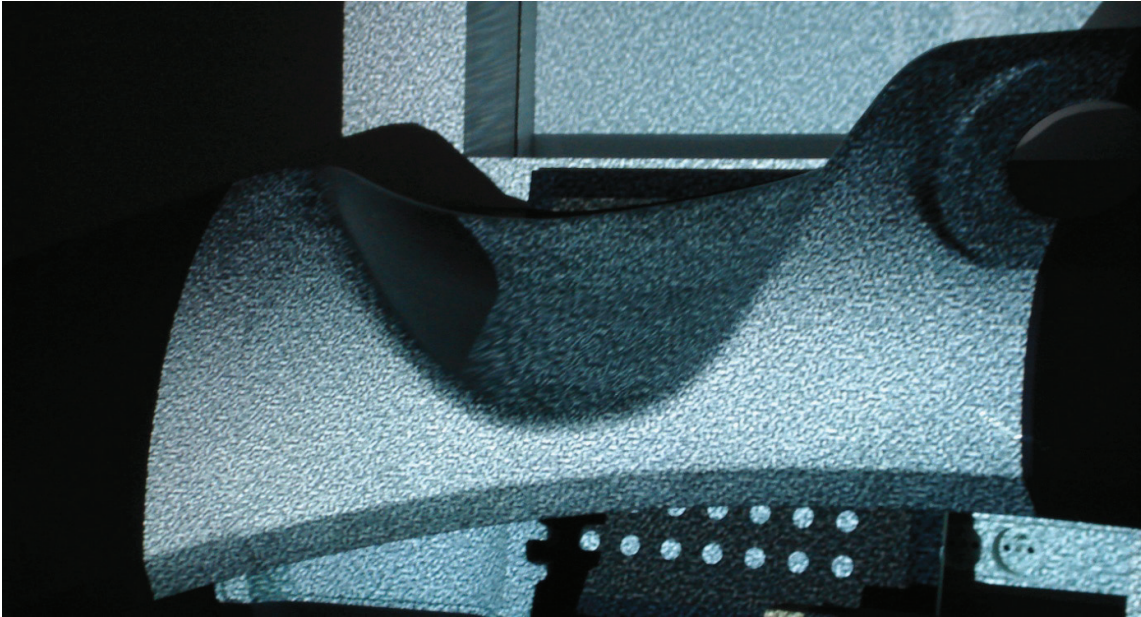


Figure 5. 6- Texture artificielle vidéo projetée



Figure 5. 7- Pastilles autocollantes utilisées pour le recalage par le système HandyScan®

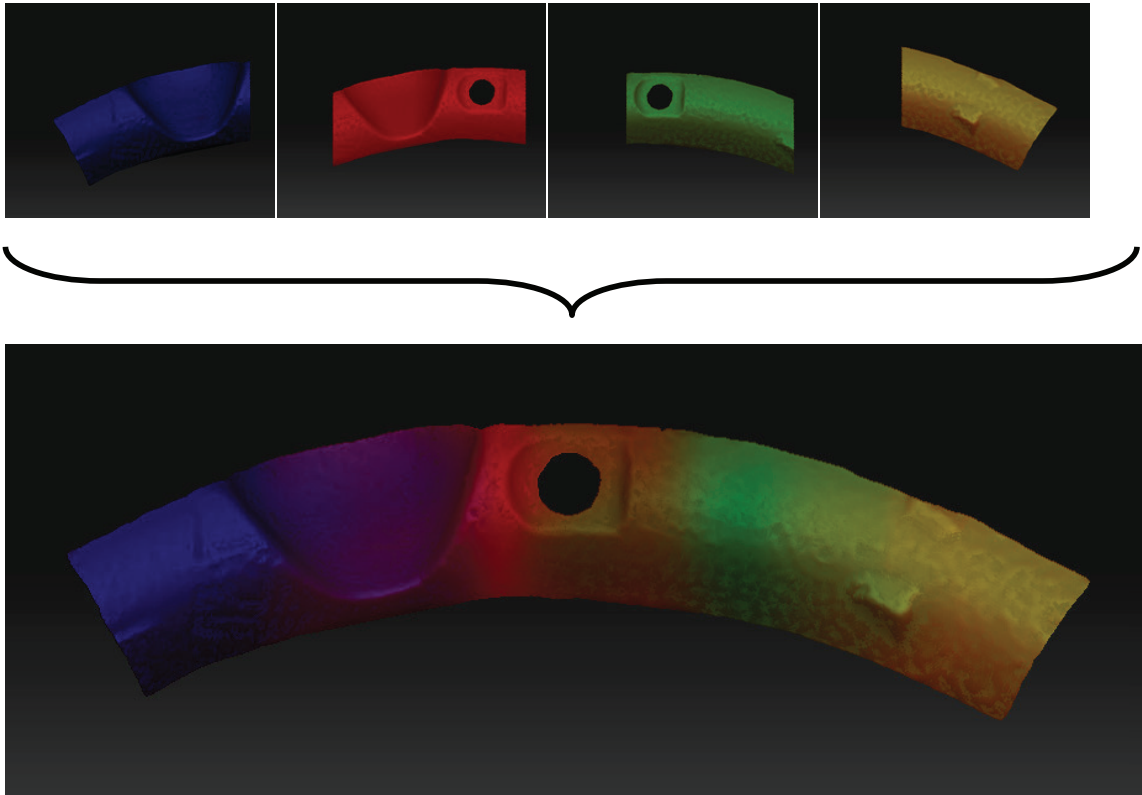


Figure 5. 8- Quatre nuages de points 3D indépendants doivent être recalés dans un même repère afin d'obtenir la pièce en entier

### 5.2.1 Recalage géométrique

Géométriquement, nous utiliserons le recalage par ICP (Iterative closest point) (Besl and Neil, 1992) de Geomagic®. ICP est un algorithme itératif largement utilisé en vision par ordinateur permettant de minimiser la distance entre deux nuages de points 3D, de façon à calculer la transformation rigide les séparant et à les ramener si possible dans un même repère. L'algorithme ICP nécessite généralement une estimée initiale de la transformation rigide présente entre les deux nuages de points 3D à recalés. Cette transformation peut être estimée automatiquement lorsque les nuages de points se recouvrent suffisamment, en se servant du centre de gravité des nuages ou de leurs axes principaux. Lorsque les nuages n'ont qu'une petite partie commune ce procédé ne peut fonctionner, et l'estimation de la transformation rigide nécessite souvent l'intervention d'un opérateur. Une transformation rigide est composée de trois paramètres de rotation et de trois paramètres de translation et nécessite au minimum trois paires de points 3D correspondants pour être calculée (Lorusso, Eggert and Fisher, 1997). Ces points 3D sont choisis dans le logiciel Geomagic® par l'opérateur. Bien que n'importe quels points peuvent être sélectionnés, le fait de devoir déterminer des points 3D correspondants encourage souvent l'opérateur à choisir des points se situant sur des arêtes de l'objet ou bien dans des angles. Par exemple, pour recalés la partie bleue avec la partie rouge de la figure 5.8, on choisira de disposer des points sur l'arête de la cuvette. Pour la pièce rouge et verte, on choisira de les disposer autour du trou ou du renforcement. Pour la pièce verte et jaune le choix est plus difficile à faire visuellement, et peut éventuellement demander plusieurs essais. Afin de



s'affranchir de cette étape de sélection, il est possible d'utiliser l'information photométrique des images et d'effectuer ce que l'on appellera un recalage photométrique.

### 5.2.2 Recalage photométrique

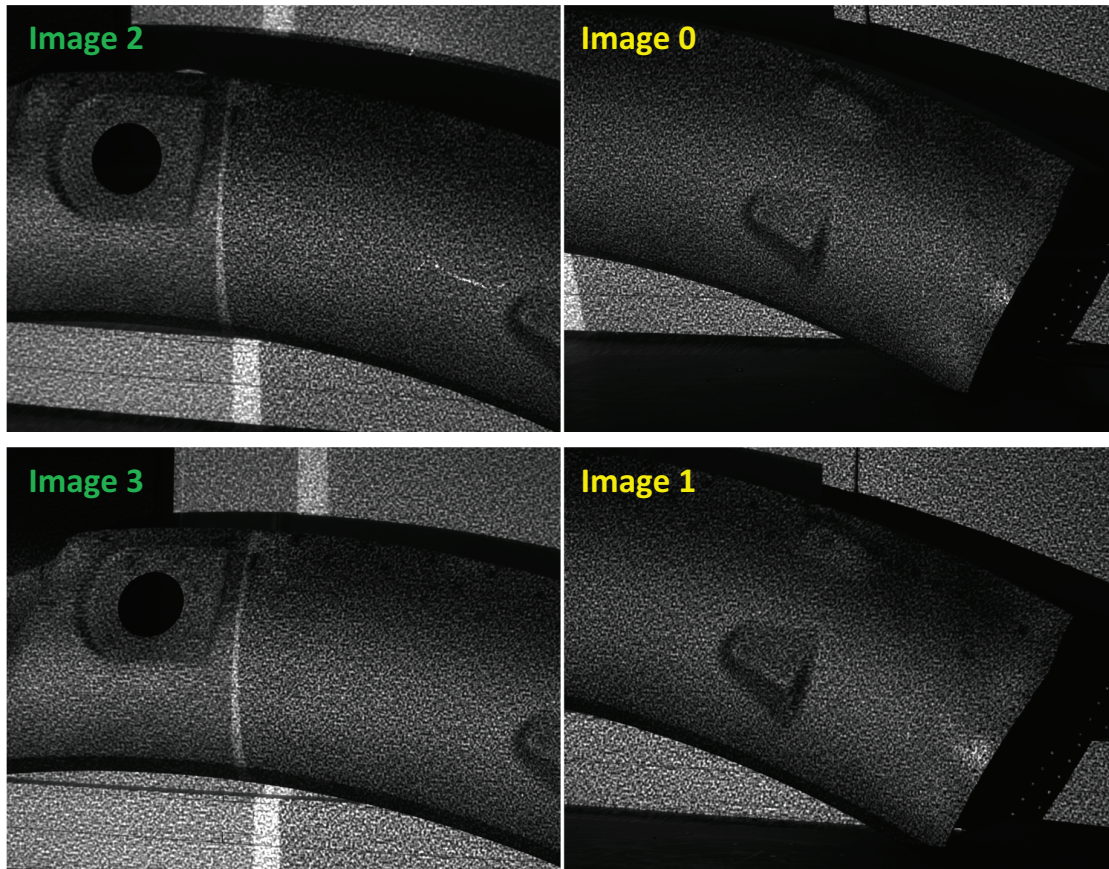


Figure 5. 9- Images utilisées pour le recalage photométrique du nuage vert avec le nuage jaune

Le recalage photométrique implique comme pour le recalage géométrique d'estimer la transformation rigide entre les nuages de points 3D. Au lieu de sélectionner des appariements 3D, des appariements 2D seront sélectionnés au niveau des images. Nous utiliserons la corrélation d'images afin de mettre en correspondance ces points. La géométrie entre les caméras étant inconnue entre les bancs stéréo, nous utiliserons un critère de corrélation classique comme le critère affine, c'est à dire ne faisant pas intervenir les paramètres des caméras.

Dans le chapitre 3, section 3.7.3 nous avons vu qu'il était possible de stocker des valeurs donnant une indication sur la qualité de la propagation et de la corrélation d'images. Certaines d'entre elles (contrainte de lissage, score de corrélation) peuvent être utilisées pour sélectionner les meilleurs points 2D appariés, c'est-à-dire ceux ayant les valeurs les plus faibles. Prenons pour exemple le nuage vert et le nuage jaune de la figure 5.8 et leurs images correspondantes (fig. 5.9). En choisissant l'image 0 comme image de référence, les zones corrélées correspondantes dans les images 1, 2, et 3 sont représentées en couleur verte et rouge sur la figure 5.10. Le dégradé allant du vert vers le rouge représente la valeur du score de corrélation. Les scores élevés en rouge sont principalement présents sur les bords de la pièce, sur l'arête de l'ailette et autour du reflet dans l'image 2. Les points rouges situés au milieu de la pièce correspondent à



l'ancien emplacement de pastilles autocollantes utilisées par d'autres systèmes de mesures afin d'effectuer le recalage.

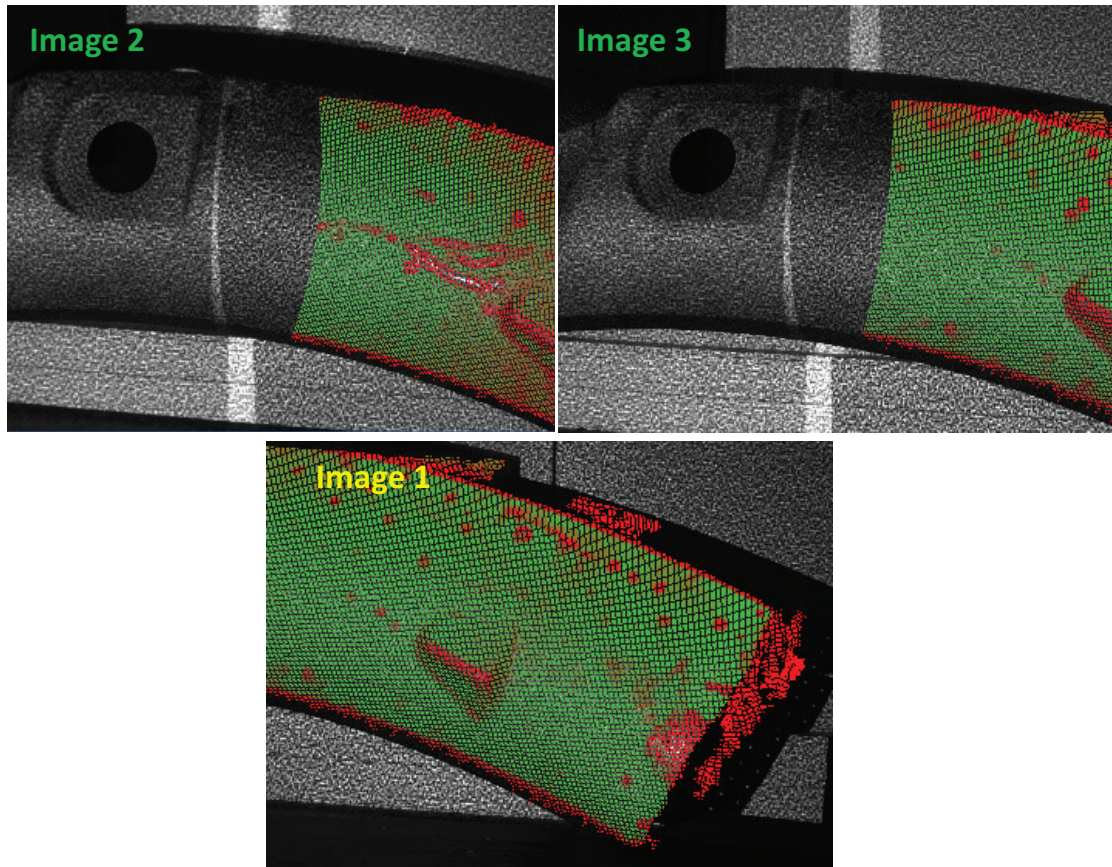


Figure 5. 10- Zones corrélées colorées en fonction de la valeur du score de corrélation. Vert : score faible, rouge : score élevé.

Nous nous donnons la possibilité d'effectuer des opérations de morphologie mathématique afin d'éliminer plus de points et en particulier certains points isolés dont la valeur peut ne pas être représentative de leur qualité. La figure 5.11 ci-dessous présente une binarisation des scores de corrélation et d'une fermeture appliquées à l'image 2. Seuls les points verts seront pris en compte pour la suite du calcul.

