



HAL
open science

Une approche unifiée pour la mesure et l'analyse des défauts de forme des pièces mécaniques

David Etievant

► **To cite this version:**

David Etievant. Une approche unifiée pour la mesure et l'analyse des défauts de forme des pièces mécaniques. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT : 2022UPAST139 . tel-03988852

HAL Id: tel-03988852

<https://theses.hal.science/tel-03988852>

Submitted on 14 Feb 2023

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.

Une approche unifiée pour la mesure et l'analyse de défauts de forme des pièces mécaniques

A unified approach for shape defects measurement and analysis on mechanical parts

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 579 : sciences mécaniques et énergétiques,
matériaux et géosciences (SMEMaG)
Spécialité de doctorat : Génie mécanique
Graduate School : Sciences de l'ingénierie et des systèmes
Réfèrent : École Normale Supérieure

Thèse préparée dans l'unité de recherche **LURPA (Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay)**, sous la direction de **Yann QUINSAT**, Professeur agrégé HDR et la co-direction de **François THIEBAUT**, Maître de conférences HDR

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 28 novembre 2022, par

David ETIEVANT

Composition du jury

Membres du jury avec voix délibérative

Jean-José ORTEU Professeur de l'Institut Mines Telecom, IMT Mines Albi, Institut Clément Ader	Président
Hélène CHANAL Maître de conférences, HDR, SIGMA Clermont-Ferrand, Institut Pascal	Rapporteur & Examinatrice
Souheil-Antoine TAHAN Professeur des Universités, École de Technologie Supérieure Montréal, LIPPS	Rapporteur & Examineur
François HILD Directeur de Recherche CNRS, Université Paris-Saclay, LMPS	Examineur

Remerciements

Je garderai un souvenir ému de ces quatre années de thèse. Malgré un déménagement de laboratoire, une pandémie mondiale, un confinement et une rédaction laborieuse, ces années de doctorat ont été une incroyable expérience grâce aux personnes que j'ai eu la chance de croiser.

Mes premiers remerciements vont à mon équipe d'encadrement. Merci pour ce sujet riche et intéressant, pour vos conseils et votre aide tout au long de cette thèse. Un grand merci pour votre disponibilité, votre honnêteté et vos retours toujours très pertinents.

Un immense merci à toi Yann pour ta bienveillance et tes conseils toujours très avisés. Je pense d'ailleurs que tous les remerciements que je pourrais écrire ne pourront être à la hauteur de la reconnaissance que je te porte. Si cette thèse a finalement abouti, c'est en grande partie grâce à toi, à tes nombreuses relectures et à ta grande réactivité. Ton soutien tout au long de cette thèse - notamment lorsque je finissais la rédaction en parallèle de mon travail d'enseignant - a été d'une grande aide. Merci infiniment pour tout ce que tu m'as apporté.

Merci également à toi François pour tes conseils tout au long de ce projet. Comme je te l'ai dit (maladroitement) le jour de ma soutenance, j'ai été de nombreuses fois bluffé par la pertinence de tes remarques. Chacune d'elles était à la fois très profonde et riche de sens, mais également d'une évidence incroyable. Merci pour tes retours et pour la culture scientifique et technique que tu m'as transmise.

Je souhaite également remercier très chaleureusement tous les membres de mon jury pour leur relecture attentive de mon manuscrit et les discussions intéressantes soulevées par leurs questions. Merci également à Antoine TAHAN d'avoir présidé mon comité de suivi de première année, les retours pertinents (mêlés d'une pointe d'humour) m'ont permis d'orienter convenablement mon sujet de thèse. Merci aussi à François HILD pour les discussions que j'ai pu avoir lors de mon stage de M2 et lors de ma première année de doctorat, nos échanges ont été extrêmement enrichissants, aussi bien d'un point de vue scientifique qu'humain.

Un grand merci également à Christophe TOURNIER, Bruno DENIS et Kévin GODINEAU pour leurs retours sur les diapositives de thèse. Si la présentation était claire et compréhensible, c'est en grande partie grâce à vos remarques. Merci encore pour le temps que vous m'avez accordé, pour votre patience et pour la pertinence de vos conseils.

Merci aussi à Philippe CORNET, Florianne DUONG et Claudine CHABAUD pour toute l'aide que vous avez pu m'apporter, que ce soit d'un point de vue pratique ou administratif.

Au-delà du travail de doctorant, si tout s'est bien passé durant ces années de thèse, c'est aussi grâce aux collègues formidables que j'ai eu la chance de rencontrer au sein du LURPA. Que ce soit les discussions au coin café, les nombreuses séances de babyfoot ou les événements CIVIL, j'ai apprécié chacun de ces instants. Merci à Yifan, Marc-Antoine, Clément, François, Baptiste, Kamel, Carlos, Charly, aux différents Kévins, Yannick, Jean-Loup, Minh et j'en oublie... Merci à Florian pour les nombreuses discussions autour de l'ATOS Core mais aussi pour les éclats de rire que l'on a pu avoir. Merci à Clément et Mathias pour votre soutien chaque mardi soir durant la rédaction.

Merci à Michèle pour ta bonne humeur, ta bienveillance et les innombrables invitations à la collo' pour me remonter le moral (merci d'ailleurs à Lucas et Mathis pour votre accueil).

J'adresse aussi un énorme merci à mon cobureau, Kevin (ou Kave). Même si ton intolérance par rapport à mon magnifique drapeau jurassien suscite encore chez moi l'incompréhension, j'ai passé de magnifiques années de thèse grâce à toi. Ta bonne humeur et ta joie de vivre ont été un véritable moteur pour moi. Merci aussi à Willy (notre quasi-cobureau) et à Pierre pour votre créativité inégalable. Vos photomontages et vos vidéos débiles m'ont fait énormément rire durant ces quatre années et ont illuminé chacune de mes journées. Merci beaucoup à vous trois.

Je voulais enfin remercier ma famille et mes amis pour leurs mots d'encouragement et leur soutien indéfectible. Merci à Pauline, Étienne et Diane pour les magnifiques moments passés avec vous. Merci à mon frère Maxime pour les retours, notamment lors de la préparation de la soutenance. Merci à Morgane pour les mails magnifiquement rédigés que tu nous envoyais depuis Toulouse. Merci à Céline de m'avoir fait confiance pour monter avec toi l'ADEPS. Merci à Ronan, Filippo et Roméo pour vos discussions bourrées d'humour.

Finalement, un grand merci à toutes celles et ceux dont le nom ne figure par dans ces quelques lignes, mais qui ont d'une manière ou d'une autre participé à cette belle aventure.

Merci infiniment à vous tous!

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vii
Introduction générale	1
1 Mesure de défauts de forme des pièces mécaniques	5
1 Introduction	6
2 Inspection de pièces de grandes dimensions	8
3 Mesure de forme par photogrammétrie	11
4 Mesure de forme par corrélation d'images	22
5 Représentation d'un défaut de forme	23
6 Cas applicatif pour la métrologie de pièce de grandes dimensions	26
7 Problématique générale	32
2 Mesure de défauts de forme par stéréocorrélation modale	37
1 Introduction	37
2 Méthode proposée	39
3 Application sur un cas d'étude	44
4 Étude de sensibilité	51
5 Conclusion	59
3 Étude de l'étalonnage	61
1 Introduction	61
2 Écriture du problème d'étalonnage	62
3 Protocole de validation de l'étalonnage	72
4 Qualification de l'étalonnage	82
5 Conclusion	97

4	Effet d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de forme	99
1	Introduction	99
2	Influence des paramètres extrinsèques sur la mesure d'un point 3D	102
3	Techniques usuelles de triangulation	103
4	Comparaison des techniques de triangulation	111
5	Mise en relation avec la méthode de corrélation d'images	116
6	Exploitation des champs de triangulation	118
7	Conclusion	122
5	Application aux pièces de grandes dimensions	125
1	Introduction	125
2	Mesure de pièces de grandes dimensions : composants aéronautiques	127
3	Mesure de référence	130
4	Détermination du défaut de forme via ICP non rigide	132
5	Mesure par corrélation d'images avec masques	137
6	Conclusion	147
	Conclusions et perspectives	149
	Références	155
	Annexes	163
A	ICP non rigide	163
B	Mesure par lumière structurée ATOS	166
C	Calcul de la fonction d'autocorrélation d'une image	168
D	Autocorrélation des mouchetis employés	169
E	Champs 3D projetés obtenus par triangulation linéaire	170
F	Champs 3D projetés obtenus par point milieu	171
G	Champs 3D projetés obtenus par la méthode polynomiale	172
H	Champs 3D projetés obtenus par approximation de Sampson	173
I	Influence des approximations de triangulation dans l'espace 3D	174
J	Champs 3D projetés obtenus par point milieu sans la composante de corps rigide	175
K	Champs 3D calculés par corrélation d'images	176
L	Modes propres du panneau avec prise en compte des cadres forts	177

Liste des figures

1.1	Exemple de pièce aéronautique	6
1.2	Modélisation linéaire d'une caméra	13
1.3	Modèle sténopé d'une caméra	15
1.4	Modélisation de caméra avec aberrations	16
1.5	Aberrations radiale négative (a), nulle (b) et positive (c)	16
1.6	Exemple de distorsion tangentielle (a) et prismatique (b)	17
1.7	Détermination des aberrations optiques par interpolation	17
1.8	Correction des aberrations optiques	18
1.9	Mire plane en damier (a) ou mire plane à points (b)	21
1.10	Classification des différentes représentations de défaut de forme	24
1.11	Portion de panneau dont le défaut de forme doit être identifié.	26
1.12	Système de photogrammétrie de cibles TRITOP [ZEISS,] servant de mesure de référence	27
1.13	Repérages des cibles codées (rouges) et non codées (bleues) présentes sur le panneau.	27
1.14	Positions relatives des prises de vues et des cibles 3D calculées par TRITOP.	28
1.15	Maillage issu de la mesure (a) et maillage détourné (b).	29
1.16	Écarts initiaux entre le maillage nominal et le maillage de mesure ATOS Core	30
1.17	Défaut de forme et participations modales identifiés par ICP non rigide.	30
1.18	Écarts résiduels après ICP non rigide.	31
2.1	Schéma de principe de la méthode envisagée	39
2.2	Surface retenue (a) et maillage associé (b)	44
2.3	Exemples de modes unitaires de la base projetée : mode 7 (a), mode 30 (b) et mode 49 (c)	45
2.4	Système stéréoscopique (a) et projection du mouchetis sur la pièce (b)	46
2.5	Fluctuation de niveaux de gris pour la caméra gauche (a) et droite (b)	47
2.6	(a-b) Amplitudes modales estimées sur le nuage de points ATOS Core avec les deux bases modales. (c-d) Défauts de forme correspondants (exprimés en mm)	48
2.7	(a-b) Histogramme des écarts entre le nuage de points ATOS Core et la forme estimée sur les deux bases modales. (c-d) Cartographie de différence correspondante (exprimées en mm)	48
2.8	Images gauche (a) et droite (b) utilisées pour les calculs de stéréocorrélation	49

2.9	Cartographie de résidus (exprimées en % de la dynamique des images) avant et après correction de forme	50
2.10	(a-b) Résultats de stéréocorrélation sur base modale et (c-d) comparaison avec les résultats ATOS Core (exprimés en mm)	50
2.11	Résidu de corrélation pendant l'étape de correction de forme avec les deux bases modales sur un mouchetis grossier (a) et fin (b)	52
2.12	Positions relatives des caméras et de la pièce pour les 4 configurations étudiées . . .	54
2.13	Cartographie de correction moyenne (exprimée en mm) pour les quatre configurations	54
2.14	Participations modales moyennes pour les quatre configurations	55
2.15	Différence entre la cartographie de correction moyenne (figure 2.13) et les résultats ATOS Core (figure 2.6) pour les quatre configurations	56
2.16	Couple de solutions obtenues pour la configuration de mesure 2	56
2.17	Cartographie d'écart-type au noeud (exprimée en mm) associé au défaut de forme .	57
2.18	Spectre des matrices hessienne \mathbf{H}^q pour les quatre configurations	58
2.19	Mode propre de la matrice hessienne \mathbf{H}^q le plus influent (vecteur propre n°1 sur le spectre, Figure 2.18)	58
2.20	Mode propre de la matrice hessienne \mathbf{H}^q le moins influent (vecteur propre n°44 sur le spectre, figure 2.18)	59
3.1	Images gauche et droite retenues pour illustrer les problèmes de conditionnement de l'étalonnage explicite	65
3.2	Exemple de matrice initiale du problème d'autoétalonnage et courbe de convergence associée au même problème avec un schéma d'optimisation de type Gauss-Newton	66
3.3	Matrice initiale du problème d'autoétalonnage normalisé (a) et comparaison des courbes de convergence avec et sans normalisation des paramètres extrinsèques (b)	68
3.4	Conditionnement de la matrice initiale du problème d'autoétalonnage normalisé en fonction des valeurs d'amortissement η	71
3.5	Résidu du problème d'autoétalonnage explicite avec schéma de Gauss-Newton (GN) et Levenberg-Marquardt (LM) avec et sans normalisation des paramètres extrinsèques.	72
3.6	Problème de recalage : les données de photogrammétrie et celles de corrélation doivent être exprimées dans un même repère pour permettre une comparaison des paramètres extrinsèques	74
3.7	Mise en correspondance des données TRITOP avec celles de corrélation d'images grâce à l'utilisation de l'ATOS Core	75
3.8	Schéma de principe pour la détermination des paramètres extrinsèques obtenus via TRITOP	76
3.9	Schéma de principe pour la comparaison des paramètres extrinsèques obtenus via TRITOP et via corrélation d'images	77
3.10	Vues gauche et droite exploitées pour le calcul de paramètres extrinsèques via TRITOP	78
3.11	Aperçu des positions et orientations retenues pour les prises de vue TRITOP.	79
3.12	Résultats du recalage ICP non rigide avec 50 modes : amplitudes calculées (a) et cartographie de résidu selon la normale locale (b)	80
3.13	Positions et orientations estimées des caméras par rapport au maillage de mesure ATOS	82
3.14	Répétabilité des rotations estimées par corrélation d'images pour 3 mouchetis . . .	86

3.15	Répétabilité des translations estimées par corrélation d'images pour 3 mouchetis . . .	86
3.16	Distance moyenne de reprojection dans l'image gauche (a) et de droite (b) par rapport à la solution de référence (distance initiale maximale : 30 pixels)	88
3.17	Distance moyenne de reprojection dans l'image gauche (a) et de droite (b) par rapport à la solution de référence (distance initiale maximale : 10 pixels)	89
3.18	Incertitudes sur les paramètres de rotation estimés par corrélation d'images sur le modèle mesuré ATOS et sur le modèle nominal	94
3.19	Incertitudes sur les paramètres de translation estimés par corrélation d'images sur le modèle mesuré ATOS et sur le modèle nominal	95
3.20	Exemples de défauts de forme obtenus par tirage aléatoire	96
4.1	Défaut de forme calculé par l'ICP non rigide [Thiébaud et al., 2018] avec 50 modes basé sur la mesure ATOS Core (a) et différence avec le défaut retrouvé par corrélation d'images en s'auto-étalonnant sur la forme mesurée ATOS Core (b)	100
4.2	Différence de défaut de forme identifié par ICP non rigide et par corrélation d'images (étalonnage sur modèle nominal) (a) et différence de défaut de forme identifié par corrélation d'images lorsque l'auto-étalonnage est appliqué sur la forme mesurée ATOS Core ou sur le modèle nominal (b)	101
4.3	Recherche de l'effet d'une variation de paramètres extrinsèques de la caméra gauche sur la mesure d'un point 3D	103
4.4	Principe de l'algorithme du point milieu	106
4.5	Illustration de triangulation par contrainte épipolaire.	107
4.6	Détermination d'un vecteur du champ 3D $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial a^l}$	112
4.7	Champs projetés $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n})$ (a) et $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_y^l} \cdot \mathbf{n})$ (b) calculés avec la méthode polynomiale. . .	113
4.8	Illustration de la demi-perpendiculaire associée aux droites projectives	114
4.9	Projection selon la normale locale de la demi-perpendiculaire commune associée au champ $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l}$ pour $dt_x^l = 0.1$ mm	115
4.10	Détermination de la variation de forme obtenue par corrélation d'images engendrée par un biais d'étalonnage.	116
4.11	Champ $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha^l} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ (a) et variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'image avec $d\alpha^l = 0.1$ deg	117
4.12	Champ $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ (a) et variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'image avec $dt_x^l = 0.1$ mm	118
4.13	Estimation de la variation de forme perçue par le système de photogrammétrie (écart-type au nœud) associée aux erreurs de reproductibilité (dépendance à la solution initiale) d'étalonnage.	119
4.14	Estimation de la variation de forme perçue par le système de photogrammétrie (écart-type au nœud) liée à une méconnaissance de forme de 3 mm lors de l'auto-étalonnage	120
4.15	Incertitudes de répétabilité liées à l'algorithme de déformation du modèle numérique	121
5.1	Photographie du nouveau cas d'application	126
5.2	Projection de mouchetis régulier sur pièces de moyennes et grandes dimensions . .	128
5.3	Image du panneau et masque 2D associé	129
5.4	Repérage des points codés (rouge) et non codés (bleu) présents sur le panneau. . . .	130

5.5	Disposition des 29 prises de vue TRITOP par rapport au panneau.	131
5.6	Maillage issu de la mesure et maillage détourné décimé	131
5.7	Maillage du panneau avec renforts verticaux.	132
5.8	Écarts initiaux entre le maillage nominal et le maillage de mesure ATOS Core	133
5.9	Défaut de forme et participations modales identifiés par ICP non rigide avec le maillage régulier (a,c) et le maillage avec renforts (b, d)	134
5.10	Écarts résiduels après ICP non rigide sur maillage régulier (a,c) et avec renforts (b, d)	135
5.11	Configuration estimée des caméras pour la mesure du panneau	136
5.12	Mouchetis régulier et mouchetis aléatoire employés pour la mesure du panneau. . .	137
5.13	Réalisation du masque du panneau avec l'interface graphique développée.	138
5.14	Image gauche et droite du panneau et masques associés	139
5.15	Répartition des noeuds du maillage visibles simultanément par les deux caméras . .	139
5.16	Convergence de l'autoétalonnage sur mouchetis aléatoire avec modèle mesuré . . .	142
5.17	Convergence de la correction de forme sur mouchetis aléatoire avec modèle mesuré	142
5.18	Participations modales identifiées par corrélation d'images et défaut de forme associé	143
5.19	Comparaison des participations modales issues de l'ICP non rigide (bleu) et de corrélation d'images (rouge) sur le panneau	144
5.20	Écarts entre la forme obtenue par ICP non rigide et la mesure par corrélation d'images	144
5.21	Convergence de la correction de forme sur mouchetis aléatoire sans autoétalonnage	146
5.22	Défaut de forme identifié sans autoétalonnage et écart avec le défaut calculé après autoétalonnage sur géométrie mesurée	147
5.23	Motif régulier dans l'espace projecteur (gauche) et motif adapté pour être régulier sur la pièce (droite) pour la même configuration projecteur/pièce	153
24	Principe d'appariement de l'ICP non rigide considéré [Thiébaud et al., 2018]	163
25	Histogramme des écarts ξ_i avant et après recalage ICP non rigide (a-b) et cartographie d'écarts correspondante (c-d)	164
26	Amplitudes modales λ_j calculées (a) et cartographie de défaut de forme associée (b)	165
27	Système de photogrammétrie TRITOP comprenant barres d'étalonnage, croix avec cibles codées et appareil photographique	166
28	Système ATOS Core composé de deux caméras et d'un projecteur	167
29	Exemple d'autocorrélation et détermination des rayons à 50	168
30	Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par triangulation linéaire . . .	170
31	Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par la méthode du point milieu	171
32	Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par la méthode polynomiale .	172
33	Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par approximation de Sampson	173
34	Projection selon la normale locale de la demi-longueur de la perpendiculaire commune calculée avec la méthode du point milieu	174
35	Champs 3D $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ obtenus par point milieu	175
36	Variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'images correspondant à un défaut d'étalonnage de $d\mathbf{a}^l$	176
37	Modes propres de vibration du panneau avec et sans présence de cadres forts	177

Liste des tableaux

1.1	Évaluation des techniques de mesure pour les pièces de moyennes et grandes dimensions [Savio et al., 2007]	9
1.2	Résumé des techniques courantes d'étalonnage	20
1.3	Tableau comparatif des représentations de défauts	25
2.1	Information du matériel optique utilisé	45
2.2	Paramètres liés aux aberrations optiques des caméras	46
2.3	Paramètres retenus pour la corrélation d'images	49
3.1	Paramètres extrinsèques estimés via TRITOP pour l'image gauche et droite	81
3.2	Mouchetis employés pour étudier l'impact du motif employé sur les résultats d'étalonnage	83
3.3	Rayons d'autocorrélation (en pixels) pour les trois mouchetis employés	83
3.4	Paramètres extrinsèques estimés par corrélation d'images lorsque la solution initiale est décalée de 30 pixels par rapport à la solution recherchée	90
3.5	Comparaison des variations de paramètres extrinsèques induits par une variation de forme dX estimés par le modèle et obtenus expérimentalement	95
3.6	Écart-type des paramètres extrinsèques estimés lorsque le défaut de forme de la pièce est de ± 3 mm	97
4.1	Amplitude des champs 3D projetés et moyenne quadratique (RMS) de la projection selon la normale locale des demi-longueurs des perpendiculaires communes	115
4.2	Paramètres extrinsèques estimés par corrélation d'images lorsque la solution initiale est décalée de 30 pixels par rapport à la solution recherchée	119
4.3	Écart-type des paramètres extrinsèques estimés lorsque le défaut de forme de la pièce est de ± 3 mm	120
4.4	Amplitude des résidus associés à la décomposition des champs sur la base modale	122
5.1	Quantification de la perte de contraste pour les pièces de grandes dimensions	128
5.2	Paramètres extrinsèques déterminés via TRITOP	136
5.3	Écarts de défaut de forme estimés par corrélation d'images et par mesure ATOS Core pour les deux cas d'étude	145
4	Résultats de la caractérisation de l'ATOS Core	167
5	Fonction d'autocorrélation normalisée pour les trois mouchetis employés	169

Introduction générale

Dans le cycle de fabrication et d'assemblage des pièces mécaniques, l'acquisition de la géométrie des composants et le traitement de ces données sont des étapes essentielles permettant de valider la conformité des pièces vis-à-vis des spécifications fonctionnelles. Cette étape d'inspection consiste généralement en une mesure de la géométrie du composant par un système d'acquisition puis une comparaison de celle-ci avec la définition nominale du produit. En analysant les écarts ainsi obtenus entre la mesure et le modèle nominal, il est alors possible de conclure quant à la conformité de la pièce vis-à-vis des exigences fonctionnelles.

Dans ces travaux, nous nous intéresserons plus particulièrement à la détermination du défaut de forme des pièces mécaniques. Dans ce document, le terme de "défaut de forme" désignera les écarts géométriques entre la mesure recalée et le modèle nominal. En s'appuyant sur cette définition, la vérification des spécifications géométriques de forme reviendra à comparer l'étendue du défaut de forme ainsi calculé par rapport à l'intervalle de tolérance donné.

Traditionnellement, la détermination des écarts de forme s'appuie sur les données issues d'une machine à mesurer tridimensionnelle équipée d'un palpeur mécanique. Bien que ces systèmes garantissent une incertitude de mesure faible, les temps d'exécution de programmes de contrôle sont souvent longs (de quelques minutes à plusieurs heures selon les dimensions de la pièce) et le nuage de points obtenu est généralement peu dense. Or cette faible densité peut être préjudiciable lors de l'inspection de pièces complexes ou de grandes dimensions pour lesquelles un grand nombre de points est nécessaire afin d'obtenir une mesure représentative de la géométrie réelle de la pièce.

Pour obtenir des informations denses sur la géométrie de la pièce tout en accélérant la mise en oeuvre de la mesure, une solution permettant d'améliorer usuellement le temps de mesure consiste à employer des méthodes optiques lors de l'acquisition. Néanmoins, le post-traitement des données acquises par ces moyens optiques peut être long et difficile. En effet, ces données sont souvent hétérogènes, bruitées et peuvent comporter des lacunes de numérisation en fonction de la complexité de la géométrie numérisée; c'est pourquoi les analyses des mesures peuvent devenir complexes et l'identification des défauts un réel défi. Une seconde difficulté concerne la mise en correspondance des mesures avec la définition nominale de la pièce, les outils utilisés sont source d'erreurs supplémentaires dans la détermination des écarts.

Dans ce contexte, afin de réduire le temps de post-traitement et améliorer la qualité des données acquises, il est envisagé de mettre au point un système de mesure permettant de délivrer

directement une description des écarts de forme de la pièce mesurée. Cette approche aura l'avantage de fournir des mesures directement exploitables pour la qualification de la pièce mesurée et plus particulièrement pour l'identification des défauts de forme. L'intérêt de cette méthode sera d'autant plus pertinent que les dimensions de la pièce seront importantes.

Le premier chapitre de ce manuscrit présente le principe et les contraintes induites dans le contexte de la métrologie de pièces de grandes dimensions. Ce chapitre expose donc les approches communément employées dans ce cadre en détaillant notamment les systèmes d'acquisition envisageables et les techniques usuelles de traitement des données. La photogrammétrie semble alors la technologie la plus adaptée mais des adaptations sont nécessaires pour rendre la mesure dense tout en limitant le post-traitement des données de mesure. Après avoir présenté le principe de fonctionnement de la photogrammétrie et les contraintes liées à l'étalonnage, nous convergerons vers une solution de photogrammétrie dense : la corrélation d'images globale. Enfin, pour réduire la phase de post-traitement, cette approche s'appuiera sur une description modale des défauts de forme. Ce chapitre conclura par la présentation de la problématique générale de ces travaux de thèse en explicitant les verrous scientifiques à lever pour obtenir une identification des défauts de forme des pièces mécaniques lorsque celles-ci possèdent de grandes dimensions.

Le second chapitre se focalisera sur la mesure du défaut de forme. Il a pour objectif d'établir, de développer et de valider la faisabilité de la mesure de défauts de forme sur base modale à partir d'une approche globale de corrélation d'images. L'étude sera menée sur une pièce de dimensions moyennes (approximativement 300 mm de côté). Pour éviter que d'éventuelles erreurs d'étalonnage ne viennent entacher la mesure de défauts de forme, ce dernier sera réalisé en se basant sur la géométrie de la pièce mesurée à l'aide d'un système industriel. Dans ce chapitre, le système de stéréovision sera donc considéré comme correctement étalonné, permettant de focaliser l'étude uniquement sur la mesure de forme. Ainsi, une méthode complète de mesure et d'identification de défaut de forme par stéréocorrélation d'images sera proposée et détaillée. Les résultats obtenus dans ce chapitre permettront de valider l'approche envisagée dans ces travaux.

Ayant montré dans le chapitre précédent la faisabilité d'identifier les défauts de forme lorsque l'étalonnage est correctement réalisé, le chapitre 3 s'intéressera à l'étape d'étalonnage. Plus particulièrement, une réécriture explicite du problème d'étalonnage sera proposée et différentes stratégies numériques seront mises en place afin d'améliorer la convergence de celui-ci. Afin de vérifier la cohérence des paramètres extrinsèques estimés par cette nouvelle approche, un protocole de validation sera proposé. Enfin la résolution numérique de l'étalonnage sera qualifiée (répétabilité, influence de la solution initiale, influence de la géométrie en entrée) en faisant varier le mouchetis projeté. Cette étude permettra d'extraire une démarche d'étalonnage permettant une bonne identification des paramètres extrinsèques du système de stéréovision.

La mesure de défauts de forme reposant sur les résultats d'étalonnage, il sera proposé dans le chapitre 4 d'étudier l'impact d'une erreur d'étalonnage sur la détermination du défaut de forme. Cette étude s'appuiera sur l'utilisation de techniques de triangulation pour calculer la variation de géométrie perçue (sous forme de champs 3D) lorsque les paramètres extrinsèques varient. Ces champs tridimensionnels seront alors calculés via quatre approches de triangulation et comparés

afin de retenir les plus pertinents. Enfin, les champs 3D retenus seront exploités pour convertir les incertitudes portant sur les paramètres extrinsèques en incertitude sur la mesure de forme. Enfin, le cinquième chapitre consistera à mobiliser les différentes solutions proposées dans les chapitres précédents pour les transposer dans le cadre d'une pièce de grandes dimensions (approximativement $2\text{ m} \times 1\text{ m}$). Une adaptation de la méthode de corrélation d'images sera alors proposée via l'utilisation de masques 2D afin de tenir compte des contraintes de visibilité liées à la présence de renforts sur ce nouveau cas d'application.

Chapitre 1

Mesure de défauts de forme des pièces mécaniques

Sommaire

1	Introduction	6
2	Inspection de pièces de grandes dimensions	8
2.1	Acquisition de la géométrie	8
2.2	Traitement des données de mesures	10
3	Mesure de forme par photogrammétrie	11
3.1	Principe de photogrammétrie	11
3.2	Modélisation de caméra	12
3.2.1	Modélisation linéaire de caméra	13
3.2.2	Modélisation des aberrations optiques	15
3.3	Étalonnage de systèmes de photogrammétrie	18
3.3.1	Méthodes courantes d'étalonnage	19
3.3.2	Synthèse sur les techniques d'étalonnage	20
4	Mesure de forme par corrélation d'images	22
5	Représentation d'un défaut de forme	23
5.1	Approches classiques de représentation de défaut	23
5.2	Avantages et limites des représentations de défaut	25
6	Cas applicatif pour la métrologie de pièce de grandes dimensions	26
6.1	Mesure par photogrammétrie de cibles TRITOP	26
6.2	Couplage de la photogrammétrie avec la lumière structurée	28
6.3	Obtention du défaut de forme du panneau	29
6.4	Bilan sur la mesure	31
7	Problématique générale	32

1 Introduction

Lors de la réalisation d'un assemblage nécessitant un appairage de composants, chacun des éléments est mesuré individuellement avant montage afin de valider leur conformité géométrique. Cette validation permet alors d'assurer que les jeux et affleurements désirés lors de la phase de conception soient obtenus. Ce contexte concerne tout particulièrement les assemblages aéronautiques pour lesquels une mauvaise maîtrise des défauts et des jeux peut être critique. Or les composants de tels assemblages sont généralement élancés et de grande taille (voir figure 1.1), impliquant donc une certaine souplesse. Pour ces éléments, les écarts géométriques obtenus entre leur définition nominale et la mesure peuvent provenir du procédé d'obtention mais également de la configuration de mesure étant donné leur manque de rigidité. Pour supprimer cette ambiguïté et identifier uniquement le défaut de forme de la pièce, les spécifications géométriques du composant sont données lorsque la pièce est dans son état libre, c'est-à-dire lorsqu'elle n'est soumise à aucune action extérieure excepté son propre poids [ISO 10579, 2013, ASME Y14.5, 2018].



FIGURE 1.1 – Exemple de pièce aéronautique

Afin de contrôler ces composants flexibles, un montage spécifique permettant de reproduire la position du composant dans son état assemblé peut être utilisé. Ce dernier permet alors de garantir une répétabilité de la mesure tout en assurant l'accessibilité des éléments géométriques du composant lors du contrôle [Ascione and Polini, 2010]. Ces montages dédiés sont généralement complexes et coûteux, c'est pourquoi certains travaux visent à s'en affranchir [Abenhaim et al., 2011]. Une solution consiste alors à employer un porte-pièce non dédié, et prédire l'effet de la configuration de mesure sur la déformation du composant, intégrer cette déformation au modèle nominal pour pouvoir directement évaluer les écarts géométriques entre le modèle nominal déformé et la mesure [Abenhaim et al., 2012, Thiébaud et al., 2017]. Ainsi, pour permettre le contrôle de telles pièces sans recourir à un porte-pièce dédié, il est nécessaire d'établir un lien direct entre la mesure et le modèle permettant la prédiction de son comportement, et plus particulièrement son modèle CAO. Dans ce cas-ci, un traitement complexe des données acquises doit être réalisé et des mesures denses sont souvent indispensables pour établir ce lien.

D'autre part, les dimensions de tels composants imposent de nombreux défis. En effet, pour réaliser l'inspection de ces pièces, il est nécessaire d'employer des systèmes disposant d'un vo-

lume de mesure suffisant, limitant ainsi les technologies adaptées. Ces pièces étant également encombrantes, elles sont difficilement transportables; il faut donc pouvoir réaliser une mesure directement sur la chaîne de production. Cela impose de disposer d'un système d'acquisition ne nécessitant pas un environnement de mesure contrôlé et disposant d'une vitesse d'acquisition suffisamment importante afin de limiter l'immobilisation de la pièce. Enfin, le contexte aéronautique imposant des exigences fonctionnelles strictes comparées aux dimensions des éléments mesurés, le moyen de mesure employé doit disposer d'une incertitude de mesure adaptée.

L'inspection de composants aéronautiques nécessite donc de répondre à différentes contraintes liées à la dimension du volume de mesure, à la quantité de données à traiter et à la qualité de ces dernières. De façon plus générale, ce contexte de mesure s'inscrit plus largement dans le domaine de la métrologie de pièces de grandes dimensions. Ce contexte impose donc de nombreux défis et contraintes pour le système de mesure lorsqu'il s'agit d'identifier le défaut de forme des pièces mesurées :

- Le système de mesure doit disposer d'un volume de contrôle suffisamment large pour acquérir l'intégralité de la pièce;
- Les pièces étant difficilement transportables, il faut que ce système soit adapté à de la mesure *in-situ* ou *in-process* (mesure de la pièce dans la cellule d'assemblage ou pendant l'assemblage). En cela, sa mise en oeuvre devra être rapide et ne pas nécessiter d'environnement contrôlé;
- Les tolérances géométriques sur ces pièces étant serrées, il faut que le système de mesure dispose d'une incertitude adaptée. De plus, l'acquisition de géométrie doit être suffisamment dense afin d'obtenir une mesure représentative de la géométrie réelle de la pièce;
- Enfin, pour compenser les actions mécaniques extérieures et n'extraire que le défaut de forme, un lien fort entre la mesure et le modèle CAO doit être réalisé.

Dans ce contexte, les travaux engagés dans cette thèse visent à **développer un système de mesure de défaut de forme adapté aux pièces de grandes dimensions facilitant le traitement des données acquises**. Cette problématique étant directement en lien avec l'inspection de pièces de grandes dimensions, la première partie de ce chapitre traitera donc des systèmes d'acquisition couramment employés pour cette famille de pièces et des approches classiques de traitement de données de mesure. Cette étude conclura alors sur l'adéquation de la photogrammétrie vis-à-vis des contraintes énoncées précédemment. Ainsi, dans une seconde partie, le principe de la photogrammétrie sera détaillé. Enfin, pour obtenir une mesure dense de la pièce par photogrammétrie, il sera envisagé d'utiliser la corrélation d'images pour la mesure de forme. Cette dernière possibilité sera discutée dans la troisième partie de ce chapitre en mettant en perspective ces méthodes avec les possibilités de représentation des défauts de forme. Dans chacune de ces parties, une analyse bibliographique sera présentée afin de donner une vue d'ensemble des travaux existants dans le domaine. Nous terminerons ce chapitre en en détaillant la question de recherche étudiée dans ces travaux.

2 Inspection de pièces de grandes dimensions

Pour vérifier la conformité de pièces mécaniques vis-à-vis des contraintes dimensionnelles et géométriques établies par le bureau d'étude, une phase d'inspection est généralement réalisée. Celle-ci peut être décomposée en deux grandes étapes : la première consiste à obtenir une image de la géométrie réelle de la pièce sous la forme d'un maillage ou d'un nuage de points ; la seconde étape consiste ensuite à post-traiter ces données pour recalibrer la géométrie mesurée sur le modèle nominal de la pièce et ainsi permettre l'extraction de la quantité recherchée (dans notre cas, le défaut de forme de la pièce réelle).

Les pièces de grandes dimensions imposant de nombreuses contraintes lors de l'inspection, cette section vise donc à décrire les difficultés rencontrées pour ce type de pièces et lister les solutions envisageables pour permettre leur contrôle. Ainsi, la partie 2.1 présente les différentes technologies d'acquisition de géométrie adaptées pour les pièces de grandes dimensions et la partie 2.2 traitera des algorithmes de recalage des données de mesure sur le modèle nominal.

2.1 Acquisition de la géométrie

Lors du contrôle géométrique d'une pièce possédant de grandes dimensions sur une ligne de production, une bonne efficacité de la mesure est requise ; un compromis entre un faible temps de mise en oeuvre et une forte densité de points d'évaluation doit donc être recherché. Afin de satisfaire au mieux ces deux critères, il est possible d'adapter les deux éléments principaux d'un système d'inspection, à savoir le système d'acquisition (permettant d'acquérir la géométrie de la surface) et le système porteur (permettant de déplacer le système d'acquisition). Dans ces travaux, l'influence du système porteur sur la mesure ne sera pas analysée ; seul le système d'acquisition fera l'objet de notre étude.

Traditionnellement, la mesure géométrique des pièces s'appuie sur les données issues d'une machine à mesurer tridimensionnelle (abrégée par la suite MMT) équipée d'un palpeur mécanique à contact. Bien que ces systèmes garantissent une incertitude de mesure faible, les temps d'exécution de programmes de contrôle sont souvent longs (de quelques minutes à plusieurs heures selon les dimensions de la pièce) et la mesure obtenue est généralement peu dense. Or cette faible densité et cette vitesse d'acquisition peuvent être préjudiciables lors de l'inspection de pièces complexes ou de grandes dimensions pour lesquelles un grand nombre de points est nécessaire afin d'obtenir une mesure représentative de la géométrie réelle de la pièce.

Le système d'acquisition peut alors être modifié pour augmenter le volume de mesure, accélérer sa mise en oeuvre ou obtenir une densité de points d'évaluation plus importante. Le tableau 1.1, extrait de [Savio et al., 2007], présente les techniques de mesure les plus communément utilisées et l'aptitude de chacune d'elle pour la mesure de pièces de grandes dimensions et pour la mesure de pièces de forme complexe.

Le tableau 1.1 met en valeur les capacités du palpeur mécanique à contact, du laser tracker et de la photogrammétrie pour mesurer des pièces de grandes dimensions. En revanche lorsque

	Palpeur	Gabarit	Interférométrie	Laser tracker	Projection de franges	Photogrammétrie
Dimensions de la pièce						
Grande ($10^0 - 10^2$ m)	●	◐	◐	●	◐	●
Moyenne ($10^{-2} - 10^0$ m)	●	◐	◐	●	◐	●
Complexité de la géométrie						
Faible	●	●	●	●	●	●
Moyenne	●	◐	○	◐	◐	◐
Forte	◐	○	○	◐	○	○

Parfaitement approprié	●
Adapté	◐
Possible	◑
Complexe	◒
Impossible	○

TABLEAU 1.1 – Évaluation des techniques de mesure pour les pièces de moyennes et grandes dimensions [Savio et al., 2007]

la complexité de la pièce devient importante, la faible quantité de points mesurés avec ces technologies rend l'exploitation de la mesure délicate, voire impossible. Pour augmenter la densité de points de mesure tout en gardant un temps de mise en oeuvre identique, le palpeur mécanique à contact peut être remplacé par un palpeur à balayage [Renishaw, 2021, ZEISS, 2021] rendant alors possible son exploitation pour la mesure de pièces complexes.

Le bilan dressé au tableau 1.1 est néanmoins à nuancer car il ne tient pas compte des temps associés à l'acquisition de la géométrie. En effet, les mesures par moyens optiques sont souvent plus rapides à mettre en oeuvre que les mesures effectuées sur machine à mesurer tridimensionnelle et plus adaptées à la mesure en bord de ligne de production car elles ne nécessitent pas forcément de porteur particulier. Ainsi, pour limiter le temps d'acquisition et donc le temps d'immobilisation de la pièce durant le contrôle, les travaux développés se baseront sur des mesures optiques. En reprenant les données du tableau précédent, la photogrammétrie semble adaptée pour les pièces de toutes dimensions. Cependant, le faible nombre de points acquis limite son application à des pièces de complexité moyenne ou faible. Ainsi dans ces travaux, afin de mesurer le défaut de forme de pièces de grandes dimensions avec une géométrie potentiellement complexe, il faudra s'assurer que la mesure par photogrammétrie puisse donner des résultats denses. Cette contrainte sera évoquée de nouveau dans la partie 3 présentant le principe de mesure de la photogrammétrie et les différentes approches envisageables. Indépendamment du système de mesure choisi, les données acquises étant délivrées sous la forme d'un nuage de points ou de maillage, il convient de s'intéresser aux traitements à effectuer pour identifier les écarts géométriques.

2.2 Traitement des données de mesures

Les données de sortie des systèmes d'acquisition actuels sont généralement des nuages de points ou des maillages sous forme brute, imposant des traitements *a posteriori* de la mesure pour ne conserver que les écarts significatifs par rapport au défaut étudié. Pour obtenir une cartographie d'écart, il faut donc mettre en relation la mesure avec la géométrie nominale de la pièce définie numériquement. Pour ce faire, il faut procéder au recalage des données, c'est-à-dire aligner la mesure avec le modèle CAO de la pièce dans un seul et même repère.

De nombreux algorithmes de recalage 3D existent, le plus connu étant l'algorithme *Iterative Closest Point* (ICP) [Besl and McKay, 1992]. Dans ce dernier, les données de mesure et la définition nominale de la pièce sont représentées par deux nuages de points distincts. Deux étapes sont alors répétées jusqu'à obtenir un recalage satisfaisant :

- **L'appariement** : cette première étape consiste en l'appariement des points de la mesure avec les points de la géométrie nominale, autrement dit la mise en relation de paires de points entre les deux nuages. Une fois les différentes correspondances établies, il est possible de calculer chacune des distances point à point ξ_i des différents couples.
- **Le calcul de transformation** : cette seconde étape consiste à déterminer la transformation rigide permettant de minimiser une erreur métrique. Cette dernière correspond généralement à une erreur des moindres carrés portant sur les distances point à point ξ_i .

En se basant sur cet algorithme, de nombreuses variantes sont apparues modifiant notamment le critère d'appariement [Chen and Medioni, 1992, Blais and Levine, 1995, Dorai et al., 1998] ou les stratégies de minimisation de l'erreur [Blais and Levine, 1995, Masuda et al., 1996]. Pour plus d'informations, les principes sous-jacents et les performances de ces variantes sont comparés dans l'article [Rusinkiewicz and Levoy, 2001].

En sortie de l'algorithme de recalage, la transformation rigide estimée peut être exploitée afin d'exprimer les coordonnées 3D des points de la mesure dans le repère associé au modèle CAO. De plus le champ 3D final associé aux distances point à point ξ_i peut être conservé et correspond au champ d'écarts résiduels entre la mesure recalée et le modèle nominal. Cette approche pose alors deux difficultés. D'une part, ce champ mêle simultanément les défauts géométriques de la pièce réelle et les erreurs de recalage. D'autre part, l'écart minimisé lors du recalage est très souvent une distance entre deux points et non l'écart entre une surface et un point. Cependant en supposant que ces erreurs sont négligeables, il est possible d'extraire de ce champ ξ le défaut de forme de la pièce. En effet, en fonction de la longueur d'onde de ces écarts géométriques, un classement peut alors être réalisé pour séparer les défauts de forme des défauts d'ondulation et de rugosité [ISO 4288, 1998, ISO 25178-73, 2019].

Le recalage ICP permet donc l'extraction du défaut de forme de la pièce lorsque les erreurs de recalage sont négligeables. Or, ces erreurs peuvent devenir importantes lorsque la géométrie mesurée présente des lacunes de numérisation, un bruit de mesure important ou lorsque la densité de points de mesure n'est pas suffisante. Ainsi une attention particulière doit être portée sur la densité de points d'évaluation lors de l'acquisition de la géométrie. En effet, si cette densité

est faible, les erreurs de recalage pourront devenir importantes, pénalisant ainsi la détermination du défaut de forme. En revanche, si cette densité devient trop importante, un grand nombre de points de mesure entraînera une forte complexité lors du recalage des données, augmentant ainsi le temps de post-traitement des données de mesure.

Compte tenu de l'état de l'art présenté dans la partie 2.1, le choix a été fait de retenir la photogrammétrie pour l'acquisition de la géométrie des pièces de grandes dimensions en vue d'évaluer leurs écarts de forme. Ce choix, ainsi que les outils de traitements couramment utilisés, induisent deux difficultés majeures qui sont :

- **Comment obtenir une information dense à partir de mesures en photogrammétrie?**
- **Comment limiter le temps de post-traitement des données acquises?**

En effet, ce compromis devra être trouvé afin d'obtenir une mesure par photogrammétrie suffisamment dense pour limiter les erreurs de recalage tout en limitant le temps de post-traitement. Pour prendre en compte ces considérations et choisir la stratégie de mesure adaptée, la partie suivante présente le principe de fonctionnement de la photogrammétrie ainsi que les stratégies envisageables pour l'étalonnage du système de stéréovision.

3 Mesure de forme par photogrammétrie

Dans la partie 2.1, le bilan dressé par [Savio et al., 2007] (voir tableau 1.1) met en évidence la pertinence de la photogrammétrie pour les pièces de grandes dimensions. En revanche, l'application d'une telle technique sur des pièces de géométrie complexe semble limitée. L'objectif de cette partie consiste alors à comprendre le fonctionnement de la photogrammétrie - particulièrement les contraintes induites par son utilisation - afin de proposer une stratégie compatible avec les pièces de géométrie complexe.

La partie 3.1 présente brièvement le principe de la photogrammétrie et les différents types de systèmes de mesure basés sur cette technique. Dans chacun des cas, la mesure devra systématiquement passer par une étape d'étalonnage permettant de lier les repères 2D associés aux images avec un repère 3D dans lequel sera mesuré l'objet. Ainsi, la partie 3.2 s'intéressera aux modélisations des caméras puis la partie 3.3 présentera les approches possibles permettant d'étalonner ces systèmes et ainsi déterminer le passage entre les repères images et les repères 3D.

3.1 Principe de photogrammétrie

La photogrammétrie, également appelée stéréovision, consiste en l'acquisition d'images 2D servant ensuite de support à la reconstruction de points 3D d'un objet mesuré. Cette technique repose sur un principe analogue à celui de la vision humaine : toutes deux exploitent la parallaxe obtenue entre deux prises de vues d'une même scène. Lorsque la position relative d'une prise de vue par rapport à la seconde est connue, il est possible de reconstruire la position 3D d'un élément identifié simultanément dans les deux images. Ainsi, en exploitant ce principe, il est possible de

reconstruire la géométrie tridimensionnelle d'un objet en disposant uniquement d'images bidimensionnelles.

Comparés aux autres systèmes de mesure sans contact, les systèmes de stéréovision se démarquent notamment par leur rapidité d'acquisition [Schwenke et al., 2002a]. De nombreux systèmes d'acquisition par stéréovision existent et peuvent être classifiés en trois catégories en fonction de la nature de l'information sur laquelle ils se basent :

- **Systèmes basés sur des points** : la détection de cibles sur les différentes images 2D et leurs appariements permettent la reconstruction de points 3D associés à chacune des cibles. Cette technique génère donc un nombre limité de points 3D et nécessite le placement de cibles sur la pièce en amont de la mesure.
- **Systèmes basés sur des lignes** : la détection de lignes caractéristiques sur les images et leurs orientations permettent de recréer des objets polyédriques. Basée sur la géométrie épipolaire, cette technique permet d'obtenir une meilleure représentativité de la pièce comparée à la photogrammétrie de points mais est plus complexe en matière de traitement de données [Koch, 1995].
- **Systèmes basés sur la texture de la pièce** : les systèmes de stéréocorrélation, également appelée photogrammétrie dense, appariant un grand nombre de points grâce à leur niveau de gris dans chaque image 2D puis reconstruisent les points 3D par triangulation. L'appariement des points de la surface se fait grâce à l'analyse par corrélation des différentes images et la recherche d'un score de corrélation optimal. Ainsi, les mesures doivent être faites sur des pièces présentant des surfaces texturées naturellement (béton, céramique brute) ou artificiellement par application d'un mouchetis [Helm et al., 1996, Sutton et al., 2009, Hild and Roux, 2012b].

Tout comme les autres systèmes de mesure optiques, les mesures par stéréovision nécessitent une phase d'étalonnage pour pouvoir passer des mesures dans les plans images 2D à la reconstruction des points 3D. Pour les systèmes stéréoscopiques, cette procédure passe par la détermination des paramètres intrinsèques (c'est-à-dire les paramètres internes de la caméra) et extrinsèques (autrement dit la position et l'orientation d'un repère associé à la caméra par rapport à un repère de l'espace). L'identification de ces paramètres passe généralement par la modélisation mathématique du système optique, c'est pourquoi la partie suivante présente les modèles de caméras couramment retenues dans la littérature.

3.2 Modélisation de caméra

Selon la complexité de la modélisation de caméra retenue, les aberrations optiques pourront ou non être prises en compte. Dans la partie suivante, une modélisation linéaire de caméra sera présentée (partie 3.2.1) puis celle-ci sera enrichie avec la prise en compte de distorsions optiques (partie 3.2.2).