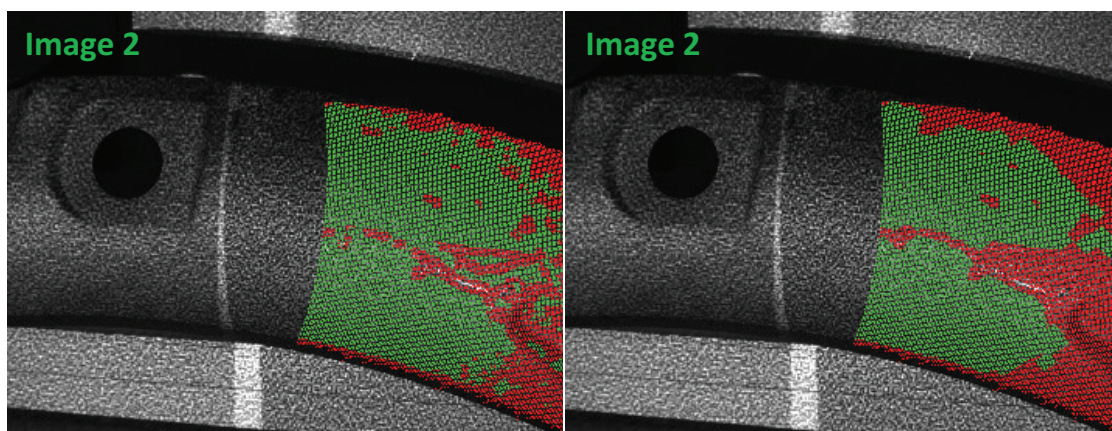


Figure 5. 11- Binarisation (à gauche) et fermeture (à droite) appliquées à la carte des scores de corrélation

Les points appariés sont reconstruits en 3D pour chaque banc stéréo. Les résultats issus de la corrélation entre les images 0 et 1 donnent un premier nuage de points 3D, les corrélations entre les images 0 et 2 et les images 0 et 3 donnent un second nuage de points 3D. Ces deux nuages sont strictement identiques et correspondent aux mêmes points 3D physiques, aux erreurs de corrélation et de calibrage près. Il est alors possible de calculer la transformation rigide de manière classique (Lorusso, Eggert and Fisher, 1997) entre les nuages, puis de l'affiner itérativement par un algorithme de type Levenberg-Marquardt. Nous avons implémenté une estimation de type RANSAC (Hartley and Zisserman, 2004) afin d'améliorer un peu plus la robustesse du calcul et d'écarter de faux appariements.

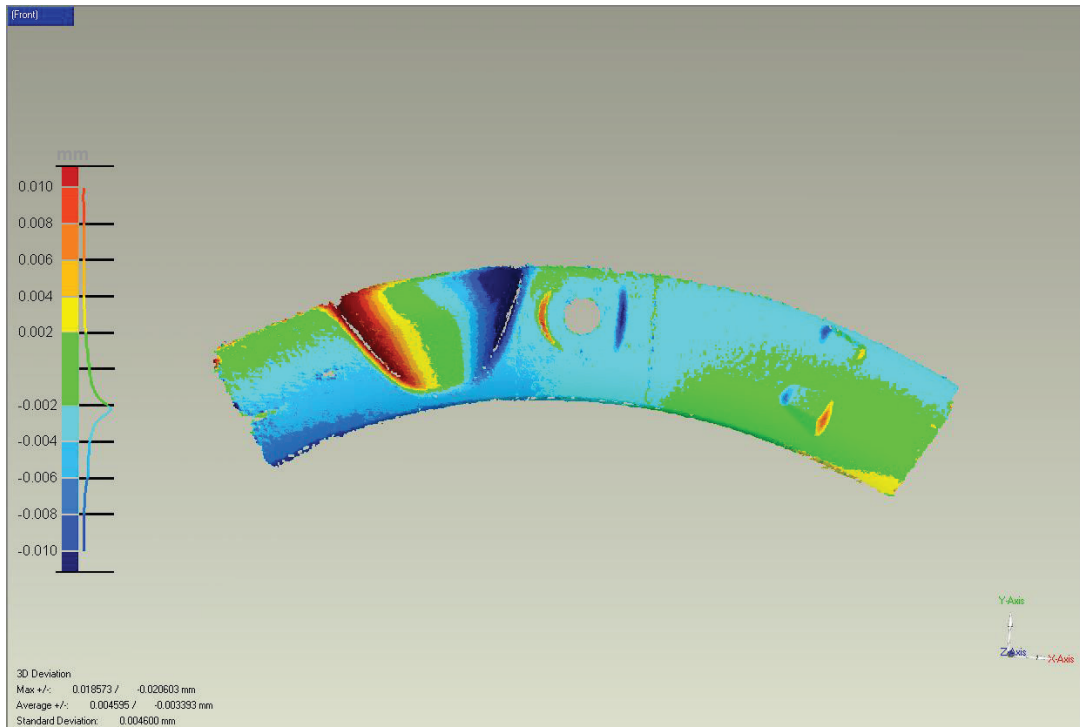


Figure 5.12- Comparaison du recalage géométrique et du recalage photométrique

### 5.2.3 Comparaison du recalage géométrique au recalage photométrique

Nous avons pour cette pièce, comparé les deux recalages à l'aide du logiciel Géomagic® (fig 5.12). Géomagic® effectue un recalage géométrique entre les deux nuages. Les mêmes nuages de points ont été utilisés, aussi l'erreur moyenne et l'écart type sont très faibles, de l'ordre de 2  $\mu m$ . Les zones planes sont relativement identiques. La cuvette présente tout de même des écarts plus importants, de l'ordre de 5  $\mu m$ .

## 5.3 Comparaison avec d'autres systèmes de mesures

Nous utiliserons pour cette partie la pièce d'avion appelée 'banane'. Cette pièce a été mesurée à l'aide du Laser Tracker Faro® par la société G2metric, à l'aide du système Atos® de GOM par l'ENI de Tarbes, à l'aide du système HandyScan® par Catherine Galerne d'EADS IW, par le système Vic3D® Multi-View et bien sûr par nos méthodes. Nous disposons également du modèle CAO de la pièce, mais nous n'utiliserons pas ce dernier pour nos comparaisons car la pièce a subi

de telles manipulations que sa forme n'est probablement pas conforme à son modèle CAO (cf. figure 5.13). Nous utiliserons la numérisation du Laser Tracker comme nuage de référence pour nos comparaisons car annonçant la meilleure incertitude. La figure 5.13 montre la comparaison entre le modèle CAO et la numérisation par Laser Tracker. De larges écarts peuvent être observés en haut à gauche de la pièce, au niveau de la cuvette, sur les bords gauches et droits et sur les deux ailettes à droite. La pièce est posée et collée sur une table stable construite pour l'occasion afin de limiter au maximum d'éventuels déplacements ou déformations. Cette configuration a été utilisée pour toutes les mesures, y compris celle du Laser Tracker. Les points d'appui se situent aux deux extrémités droite et gauche et en haut de la cuvette. De forts écarts sont visibles en ces endroits. De forts écarts sont aussi notables au milieu des extrémités de la pièce, associés à des entailles de rebutage et correspondent aux valeurs min (-6cm) et max (+9cm) de la figure. Les forts écarts des deux ailettes seraient quant à eux une erreur de mesure du Laser Tracker, la numérisation étant visuellement incorrecte à cet endroit, et les comparaisons entre le Laser Tracker et les autres systèmes présentant les mêmes écarts.

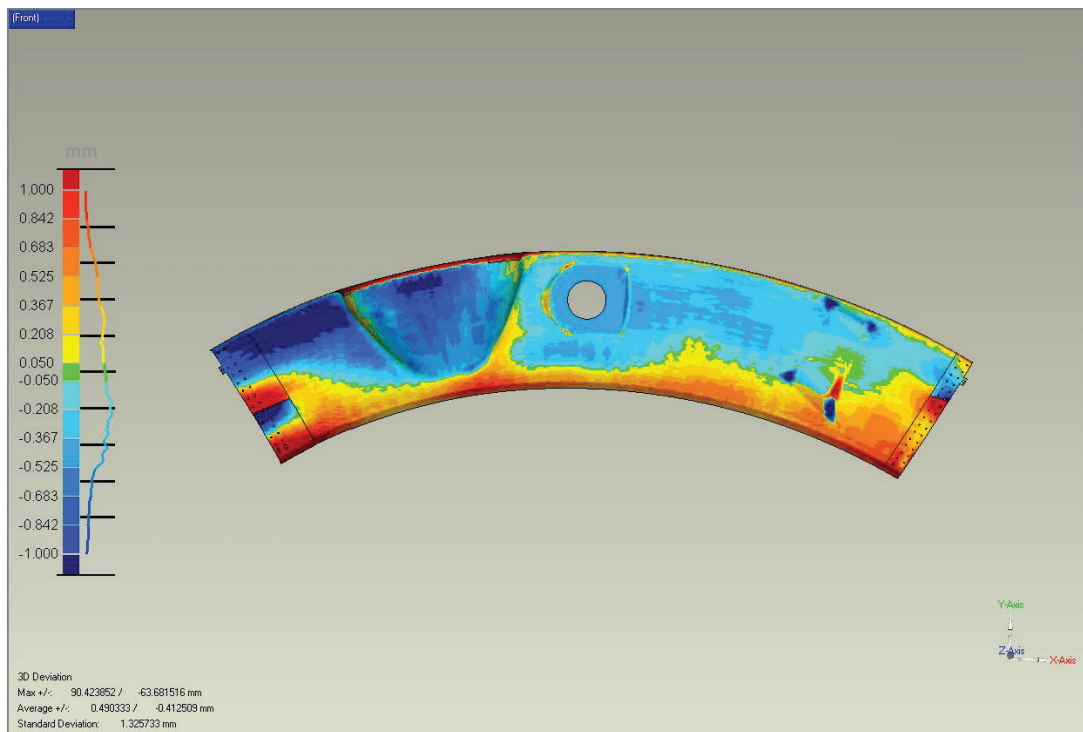


Figure 5.13- Comparaison entre le modèle CAO et la mesure fournie par le Laser Tracker Faro®

Le système multi-caméras utilisé pour cette expérience est composé de huit caméras et de deux vidéo projecteurs (fig. 5.3). Nous avons focalisé quatre caméras sur la cuvette de la banane, cette partie nous semblant la plus intéressante à observer par plus de deux caméras de par sa plus forte courbure. Les caméras sont positionnées à environ deux mètres de l'objet, et sont montées avec des focales de 16mm. Elles sont disposées dans une configuration dite murale, et seule une face de l'objet peut être observée. Pour les mesures par projection de franges du système Atos®, la pièce a été recouverte d'une fine couche blanche de bombe de ressuage afin d'éviter les reflets. Nous avons laissé cette couche pour toutes les mesures. Pour les mesures



effectuées par le système Atos® et le système HandyScan®, des pastilles photométriques ont été collées sur la pièce afin de pouvoir recalibrer les différentes prises de vue. Nous avons bien sûr retiré ces pastilles. Notre but n'étant pas de comparer les systèmes de mesure commerciaux entre eux, nous n'associerons pas le nom des systèmes aux comparaisons et les dénoterons A, B et C. Nous présenterons nos méthodes dans la partie 5.3.4. L'ensemble des méthodes traitées est résumé dans le Tableau 5.2.

Méthodes	Figure correspondante
<b>Système A</b>	5.14
<b>Système B</b>	5.15
<b>Système C</b>	5.16
<b>Bancs stéréos recalés : corrélation classique + triangulation stéréo</b>	5.17
<b>Grappe + Bancs recalés : corrélation classique + triangulation multi-vues</b>	5.19
<b>Grappe + Bancs recalés : corrélation classique + triangulation multi-vues + ajustement de faisceaux</b>	5.20
<b>Grappe + Bancs recalés : critère de corrélation multi-vues + reconstruction via le critère</b>	5.21

Tableau 5. 2-Méthodes de numérisation comparées

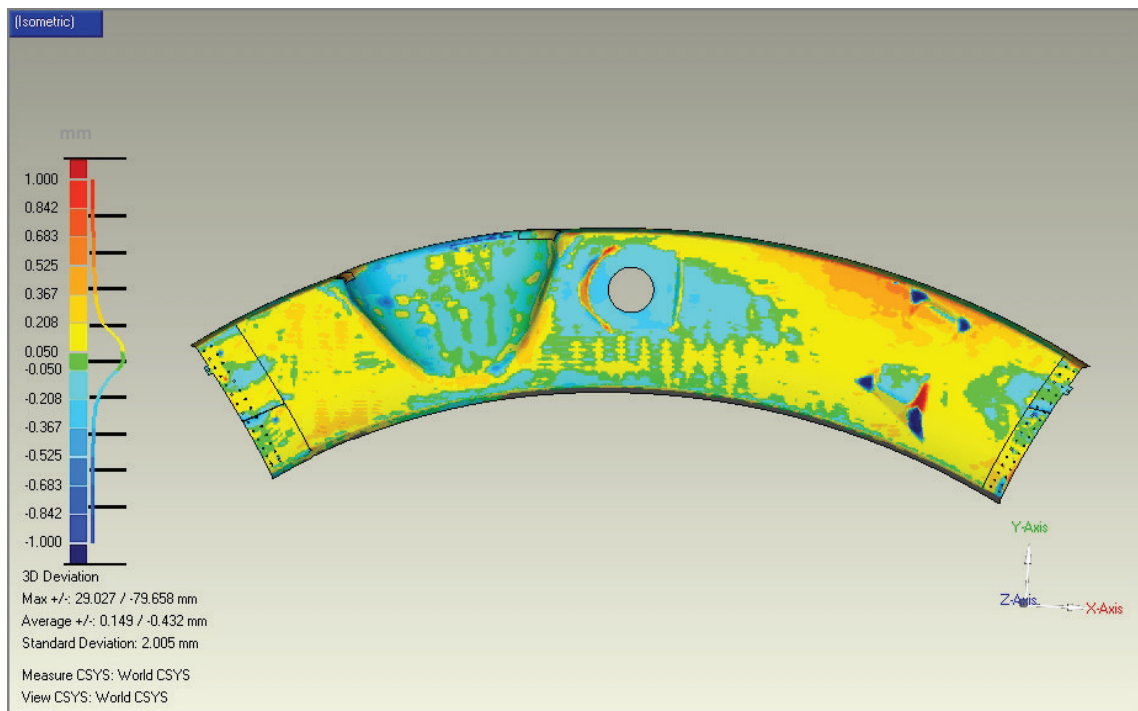


Figure 5. 14- Comparaison entre la mesure fournie par le système A et la mesure fournie par le Laser Tracker Faro®

### 5.3.1 Système A

La figure 5.14 présente la comparaison entre la mesure par le système A et la mesure par laser Tracker. L'histogramme de gauche nous indique que les écarts varient autour de -0.2 mm et +0.37 mm. Le fort écart type et la moyenne inférieure ont été biaisés par des points aberrants situés dans les ailettes de droite et sur le bord supérieur de la pièce. Ces points correspondent aux min +2.9cm et max -7.9mm de la figure. Nous avons essayé sans succès de les enlever sous

Geomagic®. La moyenne négative des écarts ainsi que l'écart-type ont du coup été biaisés par ces valeurs. La cartographie est très bonne dans son ensemble mise à part sur la partie droite, où de plus forts écarts sont observés au dessus des deux ailettes.

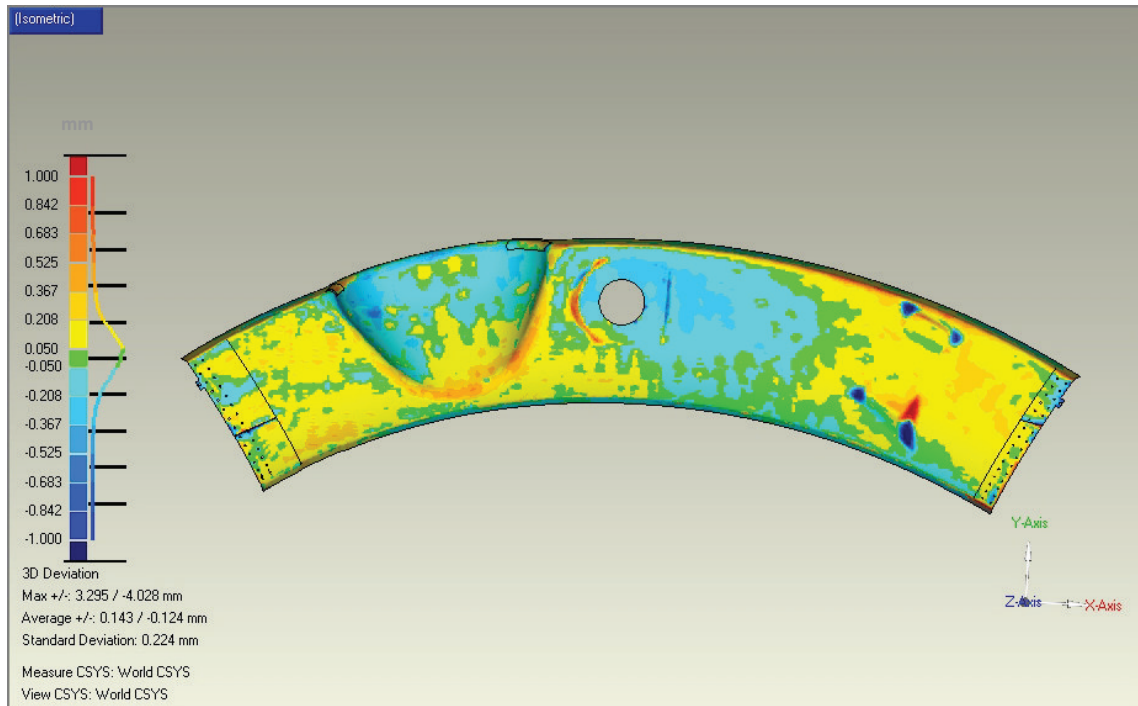


Figure 5. 15- Comparaison entre la mesure fournie par le système B et la mesure fournie pas le Laser Tracker Faro®

### 5.3.2 Système B

La figure 5.15 présente la comparaison entre la mesure par le système B et la mesure par laser Tracker. La cartographie est principalement composée de vert, de jaune et de cyan qui correspondent aux valeurs comprises entre +0.2mm et -0.2mm. L'historgramme de gauche nous indique que les écarts sont principalement concentrés entre ces deux valeurs. Il n'y a pas de points aberrants comme pour le système A. Les valeurs min et max se trouvent sur les ailettes à droite de la pièce. La moyenne des écarts est de +0.143mm / -0.124mm et l'écart-type de 0.224mm. Cette mesure est probablement la meilleure de celles présentées dans cette partie.

### 5.3.3 Système C

La figure 5.16 présente la comparaison entre la mesure par le système C et la mesure par laser Tracker. Cette mesure est nettement moins bonne que les deux précédentes. La cartographie est d'ailleurs composée d'un plus large panel de couleurs. L'historgramme de gauche nous indique que les écarts varient principalement entre -0.37 mm et +0.5 mm et les valeurs sont largement distribuées dans cet intervalle. De fortes erreurs sont visibles sur la partie droite de la pièce au dessus des deux ailettes. La moyenne des écarts est de +0.237mm /-0.210mm, et l'écart type de 0.343mm.

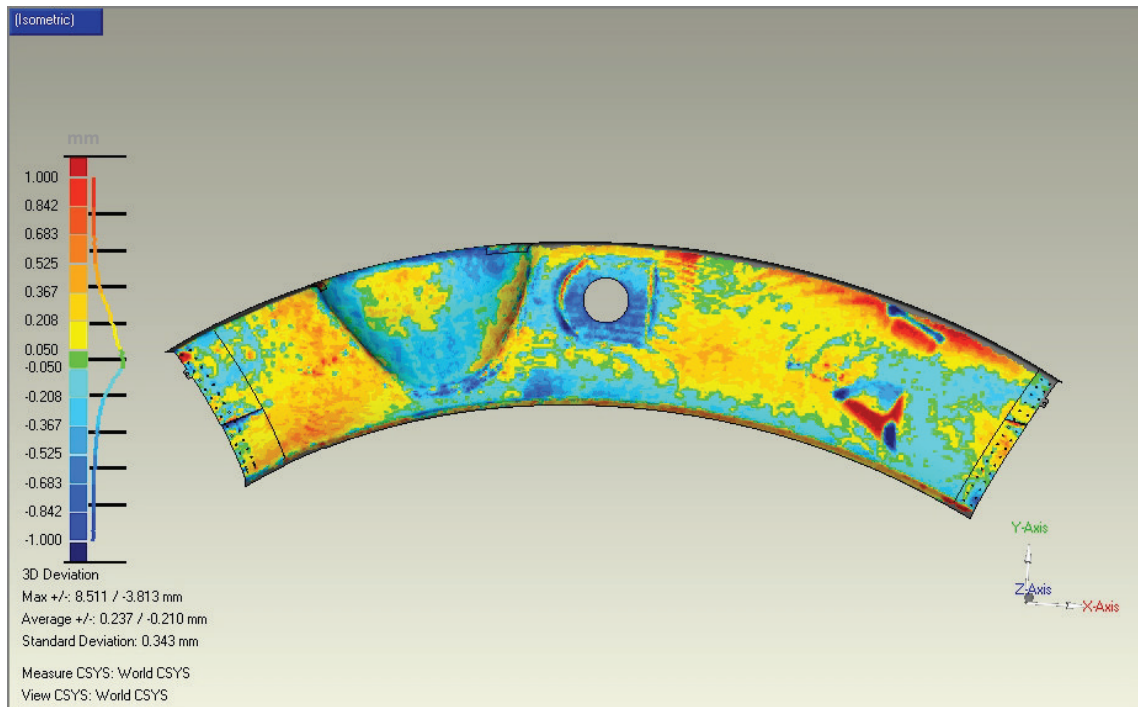


Figure 5. 16- Comparaison entre la mesure fournie par le système C et la mesure fournie par le Laser Tracker Faro®

### 5.3.4 Nos méthodes de mesure basées sur un système multi-caméras

Nous présenterons deux stratégies d'exploitation des caméras comme exposées dans le chapitre 2, à savoir un ensemble de bancs stéréo recalés et un ensemble de grappe et bancs stéréo recalés.

#### 5.3.4.1 Stratégie bancs stéréo recalés

La première stratégie consiste à exploiter un ensemble de bancs stéréo. Les bancs créés sont indiqués par des ellipses sur la figure 5.3. Ils sont calibrés indépendamment, c'est-à-dire qu'aucune géométrie connue ne permet de les relier. L'erreur de reprojection de chaque banc stéréo après calibrage est de l'ordre de 0.045 px. Chacun d'entre eux permet d'obtenir un nuage de point 3D dans un repère différent. Cette stratégie est la même que celle du système VIC3D®.

Nous avons utilisé une fenêtre de corrélation de taille 21x21 pixels. La résolution spatiale est de 1.8 pixels /mm. Après recalage, le nuage de points 3D est comparé au modèle obtenu par laser Tracker (fig 5.17). La cartographie présente des zones avec de plus forts écarts sur la partie supérieure de la pièce, au dessus du trou de la pièce. De plus fortes erreurs sont observées aux alentours de la cuvette. L'historique de gauche nous indique que les écarts varient principalement entre -0.367 mm et +0.37 mm. La moyenne des écarts est de +0.210mm / - 0.224mm et l'écart-type de 0.348mm.

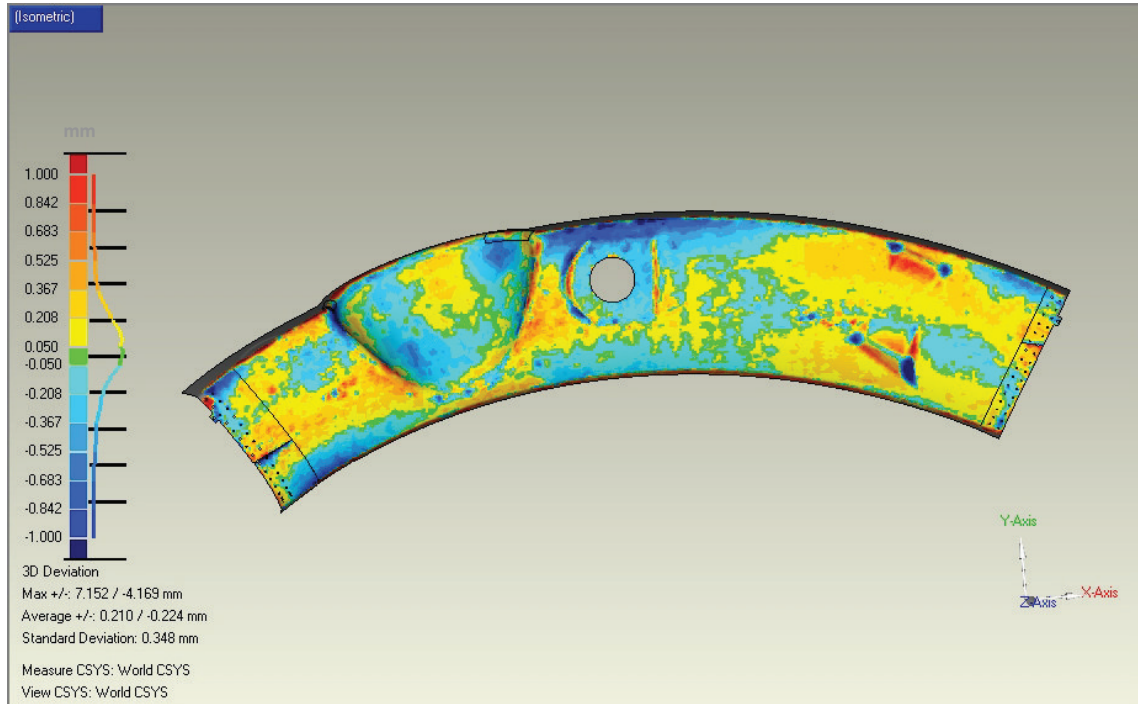


Figure 5.17- Corrélation classique + triangulation multi-caméras

### 5.3.4.2 Stratégie grappe et bancs stéréo recalés

Nous proposons ensuite de former une grappe de caméras à partir des quatre caméras observant la cuvette de la pièce. La grappe correspond aux quatre caméras de gauche de la figure 5.18. Les autres caméras forment des bancs stéréo. L'erreur de reprojection du calibrage de la grappe de caméra est de 0.06 pixels, celles des bancs stéréo est de l'ordre de 0.045 pixels. La corrélation multi-images a été réalisée suivant les deux façons exposées dans le chapitre 4. Nous avons d'abord utilisé un critère classique de corrélation et effectué trois corrélations stéréo en gardant la même image de référence. A partir de ce résultat nous avons reconstruit la pièce selon deux méthodes. La première est une reconstruction par triangulation multi-caméras. La seconde est une reconstruction par triangulation multi-caméras suivie d'un ajustement de faisceaux. Nous avons ensuite utilisé le critère de corrélation 3D multi-caméras afin de reconstruire la cuvette de la banane. En regardant les résultats des trois reconstructions (fig. 5.19, 5.20, 5.21), nous observons que les erreurs se situent principalement autour de la cuvette et au dessus du trou de la pièce. La reconstruction par triangulation multi-caméras présente de larges écarts sous forme de deux lignes verticales à droite de la cuvette (fig. 5.19). Ces lignes correspondent au nombre de points ayant servi à reconstruire la cuvette lors de la triangulation multi-caméras. A gauche quatre points ont généralement servi à la reconstruction, puis trois points, puis seulement deux. Ceci entraîne une cassure au niveau géométrique qui se répercute lors de la comparaison. Cette erreur est atténuée via la phase d'ajustement de faisceaux, présentée sur la figure 5.20. Celle-ci montre un histogramme avec des écarts variant principalement entre -0.2mm et +0.37mm. Les valeurs sont plus resserrées autour de 0 que pour la triangulation multi-caméras. La moyenne des écarts est de +0.238mm / -0.288mm et l'écart-type de 0.383mm. Le résultat se rapproche du système C et de la configuration de bancs stéréo recalés.





Figure 5. 18- Stratégie de gestion du système multi caméras par grappe et bancs stéréo recalés

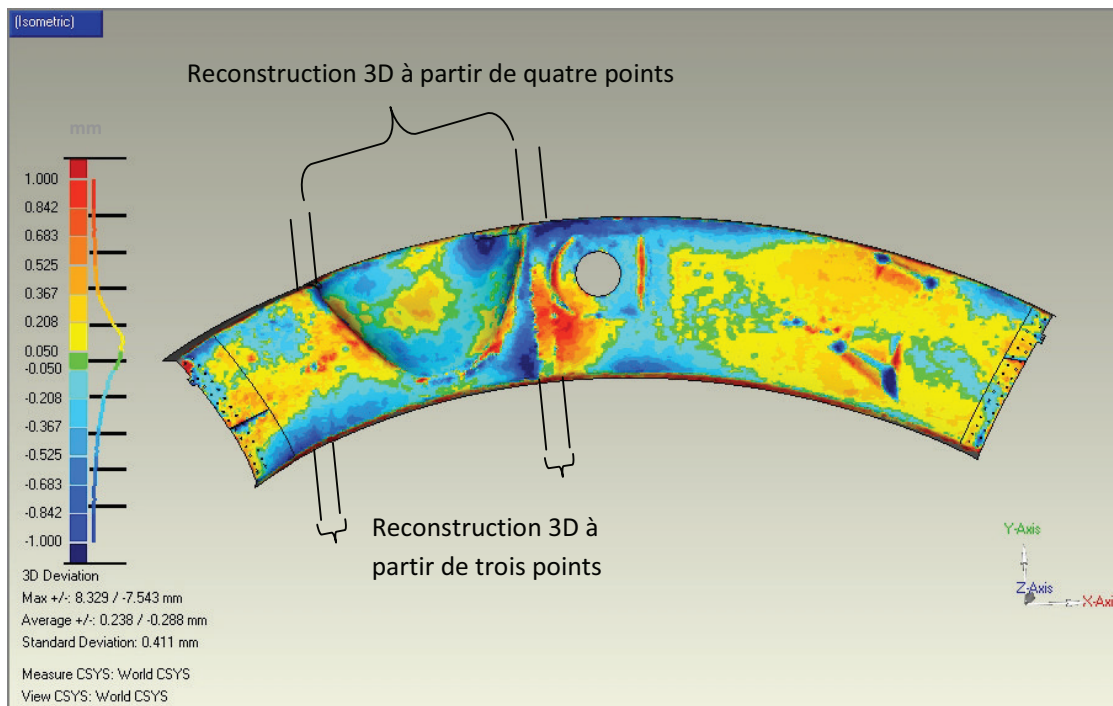


Figure 5. 19- Comparaison entre la mesure obtenue par triangulation multi caméras dans une stratégie de gestion du système multi caméras par grappe et bancs stéréo recalés, et la mesure fournie par le Laser Tracker Faro®

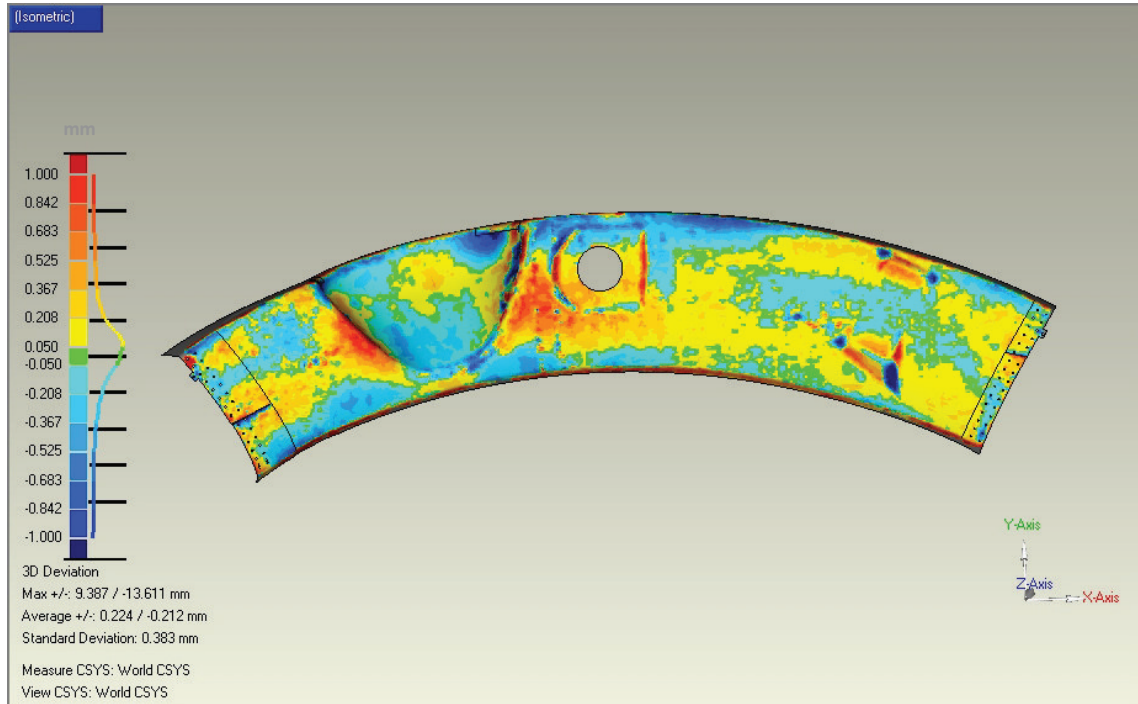


Figure 5. 20-Corrélation classique + triangulation multi-caméras + ajustement de faisceaux

La meilleure exploitation de nos caméras est celle qui a utilisé le critère de corrélation multi-caméras (fig. 5.21). C'est en tout cas celle qui produit le moins d'écarts pour la cuvette. Les valeurs de l'histogramme sont bien centrées autour de 0 et varient principalement entre -0.2 mm et +0.37 mm. Les moyennes sont relativement faibles +0.173 mm et -0.190 mm et l'écart-type est de 0.302mm. La cassure présente sur les deux numérisations précédentes est quasiment invisible et n'intervient pas dans la formation d'écarts importants. La cartographie nous montre de plus larges écarts au dessus du trou de la pièce. Cette mesure se rapproche le plus des systèmes A et B.