3.2.1 Modélisation linéaire de caméra

Dans cette partie, le système optique est considéré comme parfait. Dès lors, deux modélisations peuvent être utilisées : le modèle avec projection en perspective (également appelé modèle sténopé ou *pin-hole*) - classiquement utilisé en imagerie - et le modèle avec projection parallèle - utilisé lorsque l'objet d'étude est lointain ou de très petite taille. Dans ce document, seul le modèle sténopé sera développé.

Le modèle sténopé permet de lier les coordonnées 3D (X, Y, Z) d'un point exprimées dans le repère monde \mathcal{R}_w avec les coordonnées pixels (u, v) exprimées dans le repère image \mathcal{R}_{im} . Ce modèle se base sur 3 transformations (voir figure 1.3(a)) :

- la transformation rigide T exprimant le passage entre le repère monde \mathcal{R}_w et le repère centré sur le point focal de la caméra \mathcal{R}_{cam} ;
- la projection perspective P dans le plan image de la caméra permettant de passer du repère caméra \mathcal{R}_{cam} au repère du plan image \mathcal{R}_p ;
- la transformation affine A permettant de passer des coordonnées métriques dans le repère \mathcal{R}_p à des coordonnées pixels exprimées dans le repère image \mathcal{R}_{im} (dont l'origine est placée par convention dans le coin supérieur gauche du plan image).

Lorsque les aberrations optiques sont négligées, les différentes transformations peuvent s'écrire linéairement, permettant ainsi d'être décrites à l'aide de matrices homogènes. La transformation complète M permettant de lier les coordonnées métriques dans le repère monde \mathcal{R}_w et les coordonnées pixels dans le repère image \mathcal{R}_{im} s'écrit donc comme le produit des matrices A , P et T décrivant les transformations listées précédemment. En notant s le facteur d'échelle, l'équation de projection s'écrit alors :

$$s \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_{im}} = \mathbf{APT} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_w} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_w} \quad (1.1)$$

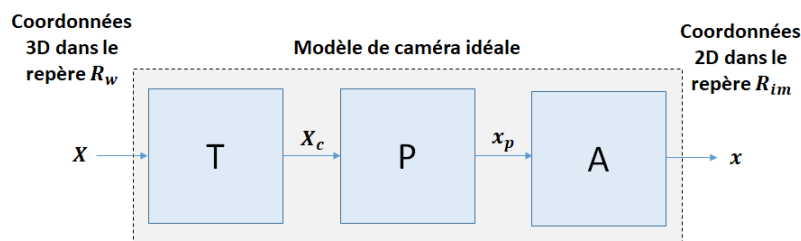


FIGURE 1.2 – Modélisation linéaire d'une caméra

Dans l'équation (1.1), la matrice A correspond à la transformation affine permettant de lier le repère \mathcal{R}_p centré sur le centre optique de l'image et le repère image \mathcal{R}_{im} . Celle-ci permet également de convertir les coordonnées métriques (x_p, y_p) en coordonnées pixels (x, y) de l'espace image. Cette transformation est définie par l'équation (1.2) en adoptant les notations suivantes :

- θ l'angle entre les axes u et v du repère \mathcal{R}_{im} , autrement dit l'angle entre les lignes et les colonnes de l'image;
- k_u et k_v respectivement le nombre de pixels par unité de longueur suivant les directions u et v de la caméra;
- x_0 et y_0 les coordonnées en pixels du point d'intersection de l'axe optique avec le plan image (théoriquement au centre de l'image).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_{im}} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_p} = \begin{bmatrix} k_u & x_0 \cot \theta & x_0 + y_0 \cot \theta \\ 0 & \frac{k_v}{\sin \theta} & \frac{y_0}{\sin \theta} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_p} \quad (1.2)$$

Classiquement, les axes u et v du repère \mathcal{R}_{im} sont quasiment perpendiculaires ($\theta \approx \frac{\pi}{2}$) ce qui mène à l'équation simplificatrice (1.3).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & x_0 \\ 0 & k_v & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Dans la suite de ce document, ce sera cette modélisation simplificatrice qui sera employée.

La seconde transformation - celle permettant de passer des coordonnées 3D d'un point dans le repère caméra \mathcal{R}_{cam} en coordonnées 2D dans le repère du plan image \mathcal{R}_p - est décrite par la matrice \mathbf{P} . Celle-ci correspond à la projection perspective dans le plan image. L'unique paramètre de cette transformation est la focale f de l'appareil photographique employé, caractérisant la distance entre le plan image et le centre optique (figure 1.3(b)). Cette matrice est alors définie par :

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_p} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_{cam}} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_{cam}} \quad (1.4)$$

Les transformations \mathbf{A} et \mathbf{P} (ainsi que les aberrations optiques, voir partie 3.2.2) peuvent donc être décrites uniquement avec des paramètres internes de la caméra. Ces paramètres sont couramment appelés paramètres intrinsèques et sont propres à l'objectif employé et aux réglages internes de la caméra.

La dernière transformation correspond à la transformation rigide \mathbf{T} permettant de passer des points de coordonnées (X, Y, Z) dans un repère 3D donné - ici le repère monde \mathcal{R}_w - aux points de coordonnées (X_c, Y_c, Z_c) dans le repère de la caméra. Cette transformation peut être décrite par une matrice de rotation \mathbf{R} et un vecteur translation \mathbf{t} . Ainsi, la matrice \mathbf{T} représentant cette transformation est définie par :

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_{cam}} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_w} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{O}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_w} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{\mathcal{R}_w} \quad (1.5)$$

Les différents paramètres de la transformation \mathbf{T} décrivent la position relative de la caméra par rapport à un repère donné. Ils sont couramment appelés paramètres extrinsèques et ne dépendent pas de la caméra mais uniquement de la configuration de mesure.

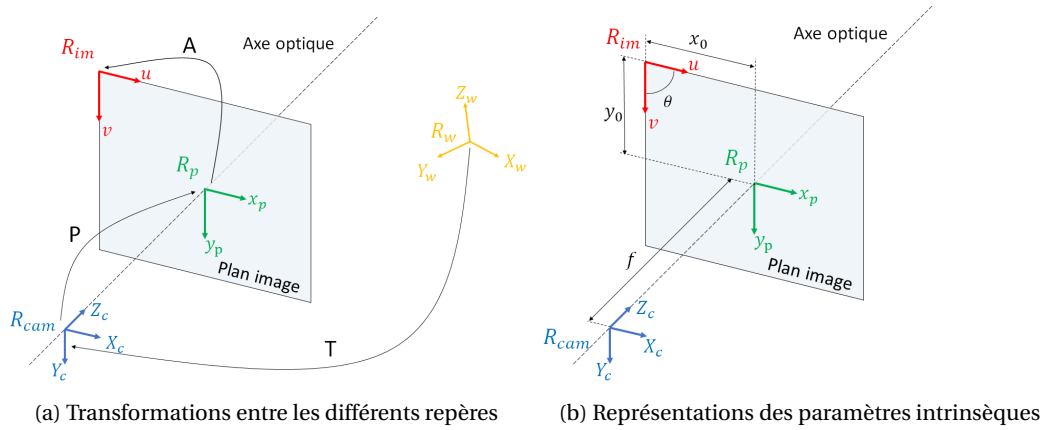


FIGURE 1.3 – Modèle sténopé d'une caméra

En combinant les équations (1.1), (1.3), (1.4) et (1.5), il est possible d'expliciter la matrice de transformation totale \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \underbrace{\begin{bmatrix} f k_u & 0 & x_0 & 0 \\ 0 & f k_v & y_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{\text{intrinsèque}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{O}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}}_{\text{extrinsèque}} \quad (1.6)$$

Ainsi, l'approche linéaire permet d'obtenir une description simple de la relation entre le repère 3D \mathcal{R}_w et le repère 2D image \mathcal{R}_{im} . Néanmoins ce type de modélisation suppose que le système optique de la caméra est parfait. Pour prendre en compte l'apparition d'aberrations optiques, ce modèle peut être enrichi; c'est l'objet de la partie 3.2.2.

3.2.2 Modélisation des aberrations optiques

Les aberrations optiques sont principalement dues aux imperfections des caméras et de leurs optiques. L'épaisseur des lentilles, leurs défauts de forme ainsi que leur mauvais alignement peuvent induire des variations sur la projection des points dans le plan image (x_p, y_p) . Ainsi, il peut être intéressant d'enrichir la modélisation de caméra en y intégrant la prise en compte des distorsions afin de décrire plus fidèlement la position des points après la projection dans le plan image $(\tilde{x}_p, \tilde{y}_p)$ (voir figure 1.4).

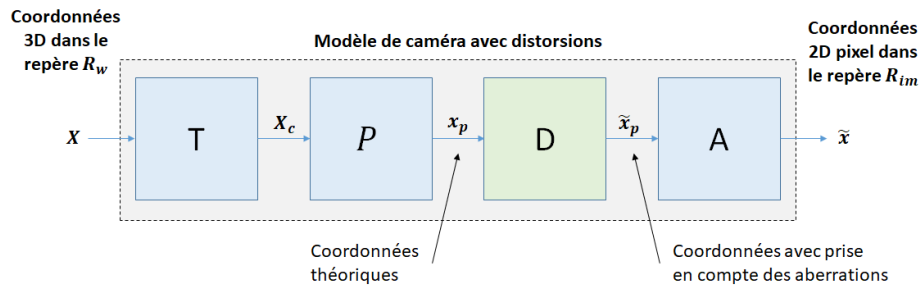


FIGURE 1.4 – Modélisation de caméra avec aberrations

Différents biais optiques peuvent être identifiés. En imagerie, seuls trois types de défauts sont classiquement pris en compte [Brown, 1971, Weng et al., 1992] :

- **La distorsion radiale**, due à l'approximation paraxiale. En effet, la modélisation linéaire du problème repose sur l'approximation de Gauss (les rayons lumineux sont parallèles et proches de l'axe optique). Or, lorsque cette hypothèse n'est pas vérifiée, cela induit des aberrations de type barillet (distorsion radiale négative) ou coussinet (distorsion radiale positive), illustrées par la figure 1.5 ;

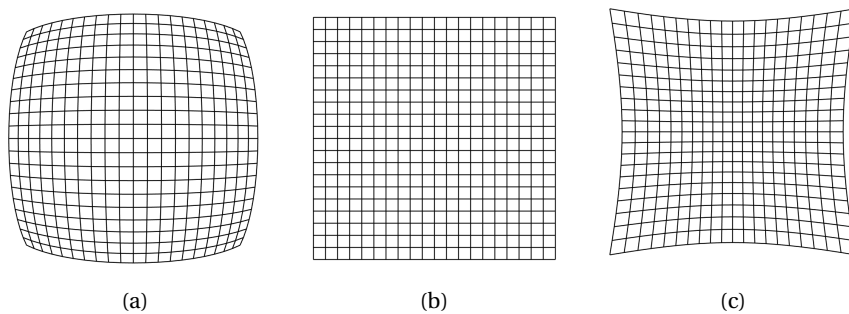


FIGURE 1.5 – Aberrations radiale négative (a), nulle (b) et positive (c)

- **L'aberration tangentielle**, ou aberration de décentrage, est causée par un écart de coaxialité entre les lentilles de l'optique. Dans un système parfaitement aligné, les rayons qui passent par les centres optiques des lentilles ne sont jamais déviés. Or si les lentilles ne sont pas correctement alignées, tous les faisceaux sont déviés. Un centre optique apparent peut néanmoins être défini mais celui-ci ne coïncide pas avec le centre optique prédit par le modèle parfait. La modification de projection associée à ce type de défaut est illustrée par la figure 1.6(a).
- **L'aberration prismatique**, due au défaut de parallélisme entre les lentilles et le capteur. L'impact de ce défaut est présenté à la figure 1.6 (b).

Chacune des aberrations peut être décrite par un modèle mathématique [Brown, 1971]. Celui-ci permet de déterminer le décalage (δ_x, δ_y) à appliquer à la position théorique des points dans le plan rétinien (x_p, y_p) afin d'obtenir l'image réelle $(\tilde{x}, \tilde{y}) = (x + \delta_x, y + \delta_y)$. Pour corriger les aberrations, il suffit d'estimer ce décalage. En notant $r^2 = x^2 + y^2$ et ϕ_0 la position angulaire du centre

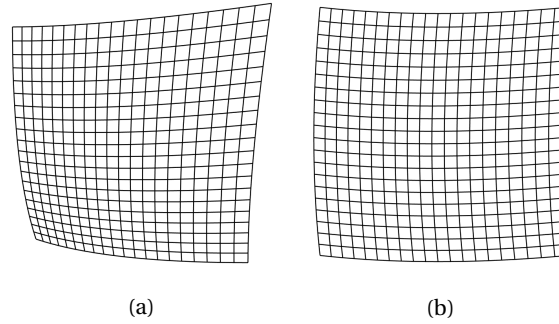


FIGURE 1.6 – Exemple de distorsion tangentielle (a) et prismatique (b)

optique apparent dans l'image, il est possible d'exprimer chaque aberration sous forme d'une somme infinie :

— Aberration radiale :

$$\begin{bmatrix} \delta_x^R(x, y) \\ \delta_y^R(x, y) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{\infty} k_i r^{2k} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

— Aberration tangentielle :

$$\begin{bmatrix} \delta_x^T(x, y) \\ \delta_y^T(x, y) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{\infty} t_i r^{2(k-1)} \begin{bmatrix} 2xy \cos \phi_0 - (2x^2 + r^2) \sin \phi_0 \\ 2xy \sin \phi_0 - (2y^2 + r^2) \cos \phi_0 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

— Aberration prismatique :

$$\begin{bmatrix} \delta_x^P(x, y) \\ \delta_y^P(x, y) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{\infty} p_i r^{2k} \begin{bmatrix} -\sin \phi_0 \\ \cos \phi_0 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Afin de prendre en compte les aberrations optiques dans le modèle de caméra, il est impératif de limiter l'ordre des sommes infinies (1.7), (1.8), (1.9). Plusieurs auteurs [Brown, 1971, Tsai, 1987, Weng et al., 1992] ont montré que les distorsions d'une image sont largement dominées par la première composante de distorsion radiale. Certains modèles étendent cette représentation aux trois premiers coefficients radiaux (k_1, k_2 et k_3) et aux deux premiers coefficients tangentiels (t_1 et t_2) [Bouguet, 2004].

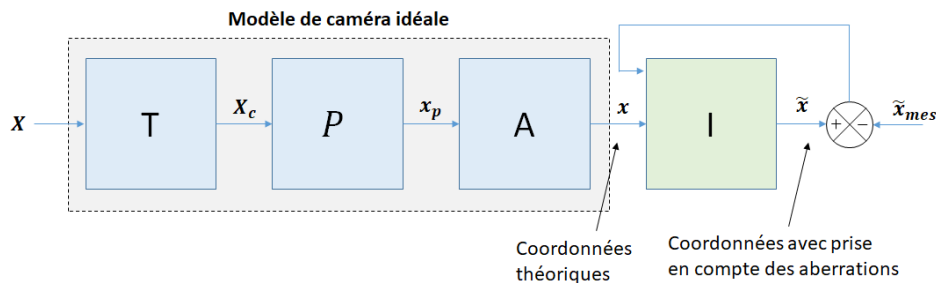


FIGURE 1.7 – Détermination des aberrations optiques par interpolation

Ainsi, pour prendre en compte les aberrations optiques, il faut déterminer les paramètres k_1, k_2, k_3, t_1, t_2 . Pour cela, une méthode classique [Zhang et al., 2011] consiste à utiliser un artefact d'étalonnage, déterminer un premier ensemble de paramètres extrinsèques et intrinsèques

reposant sur une modélisation linéaire de caméra, puis estimer les coefficients de distorsion afin de maximiser un critère de vraisemblance (*maximum likelihood*) entre les points mesurés \tilde{x}_{mes} et les points théoriques avec prise en compte des distorsions \tilde{x} . Cette méthode permet ainsi de faire une interpolation I entre la projection obtenue avec une caméra parfaite x et les points \tilde{x} obtenus lorsque le système optique présente des défauts (voir figure 1.7).

Une fois l'estimation des paramètres décrivant les aberrations optiques réalisée, il est possible de retirer leur participation en estimant l'interpolation inverse I^{-1} (voir figure 1.8). Ainsi les images peuvent être corrigées d'une grande partie de leurs aberrations optiques, permettant de baser les calculs de stéréovision sur un modèle linéaire de caméra.

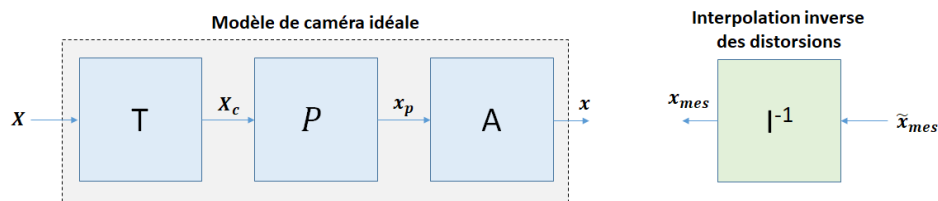


FIGURE 1.8 – Correction des aberrations optiques

Par la suite, une correction des distorsions optiques sera appliquée en amont des calculs de stéréovision, permettant ainsi d'utiliser un modèle simple et linéaire de caméra.

Ainsi le modèle de caméra permet d'associer un point 3D X à un unique point 2D x dans l'espace image. En revanche, puisqu'il y a une projection orthogonale et donc une perte de dimension, un point 2D x sera associé à une ligne dans l'espace 3D. C'est la raison pour laquelle lorsque la géométrie d'une pièce doit être mesurée par un système optique, deux prises de vues sont nécessaires. En connaissant les coordonnées 2D dans deux images différentes pour un même élément, il est alors possible de reconstruire cet élément en 3D par triangulation si le modèle de caméra est connu.

Pour connaître le modèle de caméra, autrement dit pour identifier l'ensemble des paramètres intrinsèques et extrinsèques, une étape d'étalonnage est nécessaire. La section suivante présente donc une liste non exhaustive des méthodes classiques employées pour l'étalonnage de systèmes de stéréovision.

3.3 Étalonnage de systèmes de photogrammétrie

Bien qu'il soit possible d'extraire des informations d'une caméra non étalonnée [Harvent et al., 2008], l'étalonnage devient une étape impérative dès lors qu'une information métrique est requise [Faugeras, 1987, Sutton et al., 2009]. Pour les systèmes stéréoscopiques, l'étalonnage consiste à déterminer la relation entre les coordonnées 3D des points d'une scène et les coordonnées pixels des points 2D dans le plan image de chacune des caméras.

3.3.1 Méthodes courantes d'étalonnage

La phase d'étalonnage a pour but d'identifier les paramètres du modèle (1.1) permettant de passer des points 3D dans le repère monde \mathcal{R}_w aux points des images 2D dans le repère image \mathcal{R}_{im} . Le problème se ramène donc à la détermination des 11 inconnues M_{ij} (la composante M_{34} est fixée à 1 pour garantir l'unicité de la matrice \mathbf{M}). De nombreuses techniques existent dans la littérature, l'objectif de cette partie est d'en donner une vision globale en présentant une liste non exhaustive des méthodes d'étalonnage couramment employées.

Étalonnage à partir de points

Il existe de nombreuses méthodes d'étalonnage basées sur des points; les principales approches sont présentées et comparées dans l'article [Salvi et al., 2002]. Généralement, une première estimation de la matrice \mathbf{M} peut être réalisée par des approches linéaires via l'utilisation de l'algorithme DLT (Direct Linear Transformation) [Sutherland, 1964]. Cette méthode consiste à déterminer le noyau d'une matrice \mathbf{A} , *i.e.* déterminer la solution non triviale du système $\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$.

Une fois la solution initiale estimée, les composantes de la matrice de passage sont optimisées à l'aide de méthode d'inversion classique (méthode des moindres carrés non linéaire [Faugeras, 1987] ou décomposition en valeurs singulières [Morvan, 2009]). Ces approches sont simples à mettre en œuvre mais ne permettent pas d'inclure les corrections d'aberrations optiques.

D'autres méthodes existent mais consistent cette fois-ci en une optimisation non linéaire du problème. Cette approche permet de prendre en compte la correction des aberrations optiques, mais nécessite une bonne solution initiale du problème pour garantir la convergence. Pour pallier ce problème, la première étape de ces méthodes consiste en une linéarisation du problème afin d'obtenir une estimation initiale des paramètres recherchés. Ensuite, une méthode d'optimisation itérative permet d'évaluer les paramètres intrinsèques et extrinsèques de manière optimale en prenant en compte les aberrations optiques [Tsai, 1987, Weng et al., 1992].

En plus des méthodes comparées dans l'article [Salvi et al., 2002], d'autres méthodes peuvent être employées dans le cadre de l'étalonnage de système de stéréovision [Garcia, 2001].

Étalonnage à partir de droites

De manière analogue, d'autres méthodes permettent l'étalonnage des systèmes de vision en se basant non plus sur des points mais sur des droites. [Dornaika and Garcia, 1997] proposent une extension des méthodes linéaires et non linéaires développées dans [Sutherland, 1964] et [Faugeras, 1987] en associant des droites, modélisées par un point et un vecteur directeur. [Ma et al., 1993] modélisent les droites comme l'intersection de plans et proposent une résolution linéaire.

Étalonnage à partir d'un modèle numérique

[Dubreuil et al., 2015] proposent de s'affranchir de l'utilisation de mire d'étalonnage en considérant la définition nominale du porte-pièce comme support d'étalonnage. Ainsi, la détection et l'appariement des contours du porte-pièce permet d'étalonner le système stéréoscopique et d'obtenir un lien direct entre les deux repères images et le repère CAO.

De manière analogue, Beaubier [Beaubier et al., 2014] proposent d'utiliser l'objet d'étude directement comme artefact d'étalonnage. Pour cela, ils utilisent la définition nominale de la pièce d'étude sous forme de maquette numérique et détermine les paramètres de la matrice \mathbf{M} via des techniques de stéréocorrélation. Cette méthode a été reprise dans [Dubreuil et al., 2016] et appliquée non plus sur une surface de Bézier mais sur un maillage.

L'étalonnage sur modèle numérique par stéréocorrélation vise à déterminer les matrices de passage \mathbf{M} pour les deux caméras (respectivement \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r pour l'appareil gauche et droit) de sorte que le modèle numérique 3D se projette au mieux dans les deux images. Les composantes de chaque matrice sont optimisées pour minimiser le résidu de corrélation, permettant l'obtention directe de la transformation à appliquer pour passer du repère virtuel \mathcal{R}_{CAO} aux repères caméras.

Dans la suite de ce document, le terme "auto-étalonnage" désignera l'approche d'étalonnage s'appuyant sur le modèle nominal de la pièce étudiée.

3.3.2 Synthèse sur les techniques d'étalonnage

Le tableau 1.2 résume les différentes techniques d'appariement pour l'évaluation des matrices de passage \mathbf{M} lors de l'étalonnage de systèmes stéréoscopiques.

Éléments	Points	Droites	Modèle CAO
Résolution linéaire	[Sutherland, 1964]	[Ma et al., 1993]	
Résolution non linéaire (avec prise en compte des aberrations)	[Faugeras, 1987] [Morvan, 2009] [Salvi et al., 2002] [Tsai, 1987] [Weng et al., 1992]	[Dornaika and Garcia, 1997]	[Beaubier et al., 2014] [Dubreuil et al., 2016] [Quinsat et al., 2017]

TABLEAU 1.2 – Résumé des techniques courantes d'étalonnage

La majorité de ces méthodes repose sur l'extraction d'éléments géométriques (points ou droite) dont la position relative est connue. Pour cela, des artefacts de géométrie connue sont généralement utilisés. Ces objets sont composés de points remarquables comme l'intersection de lignes verticales et horizontales (figure 1.9(a)) ou le centre de taches elliptiques (figure 1.9(b)). Deux types de mires d'étalonnage sont couramment utilisées : les mires planes et les mires 3D.

Pour étalonner un système de stéréovision avec les mires planes, une dizaine d'images prises dans différentes positions et avec différentes orientations sont nécessaires. Bien que très couramment utilisé, l'étalonnage sur mire plane devient laborieux lorsque la pièce à mesurer par la suite est de grande dimension puisqu'il faut prendre des images sur la totalité de la surface à observer pour obtenir un étalonnage correct. Pour pallier ce problème, l'étalonnage peut se faire sur

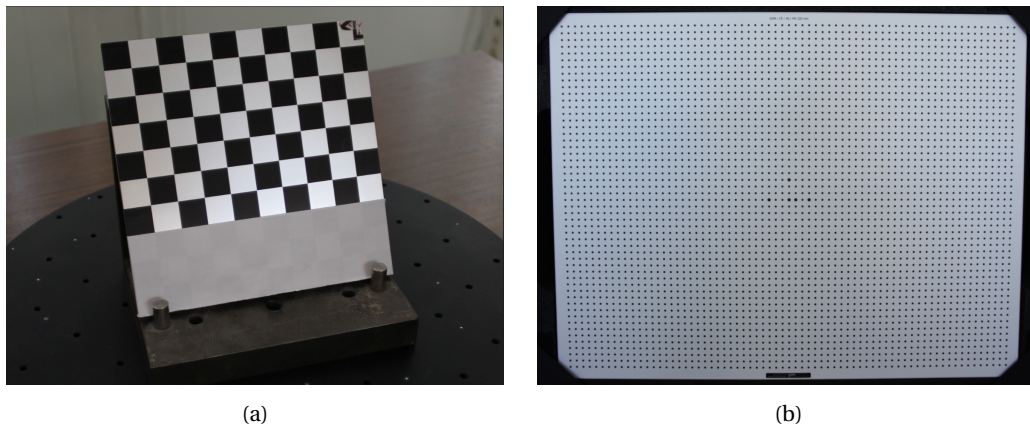


FIGURE 1.9 – Mire plane en damier (a) ou mire plane à points (b)

une mire 3D : dans ce cas, une seule paire d'images suffit. Cette technique permet d'obtenir les informations hors plan, rendant la mise en oeuvre de l'étalonnage plus simple et plus rapide. En revanche, la taille de la mire 3D doit être du même ordre de grandeur que la surface à observer [Besnard, 2010]. De plus, les méthodes basées sur les artefacts de mesure permettent d'obtenir les matrices de passage \mathbf{M} dans un repère lié à la mire et non lié à un repère propre à la pièce étudiée; une étape de recalage des données est donc nécessaire.

Ainsi, la mesure par photogrammétrie nécessite une étape préalable d'étalonnage à partir d'artefacts de géométrie connue. Cette étape, déterminante sur la qualité et la description des données acquises, pose deux contraintes :

- **Comment avoir un artefact d'étalonnage facilement compatible avec des pièces de grandes dimensions ?**
- **Comment lier le repère d'étalonnage avec le repère de définition de la pièce à mesurer ?**

Pour s'affranchir des contraintes induites par l'utilisation de mires d'étalonnage, certains travaux utilisent la pièce d'étude [Beaubier et al., 2014, Dubreuil et al., 2016] ou le porte-pièce [Dubreuil et al., 2015, Quinsat et al., 2017] comme artefact d'étalonnage. Les mesures peuvent alors être directement exprimées dans le repère CAO, permettant une comparaison immédiate entre la mesure et le modèle nominal de la pièce. Cette approche prend également tout son sens pour les pièces de grandes dimensions, évitant ainsi de manipuler des mires d'étalonnage de grande taille.

Ainsi pour réduire le temps de post-traitement des données de mesure, une stratégie similaire d'auto-étalonnage sur modèle numérique est envisagée. Cette solution permet alors de coupler directement l'étalonnage du système stéréoscopique (voir partie 3.3.1) avec le recalage des données de mesure (voir partie 2.2).

Puisque l'objectif de ces travaux consiste à développer un système de mesure de défaut de forme pour des pièces de grandes dimensions, le choix a été fait de s'orienter vers de l'acquisition de géométrie par photogrammétrie. Afin d'obtenir une mesure dense - permettant ainsi le bon traitement des données et l'obtention d'une mesure représentative de la géométrie réelle de la pièce - notre choix s'est donc porté vers les approches de corrélation d'images. Le principe de fonctionnement de la mesure par corrélation d'images est donc détaillé dans la section suivante.

4 Mesure de forme par corrélation d'images

Classiquement, la mesure de forme à l'aide de technique de corrélation d'images consiste en la mise en correspondance d'images (régions locales d'une photographie) prises dans différentes configurations [Sutton et al., 2009, Harvent et al., 2008]. Cet appariement est réalisé sur de petites zones d'intérêt dans chacune des images également appelées images. La corrélation d'images consiste à appairer les pixels de deux images de sorte que la différence de niveaux de gris de chaque appariement soit minimale. Une fois la mise en correspondance réalisée dans chaque photographie, la reconstruction de la surface est obtenue par triangulation des centres des images. Ainsi les approches "classiques" de mesure par corrélation - également appelées approches locales - permettent d'obtenir une grande quantité de données, nécessaire pour la mesure de pièces complexes. En revanche la donnée de sortie est un nuage de points, ce qui nécessite un traitement *a posteriori* des données.

Bien que cette première approche puisse générer un grand nombre de points, les informations obtenues restent locales. Une seconde approche - similaire aux approches globales adoptées en corrélation 2D d'images numériques [Besnard et al., 2006, Roux et al., 2008] - consiste à modéliser mathématiquement la surface étudiée (par des NURBS [Beaubier et al., 2014, Dufour et al., 2016] ou par un maillage [Dubreuil et al., 2016] par exemple) et à déterminer le champ de déplacement à appliquer à cette modélisation afin de minimiser un résidu de corrélation calculé sur l'intégralité de la surface d'intérêt. Cette technique donne une description dense du champ mesuré (géométrie 3D de la surface ou déformation 2D de celle-ci au cours du temps [Dufour et al., 2015a, Rebergue et al., 2017, Rebergue et al., 2018]) et assure un lien direct avec les logiciels de CAO. Il a été montré dans l'article [Hild and Roux, 2012a] que les approches globales avaient de meilleures performances (résolution et incertitude de mesure notamment) dans le cadre de la mesure de champs de déplacement comparées aux approches locales; il est donc raisonnable de penser que les approches globales pourraient également être bien adaptées pour la mesure de forme.

Dans leurs travaux, [Beaubier et al., 2014] et [Dufour et al., 2016] modélisent la surface par une NURBS et, après une étape d'étalonnage, déforment itérativement celle-ci en optimisant la position des points de contrôle afin de minimiser un résidu global. Le problème d'optimisation obtenu contient ici un nombre très faible d'inconnues, cependant cette modélisation ne permet pas de représenter des surfaces discontinues en tangence (surfaces avec des défauts d'usinage par exemple).

[Dubreuil et al., 2016] étendent la précédente approche aux maillages éléments finis en déplaçant chacun des noeuds de la surface selon la normale locale afin de minimiser un résidu de corrélation calculé sur l'intégralité du maillage. Cette seconde approche offre une description moins régulière que la modélisation par NURBS, permettant de représenter des surfaces potentiellement plus complexes et ne se limite plus à des défauts continus en tangence. Néanmoins, le grand nombre de degrés de liberté du problème d'optimisation peut être préjudiciable et nécessite également de disposer d'une bonne heuristique de départ pour pouvoir converger vers une solution cohérente.

Ainsi, bien que les techniques de corrélation d'images soient plus couramment employées pour la mesure de déformations, elles semblent également adaptées à la mesure de forme. De plus, grâce aux approches globales de corrélation d'images, il est possible d'obtenir une mesure dense de la géométrie de la pièce. En revanche, les deux exemples cités précédemment mettent en lumière le besoin de trouver un compromis entre une bonne représentativité de la description de la surface et un nombre limité d'inconnues du problème de corrélation. En conséquence, l'utilisation de stéréocorrélation pour la mesure des pièces de grandes dimensions soulève la question suivante :

- **Comment définir un ensemble de paramètres réduit pour représenter les défauts de forme d'une surface?**

Afin de construire cet ensemble, la section suivante dresse un bilan des approches classiques employées pour représenter le défaut de forme d'une pièce mécanique. Après avoir listé et détaillé l'ensemble de ces approches, celles-ci seront comparées afin de déterminer la représentation la plus adaptée à la mesure de pièces de grandes dimensions.

5 Représentation d'un défaut de forme

De nombreuses approches existent pour représenter le défaut de forme, le but de cette partie consiste à en donner une vision d'ensemble en fournissant une liste non exhaustive des méthodes de représentation possibles.

5.1 Approches classiques de représentation de défaut

Une première méthode pour représenter les défauts de forme repose sur l'utilisation d'une famille de fonctions trigonométriques ou polynomiales. Pour les composants optiques, le défaut de forme est généralement décomposé à l'aide des polynômes de Zernike car cette base permet de représenter les défauts générant des aberrations optiques [Zernike, 1942, ISO 10110-5, 2015]. Pour les pièces mécaniques, [Huang and Ceglarek, 2002] proposent d'utiliser une décomposition sur une base de cosinus (*Discrete Cosine Transform*, ou décomposition en cosinus discrète) pour exprimer le défaut de forme de la pièce. [Ganti and Bhushan, 1995] décomposent le défaut de forme de pièces à l'aide des fonctions de Weierstrass-Mandelbrot. Ces différentes approches permettent de représenter le défaut de forme d'une pièce avec peu de paramètres, mais se limitent à des surfaces élémentaires (plan, cylindre, cône). Pour des surfaces légèrement plus complexes pouvant être représentées par des carreaux NURBS, une famille de défaut peut être construite en déplaçant chacun des points de contrôle [Beaubier et al., 2014, Colantonio et al., 2020]. Cette approche permet alors de définir une base de défaut sur des pièces non élémentaires mais se limite à des surfaces paramétrisables.

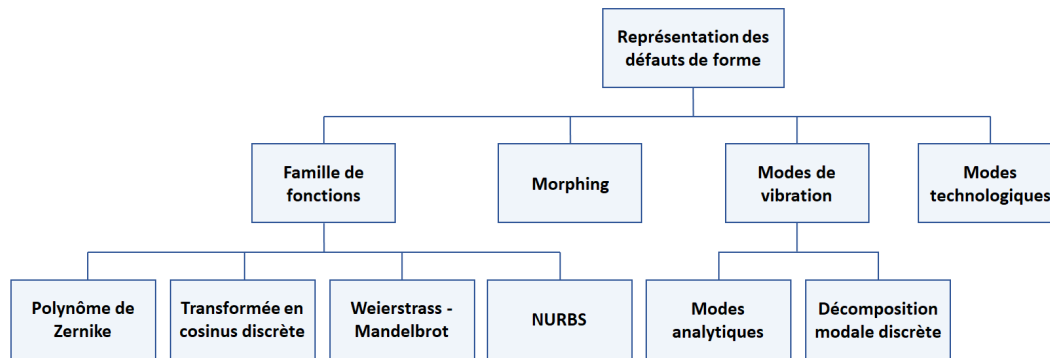


FIGURE 1.10 – Classification des différentes représentations de défaut de forme

Pour étendre la représentation des défauts de formes à des surfaces complexes, [Franciosa et al., 2011] proposent d'utiliser des techniques de morphing de maillage issues de la communauté d'infographie pour identifier les écarts de forme. Cette technique permet de représenter une large gamme de défauts de forme, cependant la caractérisation de ceux-ci est très dépendante des différents paramètres employés (fonctions de forme et taille de l'enveloppe convexe employées).

Une troisième méthode consiste à décomposer le défaut de forme en utilisant les modes propres de vibration de la surface étudiée. Cette approche fait l'objet de normes [ISO 12181-1, 2011, XP E04-007, 2015] pour l'analyse et la caractérisation des défauts de forme des géométries élémentaires (plan, cylindre, cône et cercle). Dans ces documents, les modes propres sont obtenus de manière analytique, réduisant l'application de l'approche à des surfaces élémentaires. Cette méthode peut néanmoins être généralisée aux surfaces complexes à l'aide de la décomposition modale discrète (basée sur les solutions éléments finis des modes propres de vibration de la surface) [Samper and Formosa, 2007]. Or, comme l'amplitude des modes décroît lorsque leur longueur d'onde diminue, l'intégralité de la base n'est pas nécessaire pour représenter le défaut de forme. Ainsi, une bonne représentativité du défaut de forme peut être obtenue avec une quantité restreinte de modes, réduisant le nombre de degrés de liberté du problème de mesure de forme. À titre d'exemple, cette approche a été appliquée pour évaluer le défaut de pièce flexible de grande dimension [Thiébaud et al., 2017].

Les différentes méthodes citées précédemment permettent de représenter un défaut de forme mais ne tiennent pas compte du procédé d'obtention de la pièce; une action corrective sur le procédé peut donc être compliquée à mettre en œuvre. Pour pallier ce problème, une dernière approche consiste à utiliser des modes technologiques. Ceux-ci, construits par expérience ou par une campagne de mesure, prennent en compte les phénomènes physiques liés au procédé : les modes construits par expérience se basent sur une connaissance *a priori* du procédé d'obtention (défauts géométriques des machines-outils, erreur de mise en position de la pièce, flexion de l'outil...) [Yun et al., 2002, Dantan et al., 2017]; les modes basés sur une campagne de mesures sont eux construits à partir d'une étude statistique d'une série de mesure. Cette dernière base est généralement construite à l'aide d'une étude multivariée (via *Independent Component Analysis* (ICA) [Ruto et al., 2006] ou *Principal Component Analysis* (PCA) [Ballu et al., 2017, Ghaoui et al., 2019] par exemple).

5.2 Avantages et limites des représentations de défaut

L'objectif de cette partie consiste à comparer les méthodes de représentation de défaut présentées précédemment ; l'ensemble de ces comparaisons sont résumées dans le tableau 1.3.

Les familles de fonctions permettent de représenter une large gamme de défauts de forme à des échelles variées. De par leur formulation analytique, la complexité de calcul de ces approches est très faible, cependant leur application se limite à des surfaces élémentaires. Il en est de même pour l'utilisation des modes propres analytiques.

Pour des surfaces plus complexes, des fonctions NURBS peuvent être employées. Cette approche permet de représenter un défaut de forme global, néanmoins elle est peu adaptée pour représenter un défaut local ou possédant une faible longueur d'onde.

Pour obtenir une représentation d'un défaut de forme quel que soit le maillage utilisé, les techniques de morphing peuvent être employées. L'inconvénient de cette approche réside dans le contrôle du défaut obtenu : il dépend du choix de la fonction de forme utilisée et de la taille de l'enveloppe convexe choisie ; ainsi, il peut être complexe de choisir un jeu de paramètres permettant de représenter correctement un défaut particulier.

Enfin, le défaut de forme peut être décrit à l'aide de la décomposition modale discrète ou par des modes technologiques. Les deux approches sont applicables quel que soit le maillage employé et permettent de représenter un défaut de forme à différentes échelles. Les modes technologiques se démarquent de la décomposition modale discrète par leur compacité : en effet, seuls quelques modes technologiques sont nécessaires pour être représentatifs d'un défaut mesuré, pour plusieurs dizaines pour la décomposition modale discrète. En revanche, cela nécessite d'apporter une connaissance *a priori* (par la mesure d'une série de pièce ou par la connaissance du procédé d'obtention) ce qui ne peut pas toujours être fait.

	Surface complexe	Représentation multi-échelle	Représentativité du défaut	Complexité de calcul
Familles de fonctions	○	●	●	●
Morphing	●	●	◐	◐
Modes propres analytiques	○	●	●	●
Décomposition modale discrète	●	●	●	◐
Modes technologiques	●	●	●	◐

Parfaitement adapté	●
Adapté	◐
Peu adapté	○

TABLEAU 1.3 – Tableau comparatif des représentations de défauts

Dans le contexte de ces travaux, puisque nous souhaitons identifier le défaut de forme de pièces de grandes dimensions ou de géométrie complexe, deux possibilités semblent se démarquer : la décomposition modale discrète et les modes technologiques. Cependant, une connaissance *a priori* du procédé ou un retour sur expérience ne peut pas être systématiquement fait.

Ainsi, dans le but d'apporter une méthode généralisable quelle que soit la pièce considérée, le choix a été fait dans ces travaux d'exploiter la décomposition modale discrète.

6 Cas applicatif pour la métrologie de pièce de grandes dimensions

Au travers d'un exemple, cette partie vise à exécuter un processus de mesure et d'identification du défaut de forme pour une pièce de grandes dimensions. Il s'agit alors d'illustrer les contraintes et difficultés actuelles lors de l'utilisation de techniques industriellement reconnues. La pièce retenue ici (figure 1.11) est une portion de panneau aéronautique d'environ $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ présentant des renforts verticaux (cadres) et horizontaux (lices) ainsi que des évidements (hublots).



FIGURE 1.11 – Portion de panneau dont le défaut de forme doit être identifié.

Afin d'obtenir une représentation de la géométrie réelle du panneau, une approche par photogrammétrie de cibles peut être employée. Une mesure plus dense sera obtenue avec une fusion des données issues de la photogrammétrie avec celles obtenues avec un capteur à projection de franges.

6.1 Mesure par photogrammétrie de cibles TRITOP

Dans ces travaux, le système industriel TRITOP commercialisé par l'entreprise ZEISS sera employé. Ce dernier est constitué d'un appareil photographique, de barres d'étalonnage en fibre de carbone de longueur certifiée et d'un ensemble de cibles codées (figure 1.12). Afin de faciliter la lecture, l'ensemble des informations techniques concernant la solution TRITOP est donné dans l'annexe B.

Pour réaliser une mesure par photogrammétrie, il est essentiel de disposer les éléments d'étalonnage tout autour de la pièce. À titre d'illustration, la disposition des barres d'étalonnage et de croix de positionnement est visible sur la figure 1.13. En supplément, il est possible d'ajouter des cibles codées ou non codées sur l'ensemble de la pièce pour obtenir une mesure légèrement plus dense et plus représentative de la géométrie réelle de la pièce.



FIGURE 1.12 – Système de photogrammétrie de cibles TRITOP [ZEISS,] servant de mesure de référence

Ces cibles, qu'elles soient codées ou non, sont constituées d'un disque central blanc sur fond noir de rayon 5 mm. En revanche les cibles codées disposent d'un élément supplémentaire : un anneau extérieur blanc sur lequel plusieurs portions peuvent être masquées pour créer un code facilement repérable sur les images. Ainsi grâce à ces cibles codées, il est possible de réaliser automatiquement l'appariement des cibles entre deux prises de vues et ainsi calculer la transformation permettant de passer de l'une à l'autre. Enfin par triangulation, la position 3D de chacune des cibles peut être obtenue. Au total sur le panneau, 241 pastilles ont été collées (leur emplacement est repéré en bleu sur la figure 1.13) et 56 cibles codées ont été identifiées sur la scène (repérées en rouge sur la même figure).

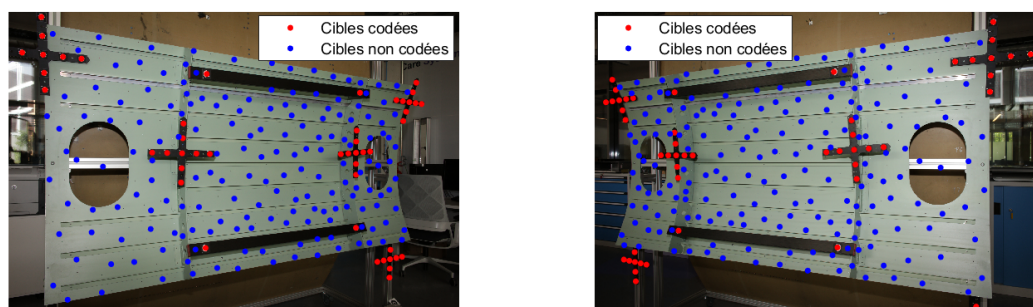


FIGURE 1.13 – Repérages des cibles codées (rouges) et non codées (bleues) présentes sur le panneau.

Pour obtenir une mesure de la géométrie du panneau, il est nécessaire de prendre plusieurs vues de la pièce avec des angles différents. En théorie seules deux images suffisent pour recalculer les positions 3D des cibles; en pratique quelques dizaines de photographies sont nécessaires pour obtenir des incertitudes de mesure acceptables. Dans ce cas d'illustration, 40 photographies ont été réalisées tout autour de la pièce, cependant pour pallier les problèmes de sureposition ou de netteté, seules 29 d'entre elles ont été exploitées pour le calcul des coordonnées 3D des cibles (figure 1.14).

Le logiciel GOM Inspect identifie alors automatiquement les centres des cibles dans chacune des images puis, par l'intermédiaire des cibles codées et des barres étalons, le logiciel détermine les coordonnées de chacune des cibles dans un repère 3D de mesure. Les incertitudes moyennes (données par le logiciel constructeur) dans les images sont alors de 0.008 pixels et l'incertitude moyenne dans l'espace 3D est de 0.040 mm.

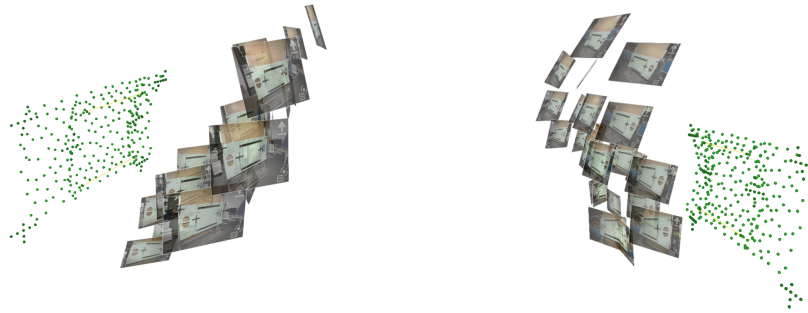


FIGURE 1.14 – Positions relatives des prises de vues et des cibles 3D calculées par TRITOP.

Ainsi la photogrammétrie de cibles via le système industriel TRITOP permet l'obtention d'environ 250 points sur la peau de la pièce (correspondant aux cibles non codées). Même si ce nombre peut sembler important, il est aisé de remarquer sur la figure 1.14 que la densité des points de mesure est faible, pouvant induire des erreurs importantes lors du recalage de ces données sur le modèle nominal. Afin d'obtenir une mesure plus dense du panneau, il est nécessaire de coupler le système de photogrammétrie avec un autre système.

6.2 Couplage de la photogrammétrie avec la lumière structurée

Actuellement, les systèmes de mesure par lumière structurée semblent être l'une des solutions optiques les plus efficaces pour mesurer des pièces aux formes complexes [Guerra et al., 2019]. C'est pourquoi un système à projection de franges commercialisé par la même entreprise a été utilisé dans ces travaux. Il s'agit de l'ATOS Core 300 SN : 171215, constitué de deux caméras et d'un projecteur. À nouveau, l'ensemble des informations techniques relatives à la solution ATOS Core est détaillé dans l'annexe B.

Le système de projection de franges ATOS Core retenu permet de mesurer un volume d'environ $300 \times 230 \times 230 \text{ mm}^3$. Au vu de la dimension du panneau, il est nécessaire de réaliser plusieurs patches de mesure et de les assembler. Or, puisque les deux systèmes sont commercialisés par la même entreprise, le système ATOS Core est capable de détecter les cibles présentes dans son volume de mesure et de recalculer automatiquement les patches par rapport à ces cibles.

Ainsi, une fois les 241 cibles identifiées et repérées dans l'espace 3D par le système TRITOP, la mesure par lumière structurée ATOS Core peut être réalisée. De par la dimension du panneau et des problèmes de visibilité induits par la présence de cadres et de lices, 88 patches de mesure ont été réalisés et recalés automatiquement sur les cibles 3D.

La fusion de chacune des mesures permet alors d'obtenir un maillage contenant plus de 30 millions de sommets (figure 1.15(a)). Ce maillage est alors détourné manuellement pour ne garder que les points appartenant à la peau intérieure du panneau. Ainsi, en retirant les sommets appartenant aux cadres, aux lices, aux barres étalons et aux croix d'étalonnages, le maillage détourné est alors réduit à 19 millions de points (figure 1.15(b)). Au vu du nombre de points disponibles et pour limiter les volumes de stockage de données, un maillage de 1,2 millions de noeuds est créé en décimant le maillage de mesure détourné.

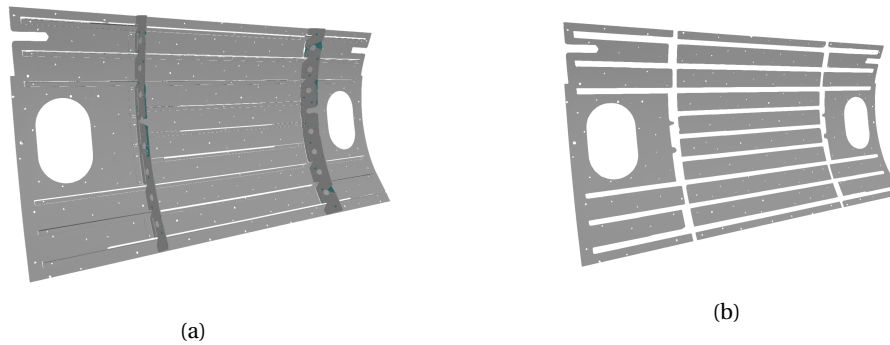


FIGURE 1.15 – Maillage issu de la mesure (a) et maillage détourné (b).