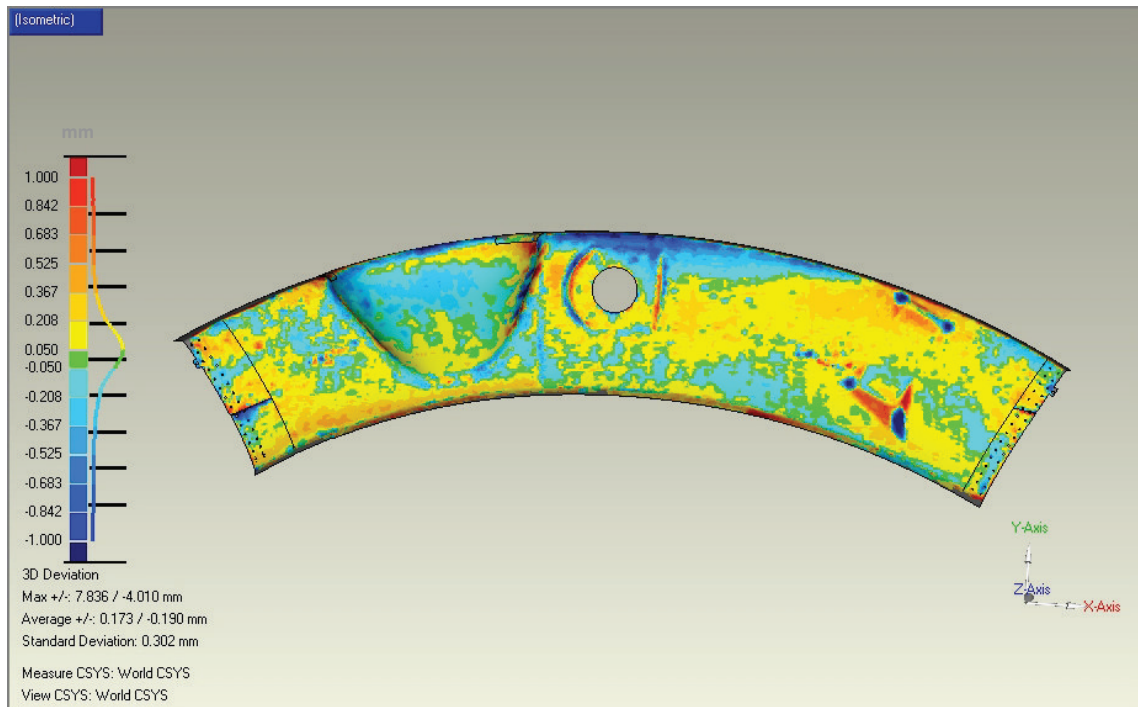


Figure 5. 21-Corrélation multi-vues + reconstruction via les paramètres du critère

### 5.3.5 Conclusion sur les résultats

Nous présentons dans le tableau 5.3 l'ensemble des moyennes et écart-types des différentes mesures. Le système A, le système B, et notre méthode basée sur la corrélation multi-vues semblent donner les meilleurs résultats. Il est difficile de comparer les histogrammes présents sur les figures entres eux car leur amplitude est ajustée automatiquement par le logiciel. De plus les moyennes et écart-types des écarts de forme peuvent être biaisés par des points aberrants qu'il est difficile, voir impossible d'enlever.

Méthodes	Erreur moyenne (mm)	Ecart-type (mm)
<b>Système A</b>	+0.149 / -0.432	2.005 (*)
<b>Système B</b>	+0.143 / -0.124	0.224
<b>Système C</b>	+0.237 / -0.210	0.343
<b>Bancs stéréos recalés : corrélation classique + triangulation stéréo</b>	+0.210 / -0.224	0.348
<b>Grappe + Bancs recalés : corrélation classique + triangulation multi-vues</b>	+0.238 / -0.288	0.411
<b>Grappe + Bancs recalés : corrélation classique + triangulation multi-vues + ajustement de faisceaux</b>	+0.224 / -0.212	0.383
<b>Grappe + Bancs recalés : critère de corrélation multi-vues + reconstruction via le critère</b>	+0.173 / -0.190	0.302

Tableau 5. 3- Tableau récapitulatif des résultats, (\*) des points aberrants biaisent le résultat

Nous présentons donc le nombre de points 3D exprimé en pourcentage du nombre total de points, pour chaque numérisation, en fonction de chaque plage comprise entre -1mm et 1mm (fig. 5.22). Trois systèmes se différencient des autres. Le système B (en vert) donne les meilleurs résultats avec plus de 30% des points compris entre -0.05 et 0.05mm. Viennent ensuite le système A (en bleu), et la corrélation multi-vues (en magenta) avec un grand nombre de points compris entre -0.5 et 0.5mm. Les points du système A sont légèrement plus distribués dans la partie positive de l'histogramme tandis que la corrélation multi-vues distribue les erreurs symétriquement de chaque côté. Nous observons que la triangulation multi-caméras (en jaune) produit les plus faibles résultats, suivie du Système C (en rouge), puis des bancs stéréos recalés (en cyan), puis de l'ajustement de faisceaux (en noir). L'ajustement de faisceaux a nettement amélioré la triangulation multi-caméras (il a été initialisé à partir de cette dernière), et est légèrement plus performant qu'un ensemble de bancs recalés reconstruit par triangulation. Compte tenu des résultats, nous pouvons dire que le traitement de la cuvette sous forme de grappe a permis une amélioration des résultats par rapport à une configuration stéréo, et ce particulièrement avec l'utilisation du critère multi-vues.

Nous avons présenté différentes comparaisons de modèles avec pour nuage de référence la numérisation du laser Tracker Faro®. A noter que nous avons aussi testé les autres combinaisons comme « système A » comparé à « système B », « système C » comparé à « système B », etc. Toutes les combinaisons produisent globalement les mêmes cartes d'erreurs, c'est-à-dire qu'une incertitude moyenne de +/- 0.3 mm est observée pour chaque comparaison. Si l'on considère le résultat sur la pyramide du chapitre 4, l'erreur moyenne entre notre système et le système HandyScan® n'est que de 0.05 mm. Le système HandyScan® effectue quoiqu'il arrive une étape de recalage à travers l'utilisation de pastilles. Nous pouvons penser que l'écart plus important entre les numérisations sur la pièce de la banane proviendrait plutôt de la texture de la pièce observée mais il aurait fallu de plus nombreux tests pour le confirmer. La banane est en effet une pièce métallique qui même recouverte de poudre de ressuage reste réfléchissante. La pièce pyramide était quant à elle mouchetée à la peinture en noir et blanc (pas de vidéo-projection de mouchetis).

Nous avons vu que nos méthodes et en particulier la dernière produisaient des résultats comparables aux autres systèmes. Il ne faut pas oublier que les caméras se situent à environ deux mètres de l'objet et présentent de larges champs de vue ( $80 * 80cm^2$  à  $90 * 90cm^2$ ) comparés aux autres systèmes. Les autres méthodes de numérisation (Atos® et HandyScan®) ont travaillé sur de plus petites surfaces, de l'ordre de  $50 * 50cm^2$  car elles se permettent un plus grand nombre d'acquisitions n'étant pas limitées par le nombre de caméras.

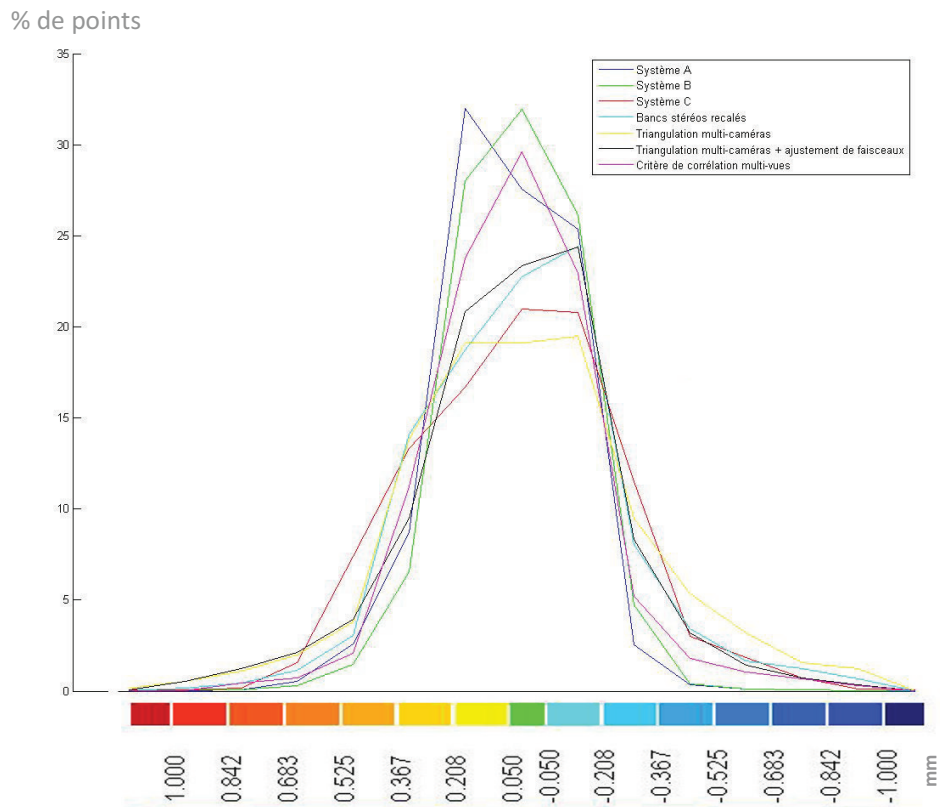


Figure 5. 22- Pourcentage de points en fonction de l'écart au modèle fourni par le Laser Tracker

### 5.4 Autres pièces numérisées

Nous avons effectué d'autres mesures au cours de cette thèse, afin de tester différentes géométries comme différents matériaux. Nous ne disposons pas d'éléments de comparaison avec une vérité terrain mais présentons tout de même les résultats.

La pièce composite suivante (fig. 5.23) avait la particularité d'être fortement réfléchissante. Elle a été reconstruite par ajustement de faisceaux conduisant à une forme globale satisfaisante. Localement, le modèle reconstruit n'est pas aussi lisse que dans la réalité. Ceci est principalement dû aux réflexions du matériau qui dégradent l'étape de corrélation.

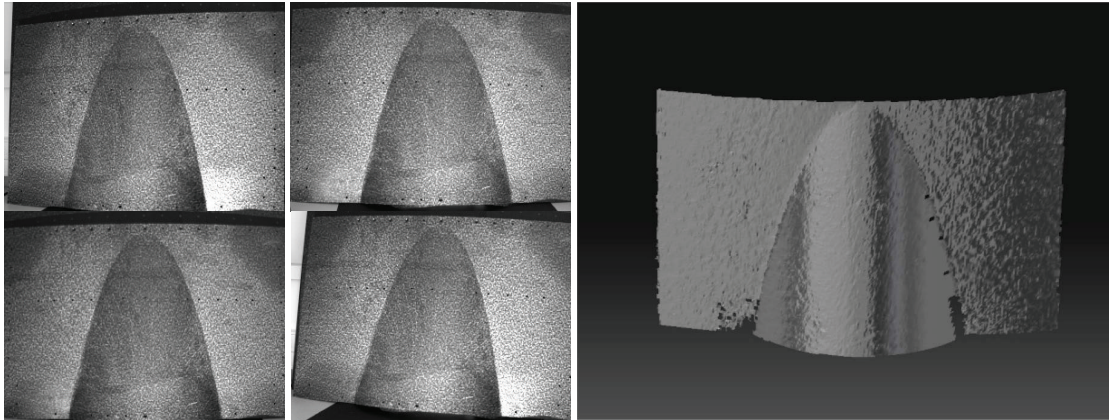


Figure 5. 23- Vues et reconstruction 3D de la pièce composite A

La pièce suivante (fig. 5.24) a été réalisée par formage incrémental à l'ENSM de Besançon. Elle est parfaitement lisse et métallique. Afin de lui apporter de la texture, un mouchetis de type peinture a été déposé à sa surface (pas de mouchetis vidéo-projeté). Le modèle résultat a été obtenu à l'aide de quatre nuages fusionnés pas Geomagic®.

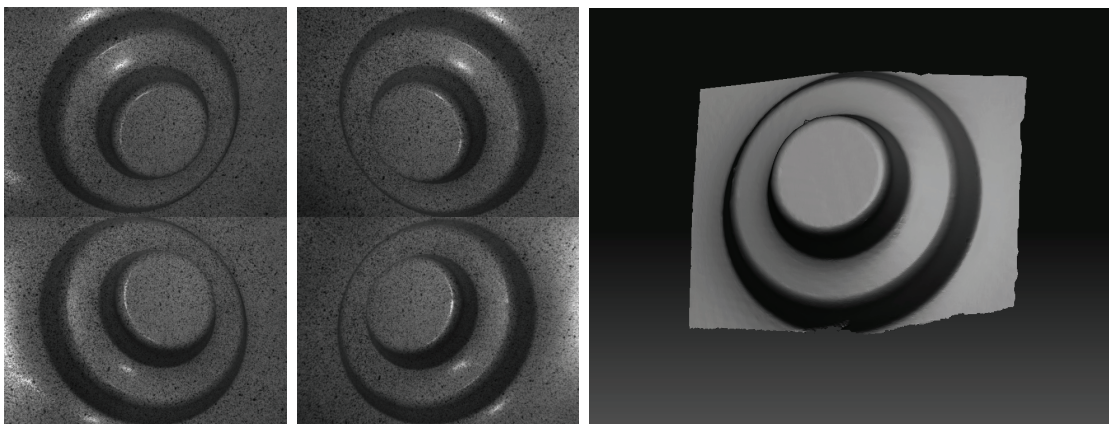


Figure 5. 24- Vues et reconstruction 3D de la pièce réalisée par formage incrémental à l'ENSM de Besançon

La pièce métallique suivante (fig. 5.25) a été mesurée par stéréo. Les trous correspondent à des zones polies sur lesquelles la texture apportée par la vidéo projection de mouchetis était presque invisible.

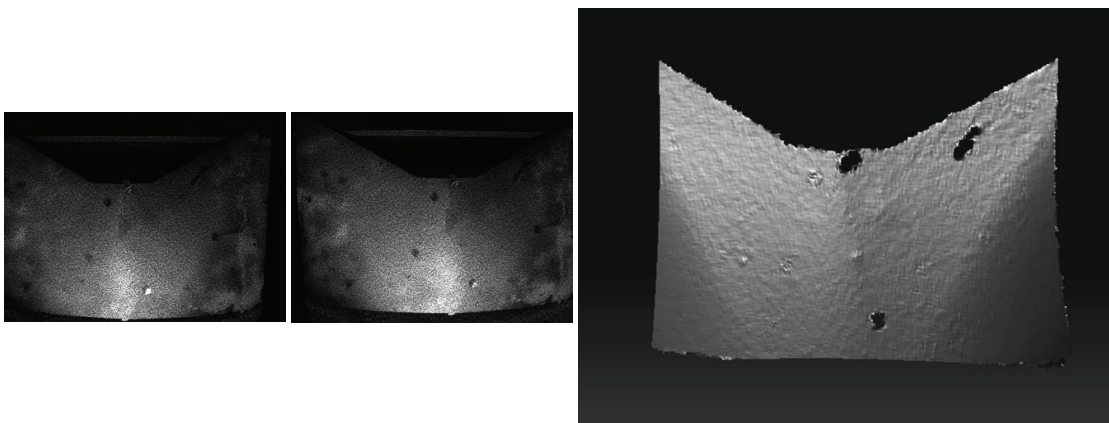


Figure 5. 25- Vues et reconstruction 3D d'un capot métallique

La pièce précédente a été déformée à l'aide d'un chalumeau et d'un marteau afin de lui apporter des défauts de forme. Sur la figure 5.26, nous pouvons observer les défauts au centre de la pièce.

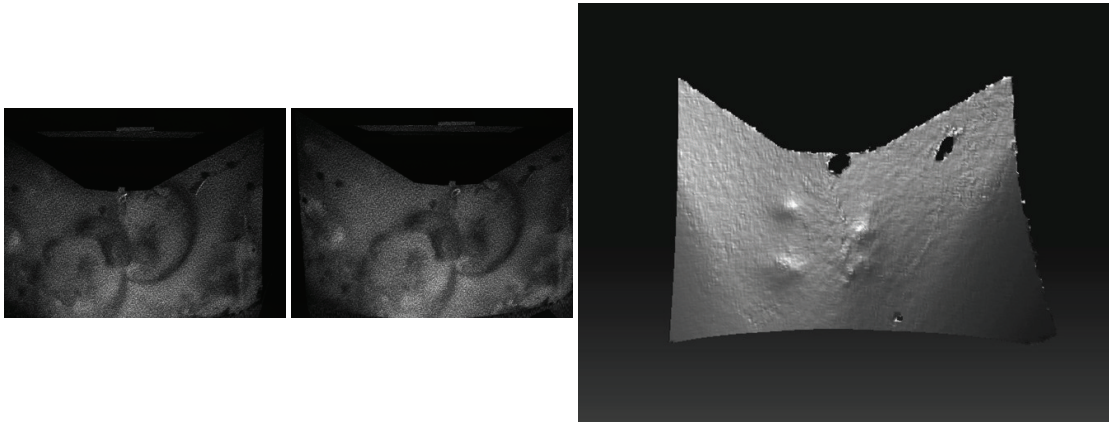


Figure 5. 26- Vues et reconstruction 3D d'un capot métallique avec des défauts

La pièce suivante est une pièce métallique peinte. La mesure a été effectuée par l'ingénieur Florian Bugarin de l'ICA-Albi, à la fin de cette thèse, en utilisant les logiciels développés durant ces trois années de thèse. Cette mesure a été effectuée sur le site d'Airbus. Un système composé de huit caméras et d'un vidéoprojecteur a été utilisé dans une configuration semblable à celle de la 'banane' (fig. 5.27) afin de mesurer une partie de la pièce. Deux grappes de caméras ont été formées. La reconstruction finale (fig. 5.29) permet d'observer les rivets (visibles aussi sur les images de la figure 5.28) ainsi que les déformations subies par la pièce lors d'essais d'impact réalisés par Airbus.





Figure 5. 27- Configuration des caméras pour la mesure du 'bouclier'

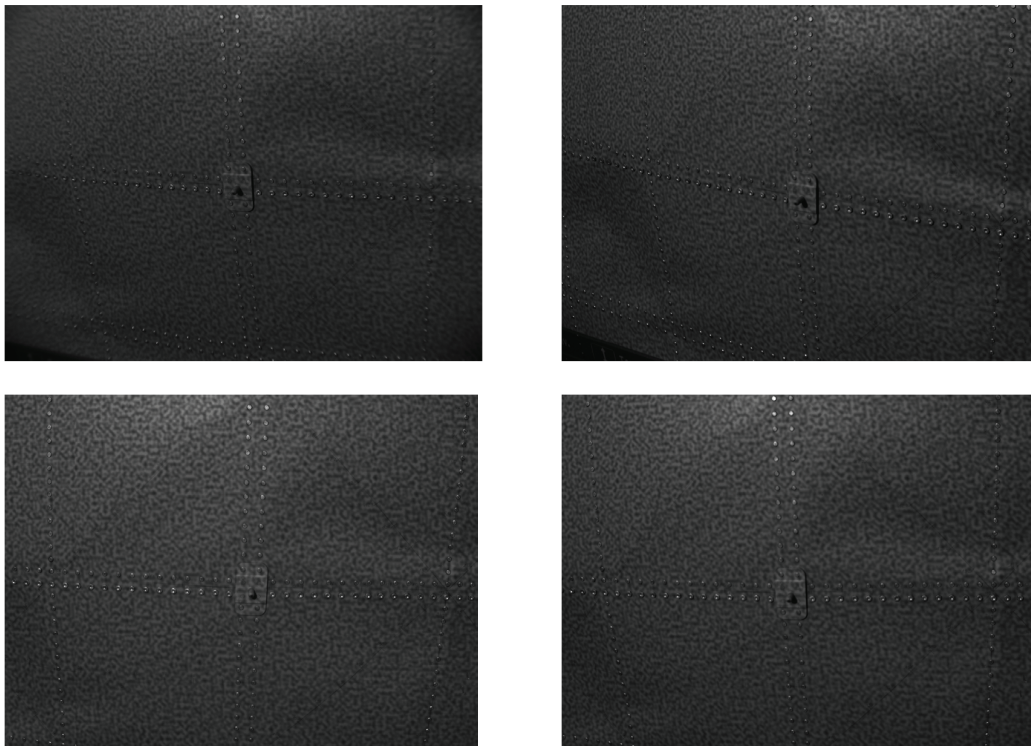


Figure 5. 28-Exemple d'images utilisées lors de la mesure du 'bouclier'



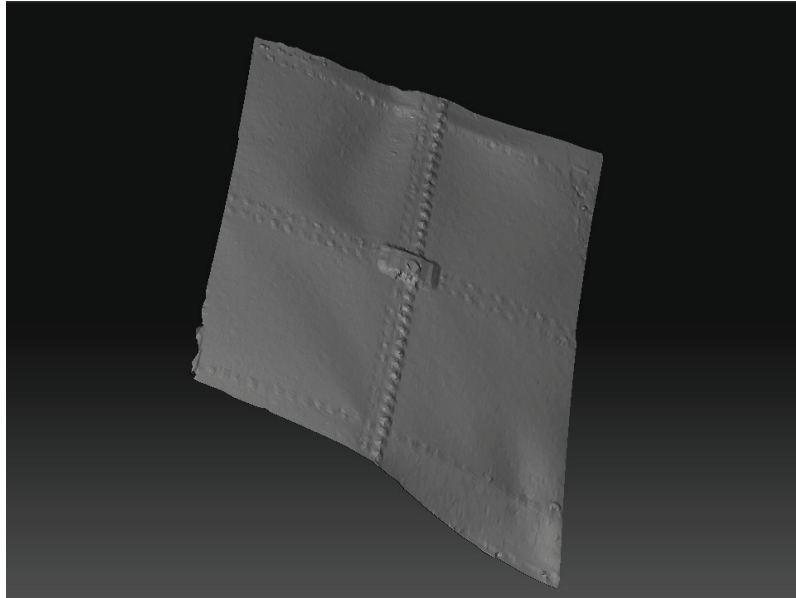


Figure 5. 29- Reconstruction 3D du bouclier

## 5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les éléments essentiels à une reconstruction 3D à partir d'un ensemble de points correspondants, et suivant différentes configurations du système multi-caméras. Nous avons présenté l'étape de recalage et plus particulièrement le recalage photométrique. Les informations issues de la corrélation d'images ont été utilisées afin d'écarter du calcul de la transformation rigide des points peu fiables.

Les résultats de nos différentes numérisations ont été enfin comparés à d'autres systèmes commerciaux de mesures. Les performances de notre système semblent tout à fait correctes, bien que quelques numérisations ne suffisent jamais à complètement évaluer un système de numérisation. Une évaluation de l'influence de la video-projection de mouchetis sur la qualité d'appariement et de reconstruction pourrait être très intéressante afin d'améliorer ces systèmes.

Nous avons montré que la création d'une grappe sur la cuvette de la 'banane' permettait d'améliorer la reconstruction 3D, en particulier via l'utilisation du critère multi-vues. La méthode par ajustement de faisceaux améliore aussi les résultats dans une moindre mesure. Il serait intéressant de pondérer les faisceaux en fonction de la qualité d'appariement de chaque point afin d'améliorer peut être la reconstruction 3D du nuage.

## 5.6 Bibliographie

Agarwaj, S., Chandraker, M.K., Kahl, F., Kriegman, D.J. and Belongie, S. (2005) 'Practical global optimization for multiview geometry', *IEEE European Conference on Computer Vision*.

Besl, P.J. and Neil, D.M. (1992) 'A method for registration of 3-D shapes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 239-256.

Garcia, D. (2001) 'Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images', *Thèse de doctorat, Ecole Mines Albi*.

Hartley, R. and Sturm, P. (1997) 'Triangulation', *Computer Vision and Image Understanding*, pp. 146-157.

Hartley, R. and Zisserman, A. (2004) 'Multiple View Geometry', *Cambridge University Press, ISBN 0-521-54051-8*.

Kahl, F. (2005) 'Multiple view geometry and the Linf norm', *IEEE International Conference on Computer Vision*.

Lorusso, A., Eggert, D. and Fisher, R.B. (1997) 'A comparison of four algorithms for estimating 3-D rigid transformations', *Machine vision and applications*, pp. 272-290.

Stewénius, H., Schaffalitzky, F. and Nistér, D. (2005) 'How hard is three-view triangulation really?', *IEEE International Conference on Computer Vision*.

Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R.I. and Fitzgibbon, A.W. (2000) 'Bundle adjustment - A modern synthesis', *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 298-372.



# Conclusion générale et perspectives

---

L'objectif de cette thèse était de développer un système multi-caméras permettant de mesurer sans contact des pièces aéronautiques de grande surface, et d'exploiter un système multi-caméras pour couvrir le champ de perception, mais aussi pour améliorer les mesures par rapport à un système stéréoscopique classique. Une deuxième partie de cette thèse, qui n'a pas pu être abordée pleinement, devait porter sur la détection de défauts de formes. Nous avons choisi au départ d'utiliser le logiciel Geomagic® afin de détecter les défauts de formes à l'aide de la comparaison du modèle CAO et du modèle obtenu par numérisation. Cette étape très délicate nécessite le développement d'outils spécialisés, permettant de séparer les défauts dits locaux (impacts, fissures) des défauts dits globaux (écarts de formes) afin de ne détecter que ceux-ci.

Pour la phase d'appariement de points, nous avons testé à la fois une approche globale et une approche locale de corrélation d'images. Nous avons finalement approfondi cette deuxième approche, et développé un moteur de corrélation par propagation de germe, capable par l'intermédiaire de critères d'arrêt de contourner les zones plus difficilement corrélables. Ces critères peuvent être basés sur la structure de la scène (distance à la droite épipolaire) ou bien sur les informations issues de la corrélation (score de corrélation, contrainte de lissage). Le fait de ne pas être dépendant de la structure de la scène permet d'utiliser la propagation de germe lors du recalage photométrique ou lors de l'assistance au calibrage afin de corréler les points présents dans les zones de recouvrement. L'utilisation simultanée de tous les critères permet un réglage plus souple de leur valeur et permet ainsi à l'utilisateur d'apparier la plupart des images avec les valeurs présentes par défaut dans le logiciel. Notre implémentation basée sur une résolution par composition inverse du critère a permis de garder les mêmes performances que les formulations classiques tout en réduisant le temps de calcul. Nous avons pu le vérifier sur les images synthétiques de déplacement 2D. Par ailleurs nous avons proposé d'utiliser un critère 3D bien adapté au contexte multi-vues car son nombre de paramètres n'augmente pas avec le nombre de caméras. Ce critère permet de traiter dans le même processus d'optimisation non linéaire simultanément la corrélation et la reconstruction 3D du point physique, la profondeur Z du point recherché faisant partie des paramètres du critère.

Nous avons proposé différentes stratégies d'exploitation des caméras et nous donnons des illustrations de ces diverses stratégies dans des expérimentations présentées à la fin de cette thèse. La configuration dite par grappe aura permis d'étendre la corrélation d'images stéréoscopiques au contexte multi-caméras via l'utilisation d'un modèle 3D comme référence lors de l'initialisation de l'appariement. Ce procédé permet d'utiliser des algorithmes de reconstruction multi-caméras tels que la triangulation multi-vues, l'ajustement de faisceaux et le critère de corrélation multi-vues basé sur l'homographie induite d'un plan. Ces deux derniers points ont montré un gain dans l'incertitude de reconstruction 3D par rapport à une triangulation multi-vues. Le critère multi-vues a montré les meilleurs résultats sur la pièce test de la 'banane', et a permis d'améliorer l'incertitude de reconstruction 3D par rapport à un système composé de plusieurs bancs stéréo. Cette exploitation d'un modèle CAO connu a priori est possible dans notre cas, puisque le but est de détecter des défauts de la pièce inspectée vis-à-vis de ce modèle. L'exploitation de notre approche multi-caméras dans le cas de la

numérisation 3D d'une pièce inconnue a priori, nécessite la mise en œuvre d'une autre stratégie. Nous avons de plus montré, que grâce au système multi-caméras, il est possible de numériser en 3D des pièces réfléchissantes, typiquement des pièces métalliques sur lesquelles la projection de mouchetis provoque des reflets.

Nous avons évalué nos algorithmes sur un ensemble d'images synthétiques de déplacements 2D et de scènes 3D. Pour la corrélation 2D, nous avons utilisé les images synthétiques fabriquées à l'occasion d'une étude portant sur le comportement des logiciels de corrélation d'images par le groupe de travail GDR CNRS 2519 MCIMS<sup>1</sup>. Notre logiciel a montré de bonnes performances et a permis de plus d'observer que les courbes en 'S' couramment utilisées à des fins d'évaluation pouvaient être difficiles à interpréter dans le cas d'une mauvaise gestion des critères d'arrêts de la méthode de descente de gradient utilisée lors de l'optimisation du critère de corrélation. Pour les images 3D, nous avons généré par lancer de rayons des images d'une scène composée de primitives usuelles et texturé les objets à l'aide d'un bruit de Perlin. L'utilisation de ces images synthétiques a montré une amélioration apportée par le critère 3D par rapport au critère stéréoscopique classique.