Une fois la mesure dense de la pièce obtenue, il est désormais nécessaire d'extraire le défaut de forme de celle-ci. Pour cela, la mesure doit être mise en correspondance avec le modèle nominal (voir partie 2.2).

6.3 Obtention du défaut de forme du panneau

Afin d'obtenir le défaut de forme du panneau, il faut mettre en correspondance la géométrie mesurée avec la définition théorique du panneau. Pour cela, un recalage doit être effectué entre la mesure et le modèle CAO. La majorité des algorithmes de recalage se basant sur des nuages de points (voir partie 2.2), il est nécessaire de discrétiser le modèle nominal.

Le panneau est nominale une portion de $2000 \times 1000 \text{ mm}^2$ d'un cylindre de 2450 mm de diamètre. Le modèle nominal est défini à l'aide du logiciel de CAO Catia (V5R19). Ce modèle a ensuite été maillé avec un pas régulier de 10 mm, créant ainsi 2500 sommets et 4750 éléments. Enfin, une analyse modale libre a permis d'extraire les 50 premiers modes propres de la pièce en supposant que l'épaisseur du panneau était constante.

Une fois la géométrie nominale discrétisée et les modes calculés, il est possible de recalibrer la mesure sur ce nuage de point. Un recalage rigide de type *Iterative Closest Point* peut être envisagé, cependant un recalage rigide suppose que les deux nuages de points possèdent la même géométrie. Dans le cas d'une pièce possédant un défaut de forme important, le nuage issu de la numérisation présente des différences significatives avec le nuage nominal. Ces différences peuvent alors induire une erreur lors du calcul des écarts point à point et ainsi influencer le calcul de la transformation rigide. Pour pallier ce problème, d'autres algorithmes accompagnent le recalage d'une phase de déformation [Cao et al., 2014, Guo et al., 2016, Thiébaud et al., 2018]; ce type d'algorithme est alors appelé recalage non rigide. La majorité des algorithmes de recalage non rigide se concentrent sur l'estimation de la transformation à appliquer. Cependant, peu d'entre eux exploitent la déformation du nuage de points pour identifier le défaut de forme. Pour coupler l'étape de recalage avec l'identification du défaut de forme et permettre ainsi de réduire le temps de post-traitement des données, dans la suite de ce manuscrit le recalage ICP non rigide fera référence à la méthode proposée dans [Thiébaud et al., 2018]. Cet algorithme étant exploité à plusieurs reprises au cours de ces travaux, le fonctionnement de celui-ci et l'analyse générale des résultats de sortie sont présentés dans l'annexe A.

Afin d'identifier le défaut de forme du panneau, un algorithme ICP non rigide est appliqué sur le maillage issu de la mesure ATOS Core. Le maillage nominal est alors recalé et déformé pour minimiser les écarts selon la normale locale. Au vu de la densité de points et de l'importance du défaut de forme, l'appariement des deux nuages se fait en liant chaque sommet du maillage nominal avec le barycentre des 5 plus proches voisins appartenant au nuage de mesure et contenu dans un cylindre d'axe la normale locale du maillage, de rayon 3 mm et de hauteur 40 mm.

Une fois un premier appariement réalisé, il est possible d'obtenir les distances entre les sommets du maillage nominal et les barycentres associés au maillage de mesure. Ces distances peuvent alors être projetées sur les normales locales du maillage afin d'obtenir les écarts de forme entre le modèle nominal et la pièce mesurée. Ces écarts initiaux sont présentés sur la figure 1.16. Puisque le maillage de mesure a été détourné au niveau des cadres et des lices, certains sommets du maillage nominal ne peuvent pas respecter le critère d'appariement. Ainsi, il est cohérent de trouver des zones évidées dans la figure 1.16(a) au niveau de ces renforts.

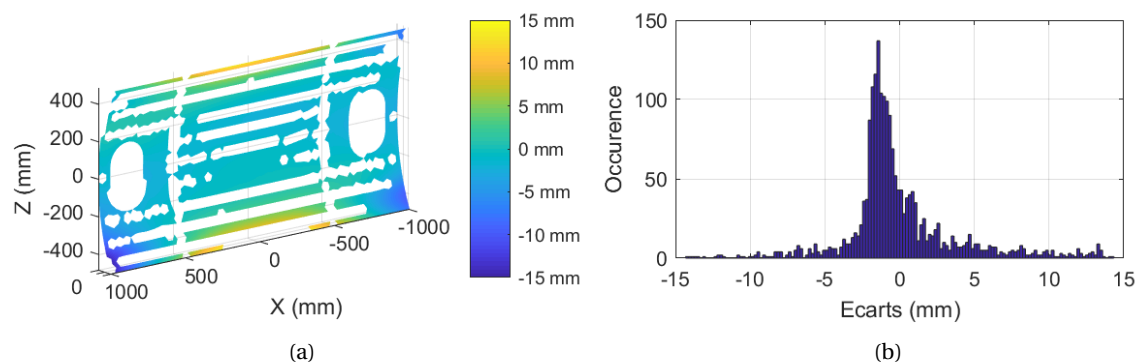


FIGURE 1.16 – Écarts initiaux entre le maillage nominal et le maillage de mesure ATOS Core

Sur la figure 1.16, les écarts initiaux sont compris entre -15 mm et $+15$ mm, notamment au niveau des coins du panneau et au milieu des bords supérieurs et inférieurs. À partir de ces écarts, il est possible de déterminer la décomposition modale permettant d'approcher au mieux cette cartographie initiale. La figure 1.17 présente le défaut de forme retrouvé par ICP non rigide ainsi que la décomposition modale associée. Pour cette application, étant donné que la géométrie nominale comporte 2 invariants, seuls 4 corps rigides ont été utilisés dans le recalage rigide (la rotation et la translation selon l'axe du cylindre ont été retirées du calcul).

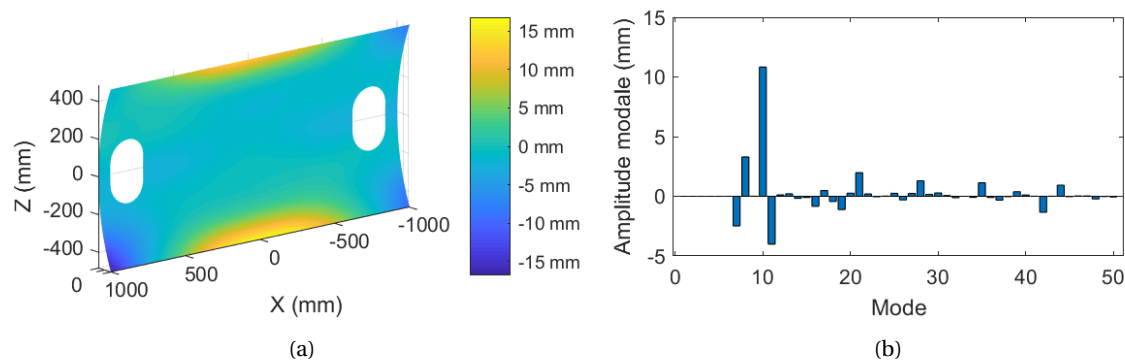


FIGURE 1.17 – Défaut de forme et participations modales identifiés par ICP non rigide.

Le défaut de forme ainsi retrouvé varie alors entre approximativement -15 mm et $+15$ mm et semble cohérent avec la cartographie d'écart présentée à la figure 1.16. Pour vérifier la pertinence de ce résultat, il peut alors être intéressant d'analyser les écarts résiduels afin de vérifier que ces derniers correspondent uniquement à des écarts haute fréquence. La figure 1.18 présente donc les écarts résiduels après recalage non rigide.

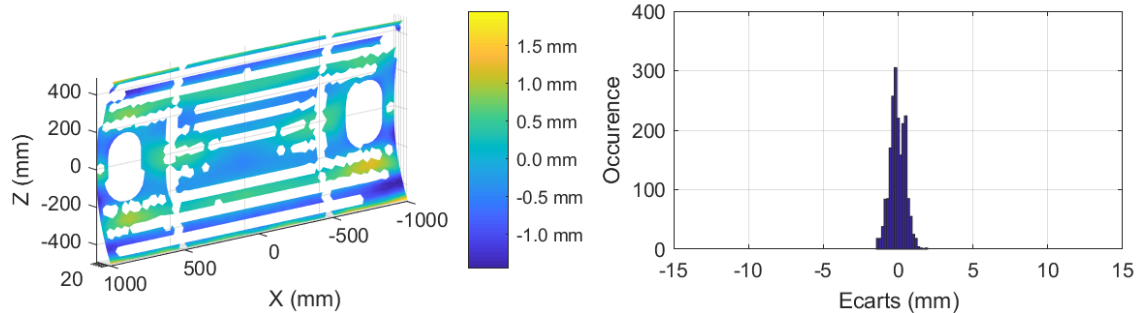


FIGURE 1.18 – Écarts résiduels après ICP non rigide.

Sur la figure 1.18, les écarts résiduels après recalage ICP non rigide varient entre -1.4 mm et $+1.9$ mm. Il est également intéressant de noter que ces écarts sont situés dans des parties très locales de la pièce. Ce type de résidu indique alors la présence d'une légère bosse locale ne pouvant être représentée avec seulement 50 modes. En revanche, la majeure partie du défaut semble être captée et les écarts hautes fréquences sont filtrés grâce à l'utilisation de la base modale.

6.4 Bilan sur la mesure

Grâce au couplage de la photogrammétrie de cibles TRITOP et de la mesure par lumière structurée ATOS Core, une mesure dense du panneau a pu être réalisée et une identification du défaut de forme de ce dernier a été estimée.

Ainsi à l'heure actuelle, il est possible de mesurer le défaut de forme des pièces de grandes dimensions. Néanmoins pour obtenir ces informations, plusieurs heures de travail préalables ont été nécessaires :

- **Pastillage du panneau** : il a fallu environ 2 heures pour disposer l'ensemble des croix d'étalement, les barres étalons ainsi que les 241 cibles non codées sur l'ensemble de la peau de la pièce. Dans un contexte industriel, il faudrait également retirer l'ensemble de ces éléments après mesure, rajoutant ainsi un temps additionnel non pris en compte ici ;
- **Prise de vue TRITOP** : puisque la solution TRITOP nécessite plusieurs dizaines de prises de vues, la réalisation de 40 photographies avec des angles variés a nécessité approximativement 30 minutes ;
- **Mesure par projection de franges ATOS Core** : avant de réaliser la mesure avec le système ATOS Core, ce dernier a dû être allumé 20 minutes pour monter en chauffe et se stabiliser thermiquement. Une fois l'ensemble à température de travail, 88 patchs de mesure ont dû être obtenus. Pour chacun d'entre eux, le capteur devait être déplacé et orienté vers la

zone étudiée, puis le capteur réalisait 3 mesures en faisant varier le temps d'exposition des systèmes optiques pour s'adapter aux variations de brillance et de contraste de la pièce. L'ensemble de ces mesures a été obtenu en approximativement 2 heures. L'utilisation d'un capteur avec une fenêtre de mesure plus importante (il est possible d'avoir des fenêtres de mesure de l'ordre de 1 m^2) permettrait de réduire ce temps de mesure. Néanmoins le temps de chauffe incompressible et les problématiques de visibilité ne permettraient pas une réduction d'un facteur aussi important;

- **Traitement des données :** Une fois la mesure ATOS effectuée, un premier traitement propre au logiciel GOM Inspect a dû être réalisé pour filtrer et lisser le maillage de mesure. Pour traiter les 19 millions de points, il a donc fallu 20 minutes puis quelques minutes pour le décimer. Enfin le détourage manuel des cadres et des lices a pris environ 2 heures. En revanche le recalage ICP non rigide a lui été quasiment immédiat (de l'ordre de la dizaine de secondes).

Bien que l'obtention du défaut de forme de la pièce soit réalisable actuellement, elle nécessite environ 7 heures de travail préalable dont 5 qui immobilisent complètement la pièce sur la chaîne de production. Cette solution semble difficilement envisageable dans un contexte industriel, c'est pourquoi, il est donc envisagé dans ces travaux de mettre au point un système de mesure de défauts de forme adapté aux contraintes induites par les pièces de grandes dimensions.

7 Problématique générale

L'objectif de ces travaux de thèse consiste à développer un système de mesure de défaut de forme permettant l'inspection de composants aéronautiques. Ces travaux s'inscrivent plus largement dans le contexte de la métrologie de pièces de grandes dimensions. De par leur taille, ces pièces induisent de nombreuses contraintes lors de la phase d'inspection auxquelles doit répondre notre système de mesure. Au cours de ce chapitre, nous avons mis en évidence diverses difficultés et contraintes pour la mise en oeuvre d'un système de mesure pertinent pour l'identification du défaut de forme pour des pièces de grandes dimensions. Celles-ci amènent à répondre à un ensemble de questions :

- Comment obtenir une information dense à partir de mesures en photogrammétrie?
- Comment limiter le temps de post-traitement des données acquises?
- Comment avoir un artefact d'étalonnage facilement compatible avec des pièces de grandes dimensions?
- Comment lier le repère d'étalonnage avec le repère de définition de la pièce à mesurer?
- Comment définir un ensemble réduit de paramètres pour représenter les défauts de forme d'une surface?

Une comparaison des méthodes d'acquisition de géométrie (partie 2) a conclu sur l'adéquation de la photogrammétrie pour la mesure de pièces de grandes dimensions. En effet, la photogrammétrie dispose d'un volume de mesure suffisant, son temps de mise en oeuvre est faible et elle ne nécessite pas d'environnement contrôlé. Afin de garantir la bonne représentativité de la

géométrie acquise vis-à-vis de la géométrie réelle de la pièce, les techniques de photogrammétrie dense, autrement dit les techniques de corrélation d'images, sont pertinentes pour délivrer une information compatible avec l'identification d'un défaut de forme. De manière plus détaillée, il est envisagé d'appliquer une approche globale de corrélation d'images. À l'instar de [Dubreuil et al., 2016], dans ces travaux le choix sera fait de garder la description de la géométrie de la pièce sous forme d'un maillage, permettant de garantir une bonne représentativité des pièces mêmes complexes. Le principe des approches globales de corrélation sera détaillé dans le chapitre 2.

Pour limiter le nombre d'inconnues dans le problème de mesure de forme par corrélation d'images, une déformation du maillage nominal basée sur un ensemble de champs tridimensionnels doit être considérée. Le problème revient alors à construire ces différents champs 3D pour qu'ils déforment la géométrie nominale de manière cohérente. Pour répondre à cette contrainte, dans ces travaux il est envisagé de construire ces champs tridimensionnels en s'appuyant directement sur une représentation du défaut de forme. Cette approche permet alors d'intégrer l'identification du défaut de forme - classiquement réalisé en phase de post-traitement (après le recalage, voir section 2.2) - directement à la phase de mesure de forme. Ainsi, en déformant le modèle nominal sur une famille de défauts prédéfinis, il est possible de réduire le nombre d'inconnues du problème de mesure de forme tout en réduisant sensiblement le post-traitement des données. Enfin, toujours pour simplifier le post-traitement des données et l'étalonnage du système de stéréocorrélation, un autoétalonnage du système de mesure basé sur le modèle numérique de la pièce est proposé. Cette étape permet alors de coupler l'étalonnage du système de stéréovision et le recalage de la mesure sur le modèle numérique.

Ainsi, afin de répondre au problème d'identification du défaut de forme sur les pièces de grandes dimensions, l'objectif de ces travaux consiste à **mettre au point une méthode de mesure par corrélation d'images globale compatible avec une base de défauts intégrant une phase d'autoétalonnage sur modèle numérique**. Ceci peut se traduire en deux questions de recherche :

- **Comment utiliser une base de défauts prédéfinis en stéréocorrélation ?**
- **Quelle est l'influence d'une erreur d'étalonnage sur la qualité des données acquises ?**

Ainsi, le premier axe de travail de ces travaux consiste à intégrer la représentation modale du défaut de forme lors de la phase de déformation du modèle nominal. L'écriture du problème de correction de forme est développée dans le chapitre 2. Pour s'assurer de la cohérence des résultats obtenus par cette nouvelle écriture, une preuve de concept est réalisée sur un cas d'étude plus simple dont les dimensions sont approximativement de $300 \times 300 \times 20 \text{ mm}^3$. Pour identifier uniquement les limites de cette nouvelle approche, celle-ci s'appuie donc sur un système de stéréovision déjà étalonné. Cette preuve de concept conclut alors sur la pertinence de la mesure de défaut de forme dès lors que l'étalonnage du système de stéréovision est correct.

Naturellement, le deuxième axe de travail consiste à assurer que le système de stéréovision soit correctement étalonné. Ainsi dans le chapitre 3, une étude portant sur l'auto-étalonnage des caméras est réalisée; une réécriture du problème est alors envisagée afin d'améliorer la phase d'étalonnage. Pour cela, les paramètres extrinsèques sont explicités, normés par rapport à leur influence dans l'espace image et optimisés directement avec un schéma d'optimisation régularisé.

Un protocole de validation est ensuite proposé afin de vérifier la cohérence des paramètres extrinsèques obtenus. Enfin, l'auto-étalonnage est qualifié pour 3 mouchetis différents en termes de répétabilité, de sensibilité à la solution initiale et de sensibilité à la forme en entrée. Cette étude permet alors d'extraire un protocole d'étalonnage diminuant la sensibilité à la solution initiale tout en réduisant les incertitudes sur les paramètres extrinsèques.

Bien que les incertitudes sur les paramètres extrinsèques aient été réduites dans le chapitre 3, il est néanmoins essentiel de quantifier leur impact sur la détermination du défaut de forme. En effet, la mesure de défaut de forme s'appuyant sur les résultats d'étalonnage, une incertitude sur les paramètres extrinsèques entraînera une incertitude sur la mesure de défaut de forme. Ainsi dans le chapitre 4, il est envisagé de modéliser ces impacts sous la forme de champs tridimensionnels. Quatre méthodes de triangulation sont alors présentées et comparées afin de calculer les champs 3D les plus adaptés pour représenter l'effet d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de défaut de forme. Une fois les champs tridimensionnels calculés, ces derniers sont employés pour traduire les incertitudes de paramètres extrinsèques en incertitudes tridimensionnelles.

Une fois les différentes méthodes appliquées et validées sur un cas d'étude simple, il est envisagé dans le chapitre 5 de mobiliser l'ensemble de ces approches sur la pièce de grandes dimensions présentée précédemment à la partie 6. Une proposition d'adaptation de la méthode de corrélation d'images est alors envisagée en s'appuyant sur la création de masques 2D dans chacune des photographies afin de prendre en considération les contraintes de visibilité.

Enfin, ce document se terminera par les conclusions dressées par ces travaux et les poursuites envisageables permettant l'application de la méthode de mesure de défauts de forme dans un contexte industriel.

Chapitre 2

Mesure de défauts de forme par stéréocorrélation modale

Sommaire

1	Introduction	37
2	Méthode proposée	39
2.1	Auto-étalonnage	39
2.2	Correction de forme sur base modale	41
2.3	Facteurs influents sur les algorithmes de corrélation	43
3	Application sur un cas d'étude	44
3.1	Configuration expérimentale	44
3.2	Mesure de référence	47
3.3	Résultats de stéréocorrélation sur base modale	49
4	Étude de sensibilité	51
4.1	Influence du mouchetis et de la base	52
4.2	Configuration du système	53
4.3	Défauts de forme influents	57
5	Conclusion	59

Ce chapitre est inspiré d'un article publié en revue [Etievant et al., 2020].

1 Introduction

La géométrie des pièces mécaniques fabriquées diffère de leur description nominale définie numériquement (via des modèles CAO ou EF). En fonction de la nature ou des longueurs d'onde des écarts géométriques, une classification peut être établie pour séparer des défauts de position, d'orientation, de forme, d'ondulation et de rugosité [ISO 4287, 1997]. Ces écarts sont évalués en comparant l'acquisition de la géométrie des pièces avec leur définition nominale. Dans le cadre de la mesure de pièces de forme complexes, les méthodes optiques sont de plus en plus

employées car elles permettent un bon compromis entre vitesse d'acquisition et incertitudes de mesure [Audfray, 2012, Zuquete Guarato, 2013]. Or les données issues des systèmes actuels d'acquisitions sont généralement des nuages de points ou des maillages sous forme brute, imposant des traitements *a posteriori* pour ne conserver que les écarts significatifs par rapport au défaut étudié [Han et al., 2018]. En effet, les données issues des systèmes optiques sont souvent hétérogènes, bruitées et peuvent présenter des lacunes de numérisation lorsque la surface d'intérêt est complexe [Schwenke et al., 2002b]. C'est pourquoi les mesures peuvent devenir complexes et la quantification des défauts devenir un véritable défi. Une seconde difficulté provient du recalage des données d'acquisition avec la définition théorique de la surface d'intérêt. Les méthodes les plus courantes reposent sur l'algorithme "Iterative Closest Point" (ICP) [Besl and McKay, 1992, Zhu et al., 2007] et peuvent induire des erreurs supplémentaires dans la détermination des écarts géométriques [Senin et al., 2013].

Dans ce contexte, afin de réduire le temps de post-traitement et améliorer la qualité des données acquises, il est envisagé de mettre au point une méthode de mesure de défauts de forme adaptée pour les pièces de grandes dimensions. Pour cela, la solution retenue consiste à utiliser un système de stéréovision par caméras permettant une mise en œuvre rapide quelle que soit la taille de la pièce étudiée. Pour obtenir une mesure dense du défaut de forme de la pièce, les données issues du système de stéréovision seront traitées avec des techniques de corrélation d'images globales. Toujours pour faciliter la mise en œuvre, la texturation de la surface mesurée sera réalisée par projection d'un mouchetis à l'aide d'un projecteur haute définition, permettant l'obtention d'une texture fine même sur des pièces de grandes dimensions. Enfin pour améliorer le problème de corrélation d'images tout en facilitant l'analyse des résultats, le système de mesure délivrera la description des écarts géométriques acquis sur une base de défauts prédéfinis.

La stratégie envisagée ici aura l'avantage de fournir des mesures directement exploitables pour la qualification de la pièce mesurée et plus particulièrement pour l'identification des défauts de forme. De plus, comme la méthode proposée s'appuie sur un système de stéréovision par caméras et sur la projection d'un mouchetis, elle sera adaptée quelle que soit la dimension de la pièce étudiée.

Ce chapitre est donc consacré à la présentation la méthode envisagée et son application sur un cas d'étude afin de valider sa faisabilité. Une partie de la méthode s'appuyant sur des travaux d'auto-étalonnage déjà existants [Beaubier et al., 2014, Dubreuil et al., 2016], l'attention de ce chapitre sera plutôt concentrée sur l'étape novatrice à savoir la déformation du modèle numérique sur base modale.

La première partie (partie 2) présentera le principe général de la méthode proposée ainsi que les facteurs influents sur celle-ci. Dans la partie 3, la stratégie envisagée sera appliquée sur un cas d'étude pour valider le bon fonctionnement de la méthode et comparer les résultats de corrélation d'images avec des résultats obtenus avec un système de mesure industriel. Enfin dans la partie 4, une étude de sensibilité sera menée pour étudier les différents facteurs influents sur la méthode proposée et étudier leur impact sur les résultats de mesure.

2 Méthode proposée

Dans ces travaux, nous souhaitons mesurer le défaut de forme d'une pièce mécanique tout en réduisant le temps lié à la phase de post-traitement des données. Pour ce faire, la stratégie retenue ici consiste à mesurer la pièce à l'aide d'un système de photogrammétrie composé de deux caméras et de traiter ces données avec des techniques de corrélation globale. Cette approche nécessite donc au minimum deux photographies d'une surface texturée prises avec des points de vue différents. De plus, pour limiter la phase de traitement *a posteriori* des données, il est envisagé ici de mettre directement en correspondance les images avec le modèle numérique de la pièce à étudier.

La méthode envisagée ici se décompose alors en deux étapes : une première étape d'auto-étalonnage (méthode développée dans [Beaubier et al., 2014] sur des surfaces NURBS et adaptée à un maillage dans [Dubreuil et al., 2016]) consistant à estimer puis optimiser les matrices de passage permettant de passer de l'espace numérique 3D à chacun des espaces image 2D; la seconde étape consiste quant à elle à actualiser le modèle numérique en le déformant à l'aide d'une base modale pour qu'il soit le plus proche possible de la géométrie réelle de la pièce physique (figure 2.1).

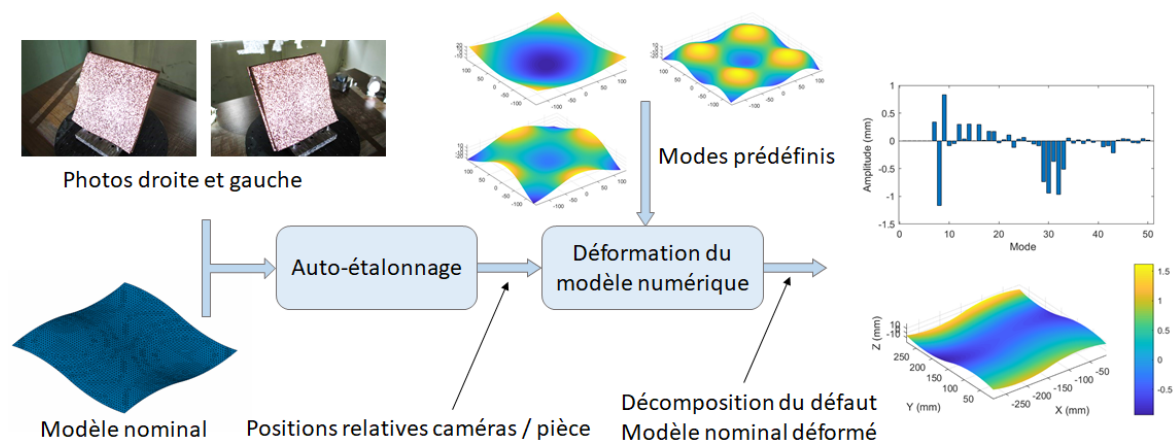


FIGURE 2.1 – Schéma de principe de la méthode envisagée

2.1 Auto-étalonnage

Bien qu'il soit possible d'extraire des informations d'une scène à l'aide de caméras non étalonnées [Hartley, 1993], l'étalonnage est une étape essentielle dès lors que des informations métriques doivent être extraites. Pour un système stéréoscopique, l'étalonnage consiste à déterminer la relation permettant de passer des points 3D de la scène aux pixels 2D des différentes images. En règle générale, l'étalonnage consiste à déterminer la matrice de projection \mathbf{M} permettant de passer du repère 3D au repère image.

Différentes techniques d'étalonnage existent et peuvent être classifiées selon différents critères [Salvi et al., 2002]. Par exemple, elles peuvent être triées selon si l'approche adoptée est ex-

plicité [Faugeras, 1993, Tsai, 1987, Weng et al., 1992] ou implicite [Hall et al., 1982]. Dans le premier cas, on cherche à déterminer les paramètres intrinsèques et extrinsèques qui permettent la construction de la matrice de passage entre le repère monde 3D et les repères images. En revanche dans le second cas, les différentes composantes de la matrice \mathbf{M} sont optimisées indépendamment les unes des autres. Bien que cette dernière approche permette la mesure de forme 3D, elle ne permet pas de remonter aux paramètres physiques de la caméra. Quelle que soit l'approche adoptée, une mire est généralement utilisée et plusieurs paires d'images prises dans différentes orientations sont nécessaires. À ce stade, il n'y a encore aucun lien établi entre le modèle numérique et les données des mesures. Ainsi, il est nécessaire de réaliser une opération de recalage des données sur le modèle pour pouvoir en extraire les défauts de forme de la pièce.

Dans le cadre de la stéréocorrélation, une autre possibilité existe et consiste à utiliser la pièce observée comme cible d'étalonnage. Par conséquent, aucun objet extérieur n'est nécessaire [Faugeras et al., 1992]. Pour effectuer cet auto-étalonnage, la description mathématique de la surface analysée est nécessaire. Cette modélisation de la surface peut être basée sur des surfaces NURBS [Beaubier et al., 2014, Dufour et al., 2016] mais peut également se baser sur des maillages [Dubreuil et al., 2016, Pierré et al., 2017]. Les matrices de projection gauche et droite ($\mathbf{M}^l, \mathbf{M}^r$) sont alors déterminées par recalage global en utilisant la description nominale de la surface. Le principe de minimisation sous-jacent est basé sur la conservation du niveau de gris des images f^l, f^r prises par les caméras gauche et droite. Pour un point de coordonnées 3D \mathbf{X} dans le repère CAO, en notant \mathbf{x}^l et \mathbf{x}^r sa projection sur chacune des images, la conservation de niveau de gris s'écrit

$$f^l(\mathbf{x}^l) = f^r(\mathbf{x}^r) \quad (2.1)$$

En se basant sur ce critère, il est alors possible d'estimer les matrices de transformation ($\mathbf{M}^l, \mathbf{M}^r$) en effectuant une minimisation sur l'ensemble de la région d'intérêt des images (également appelée "Region of interest" et abrégée ROI)

$$(\mathbf{M}^l, \mathbf{M}^r) = \underset{\mu^l, \mu^r}{\operatorname{argmin}} \sum_{\text{ROI}} \left(f^l(\mathbf{x}^l(\mathbf{X}, [\mu^l])) - f^r(\mathbf{x}^r(\mathbf{X}, [\mu^r])) \right)^2 \quad (2.2)$$

De manière analogue aux approches globales en corrélation d'image 2D [Sutton et al., 2009, Hild and Roux, 2012c], un algorithme de Gauss-Newton est utilisé pour réaliser la minimisation précédente. Pour cela, il est nécessaire de linéariser l'expression de la fonctionnelle à minimiser

$$\tau_{\text{lin. etal}} = \sum_{\text{ROI}} \left(f^l(\mathbf{x}^l) - f^r(\mathbf{x}^r) + (\nabla f^l \cdot \delta \mathbf{x}_{\text{etal}}^l)(\mathbf{x}^l) - (\nabla f^r \cdot \delta \mathbf{x}_{\text{etal}}^r)(\mathbf{x}^r) \right)^2 \quad (2.3)$$

avec $\delta \mathbf{x}_{\text{etal}}^p$ défini à partir des différentes composantes m_{jk}^p associées à la matrice de transformation \mathbf{M}^p

$$\delta \mathbf{x}_{\text{etal}}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial m_{jk}^p} dm_{jk}^p \quad (2.4)$$

Ainsi, la minimisation de la fonctionnelle (2.4) revient à résoudre le problème

$$\frac{\partial \tau_{\text{lin. etal}}}{\partial m_{jk}^p} = 0 \quad (2.5)$$

Cela revient alors à résoudre un problème linéaire pour déterminer la correction dm_{jk}^p à apporter à la composante (j, k) de la matrice de transformation \mathbf{M}^p . Le problème linéaire ainsi obtenu s'écrit alors sous la forme

$$\mathbf{H}_{\text{etal}} \cdot \begin{bmatrix} dm_{jk}^l \\ dm_{jk}^r \end{bmatrix} = \mathbf{b}_{\text{etal}} \quad (2.6)$$

avec

$$\mathbf{H}_{\text{etal}} = \sum_{\text{ROI}} \left[\nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial m_{jk}^l} - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial m_{jk}^r} \right]^T \left[\nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial m_{jk}^l} - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial m_{jk}^r} \right] \quad (2.7)$$

$$\mathbf{b}_{\text{etal}} = \sum_{\text{ROI}} [f^l - f^r]^T \left[\nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial m_{jk}^l} - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial m_{jk}^r} \right] \quad (2.8)$$

Ainsi à chaque itération, une nouvelle correction est apportée aux matrices de transformation \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r , modifiant ainsi les coordonnées des points projetés \mathbf{x}^l et \mathbf{x}^r . Ce procédé itératif est suivi jusqu'à ce que les corrections dm_{jk}^p deviennent suffisamment faibles ($\|\mathbf{d}\mathbf{m}^p\|_{\infty} < \epsilon_{\text{etal}}$) ou que les corrections ne fassent plus suffisamment diminuer le résidu de corrélation d'images (défini par l'erreur moyenne quadratique associée aux différences de niveaux de gris $(f^l(\mathbf{x}^l) - f^r(\mathbf{x}^r))$).

À la fin de l'étape d'auto-étalonnage, la transformation permettant de passer du repère CAO au repère associé à chacun des plans images est alors connue.

2.2 Correction de forme sur base modale

Une fois les composantes des matrices de transformation ($\mathbf{M}^l, \mathbf{M}^r$) déterminées, celles-ci sont fixées et ce sont les positions 3D des points de la surface qui seront modifiées pour minimiser un résidu de corrélation. Dans l'approche proposée ici, la variation des positions de ces points se fait en utilisant une base modale, permettant un nombre limité d'inconnues et un post-traitement simplifié des résultats. En notant λ_i les amplitudes modales associées aux modes \mathbf{q}_i et \mathbf{X}_0 les coordonnées 3D des points de la surface nominale, il vient

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \sum_{i=1}^N \mathbf{q}_i \lambda_i \quad (2.9)$$

où \mathbf{X} correspond à la géométrie estimée par déformation modale du modèle nominal.

De manière analogue à l'auto-étalonnage, les amplitudes modales λ_i sont déterminées de sorte à minimiser le résidu de stéréocorrélation sur l'ensemble de la région d'intérêt, *i.e.* minimiser la différence des niveaux de gris des points de la surface d'étude projetés sur les deux images

$$\lambda = \underset{\nu}{\operatorname{argmin}} \sum_{\text{ROI}} \left(f^l(\mathbf{x}^l(X_0, Y_0, Z_0, \nu)) - f^r(\mathbf{x}^r(X_0, Y_0, Z_0, \nu)) \right)^2 \quad (2.10)$$

Tout comme pour l'étape d'auto-étalonnage, un algorithme de Gauss-Newton est utilisé pour réaliser la minimisation précédente. À nouveau, il est nécessaire de linéariser l'expression précédente

$$\tau_{lin} = \sum_{\text{ROI}} \left(f^l(\mathbf{x}^l) - f^r(\mathbf{x}^r) + (\nabla f^l \cdot \delta \mathbf{x}^l)(\mathbf{x}^l) - (\nabla f^r \cdot \delta \mathbf{x}^r)(\mathbf{x}^r) \right)^2 \quad (2.11)$$

avec cette fois-ci :

$$\delta \mathbf{x}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{X}} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \lambda_i} d\lambda_i = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{q}_i d\lambda_i \quad (2.12)$$

Ainsi, la nouvelle fonctionnelle à minimiser s'écrit de manière explicite :

$$\tau_{lin} = \sum_{\text{ROI}} [f^l(\mathbf{x}^l) - f^r(\mathbf{x}^r) + \nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{q}_i d\lambda_i - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{X}} \cdot \mathbf{q}_i d\lambda_i]^2 \quad (2.13)$$

La minimisation de l'équation (2.13) est obtenue lorsque

$$\frac{\tau_{lin}}{d\lambda_j} = 0 \quad (2.14)$$

Cela revient à résoudre un système linéaire de la forme

$$\mathbf{H}^q \cdot d\lambda_j = \mathbf{b}^q \quad (2.15)$$

où \mathbf{H}^q et \mathbf{b}^q correspondent respectivement à la matrice hessienne "modale" et au vecteur résiduel "modal", et $d\lambda_j$ l'ensemble des corrections à appliquer aux participations modales estimées à l'itération précédente ($\lambda_j^n = \lambda_j^{n-1} + d\lambda_j$). En notant \mathbf{Q} la matrice modale regroupant les déplacements aux nœuds de chacun des modes de la base considérée, les expressions de la matrice hessienne modale et du vecteur résiduel modal sont données par

$$\mathbf{H}^q = \sum_{\text{ROI}} \mathbf{Q}^T \cdot \left[\nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{X}} - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{X}} \right]^T \left[\nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{X}} - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{X}} \right] \cdot \mathbf{Q} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{b}^q = \sum_{\text{ROI}} [f^l - f^r]^T \left[\nabla f^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{X}} - \nabla f^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{X}} \right] \cdot \mathbf{Q} \quad (2.17)$$

Ce procédé itératif est suivi jusqu'à ce que les corrections $d\lambda$ deviennent suffisamment faibles ($\|d\lambda_j\|_\infty < \epsilon$) ou que les corrections $d\lambda$ ne fassent plus suffisamment décroître le résidu de corrélation.

Une fois que l'algorithme de déformation du modèle numérique a convergé, l'ensemble des amplitudes modales λ estimées par corrélation d'images permettent d'estimer la projection sur la base retenue \mathbf{Q} de l'écart entre le modèle numérique et la pièce mesurée.

2.3 Facteurs influents sur les algorithmes de corrélation

Que ce soit pour l'algorithme d'auto-étalonnage ou pour la correction de la forme sur base modale, la stratégie envisagée consiste à minimiser une fonctionnelle associée à la conservation de niveaux de gris selon un critère des moindres carrés.

Dans les deux cas, cela revient à résoudre un système linéaire :

$$\mathbf{H}_{\text{etal}} \cdot \begin{bmatrix} dm_{jk}^l \\ dm_{jk}^r \end{bmatrix} = \mathbf{b}_{\text{etal}}$$

$$\mathbf{H}^q \cdot d\lambda_j = \mathbf{b}^q$$

Au vu de l'expression analytique des matrices \mathbf{H}_{etal} et \mathbf{H}^q , celles-ci seront désignées par le terme "matrice hessienne" dans la suite de ce rapport. Puisque la résolution de ces systèmes linéaires est réalisée numériquement, il faut veiller à ce que ces matrices hessiennes soient correctement conditionnées. Or, ces matrices dépendent de différents facteurs :

- les termes ∇f^l et ∇f^r , correspondant aux gradients des fonctions de niveaux de gris et dépendant - entre autres - du mouchetis utilisé et de l'éclairage de la scène. La modification de ces termes est complexe lorsque la texturation de la surface est réalisée par peinture, en revanche si le mouchetis est projeté, ces termes peuvent être modifiés plus aisément;
- pour le problème d'auto-étalonnage, la matrice hessienne associée dépend des paramètres $\frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial m_{jk}^l}$ et $\frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial m_{jk}^r}$. Ces termes-ci caractérisent la variation de projection associée à une variation des matrices de transformation. Ils dépendent notamment de la géométrie 3D du modèle numérique retenu \mathbf{X} ;
- dans le cadre de la déformation du modèle numérique, la matrice hessienne \mathbf{H}^q dépend de $\frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{X}}$ et $\frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{X}}$. Ces termes caractérisent la relation entre les points 3D \mathbf{X} et les points 2D \mathbf{x}^p , et sont donc dépendants des matrices de transformation \mathbf{M}^p . Or ces matrices dépendent des paramètres intrinsèques des caméras, mais également des paramètres extrinsèques. Ainsi, pour une caméra donnée (et donc pour des valeurs de paramètres intrinsèques fixés), ce terme-ci sera dépendant de la configuration de mesure, autrement dit de la position et de l'orientation des caméras par rapport à la pièce.
- enfin, toujours dans le cadre de la déformation du modèle numérique, le problème linéaire dépend du terme \mathbf{Q} correspondant à la matrice modale regroupant les déplacements aux nœuds de chacun des modes de la base considérée.

Ainsi le mouchetis, le modèle numérique employé, la configuration de mesure et la base modale retenue seront des éléments importants qui conditionneront la bonne résolution du système linéaire lors de l'auto-étalonnage ou de la mesure de défaut de forme. Pour illustrer l'impact de ces différents paramètres, une analyse de sensibilité sera menée dans la partie 4.

3 Application sur un cas d'étude

La méthode envisagée étant basée sur des techniques de photogrammétrie, elle est applicable quelles que soient les dimensions de la pièce à mesurer. De plus, elle permet d'obtenir la décomposition du défaut de forme de manière compacte (quelques amplitudes modales). Ainsi, il est préférable d'appliquer cette méthode sur des pièces de grandes dimensions pour lesquelles la détermination du défaut de forme avec des systèmes classiques peut être complexe et exigeante en ressources informatiques. Cependant, pour valider la méthode proposée et la comparer à un système industriel de mesure, celle-ci sera appliquée sur une pièce de moyennes dimensions.

3.1 Configuration expérimentale

Le modèle numérique de la pièce - constitué de 4 carreaux de Bézier raccordés en courbure - a été obtenu sur le logiciel CATIA. La surface ainsi créée mesurait 290 mm de côté et sa profondeur variait entre +10 mm et -10 mm par rapport au plan moyen. Pour éviter des problèmes d'effet de bords lors de la mesure, la surface d'intérêt a été délimitée en laissant une bande de 10 mm sur l'extérieur (voir figure 2.2(a)). Une fois relimitée, la surface nominale a été discrétisée à l'aide d'un maillage composé d'éléments triangulaires T3 avec un pas maximal de 3 mm et une flèche maximale de 0.5 mm (voir figure 2.2(b)).

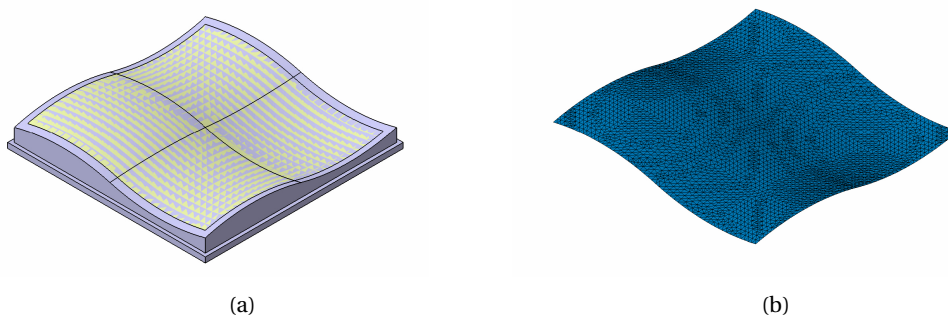


FIGURE 2.2 – Surface retenue (a) et maillage associé (b)

La base de défaut retenue ici était constituée des 50 premiers modes propres du maillage (solutions éléments finis) projetés selon la normale locale et normés en amplitude. Puisque la base modale employée à une influence lors de la déformation du modèle numérique (l'expression de \mathbf{H}^q dépend de \mathbf{Q} , voir équation (2.16)), deux ensembles de champs de déplacements sont considérés ici. Tous deux sont associés aux modes libres de vibrations calculés avec le logiciel de CAO Catia : la première base est directement issue du logiciel, la seconde est construite en projetant la

première base selon la normale locale à la surface. Ce choix de projection permet alors de considérer uniquement les déplacements induits par un défaut de forme.

$$\text{Base 1 : } q_i \qquad \text{Base 2 : } (q_i \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}$$

où \mathbf{n} correspond au vecteur unitaire normal à la surface au point considéré, et q_i le i -ème mode libre de vibration. Ces deux bases sont ensuite normées en amplitude de sorte que le déplacement maximum associé à chaque mode soit unitaire (permettant une lecture plus aisée des amplitudes modales). À titre d'exemple, trois différents modes sont présentés à la figure 2.3.

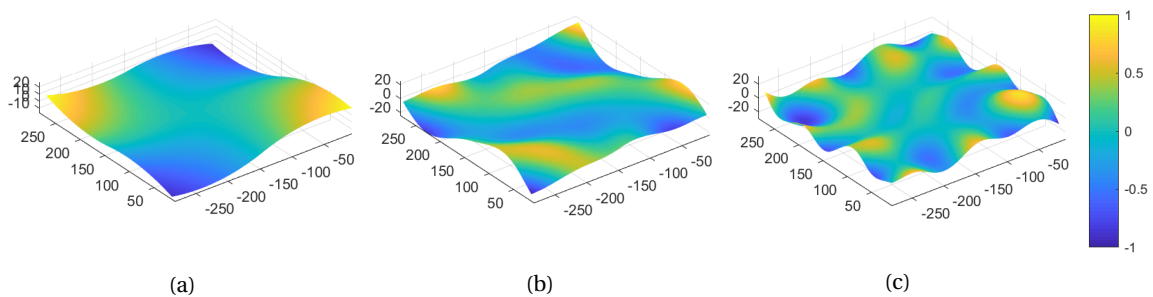


FIGURE 2.3 – Exemples de modes unitaires de la base projetée : mode 7 (a), mode 30 (b) et mode 49 (c)

La pièce réelle a été usinée dans un parallélépipède de résine polyuréthane à l'aide d'un centre d'usinage 3 axes. De par la faible rigidité de la pièce, les efforts de serrage durant l'opération d'usinage ont provoqué des déformations relativement importantes. Ces déformations expliqueront donc en grande partie le défaut de forme de la pièce.

Concernant les caractéristiques de l'installation optique, l'ensemble des informations est regroupé dans le tableau 2.1.

Caméras	CANON EOS 7D
Définition	5184 × 3456 pixels (images couleur)
Filtre couleur	Bayer
Rendu de niveaux de gris	14 bits
Lentille	CANON EF 20 mm
Ouverture	$f/2.8$
Champ de vision	530 × 400 mm ²
Échelle de l'image	100 μm/pixel
Angle stéréoscopique	50°
Distance pièce/caméras	600 mm
Vitesse d'acquisition des images	1 – 2 fps
Technique de texturation	Mouchetis projeté (voir figure 2.4(a) et le texte)
Taille du motif	3 pixels (plan projecteur) 0.5 – 0.8 mm (sur la pièce) 5 – 8 pixels (plan caméra)

TABEAU 2.1 – Information du matériel optique utilisé

Le système optique des caméras employées n'étant pas parfait, le défaut d'alignement et d'orientation des lentilles peut entraîner des aberrations sur les photographies. Pour éviter que celles-ci ne viennent perturber l'algorithme, les aberrations optiques des images seront corrigées. Pour cela, les paramètres liés aux aberrations optiques des caméras ont été estimés (modèle à 5 paramètres [Brown, 1971]) via la *toolbox* "Camera Calibration" fournie par la version R2017b de Matlab. Dix prises de vue d'une mire d'étalonnage plane ont été utilisées pour chaque appareil, donnant accès aux paramètres k_1 , k_2 , k_3 , t_1 , t_2 et l'estimation de la non orthogonalité des axes u et v (voir partie 3.2.2 du chapitre 1). Les valeurs de ces paramètres sont données dans le tableau 2.2. Après estimation de ceux-ci, les déplacements induits par les aberrations optiques étaient inférieurs à 25 pixels pour la région d'intérêt.

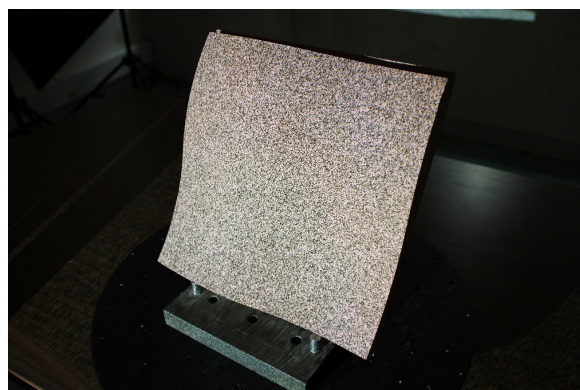
Paramètres estimés	Caméra gauche	Caméra droite
Aberrations radiales		
k_1	-6.04×10^{-2}	-6.48×10^{-2}
k_2	-2.77×10^{-2}	-2.11×10^{-2}
k_3	1.67×10^{-1}	1.58×10^{-1}
Aberrations tangentielles		
t_1	2.00×10^{-3}	2.10×10^{-3}
t_2	7.48×10^{-4}	5.52×10^{-4}

TABLEAU 2.2 – Paramètres liés aux aberrations optiques des caméras

Le matériau de la pièce n'étant pas naturellement texturé, un mouchetis a donc été appliqué sur la surface. Dans le cas présent, un projecteur Sony SXR D 4k a été utilisé pour projeter le motif (figure 2.4). Le motif du mouchetis aléatoire projeté a été généré à partir d'une image d'une définition 4096×2160 pixels avec un rapport blanc/noir de 60 %. Le rayon moyen du motif projeté était d'environ 0.4 mm sur la pièce, ce qui une fois projeté dans chacune des caméras a donné des taches de diamètre moyen approximativement 8 pixels (figure 2.4(b)).



(a)



(b)

FIGURE 2.4 – Système stéréoscopique (a) et projection du mouchetis sur la pièce (b)

Pour chaque caméra, cinq images ont été acquises avec les mêmes conditions expérimentales pour estimer le bruit d'acquisition de celles-ci. En ne considérant que la région d'intérêt et en comparant deux à deux les images acquises avec la même caméra, il est possible d'estimer la fluctuation de niveau de gris associée à chaque pixel. La figure 2.5 présente la fluctuation de niveau de gris pour les caméras gauche et droite (sachant que les plages dynamiques des deux séries d'images sont de 256 niveaux de gris).

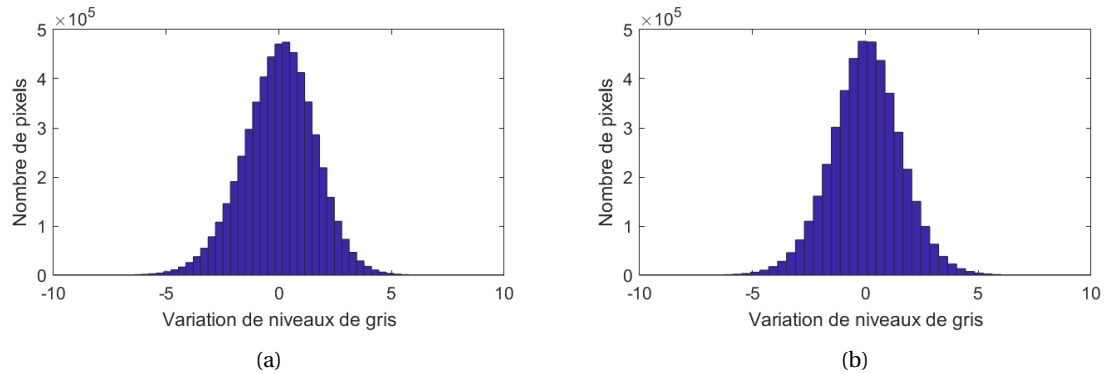


FIGURE 2.5 – Fluctuation de niveaux de gris pour la caméra gauche (a) et droite (b)

Pour chacune des caméras, le bruit possède une moyenne quasi nulle et un écart-type respectivement de 1.36 et 1.58 niveaux de gris. Cette valeur pourra être utilisée par la suite pour déterminer l'incertitude de mesure pour une configuration de mesure donnée [ISO/IEC Guide 99, 2011, ISO/IEC Guide 98-3, 2014].

3.2 Mesure de référence

Après avoir mesuré la pièce à l'aide du système ATOS Core (voir Annexe B), un nuage d'environ 5.9 millions de points a été obtenu. Afin de valider la méthode et de la comparer à ce système de référence, il est essentiel d'estimer le défaut de forme de la pièce. Un algorithme de recalage non rigide [Thiébaud et al., 2018] a été utilisé en considérant $K = 10$ voisins triés dans un cylindre de rayon $R = 4$ mm et de hauteur $h = 1$ mm dont l'axe est confondu avec la normale locale (voir annexe A). Le défaut de forme de la pièce a été estimé avec $N = 50$ modes dans les deux bases. L'application du recalage non rigide a permis d'obtenir le défaut de forme de la pièce ainsi que le résidu associé (lié au bruit d'acquisition et à la complétude de la base considérée). Le défaut de forme peut être représenté soit par un diagramme à barres donnant les valeurs des amplitudes modales (figure 2.6(a-b)), soit par des cartes de déplacement (figure 2.6(c-d)). Les deux cartographies de corrections de forme sont très proches, avec une différence quadratique moyenne (RMS) de $26 \mu\text{m}$, et les amplitudes modales sont également très similaires. Il convient de noter que les mouvements du corps rigide, c'est-à-dire les 6 premiers modes, ne sont pas affichés pour ne mettre en évidence que le défaut de forme.

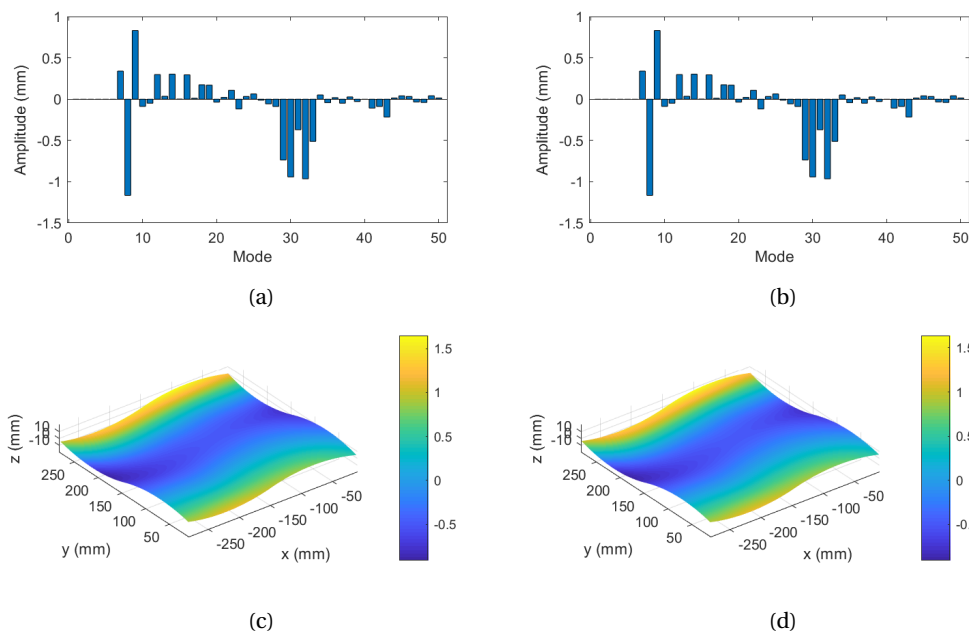


FIGURE 2.6 – (a-b) Amplitudes modales estimées sur le nuage de points ATOS Core avec les deux bases modales. (c-d) Défauts de forme correspondants (exprimés en mm)

Les résidus après recalage non rigide associés à chacune des bases sont donnés à la figure 2.7. Cette figure met en évidence les différences de forme projetées selon la norme locale entre la partie nominale déformée et le nuage de points. Quelle que soit la base, les résultats sont très proches (résidu RMS de $7.6 \mu\text{m}$ pour les deux bases). Dans le cas présent, les résidus associés aux deux bases ne permettent pas de discriminer leur pertinence. Cependant, les résidus de forme entre la géométrie nominale et la mesure sont suffisamment faibles pour affirmer que les deux bases sont capables de décrire les défauts de forme étudiés.

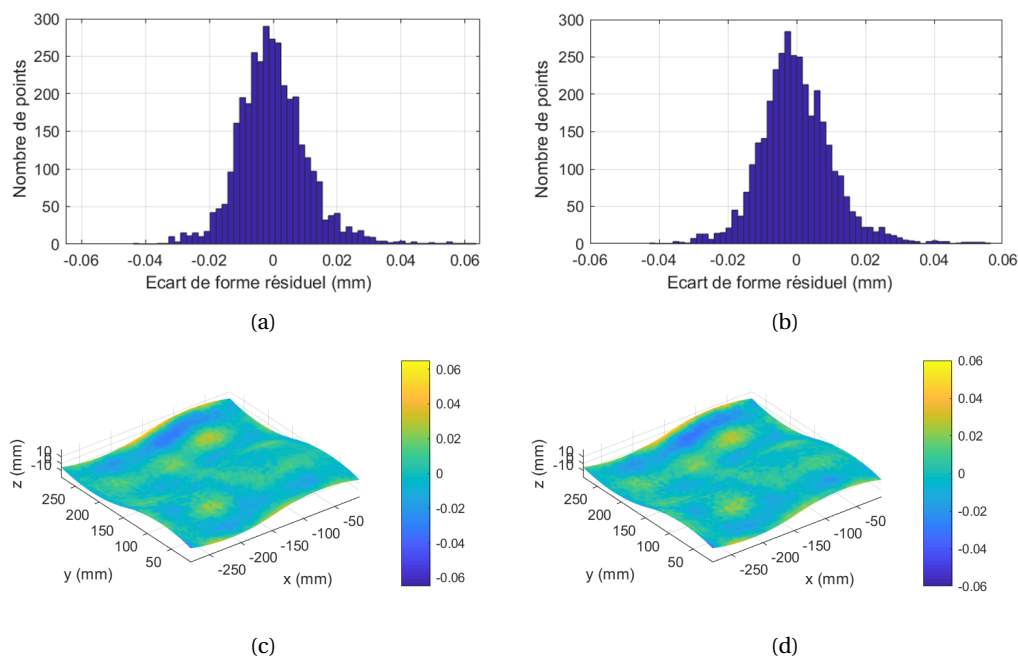


FIGURE 2.7 – (a-b) Histogramme des écarts entre le nuage de points ATOS Core et la forme estimée sur les deux bases modales. (c-d) Cartographie de différence correspondante (exprimées en mm)

3.3 Résultats de stéréocorrélation sur base modale

Dans les analyses suivantes, une première série de résultats est obtenue par stéréocorrélation sur base modale (voir tableau 2.3). Pour suivre la proposition présentée dans [Dubreuil et al., 2016], la deuxième base modale a été sélectionnée (l'autre sera étudiée dans la section 4 à des fins de comparaison).

Logiciel de corrélation	Correli 3.0 [Leclerc et al., 2015]
Filtre des images	Aucun
Taille des éléments	3 mm
Fonctions de forme	Linéaires
Points de Gauss (par éléments)	28
Nombre de modes	44 modes (voir texte)
Interpolation	Linéaire

TABLEAU 2.3 – Paramètres retenus pour la corrélation d'images

Le couple d'images utilisé pour l'étude est présenté sur la figure 2.8. L'étape d'auto-étalonnage peut être réalisée soit avec le modèle nominal de la pièce d'intérêt, soit avec ses dimensions réelles [Beaubier et al., 2014]. Si elle est disponible, cette dernière information est plus souhaitable et permet une convergence plus rapide de l'algorithme.

Dans le cas présent, l'auto-étalonnage a été effectué à l'aide des données ATOS Core, permettant de concentrer cette analyse sur la détermination du défaut de forme uniquement. La stéréocorrélation modale a été effectuée avec les 44 premiers modes pour la base du défaut de forme, c'est-à-dire les modes 7 à 50 (les mouvements du corps rigide n'ont pas été pris en compte).

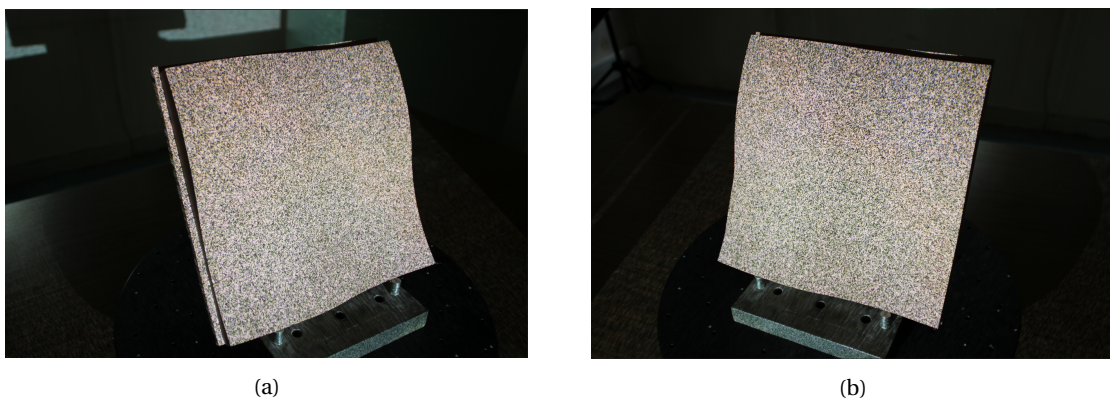


FIGURE 2.8 – Images gauche (a) et droite (b) utilisées pour les calculs de stéréocorrélation

La carte des résidus de corrélation fournit les informations pertinentes sur les résultats de l'optimisation. Un résidu faible et uniforme sur l'ensemble de la région d'intérêt indique que le recalage a réussi et que la base modale sélectionnée était suffisamment complète pour décrire correctement les défauts de forme [Dufour et al., 2016]. Des hétérogénéités dans la carte des résidus peuvent indiquer un écart entre la solution réelle et la solution optimale du fait de l'incomplétude

de la base sélectionnée ou d'une mauvaise solution d'optimisation. Les cartes de résidus avant et après la correction de forme sont reportées dans la figure 2.9.

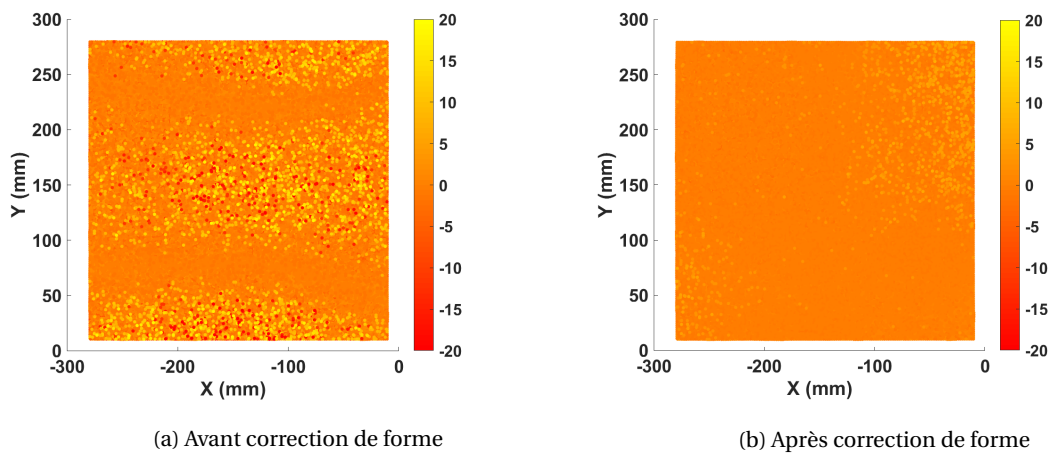


FIGURE 2.9 – Cartographie de résidus (exprimées en % de la dynamique des images) avant et après correction de forme

Avant les corrections de forme, la carte des résidus est hétérogène presque partout. À l'inverse, à la fin de la correction de forme, les résidus sont plus faibles (ils sont passés de 5.2 % de la dynamique des images à 1.5 %), ce qui valide le recalage. A noter cependant que certains niveaux plus élevés sont observés près du coin supérieur droit, ce qui indique que dans cette zone les corrections de forme n'étaient pas totalement satisfaisantes. Ces résidus de corrélation sont plus élevés que le bruit d'acquisition (figure 2.5), ce qui peut indiquer une inadéquation locale de la forme dans cette zone.

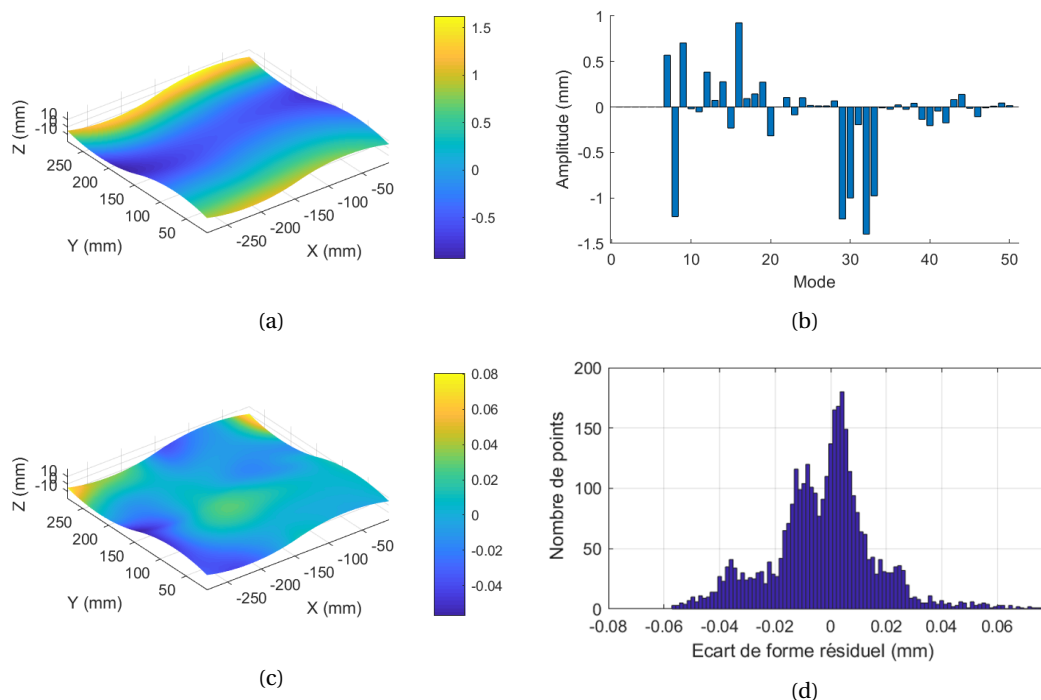


FIGURE 2.10 – (a-b) Résultats de stéréocorrélation sur base modale et (c-d) comparaison avec les résultats ATOS Core (exprimés en mm)

Les corrections de forme sont reportées dans la figure 2.10(a-b). Qualitativement, elles sont proches de celles obtenues avec la méthode de référence (figure 2.6(b-d)). D'un point de vue quantitatif, la carte des différences de forme le long de la normale à la surface est représentée sur la figure 2.10(c) et l'histogramme correspondant sur la figure 2.10(d). La gamme des différences est inférieure à $\pm 80 \mu\text{m}$ et l'écart-type correspondant est égal à $18 \mu\text{m}$. Ces résultats valident la méthode de stéréocorrélation modale. Il est intéressant de noter que l'un des coins où le résidu de forme est élevé est aussi celui où le résidu de corrélation est élevé.

Les temps d'acquisition et de traitement des données du système ATOS Core et de la méthode de stéréocorrélation sont similaires pour la surface étudiée, respectivement 14 et 17 minutes. Cependant, sur des surfaces de grande taille, ce temps restera identique pour la corrélation d'images et pourra être diminué en optimisant le code Matlab, alors qu'il augmentera fortement pour le système ATOS Core. La question suivante à traiter est de savoir si de tels résultats sont reproductibles pour une configuration donnée, mais aussi pour différentes configurations. La réponse est fournie en effectuant une analyse de sensibilité.

4 Étude de sensibilité

Dans cette partie, une analyse de sensibilité est effectuée pour différents paramètres qui peuvent être fixés par l'utilisateur. L'équation (2.14) étant résolue de manière itérative, il est important de s'assurer que la matrice hessienne \mathbf{H}^q est correctement conditionnée. Les valeurs propres correspondantes peuvent être utilisées pour optimiser les tests en fonction de leur sensibilité au bruit d'acquisition [Bertin et al., 2016]. Comme évoqué à la partie 2.3, la matrice hessienne dépend principalement de trois paramètres [Beaubier et al., 2014, Dufour et al., 2015b] :

- ∇f^l et ∇f^r correspondant aux contrastes de niveaux de gris et donc dépendant entre autres du mouchetis projeté;
- $\frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{X}}$ et $\frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{X}}$ caractérisant la variation de projection en pixel induite par des variations 3D. Ces dérivées partielles sont directement liées aux matrices de projection \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r , et donc dépendent des paramètres intrinsèques et extrinsèques de chaque caméra [Faugeras, 1993, Sutton et al., 2009];
- de la matrice modale \mathbf{Q} , qui est directement liée à la base modale retenue.

Ainsi dans cette partie, il est proposé de faire varier ces différents paramètres afin d'analyser l'impact de chacun d'entre eux sur les résultats de mesure. Pour faciliter la lecture, dès lors qu'un paramètre sera modifié, un tableau récapitulatif sera présent en début de section (voir exemple ci-dessous). Ce récapitulatif sous forme de tableau sera retrouvé dans les différents chapitres de ce manuscrit et présentera l'objectif de la section concernée, les éléments sur lesquels repose l'étalement et l'étape de mesure de forme.

Objectif de la partie 4.1	
Déterminer l'influence de la base modale et du mouchetis sur la convergence de l'algorithme	
Étalonnage	
Modèle employé :	Géométrie mesurée par ATOS Core
Paramètres extrinsèques initiaux :	Estimation visuelle
Mesure de forme	
Éléments modifiés :	Base modale Mouchetis
Modèle employé :	Géométrie nominale
Paramètres extrinsèques retenus :	Paramètres optimisés par étalonnage sur le modèle mesuré

4.1 Influence du mouchetis et de la base

La pertinence des deux bases introduites précédemment est maintenant discutée. Comme le montre la partie 3.2, les deux bases ont conduit essentiellement au même résultat lors de l'utilisation du système ATOS Core. Elles ont permis de représenter les défauts de forme avec un résidu RMS inférieur à $7.6 \mu\text{m}$ (voir figure 2.7). Afin d'étudier l'influence de la base modale sur l'identification des défauts de forme, le résidu de corrélation global - qui est le RMS des différences de niveaux de gris normé par la dynamique des images de référence (*i.e.* 255 niveaux de gris) - est étudié. La figure 2.11 montre l'évolution du résidu de corrélation global pendant la phase de correction de la forme en utilisant les deux bases modales. La figure 2.11(a) correspond à un mouchetis grossier (diamètre moyen du motif d'environ 0.8 mm ou approximativement 8 pixels). Les résultats de la figure 2.11(b) sont obtenus avec un mouchetis fin (diamètre moyen d'environ 0.5 mm ou approximativement 5 pixels).

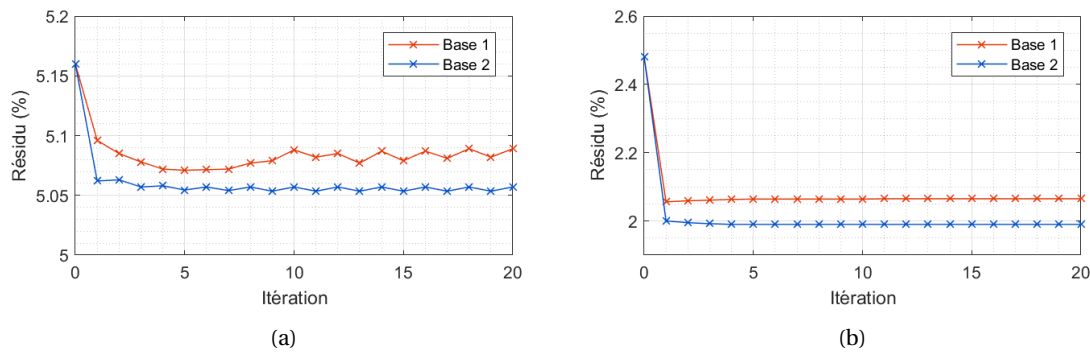


FIGURE 2.11 – Résidu de corrélation pendant l'étape de correction de forme avec les deux bases modales sur un mouchetis grossier (a) et fin (b)

Dans la figure 2.11(a), la première base conduit à des oscillations avec une divergence progressive dans les dernières itérations, alors que pour la deuxième base, la convergence est atteinte de manière régulière. La deuxième base facilite la convergence de l'algorithme, ce qui peut s'expliquer par l'effet régularisant de la projection des déplacements selon la normale locale à la surface [Dubreuil et al., 2016]. De plus, lorsque l'algorithme converge pour les deux bases, les résidus de corrélation sont légèrement plus faibles avec la seconde (figure 2.11(b)). Sur la base de ces deux observations, la seconde base est la plus pertinente et sera conservée pour des investigations fu-

tures.

En étudiant la valeur des résidus dans les différentes situations, dans le cas étudié les meilleurs résultats sont obtenus avec des diamètres de mouchetis de 5 pixels, conformément aux recommandations de la "*International Digital Image Correlation Society (IDICS)*" (*i.e.* taille de mouchetis de 3 – 5 pixels [Jones et al., 2018]).

4.2 Configuration du système

Objectif de la section 4.2	
Étudier l'influence de la configuration des caméras sur la répétabilité des résultats de mesure de défaut de forme	
Étalonnage	
Modèle employé :	Géométrie mesurée par ATOS Core
Paramètres extrinsèques initiaux :	Estimation visuelle
Mesure de forme	
Élément modifié :	Configuration de mesure
Modèle employé :	Géométrie nominale
Paramètres extrinsèques retenus :	Paramètres optimisés via étalonnage sur le modèle mesuré

L'influence de la position de la caméra sur les résultats de la corrélation est étudiée dans la suite. Pour effectuer cette analyse, trois positions de caméra ont été choisies près de la configuration stéréoscopique initialement sélectionnée (figure 2.12). Les résultats présentés dans la section 3 ont été obtenus en utilisant la configuration n°3. Pour ces quatre configurations, cinq images ont été acquises avec chaque caméra afin d'étudier la répétabilité des résultats. Le mouchetis projeté était identique dans les quatre configurations, et la position et l'orientation de la pièce par rapport au projecteur n'ont pas changé.

Pour effectuer les calculs, les 44 premiers modes de défaut de forme de la seconde base ont été utilisés (modes 7 à 50, les 6 premiers étant des modes de corps rigide). Comme il y a 5 images de gauche et 5 images de droite, 25 paires d'images peuvent être analysées (Gauche1-Droite1, Gauche1-Droite2, etc.), ce qui permet de construire un résultat moyen et d'analyser les fluctuations. Les résultats suivants correspondent aux résultats moyens calculés à partir des 25 paires d'images pour chaque configuration. Les cartes de correction de forme moyenne pour chaque configuration (figure 2.13) apparaissent toutes essentiellement identiques et très proches du cas de référence (figure 2.10(a)).

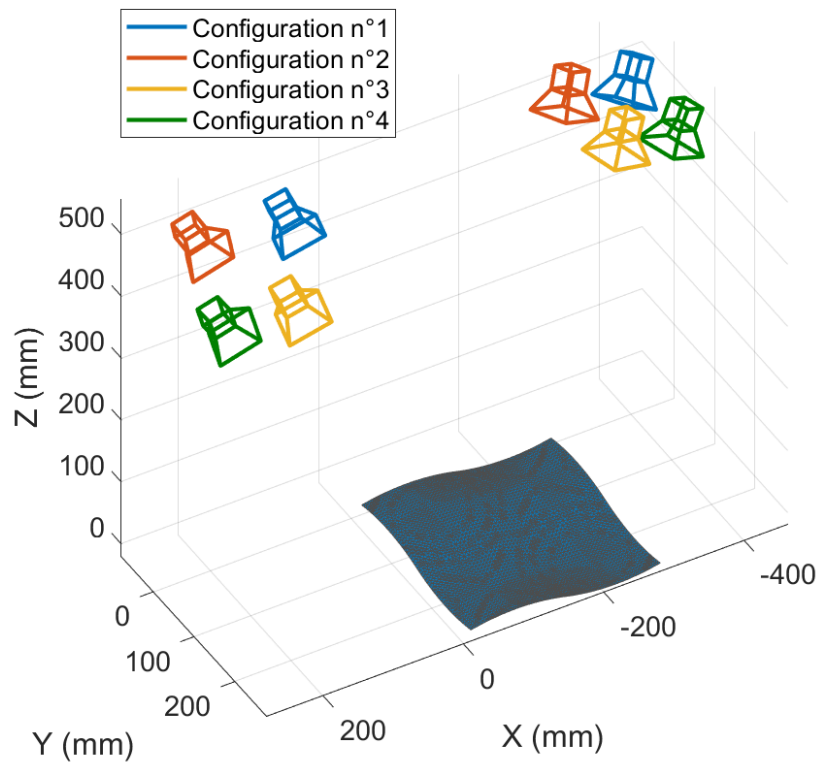


FIGURE 2.12 – Positions relatives des caméras et de la pièce pour les 4 configurations étudiées

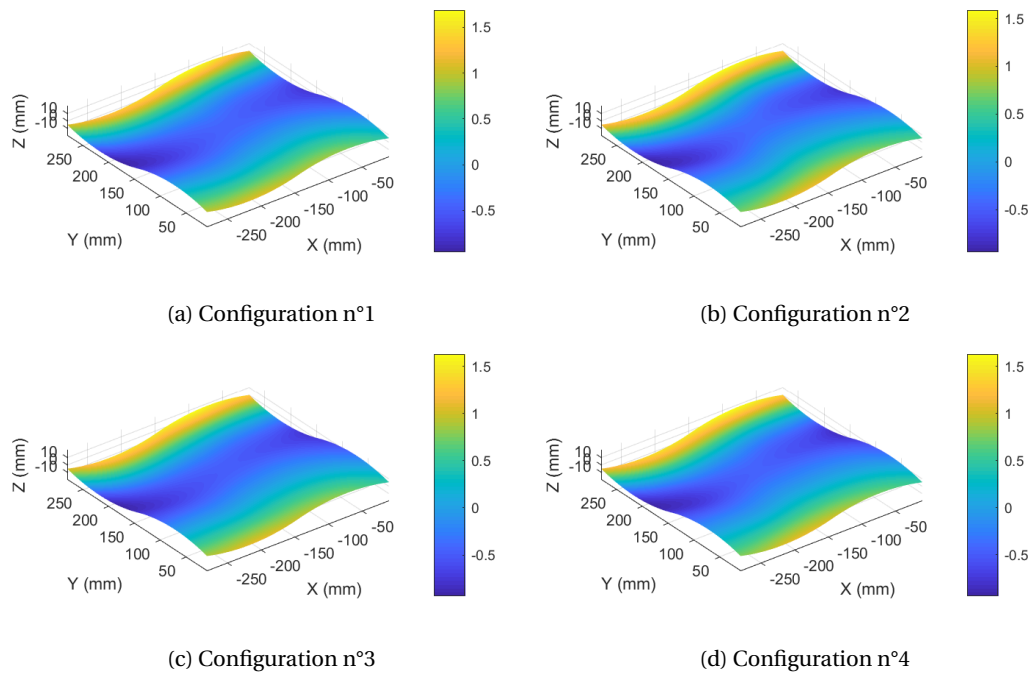


FIGURE 2.13 – Cartographie de correction moyenne (exprimée en mm) pour les quatre configurations

Pour les 25 paires d'images, la valeur moyenne et l'écart-type de chaque amplitude modale

ont été calculés et sont rapportés dans la figure 2.14. En ce qui concerne les amplitudes modales, bien que la distribution soit généralement similaire et proche du cas de référence (figure 2.10(b)), quelques changements mineurs sont observés. Il convient de noter que les barres d'erreur diffèrent d'une configuration à l'autre.

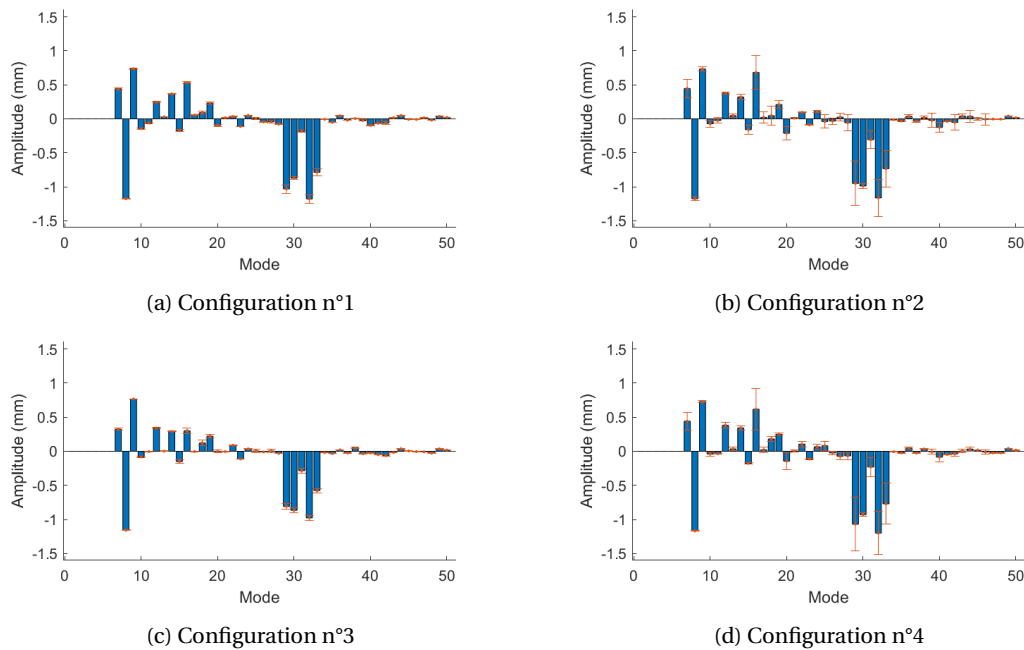


FIGURE 2.14 – Participations modales moyennes pour les quatre configurations

En utilisant la valeur moyenne des amplitudes modales (figure 2.14), la carte de défaut de forme associée dans chaque configuration est comparée à la mesure de référence (*i.e.* avec le système ATOS Core). La figure 2.15 montre que le défaut de forme global est proche de $\pm 160 \mu\text{m}$ de la mesure de référence avec une différence quadratique moyenne variant entre $53 \mu\text{m}$ et $18 \mu\text{m}$ selon la configuration étudiée. Ainsi, la position relative des caméras a un impact significatif sur la détermination du défaut de forme.

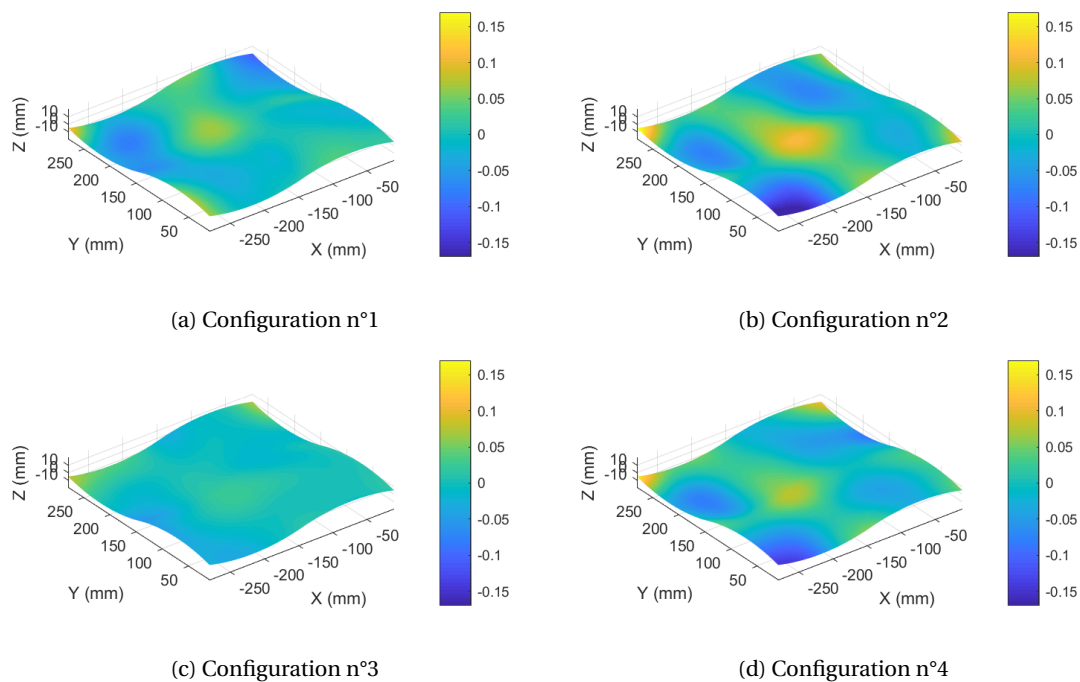


FIGURE 2.15 – Différence entre la cartographie de correction moyenne (figure 2.13) et les résultats ATOS Core (figure 2.6) pour les quatre configurations

La figure 2.14 met également en évidence deux configurations pour lesquelles l'incertitude associée aux participations modales est plus élevée que les autres. En regardant plus spécifiquement les résultats, il est possible de distinguer deux séries différentes d'amplitudes modales qui donnent approximativement la même carte de correction (voir figure 2.16). Cette observation explique l'importante taille de certaines barres d'erreur sur l'amplitude modale.

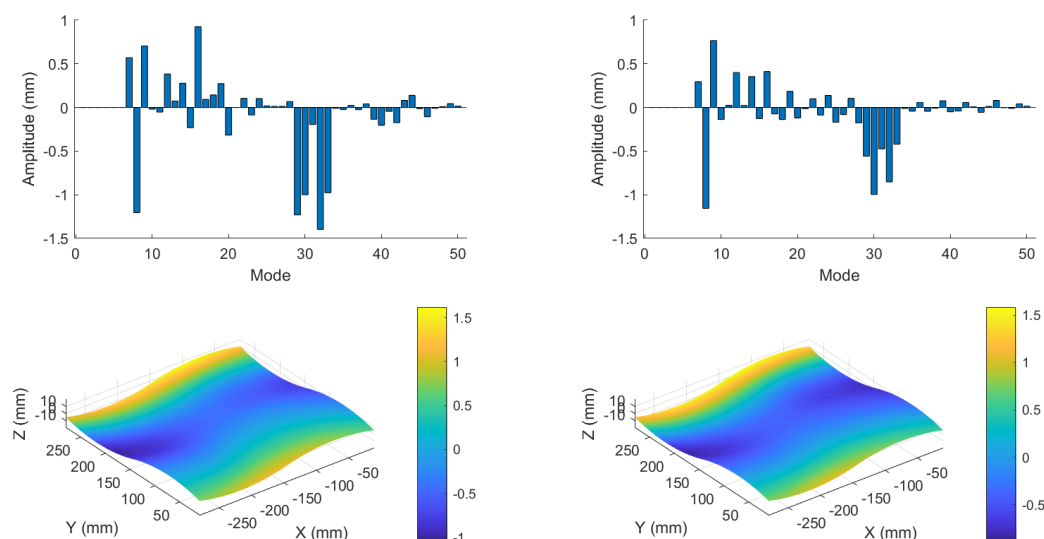


FIGURE 2.16 – Couple de solutions obtenues pour la configuration de mesure 2

Les barres d'erreur appliquées aux amplitudes modales λ_i ne permettent pas d'obtenir visuellement une indication de la répétabilité du défaut de forme lui-même. C'est pourquoi il faut considérer l'écart-type non pas en termes d'amplitudes modales, mais en termes de déplacements le

long de la normale locale à la surface. La figure 2.17 présente l'écart-type du défaut de forme. L'incertitude du défaut de forme varie en fonction de la configuration choisie. L'écart-type moyen est compris entre 17 μm (configuration n°1) et 120 μm (configuration n°2). Ce résultat confirme le fait que la configuration de mesure (et donc les matrices de projection correspondantes \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r) a une influence importante. Un tel résultat appelle également à une optimisation du système de stéréovision.

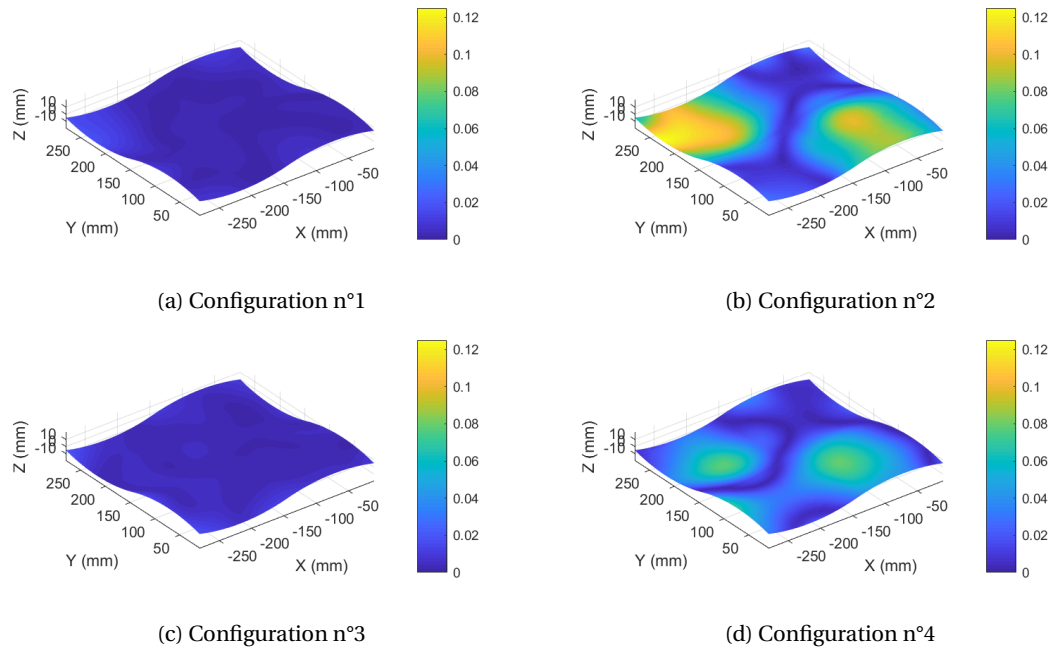
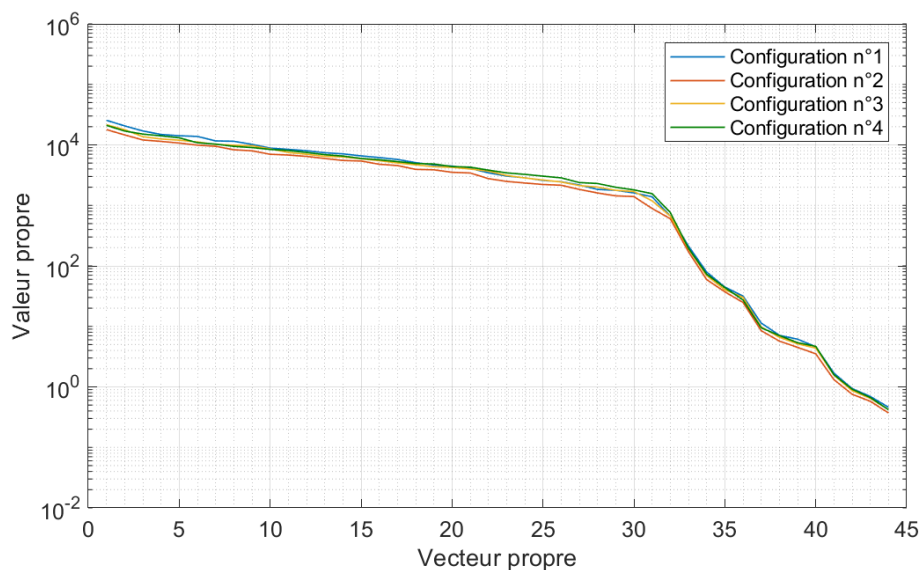


FIGURE 2.17 – Cartographie d'écart-type au noeud (exprimée en mm) associée au défaut de forme

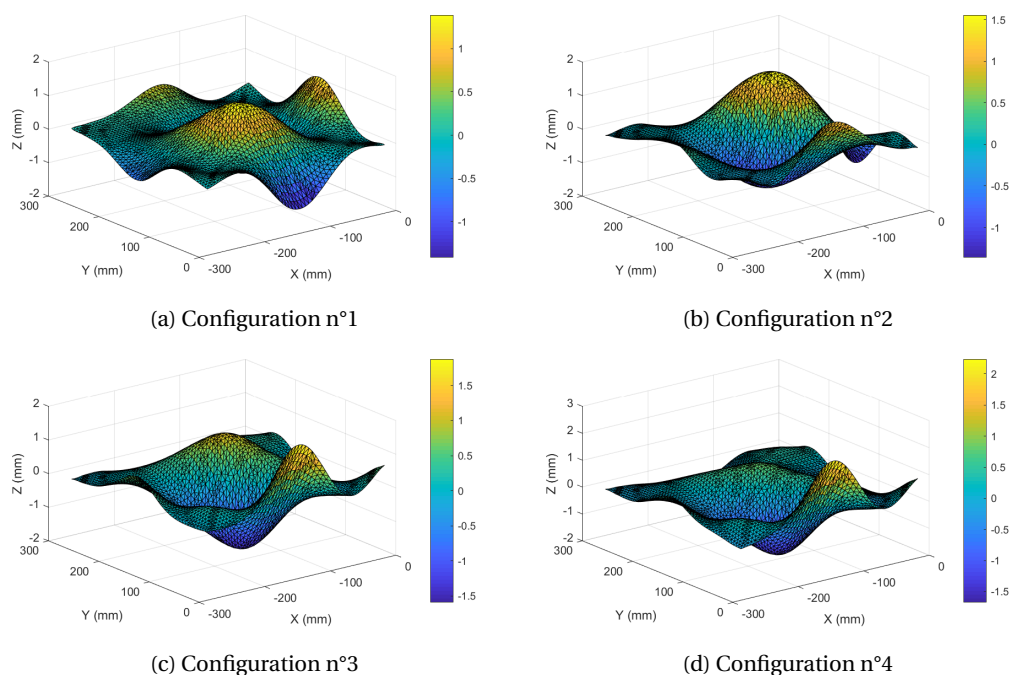
4.3 Défauts de forme influents

Pour les différentes configurations de mesure, il est possible d'étudier la matrice hessienne \mathbf{H}^q . Pour étudier la capacité de la méthode à détecter certains défauts dans une configuration de mesure donnée, il est nécessaire d'analyser les valeurs propres de la matrice hessienne [Bertin et al., 2016]. Une valeur propre élevée définit un mode propre très sensible, c'est-à-dire que son incertitude sera très faible. À l'inverse, une valeur propre faible sera plus impactée par le bruit de l'image.

Une analyse spectrale des matrices hessiennes permet de déterminer l'influence de la configuration de mesure sur la détection de certains défauts. La figure 2.18 présente les spectres associés aux configurations de mesure n°1 à n°4. Sur ce cas d'étude, même si le spectre varie légèrement d'une configuration à l'autre, la tendance générale reste la même. Dans toutes les configurations étudiées, 12 modes sont beaucoup moins influents que les 32 autres. Il convient de noter que, d'après les tendances de ces spectres, si la base considérée contenait trop de modes, le conditionnement se dégraderait davantage et pourrait conduire à des instabilités numériques.

FIGURE 2.18 – Spectre des matrices hessienne \mathbf{H}^q pour les quatre configurations

Pour chaque configuration, il est possible d'étudier la carte de déplacement associée au mode propre le plus sensible. La figure 2.19 montre les cartes de déplacement associées au mode le plus influent (vecteur propre n°1 se référant aux spectres ci-dessus, voir figure 2.18). Les arrêtes du maillage ont été intentionnellement laissés sur ces figures pour mieux percevoir les variations de forme. En se basant sur la figure 2.19, le mode propre le plus influent n'est pas le même selon la configuration de mesure choisie; cependant, il est intéressant de noter que le mode propre le plus influent possède une longueur d'onde assez élevée quelle que soit la configuration étudiée.

FIGURE 2.19 – Mode propre de la matrice hessienne \mathbf{H}^q le plus influent (vecteur propre n°1 sur le spectre, Figure 2.18)

La figure 2.20 présente le mode propre le moins influent pour chacune des configurations de mesure. Celui-ci diffère d'une configuration à l'autre, cependant leur longueur d'onde semble être du même ordre de grandeur.

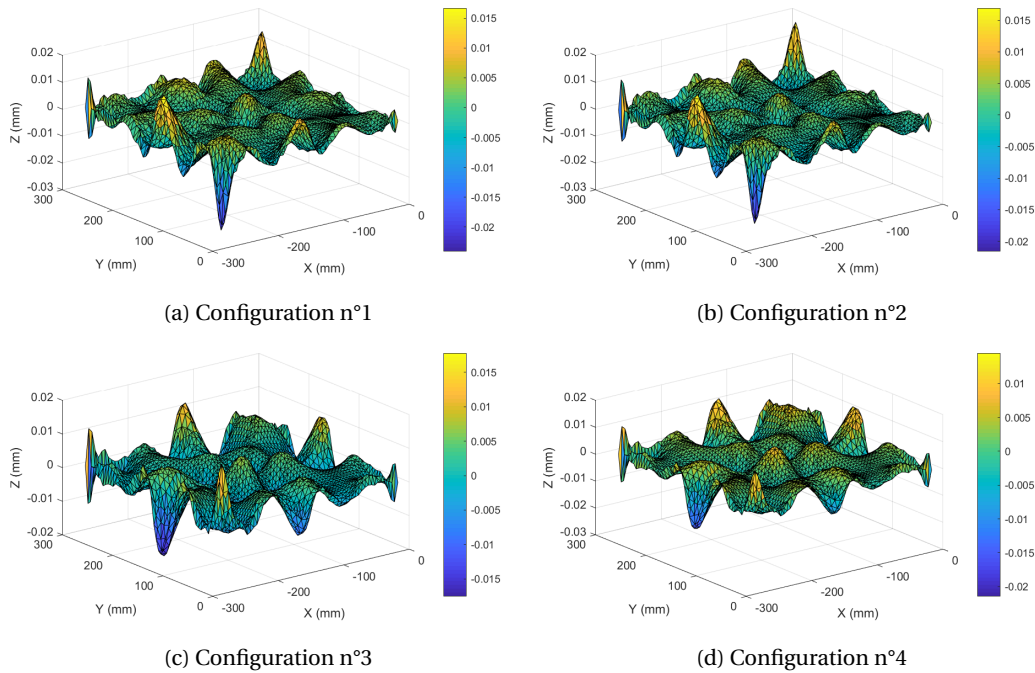


FIGURE 2.20 – Mode propre de la matrice hessienne \mathbf{H}^q le moins influent (vecteur propre n°44 sur le spectre, figure 2.18)

Ainsi, d'après les Figures 2.18, 2.19 et 2.20, les défauts de haute fréquence seront naturellement filtrés par la stéréocorrélation modale tandis que ceux de basse fréquence seront mieux perçus. Cependant, si l'on s'intéresse à la détection de défauts locaux (qui nécessitent l'utilisation de représentations à haute fréquence), il est possible d'exploiter la cartographie de résidu (figure 2.9) pour localiser les zones dans lesquelles la forme calculée diffère de la surface réelle.