Notre application a aussi été validée sur des images réelles, pour la mesure de pièces fabriquées par formage incrémental et pour la mesure de pièces aéronautiques sur lesquelles nous avons comparé notre méthode de numérisation 3D utilisant un système multi-caméras, avec d'autres systèmes de mesure existants. Même si notre application n'a pas fourni les meilleurs résultats en termes d'incertitude de reconstruction 3D sur la pièce aéronautique test de la 'banane', les résultats obtenus restent tout de même très proches. Notre méthode est bien adaptée à la mesure de larges pièces dans un contexte industriel. Le système est fixe et ne nécessite pas d'être déplacé autour de la pièce, il permet de mesurer en une seule acquisition la pièce dans sa totalité pour un temps de traitement des images ne dépassant pas les quelques minutes, il travaille à une distance plus grande que de nombreux systèmes, et laisse la libre circulation d'opérateurs près de la pièce.

De nombreuses pistes sont encore à explorer, notamment une meilleure exploitation des informations a priori : du modèle CAO, du mouchetis, de la position des vidéoprojecteurs...

Concernant la corrélation d'images il serait intéressant de mieux exploiter les connaissances sur le mouchetis synthétique projeté par les vidéoprojecteurs. Celui-ci peut à la fois donner des indications vis-à-vis de la corrélabilité des images, de la taille optimale des fenêtres de corrélation mais pourrait aussi être utilisé lors de l'appariement lui-même afin de réduire à la fois le temps de calcul et les erreurs d'interpolation commises pour l'évaluation du score de corrélation pour des coordonnées sub-pixel des correspondants. L'interpolation est l'élément le plus consommateur de temps de calcul de ces algorithmes. La fonction mouchetis étant connue et pouvant être calculée très rapidement, par exemple avec le 'simplex noise', elle pourrait permettre de s'affranchir dans un schéma de corrélation « Image référence = image des caméras », « image cible = mouchetis projeté » de l'étape d'interpolation. Cette stratégie changerait néanmoins le contexte d'utilisation du système et le vidéoprojecteur devrait être calibré. Le système pourrait numériser en 3D des zones de la pièce perçues à partir d'un seul couple caméra/vidéo-projecteur.

---

<sup>1</sup> GDR2519 : <http://www.ifma.fr/lami/gdr2519>

Nous n'avons pas non plus étudié l'influence de la vidéo projection sur la qualité finale de la reconstruction 3D obtenue. Cette étude essentielle permettrait de mieux cibler les lacunes de nos algorithmes et sûrement de les améliorer, mais aussi de mieux positionner les vidéoprojecteurs, leur comportement étant mieux connu.

Calibrer les vidéoprojecteurs, en combinaison avec l'utilisation du modèle CAO pourrait nous permettre d'adapter le mouchetis à la surface de la pièce observée. Il serait ainsi possible de déformer le mouchetis afin de recouvrir la pièce d'une texture de taches uniformes.

Nous avons développé les prémices d'un module d'assistance d'aide au calibrage, permettant d'orienter le choix de l'opérateur dans la création de grappes et de bancs stéréo. Cette assistance peut être améliorée afin de fournir plus d'informations à l'opérateur. Par exemple, un message d'alerte pourrait être affiché lorsque l'opérateur n'a pas laissé suffisamment de zones de recouvrement afin de permettre un recalage photométrique correct des bancs ou grappes de caméras, ou bien lorsque le calibrage risque d'être dégradé. A long terme, cette assistance pourrait déboucher sur un programme de configuration automatique du système. Elle pourrait permettre de positionner les caméras et les vidéoprojecteurs d'une manière optimale, et de choisir le mouchetis idéal en fonction de la pièce observée.

Au niveau reconstruction 3D, il serait intéressant de prendre en compte la qualité de chaque appariement et d'en tirer parti lors de l'ajustement de faisceaux à travers la pondération de chaque rayon. En effet dans notre implémentation actuelle chaque appariement est considéré de la même façon. Nous possédons déjà un indicateur de qualité pour chaque point apparié au travers des valeurs des seuils issues de la propagation de germe. Aussi nous pourrions les intégrer à la phase de reconstruction 3D.

Dans un contexte métrologique, il semble indispensable de pouvoir associer une incertitude à chaque point reconstruit en fonction des erreurs de calibrage et des erreurs de corrélation. Nous disposons déjà de critères d'évaluation du calibrage (erreur de reprojection, distance à la droite épipolaire...) et de la corrélation (score de corrélation, contrainte de lissage...) mais n'exploitons pas ces informations pour associer une incertitude à chaque point reconstruit. Propager les incertitudes, en partant de la phase de calibrage du système pourrait nous permettre de disposer de cette information.

D'un point de vue pratique, une couche d'intégration permettant de rendre le produit plus exploitable par AIRBUS serait nécessaire. Le développement d'une interface graphique plus conviviale ainsi que l'automatisation de fonctionnalités élémentaires : gestion des fichiers d'entrée et de sortie, fusion de la partie calibrage (développée par l'ingénieur de recherche Florian Bugarin) et de la partie corrélation (développée au cours de cette thèse), seraient nécessaires.





# Annexe A. Images issues du groupe de travail GDR2519

---

Une des tâches du groupe de travail GDR CNRS 2519 « Mesures de champs et identification en mécanique des solides »<sup>1</sup> est de mieux comprendre l'origine des incertitudes de mesure des systèmes optiques (Bornert et al., 2009). Les logiciels de corrélation d'images sont largement utilisés afin de mesurer des déplacements et déformations lors d'essais mécaniques. Ceux-ci sont généralement utilisés par des personnes non expertes dans le domaine de la corrélation d'images, et il leur est parfois difficile de comprendre l'influence des divers paramètres auxquels ils ont accès. Afin d'évaluer les résultats de ces logiciels il est possible de générer des images représentant un déplacement imposé dont la valeur est connue. Dans un premier « benchmark », le groupe de travail GRD2519 a choisi de générer des images synthétiques modélisant des déplacements sinusoïdaux d'amplitude et de fréquence variables et d'étudier le comportement des logiciels. Dans un second « benchmark », des images synthétiques modélisant des déplacements de type translation ont été créés. Nous présentons ici la formation de ces deux types d'images.

Les images ont été générées à partir du logiciel TexGen (Orteu et al., 2006) basé sur la fonction bruit de Perlin (Annexe B). Ce logiciel permet de créer des images synthétiques qui imitent les textures réelles (projection de peinture en spray noire et blanche, dépôt de toner d'imprimante) habituellement utilisées en corrélation d'images. Les images ainsi créées sont affranchies de toutes les erreurs d'interpolation possibles en utilisant une technique « d'anti-aliasing » lors de la discrétisation de l'image. Afin de créer des images déformées, n'importe quelle transformation  $W$  peut être appliquée à une image de référence  $T_c$ , en obéissant au principe de conservation du flot optique, tel que :

$$D(j) = T_c(W^{-1}(j; p)) \quad (\text{A.1})$$

avec  $D$  l'image déformée et  $p$  l'ensemble des paramètres définissant la transformation  $W$ .  $T_c$  exprime la représentation continue de l'image discrétisée sur 8 bits  $T$ . La déformation est donc appliquée sur la fonction continue représentant l'image et n'introduit pas de biais.

## A.1 Images « sinus »

Les images du premier « benchmark » ont été générées en utilisant la transformation sinusoïdale suivante :

$$W(j; p) = j + \alpha p \sin \frac{2\pi j}{p_e} e_x \quad (\text{A.2})$$

avec  $p_e$  la période en pixels et  $2\pi\alpha$  l'amplitude du gradient du déplacement dans la direction  $X$ . Les images sinus ont été formées pour différentes associations d'amplitudes et de périodes, avec

---

<sup>1</sup> GDR2519 : <http://www.ifma.fr/lami/gdr2519>

$p_e = \{10,20,30,60,130,260,510\}$  et  $\alpha = \{0.001,0.005,0.01,0.02,0.05,0.1\}$ . La figure A.1 présente quatre images.

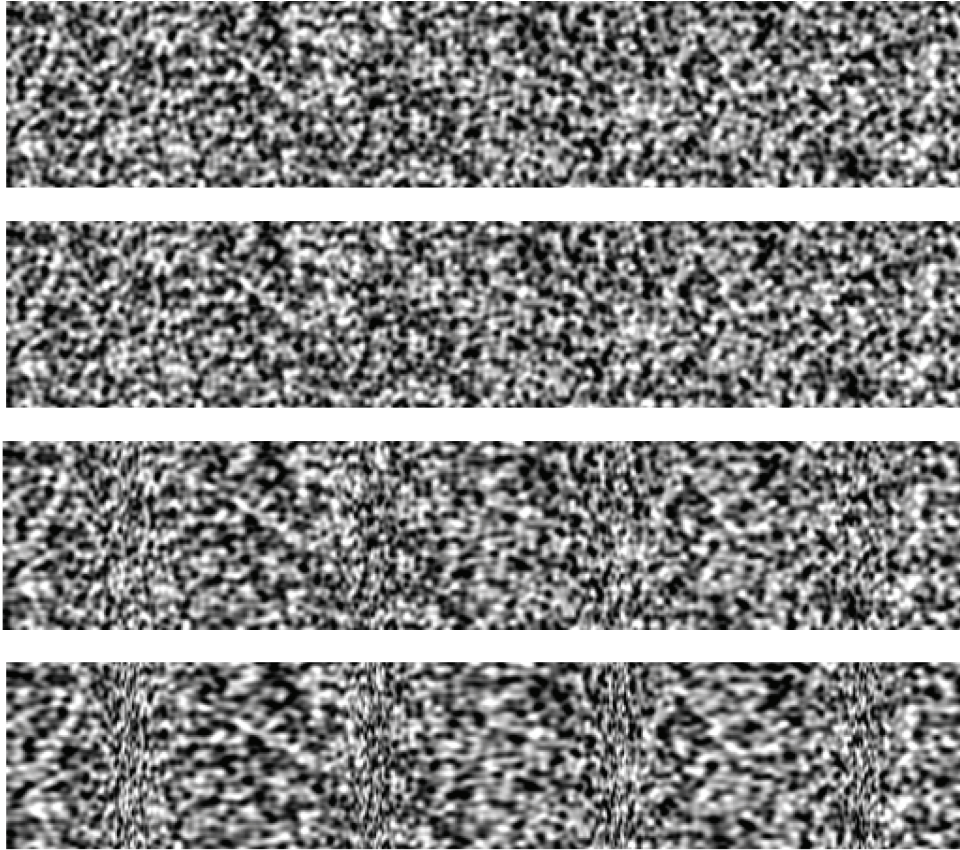


Figure A. 1-Exemple d'images synthétiques, Image 0 : Référence, Image 1 :  $p_e=130$ ,  $\alpha=0.02$ , Image 2 :  $p_e=130$ ,  $\alpha=0.05$ , Image 3 :  $p_e=130$ ,  $\alpha=0.1$

Le gradient maximal est alors calculée  $u_X^{MAX} = \{0.63\%, 3.1\%, 6.3\%, 12.6\%, 31.4\%, 62.8\%\}$  et peut être observé (cf. figure A.2). Les deux images du haut montrent une image « sinus » de période  $p_e = 510$  et  $\alpha = 0.1$ .  $u_X^{MAX} = 62.8\%$  et le déplacement maximum observé (à l'aide du logiciel Vic3D®) est de 51 pixels. Les deux images du bas montrent une image « sinus » de période  $p_e = 60$  et  $\alpha = 0.01$ .  $u_X^{MAX} = 6.3\%$  et le déplacement maximum observé est de 0.6 pixels.



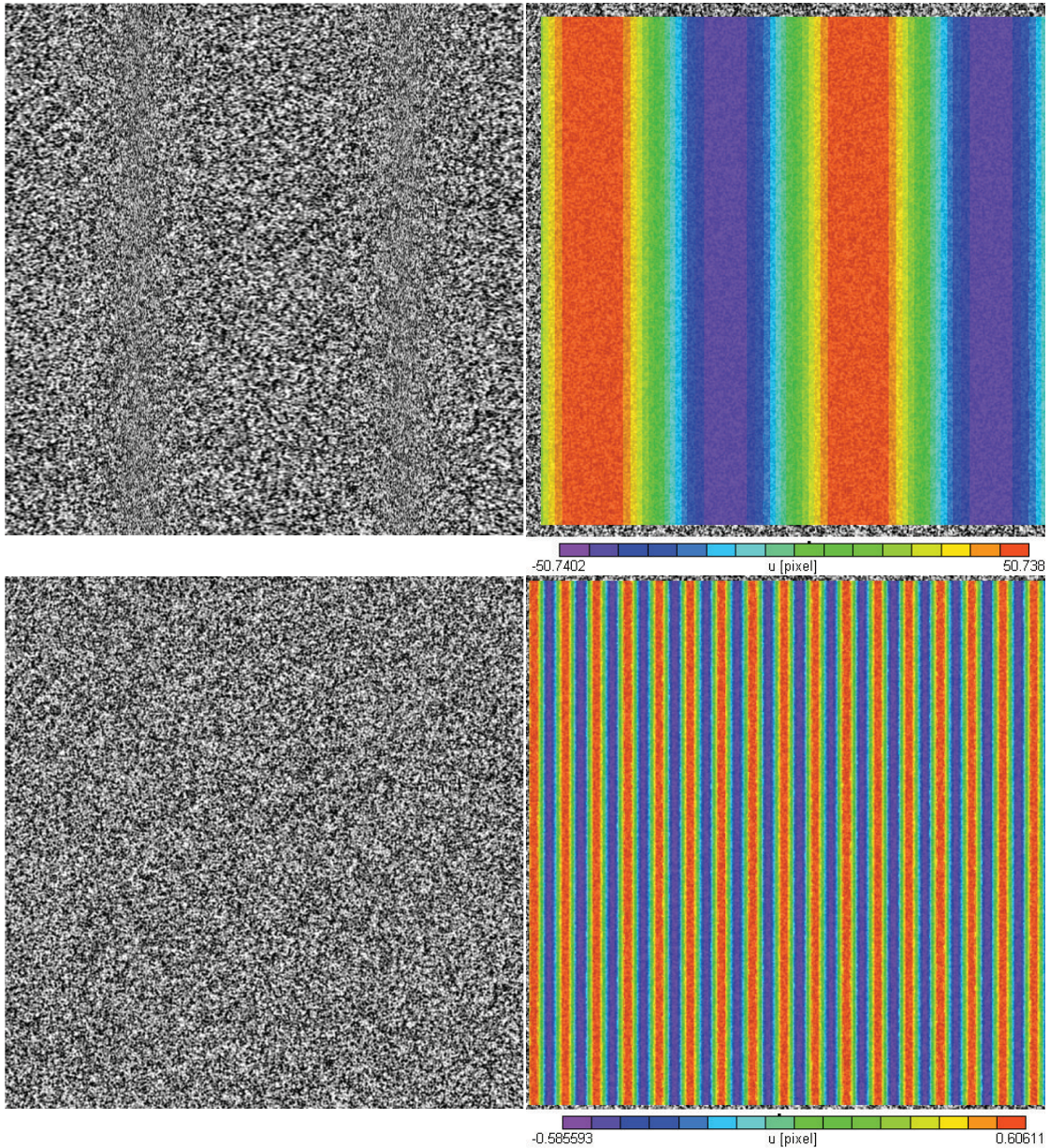


Figure A. 2-Déplacements observés sur les images "sinus" à l'aide du logiciel Vic2D®

## A.2 Images « translation »

Dans une deuxième étude le groupe de travail GRD2519 a souhaité étudier l'influence du bruit sur la mesure de déplacements et a créé un ensemble d'images synthétiques bruitées soumises à un déplacement de type translation. La transformation utilisée s'écrit :

$$W(j; p) = j + d \quad (\text{A.3})$$

avec  $d = \begin{pmatrix} d_x \\ 0 \end{pmatrix}$  le vecteur de déplacement selon l'axe x.

Les images ont été générées selon un déplacement variant de 0 à 1 pixel, avec un pas de 0.02 pixels (soit 50 images), et suivant différents niveaux de gris de bruit  $n = \{0, 2, 4, 8, 16\}$ . Les images discrétisées sont de taille 512x512, 1024x1024 et 2048x2048 pixels.

La figure A.3 présente 2 images.



Figure A. 3- Exemple d'images synthétiques "translation", Image gauche : bruit = 0, Image droite : bruit = 16

### A.3 Bibliographie

Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J.-C., Fazzini, M., Grédiac, M., Hild, F., Mistou, S., Molimard, J., Orteu, J.-J., Robert, L., Surrel, Y., Vacher, P. and Wattrisse, B. (2009) 'Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: methodology and results', *Experimental Mechanics*, vol. 49, no. 3, pp. 353-370.

Orteu, J.J., Garcia, D., Robert, L. and Bugarin, F. (2006) 'A speckle-texture image generator', *Speckle06*.



# Annexe B. Génération de mouchetis

A partir du moment où l'on souhaite apparier des images par corrélation, et que l'on désire obtenir une précision accrue, il devient nécessaire que la scène possède une texture suffisante. Pour pallier ce problème, nous projetons un motif aléatoire sur les objets que l'on veut numériser. Nous utilisons pour cela soit plusieurs vidéoprojecteurs, soit des rétro projecteurs. Nous présenterons ici, comment les différents mouchetis utilisés lors de la projection de texture ou la création des images synthétiques ont été créés. A noter que le logiciel TexGen (Orteu et al., 2006), permet déjà la création d'images synthétiques et est basé sur les mêmes algorithmes et le même code de bruit de Perlin. Son utilité principale est de créer des images imitant les mouchetis de type peinture généralement utilisés en corrélation d'images et d'appliquer à ces images une transformation quelconque. Nous avons créé notre propre moteur de bruit afin de pouvoir moucheter nos scènes 3D, et afin de pouvoir contrôler en temps réel le mouchetis vidéo-projeté. Nous avons observé que les mouchetis du logiciel TexGen, de par leur ressemblance à des textures naturelles, ne sont pas toujours ceux qui donnent le meilleur résultat en corrélation d'images, aussi nous avons privilégié des mouchetis plus 'tendres', avec des transitions plus douces entre les niveaux de gris.

## B.1 Bruit de Perlin

Le Bruit de Perlin (Perlin, 1985)(Perlin, 2002) est une texture procédurale habituellement utilisée dans le domaine de la synthèse d'images afin de produire des effets réalistes tels que les nuages, les explosions, le marbre...

### B.1.1 Dimension 1

La fonction de Perlin est une fonction de bruit basée sur des gradients pseudo aléatoires distribués à intervalles réguliers dans un espace donné. Entre ces intervalles, la fonction est interpolée. Pour générer une fonction de Perlin en 1 dimension, un gradient pseudo-aléatoire est associé à chaque position entière de l'espace 1D (fig.B.1). La valeur nulle est aussi donnée à chacune de ces positions.

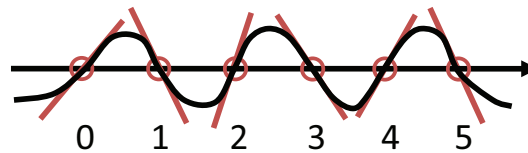


Figure B. 1- Gradients (droites rouges) associés aux points 1D entiers

Pout un point  $x$  se trouvant quelque part entre deux entiers, sa valeur est déterminée par interpolation en utilisant les gradients choisis précédemment. L'interpolation ne peut être linéaire car la fonction ne serait plus dérivable aux points entiers. Perlin, dans son premier article



avait choisi d'utiliser une fonction de mélange cubique basée sur les courbes de Hermite (Perlin, 1985).

$$f(t) = 3t^2 - 2t^3 \quad (\text{B.1})$$

Cependant il est parfois désirable d'avoir une fonction doublement différentiable. Dans une nouvelle version (Perlin, 2002), la fonction de degrés cinq suivante, obtenue selon le même modèle fut introduite.

$$f(t) = 6t^5 - 15t^4 + 10t^3 \quad (\text{B.2})$$

### B.1.2 Dimension 2

En 2 dimensions, les coordonnées des points entiers forment une grille régulière. Un gradient pseudo-aléatoire 2D est associé à chacun des points (fig. B.2).

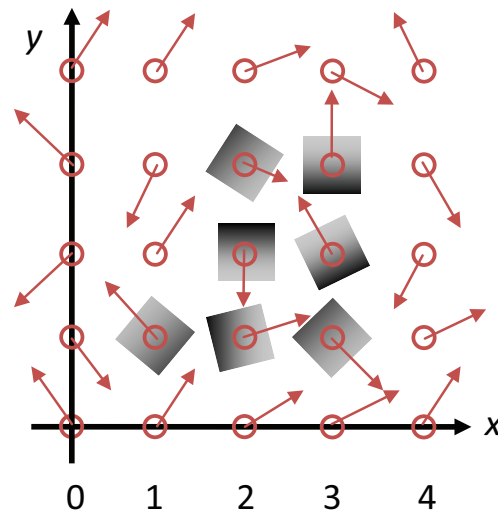


Figure B. 2- Gradients associés aux points 2D entiers

La valeur pour un point  $P(i + u, j + v)$  quelconque est calculée par interpolation du produit scalaire des gradients (en rouge) de chaque sommet et des vecteurs reliant les sommets au point  $P$  (en vert). Les équations (B.1) ou (B.2) sont utilisées lors de l'interpolation.

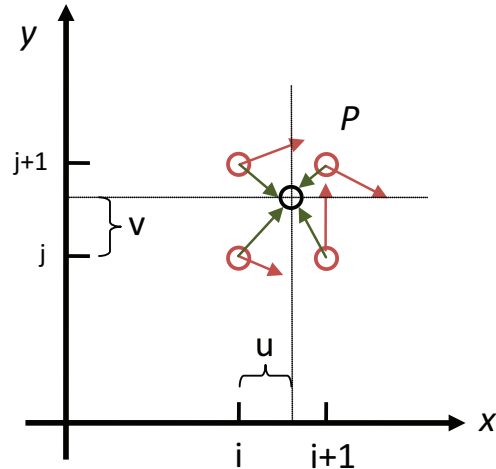


Figure B. 3- Calcul de la valeur d'un point P quelconque

L'algorithme est généralisable à des dimensions supérieures.

## B.2 Bruit Simplex

Le bruit Simplex (Perlin, 2001) (Gustavson, 2005) est une méthode de génération de bruit pseudo-aléatoire qui fut introduite par Ken Perlin. Ce bruit fut présenté comme une alternative au bruit classique décrit dans la partie précédente. Il permet de combler quelques inconvénients présents dans la version précédente.

Il est d'abord plus efficace en termes de complexité et le temps de génération des images est nettement diminué.

Il est plus uniforme et ne présente pas d'artéfacts (proche des zones entières notamment).

### B.2.1 Grilles simplex

L'idée directrice de cet algorithme est d'occuper un espace de dimension donnée à l'aide de la composition de la plus simple primitive de cet espace. Pour exemple, en 2 dimensions, la primitive la plus simple pour couvrir un plan est un triangle, et plus précisément équilatéral. En les disposants tête bêche, ceux ci prennent la forme de losanges (en gris sur la figure B.4).

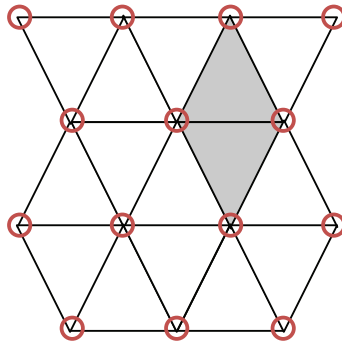


Figure B. 4- Grille simplex

En trois dimensions, la primitive minimale est un tétraèdre, et l'assemblage de six d'entre eux forme un rhomboèdre, et plus particulièrement un trapézoèdre trigonal.

### B.2.2 Sommation des gradients

Comme pour le bruit classique, la contribution de chaque sommet doit être prise en compte pour déduire la valeur de niveaux de gris en chaque pixel. Ceci se fait par sommation directe des gradients de chaque sommet associés à une fonction d'atténuation radiale (cercle de la figure B.5.). La fonction d'atténuation prend la valeur nulle à l'extérieur du cercle. Chaque point  $P$  s'exprime donc en fonction de trois sommets. A la différence de la méthode classique, où l'on interpole dans chaque dimension les gradients cette méthode se contente de les additionner. Cette nouvelle façon de procéder est plus rapide et permet aussi d'obtenir plus facilement les dérivées de l'image. Il n'est en effet pas nécessaire de dériver les interpolations imbriquées.

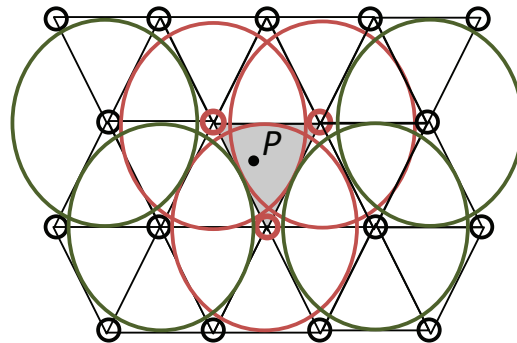


Figure B. 5- Contribution des gradients au point P

### B.3 Paramètres contrôlables et choix du mouchetis

La fonction bruit de Perlin, comme la fonction 'simplex' possèdent un ensemble de paramètres contrôlables. La taille du grain (taille des taches), la dureté (gradient entre le noir et le blanc), le nombre de niveaux de gris, la couleur, la répartition des niveaux de gris, l'intensité, peuvent être ajustés selon les pièces à numériser. Nous avons principalement fait varier la taille du grain, ainsi

que l'intensité lorsque la texture observée était trop sombre. La taille du grain permet, quand elle est réduite sans dégrader la qualité du mouchetis projeté, de réduire la fenêtre de corrélation utilisée et ainsi d'augmenter la résolution spatiale. Les mouchetis en couleur permettent parfois de diminuer légèrement les reflets sur certaines surfaces colorées. Nous privilégions les mouchetis ayant une 'dureté' faible, c'est-à-dire ayant une transition douce et continue entre le blanc et le noir. Nous avons en effet remarqué que notre algorithme de corrélation d'images donnait de meilleurs résultats sur ce type d'images.

Le logiciel permet directement de modifier les mouchetis projetés. Lors d'une numérisation nous essayons donc différents mouchetis de taille de grain différente et éventuellement d'intensité différente, et acquérons plusieurs fois la même scène. Lors du traitement nous essayons de choisir les images permettant d'utiliser une fenêtre de corrélation de petite taille et permettant bien sûr de corréler les images dans leur totalité.

Nous présentons six exemples de mouchetis : cinq mouchetis de type Perlin : deux de tailles de grain différentes et trois en couleur et un mouchetis de type 'Simplex'.

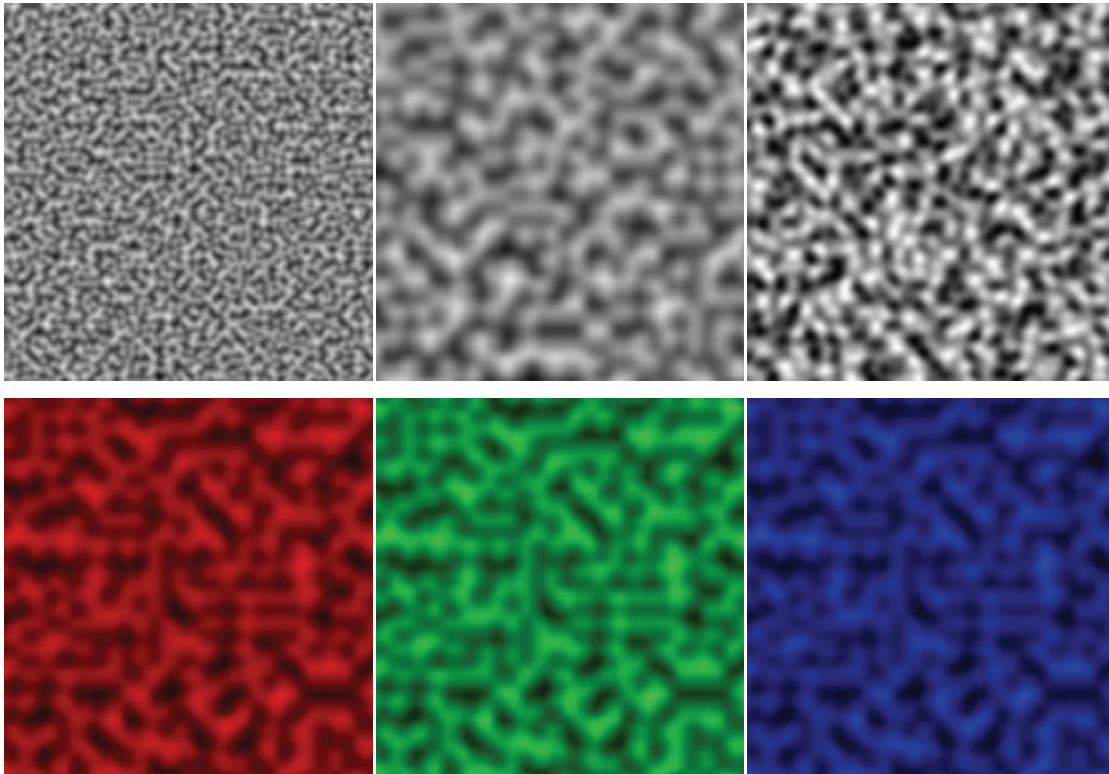


Figure B. 6- Exemples de mouchetis utilisé pour la vidéo-projection de texture. Bruit de Perlin (deux images haut gauche et images du bas) et bruit 'simplex' (image haut droite)

## B.4 Bibliographie

Gustavson, S. (2005) 'Simplex noise demystified', Note : <http://www.itn.liu.se/~stegu/simplexnoise/simplexnoise.pdf>.

Orteu, J.J., Garcia, D., Robert, L. and Bugarin, F. (2006) 'A speckle-texture image generator', *Speckle06*.

Perlin, K. (1985) 'An image synthesizer', *SIGGRAPH*, vol. 19, no. 3, pp. 287-296.

Perlin, K. (2001) 'Noise hardware', *Real-time shading SIGGRAPH Courses Notes*.

Perlin, K. (2002) 'Improving noise', *SIGGRAPH*, vol. 21, no. 3, pp. 681-682.

## Bibliographie générale

Agarwaj, S., Chandraker, M.K., Kahl, F., Kriegman, D.J. and Belongie, S. (2005) 'Practical global optimization for multiview geometry', *IEEE European Conference on Computer Vision*.

Baker, S. and Matthews, I. (2003) 'Lucas-Kanade 20 years on:a unifying framework: part2', *Technical Report*.

Baker, S. and Matthews, I. (2004) 'Lucas-Kanade 20 years on:a unifying framework: part1', *International Journal of Computer Vision*, vol. 56, no. 3, pp. 221-255.

Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. and Van Gool, L. (2008) 'Spedded-up robust features (SURF)', *Computer Vision and Intelligence Understanding*, vol. 110, no. 3, pp. 346-359.

Besl, P.J. and Neil, D.M. (1992) 'A method for registration of 3-D shapes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 2, pp. 239-256.

Boorne, P. (2010) 'Measure for measure', *Aerospace Testing International*, pp. 54-58.

Bornert, M., Brémand, F., Doumalin, P., Dupré, J.-C., Fazzini, M., Grédiac, M., Hild, F., Mistou, S., Molimard, J., Orteu, J.-J., Robert, L., Surrel, Y., Vacher, P. and Wattrisse, B. (2009) 'Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: methodology and results', *Experimental Mechanics*, vol. 49, no. 3, pp. 353-370.

Bornert, M., Orteu, J.J. and Roux, S. (A paraître) 'Chapitre 6. Corrélation d'images', *Mesures de champs et identification, Hermès*.

Boykov, Veksler and Zabih (1999) 'Fast approximate energy minimization via graph cuts', *IEEE International Conference on Computer Vision*.

Brown, Burschka and Hager (2003) 'Advances in Computational Stereo', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, no. 8, pp. 993-1008.