5 Conclusion

Dans ce chapitre, une méthode de mesure de défauts de forme par stéréocorrélation globale a été proposée. L'originalité de la méthode réside dans l'utilisation d'une base modale, permettant de représenter le défaut de forme tout en limitant le nombre d'inconnues du problème de corrélation (et donc sa complexité de résolution) et réduisant également la phase de post-traitement des résultats.

Cette approche étant basée sur un système de stéréovision et la texturation de la surface étant réalisée par projection, la mise en œuvre de ce système est rapide et adaptée pour les pièces de grandes dimensions.

Même si la méthode est applicable pour des pièces de grandes dimensions, pour valider la cohérence des résultats obtenus, celle-ci a été appliquée sur une pièce de taille moyenne ($290 \times$

$290 \times 20 \text{ mm}^3$) et les résultats ont été comparés au défaut de forme déterminé par un système de mesure industriel (ATOS Core). Pour éviter tout problème lié à l'étape d'auto-étalonnage et étudier exclusivement les limites de l'étape de mesure de défaut de forme, l'auto-étalonnage a été réalisé en utilisant les mesures ATOS Core de la surface d'intérêt. Dans ces conditions, le défaut de forme mesuré par cette méthode était proche de celui déterminé par le système de référence avec des différences quadratiques moyennes n'excédant pas $53 \mu\text{m}$ pour une amplitude globale du défaut d'environ 2 mm. Ces différences quadratiques peuvent être réduites jusqu'à $18 \mu\text{m}$ selon la configuration de mesure employée.

D'après l'étude de défauts influents menée à la section 2.3, l'algorithme de corrélation sur base modale semble sensible au défaut de basse fréquence mais aura naturellement tendance à filtrer les défauts de haute fréquence. Ainsi, il ne sera pas possible de mesurer des défauts locaux avec cette méthode. En revanche, il sera possible de localiser ceux-ci en s'appuyant sur les cartographies de résidu (voir figure 2.9).

Ainsi, l'identification de défaut de forme semble cohérente lorsque l'auto-étalonnage est réalisé sur la géométrie mesurée de la pièce. Cependant la connaissance à priori de la géométrie réelle de celle-ci n'est généralement pas accessible, c'est pourquoi l'auto-étalonnage s'appuiera classiquement sur la définition théorique de la pièce. Or puisque la géométrie réelle de la pièce diffère de sa définition théorique, l'utilisation du modèle nominal dans l'auto-étalonnage induira un biais pouvant potentiellement perturber la détermination du défaut de forme. Ainsi, le chapitre suivant consistera à étudier l'étape d'auto-étalonnage pour s'assurer que la méconnaissance à priori de la forme en entrée n'impacte que peu les résultats de corrélation d'images.

Chapitre 3

Étude de l'étalonnage

Sommaire

1	Introduction	61
2	Écriture du problème d'étalonnage	62
2.1	Autoétalonnage explicite en stéréocorrélation	63
2.2	Problèmes de conditionnement	65
2.3	Algorithme d'optimisation	69
3	Protocole de validation de l'étalonnage	72
3.1	Recalage des données de mesure en vue d'une comparaison	73
3.2	Obtention des positions et orientations caméras grâce à TRITOP	75
3.3	Application au cas d'étude	78
3.3.1	Acquisition de la géométrie via TRITOP et ATOS Core	78
3.3.2	Recalage des données de corrélation d'images	79
3.3.3	Obtention des positions caméras grâce à TRITOP	80
4	Qualification de l'étalonnage	82
4.1	Répétabilité	84
4.2	Sensibilité de la solution initiale	87
4.3	Sensibilité de la forme en entrée	91
4.3.1	Estimation de l'impact de la forme sur l'autoétalonnage	91
4.3.2	Validation du modèle retenu	93
4.3.3	Sensibilité des paramètres extrinsèques au défaut de forme	96
5	Conclusion	97

1 Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été montré qu'il était possible d'identifier le défaut de forme d'une pièce par corrélation d'images si certaines précautions étaient prises avec l'étape d'étalonnage. En effet, pour éviter toute erreur induite par une mauvaise identification des paramètres de pose, l'algorithme d'autoétalonnage s'est appuyé sur la géométrie mesurée de la pièce. À partir de

cette solution, il est possible d'identifier le défaut de forme de la pièce par corrélation d'images. Les résultats ainsi obtenus sont alors proches de ceux estimés par le système industriel ATOS Core, avec des différences dont l'écart-type varie entre $18 \mu\text{m}$ et $53 \mu\text{m}$ selon la configuration de mesure employée pour une amplitude globale du défaut d'environ 2 mm .

Ainsi lorsque l'étalonnage s'appuie sur un modèle numérique proche de la géométrie réelle de la pièce, les matrices de passage entre les points 3D et les points 2D semblent correctement identifiées, permettant ainsi d'obtenir une estimation cohérente du défaut de forme. En s'appuyant sur une mesure préalable de la pièce, il est donc possible de faire converger l'étalonnage vers la solution recherchée.

En revanche dans le contexte de la mesure des défauts de forme d'une pièce, une mesure préalable n'est généralement pas réalisée; il faut donc que l'étalonnage s'appuie - en dehors de tout autre artefact d'étalonnage possible - sur le modèle nominal de celle-ci. Or puisque la pièce physique présente un défaut de forme, le modèle nominal sera différent de la géométrie réelle de la pièce. Il est donc important de veiller à ce que l'algorithme d'étalonnage puisse converger vers la solution recherchée même lorsque la pièce réelle présente un défaut de forme non négligeable.

L'objectif de ce chapitre consiste donc à étudier et améliorer l'étape d'étalonnage. Il s'agit en particulier de se focaliser sur sa sensibilité vis-à-vis de la forme en entrée de l'algorithme.

Pour ce faire, une adaptation de la stratégie d'étalonnage sera proposée dans la section 2. Il sera alors question d'optimiser explicitement les paramètres extrinsèques (et non plus les composantes des matrices \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r indépendamment), de normaliser ces paramètres extrinsèques par rapport à leur influence dans l'espace image et également de modifier le schéma d'optimisation. Dans la section 3, un protocole de validation sera proposé pour confirmer la validité des résultats du nouveau processus d'étalonnage. Cette validation s'appuiera sur les résultats obtenus via un système industriel et la mise en correspondance de ceux-ci avec les données de corrélation d'images. Les résultats obtenus avec le système industriel seront alors exploités dans la section 4 pour déterminer le protocole le plus adapté pour l'estimation des paramètres de pose du système en faisant notamment varier le mouchetis employé et la géométrie du modèle numérique utilisé.

2 Écriture du problème d'étalonnage

Pour mesurer le défaut de forme d'une pièce avec la méthode proposée dans le chapitre 2, il est nécessaire d'avoir préalablement estimé les transformations permettant de projeter les points 3D \mathbf{X} en points 2D \mathbf{x}^p dans chacune des images. Puisque l'étape de déformation du modèle numérique dépend des résultats d'étalonnage, il est nécessaire de veiller à ce que cette première étape converge correctement vers la solution recherchée.

Usuellement cette étape consiste à déterminer les composantes des matrices de passage permettant de lier le repère 3D (dans ce cas-ci le repère CAO) et les repères 2D associés à chacune des images. Ainsi lorsqu'il s'agit d'étudier la répétabilité et la reproductibilité d'un étalonnage, l'utilisateur devra comparer deux à deux des matrices de passage et extraire les incertitudes associées à

chacune des composantes de ces matrices. Cette comparaison peut alors être laborieuse et complexe puisque les composantes des matrices de passage mêlent simultanément des paramètres intrinsèques et extrinsèques.

Une solution pour se ramener à des ordres de grandeur de référence consiste à extraire les paramètres intrinsèques et extrinsèques à partir des matrices \mathbf{M}^p puis d'analyser les incertitudes associées à chacun de ces paramètres. Ce procédé est certes réalisable [Faugeras, 1987, Hall et al., 1982, Zhang, 2000], cependant des précautions doivent être prises pour conserver les propriétés mathématiques des différents éléments (par exemple, la matrice de rotation doit être orthonormée). De plus, cette nouvelle étape d'extraction des paramètres intrinsèques et extrinsèques peut amener des erreurs d'approximation, notamment lorsque les paramètres d'aberrations radiales des images n'ont pas été correctement estimés et corrigés.

Une autre possibilité consiste à intégrer la décomposition des matrices de passage \mathbf{M}^p non plus a posteriori de l'optimisation mais a priori de l'étape d'étalonnage. Cette étape ne consisterait plus à optimiser les composantes des matrices de passage indépendamment les unes des autres mais directement les paramètres intrinsèques et extrinsèques. Pour cela, il suffit d'explicitement ces matrices en s'appuyant sur un modèle de caméra (voir chapitre 1) pour faire apparaître les différents termes recherchés. Ainsi avec cette approche, le résultat de l'autoétalonnage explicite serait directement les paramètres intrinsèques et extrinsèques, permettant une analyse simplifiée lors de la répétabilité et de la reproductibilité.

En plus de simplifier l'analyse des résultats d'étalonnage, l'écriture explicite du problème permettrait d'obtenir plus aisément la sensibilité de la méthode vis-à-vis de chacun des paramètres. Cette sensibilité pourra alors être exploitée par la suite pour déterminer l'impact des erreurs d'étalonnage sur la mesure de forme (voir chapitre 4).

Enfin, pour obtenir une détermination correcte des paramètres du système (notamment les paramètres intrinsèques), les algorithmes d'étalonnage classiques utilisent généralement une dizaine d'images à minima [Heikkila and Silvén, 1997, Lavest et al., 1999, Zhang, 2000]. Dans notre cas, seules deux photographies sont utilisées, rendant ainsi l'estimation des paramètres intrinsèques complexe et incertaine. C'est pourquoi par la suite, l'estimation des paramètres intrinsèques et des paramètres d'aberrations optiques sera réalisée en amont, permettant de focaliser l'autoétalonnage uniquement sur l'optimisation des paramètres extrinsèques du système.

La section suivante présente donc l'écriture du nouveau problème d'étalonnage par corrélation d'images de manière explicite et les dispositions mises en place pour améliorer la convergence de l'algorithme.

2.1 Autoétalonnage explicite en stéréocorrélation

L'autoétalonnage proposé par Beaubier [Beaubier et al., 2014] repose sur l'optimisation des composantes des matrices de passage \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r indépendamment les unes des autres. Or, en s'appuyant sur le modèle de sténopé, les matrices de passage de chacun des appareils peuvent être explicitées en faisant apparaître les paramètres intrinsèques et extrinsèques (voir chapitre 1).

Dans la méthode d'autoétalonnage envisagée, seules deux photographies sont exploitées. Ce faible nombre de configurations de mesure ne permet donc pas une estimation correcte des paramètres intrinsèques de la caméra [Lavest et al., 1999]. Ces derniers seront donc déterminés en amont; l'autoétalonnage explicite proposé consiste donc à déterminer uniquement les paramètres extrinsèques du système de stéréovision.

En regroupant les paramètres extrinsèques $\alpha, \beta, \gamma, t_1, t_2$ et t_3 dans un même vecteur \mathbf{a} , il est possible de réécrire le problème d'étalonnage de manière explicite afin d'optimiser les paramètres \mathbf{a}^l et \mathbf{a}^r :

$$\left(\mathbf{a}^l, \mathbf{a}^r\right) = \underset{(\hat{\mathbf{a}}^l, \hat{\mathbf{a}}^r)}{\operatorname{arg\,min}} \sum_{\text{ROI}} \left(f^l(\mathbf{x}^l(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{a}}^l)) - f^r(\mathbf{x}^r(\mathbf{X}, \hat{\mathbf{a}}^r))\right)^2 \quad (3.1)$$

Pour obtenir une estimation des paramètres extrinsèques des appareils gauche et droit, un algorithme de Gauss-Newton est utilisé pour minimiser le résidu de corrélation défini précédemment. Pour cela, l'expression précédente est linéarisée :

$$\tau_{lin} = \sum_{\text{ROI}} \left(f^l(\mathbf{x}^l) - f^r(\mathbf{x}^r) + (\nabla f^l \cdot \delta \mathbf{x}^l)(\mathbf{x}^l) - (\nabla f^r \cdot \delta \mathbf{x}^r)(\mathbf{x}^r)\right)^2 \quad (3.2)$$

avec, en adoptant la notation $p = \{l, r\}$:

$$\delta \mathbf{x}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p$$

De manière analogue à la mesure de forme (voir chapitre 2), le problème d'étalonnage se réécrit sous la forme d'un système linéaire. La résolution de ce système permet alors de déterminer la correction $d\mathbf{a}^p$ à apporter à l'estimation courante des paramètres extrinsèques \mathbf{a}^p .

Le problème d'optimisation linéaire sous-jacent peut être relié au problème d'étalonnage implicite en détaillant la variation $d\mathbf{M}^p$ de la matrice $d\mathbf{M}^p$ induite par une modification des paramètres extrinsèques $d\mathbf{a}^p$. La matrice de passage \mathbf{P} permettant de passer d'un problème implicite à un problème explicite s'écrit alors :

$$\left[\mathbf{P}\right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{M}^l}{\partial \mathbf{a}^l} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{M}^r}{\partial \mathbf{a}^r} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Il est alors possible de relier les deux problèmes d'optimisation :

Version implicite :	Version explicite :
$\delta \mathbf{x}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{M}^p} d\mathbf{M}^p$	$\delta \mathbf{x}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{a}^p} = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{M}^p} \frac{\partial \mathbf{M}^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p$
$\left[\mathbf{H}_1\right] \begin{bmatrix} d\mathbf{M}^l \\ d\mathbf{M}^r \end{bmatrix} = \mathbf{b}_1$	$\underbrace{\mathbf{P}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{P}}_{[\mathbf{H}_2]} \begin{bmatrix} d\mathbf{a}^l \\ d\mathbf{a}^r \end{bmatrix} = \underbrace{\mathbf{P}^T \mathbf{b}_1}_{\mathbf{b}_2}$

L'autoétalonnage explicite mène alors à un nouveau problème linéaire $[\mathbf{H}_2] \left[d\mathbf{a} \right] = \left[d\mathbf{b}_2 \right]$.

Le problème d'étalonnage explicite mêlant des translations et des rotations, il est possible que les déplacements 2D induits par la variation des différents paramètres ne soient pas du même ordre de grandeur. Ainsi, la disparité de ces effets peut entraîner un problème mal conditionné. La section suivante consiste donc à mettre en évidence ces problèmes de conditionnement et vise à proposer une solution pour faciliter la résolution du problème de corrélation d'images.

2.2 Problèmes de conditionnement

Contrairement aux translations, les effets induits par les rotations dépendent de la géométrie de la pièce, autrement dit des bras de levier. Le problème d'optimisation explicite mêlant simultanément des rotations et des translations, il est possible que la disparité de ces effets puisse entraîner un mauvais conditionnement du problème de corrélation d'images.

Pour illustrer ce problème, l'algorithme d'autoétalonnage explicite peut être exécuté sur une pièce test. Cette pièce est utilisée à titre d'exemple, cependant il est important de noter que la démarche reste généralisable quelle que soit la pièce étudiée. La configuration des appareils photographiques retenue est quelconque et la solution initiale du schéma d'optimisation est choisie manuellement (estimation de 12 paramètres extrinsèques permettant une reprojection correcte visuellement). Les photographies exploitées pour mettre en évidence les problèmes de conditionnement et sélectionner une stratégie d'optimisation sont présentées à la figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Images gauche et droite retenues pour illustrer les problèmes de conditionnement de l'étalonnage explicite

Sur ces images, il est possible d'observer le motif utilisé pour texturer la surface de la pièce : il s'agit d'un mouchetis aléatoire relativement grossier (rayon d'autocorrélation d'environ 10 pixels sur les images gauche et droite, estimé selon la largeur à mi-hauteur). À titre informatif, de plus amples détails concernant le calcul de rayon d'autocorrélation peuvent être lus dans l'annexe C.

Les calculs d'autoétalonnage explicite sont alors effectués depuis une solution initiale quelconque. La figure 3.2 présente la matrice \mathbf{H}_2 associée au problème de corrélation d'images dans la configuration initiale et également la courbe de convergence associée à ce même problème pour un schéma d'optimisation de Gauss-Newton.

Sur l'image 3.2, il est aisé de remarquer qu'une des composantes diagonales est prédominante

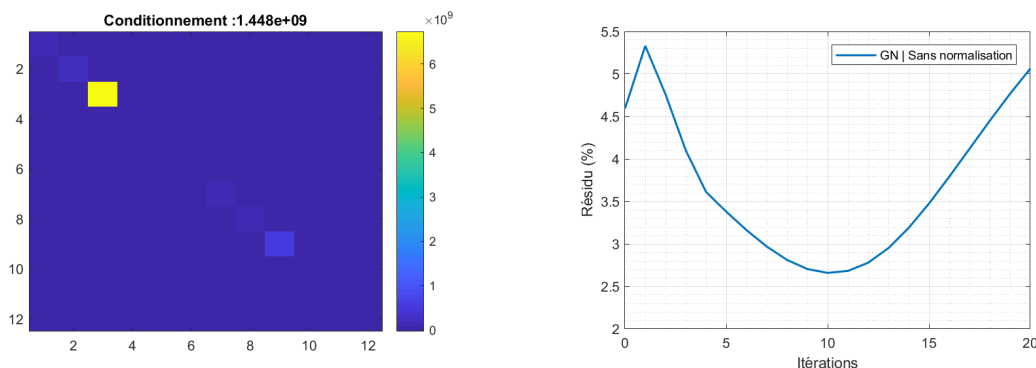


FIGURE 3.2 – Exemple de matrice initiale du problème d'autoétalonnage et courbe de convergence associée au même problème avec un schéma d'optimisation de type Gauss-Newton

par rapport aux autres. Il s'agit de la composante (3,3) associée au paramètre de rotation γ^l . Les autres composantes associées aux rotations - c'est-à-dire les composantes diagonales 1, 2, 7, 8, 9 correspondant respectivement aux paramètres $\alpha^l, \beta^l, \alpha^r, \beta^r$ et γ^r - sont également visibles sur cette figure même si leur valeur est plus faible que la composante (3,3). En revanche les composantes associées aux translations ne sont pas visibles ici, impliquant un conditionnement élevé de la matrice. Ainsi, la figure 3.2 illustre bien la différence d'influence entre les rotations et les translations.

Cette forte valeur du conditionnement lors de la première itération conduit alors à une mauvaise estimation de la correction \mathbf{da} à apporter aux paramètres extrinsèques, ce qui se traduit donc par une augmentation du résidu. Même si dès la deuxième itération le résidu de corrélation diminue, ce premier pas de calcul peut attirer la solution vers un minimum local différent du minimum global recherché. Ainsi par la suite, des stratégies d'amélioration du conditionnement seront étudiées pour limiter son impact, notamment lors ce premier pas de calcul.

En plus de mettre en lumière un problème lors de premier pas de calcul, la figure 3.2 montre également que l'algorithme de Gauss-Newton converge en une dizaine d'itérations vers une solution à environ 2.7 % de résidu, mais si celui-ci n'est pas interrompu par un critère d'arrêt portant sur la diminution du résidu, le problème se met à diverger.

Dans la suite des travaux, afin d'obtenir un ensemble de résultats cohérents, l'algorithme d'autoétalonnage proposé sera interrompu lorsque l'un des critères d'arrêt suivants sera rencontré :

- La décroissance de résidu entre deux itérations devient trop faible.

$$Residu_{(iter-1)} - Residu_{iter} < 10^{-5}$$

- La correction de paramètres extrinsèques \mathbf{da} d'une itération à l'autre ne modifie plus suffisamment la reprojction du maillage dans l'image de gauche et de droite. En effet, si le déplacement maximal dans l'une et l'autre des deux images est inférieur au millième de pixel, il est possible de considérer la correction trop faible.

$$\max_{p=l,r} \max_{i=1..N} (x_i^p_{(iter-1)} - x_i^p_{iter}) < 10^{-3} \text{ pixel}$$

- Le calcul n'arrive pas à converger en moins de 50 itérations.

$$Nb_{iter} = 50$$

Pour limiter les problèmes liés au mauvais conditionnement de la matrice du problème, une solution consiste à réaliser un changement de variable afin de réduire les disparités entre les différents termes à optimiser. Il est alors possible de réécrire chacun des paramètres de sorte qu'ils engendrent un déplacement moyen comparable dans l'espace image :

$$\tilde{a}_i^p = k_i^p a_i^p \quad \text{tel que} \quad \text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \tilde{a}_i^p}\right\|\right) = 1 \quad (3.4)$$

$$\text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \tilde{a}_i^p}\right\|\right) = 1 \quad (3.5)$$

$$\Leftrightarrow \text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial a_i^p} \frac{\partial a_i^p}{\partial \tilde{a}_i^p}\right\|\right) = 1 \quad (3.6)$$

$$\Leftrightarrow \text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial a_i^p} \frac{1}{k_i^p}\right\|\right) = 1 \quad (3.7)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{k_i^p} \cdot \text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial a_i^p}\right\|\right) = 1 \quad (3.8)$$

Ainsi, le passage entre les paramètres extrinsèques et les paramètres extrinsèques normalisés est obtenu avec le facteur de normalisation k_i^p :

$$k_i^p = \text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial a_i^p}\right\|\right) \quad (3.9)$$

Il est alors possible de réécrire le problème d'optimisation à l'aide d'une matrice de normalisation \mathbf{N} définie par :

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_\alpha^l} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_\beta^l} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{k_{t_3}^l} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \alpha^l}\right\|\right)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \beta^l}\right\|\right)} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{\text{mean}\left(\left\|\frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial t_3^l}\right\|\right)} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

L'impact d'une variation de paramètre extrinsèque normalisé $\tilde{\mathbf{a}}^p$ sur la projection dans l'espace image peut alors s'écrire grâce à cette matrice \mathbf{N} :

$$\delta \mathbf{x}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \tilde{\mathbf{a}}^p} d\tilde{\mathbf{a}}^p = \frac{\partial \mathbf{x}^p}{\partial \mathbf{M}^p} \underbrace{\frac{\partial \mathbf{M}^p}{\partial \mathbf{a}^p}}_{\mathbf{P}} \underbrace{\frac{\partial \mathbf{a}^p}{\partial \tilde{\mathbf{a}}^p}}_{\mathbf{N}} d\tilde{\mathbf{a}}^p \quad (3.12)$$

En prenant en compte le changement de variables avec les paramètres normalisés, le problème d'optimisation peut alors s'écrire :

$$\mathbf{N}^T \mathbf{P}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{P} \mathbf{N} \begin{bmatrix} d\tilde{\mathbf{a}}^l \\ d\tilde{\mathbf{a}}^r \end{bmatrix} = \mathbf{N}^T \mathbf{P}^T \mathbf{b}_1 \quad (3.13)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{H}_3 \begin{bmatrix} d\tilde{\mathbf{a}}^l \\ d\tilde{\mathbf{a}}^r \end{bmatrix} = \mathbf{b}_3 \quad (3.14)$$

Pour chaque pas de calcul, le problème normalisé (équation 3.14) peut être résolu, puis la correction de paramètres extrinsèques réels $d\mathbf{a}^p$ est calculée à partir des incréments des paramètres extrinsèques normalisés $d\tilde{\mathbf{a}}^p$:

$$d\mathbf{a}^p = \mathbf{N}^{-1} d\tilde{\mathbf{a}}^p \quad (3.15)$$

Pour valider l'apport de la normalisation des paramètres extrinsèques dans le problème d'auto-étalonnage explicite, il peut être intéressant de reprendre l'exemple donné à la figure 3.2.

La figure 3.3(a) présente la matrice du problème d'auto-étalonnage avec normalisation des paramètres extrinsèques appliquée avec la même solution initiale et avec les mêmes images. Grâce à la figure 3.3(a), il est facile de remarquer que toutes les rotations ont cette fois-ci sensiblement la même influence, néanmoins les translations restent toujours faiblement influentes. Il est important de noter qu'avec l'intégration de la normalisation des paramètres extrinsèques, le conditionnement de la matrice du problème d'étalonnage est amélioré par un facteur 10000.

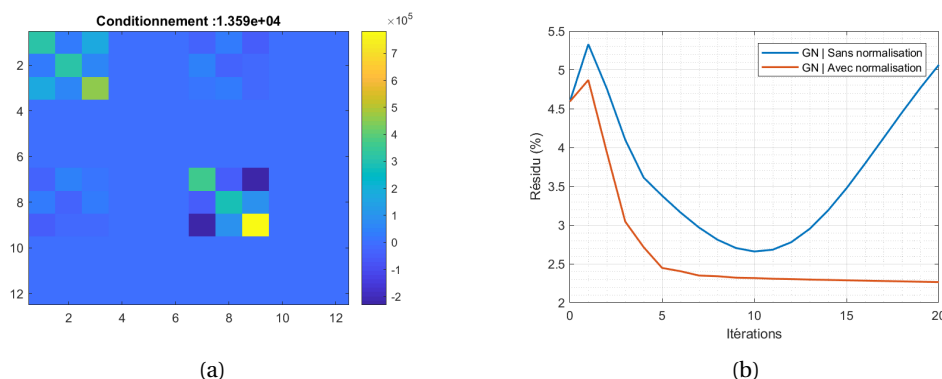


FIGURE 3.3 – Matrice initiale du problème d'auto-étalonnage normalisé (a) et comparaison des courbes de convergence avec et sans normalisation des paramètres extrinsèques (b)

La figure 3.3(b) compare l'évolution du résidu avec et sans normalisation. Sur celle-ci, l'impact de la normalisation peut être clairement perçu. En effet, comparativement au problème sans

normalisation, l'augmentation du résidu lors du premier pas est ici diminuée, passant de 5.32% à 4.78%.

De plus, il est aisé de remarquer que le résidu obtenu avec normalisation des paramètres extrinsèques permet d'obtenir un résidu final inférieur (2.24% contre 2.65% lorsque le problème a convergé). Enfin, la solution obtenue semble plus stable et moins sensible au bruit de mesure.

Ainsi dans la suite de ce document, l'optimisation explicite sera réalisée avec normalisation des paramètres extrinsèques afin de limiter l'impact du conditionnement de la matrice du problème d'autoétalonnage.

2.3 Algorithme d'optimisation

Objectif de la section 2.3	
Étudier l'influence du schéma d'optimisation sur la convergence de l'étalonnage	
Étalonnage	
Éléments fixés :	Paramètres extrinsèques initiaux Mouchetis
Élément modifié :	Schéma d'optimisation de l'étalonnage
Modèle employé :	Géométrie mesurée par ATOS Core
Paramètres extrinsèques initiaux :	Estimation visuelle
Mesure de forme	
Non étudié dans ce chapitre	

Une fois le conditionnement de la matrice de corrélation d'images amélioré, il faut s'assurer que le problème d'autoétalonnage converge vers la solution recherchée. Même si la normalisation des paramètres extrinsèques a permis de grandement améliorer la convergence de l'algorithme, le calcul lors du premier pas de calcul semble toujours entaché par une erreur. Pour éviter que celle-ci ne vienne perturber l'étalonnage par la suite, un nouveau schéma d'optimisation sera étudié ici : l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

L'algorithme de Levenberg-Marquardt [Levenberg, 1944, Marquardt, 1963] - également connu sous le nom de méthode des moindres carrés amortie (Damped Least-Squares method) - repose sur l'algorithme de Gauss-Newton et l'algorithme de descente de gradient. Bien que dans certains cas de figure cet algorithme soit légèrement plus lent que l'algorithme de Gauss-Newton, il est plus robuste et permet d'obtenir la solution recherchée même lorsque les paramètres d'optimisation sont éloignés de leur valeur optimale.

Pour obtenir des formules compactes, notons \mathbf{J} la matrice jacobienne de variation de niveaux de gris définie par :

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\mathbf{f}^l - \mathbf{f}^r)}{\partial \mathbf{a}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \nabla \mathbf{f}^l \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^l}{\partial \mathbf{a}^l} & 0 \\ 0 & -\nabla \mathbf{f}^r \cdot \frac{\partial \mathbf{x}^r}{\partial \mathbf{a}^r} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Ainsi avec cette matrice jacobienne, il est possible d'expliciter l'incrément $\mathbf{d}\tilde{\mathbf{a}}^p$ pour chacune des méthodes citées précédemment.

- **L'algorithme de descente de gradient** : il s'agit d'apporter une correction $d\tilde{\mathbf{a}}^p$ selon la direction opposée au gradient afin de faire décroître la fonction coût. Bien que lente, cette méthode permet d'assurer la convergence du calcul. Avec cette approche, en notant v le scalaire positif correspond à la longueur de déplacement selon la direction inverse au gradient local, la correction de paramètres extrinsèques est donnée par :

$$\boxed{d\tilde{\mathbf{a}} = -v\mathbf{J}^T(\mathbf{f}^l - \mathbf{f}^r)} \quad (3.17)$$

- **L'algorithme de Gauss-Newton** : il s'agit d'une méthode de minimisation de problème des moindres carrés. Elle présuppose que la fonction objectif est quadratique en fonction des paramètres d'optimisation lorsque ceux-ci sont proches de la solution optimale. Cette méthode est généralement plus rapide que la méthode de descente de gradient mais nécessite une solution initiale proche de la solution optimale [Argyros, 2008]. L'incrément de paramètre extrinsèque est alors calculé à l'aide de la matrice Hessienne $\mathbf{J}^T\mathbf{J}$:

$$\boxed{\mathbf{J}^T\mathbf{J}d\tilde{\mathbf{a}} = -\mathbf{J}^T(\mathbf{f}^l - \mathbf{f}^r)} \quad (3.18)$$

- **L'algorithme de Levenberg-Marquardt** : le concept de l'algorithme de Levenberg-Marquardt consiste à approcher une résolution de type Gauss-Newton tout en "amortissant" la résolution afin de limiter les problèmes liés au mauvais conditionnement de la matrice à inverser. Pour cela, Levenberg propose d'utiliser un coefficient d'amortissement positif η ajusté à chaque nouvelle itération. Ce coefficient permet alors d'adapter la résolution pour profiter des avantages de la méthode de descente de gradient ou de la méthode de Gauss-Newton.

$$\boxed{[(\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \eta\mathbf{I})] [d\tilde{\mathbf{a}}] = -\mathbf{J}^T(\mathbf{f}^l - \mathbf{f}^r)} \quad (3.19)$$

Ainsi, une faible valeur du coefficient d'amortissement η permet d'approcher une résolution de type Gauss-Newton tandis qu'une valeur plus élevée permet de tendre vers un algorithme de descente de gradient. Le paramètre d'amortissement η est initialisé avec une valeur importante de sorte que les premiers pas de correction soient faibles selon la direction de décroissance la plus rapide. Si cette correction ne permet pas de faire décroître la valeur du résidu, la valeur de η est augmentée; dans le cas contraire, sa valeur est diminuée pour accélérer la vitesse de convergence.

Pour améliorer la vitesse de convergence de l'algorithme, Marquardt propose de modifier légèrement la formule proposée par Levenberg en y intégrant les informations liées à la courbure locale de la fonctionnelle. En remplaçant la matrice identité \mathbf{I} de la formule précédente par les termes diagonaux de la matrice hessienne, il est alors possible d'obtenir de grands mouvements selon les directions où le gradient est le plus faible, accélérant la vitesse de convergence de l'algorithme. Ainsi, l'algorithme de Levenberg-Marquardt s'écrit :

$$\boxed{[\mathbf{J}^T\mathbf{J} + \eta.\text{diag}(\mathbf{J}^T\mathbf{J})] [d\tilde{\mathbf{a}}] = -\mathbf{J}^T(\mathbf{f}^l - \mathbf{f}^r)} \quad (3.20)$$

Cette dernière formulation a donc été implémentée afin d'améliorer la résolution de l'auto-étalonnage explicite. Afin d'évaluer l'impact du schéma d'optimisation sur l'auto-étalonnage, une optimisation a été menée avec les mêmes images d'entrée et en utilisant les mêmes conditions initiales que pour l'exemple des figures 3.2 et 3.3.

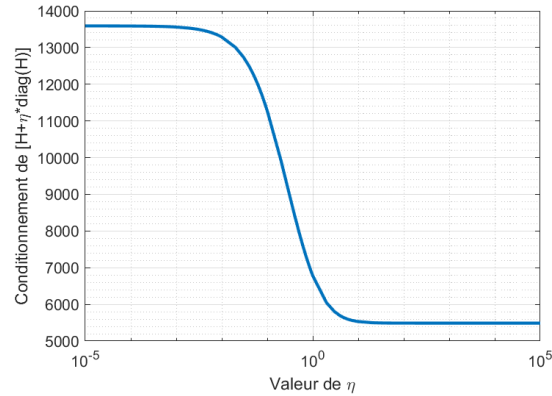


FIGURE 3.4 – Conditionnement de la matrice initiale du problème d'auto-étalonnage normalisé en fonction des valeurs d'amortissement η

La figure 3.4 présente la valeur du conditionnement de la matrice $\mathbf{H}_3 + \eta \cdot \text{diag}(\mathbf{H}_3)$ en fonction de la valeur du coefficient d'amortissement η . Sur cette figure, il est aisé de remarquer que lorsque le facteur d'amortissement est très faible, le conditionnement de la matrice correspond au conditionnement initial obtenu avec l'algorithme de Gauss-Newton (voir figure 3.3(a)). En revanche lorsque l'amortissement est plus important, le conditionnement est divisé par un facteur 3, permettant ainsi de faciliter la résolution du problème notamment lors des premières itérations.

Pour réaliser l'optimisation, les recommandations données par [Gavin, 2019] sont utilisées et le protocole suivant a été réalisé :

- Le paramètre d'amortissement η est initialisé à 10^3 .
- Si la diminution de résidu entre deux estimations de η est supérieure à 10^{-5} , alors η est diminué par un facteur 9 (avec une borne inférieure à 10^{-7}).
- Dans le cas contraire, la valeur du coefficient d'amortissement η est augmentée d'un facteur 11 (avec une borne supérieure à 10^7).

Les résultats de l'optimisation sont présentés sur la figure 3.5 et mis en regard avec les résultats obtenus avec l'algorithme de Gauss-Newton présentés à la figure 3.3.

Comme évoqué précédemment, lors de la première itération, la correction $d\mathbf{a}$ calculée avec l'algorithme de Gauss-Newton fait augmenter le résidu. Si ce premier calcul apporte un pas trop important, cela peut éventuellement amener l'algorithme à converger vers un minimum local différent du minimum global recherché; c'est justement ce qui s'est produit lorsque les paramètres extrinsèques n'ont pas été normalisés (voir la courbe bleue sur la figure 3.5). Lorsque les paramètres extrinsèques ont été normalisés, l'erreur induite sur la première itération pour le calcul de $d\mathbf{a}$ semble réduite mais une augmentation légère du résidu est encore présente lors de ce premier pas de calcul. Enfin, la figure 3.5 met en lumière le côté régularisant de l'algorithme de Levenberg-

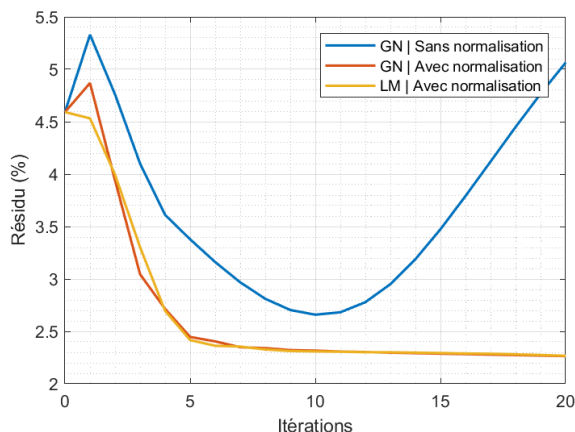


FIGURE 3.5 – Résidu du problème d’autoétalonnage explicite avec schéma de Gauss-Newton (GN) et Levenberg-Marquardt (LM) avec et sans normalisation des paramètres extrinsèques.

Marquadt. En effet, contrairement à l’algorithme de Gauss-Newton, le premier pas de calcul permet de faire diminuer le résidu de corrélation. Ainsi grâce à la régularisation, l’estimation lors de la première itération de correction \mathbf{d}_a permet de converger vers la solution recherchée.

Dans le cas présenté sur la figure 3.5, l’algorithme de Gauss-Newton avec normalisation et l’algorithme de Levenberg-Marquardt convergent vers la même solution avec une vitesse de convergence comparable. En revanche selon la solution initiale, l’algorithme de Levenberg-Marquardt pourra être légèrement moins rapide. Néanmoins, le caractère régularisant de ce schéma d’optimisation sera privilégié pour assurer la convergence de l’autoétalonnage explicite.

Ainsi dans la suite de ces travaux, l’autoétalonnage explicite sera réalisé en adoptant l’algorithme de Levenberg-Marquardt et en normalisant les paramètres extrinsèques lors du calcul de corrélation d’images.

3 Protocole de validation de l’étalonnage

Une fois le problème d’autoétalonnage écrit et le schéma d’optimisation choisi, il est important de vérifier que la méthode retenue permette d’obtenir une estimation cohérente des positions relatives caméras/pièce. En effet, l’objectif de ces travaux consiste à identifier le défaut de forme d’une pièce mécanique. Or, l’étape de déformation du modèle numérique reposant sur les résultats d’étalonnage, il est essentiel d’étudier la validité de ces derniers.

La vérification de la cohérence des résultats d’étalonnage est une réelle difficulté. En effet, une solution pourrait consister à autoétalonner le système par corrélation d’images dans une configuration de mesure donnée, puis après translation de l’une des caméras d’une longueur connue, appliquer un second autoétalonnage. En comparant la variation de paramètres extrinsèques obtenus, il serait possible de valider la capacité de la méthode à identifier ce déplacement caméra. Cependant, l’inconvénient majeur de cette méthode repose sur le fait qu’elle compare deux résultats d’étalonnage; de ce fait, une erreur de justesse ne serait pas perçue par cette approche.

Une seconde difficulté pour la validation des résultats d'étalonnage vient du fait que les paramètres extrinsèques recherchés traduisent les transformations entre différents repères difficilement accessibles par une mesure. En effet, le repère 3D retenu est un repère défini numériquement et repose donc sur la géométrie de la pièce; concernant les repères caméras, la position exacte de ceux-ci est complexe à identifier par un moyen de mesure.

Ainsi, la vérification des résultats d'autoétalonnage ne sera pas aisée. Pour pallier les différents problèmes évoqués, la solution retenue dans ces travaux consiste à utiliser un moyen de mesure différent de la corrélation d'images mais exploitant les mêmes données 2D; de ce fait, les deux méthodes de mesure s'appuieront sur les mêmes repères images. Par conséquent, il suffira de lier les repères 3D associés à chacune des deux méthodes pour que celles-ci partagent les mêmes données. Une fois le recalage des données effectuées, l'estimation des paramètres extrinsèques avec les deux approches traduiront les mêmes transformations ce qui permettra de les comparer.

Cette démarche de comparaison avec un système extérieur peut être appliquée quelle que soit la pièce étudiée. Pour illustrer cette démarche, un protocole de validation sera appliqué sur les résultats de corrélation obtenus sur la pièce test présentée dans le chapitre précédent. Ceux-ci seront ensuite comparés aux résultats obtenus avec un système de référence : le système de photogrammétrie TRITOP présenté dans le chapitre 1.

Pour lier les différentes données exploitées par l'algorithme de corrélation d'images et par le système TRITOP, la scène sera photographiée avec l'appareil photographique fourni par l'entreprise GOM. De nombreuses images pourront ainsi être acquises, permettant à l'algorithme de photogrammétrie de cibles de calculer les coordonnées 3D des centres de cibles dans un repère \mathcal{R}_{GOM} associé à la mesure. En revanche pour la corrélation d'images, seules 2 de ces configurations de mesure seront exploitées.

Bien que la photogrammétrie de cibles et la corrélation d'images partagent des données 2D communes, pour permettre la comparaison de résultats, il faut également mettre en relation les repères 3D (voir figure 3.6). Cette problématique de recalage fait donc l'objet de la section suivante.

3.1 Recalage des données de mesure en vue d'une comparaison

Pour obtenir une comparaison directe entre les résultats de corrélation d'images (sur forme mesurée ou sur forme nominale) et ceux obtenus par photogrammétrie de cibles, il est nécessaire de lier les données issues de ces deux systèmes l'un par rapport à l'autre. Les données 2D étant déjà exprimées dans le même repère, l'étape de recalage consistera donc uniquement à exprimer les différentes coordonnées 3D dans un repère commun.

Les données de photogrammétrie n'étant généralement pas suffisamment denses sur la pièce (à titre d'exemple sur la pièce d'étude, seule une trentaine de cibles ont été collées sur la surface de celle-ci), une mise en correspondance entre le repère \mathcal{R}_{CAO} et le repère \mathcal{R}_{GOM} n'est pas réalisable en l'état par un recalage non rigide; il est donc nécessaire d'envisager une autre approche.

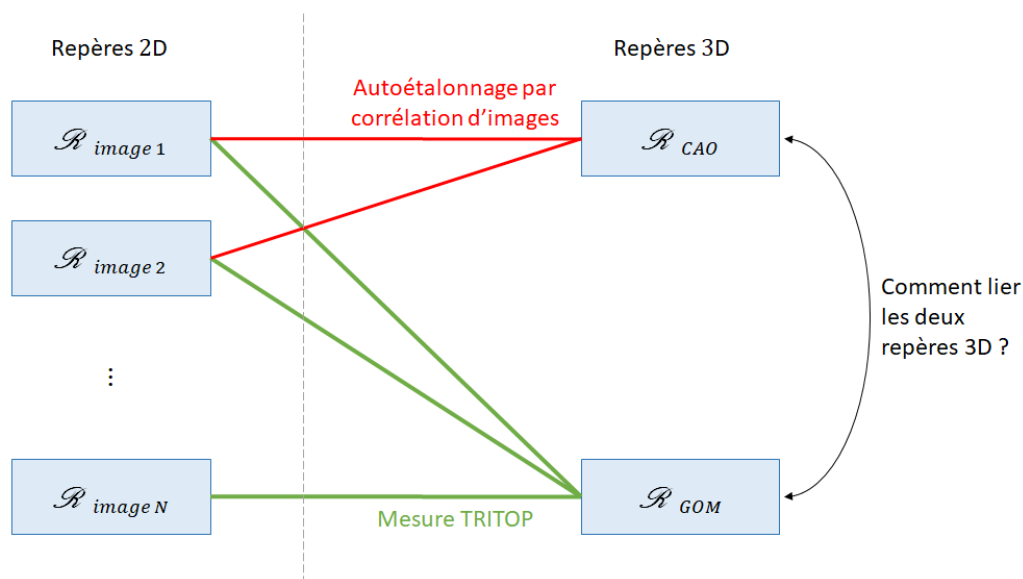


FIGURE 3.6 – Problème de recalage : les données de photogrammétrie et celles de corrélation doivent être exprimées dans un même repère pour permettre une comparaison des paramètres extrinsèques

Pour pallier le manque de densité de points sur la surface de la pièce, le système de photogrammétrie TRITOP peut être couplé avec le système à lumière structurée ATOS Core (également présenté dans le chapitre 1). Ces deux systèmes d'acquisition étant développés par le même fabricant, le recalage et la fusion de ces données sont directement réalisés par le logiciel GOM Inspect. Pour ce faire, la scène doit être mesurée au préalable par photogrammétrie de cibles TRITOP, donnant ainsi accès à la position 3D des cibles codées (présentes sur les barres d'étalonnage et les croix codées) et des cibles non codées (collées sur la surface de la pièce). La détection et la reconnaissance des cibles non codées dans les deux plans image de l'ATOS Core permettent de délivrer la mesure de géométrie directement dans le repère lié aux cibles. Ainsi en couplant ces deux systèmes d'acquisition, il est possible d'obtenir une mesure dense de la pièce pour laquelle les coordonnées 3D des cibles de photogrammétrie sont exprimées dans le même repère que le nuage de points.

Une fois la mesure dense réalisée, les coordonnées 3D du nuage de points et des cibles sont exprimées dans un même repère 3D construit à partir de l'une des croix d'étalonnage. Pour que la mesure ne soit pas dépendante de la disposition des éléments d'étalonnage autour de la scène, un repère \mathcal{R}_{GOM} est créé en s'appuyant sur la géométrie mesurée de la pièce. L'ensemble des données de mesure est alors exprimé dans ce nouveau repère.

Après avoir créé le repère \mathcal{R}_{GOM} , il faut désormais le lier avec le repère CAO \mathcal{R}_{CAO} utilisé par corrélation d'images (voir figure 3.6). Puisque les données TRITOP et ATOS Core sont denses, il est désormais envisageable de recalibrer le nuage de points avec le modèle CAO de la pièce. La pièce mesurée présentant un défaut de forme, le nuage de points obtenu par ATOS Core différera du modèle nominal. Pour éviter que ces écarts ne viennent perturber le recalage, les défauts de forme doivent être pris en compte lors du recalage [Thiébaud et al., 2018].

Pour obtenir la transformation rigide à appliquer au repère \mathcal{R}_{CAO} pour le recaler sur le repère \mathcal{R}_{GOM} , il faut extraire des résultats de l'ICP non rigide uniquement les amplitudes modales associées aux corps rigides (autrement dit les 6 premières amplitudes modales) et ne pas prendre en compte les amplitudes associées au défaut de forme de la pièce (c'est-à-dire les amplitudes modales associées aux modes déformants). Les corps rigides ainsi calculés permettent donc de lier les deux repères 3D (voir figure 3.7).

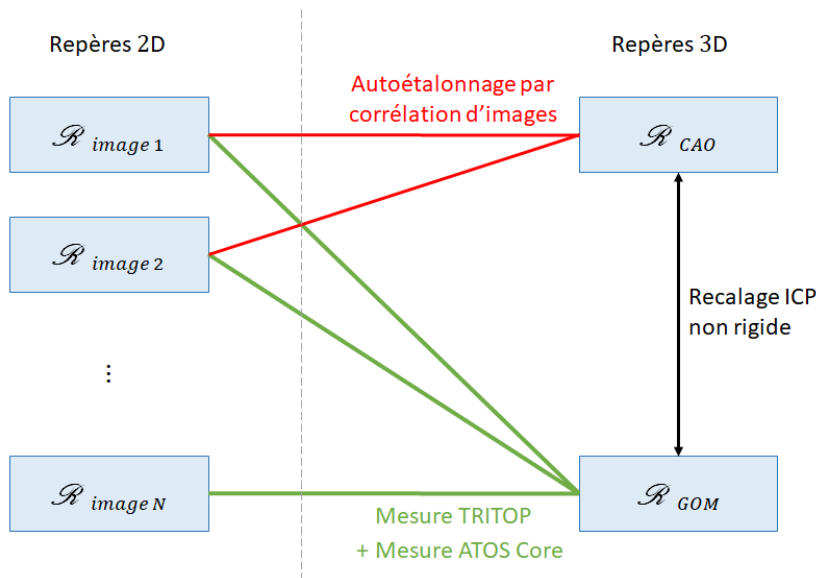


FIGURE 3.7 – Mise en correspondance des données TRITOP avec celles de corrélation d'images grâce à l'utilisation de l'ATOS Core

Après recalage des données de photogrammétrie TRITOP dans le repère \mathcal{R}_{CAO} , les paramètres extrinsèques obtenus par les deux méthodes décriront les transformations permettant de passer du repère 3D \mathcal{R}_{CAO} aux repères 2D $\mathcal{R}_{image 1}$ et $\mathcal{R}_{image 2}$ associés à chaque image.

L'autoétalonnage proposé dans la section 2 fournissant directement les paramètres extrinsèques après optimisation, il suffit cette fois-ci d'extraire les paramètres de pose du système grâce à la photogrammétrie TRITOP en se basant sur les mêmes images. De cette manière, il sera possible de comparer directement les résultats des deux méthodes et ainsi vérifier la validité des résultats de corrélation d'images. La section suivante présente donc une démarche permettant d'extraire les paramètres extrinsèques depuis les données de mesure TRITOP.

3.2 Obtention des positions et orientations caméras grâce à TRITOP

Après avoir réalisé l'acquisition des images, calculé la position 3D de chacune des cibles, recalé l'ensemble de ces mesures avec la mesure ATOS Core, le logiciel GOM Inspect donne alors accès aux coordonnées 2D $\tilde{\mathbf{x}}^{\text{TRITOP}}$ des centres de cible pour chacune des images. Ces coordonnées sont exprimées par rapport à l'image brute. Pour permettre l'utilisation d'un modèle linéaire de caméra lors de la détermination des paramètres extrinsèques, la composante liée aux aberrations optiques doit être retirée des coordonnées 2D mesurées (voir chapitre 1) pour obtenir les coordonnées théoriques si le système optique de la caméra était parfait.

Une fois les aberrations corrigées, les coordonnées 2D corrigées $\mathbf{x}^{\text{TRITOP}}$ peuvent être liées aux coordonnées 3D $\mathbf{X}^{\text{TRITOP}}$ par un modèle linéaire de caméra pour trouver les paramètres extrinsèques associés à chaque prise de vue. Cette information n'étant pas accessible par le logiciel GOM Inspect, une solution consiste donc à déterminer la matrice de transformation $\mathbf{M}^{\text{TRITOP}}$ permettant de minimiser l'erreur de reprojection pour chacun des points de mesure considérés :

$$\text{Erreur de reprojection} = \|\mathbf{x}_i^{\text{TRITOP}} - \mathbf{M}^{\text{TRITOP}}\mathbf{X}_i^{\text{TRITOP}}\| \quad (3.21)$$

Puisque les composantes associées aux aberrations optiques ont été retirées des coordonnées 2D, il est possible d'utiliser un modèle linéaire de caméra. Cela se traduit donc par une indépendance de la matrice $\mathbf{M}^{\text{TRITOP}}$ par rapport au point de mesure considéré. De plus, les paramètres intrinsèques de la caméra pouvant être déterminés simultanément avec les paramètres liés aux aberrations optiques, la matrice des paramètres intrinsèques \mathbf{K} sera supposée connue. Ainsi, la minimisation de l'erreur de reprojection portera donc uniquement sur les paramètres extrinsèques. Pour limiter l'impact du bruit de mesure sur la détermination de ces derniers, un critère des moindres carrés sera utilisé lors de la minimisation :

$$\mathbf{a}^{\text{TRITOP}} = \arg \min_{\alpha, \beta, \gamma, t_1, t_2, t_3} \sum_{i=1}^N (\|\mathbf{x}_i^{\text{TRITOP}} - \mathbf{K}\mathbf{T}(\alpha, \beta, \gamma, t_1, t_2, t_3)\mathbf{X}_i^{\text{TRITOP}}\|^2) \quad (3.22)$$

La minimisation de l'erreur de reprojection selon le critère des moindres carrés permet alors d'estimer les paramètres extrinsèques associés à une scène à partir de la connaissance des points 2D $\mathbf{x}^{\text{TRITOP}}$ et de leur correspondant en 3D $\mathbf{X}^{\text{TRITOP}}$. De cette manière, en couplant les informations issues de GOM Inspect, il est possible d'estimer les paramètres extrinsèques décrivant la transformation entre le repère de référence (voir section précédente) et le repère associé à l'image étudiée.

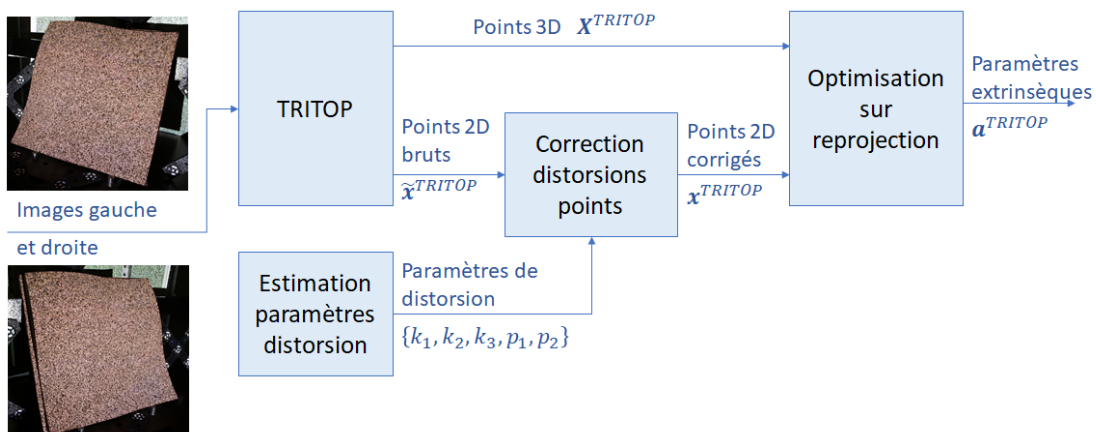


FIGURE 3.8 – Schéma de principe pour la détermination des paramètres extrinsèques obtenus via TRITOP

L'algorithme décrit précédemment permet donc d'estimer les paramètres extrinsèques associés à une scène grâce au couplage entre les points 2D $\mathbf{x}^{\text{TRITOP}}$ et les points 3D $\mathbf{X}^{\text{TRITOP}}$. Cependant, il reste une incertitude sur leur valeur. En effet, ces données sont extraites à partir de mesures

contenant du bruit d'acquisition. De plus, les paramètres extrinsèques ne correspondent pas à une solution exacte mais à une estimation après optimisation : il reste donc un résidu non nul même après convergence (dans le cas exemple, l'ordre de grandeur de l'erreur de reprojection moyenne après optimisation est d'environ 1.7 pixels).

Il est donc important de quantifier l'impact de ces incertitudes de mesure sur la détermination des paramètres extrinsèques. Pour cela, un algorithme de Monte-Carlo est utilisé. Cet algorithme permet alors de faire varier simultanément :

- chacun des points 2D autour de leur position moyenne mesurée $\mathbf{x}^{\text{TRITOP}}_i$ dans un disque dont le rayon correspondant à l'incertitude 2D associé au point;
- chacun des points 3D autour de leur position moyenne mesurée $\mathbf{X}^{\text{TRITOP}}_i$ dans une sphère dont le rayon correspondant à l'incertitude 3D associé au point.

En exécutant la minimisation d'erreur de reprojection avec les différents jeux de points 2D et 3D, il est possible d'estimer la valeur moyenne et l'incertitude associées aux paramètres extrinsèques.

Ainsi il est possible d'estimer les paramètres extrinsèques décrivant la transformation liant le repère de référence avec chacun des repères images grâce à la mesure TRITOP ainsi que leur incertitude associée. Si un recalage a été effectué (voir section 3.1), il est possible de comparer directement les résultats issus de TRITOP avec ceux de corrélation d'images (voir figure 3.9).

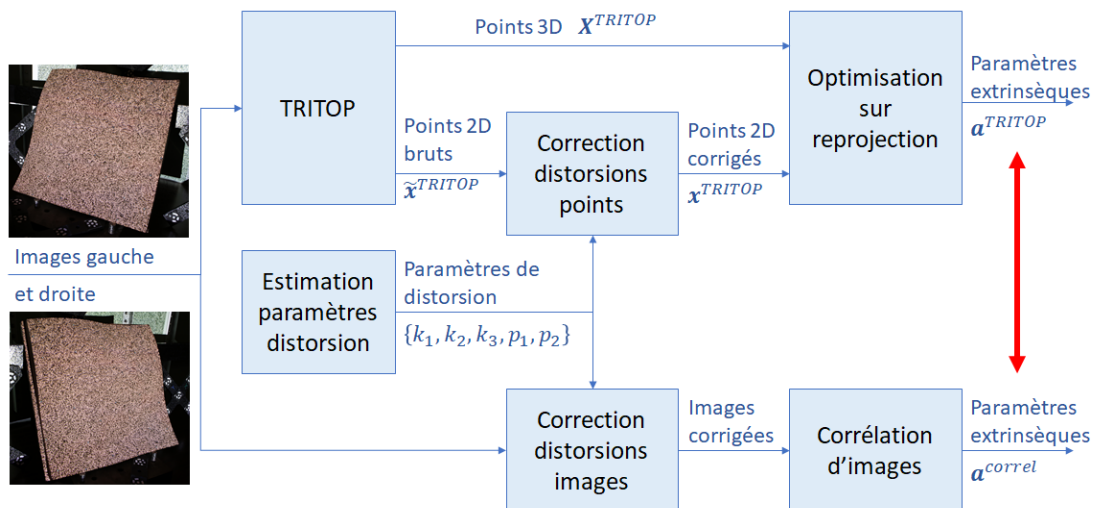


FIGURE 3.9 – Schéma de principe pour la comparaison des paramètres extrinsèques obtenus via TRITOP et via corrélation d'images

Un protocole de validation des résultats d'autoétalonnage obtenus par stéréocorrélation a donc été proposé. Celui-ci repose sur l'utilisation d'un moyen de mesure industriel qui, après recalage des données de mesure avec la CAO, permet l'estimation des paramètres de pose de la caméra et offre une solution de comparaison aux résultats de corrélation. Pour illustrer ce protocole de validation sur un cas concret, la section suivante consiste à appliquer ce dernier sur la pièce d'étude.

3.3 Application au cas d'étude

Pour vérifier la validité de la stratégie d'autoétalonnage proposée en début de chapitre, le protocole de validation (autoétalonnage par corrélation d'images, mesure via TRITOP et ATOS Core, recalage des données, extraction des paramètres extrinsèques et comparaison) sera effectué sur la pièce d'étude. Il est néanmoins important de noter que l'ensemble de la méthode proposée et le protocole de validation restent généralisables quelle que soit la pièce considérée.

3.3.1 Acquisition de la géométrie via TRITOP et ATOS Core

La première étape de validation des résultats de corrélation consiste à mesurer la géométrie de la pièce via le système industriel TRITOP. Pour cela, une trentaine de cibles non codées (pastilles blanches sur fond noir) ont été collées sur l'ensemble de la peau de la pièce. Ces cibles permettront par la suite de recalibrer les données de mesure de l'ATOS Core avec les données TRITOP. De plus, deux barres d'étalonnage SG7854 et SG7855 de longueur respective 951.103 mm et 952.800 mm et quatre croix d'étalonnage (composées de 9 cibles codées) ont été réparties tout autour de la pièce (voir figure 3.10).

Les cibles codées sont constituées d'un anneau blanc concentrique à un disque blanc (centre de la cible) sur un fond noir. Certaines portions de l'anneau peuvent être masquées, réalisant un code facilement repérable sur les images. Grâce à ces cibles codées, il est possible d'automatiser l'appariement des points 2D entre les différentes photographies réalisées lors de la mesure TRITOP. Les barres d'étalonnage servent quant à elle de référence pour obtenir l'information du facteur d'échelle de la photographie.

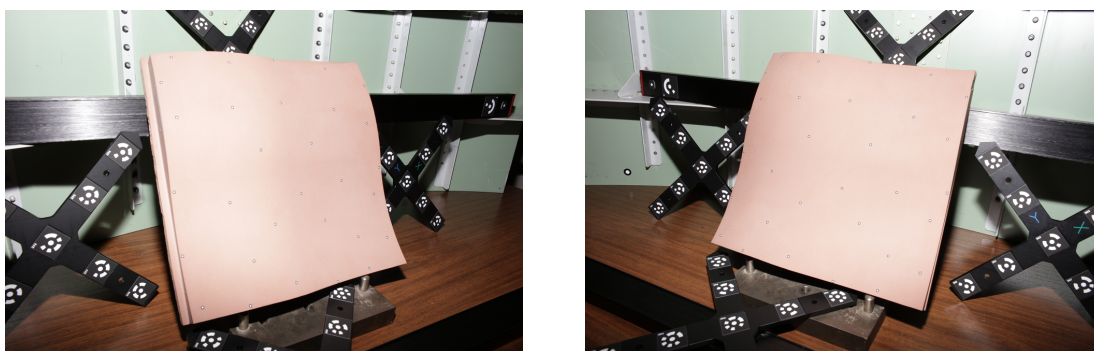


FIGURE 3.10 – Vues gauche et droite exploitées pour le calcul de paramètres extrinsèques via TRITOP

Une fois l'ensemble des points codés et non codés disposés autour de la pièce, 33 prises de vues ont été réalisées tout autour de la scène en adoptant des positions et orientations caméra variées (voir figure 3.11).

Une fois l'ensemble des prises de vues acquises, le logiciel GOM Inspect peut appairer les différentes images entre elles, identifier le centre des cibles dans chacune des images et reconstruire les coordonnées 3D de celles-ci dans le repère de mesure. Pour obtenir une mesure dense de la pièce et ainsi permettre le recalage des données, la surface de la pièce d'étude a été numérisée à l'aide du système à lumière structurée ATOS Core. Ainsi, le couplage de ce système avec TRITOP

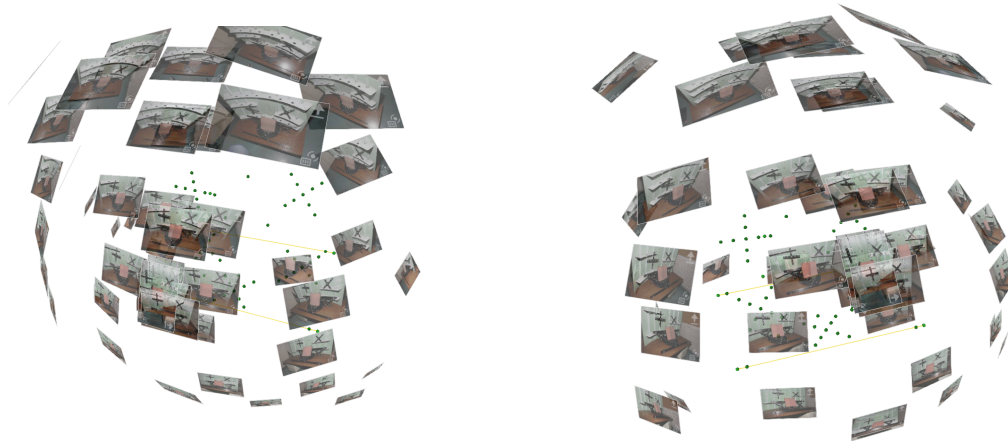


FIGURE 3.11 – Aperçu des positions et orientations retenues pour les prises de vue TRITOP.

réalisé par GOM Inspect permet alors d'obtenir la position 3D des différentes pastilles dans un repère associé au nuage de points.

Comme évoqué dans la section 3.1, le repère de mesure est créé en s'appuyant sur l'une des croix d'étalonnage. Pour que les coordonnées 3D des cibles ne dépendent pas de la disposition des éléments d'étalonnage autour de la scène, un repère \mathcal{R}_{GOM} est créé en s'appuyant cette fois-ci sur la géométrie de la pièce mesurée. De cette manière, si plusieurs mesures sont réalisées avec l'ATOS Core ou si plusieurs pièces d'une même série sont mesurées, le repère \mathcal{R}_{GOM} ne dépendra pas du pastillage ou du protocole de mesure effectué.

Une solution consiste à créer ce repère en s'appuyant sur les bords verticaux de la pièce et à déplacer l'origine de celui-ci au niveau de barycentre du nuage de points. Ce déplacement d'origine permet d'obtenir une correspondance presque directe entre le repère \mathcal{R}_{GOM} et le repère \mathcal{R}_{CAO} .

Après avoir créé le repère \mathcal{R}_{GOM} au niveau du barycentre de la pièce, les coordonnées 3D des centres de cibles peuvent être alors exprimées dans ce nouveau repère. Les coordonnées 3D \mathbf{X}^{TRITOP} des centres de cibles ainsi obtenues permettront par la suite l'estimation des paramètres extrinsèques.

Une fois le repère \mathcal{R}_{GOM} créé, il est nécessaire de déterminer la transformation rigide permettant de passer de ce repère au repère \mathcal{R}_{CAO} . De cette manière, il sera possible d'exprimer l'ensemble des résultats des deux méthodes dans un même repère 3D, permettant une comparaison directe des paramètres extrinsèques estimés.

3.3.2 Recalage des données de corrélation d'images

Comme détaillé dans la section 3.1, les paramètres extrinsèques calculés par autoétalonnage doivent décrire les mêmes transformations que celles estimées par photogrammétrie afin d'être comparées. Or, la corrélation d'images s'appuie sur le modèle nominal de la pièce d'étude. Pour lier le repère \mathcal{R}_{CAO} associé à la description nominale de la pièce avec le repère \mathcal{R}_{GOM} , un recalage ICP non rigide est utilisé.

Lors de ce recalage, 50 modes sont utilisés (6 modes de corps rigides et 44 modes déformants). La figure 3.12(a) présente les amplitudes associées aux 50 modes permettant de recalcr le modèle CAO sur les données de mesure issues de l'ATOS Core. Il peut être intéressant de noter que les amplitudes modales ainsi obtenues diffèrent des amplitudes modales présentées dans le chapitre précédent. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que les mesures présentées ici ont été réalisées une année après celles présentées dans le chapitre 2. De plus, la pièce étant réalisée dans une résine polyuréthane, sa rigidité n'est pas très élevée et elle est sensible à l'humidité ; il est donc possible que le défaut de forme de la pièce ait pu légèrement varier entre les deux mesures.

La figure 3.12(b) quant à elle présente les écarts résiduels après recalage - c'est-à-dire la distance projetée selon la normale locale entre le maillage nominal après déformation et le nuage de points mesuré par l'ATOS Core. Sur cette figure, les écarts résiduels après recalage sont relativement faibles avec une distribution dont l'écart-type de $11.4\mu\text{m}$. La faible amplitude de ces résidus permet alors de valider le recalage non rigide réalisé.

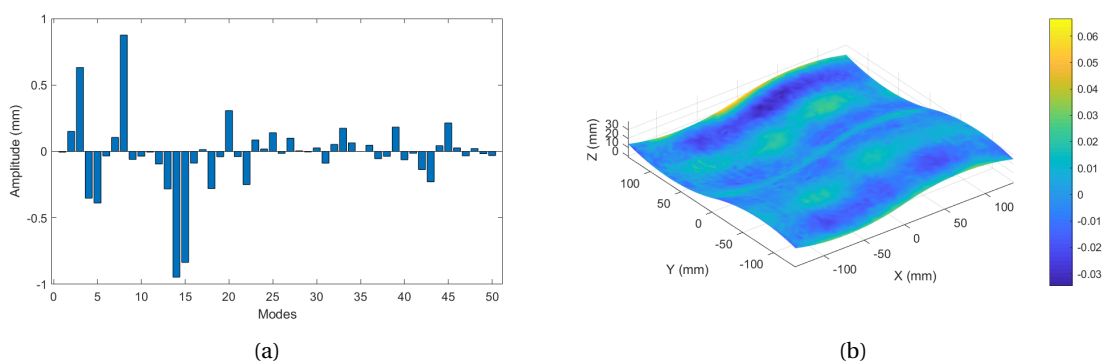


FIGURE 3.12 – Résultats du recalage ICP non rigide avec 50 modes : amplitudes calculées (a) et cartographie de résidu selon la normale locale (b)

Comme évoqué dans la section 3.1, ici seules les 6 premières amplitudes modales nous intéressent (autrement dit celles associées aux modes de corps rigides). Au vu des résidus après ICP non rigide, les amplitudes modales associées aux corps rigides peuvent être considérées comme correctement estimées.

En exploitant les amplitudes modales associées aux 6 corps rigides, il est possible de calculer la transformation rigide permettant de passer du repère 3D \mathcal{R}_{GOM} au repère 3D \mathcal{R}_{CAO} .

Une fois l'ensemble des données recalées dans le même repère 3D \mathcal{R}_{CAO} , il est désormais possible d'estimer les paramètres extrinsèques via la mesure TRITOP et également par corrélation d'images. Ces données étant exprimées dans un même repère, il sera donc possible de comparer directement les valeurs des paramètres extrinsèques.

3.3.3 Obtention des positions caméras grâce à TRITOP

Une fois l'acquisition TRITOP + ATOS Core réalisée et le recalage de ces données dans le repère \mathcal{R}_{CAO} effectué, il ne reste qu'à estimer les paramètres extrinsèques associés à deux photographies.

Pour chacune des cibles mesurées, le logiciel GOM Inspect donne accès aux coordonnées 2D brutes $\bar{\mathbf{x}}^{\text{TRITOP}}$ pour chaque image, leurs coordonnées 3D $\mathbf{X}^{\text{TRITOP}}$ exprimées dans le repère de référence ainsi que les différentes incertitudes associées. Pour obtenir une estimation correcte des paramètres extrinsèques, la composante associée aux aberrations optiques de la caméra est alors corrigée. Les points 2D corrigés $\bar{\mathbf{x}}^{\text{TRITOP}}$ peuvent être couplés aux points 3D $\mathbf{X}^{\text{TRITOP}}$ pour minimiser l'erreur de reprojection et ainsi obtenir une estimation des paramètres extrinsèques (voir section 3.2).

En plus des positions 2D et 3D moyennes des cibles, le logiciel GOM Inspect donne également accès à leurs incertitudes. Pour quantifier l'impact de ces incertitudes sur la détermination des paramètres extrinsèques, une simulation de Monte-Carlo est exécutée. Lors de cette simulation, les coordonnées 2D et 3D des centres de cible varient par rapport à leur position théorique selon une loi normale de moyenne nulle et dont l'écart-type correspond à l'incertitude 2D ou 3D calculée par le logiciel. Lors de cette simulation, 100 000 jeux différents de coordonnées 2D et 3D ont été utilisés, permettant de calculer les paramètres extrinsèques moyens et leur incertitude associée. L'ensemble de ces valeurs sont présentées dans le tableau 3.1.

Dans ce tableau comme dans la suite de ces travaux, les paramètres extrinsèques seront donnés sous la forme de trois angles (α , β et γ) et trois translations (t_x , t_y et t_z). Ces paramètres correspondent aux angles et translations permettant de passer du repère \mathcal{R}_{CAO} à chacun des repères image, le tout exprimé dans le repère \mathcal{R}_{CAO} .

	Image gauche		Image droite	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
α (deg)	170.636	5.754×10^{-4}	169.665	5.215×10^{-4}
β (deg)	-25.891	4.487×10^{-4}	20.991	4.485×10^{-4}
γ (deg)	-172.791	3.581×10^{-4}	168.130	3.376×10^{-4}
t_x (mm)	226.494	9.010×10^{-4}	-184.173	1.263×10^{-3}
t_y (mm)	75.017	6.953×10^{-4}	102.017	1.145×10^{-3}
t_z (mm)	400.316	1.631×10^{-3}	446.327	3.107×10^{-3}

TABEAU 3.1 – Paramètres extrinsèques estimés via TRITOP pour l'image gauche et droite

Grâce aux valeurs moyennes des paramètres extrinsèques, la position et l'orientation de chacun des appareils photographiques par rapport au maillage de mesure de l'ATOS Core peuvent être déterminées. La figure 3.13 présente donc la configuration de mesure estimée à l'aide des données issues de TRITOP. Sur cette figure, l'incertitude associée à la position du centre de chacune des caméras n'est pas représentée. En effet, au vu des valeurs des écarts-types sur les paramètres de translation par rapport à leur valeur moyenne, l'ellipsoïde représentant cette incertitude n'aurait pas été correctement visible.

Les valeurs moyennes des paramètres extrinsèques estimés via TRITOP et leur écart-type sont conservées et serviront de valeur de référence par la suite.

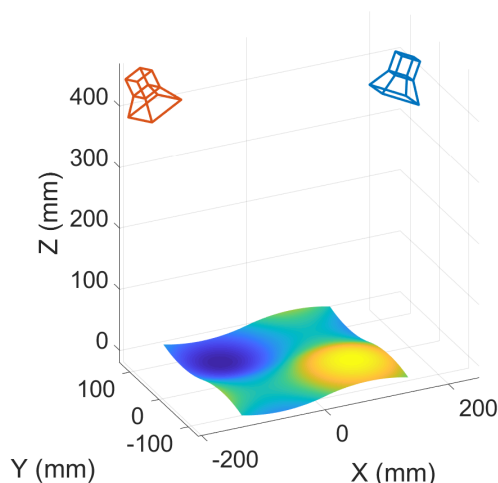


FIGURE 3.13 – Positions et orientations estimées des caméras par rapport au maillage de mesure ATOS

Il est donc désormais possible de réaliser des calculs d'autoétalonnage explicite par corrélation d'images et de vérifier la cohérence de ces résultats en les comparant par rapport aux valeurs de paramètres extrinsèques obtenus via TRITOP. En s'appuyant sur ces résultats, il sera donc possible de comparer la qualité de différents étalonnages par corrélation d'images pour extraire un protocole d'autoétalonnage répétable et juste.

Les résultats de corrélation d'images étant dépendant de la texture appliquée, la section suivante consiste à étudier l'impact du mouchetis sur la détermination des paramètres extrinsèques.

4 Qualification de l'étalonnage

Les algorithmes de corrélation d'images dépendent de nombreux facteurs, notamment du motif présent sur la pièce. Dans notre cas, la texturation de la surface étant réalisée à l'aide d'un projecteur, il est possible de faire varier le mouchetis projeté pour étudier son impact vis-à-vis de l'étalonnage.

Pour faire varier le mouchetis tout en gardant une même configuration de mesure, la solution retenue ici consiste à photographier la pièce avec un trépied tout en faisant varier le mouchetis. Ainsi pour une configuration donnée, la pièce pourra présenter différentes texturations. Dans cette étude, 3 motifs différents sont étudiés (voir tableau 3.2).

Le premier motif est un mouchetis régulier, constitué de taches circulaires noires sur fond blanc régulièrement espacées dans le plan image du projecteur et dont le rayon est de 15 pixels (dans le plan projecteur, soit approximativement 2 mm sur la pièce). Le second motif est un mouchetis aléatoire dont le ratio noir/blanc est de 50% et dont la taille moyenne des taches dans l'espace image projetée est de 4 pixels (soit 0.5 mm en moyenne sur la pièce). Le dernier motif est également un mouchetis aléatoire avec le même ratio blanc/noir et dont la taille des taches est de 2 pixels (soit 0.25 mm en moyenne sur la pièce). Les différents motifs étudiés sont présentés dans le tableau 3.2.

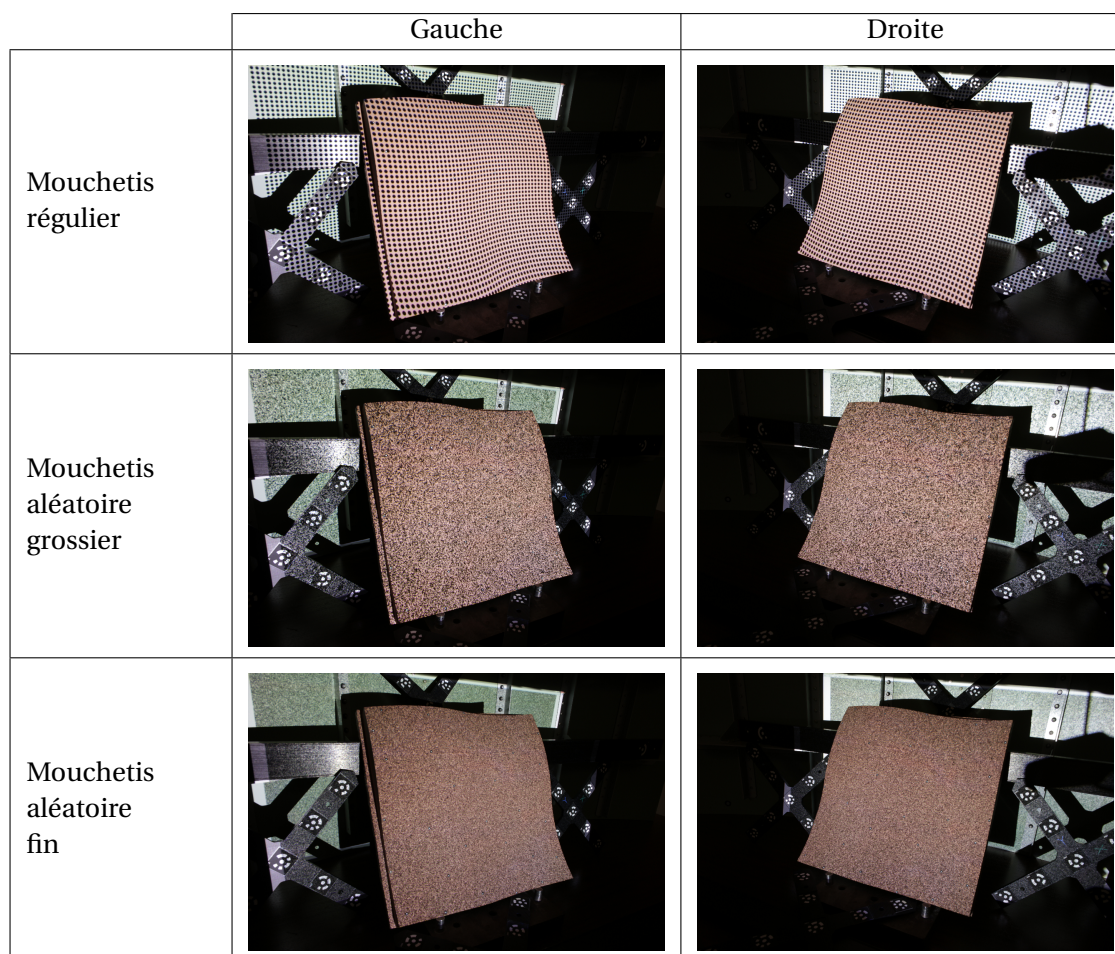


TABLEAU 3.2 – Mouchetis employés pour étudier l'impact du motif employé sur les résultats d'étalonnage

Puisque les motifs projetés sont créés numériquement, il est possible d'imposer la taille des différentes taches dans le plan image du projecteur. En mesurant la distance du projecteur par rapport à la pièce, il est possible d'estimer la taille de ces taches une fois projetées sur la surface de la pièce. Pour déterminer la taille de ces dernières une fois reprojetées dans le plan image des caméras, il est cette fois-ci possible d'étudier la fonction d'autocorrélation de chacune des images (voir annexe C). Le tableau 3.3 présente les rayons du motif lorsque la fonction d'autocorrélation adimensionnée vaut 50% (critère de largeur à mi-hauteur, ou *Full Width at Half Maximum*).

	Mouchetis régulier		Mouchetis aléatoire grossier		Mouchetis aléatoire fin	
	Gauche	Droite	Gauche	Droite	Gauche	Droite
Rayon d'autocorrélation à 50% (en pixels)	18.4	18.0	9.9	9.3	9.3	8.6

TABLEAU 3.3 – Rayons d'autocorrélation (en pixels) pour les trois mouchetis employés

En analysant les valeurs de rayon d'autocorrélation à 50% présentées dans le tableau 3.3, plusieurs remarques peuvent être faites :

- Pour un mouchetis donné, le rayon d'autocorrélation à 50% est sensiblement identique pour l'image de gauche et pour l'image de droite. Ce constat indique que les deux caméras sont donc à une distance similaire de la pièce.
- En étudiant les deux mouchetis aléatoires, il est aisé de remarquer que ceux-ci présentent des rayons d'autocorrélation dans le plan caméra similaires alors que la taille du motif projeté initialement diffère d'un facteur 2. Ce phénomène peut être expliqué par différents facteurs limitants de la projection et de chaîne d'acquisition (profondeur de champ limitée du projecteur et des caméras, limite de résolution des systèmes optiques, réflexion de la lumière du projecteur hétérogène sur la pièce...). Ainsi puisque les rayons perçus dans les images sont identiques pour les deux mouchetis aléatoires, il est probable que les résultats d'étalonnage calculés avec ces motifs soient similaires.
- De manière analogue, le mouchetis régulier possède une taille presque 4 fois supérieure au mouchetis aléatoire grossier alors que leurs rayons d'autocorrélation ne diffèrent que d'un facteur 2. Cependant, la différence de rayon sera suffisamment importante pour espérer mettre en évidence certaines variations de comportement lors des calculs d'étalonnage.

Une fois cette première analyse réalisée, il est possible d'appliquer l'étalonnage explicite avec régularisation et normalisation des paramètres extrinsèques sur les différents mouchetis présentés dans le tableau 3.2. La section suivante étudiera donc l'impact du mouchetis sur la répétabilité de l'étalonnage.

4.1 Répétabilité

Objectif de la section 4.1	
Estimer expérimentalement les erreurs de répétabilité d'étalonnage avec différents mouchetis	
Étalonnage	
Éléments fixés :	Paramètres extrinsèques initiaux Modèle numérique
Éléments modifiés :	Couple d'images Mouchetis
Modèle employé :	Géométrie mesurée par ATOS Core
Paramètres extrinsèques initiaux :	Estimation via TRITOP (tableau 3.1)
Mesure de forme	
Non étudiée dans ce chapitre	

Pour déterminer l'impact du mouchetis sur la détermination des paramètres extrinsèques, une première analyse consiste à étudier la répétabilité des résultats d'étalonnage. Pour ce faire, 5 photographies ont été acquises dans deux configurations distinctes pour chacun des mouchetis (voir figures 3.10 et 3.13). Ces configurations de mesure font partie des 33 prises de vues employées par TRITOP (voir figure 3.11) permettant ainsi une comparaison directe des résultats d'étalonnage. L'autoétalonnage explicite avec régularisation proposé à la section 2 a ensuite été appliqué sur les 25 couples d'images (5 images gauche × 5 images droite) pour les différents mouchetis.

Pour chacun des calculs, l'algorithme de corrélation d'images a été initialisé en utilisant la solution moyenne calculée à partir des données TRITOP (voir tableau 3.1). Enfin, bien que l'objectif à terme consiste à s'autoétalonner sur le modèle nominal, dans cette section l'étalonnage a été réalisé en s'appuyant sur la géométrie mesurée de la pièce par l'ATOS Core, permettant ainsi de dissocier les potentielles sources d'erreurs. Même si l'impact de la géométrie est laissé de côté dans cette section, celle-ci sera étudiée par la suite dans la section 4.3.

Les résultats d'étalonnage sur les 5×5 paires d'images avec le modèle mesuré sont présentés sur les figures 3.14 et 3.15. De manière analogue aux résultats présentés avec la solution de photogrammétrie de cibles TRITOP (voir tableau 3.1), les paramètres extrinsèques sont exprimés dans le repère de référence \mathcal{R}_{CAO} . De plus sur ces figures, les barres d'erreur présentées correspondent à l'écart-type calculé sur ces 25 couples d'images.

En se basant sur ces figures, un premier constat peut être dressé : les valeurs moyennes des résultats de corrélation d'images sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus via TRITOP. En effet, les paramètres estimés par corrélation d'images diffèrent des résultats de photogrammétrie de 0.02 degrés pour les paramètres de rotation et d'environ 0.2 mm pour les paramètres de translation. Les écarts maximums de projection des points \mathbf{x}^p induits par ces différences sont inférieurs à 2 pixels et la moyenne quadratique associée est d'environ 1.1 pixels dans chacune des images.

La source de ces écarts est difficilement identifiable (incertitude lors du calcul des modes rigides issus du recalage ICP non rigide, erreur lors de l'estimation des paramètres extrinsèques TRITOP, erreur de justesse de l'autoétalonnage, ...) cependant ces écarts restent relativement faibles : la distance entre les centres optiques calculés par photogrammétrie et ceux calculés par corrélation d'images est de 0.316 mm pour la caméra gauche et 0.190 mm pour la caméra droite pour une distance pièce/caméra d'environ 500 mm (soit une erreur relative inférieure à 0.1%).

Les figures 3.14 et 3.15 montrent également que les résultats d'autoétalonnage sur le mouchetis régulier semblent moins répétables qu'avec les mouchetis aléatoires. Ce comportement peut être expliqué par la forme et la taille du motif utilisé. Dans le cas du mouchetis régulier, si l'image n'est pas bruitée, seuls les contours des disques présentent des variations de niveaux de gris. Or ces disques ayant une dimension relativement importante (rayon d'autocorrélation à 50% d'environ 18 pixels), l'image ne présentera que peu de variations de niveau de gris entre deux pixels adjacents. Ainsi, lorsque l'image présentera du bruit, celui-ci aura plus d'influence lorsque le motif sera grossier comparé à un motif fin. Par la suite, les résultats obtenus sur les mouchetis aléatoires seront donc privilégiés.

Enfin, les valeurs moyennes des paramètres extrinsèques calculés par corrélation d'images sur les deux mouchetis aléatoires sont quasiment identiques. Ce résultat est cohérent vis-à-vis de l'étude préalable réalisée sur ces mouchetis. En effet, bien que la taille du motif initialement projeté diffère d'un facteur 2 entre les deux mouchetis, leurs rayons perçus dans les images semblent similaires (voir les rayons d'autocorrélation présentés dans le tableau 3.3). Ainsi puisque ces deux motifs donnent des résultats comparables, dans la suite de ces travaux seul l'un d'eux sera exploité.

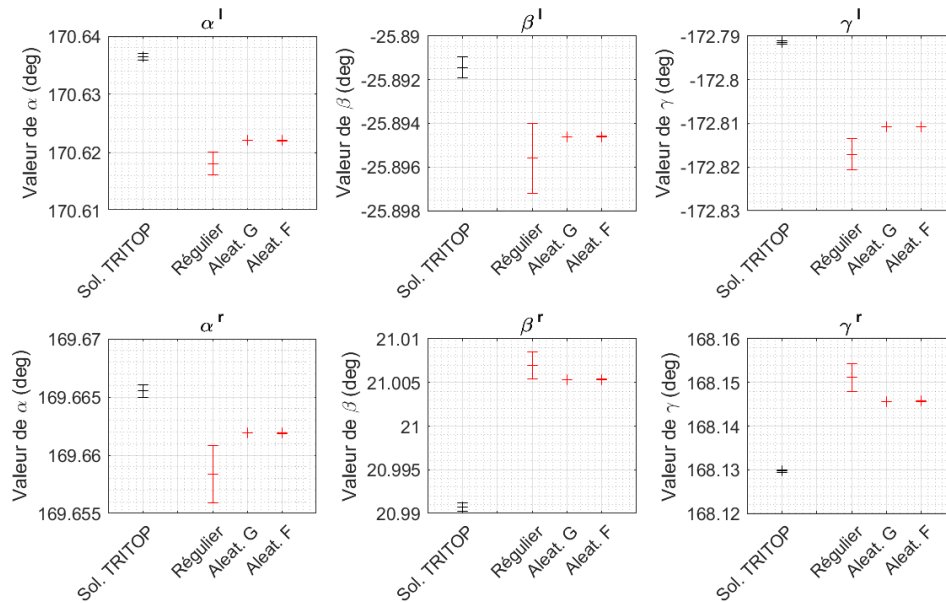


FIGURE 3.14 – Répétabilité des rotations estimées par corrélation d'images pour 3 mouchetis

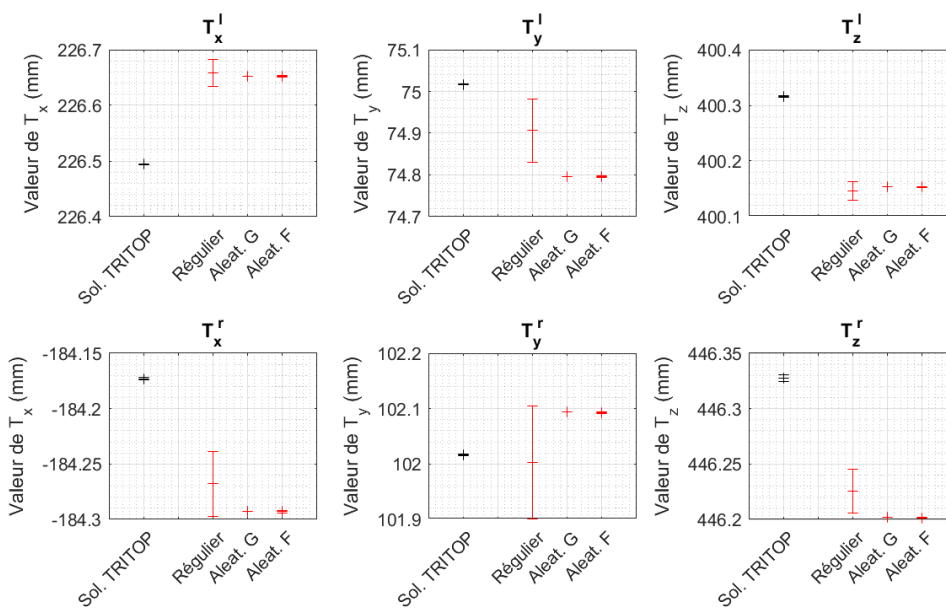


FIGURE 3.15 – Répétabilité des translations estimées par corrélation d'images pour 3 mouchetis

Il est également à noter que les incertitudes obtenues par corrélation d'images sur les mouchetis aléatoires sont du même ordre de grandeur que les incertitudes obtenues par photogrammétrie. Ce résultat est extrêmement encourageant puisque seules 2 images ont été utilisées pour la corrélation d'images contre 33 en photogrammétrie.

Cette étude de répétabilité a donc montré qu'il est possible d'obtenir des résultats similaires à ceux obtenus par photogrammétrie lorsque le modèle numérique correspond à la géométrie de la pièce réelle et si la solution initiale utilisée pour l'algorithme de corrélation est proche de la solution recherchée. Or il n'est pas toujours possible d'obtenir une solution initiale pertinente, c'est pourquoi la section suivante consiste à étudier l'impact de la solution initiale retenue sur les résultats d'étalonnage.

4.2 Sensibilité de la solution initiale

Objectif de la section 4.2	
Estimer expérimentalement l'impact de l'initialisation de l'étalonnage sur différents mouchetis	
Étalonnage	
Élément fixé :	Modèle numérique
Éléments modifiés :	Paramètres extrinsèques initiaux Mouchetis
Modèle employé :	Géométrie mesurée par ATOS Core
Paramètres extrinsèques initiaux :	Jeux de paramètres induisant un décalage moyen dans les images de 10 ou 30 pixels par rapport à la projection de référence (estimée via TRITOP, voir tableau 3.1)
Mesure de forme	
Non étudiée dans ce chapitre	

Le processus d'étalonnage reposant sur un schéma itératif, les résultats après optimisation dépendent de la solution retenue pour initialiser l'algorithme. Pour qualifier l'autoétalonnage proposé à la section 2, il est donc essentiel d'étudier l'impact de cette solution initiale sur l'estimation des paramètres extrinsèques du système.

Deux cas peuvent se présenter lorsque l'algorithme d'étalonnage est initialisé :

- soit la solution initiale n'est pas trop éloignée de la solution recherchée, dans ce cas-ci l'algorithme de corrélation peut facilement converger vers le minimum global, permettant ainsi une détermination correcte des paramètres extrinsèques;
- soit la solution initiale est relativement éloignée du minimum global; dans ce cas l'algorithme peut converger dans un minimum local différent du minimum global recherché. Les paramètres extrinsèques ainsi déterminés seront alors entachés d'une erreur.

Ainsi selon la distance de la solution initiale par rapport à la solution recherchée, le comportement de l'algorithme peut varier. Pour analyser la robustesse de l'algorithme vis-à-vis de la solution initiale retenue, il faut donc étudier son comportement en éloignant progressivement la solution initiale de la solution optimale. Pour mener cette étude, la première étape consiste donc à étudier le jeu de paramètres extrinsèques associés au minimum global de la fonctionnelle d'étalonnage.

Pour rechercher le minimum global de corrélation d'images, de nombreuses solutions ont été utilisées pour initialiser l'algorithme d'autoétalonnage. Ces solutions ont alors été appliquées sur le mouchetis régulier et les mouchetis aléatoires. Pour chacune de ces solutions initiales, le résidu de corrélation d'images après convergence a été conservé.

Parmi les différentes solutions après convergence, l'une d'entre elles présente les résidus de corrélation les plus faibles simultanément sur le mouchetis aléatoire grossier et le mouchetis aléatoire fin.

Bien qu'aucune autre solution n'ait été trouvée avec un résidu plus faible, il est impossible d'affirmer que celle-ci corresponde à la solution associée au minimum global de la fonctionnelle d'étalonnage. En effet, cette fonctionnelle présente de nombreux minimums locaux : à titre

d'exemple, sur la figure 3.5 l'algorithme de Gauss-Newton sans normalisation converge vers un minimum local avec un résidu à environ 2.65% tandis que l'algorithme de Levenberg-Marquardt converge vers une solution associée à un résidu inférieur à 2.3%. Ainsi, il n'est pas possible d'affirmer que ce minimum local corresponde effectivement au minimum global de la fonctionnelle optimisée.

Néanmoins n'ayant pas découvert d'autre solution avec un résidu de corrélation inférieur, il sera supposé ici que cette solution corresponde au minimum global de la fonctionnelle d'étalonnage. Dans la suite de ce document, cette solution sera appelée "solution de référence".

Pour analyser la sensibilité de l'algorithme vis-à-vis de la solution initiale, 10 solutions différentes ont été employées pour initialiser l'algorithme. Celles-ci ont été déterminées de sorte que le déplacement maximal dans chacun des espaces image soit de 30 pixels par rapport à la solution de référence :

$$\mathbf{a}_{init} \text{ tel que } \begin{cases} \max(\|\mathbf{x}^l(\mathbf{a}_{init}) - \mathbf{x}^l(\mathbf{a}_{reference})\|) = 30 \text{ pixels} \\ \max(\|\mathbf{x}^r(\mathbf{a}_{init}) - \mathbf{x}^r(\mathbf{a}_{reference})\|) = 30 \text{ pixels} \end{cases} \quad (3.23)$$

Pour conclure sur la pertinence de l'optimisation, après convergence de l'autoétalonnage, il est possible d'analyser la distance moyenne entre les points reprojétés avec la solution obtenue $\mathbf{x}^p(\mathbf{a}_{etal})$ et les points projetés à l'aide de la solution de référence $\mathbf{x}^p(\mathbf{a}_{reference})$.

La figure 3.16 présente donc la distance moyenne de projection après optimisation dans les images gauche et droite $\text{mean}(\|\mathbf{x}^p(\mathbf{a}_{etal}) - \mathbf{x}^p(\mathbf{a}_{reference})\|)$ lorsque l'algorithme est initialisé avec des solutions éloignées de 30 pixels.

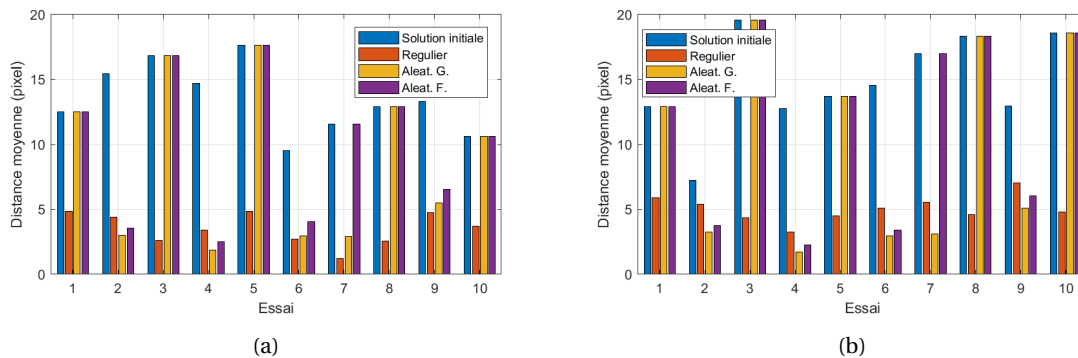


FIGURE 3.16 – Distance moyenne de projection dans l'image gauche (a) et de droite (b) par rapport à la solution de référence (distance initiale maximale : 30 pixels)

Bien que chaque solution initiale soit éloignée de 30 pixels (distance maximale), la moyenne des distances avant optimisation varie entre 7 et 20 pixels selon la solution initiale retenue. Cette variation s'explique simplement : si le déplacement imposé initialement est induit exclusivement par une translation, tous les points seront déplacés de la même quantité. A contrario, si le déplacement provient majoritairement d'une rotation, les points proches de l'axe de rotation se déplaceront peu, réduisant ainsi le déplacement moyen des points par rapport à la solution de référence.

Le deuxième élément qui peut être extrait de la figure 3.16 consiste à analyser - pour un essai donné (autrement dit une solution initiale donnée) - la distance moyenne après optimisation sur les différents mouchetis. En étudiant ces valeurs, il est aisé de remarquer que le mouchetis régulier permet en général de largement réduire la distance moyenne par rapport à la solution de référence, tandis que dans certains cas les mouchetis aléatoires grossier et fin ne permettent pas de converger vers la bonne solution. Ainsi, lorsque la solution initiale est éloignée de la solution recherchée, il est préférable d'utiliser un mouchetis régulier.

Une étude similaire peut être réalisée en éloignant moins les solutions initiales par rapport à la solution de référence. Par la suite, les solutions initiales retenues seront obtenues de sorte à induire un déplacement maximal dans chacun des espaces images de 10 pixels :

$$\mathbf{a}_{init} \text{ tel que } \begin{cases} \max(\|\mathbf{x}^l(\mathbf{a}_{init}) - \mathbf{x}^l(\mathbf{a}_{reference})\|) = 10 \text{ pixels} \\ \max(\|\mathbf{x}^r(\mathbf{a}_{init}) - \mathbf{x}^r(\mathbf{a}_{reference})\|) = 10 \text{ pixels} \end{cases} \quad (3.24)$$

De manière analogue à l'étude précédente, la figure 3.17 présente la distance moyenne de reprojection dans les images gauche et droite $\text{mean}(\|\mathbf{x}^P(\mathbf{a}_{etal}) - \mathbf{x}^P(\mathbf{a}_{reference})\|)$ lorsque l'algorithme est initialisé avec des solutions éloignées de 10 pixels.