Brox, Bruhn, Papenbergh and Weickert (2004) 'High accuracy optical flow estimation based on a theory for warping', *IEEE European Conference on Computer Vision*.

Bugarin, F., Henrion, D., Sentenac, T., Lasserre, J.B. and Orteu, J.J. (2010) 'Optimisation globale polynomiale appliquée à la rectification projective d'images non calibrées', *Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*.

Chambon, S. (2005) 'Mise en correspondance stéréoscopique d'images couleur en présence d'occultations', *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse*.

Chambon, L., Congourdeau, F., Galerne, C., Guinard, S. and Thevenet, P. (2004) 'Application des méthodes optiques pour le suivi global du comportement des structures aéronautiques', *Photoniques*, no. 16, pp. 34-38.



- Criminisi, Shotton, Blake, Rother and Torr. (2003) 'Efficient dense stereo and novel view synthesis for gaze manipulation in one to one teleconferencing', *Technical Report*.
- Deng, Y., Lin, Y., Dai, Q. and Zhang, Z. (2010) 'Depth maps for multi-view stereo via matrix completion', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. Soumis.
- Devernay, F. (1997) 'Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces', *Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique*.
- Faugeras, O. (1993) 'Three dimensional computer vision :A geometric viewpoint', *The MIT press, ISBN 0-262-06158-9*.
- Faugeras, O. and Keriven, R. (1998) 'Variational principles, surface, PDE's, level set methods, and the stereo problem', *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 7, pp. 336-344.
- Felzenszwalb and Huttenlocher (2006) 'Efficient belief propagation for early vision', *International journal of computer vision*, vol. 70, no. 1, pp. 41-54.
- Forstmann, S., Kanou, Y., Ohya, J., Thuring, S. and Schmitt, A. (2004) 'Real-time stereo by using Dynamic Programming', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 3.
- Furukawa, Y. (2008) 'High-fidelity image-based modeling', *Thèse de doctorat, University of Illinois*.
- Furukawa, Y. and Ponce, J. (2007) 'Accurate,dense,and robust multi-view stereopsis', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Fusiello, Trucco and Verri (2000) 'A compact algorithm for rectification of stereo pairs', *Machine Vision and Applications*, vol. 12, no. 1, pp. 16-22.
- Garcia, D. (2001) 'Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréocorrélation d'images', *Thèse de doctorat, Ecole Mines Albi*.
- Gustavson, S. (2005) 'Simplex noise demystified', *Note : <http://www.itn.liu.se/~stegu/simplexnoise/simplexnoise.pdf>*.
- Habbecke, M. and Kobbelt, L. (2006) 'Iterative multi-view plane fitting', *International Workshop in Vision, Modeling, and Visualization*, pp. 73-80.
- Harris, C.S.M. (1988) 'A combined corner and edge detector', *4th Alvey vision conference*, pp. 147-151.
- Hartley, R. and Sturm, P. (1997) 'Triangulation', *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 68, no. 2, pp. 146-157.
- Hartley, R. and Zisserman, A. (2004) 'Multiple View Geometry', *Cambridge University Press, ISBN 0-521-54051-8*.
- Hild, F. and Roux, S. (2006) 'Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties', *Strain*, vol. 42, no. 2, pp. 69-80.

- Horaud, R. and Monga, O. (1995) 'Vision par ordinateur :outils fondamentaux', *Hermès, ISBN 2866014812*.
- Horn and Schunck (1981) 'Determining optical flow', *Artificial intelligence*, vol. 17, pp. 185-203.
- Hua, T., Xie, H., Simon, W., Zhenxing, H., Pengwan, C. and Qinqming, Z. (2010) 'Evaluation of the quality of a speckle pattern in digital image correlation method by mean subset fluctuation', *Optics and Laser Technology*.
- Innovision-Systems (2010) '<http://www.innovision-systems.com>'.
- Kahl, F. (2005) 'Multiple view geometry and the Linf norm', *IEEE International Conference on Computer Vision*.
- Klaus, Sormann and Karner (2006) 'Segment-based stereo matching using belief propagation and a self-adapting dissimilarity measure', *International Conference on Pattern Recognition*.
- Kolmogorov and Zabih (2001) 'Computing visual correspondence with occlusions using graph cuts', *IEEE International Conference on Computer Vision*.
- Lavest, J.-M., Viala, M. and Dhome, M. (1998) 'Do We Really Need an Accurate Calibration Pattern to Achieve a Reliable Camera Calibration?', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1406, pp. 158-174.
- Lecompte, D. (2007) 'Elastic and elasto-plastic material parameter identification by inverse modeling of static tests using digital image correlation', *Thèse de doctorat, Université de Bruxelles*.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hermelrijck, D. and A.M, H. (2006) 'Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation', *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 44, no. 11, pp. 1132-1145.
- Leung, C.W.Y. (2006) 'Efficient methods for 3D reconstruction from multiple images', *Thèse de doctorat, University of Queensland*.
- Lorusso, A., Eggert, D. and Fisher, R.B. (1997) 'A comparison of four algorithms for estimating 3-D rigid transformations', *Machine vision and applications*, vol. 9, pp. 272-290.
- Lowe, D. (2004) 'Distinctive image features from scale-invariant keypoints', *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, no. 2.
- Lu, H. and Cary, P.D. (2000) 'Deformation Measurements by Digital Image Correlation: Implementation of a Second-order Displacement Gradient', *Experimental Mechanics*, vol. 40, no. 4, pp. 393-400.
- Lucas, B.D. and Kanade, T. (1981) 'An iterative image registration technique with an application to stereo vision', *International Joint Conferences on Artificial Intelligence*.
- Lu, H. and Ganesan, B. (2002) 'Implementation of Third-order Displacement Gradient in Digital Image', *International Conference on Computational Engineering and Sciences*.

- Martinec, D. (2008) 'Robust Multiview Reconstruction', *Thèse de doctorat, University of Prag*.
- Meijering, E. (2002) 'A chronology of interpolation: from ancient astronomy to modern signal and image processing', *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 3, pp. 319-342.
- Ming, L. (2001) 'Correspondence Analysis Between The Image Formation Pipelines of Graphics and Vision', *IX Spanish Symposium on Pattern Recognition and Image Processing*.
- Morel, O., Stolz, C., Meriaudeau, F. and Gorria, P. (2006) 'Active Lighting Applied to 3D Reconstruction of Specular Metallic Surfaces by Polarization Imaging', *Applied Optics*, vol. 45, no. 17, pp. 4062-4068.
- MotionAnalysis (2010) '<http://www.motionanalysis.com>'.
- Nvidia (2004) 'GPU Gems: Programming Techniques, Tips, and Tricks for Real-Time Graphics', [http://developer.nvidia.com/object/gpu\\_gems\\_home.html](http://developer.nvidia.com/object/gpu_gems_home.html).
- Okutomi, M. (1993) 'A multiple-baseline stereo', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 4, pp. 353-363.
- Orteu, J.-J., Bugarin, F., Harvent, J., Robert, L. and Velay, V. (soumis) 'Multiple-camera instrumentation of a single point incremental forming process pilot for shape and 3D displacement measurements : methodology and results', *Experimental Mechanics*.
- Orteu, J.J., Garcia, D., Robert, L. and Bugarin, F. (2006) 'A speckle-texture image generator', *Speckle06*.
- Pan, B. (2009) 'Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement', *Applied Optics*, vol. 48, no. 8, pp. 1535-1542.
- Perlin, K. (1985) 'An image synthesizer', *SIGGRAPH*, vol. 19, no. 3, pp. 287-296.
- Perlin, K. (2001) 'Noise hardware', *Real-time shading SIGGRAPH Courses Notes*.
- Perlin, K. (2002) 'Improving noise', *SIGGRAPH*, vol. 21, no. 3, pp. 681-682.
- Pons, J.-P., Keriven, R. and Faugeras, O. (2005) 'Modelling dynamic scenes by registering multi-view image sequences', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 822-827.
- Powell (2004) 'The NEWUOA software for unconstrained optimization without derivatives', *The 40th Workshop on Large Scale Nonlinear Optimization*.
- Pribanic, T., Sturm, P. and Cifrek, M. (2007) 'Calibration of 3D kinematic systems using orthogonality constraints', *Machine Vision and Applications*, vol. 18, no. 6, pp. 367-381.
- Restrepo-Specht, J.A. (2005) 'Modélisation d'objets 3D par construction incrémentale d'un maillage triangulaire, dans un contexte robotique', *Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse*.

- Réthoré, J., Hild, F. and Roux, S. (2008) 'Extended digital image correlation with crack shape optimization', *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 73, pp. 248-272.
- Rohlfing, T., Maurer, C.R., Bluemke, D.A. and Jacobs, M.A. (2003) 'Volume-preserving nonrigid registration of MR breast images using free-form deformation with an incompressibility constraint', *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 22, no. 6, pp. 730-741.
- Rueckert, D., Sonoda, L.I., Hayes, C., Hill, D.L.G., Leach, M.O. and Hawkes, D.J. (1999) 'Nonrigid registration using free-form deformations: application to breast MR images', *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 18, no. 8, pp. 712-721.
- Salvi, J., Pagès, J. and Batle, J. (2004) 'Pattern codification strategies in structured light systems', *Pattern Recognition*, vol. 37, no. 4, pp. 827-849.
- Scharr, H. (2000) 'Optimal Operators in Digital Image Processing', *Thèse de doctorat, University of Heidelberg*.
- Scharstein and Szeliski (2002) 'A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms', *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, no. 1, pp. 7-42.
- Schreier, H.W., Braasch, J.R. and Sutton, M.A. (2000) 'Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation', *Optical engineering*, vol. 39, no. 11.
- Seitz, S., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D. and Szeliski, R. (2006) 'A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms', *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 519-526.
- Seitz, S.M. and Dyer, C.M. (1999) 'Photorealistic scene reconstruction by voxel coloring', *International Journal of Computer Vision*, vol. 35, no. 2, pp. 1-23.
- Slabaugh, G., Culbertson, B., Malzbender, T. and Stevens, M. (2004) 'Methods for volumetric reconstruction of visual scenes', *International Journal of Computer Vision*, vol. 57, no. 3, pp. 179-199.
- Stewénius, H., Schaffalitzky, F. and Nistér, D. (2005) 'How hard is three-view triangulation really?', *IEEE International Conference on Computer Vision*.
- Suqi, L., Guangjun, Z. and Zhenzhong, W. (2006) 'The determination of the intrinsic and extrinsic parameters of virtual camera based on OpenGL', *Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control, and Computer Simulation*, vol. 6358.
- Sutton, M.A., Orteu, J.J. and Schreier, H. (2009) 'Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basics concepts, theory and applications', *Springer, ISBN 978-0-387-78746-6*.
- Sutton, M.A., Wolters, W.J., Peters, W.H., Ranson, W.F. and McNeill, S.R. (1983) 'Determination of displacements using an improved digital correlation method', *Image and Vision Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 133-139.

Thévenaz, P., Blu, T. and Unser, M. (2000) 'Interpolation revisited', *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 19, no. 7, pp. 739-758.

Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R.I. and Fitzgibbon, A.W. (2000) 'Bundle adjustment - A modern synthesis', *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 298-372.

Vicon (2010) '<http://www.vicon.com>'.

Wang and Cuitino (2002) 'Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation', *International Journal of Solids and Structures*, vol. 39, no. 13, pp. 3777-3796.

Wang, Liao, Gong, Yang and Nistér (2006) 'High-quality real-time stereo using adaptive cost aggregation and dynamic programming', *3D Data Processing, Visualization and Transmission*.

Wang, Y.Q., Sutton, M.A., H.A., B. and Schreier, H.W. (2009) 'Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements', *Strain*, vol. 45, no. 2, pp. 160-178.

Xu, Y. and Roy-Chowdhury, A. (2008) 'Inverse compositional estimation of 3D pose and lighting in dynamic scenes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, no. 7, pp. 1300-1307.

Yang, Wang, Yang, Stewénius and Nistér (2009) 'Stereo matching with color-weighted correlation, hierarchical belief propagation and occlusion handling', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 31, no. 3, pp. 492-504.

Zach, C. (2008) 'Fast and high quality fusion of depth maps', *3D Data Processing, Visualization and Transmission*.

Zhang, Z. (2000) 'A flexible new technique for camera calibration', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334.

Zhang, Z. (2004) 'Camera calibration with one dimensional objects', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 26, no. 7, pp. 892-899.

## Shape measurement using a multiple-view Digital Image Correlation (DIC) method: application to the inspection of large-scale aerospace structures

---

In 2006 the Ecole des Mines d'Albi and the LAAS-CNRS initiated a collaboration with AIRBUS Toulouse and EADS-IW for the development of a computer-vision-based system for the inspection of aeronautic parts (fuselage parts, metallic or composite aeronautical panels, etc.) in order to detect shape defects (shape deviation with regard to the desired overall shape corresponding to the CAD model). The system is composed of several cameras (at least four) giving the capacity to inspect large parts. The cameras are fixed on a rigid structure and the parts to be inspected are positioned in front of the system. Several images are acquired synchronously and they are used to reconstruct the 3D model of the part. This thesis focuses on different strategies that can be developed to manage a multiple-camera system. The different steps of the digitization process are presented, namely: multiple-view digital image correlation (a multiple-image DIC criterion well suited to the multiple views context is addressed), 3D cloud stitching, calibration assistance unit. Using more than two cameras has brought multiple benefits. It allows digitizing large aeronautic parts (several m<sup>2</sup>), provides the whole shape of an object in a one-shot acquisition, improves the accuracy thanks to data redundancy, and permits to avoid specular reflections on non-lambertian surfaces. Our algorithms have been evaluated through synthetic images as well as through the comparison with measurements acquired by different commercial digitizing systems.

---







**AUTEUR :** HARVENT Jacques

**TITRE :** Mesure de formes par corrélation multi-images : application à l'inspection de pièces aéronautiques à l'aide d'un système multi-caméras

**SOUTENANCE :** le 5 Novembre 2010 à Albi

**DIRECTEURS DE THESE :** Jean José Orteu et Michel Devy

---

L'École des Mines d'Albi et le LAAS-CNRS ont engagé en 2006 une collaboration avec AIRBUS Toulouse et EADS-IW pour le développement d'un système de vision artificielle destiné à l'inspection de pièces aéronautiques (panneaux de fuselage ou de voilure, métalliques ou composites) en vue de la détection de défauts de forme (écarts à la forme nominale souhaitée). Le système est constitué de plusieurs caméras (au moins quatre) afin de pouvoir inspecter des pièces de grande taille. Les caméras sont fixées sur une structure rigide statique et les pièces à inspecter sont positionnées devant cette structure.  $N$  images de la pièce à inspecter sont acquises de façon synchronisée et sont utilisées afin de reconstruire la pièce observée en 3D. Ce mémoire aborde les différentes stratégies envisagées pour l'exploitation d'un système multi-caméras. Les étapes nécessaires à la numérisation d'une pièce sont présentées, et plus particulièrement : l'appariement par corrélation multi-images (un critère de corrélation multi-images bien adapté au contexte multi-caméras est décrit), le recalage de nuages de points 3D par corrélation d'images, et l'aide au calibrage. L'utilisation de plusieurs caméras a montré de nombreux avantages. Elle permet la numérisation d'objets de grande taille (surface de plusieurs  $m^2$ ), fournit la forme complète d'un objet à partir d'une seule acquisition d'images (acquisition one-shot), améliore la précision de numérisation grâce à la redondance d'informations, permet de s'affranchir de problèmes de réflexion spéculaire dans le cas d'objets réfléchissants. Les algorithmes développés ont été évalués à la fois à partir d'images synthétiques et par comparaison aux mesures fournies par plusieurs systèmes commerciaux de numérisation 3D.

Mots clefs : multi-caméras, corrélation multi-images, stratégies multi-caméras, mesure de formes.

---

**DISCIPLINE :**

Systèmes informatiques critiques

**LABORATOIRES :**

ICA-ALBI (Institut Clément Ader), Ecole Mines Albi : Campus Jarlard, 81013 Albi, France  
LAAS-CNRS : 7 avenue du colonel Roche, 31077 Toulouse, France