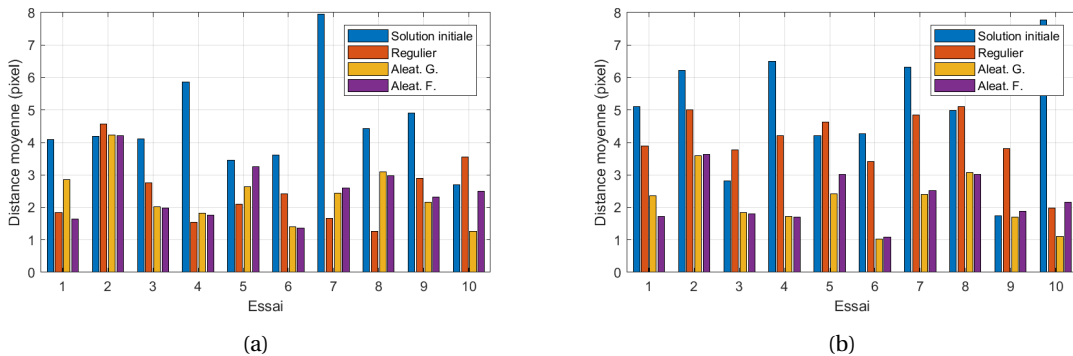


FIGURE 3.17 – Distance moyenne de reprojection dans l'image gauche (a) et de droite (b) par rapport à la solution de référence (distance initiale maximale : 10 pixels)

Contrairement aux résultats obtenus à la figure 3.16, lorsque l'algorithme est initialisé avec une solution plus proche de la solution recherchée, il semblerait que le mouchetis régulier soit moins adapté que les mouchetis aléatoires. En effet, dans la majorité des cas étudiés, la distance moyenne après optimisation $\text{mean}(\|\mathbf{x}^P(\mathbf{a}_{etal}) - \mathbf{x}^P(\mathbf{a}_{reference})\|)$ est plus élevée avec le mouchetis régulier qu'avec les mouchetis aléatoires.

En se basant sur ce constat, il semble donc que le mouchetis régulier présente un intérêt pour aider la convergence lorsque la solution initiale est éloignée de la solution recherchée, cependant si la solution initiale est suffisamment proche, les mouchetis aléatoires semblent plus adaptés.

Pour obtenir des résultats proches de ceux recherchés tout en limitant l'impact de la solution initiale, dans la suite de ces travaux, l'optimisation sera d'abord réalisée sur le mouchetis régulier puis après convergence, la solution sera injectée pour initialiser les calculs d'autoétalonnage sur mouchetis aléatoire.

Pour quantifier clairement l'impact de la solution initiale sur les résultats d'étalonnage, cette démarche a donc été appliquée en partant des 10 jeux de solutions décalés de 30 pixels par rapport à la solution de référence. L'ensemble des résultats obtenus après succession du mouchetis régulier puis du mouchetis aléatoire sont détaillés dans le tableau 3.4.

	Caméra gauche		Caméra droite	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
α (deg)	170.683	4.01×10^{-2}	169.589	5.23×10^{-2}
β (deg)	-25.912	4.87×10^{-2}	21.045	6.27×10^{-2}
γ (deg)	-172.846	4.63×10^{-2}	168.145	4.58×10^{-2}
t_x (mm)	226.129	4.49×10^{-1}	-184.939	7.71×10^{-1}
t_y (mm)	74.482	3.09×10^{-1}	102.052	4.20×10^{-1}
t_z (mm)	400.651	5.11×10^{-1}	446.492	8.40×10^{-1}

TABLEAU 3.4 – Paramètres extrinsèques estimés par corrélation d'images lorsque la solution initiale est décalée de 30 pixels par rapport à la solution recherchée

À nouveau, les résultats d'étalonnage restent cohérents et les ordres de grandeur associés aux paramètres extrinsèques sont proches des résultats obtenus via photogrammétrie TRITOP (voir tableau 3.1). En revanche, tout comme pour l'étude de répétabilité, il reste un écart entre les résultats de corrélation et les résultats de photogrammétrie.

Les résultats présentés dans le tableau 3.4 montrent que la solution initiale employée influe sur la détermination des paramètres extrinsèques, et que celle-ci peut entraîner des incertitudes d'environ 5×10^{-2} deg sur les paramètres de rotations et d'environ 5×10^{-1} mm pour les paramètres de translation. Ces valeurs sont nettement supérieures aux incertitudes obtenues sur les paramètres extrinsèques obtenus par photogrammétrie (voir tableau 3.1), néanmoins ici seules 2 images ont été exploitées contre 33 pour la mesure TRITOP qui, de plus, emploie également deux barres étalons pour réduire leurs incertitudes. Ainsi, même si les incertitudes provenant de la solution initiale employée sont plus importantes que celles obtenues par photogrammétrie, elles restent encore faibles comparées à la distance caméra/pièce (5×10^{-1} mm d'incertitude ramenée à une distance caméra/pièce d'environ 500 mm, soit une incertitude de l'ordre de 0.1%).

Ainsi l'analyse de sensibilité de l'algorithme vis-à-vis de la solution initiale a permis de montrer que le mouchetis régulier permettait d'améliorer la solution lorsque celle-ci est éloignée de la solution recherchée. Elle a également montré que les mouchetis aléatoires permettent d'améliorer les résultats lorsque l'initialisation est proche de la solution recherchée. C'est pourquoi par la suite, pour limiter la sensibilité de l'algorithme par rapport à la solution initiale et améliorer les résultats d'autoétalonnage, l'optimisation sera d'abord lancée sur le mouchetis régulier puis les résultats après convergence seront exploités sur le mouchetis aléatoire.

Dans cette section consacrée à la qualification de l'étalonnage, les différents résultats ont été obtenus en s'appuyant sur le modèle mesuré de la pièce par l'ATOS Core pour ne pas introduire de biais supplémentaire dans l'étude. Néanmoins dans le cas général, une mesure préalable de

la pièce n'est pas toujours possible, c'est pourquoi il est également important de quantifier l'impact de la forme utilisée en entrée de l'algorithme sur les résultats d'autoétalonnage. La section suivante sera donc consacrée à cette analyse.

4.3 Sensibilité de la forme en entrée

L'estimation des paramètres extrinsèques est réalisée en s'appuyant sur un modèle numérique; ainsi, pour limiter les erreurs lors de l'étalonnage, il est important de veiller à ce que ce modèle soit proche de la géométrie réelle de la pièce. Néanmoins, cette géométrie réelle n'est pas connue à l'avance et doit justement être déterminée via la mesure de forme, c'est pourquoi l'autoétalonnage repose en principe sur le modèle nominal. Or, si la pièce présente un défaut de forme, l'utilisation du modèle nominal peut induire un biais sur l'estimation des paramètres extrinsèques.

Ainsi, la méconnaissance de la forme en entrée peut engendrer des erreurs sur la détermination des paramètres de pose du système, erreurs qui pourront se traduire ensuite par une mauvaise identification du défaut de forme.

Pour qualifier les résultats d'autoétalonnage, il est donc nécessaire d'étudier l'impact du défaut de forme de la pièce sur l'identification des paramètres extrinsèques. Pour estimer cet impact, deux possibilités peuvent être envisagées :

- la première approche consiste à mesurer une série de pièces présentant des défauts de forme différents. En connaissant le défaut de forme de chacune des pièces et en analysant la variation de paramètres extrinsèques déterminés, il est possible d'estimer une tendance de l'impact d'un défaut de forme sur l'autoétalonnage. Pour obtenir une étude représentative, il est donc nécessaire d'avoir à disposition plusieurs dizaines de pièces avec des défauts différents.
- la seconde approche consiste non plus à dégager une tendance par l'expérience mais d'exploiter la connaissance du procédé de mesure. Il sera alors possible de développer un modèle pour estimer l'impact du défaut de forme sur la détermination des paramètres extrinsèques.

Ne disposant pas d'une pièce produite en série, la stratégie adoptée ici consiste à développer un modèle en se basant sur la connaissance du procédé de mesure; c'est l'objet de la sous-section suivante.

4.3.1 Estimation de l'impact de la forme sur l'autoétalonnage

Notons \mathbf{x}_0^p la projection 2D associée aux points 3D du modèle nominal de la pièce \mathbf{X} dans l'image $p = \{l, r\}$ et s_0^p le facteur d'échelle correspondant. En notant \mathbf{M}^p la matrice de transformation permettant de passer du repère 3D au repère 2D, l'équation de projection s'écrit alors :

$$s_0^p \mathbf{x}_0^p = \mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p)\mathbf{X} \quad (3.25)$$

Cette formulation est similaire à celle présentée dans le chapitre 1 (équation 1.1). Supposons que les paramètres extrinsèques sont entachés par une erreur da^p et que la pièce physique présente également un défaut de forme dX . En utilisant l'équation de projection, il est possible de calculer les coordonnées 2D associées à ces nouveaux points :

$$s_1^p \mathbf{x}_1^p = \mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p + d\mathbf{a}^p)(\mathbf{X} + d\mathbf{X}) \quad (3.26)$$

En supposant que l'erreur commise sur les paramètres extrinsèques reste faible, il est alors possible de linéariser au premier ordre le terme $\mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p + d\mathbf{a}^p)$:

$$s_1^p \mathbf{x}_1^p \approx (\mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p) + \frac{\partial \mathbf{M}^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p)(\mathbf{X} + d\mathbf{X}) \quad (3.27)$$

$$\approx \mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p)\mathbf{X} + \mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p)d\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{M}^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p \mathbf{X} \quad (3.28)$$

En se basant sur cette écriture, il est alors possible de rechercher si les effets de ces deux variations da^p et dX peuvent se compenser. Autrement dit, il est possible de calculer la variation de paramètres extrinsèques da^p permettant de compenser dans l'espace image les effets d'une méconnaissance de la forme dX .

Pour alléger les notations, par la suite \mathbf{M}^p correspondra à la matrice de transformation estimée en \mathbf{a}^p , autrement dit $\mathbf{M}^p = \mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p)$. De plus, la i -ème ligne de la matrice $\mathbf{M}^p(\mathbf{a}^p)$ sera notée \mathbf{m}_i^p .

Pour que les effets dans l'espace image d'une variation dX et da^p se compensent, cela revient à obtenir les mêmes coordonnées 2D après projection, autrement dit :

$$\mathbf{x}_1^p = \mathbf{x}_0^p \iff s_1^p \mathbf{x}_1 = s_1^p \mathbf{x}_0^p \quad (3.29)$$

$$\iff \mathbf{M}^p \mathbf{X} + \mathbf{M}^p d\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{M}^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p \mathbf{X} = (\mathbf{m}_3^p \mathbf{X} + \mathbf{m}_3^p d\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{m}_3^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p \mathbf{X}) \mathbf{x}_0^p \quad (3.30)$$

En remarquant que :

$$(\mathbf{m}_3^p \mathbf{X}) \mathbf{x}_0^p = s_0^p \mathbf{x}_0^p \quad (3.31)$$

$$= \mathbf{M}^p \mathbf{X} \quad (3.32)$$

l'équation précédente se simplifie légèrement :

$$\mathbf{M}^p d\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{M}^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p \mathbf{X} = (\mathbf{m}_3^p d\mathbf{X} + \frac{\partial \mathbf{m}_3^p}{\partial \mathbf{a}^p} d\mathbf{a}^p \mathbf{X}) \mathbf{x}_0^p \quad (3.33)$$

Cette équation peut alors être exploitée avec la caméra gauche et avec la caméra droite, puis être projetée selon les axes x et y dans chacun des plans images. Ainsi pour chaque point 3D, il vient 4 équations :

$$\left(\frac{\partial \mathbf{m}_1^l}{\partial \mathbf{a}^l} - \frac{\partial \mathbf{m}_3^l}{\partial \mathbf{a}^l}\right) \mathbf{X} d\mathbf{a}^l = (x_0^l \mathbf{m}_3^l - \mathbf{m}_1^l) d\mathbf{X} \quad (3.34)$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{m}_2^l}{\partial \mathbf{a}^l} - \frac{\partial \mathbf{m}_3^l}{\partial \mathbf{a}^l}\right) \mathbf{X} d\mathbf{a}^l = (y_0^l \mathbf{m}_3^l - \mathbf{m}_2^l) d\mathbf{X} \quad (3.35)$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{m}_1^r}{\partial \mathbf{a}^r} - \frac{\partial \mathbf{m}_3^r}{\partial \mathbf{a}^r}\right) \mathbf{X} d\mathbf{a}^r = (x_0^r \mathbf{m}_3^r - \mathbf{m}_1^r) d\mathbf{X} \quad (3.36)$$

$$\left(\frac{\partial \mathbf{m}_2^r}{\partial \mathbf{a}^r} - \frac{\partial \mathbf{m}_3^r}{\partial \mathbf{a}^r}\right) \mathbf{X} d\mathbf{a}^r = (y_0^r \mathbf{m}_3^r - \mathbf{m}_2^r) d\mathbf{X} \quad (3.37)$$

$$(3.38)$$

Le problème obtenu est un problème linéaire de $4 \times N$ équations pour 12 inconnues (les 6 paramètres extrinsèques de chacune des caméras) :

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} d\mathbf{a}^l \\ d\mathbf{a}^r \end{bmatrix} = \mathbf{b}(d\mathbf{X}) \quad (3.39)$$

Ainsi, en considérant plus de 3 points 3D, il sera possible d'estimer la variation de paramètres extrinsèques $d\mathbf{a}^p$ engendrée par un défaut de forme $d\mathbf{X}$.

Grâce à ce système linéaire, il est possible d'estimer l'impact d'une méconnaissance de forme $d\mathbf{X}$ sur la détermination des paramètres extrinsèques. Plus spécifiquement, si le modèle nominal est exploité pour l'autoétalonnage et que la pièce physique présente un défaut de forme, ce système linéaire permettra d'estimer l'erreur que pourrait induire l'autoétalonnage sur la mauvaise forme.

Une fois le modèle développé, il est important de vérifier sa validité. L'objet de la sous-section suivante consiste donc à confronter les résultats de ce modèle avec les résultats obtenus par corrélation d'images.

4.3.2 Validation du modèle retenu

Objectif de la section 4.3.2	
Confronter les résultats du modèle développé avec la variation de paramètres extrinsèques obtenue expérimentalement	
Étalonnage	
Modèles employés :	Géométrie mesurée par ATOS Core Géométrie nominale
Paramètres extrinsèques initiaux :	Jeux de solutions décalées de 30 pixels maximum par rapport à la projection de référence
Mesure de forme	
Non étudiée dans ce chapitre	

Afin de vérifier la validité du modèle linéaire développé dans la section 4.3, il est envisagé d'imposer une variation de forme sur la géométrie utilisée en entrée de l'autoétalonnage et de relever expérimentalement la variation de paramètres extrinsèques que cette dernière a induite.

Pour ce faire, l'autoétalonnage sera réalisé en se basant sur le modèle nominal mais également sur le modèle mesuré par le système ATOS Core. Dans chacun de ces cas envisagés, l'étalonnage sera réalisé successivement sur le mouchetis régulier puis sur le mouchetis aléatoire. Les calculs seront initialisés à partir de 10 jeux de paramètres extrinsèques induisant un décalage de 30 pixels maximum par rapport à la projection de référence.

Les figures 3.18 et 3.19 présentent alors les résultats lorsque l'autoétalonnage est réalisé sur la forme ATOS Core (appelé "Modèle mesuré" dans la légende d'axe) et la forme nominale. À titre informatif, les paramètres extrinsèques correspondant à la solution obtenue via TRITOP, à la solution de référence et aux différentes solutions d'initialisation sont également représentés sur ces figures.

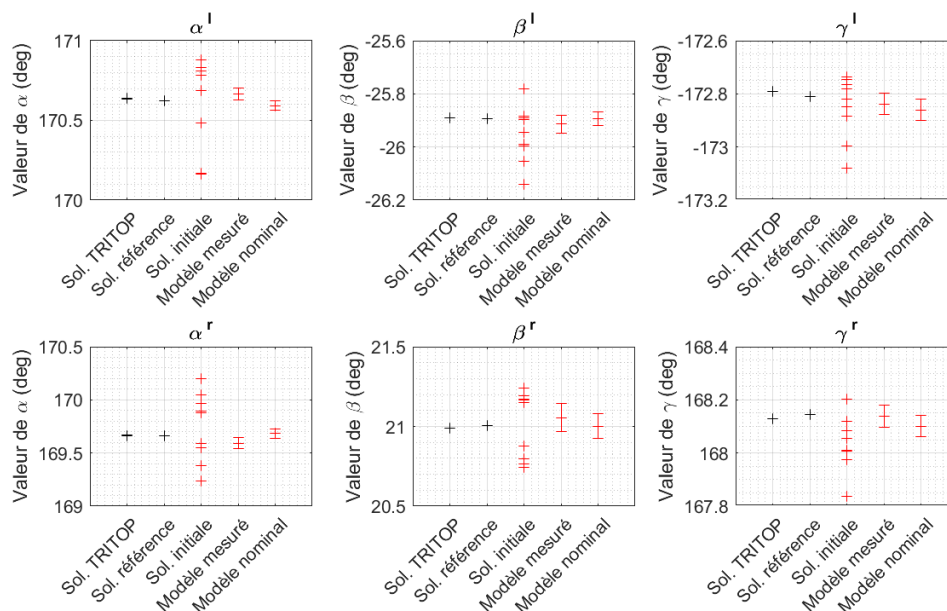


FIGURE 3.18 – Incertitudes sur les paramètres de rotation estimés par corrélation d'images sur le modèle mesuré ATOS et sur le modèle nominal

En étudiant ces résultats, plusieurs remarques peuvent être apportées. Pour commencer, les résultats après étalonnage par corrélation d'images possèdent une plus faible dispersion que les paramètres extrinsèques initiaux. En d'autres termes, même si les solutions initiales sont assez distinctes les unes des autres, l'autoétalonnage semble globalement converger vers la même solution (pour un modèle numérique donné). En revanche, la dispersion après convergence est évidemment non nulle puisque l'algorithme garde malgré tout une sensibilité à la solution initiale (voir section 4.2). La seconde remarque qui peut être apportée à ces figures porte sur la différence de résultats d'autoétalonnage selon si ce dernier s'appuie sur le modèle nominal ou le modèle mesuré. En effet, il est possible de distinguer visuellement un écart moyen sur les résultats, confortant l'idée que l'algorithme possède une sensibilité à la forme utilisée en entrée.

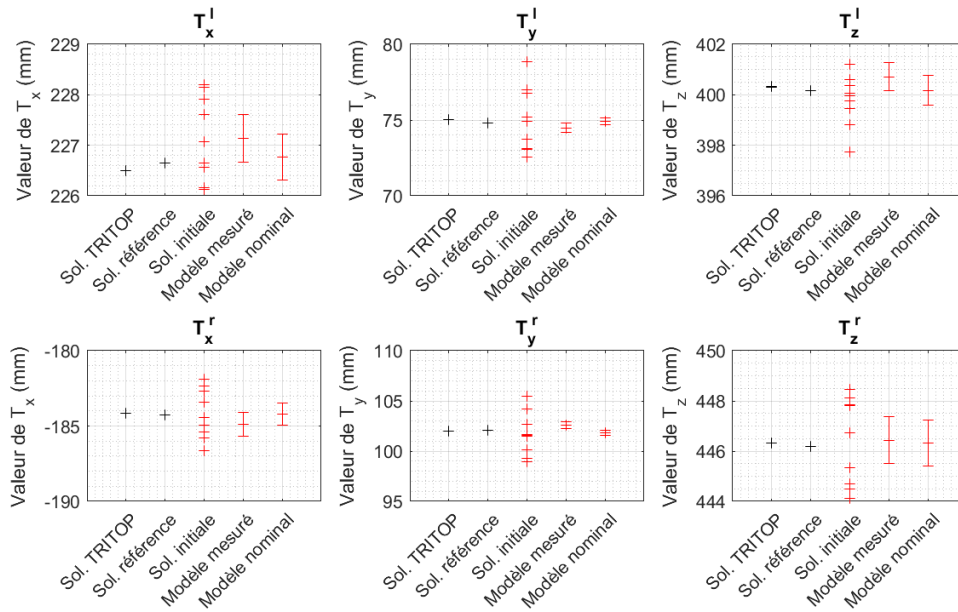


FIGURE 3.19 – Incertitudes sur les paramètres de translation estimés par corrélation d'images sur le modèle mesuré ATOS et sur le modèle nominal

Pour quantifier cette sensibilité, les écarts moyens $da^{experimental}$ ainsi obtenus entre le modèle nominal et le modèle mesuré sont conservés et présentés dans le tableau 3.5.

L'objectif de cette section visant à valider le modèle développé, il est désormais pertinent de comparer les écarts $da^{modèle}$ estimés par le modèle avec les écarts $da^{experimental}$. Pour ce faire, le système linéaire $\mathbf{A}d\mathbf{a} = \mathbf{b}(d\mathbf{X})$ est inversé en imposant comme variation de forme $d\mathbf{X}$ l'écart 3D entre le modèle nominal et le modèle mesuré par l'ATOS Core. L'ensemble des écarts de paramètres extrinsèques estimés par le modèle linéaire est présenté dans le tableau 3.5.

	Caméra gauche		Caméra droite	
	Écarts estimés $da^{modèle}$	Écarts obtenus $da^{experimental}$	Écarts estimés $da^{modèle}$	Écarts obtenus $da^{experimental}$
α (deg)	6.77×10^{-2}	8.96×10^{-2}	5.32×10^{-2}	-6.95×10^{-2}
β (deg)	-8.09×10^{-2}	-2.01×10^{-2}	1.78×10^{-1}	4.28×10^{-2}
γ (deg)	9.80×10^{-3}	1.05×10^{-2}	-3.57×10^{-2}	4.30×10^{-2}
t_x (mm)	-2.20×10^{-2}	3.51×10^{-2}	4.30×10^{-2}	-6.76×10^{-1}
t_y (mm)	-7.98×10^{-2}	-4.92×10^{-2}	-7.18×10^{-2}	2.73×10^{-1}
t_z (mm)	-2.84×10^{-1}	5.07×10^{-1}	-3.09×10^{-1}	6.60×10^{-2}

TABEAU 3.5 – Comparaison des variations de paramètres extrinsèques induits par une variation de forme $d\mathbf{X}$ estimés par le modèle et obtenus expérimentalement

En observant les résultats présentés dans le tableau 3.5, il est possible de remarquer que les écarts estimés par le modèle linéaire ne correspondent pas vraiment aux écarts obtenus expérimentalement, néanmoins leurs ordres de grandeur restent cohérents.

En analysant plus finement ces résultats et en les comparant à ceux du tableau 3.4, nous pouvons remarquer que les écarts que nous cherchons à observer sont du même ordre de grandeur que l'incertitude liée à la solution initiale. Ainsi, il est tout à fait cohérent de ne pas obtenir précisément les résultats estimés ; c'est pourquoi par la suite, le modèle mathématique développé ne sera pas exploité pour prédire des écarts de paramètres extrinsèques mais simplement pour estimer leurs ordres de grandeur.

Pour rappel, l'objectif de la section 4.3 vise à quantifier la sensibilité de l'algorithme d'étalonnage vis-à-vis de la forme utilisée en entrée. Pour caractériser cette sensibilité, nous nous intéresserons donc à la variation de paramètres intrinsèques engendrée par divers défauts de forme ; il ainsi est nécessaire d'étudier l'impact de nombreux défauts de forme variés pour obtenir une étude représentative.

De par la rapidité d'inversion du système linéaire (inférieure à 1 seconde), la caractérisation de la sensibilité des paramètres extrinsèques vis-à-vis du défaut de forme en entrée se fera en s'appuyant sur le modèle mathématique détaillé précédemment. La sous-section suivante présente donc le protocole mis en oeuvre ainsi que les résultats obtenus pour cette caractérisation.

4.3.3 Sensibilité des paramètres extrinsèques au défaut de forme

Puisque l'autoétalonnage se base généralement sur le modèle nominal, la présence d'un défaut de forme sur la pièce réelle peut induire un biais sur la détermination des paramètres extrinsèques. Or ce défaut de forme n'étant pas connu a priori, il est nécessaire d'analyser l'impact d'un grand nombre de défauts de forme différents afin d'étudier la sensibilité de l'algorithme dans un cas général. Pour ce faire, une méthode de Monte-Carlo est utilisée ici.

Le modèle mathématique développé dans la sous-section 4.3.1 est donc implémenté avec différents défauts de forme dX . Pour obtenir une étude représentative, 10 000 tirages sont ainsi effectués. Pour chacun des tirages, les 44 amplitudes modales correspondant aux modes déformants (du mode 7 au mode 50) sont choisies aléatoirement selon une loi uniforme. Enfin, pour garantir une cohérence des résultats, une amplification est effectuée sur le tirage pour que le défaut de forme global possède une amplitude totale de ± 3 mm. La figure 3.20 présente trois exemples de défauts de forme obtenus par ces tirages. Sur cette figure, il est possible de remarquer que les longueurs d'onde associées aux défauts ainsi obtenus sont variées, permettant de réaliser l'étude sur une vaste gamme de défauts de forme.

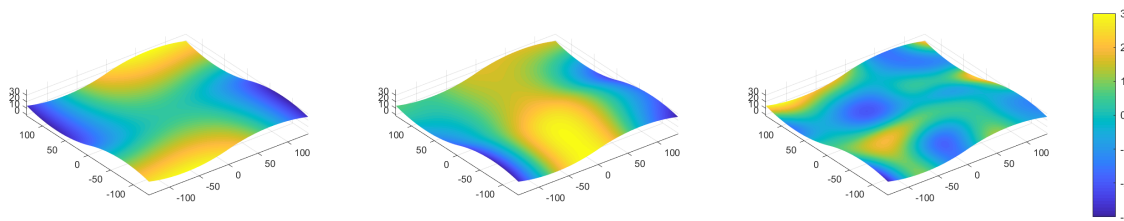


FIGURE 3.20 – Exemples de défauts de forme obtenus par tirage aléatoire

En inversant le système linéaire $\mathbf{A}\mathbf{d}\mathbf{a} = \mathbf{b}(d\mathbf{X})$ avec les défauts de forme ainsi obtenus, il est possible de calculer la moyenne et l'écart-type associés à chacun des paramètres extrinsèques; l'ensemble de ces résultats sont présentés dans le tableau 3.6.

	Caméra gauche		Caméra droite	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
α (deg)	170.594	6.74×10^{-2}	169.667	1.21×10^{-1}
β (deg)	-25.892	4.87×10^{-2}	21.003	9.24×10^{-2}
γ (deg)	-172.856	3.79×10^{-2}	168.102	5.59×10^{-2}
t_x (mm)	226.779	5.93×10^{-2}	-184.263	6.00×10^{-2}
t_y (mm)	74.974	3.59×10^{-2}	101.782	4.96×10^{-2}
t_z (mm)	400.144	1.26×10^{-1}	446.426	1.60×10^{-1}

TABLEAU 3.6 – Écart-type des paramètres extrinsèques estimés lorsque le défaut de forme de la pièce est de ± 3 mm

En analysant les données du tableau 3.6, il est possible de remarquer que la moyenne des paramètres extrinsèques obtenus correspond sensiblement aux paramètres déterminés par corrélation d'images sur le modèle nominal (voir figures 3.18 et 3.19). En d'autres termes, le biais $\mathbf{d}\mathbf{a}$ possède une moyenne quasiment nulle sur l'ensemble de ces 10 000 tirages, ce qui est cohérent avec la moyenne nulle de la distribution aléatoire uniforme utilisée pour les amplitudes modales.

Concernant les écarts-types associés aux variations de $\mathbf{d}\mathbf{a}$, ceux-ci sont du même ordre de grandeur que les incertitudes liées à la solution initiale. Ainsi, l'algorithme semble aussi sensible à la solution initiale qu'à la présence d'un défaut de forme non connu a priori.

5 Conclusion

Pour assurer que l'algorithme de déformation du modèle numérique puisse déterminer convenablement le défaut de forme de la pièce, des efforts ont été réalisés en amont pour rendre l'étalonnage plus robuste. Ainsi, une formulation explicite du problème a été proposée. Celle-ci, couplée avec une normalisation et des techniques de régularisation, a permis d'améliorer la convergence de l'étalonnage.

L'algorithme d'autoétalonnage proposé a ensuite été mis en œuvre sur une pièce test et comparé aux résultats obtenus avec un système de photogrammétrie de cibles. Pour permettre une comparaison directe des données issues des deux systèmes de mesure, un recalage a été réalisé. Celui-ci s'est alors basé sur une mesure dense de la pièce obtenue à l'aide d'un système à lumière structurée. Une fois la mesure dense de la pièce obtenue, il a alors été possible d'exprimer l'ensemble des résultats dans le repère \mathcal{R}_{CAO} grâce à un recalage ICP non rigide; permettant une comparaison directe des paramètres extrinsèques calculés à partir des deux systèmes de mesure.

En utilisant les paramètres extrinsèques calculés à partir des données de photogrammétrie, il a alors été possible d'initialiser l'algorithme de corrélation d'images. Dans un premier temps,

les calculs se sont appuyés sur le modèle mesuré de la pièce pour ne pas introduire de biais dans l'étalonnage induit par une méconnaissance de la forme en entrée.

En appliquant l'autoétalonnage explicite sur différents mouchetis, l'étude a permis de montrer qu'un mouchetis régulier permettait de converger plus facilement vers la solution recherchée même lorsque la solution initiale était éloignée de la solution attendue. Cependant sur ce type de mouchetis, la répétabilité des résultats est moins importante qu'avec un mouchetis aléatoire. Ainsi pour tirer avantage de chacun des motifs, la solution retenue a consisté à employer un mouchetis régulier puis d'utiliser les résultats obtenus après convergence sur ce motif pour initialiser les calculs avec un mouchetis aléatoire.

Enfin pour compléter la qualification des résultats d'autoétalonnage, une étude de l'impact de la forme sur la détermination des paramètres extrinsèques a été réalisée. Celle-ci visait à estimer l'erreur induite sur les paramètres extrinsèques liée à la méconnaissance à priori de la forme en entrée.

L'ensemble des résultats obtenus par autoétalonnage explicite étaient alors proches de ceux obtenus par photogrammétrie, avec des différences de quelques centièmes de degré pour les paramètres de rotations et quelques dixièmes de millimètre pour les paramètres de translation. Ces résultats sont encourageants puisqu'ils reposent uniquement sur l'analyse de 2 images et n'utilisent pas d'autre artefact d'étalonnage qu'un modèle numérique de la pièce. Bien que ces différences semblent faibles comparées aux distances caméras/pièce (erreur relative inférieure à 0.1 %), il est néanmoins nécessaire de quantifier l'impact de ces écarts dans l'espace 3D.

En effet, la caractérisation de la sensibilité de l'algorithme vis-à-vis de la solution initiale et de la forme en entrée donne accès à des incertitudes portant sur les paramètres extrinsèques. Or, la finalité de la méthode proposée consiste à mesurer le défaut de forme réellement présent sur la pièce. Ainsi, il est nécessaire de traduire les incertitudes portant sur les paramètres extrinsèques en incertitudes dans l'espace 3D.

En traduisant les incertitudes d'étalonnage en incertitude 3D, il sera possible de conclure sur la pertinence de l'autoétalonnage et des stratégies retenues vis-à-vis des erreurs que celles-ci peuvent induire sur l'identification du défaut de forme. Ainsi, le chapitre suivant consiste à étudier l'impact des incertitudes d'étalonnage sur l'estimation du défaut de forme.

Chapitre 4

Effet d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de forme

Sommaire

1	Introduction	99
2	Influence des paramètres extrinsèques sur la mesure d'un point 3D	102
3	Techniques usuelles de triangulation	103
3.1	Triangulation linéaire	104
3.2	Calcul du point milieu	105
3.3	Correction avec contrainte épipolaire	107
3.4	Correction avec approximation épipolaire	110
4	Comparaison des techniques de triangulation	111
4.1	Comparaison des champs 3D	113
4.1.1	Méthode polynomiale	113
4.1.2	Triangulation linéaire, méthode du point milieu et approximation de Sampson	114
4.2	Quantification de l'effet des approximations de triangulation sur la mesure de forme	114
5	Mise en relation avec la méthode de corrélation d'images	116
6	Exploitation des champs de triangulation	118
6.1	Conversion des incertitudes de paramètres extrinsèques en incertitude 3D	118
6.2	Impact des erreurs liées à l'autoétalonnage sur la mesure de forme	120
6.3	Indépendance des effets de l'étalonnage et des modes déformants	122
7	Conclusion	122

1 Introduction

Dans le chapitre 2, il a été montré qu'il était possible d'identifier le défaut de forme d'une pièce lorsque la position relative des caméras par rapport à celle-ci était correctement estimée.

Pour illustrer ce résultat, une pièce présentant un défaut de forme d'environ 2.5mm d'amplitude (voir figure 4.1(a)) a été mesurée par corrélation d'images et par un système à projection de franges. En exploitant la mesure par lumière structurée pour autoétalonner la paire stéréoscopique, le défaut de forme identifié par corrélation d'images était alors proche des résultats obtenus avec ce système de référence (l'écart-type des différences variait alors entre $18\mu\text{m}$ et $53\mu\text{m}$ selon la configuration de mesure adoptée [Etievant et al., 2020]). À titre d'exemple, la figure 4.1 (b) présente la différence de défaut de forme identifiée par ces deux approches dans l'une de ces configurations de mesure.

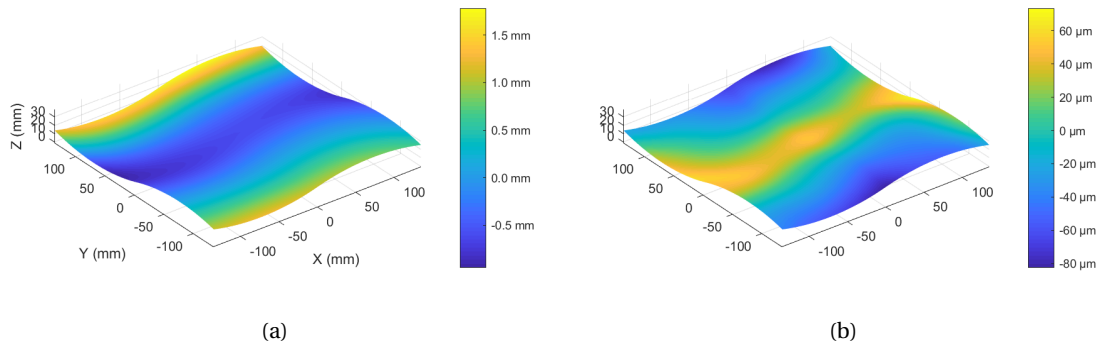


FIGURE 4.1 – Défaut de forme calculé par l'ICP non rigide [Thiébaud et al., 2018] avec 50 modes basé sur la mesure ATOS Core (a) et différence avec le défaut retrouvé par corrélation d'images en s'autoétalonnant sur la forme mesurée ATOS Core (b)

L'exploitation de la mesure par lumière structurée permet ici d'obtenir un modèle numérique proche de la géométrie réelle de la pièce physique. Ainsi, lorsque le modèle utilisé pour l'autoétalonnage est proche de la géométrie réelle de la pièce, il est possible d'identifier convenablement le défaut de forme.

Néanmoins dans le cas général, une mesure préalable de la pièce par un système extérieur n'est pas réalisée. Dans ce cas-ci, à défaut d'autre artefact d'étalonnage, il est nécessaire de s'appuyer sur la définition nominale de la surface. Le défaut de forme de la pièce physique n'étant pas connu a priori, l'utilisation du modèle nominal pourra introduire un biais sur l'identification des paramètres de pose du système.

Pour limiter l'impact de cette méconnaissance de forme sur les résultats d'étalonnage, une optimisation explicite des paramètres extrinsèques du système a été proposée dans le chapitre 3. Cette approche - couplée avec une technique de régularisation et appliquée successivement sur un mouchetis régulier puis sur un mouchetis aléatoire - a alors permis d'obtenir des résultats peu sensibles à la forme en entrée : pour la pièce d'étude, la différence de paramètres extrinsèques induite par l'utilisation du modèle nominal par rapport au modèle mesuré était alors inférieure à 9×10^{-2} degrés pour les paramètres de rotation et 7×10^{-1} mm pour les paramètres de translation.

Cette approche offrait également une sensibilité réduite de l'algorithme vis-à-vis de la solution initiale : la dispersion des paramètres extrinsèques obtenus en initialisant l'algorithme avec différentes solutions était inférieure à 7×10^{-2} degrés pour les rotations et 9×10^{-1} mm pour les translations.

Cependant, bien que l'identification des paramètres de pose du système ait été améliorée, il reste évidemment une incertitude sur les paramètres optimisés. Or, l'étape de déformation du modèle numérique se basant sur la connaissance de ces paramètres, une mauvaise identification de ceux-ci peut mener à des erreurs lors de la détermination du défaut de forme de la pièce physique.

Pour illustrer ce problème, il est possible d'identifier le défaut de forme de la pièce d'étude en s'appuyant sur les paramètres extrinsèques estimés avec le modèle nominal. La figure 4.2(a) présente la différence de défaut de forme estimée par cette approche comparée au défaut identifié par la mesure ATOS Core. L'allure de ces différences est similaire à celles calculées lorsque l'auto-étalonnage s'appuie sur le modèle mesuré (voir figure 4.1(b)), cependant les amplitudes sont ici légèrement supérieures. Pour mieux mettre en évidence l'influence du modèle numérique utilisé lors de l'étalonnage sur la détermination du défaut de forme, la figure 4.2(b) présente la variation de forme identifiée lorsque l'étalonnage s'appuie sur le modèle nominal comparé aux résultats obtenus en exploitant le modèle mesuré. Ainsi, l'utilisation de l'un ou l'autre de ces modèles lors de l'auto-étalonnage peut induire des différences lors de l'estimation du défaut de forme de l'ordre de $50\mu\text{m}$.

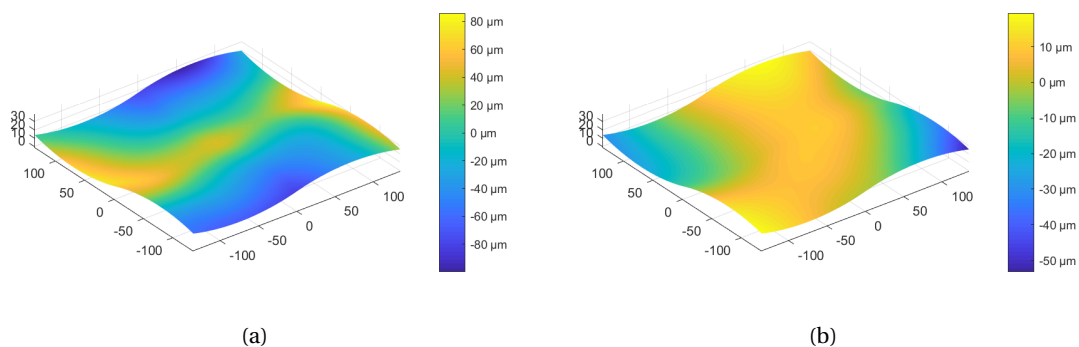


FIGURE 4.2 – Différence de défaut de forme identifié par ICP non rigide et par corrélation d'images (étalonnage sur modèle nominal) (a) et différence de défaut de forme identifié par corrélation d'images lorsque l'auto-étalonnage est appliqué sur la forme mesurée ATOS Core ou sur le modèle nominal (b)

La figure 4.2 illustre donc le fait que le biais introduit par la méconnaissance de la forme lors de l'étalonnage peut avoir un impact sur la mesure du défaut de forme. Pour s'assurer que les erreurs induites lors de l'étalonnage ne perturbent la mesure du défaut de forme, deux stratégies peuvent être envisagées :

- La première solution consiste à actualiser le modèle numérique pour progressivement diminuer le biais introduit dans l'étape d'étalonnage. Pour cela, les résultats de déformation du modèle numérique peuvent être utilisés pour actualiser la géométrie du modèle, puis ce dernier permettra de réaliser un nouvel étalonnage. En répétant ce bouclage plusieurs fois, le modèle numérique s'approchera de la géométrie réelle de la pièce, réduisant ainsi le biais introduit lors de l'auto-étalonnage. En pratique lorsque le modèle nominal est déformé lors de la première boucle, la modification de forme ne change que très peu les résultats de l'auto-étalonnage : l'étalonnage a convergé vers une solution donnée et la forme actualisée correspond à celle qui minimise le résidu de corrélation pour la configuration de mesure estimée. Ainsi cette stratégie ne semble pas fonctionner.

- Puisque l'optimisation indépendante des paramètres extrinsèques et des participations modales ne fonctionne pas, une autre solution consiste à coupler les deux problèmes. Pour réaliser l'étalonnage et l'actualisation du modèle numérique simultanément, il est nécessaire que ces deux problèmes partagent un formalisme commun. La solution envisagée consiste alors à déterminer l'effet de la variation de paramètres extrinsèques sur la géométrie 3D sous la forme de champs 3D.

L'objectif de ce chapitre consiste donc à représenter sous la forme de champs tridimensionnels l'effet d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de forme.

En plus de permettre le couplage des deux problèmes de corrélation d'images, l'introduction de champs 3D permettrait de convertir des incertitudes portant sur les paramètres extrinsèques en incertitude sur la mesure de forme.

Pour introduire cette notion de champs tridimensionnels, la section suivante traitera de l'influence d'une erreur de paramètre extrinsèque sur la mesure d'un unique point 3D. Après une présentation des techniques usuelles de triangulation, leur mise en œuvre et leur comparaison permettront de conclure quant à la pertinence de ces approches pour représenter l'effet d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de défaut de forme. Enfin, les champs 3D seront finalement exploités afin de traduire les incertitudes associées aux paramètres extrinsèques en incertitudes sur la mesure de forme.

2 Influence des paramètres extrinsèques sur la mesure d'un point 3D

Pour étudier l'impact que peut avoir une erreur d'étalonnage sur la détermination du défaut de forme, une première étape consiste à étudier l'influence que peut avoir une variation d'un des paramètres extrinsèques sur la mesure d'un point 3D. Pour que cette analyse ne dépende pas du mouchetis employé ou des éventuels minimums locaux que pourrait présenter le problème de corrélation d'images, ici une approche géométrique sera étudiée.

Supposons que les paramètres extrinsèques \mathbf{a}^l et \mathbf{a}^r aient été obtenus par autoétalonnage et notons \mathbf{x}_0^l et \mathbf{x}_0^r les coordonnées des projections du modèle nominal dans les repères images respectifs. L'ensemble des couples de points gauche et droit $(\mathbf{x}_0^l, \mathbf{x}_0^r)$ correspondent donc à la projection des points 3D dans les plans images permettant d'obtenir un résidu de corrélation minimal.

Posons l'hypothèse que la position "réelle" de la caméra droite soit correctement décrite par les paramètres extrinsèques \mathbf{a}^r mais que l'identification des paramètres de la caméra gauche soit entachée par une erreur $d\mathbf{a}^l$. La position correcte de la caméra gauche sera donc décrite par $\mathbf{a}^l + d\mathbf{a}^l$ (voir figure 4.3). Dans cette configuration, il est possible de déterminer l'impact de cette variation de paramètres extrinsèques sur la mesure de la géométrie 3D. Formulé différemment, cette problématique revient à rechercher la géométrie 3D permettant d'obtenir la même reprojec-tion de points 2D \mathbf{x}_0^l et \mathbf{x}_0^r dans cette nouvelle configuration de mesure.

Ainsi, une solution pour déterminer l'impact d'une erreur d'identification de paramètres extrinsèques sur la mesure de forme revient à trouver les coordonnées du nouveau point 3D \mathbf{X}_{new} qui

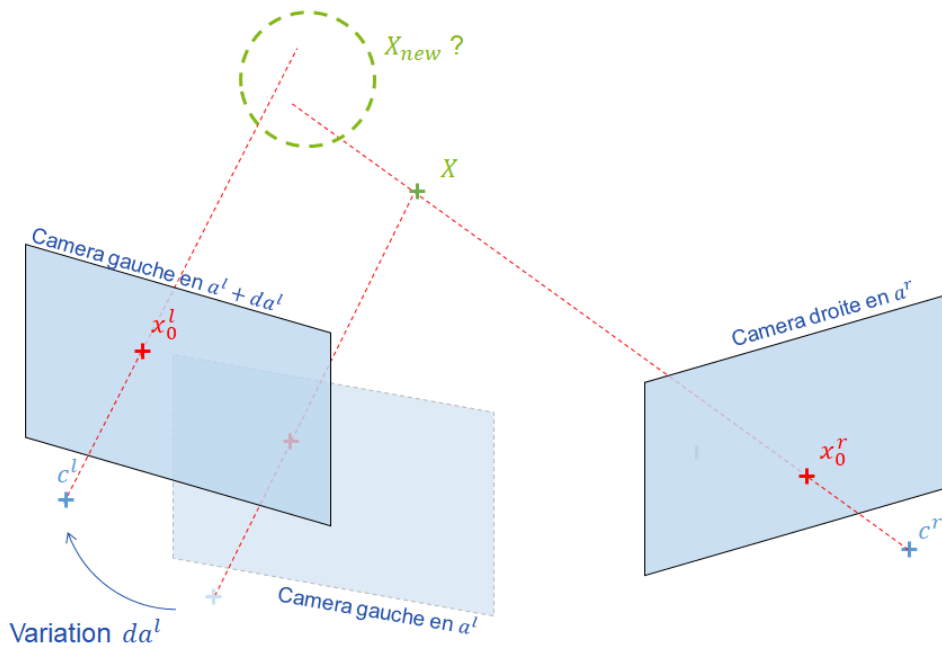


FIGURE 4.3 – Recherche de l'effet d'une variation de paramètres extrinsèques de la caméra gauche sur la mesure d'un point 3D

permettrait d'obtenir le même résidu de corrélation d'images, autrement dit qui une fois reprojété dans les plans images gauche et droite en $\mathbf{a}^l + d\mathbf{a}^l$ et \mathbf{a}^r donnerait les points 2D \mathbf{x}_0^l et \mathbf{x}_0^r .

Pour déterminer les coordonnées de ce point 3D, une possibilité consiste à trianguler le point \mathbf{x}_0^l exprimé en $\mathbf{a}^l + d\mathbf{a}^l$ avec le point \mathbf{x}_0^r en \mathbf{a}^r . De nombreuses techniques de triangulation existent; la section suivante vise donc à présenter les techniques usuellement employées. Celles-ci seront ensuite mises en œuvre et comparées pour déterminer laquelle est la plus pertinente pour représenter l'impact d'un défaut d'étalonnage sur la mesure de forme.

3 Techniques usuelles de triangulation

Les techniques de triangulation consistent à reconstruire un point 3D correspondant à un couple de points 2D ($\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r$) dans les caméras gauche et droite lorsque les positions relatives de celles-ci sont connues (parfois à un facteur d'échelle près).

Lorsque l'appariement des points 2D est parfait (c'est-à-dire lorsque les droites passant par les centres caméras et les points 2D respectifs s'intersectent), il existe un unique point 3D correspondant au couple ($\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r$) dans la configuration de mesure donnée. Dans ce cas, il n'y a pas d'ambiguïté sur la solution, le point 3D reconstruit est unique.

En revanche lorsque l'appariement n'est plus parfait, il n'y a plus de solution exacte. Pour déterminer les coordonnées d'un nouveau point 3D, il faut alors fixer un critère. Celui-ci peut être un critère algébrique, un critère géométrique dans l'espace 3D ou un critère géométrique dans l'espace 2D.

Ici, notre objectif consiste à déterminer la méthode de triangulation la plus pertinente pour calculer les coordonnées du point 3D \mathbf{X}_{new} connaissant le couple de points 2D $(\mathbf{x}_0^l, \mathbf{x}_0^r)$ et la position relative des caméras décrites par les paramètres extrinsèques $\mathbf{a}^l + d\mathbf{a}^l$ et \mathbf{a}^r .

Ainsi, cette section présente plusieurs techniques classiquement employées en triangulation, leurs avantages et leurs limites afin d'établir la stratégie de reconstruction la plus pertinente par rapport à notre problème.

3.1 Triangulation linéaire

Une première approche de triangulation consiste à déterminer les coordonnées du point 3D qui minimisent une erreur algébrique [Faugeras, 1992, Hartley et al., 1992]. Pour cela, il suffit de repartir de l'équation de projection :

$$s_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_1^T \\ \mathbf{m}_2^T \\ \mathbf{m}_3^T \end{bmatrix} \mathbf{X}_i \quad (4.1)$$

En éliminant le facteur d'échelle s_i grâce à la troisième ligne de l'équation de projection, il vient :

$$\begin{cases} x_i = \frac{m_{11}X_i + m_{12}Y_i + m_{13}Z_i + m_{14}}{m_{31}X_i + m_{32}Y_i + m_{33}Z_i + m_{34}} \\ y_i = \frac{m_{21}X_i + m_{22}Y_i + m_{23}Z_i + m_{24}}{m_{31}X_i + m_{32}Y_i + m_{33}Z_i + m_{34}} \end{cases} \quad (4.2)$$

Cette équation peut alors être réécrite sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \mathbf{m}_1^T \cdot \mathbf{X}_i - x_i \mathbf{m}_3^T \mathbf{X}_i = 0 \\ \mathbf{m}_2^T \cdot \mathbf{X}_i - y_i \mathbf{m}_3^T \mathbf{X}_i = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Pour un couple de points gauche et droit de coordonnées $(x_i^l, y_i^l, 1)$ dans le repère image gauche et $(x_i^r, y_i^r, 1)$ dans le repère image droite, en notant \mathbf{M}^l et \mathbf{M}^r leur matrice de transformation associée, le système obtenu possède 4 équations pour 3 inconnues, se réécrivant sous la forme d'un système linéaire $\mathbf{A}\mathbf{X}_i = \mathbf{0}$ avec :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} (\mathbf{m}_1^l - x_i^l \mathbf{m}_3^l)^T \\ (\mathbf{m}_2^l - y_i^l \mathbf{m}_3^l)^T \\ (\mathbf{m}_1^r - x_i^r \mathbf{m}_3^r)^T \\ (\mathbf{m}_2^r - y_i^r \mathbf{m}_3^r)^T \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Une solution approchée du système $\mathbf{A} \cdot \mathbf{X}_i = \mathbf{0}$ peut alors être obtenue en adoptant une minimisation au sens des moindres carrés via une pseudo-inverse ou une approximation par décomposition en valeur singulière (SVD) [Rothwell et al., 1997].

Cette approche comporte de nombreux avantages. Tout d'abord, elle est facilement généralisable dans le cas où plus de deux caméras sont utilisées (pour N caméras, la matrice \mathbf{A} obtenue sera de taille $2N \times 4$). De plus, cette méthode est simple et rapide à résoudre, particulièrement lorsque les distances des caméras à la pièce sont équivalentes [Scholefield et al., 2019]. Enfin, lorsque le problème de triangulation est mal conditionné, la robustesse de l'algorithme peut être améliorée en appliquant une normalisation des points dans l'espace 2D [Hartley, 1997].

En revanche, l'inconvénient majeur de cette approche vient de son critère de minimisation : puisque celle-ci repose sur la minimisation d'une erreur algébrique, le résidu obtenu après résolution du système linéaire n'a pas d'interprétation dans l'espace 3D ou dans chacun des espaces images. Ainsi, il sera difficile de conclure quant à la pertinence du résultat trouvé.

Pour pallier ce problème, une stratégie de triangulation basée sur un critère géométrique dans l'espace 3D peut être envisagée. La sous-section suivante présente donc l'une de ces approches appelée méthode du point milieu.

3.2 Calcul du point milieu

Lorsque l'appariement des points 2D n'est pas parfait, les droites passant par les centres caméra et les points 2D ne s'intersectent pas. Ainsi, une approche communément évoquée en triangulation consiste à rechercher le point 3D correspondant au milieu de la perpendiculaire commune à ces deux droites [Rothwell et al., 1997, Beardsley et al., 1997] (voir figure 4.4).

Pour déterminer les coordonnées de ce point 3D, notons :

- \mathbf{v}_1 les coordonnées du vecteur 3D reliant le centre caméra gauche \mathbf{c}^l au point 2D de coordonnées \mathbf{x}^l dans le repère image gauche (exprimées dans le repère caméra gauche) ;
- \mathbf{v}_2 les coordonnées du vecteur 3D reliant le centre caméra droite \mathbf{c}^r au point 2D de coordonnées \mathbf{x}^r dans le repère image droite (exprimées dans le repère caméra gauche) ;
- \mathbf{v}_3 les coordonnées du vecteur 3D reliant le centre caméra gauche \mathbf{c}^l au centre caméra droite \mathbf{c}^r (exprimé dans le repère caméra gauche).

Les coordonnées 3D du point $\mathbf{X}_{MidPoint}$ dans le repère caméra gauche s'expriment alors aisément par une combinaison linéaire :

$$\mathbf{X}_{MidPoint} = \frac{\alpha \mathbf{v}_1 + \beta \mathbf{v}_2 + \mathbf{v}_3}{2} \quad (4.5)$$

Pour déterminer les coordonnées du point 3D recherché, il suffit donc de déterminer les inconnues α et β . Pour cela, en notant \wedge le produit vectoriel, il est alors possible d'écrire la fermeture vectorielle suivante :

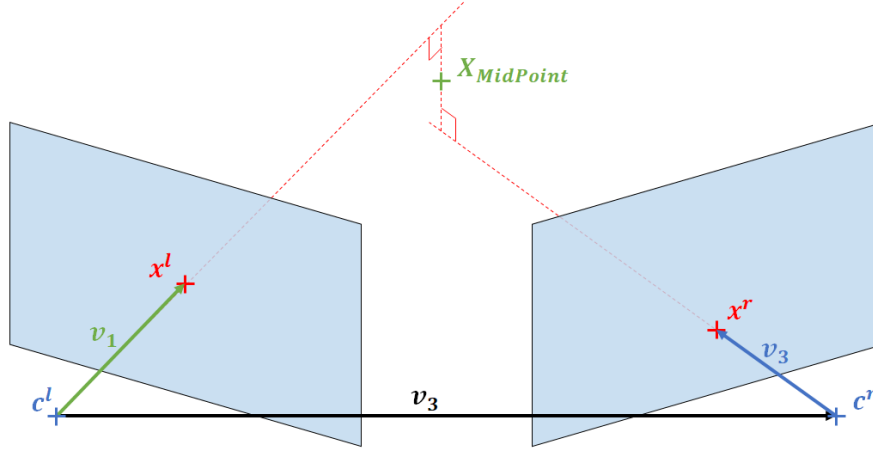


FIGURE 4.4 – Principe de l'algorithme du point milieu

$$\alpha \mathbf{v}_1 + \gamma \mathbf{v}_1 \wedge \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_3 + \beta \mathbf{v}_2 \quad (4.6)$$

La fermeture vectorielle (équation 4.6) peut ensuite être projetée selon les vecteurs \mathbf{v}_1 et \mathbf{v}_2 . Il vient alors les deux équations suivantes :

$$\begin{cases} \alpha \mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_3^T \cdot \mathbf{v}_1 + \beta \mathbf{v}_2^T \cdot \mathbf{v}_1 \\ \alpha \mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_3^T \cdot \mathbf{v}_2 + \beta \mathbf{v}_2^T \cdot \mathbf{v}_2 \end{cases} \quad (4.7)$$

Par combinaison linéaire des deux équations précédentes, il est possible d'obtenir l'expression des inconnues α et β :

$$\begin{cases} \alpha = \frac{(\mathbf{v}_3^T \cdot \mathbf{v}_1)(\mathbf{v}_2^T \cdot \mathbf{v}_2) - (\mathbf{v}_3^T \cdot \mathbf{v}_2)(\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_2)}{(\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_1)(\mathbf{v}_2^T \cdot \mathbf{v}_2) - (\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_2)^2} \\ \beta = \frac{(\mathbf{v}_3^T \cdot \mathbf{v}_2)(\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_1) - (\mathbf{v}_3^T \cdot \mathbf{v}_1)(\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_2)}{(\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_1)(\mathbf{v}_2^T \cdot \mathbf{v}_2) - (\mathbf{v}_1^T \cdot \mathbf{v}_2)^2} \end{cases} \quad (4.8)$$

Pour obtenir les coordonnées du point 3D, il suffit d'exprimer les différents vecteurs \mathbf{v}_1 , \mathbf{v}_2 et \mathbf{v}_3 en fonction des coordonnées des points 2D \mathbf{x}^l et \mathbf{x}^r . Pour cela, il suffit de repartir de la décomposition de la matrice de transformation \mathbf{M}^p en matrice intrinsèque et matrice extrinsèque :

$$\mathbf{M}^p = \begin{bmatrix} \mathbf{K}^p & \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}^p & \mathbf{t}^p \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

En exprimant les différents vecteurs dans le repère associé à la caméra gauche, il vient :

$$\mathbf{v}_1 = \begin{bmatrix} (\mathbf{K}^l)^{-1} \mathbf{x}^l \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{v}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^l (\mathbf{R}^r)^T (\mathbf{K}^r)^{-1} \mathbf{x}^r \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{v}_3 = \begin{bmatrix} -\mathbf{R}^l (\mathbf{R}^r)^T \mathbf{t}^r + \mathbf{t}^l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Ainsi, en connaissant les paramètres intrinsèques et extrinsèques des différentes caméras, il est possible de déterminer les coordonnées du point 3D $\mathbf{X}_{MidPoint}$ à partir de \mathbf{x}^l et \mathbf{x}^r .

Tout comme l'approche linéaire, l'algorithme de calcul du point milieu est relativement simple à mettre en œuvre. De plus, il permet d'obtenir des résultats cohérents lorsque les paramètres intrinsèques des caméras sont déjà connus, même approximativement [Beardsley et al., 1997].

En revanche lorsque les caméras ne sont pas préalablement étalonnées, le calcul du point milieu ne permet pas de reconstruire convenablement le point 3D. En effet cet algorithme ne possède pas de propriété d'invariance vis-à-vis de transformation affine ou projective, c'est pourquoi elle est souvent déconseillée lorsque les paramètres intrinsèques du système ne sont pas connus [Hartley, 1992]. Dans le cadre de ces travaux de thèse, les paramètres intrinsèques étant déjà estimés en amont de la mesure, ces limitations ne seront donc pas une difficulté.

3.3 Correction avec contrainte épipolaire

Une autre technique possible consiste à utiliser les propriétés épipolaires des images pour retrouver le point 3D correspondant à un couple de points 2D [Hartley and Sturm, 1997].

Lorsque deux points 2D $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ sont parfaitement appariés, les deux droites passant par les centres caméras et les points 2D s'intersectent. Il est alors possible de construire le plan défini par ces deux droites passant par les centres caméra : ce plan sera appelé plan épipolaire (voir figure 4.5). Notons $\hat{\eta}^l$ (respectivement $\hat{\eta}^r$) la droite d'intersection entre le plan épipolaire et le plan caméra gauche (respectivement plan caméra droite). Par la suite, ces droites seront appelées droites épipolaires. Enfin, le terme épipole fera référence à l'intersection de la droite reliant les deux centres caméras avec chacun des plans caméra.

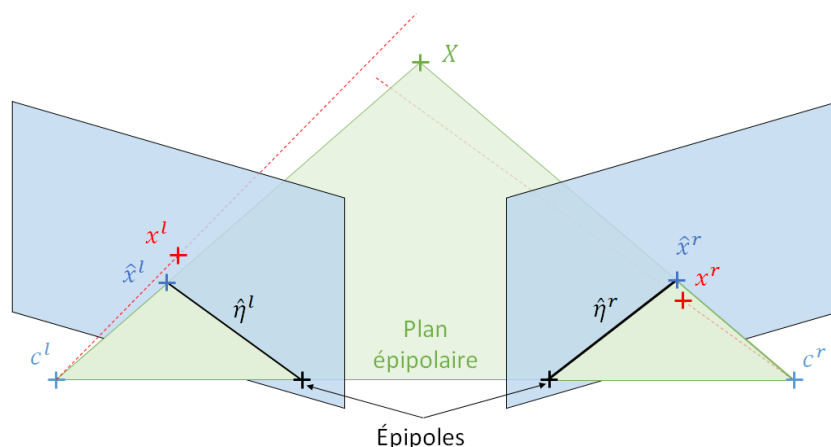


FIGURE 4.5 – Illustration de triangulation par contrainte épipolaire.

Ainsi lorsque deux points $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ correspondent à un unique point 3D, ils appartiennent au même plan épipolaire. Cette contrainte peut alors être écrite mathématiquement en introduisant

la matrice fondamentale \mathbf{F} associée aux caméras gauche et droite [Hartley, 1992]. Cette matrice encapsule les informations relatives aux paramètres extrinsèques de chacune des caméras ainsi que leur position et orientation relative. Pour ne pas alourdir la lecture de ce document, l'expression de la matrice ne sera pas donnée ici mais pourra être retrouvée dans les travaux de [Longuet-Higgins, 1981]. Le respect de la contrainte épipolaire s'écrit alors mathématiquement :

$$(\hat{\mathbf{x}}^r)^T \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}^l = 0 \quad (4.11)$$

En revanche pour un couple de points $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$, si ceux-ci ne sont pas correctement appairés, ils ne respectent pas la contrainte épipolaire : $(\mathbf{x}^r)^T \mathbf{F} \mathbf{x}^l \neq 0$. Une stratégie de triangulation consiste donc à chercher les points 2D $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ les plus proches de \mathbf{x}^l et \mathbf{x}^r qui respectent la contrainte épipolaire (équation 4.11).

Une fois le couple de points corrigés $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ déterminé, le point 3D correspondant peut être calculé de manière exacte par triangulation.

Par définition, les points $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ appartiennent au même plan épipolaire, également composé des droites $\hat{\eta}^l$ et $\hat{\eta}^r$ (voir figure 4.5). Ainsi, la recherche des points $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ revient à déterminer l'équation des droites épipolaires "les plus proches" des points initiaux $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$. Pour cela, il faut calculer les distances entre $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$ et $(\hat{\eta}^l, \hat{\eta}^r)$ puis déterminer un critère de minimisation.

Pour simplifier les expressions des calculs qui vont suivre, le problème peut être modifié en appliquant des transformations rigides \mathbf{T}^l et \mathbf{T}^r afin de placer l'origine des nouveaux repères sur $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ ($\hat{\mathbf{x}}^l = \hat{\mathbf{x}}^r = [0, 0, 1]^T$ dans leur repère respectif) et pour placer les épiholes aux points de coordonnées $[1, 0, f^l]^T$ et $[1, 0, f^r]^T$. La matrice fondamentale dans ces nouveaux repères est alors :

$$\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{T}^r \mathbf{F} (\mathbf{T}^l)^{-1} \quad (4.12)$$

Dans ce nouveau repère, il est plus aisé de déterminer l'équation des droites épipolaires. Considérons la droite épipolaire $\hat{\eta}^l(t)$ dans l'image de gauche passant par le point de coordonnées $[0, t, 1]^T$. Le vecteur représentant cette droite est alors obtenu en calculant le produit vectoriel (noté \wedge dans ce document) entre les coordonnées de ce point considéré et l'épihole :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ t \\ 1 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ f^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t f^l \\ 1 \\ -t \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

La distance du point \mathbf{x}^l à la droite épipolaire $\hat{\eta}^l(t)$ est :

$$d(\mathbf{x}^l, \hat{\eta}^l(t)) = \sqrt{\frac{t^2}{1 + (tf)^2}} \quad (4.14)$$

Une fois la distance $d(\mathbf{x}^l, \hat{\eta}^l(t))$ déterminée, il faut calculer la distance entre la droite épipolaire correspondante $\hat{\eta}^r(t)$ et le point \mathbf{x}^r . Pour cela, il faut s'appuyer sur la définition de la matrice

fondamentale. En s'appuyant sur la définition des épipoles, il vient :

$$\tilde{\mathbf{F}} [1, 0, f^l]^T = [0, 0, 0]^T \quad (4.15)$$

$$[1, 0, f^r] \tilde{\mathbf{F}} = [0, 0, 0]^T \quad (4.16)$$

permettant ainsi de simplifier l'expression de la matrice fondamentale :

$$\tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} f^l f^r d & -f^r c & -f^r d \\ -f^l b & a & b \\ -f^l d & c & d \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

La droite épipolaire dans la seconde image $\hat{\eta}^r(t)$ correspondant au point $[0, t, 1]^T$ de la première image est $\hat{\eta}^r(t) = \tilde{\mathbf{F}} [0, t, 1]^T = [-f^l(ct+d), at+b, ct+d]^T$. Ainsi, la distance entre l'origine \mathbf{x}^r et cette droite est :

$$d(\mathbf{x}^r, \hat{\eta}^r(t)) = \sqrt{\frac{(ct+d)^2}{(at+b)^2 + (f^r(ct+d))^2}} \quad (4.18)$$

Une fois les distances $d(\mathbf{x}^l, \hat{\eta}^l(t))$ et $d(\mathbf{x}^r, \hat{\eta}^r(t))$ exprimées en fonction d'une seule inconnue t , il ne reste plus qu'à choisir le critère de minimisation. En supposant que le défaut d'appariement des points 2D suit un bruit gaussien, le critère le plus pertinent pour minimiser l'impact de ce bruit consiste à minimiser la somme des carrés de l'erreur 2D :

$$s_1(t) = d(\mathbf{x}^l, \hat{\eta}^l(t))^2 + d(\mathbf{x}^r, \hat{\eta}^r(t))^2 = \frac{t^2}{1 + (tf)^2} + \frac{(ct+d)^2}{(at+b)^2 + (f^r(ct+d))^2} \quad (4.19)$$

En dérivant l'expression de $s_1(t)$ et en imposant cette dérivée nulle pour trouver les extremums de la fonction coût, il vient un polynôme de degré 6 :

$$s_1'(t) = 0 \iff t \left((at+b)^2 + f^{r2}(ct+d)^2 \right)^2 - (ad-bc)(1+(tf^l)^2)^2 (at+b)(ct+d) = 0 \quad (4.20)$$

Il suffit alors d'évaluer le polynôme $s_1(t)$ et utilisant les racines réelles du polynôme obtenu dans l'équation 4.20 pour trouver le minimum global de la fonction coût. Cela permet alors de déterminer les coordonnées des points 2D corrigés $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ qui respectent la contrainte épipolaire et minimisant le critère des moindres carrés de l'erreur 2D. Ensuite, comme les points 2D trouvés respectent la contrainte épipolaire, une triangulation linéaire peut être employée pour trouver le point 3D \mathbf{X} correspondant. Dans la suite du document, cette méthode sera appelée méthode polynomiale.

Cette méthode polynomiale est invariante par transformation affine ou projective, permettant la reconstruction de points 3D même avec des caméras non étalonnées mais nécessite néanmoins de connaître la matrice fondamentale de la paire stéréoscopique. De plus, cette méthode permet également d'obtenir des erreurs de reprojection 2D faibles en présence de bruit gaussien.

En revanche, l'inconvénient majeur de cette approche vient de son temps de calcul. En effet, lorsque plusieurs couples de points $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$ doivent être triangulés, il faut systématiquement recalculer les transformations rigides \mathbf{T}^l et \mathbf{T}^r (équation 4.12), changeant alors la matrice fondamentale transformée $\tilde{\mathbf{F}}$ et donc tous les coefficients du polynôme $s_1(t)$. De plus, l'erreur de reconstruction 3D peut devenir plus importante que les méthodes de triangulation déjà présentées lorsque les points appairés sont trop éloignés de la contrainte épipolaire (de l'ordre de quelques pixels) [Hartley and Sturm, 1997].

Pour éviter ce genre de problème et simplifier la recherche de correspondant $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$, une dernière solution consiste non plus à vérifier exactement la contrainte épipolaire mais à l'approximer. La sous-section suivante présente la correction des points 2D avec la prise en compte de cette approximation épipolaire.

3.4 Correction avec approximation épipolaire

La dernière approche présentée ici consiste une nouvelle fois à déterminer la correction à appliquer aux points $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$ pour que les points corrigés $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ respectent la contrainte épipolaire $(\hat{\mathbf{x}}^r)^T \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}^l = 0$. Néanmoins pour limiter la complexité de calcul associée au respect de la contrainte épipolaire et accélérer ainsi l'obtention des résultats de triangulation, la contrainte épipolaire sera approximée. Pour cela, l'approximation de Sampson (approximation au premier ordre) sera utilisée [Hartley and Sturm, 1997].

Supposons que le couple $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ corresponde aux points les plus proches de $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$ respectant la contrainte épipolaire. Pour simplifier l'écriture du problème, introduisons \mathbf{Z} et $\hat{\mathbf{Z}}$ les vecteurs contenant les coordonnées respectives des points $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$ et $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ et notons ϵ l'erreur de reprojection épipolaire.

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= [x^l, y^l, x^r, y^r]^T \\ \hat{\mathbf{Z}} &= [\hat{x}^l, \hat{y}^l, \hat{x}^r, \hat{y}^r]^T \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \epsilon(\mathbf{Z}) &= (\mathbf{x}^r)^T \mathbf{F} \mathbf{x}^l \\ \epsilon(\hat{\mathbf{Z}}) &= (\hat{\mathbf{x}}^r)^T \mathbf{F} \hat{\mathbf{x}}^l = 0 \end{aligned} \quad (4.22)$$

L'idée de l'approximation de Sampson consiste à linéariser l'erreur $\epsilon(\hat{\mathbf{Z}})$ en \mathbf{Z} et estimer la correction $(\hat{\mathbf{Z}} - \mathbf{Z})$ grâce à cela. Comme évoqué précédemment, l'approximation de Sampson est une approximation au premier ordre de l'erreur ϵ :

$$\epsilon(\hat{\mathbf{Z}}) \approx \epsilon(\mathbf{Z}) + \underbrace{\frac{\partial \epsilon(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}}}_{\mathbf{J}} (\hat{\mathbf{Z}} - \mathbf{Z}) \quad (4.23)$$

En se basant sur le fait que, par définition, les points $\hat{\mathbf{x}}^l$ et $\hat{\mathbf{x}}^r$ respectent la contrainte épipolaire, il vient :

$$\epsilon(\hat{\mathbf{Z}}) = 0 \approx \epsilon(\mathbf{Z}) + \mathbf{J} (\hat{\mathbf{Z}} - \mathbf{Z}) \quad (4.24)$$

d'où

$$\epsilon(\mathbf{Z}) \approx -\mathbf{J}(\hat{\mathbf{Z}} - \mathbf{Z}) \quad (4.25)$$

Pour minimiser l'écart $(\hat{\mathbf{Z}} - \mathbf{Z})$ selon un critère des moindres carrés, il suffit alors d'utiliser une pseudo-inverse pour obtenir :

$$(\hat{\mathbf{Z}} - \mathbf{Z}) \approx -\mathbf{J}^T (\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1} \epsilon(\mathbf{Z}) \quad (4.26)$$

En repartant de la définition de la matrice \mathbf{J} (voir équation 4.24), il est possible d'exprimer chacune de ces composantes :

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \epsilon(\mathbf{Z})}{\partial \mathbf{Z}} = \frac{\partial ((\mathbf{x}^r)^T \mathbf{F} \mathbf{x}^l)}{\partial \mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} x^r + \mathbf{F}_{21} y^r + \mathbf{F}_{31} \\ \mathbf{F}_{12} x^r + \mathbf{F}_{22} y^r + \mathbf{F}_{32} \\ \mathbf{F}_{11} x^l + \mathbf{F}_{12} y^l + \mathbf{F}_{13} \\ \mathbf{F}_{21} x^l + \mathbf{F}_{22} y^l + \mathbf{F}_{23} \end{bmatrix}^T \quad (4.27)$$

En notant que \mathbf{J} est un vecteur, $(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)$ est un scalaire donc $(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ également. Ainsi, d'après l'équation 4.26, il vient :

$$\hat{\mathbf{Z}} = \mathbf{Z} - \mathbf{J}^T \frac{\epsilon(\mathbf{Z})}{\mathbf{J}\mathbf{J}^T} \quad (4.28)$$

permettant d'obtenir une approximation au premier ordre des coordonnées $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}^l \\ \hat{y}^l \\ \hat{x}^r \\ \hat{y}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^l \\ y^l \\ x^r \\ y^r \end{bmatrix} - \frac{(\mathbf{x}^r)^T \mathbf{F} \mathbf{x}^l}{\mathbf{J}\mathbf{J}^T} \mathbf{J}^T \quad (4.29)$$

De manière analogue à la section précédente, une fois les coordonnées $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ déterminées, il suffit de réaliser une triangulation linéaire pour remonter à la position 3D du point recherché. Il est néanmoins important de noter que, de par la linéarisation au premier ordre (équation 4.23), les points calculés $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ ne respectent pas exactement la contrainte épipolaire.

Du fait de la linéarisation au premier ordre (équation 4.23), la détermination des coordonnées corrigées $(\hat{\mathbf{x}}^l, \hat{\mathbf{x}}^r)$ est beaucoup plus rapide à calculer que pour la méthode polynomiale. En revanche, pour que la linéarisation ait du sens, il faut que les points $(\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r)$ soient suffisamment proches de la contrainte épipolaire.

4 Comparaison des techniques de triangulation

Dans la section précédente, deux méthodes de triangulation ont été présentées (l'approche linéaire et la méthode du point milieu) ainsi que deux techniques de correction de points 2D (la méthode polynomiale et la méthode basée sur l'approximation de Sampson). Le but de cette nou-

velle section consiste donc à déterminer la méthode la plus pertinente pour représenter l'impact d'une erreur de paramètre extrinsèque sur la mesure de défaut de forme.

Pour illustrer les propos avancés, dans la suite de ce document les différentes techniques de triangulation seront mises en œuvre en exploitant le modèle numérique de la pièce d'étude présentée dans les chapitres précédents. Même si l'ensemble des résultats sera présenté sur cette pièce, il est important de noter que la méthodologie proposée pourra être appliquée de manière similaire pour toute autre pièce.

L'objectif de ce chapitre consistant à créer des champs tridimensionnels pour représenter l'impact d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de défaut de forme, il est nécessaire de vérifier la validité de chacune des méthodes de triangulation pour la détermination de ces champs.

Pour chacune des méthodes de triangulation retenue, il est possible de reconstruire un point 3D à partir de la connaissance d'un couple de points 2D. Cette opération peut être répétée pour N couples de points 2D. Dans ce document, les N couples de points 2D $(\mathbf{x}_0^l, \mathbf{x}_0^r)$ correspondront aux projections des points 3D \mathbf{X} du modèle nominal dans chacun des plans image lorsque les positions relatives des caméras par rapport au modèle sont décrites par les paramètres extrinsèques \mathbf{a}^l et \mathbf{a}^r .

En modifiant les paramètres extrinsèques de la caméra gauche d'une variation $d\mathbf{a}^l$, il est alors possible de trianguler les points 2D déterminés précédemment dans cette nouvelle configuration de mesure pour obtenir les coordonnées des nouveaux points 3D \mathbf{X}_{new} . Ainsi, pour une variation $d\mathbf{a}^l$ donnée, il sera possible d'obtenir un ensemble de N vecteurs 3D définis par chacun des points \mathbf{X} et \mathbf{X}_{new} . L'ensemble de ces vecteurs forme alors un champ et correspond donc à une approximation de la variation des points 3D $d\mathbf{X}$ induite par une variation de paramètre extrinsèque $d\mathbf{a}^l$. Dans la suite de ce document, ce champ sera noté $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l}$ (voir figure 4.6).

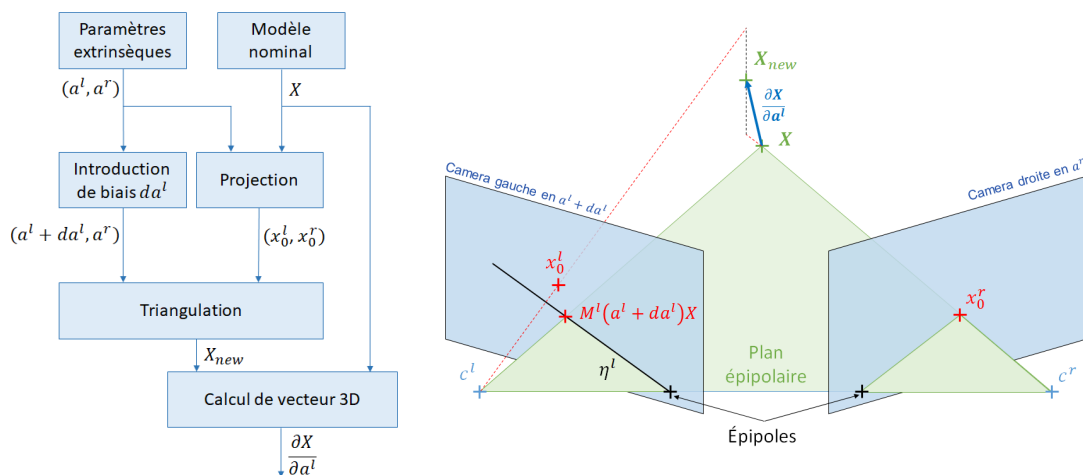


FIGURE 4.6 – Détermination d'un vecteur du champ 3D $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l}$

Pour pouvoir comparer les méthodes de triangulation, les différents champs 3D $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l}$ seront calculés pour des variations de paramètre extrinsèque de 0.1 degré pour les paramètres de rotation et 0.1 mm pour les paramètres de translation.

Ces variations $d\mathbf{a}^l$ induisent alors des variations de projection dans l'espace image de l'ordre

de quelques pixels, permettant la mise en évidence de ces effets dans l'espace 3D sans remettre en question l'hypothèse de linéarisation introduite dans la section 3.4.

Enfin pour ne garder que la contribution des erreurs d'étalonnage sur la mesure de forme, les champs 3D $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l}$ seront projetés selon la normale locale. Par abus de notation, ces champs projetés seront notés $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l} \cdot \mathbf{n})$. Les projections selon la normale locale de l'ensemble des champs calculés avec les quatre méthodes de triangulation sont présentées en annexe E, F, G et H.

4.1 Comparaison des champs 3D

4.1.1 Méthode polynomiale

Une première observation des différents champs présentés en annexe G permet de mettre en lumière un premier phénomène : la méthode polynomiale donne des résultats discontinus dans l'espace 3D.

L'importance de ces discontinuités dépend essentiellement de la direction de variation de projection $d\mathbf{x}^l = \mathbf{M}^l(\mathbf{a}^l + d\mathbf{a}^l)\mathbf{X} - \mathbf{x}_0^l$ (voir figure 4.6). Si celles-ci sont quasiment parallèles aux droites épipolaires η^l , la contrainte épipolaire reste approximativement respectée. Dans ce cas-ci la méthode polynomiale n'apporte que très peu de correction et les discontinuités 3D sont alors très peu visibles (par exemple dans le cas de la translation selon l'axe X, voir figure 4.7(a)). Dans le cas contraire, la contrainte épipolaire n'est plus respectée et les discontinuités 3D deviennent extrêmement marquées, notamment sur le champ $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_y^l}$ (voir figure 4.7(b)).

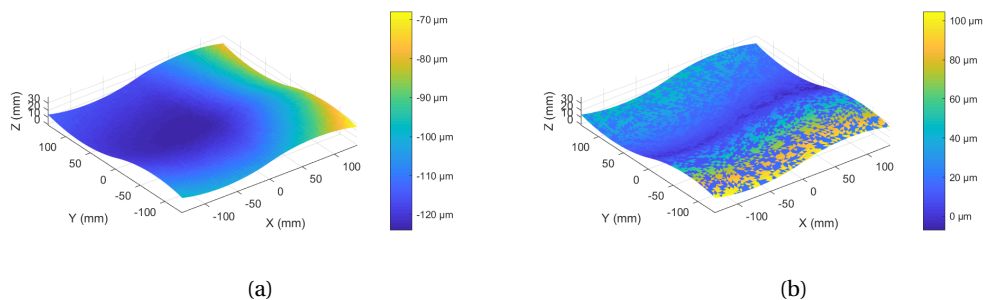


FIGURE 4.7 – Champs projetés $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n})$ (a) et $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_y^l} \cdot \mathbf{n})$ (b) calculés avec la méthode polynomiale.

Ces problématiques de discontinuités des corrections ne sont pas spécifiques à cette pièce ni à la configuration de mesure. En effet, quelle que soit la position relative des caméras, il y aura des zones de la région d'intérêt pour laquelle les champs 3D seront approximativement orthogonaux aux droites épipolaires. Il ne sera donc pas possible d'éviter ces discontinuités 3D pour l'ensemble des champs.

Or, il est raisonnable d'imaginer que le mouvement d'une caméra par rapport à la pièce doit avoir un effet global sur la mesure. Les discontinuités 3D que la méthode polynomiale génère ne semblent donc pas représenter correctement l'effet d'une erreur d'étalonnage sur la mesure de forme. Ainsi, dans la suite de ce document, la méthode polynomiale ne sera pas retenue.

4.1.2 Triangulation linéaire, méthode du point milieu et approximation de Sampson

En étudiant les annexes E, F et H, il est facile de remarquer que les trois méthodes de triangulation restantes semblent donner des résultats similaires une fois les champs projetés selon la normale locale. Ainsi, puisque les résultats de triangulation ne varient que faiblement d'une méthode à l'autre, seule l'une de ces trois méthodes sera exploitée par la suite.

Dans ce rapport, la méthode retenue sera celle du point milieu car - en plus de permettre de calculer les champs 3D $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial a^l}$ - elle permet de borner l'impact des approximations de triangulation dans l'espace 3D. En effet, puisque généralement la contrainte épipolaire n'est plus respectée pour un couple de points $(\mathbf{x}_0^l, \mathbf{x}_0^r)$ après une variation de paramètre extrinsèque da^l , il est important de quantifier l'impact des approximations de triangulation dans l'espace 3D. Pour cela, une possibilité consiste à analyser la distance du point reconstruit \mathbf{X}_{new} par rapport aux droites projectives (passant par le centre caméra \mathbf{c}^p et le point 2D \mathbf{x}_0^p). Dans le cas particulier de la méthode du point milieu, cela revient à étudier la demi-longueur de la perpendiculaire commune. Cette étude fait donc l'objet de la sous-section suivante.

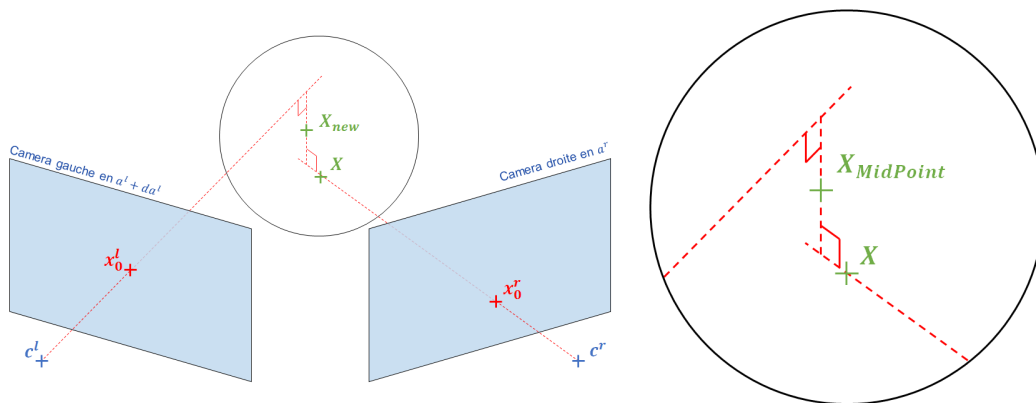


FIGURE 4.8 – Illustration de la demi-perpendiculaire associée aux droites projectives

4.2 Quantification de l'effet des approximations de triangulation sur la mesure de forme

Pour connaître l'impact maximal que pourraient avoir ces approximations de triangulation sur la détermination du défaut de forme, il suffit de projeter la demi-perpendiculaire commune selon la normale locale. L'ensemble de ces projections est présenté dans l'annexe I.

Dans cette annexe, plusieurs éléments peuvent être remarqués. Tout d'abord, pour le champ $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial a^l}$, la projection selon la normale locale des demi-perpendiculaires communes est extrêmement faible (variant entre $\pm 1 \mu\text{m}$, voir figure 4.9). Ce constat est cohérent puisque la translation selon l'axe X entraîne une variation de projection 2D dx^l quasiment parallèle aux droites épipolaires, permettant de respecter encore approximativement la contrainte épipolaire et limitant ainsi les approximations de triangulation.

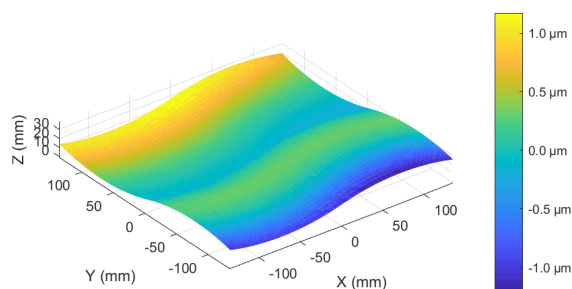


FIGURE 4.9 – Projection selon la normale locale de la demi-perpendiculaire commune associée au champ $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l}$ pour $dt_x^l = 0.1$ mm

Dans les autres cas, la contrainte épipolaire n'est plus forcément respectée - ou à minima pas sur l'intégralité de la pièce. Néanmoins en étudiant la tendance des figures présentées en Annexe I, il est aisé de remarquer que l'impact des approximations de triangulation est faible sur une grande partie de la pièce excepté dans deux coins ou sur un bord. Ainsi, un indicateur plus pertinent que l'amplitude maximale des demi-perpendiculaires projetées selon la normale locale consisterait à donner une moyenne quadratique de celles-ci sur l'intégralité de la pièce. Celles-ci sont donc présentées dans le tableau 4.1 dans la ligne "Incertitude RMS".

	$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha^l} \cdot \mathbf{n}$	$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \beta^l} \cdot \mathbf{n}$	$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \gamma^l} \cdot \mathbf{n}$	$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n}$	$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_y^l} \cdot \mathbf{n}$	$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_z^l} \cdot \mathbf{n}$
Amplitude champ	155.6 μm	341.6 μm	461.6 μm	56.6 μm	31.8 μm	55.4 μm
Incertitude RMS	11.5 μm	8.1 μm	17.4 μm	0.5 μm	13.6 μm	3.6 μm

TABLEAU 4.1 – Amplitude des champs 3D projetés et moyenne quadratique (RMS) de la projection selon la normale locale des demi-longueurs des perpendiculaires communes

En se basant sur ce tableau, il est facile de remarquer que dans la plupart des cas, l'incertitude RMS est bien plus faible que l'amplitude du champ projeté. Néanmoins dans le cas de la translation selon la direction Y, la moyenne quadratique associée aux approximations de triangulation est du même ordre de grandeur que l'amplitude du champ à représenter. Dans ce cas particulier, il est possible que le champ 3D obtenu par triangulation ne représente pas correctement l'influence du déplacement de la caméra sur la mesure du défaut de forme; cependant dans la suite de ce document, l'ensemble de ces champs seront considérés comme correctement représentés.

La représentation des effets des paramètres extrinsèques sous la forme de champs tridimensionnels permet entre autres choses d'estimer l'impact d'une erreur d'étalonnage sur la perception de forme. Autrement dit, en s'appuyant sur les champs calculés par triangulation, il serait possible de convertir les incertitudes associées aux paramètres extrinsèques en incertitudes 3D. Pour cela, il suffit de considérer uniquement la partie des champs $\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial a}$ ayant un impact sur la forme, autrement dit la projection de ces champs selon la normale locale.

Avant d'exploiter directement ces champs projetés, il est nécessaire de s'assurer que ceux-ci représentent correctement l'effet d'un déplacement de caméra sur la mesure de forme. La section

suivante est donc consacrée à la mise en relation de ces champs-ci avec la variation de résultats obtenus par corrélation d'images lorsque la configuration d'une des caméras subit une variation da connue.

5 Mise en relation avec la méthode de corrélation d'images

Objectif de la section 5	
Déterminer l'impact d'une variation de paramètre extrinsèque sur la mesure de défaut de forme Comparer la variation obtenue avec les champs 3D calculés par triangulation	
Étalonnage	
Non étudié dans ce chapitre	
Mesure de forme	
Éléments fixés :	Mouchetis (succession régulier puis aléatoire) Géométrie du modèle numérique
Élément modifié :	Paramètres extrinsèques initiaux
Modèle employé :	Géométrie nominale
Paramètres extrinsèques retenus :	Paramètres optimisés via étalonnage sur modèle mesuré Paramètres précédents avec un décalage (0.1 degré pour les paramètres de rotation, 0.1 mm pour les paramètres de translation)

Dans les sections précédentes, différentes techniques de triangulation ont été mises en œuvre pour estimer le changement de défaut de forme perçu provoqué par une variation de la position d'une des caméras. Les champs 3D représentant cet impact correspondent aux champs $(\frac{\partial X}{\partial a^l} \cdot \mathbf{n})$.

L'objectif de cette section consiste donc à s'assurer que cette estimation est cohérente, autrement dit que les champs projetés $(\frac{\partial X}{\partial a^l} \cdot \mathbf{n})$ représentent correctement la variation de défaut de forme mesuré.

Pour ce faire, ces champs projetés seront comparés à la variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'images en s'appuyant sur deux jeux de paramètres extrinsèques différents (figure 4.10). Pour s'affranchir des problématiques de méconnaissance de forme, le premier jeu de paramètres extrinsèques correspondra à la solution obtenue par autoétalonnage sur modèle mesuré ATOS. Le second jeu correspondra à la solution précédente décalée d'une variation da^l . Ainsi, il sera possible de comparer le défaut de forme mesuré depuis ces deux solutions et de vérifier si la variation de défaut mesuré par corrélation d'images correspond effectivement au champ estimé.

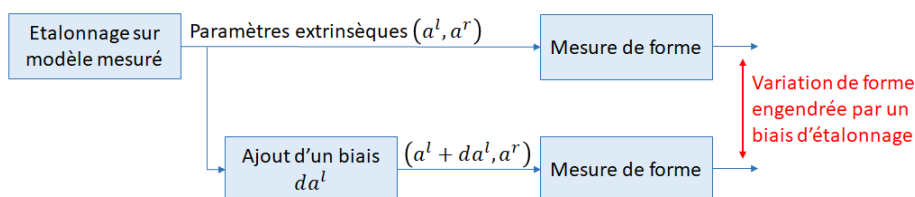


FIGURE 4.10 – Détermination de la variation de forme obtenue par corrélation d'images engendrée par un biais d'étalonnage.

Pour identifier le défaut de forme par corrélation d'images, la solution retenue dans le chapitre 2 consistait à déformer le modèle nominal en utilisant 6 modes de corps rigides et 44 modes de défaut de forme. La présence des modes de corps rigides permet donc de compenser une partie de la variation de forme perçue lorsqu'une caméra est déplacée. Ainsi, pour garder une cohérence entre les champs estimés par triangulation et la variation de forme mesurée par corrélation d'images, il sera nécessaire de retirer la participation des corps rigides dans champs projetés $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l} \cdot \mathbf{n})$. Ces nouveaux champs seront alors notés $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$

L'ensemble des champs 3D projetés selon la normale locale pour lesquels les composantes de corps rigides ont été retirées est présenté dans l'annexe J. Ces champs-ci représentent alors l'impact des erreurs d'étalonnage sur la perception du défaut de forme de la pièce. Pour vérifier la bonne représentativité de ces derniers, une comparaison avec des résultats expérimentaux est envisagée.

L'algorithme de mesure de défaut de forme a donc été appliqué depuis la solution de référence (solution obtenue par autoétalonnage sur modèle mesuré ATOS Core) et depuis une solution décalée d'un pas $d\alpha^l$ de 0.1 degré pour les paramètres de rotation et de 0.1 mm pour les paramètres de translation. L'annexe K présente la différence de défaut de forme obtenue entre ces positions. En se basant sur les annexes J et K, il est aisé de remarquer que certains champs décrivent de manière cohérente la variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'images. Le cas le plus évident est celui de la rotation selon α^l (voir figure 4.11). Sur cette figure, les champs estimés et la variation de défaut relevé ont les mêmes allures et sensiblement la même amplitude (la moyenne quadratique des différences entre le champ $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha^l})_{\text{sans CR}}$ et la variation de défaut de forme mesurée est de 6.9 μm pour une amplitude d'environ 120 μm).

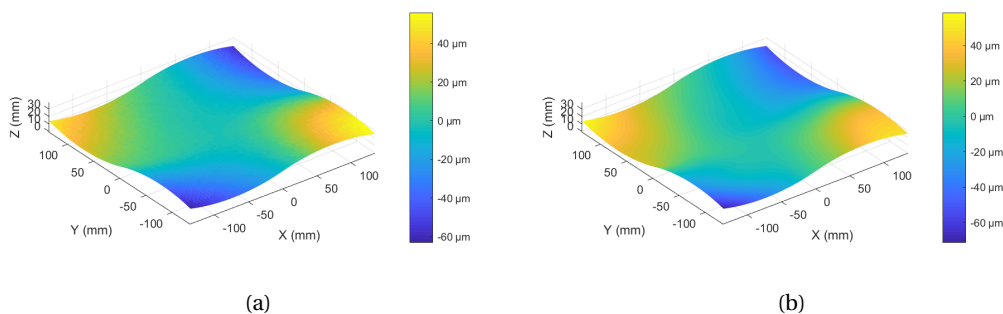


FIGURE 4.11 – Champ $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha^l} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ (a) et variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'image avec $d\alpha^l = 0.1 \text{ deg}$

En revanche pour la plupart des autres variations $d\mathbf{a}^l$, le champ estimé ne ressemble que peu à la variation de défaut mesuré (par exemple pour la translation t_x^l , voir figure 4.12). Ces différences peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs. Il est possible qu'en modifiant les paramètres extrinsèques de la caméra gauche, le problème de corrélation d'image ait convergé vers un minimum local et non vers le minimum global recherché. Il est également possible que du fait de la faible amplitude des défauts recherchés, ceux-ci soient du même ordre de grandeur que les incertitudes de mesure de la méthode développée; il serait alors difficile de dissocier ces défauts du bruit de mesure. Ainsi, pour espérer trouver des résultats similaires, il faut trouver un compromis entre

une forte modification **da** permettant de dissocier ces effets du bruit tout en gardant une variation relativement faible pour ne pas faire converger le problème vers un autre minimum local.

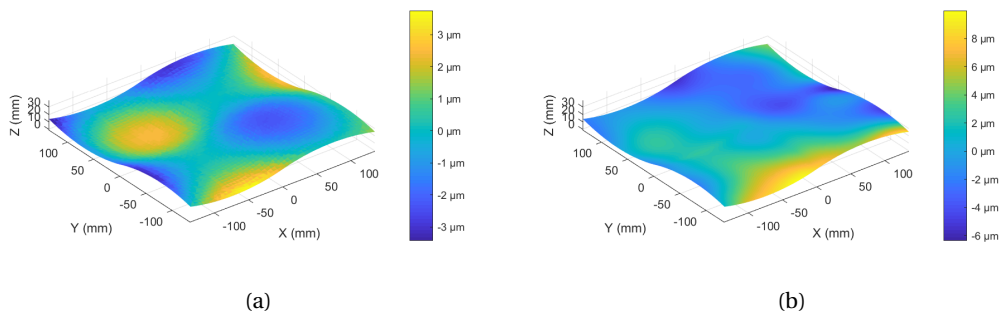


FIGURE 4.12 – Champ $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ (a) et variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'image avec $dt_x^l = 0.1 \text{ mm}$

Ainsi, l'utilisation de champs de triangulation pour représenter l'effet d'une erreur d'étalonnage lors de la mesure par stéréocorrélation n'est que partiellement validée. Néanmoins, les amplitudes des champs de triangulation sont du même ordre de grandeur que la variation de forme observée lorsqu'un biais d'étalonnage est introduit. Dans la suite de ce document, il sera supposé que les champs 3D obtenus par triangulation représentent correctement la variation de défaut de forme perçue par le système de photogrammétrie, permettant ainsi leur exploitation.

L'objectif de ce chapitre consistant à étudier l'effet des erreurs d'étalonnage sur la mesure de défaut de forme, il est envisagé de s'appuyer sur ces champs 3D construits. Pour aller dans ce sens, les champs de triangulation pourront être exploités pour convertir les incertitudes sur les paramètres extrinsèques obtenues dans le chapitre précédent en incertitude sur la géométrie 3D.

6 Exploitation des champs de triangulation

6.1 Conversion des incertitudes de paramètres extrinsèques en incertitude 3D

Dans le chapitre précédent, une étude a été menée sur l'impact de la solution initiale pour l'algorithme d'étalonnage. Lorsque l'algorithme d'autoétalonnage avec la forme mesurée était appliqué successivement à un mouchetis régulier puis aléatoire, les paramètres extrinsèques présentaient une légère variation qui dépendait de la solution retenue pour initialiser l'algorithme. Pour quantifier les incertitudes d'étalonnage vis-à-vis de la solution initiale employée, 10 jeux de paramètres extrinsèques avaient été employés. Chacun d'eux avait été déterminé aléatoirement de sorte à obtenir un déplacement maximal de 30 pixels dans les images gauche et droite.

Les valeurs moyennes et les écarts-types associés à chacun des paramètres extrinsèques après optimisation sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

	Caméra gauche		Caméra droite	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
α (deg)	170.683	4.01×10^{-2}	169.589	5.23×10^{-2}
β (deg)	-25.912	4.87×10^{-2}	21.045	6.27×10^{-2}
γ (deg)	-172.846	4.63×10^{-2}	168.145	4.58×10^{-2}
t_x (mm)	226.129	4.49×10^{-1}	-184.939	7.71×10^{-1}
t_y (mm)	74.482	3.09×10^{-1}	102.052	4.20×10^{-1}
t_z (mm)	400.651	5.11×10^{-1}	446.492	8.40×10^{-1}

TABLEAU 4.2 – Paramètres extrinsèques estimés par corrélation d’images lorsque la solution initiale est décalée de 30 pixels par rapport à la solution recherchée

Nous connaissons donc l’impact de la solution initiale sur la détermination des paramètres extrinsèques, en revanche, puisque le coeur de ces travaux consiste à faire de la mesure de défauts de forme, il est essentiel de traduire ces incertitudes $d\mathbf{a}$ en incertitudes tridimensionnelles $d\mathbf{X}$. Pour ce faire, il est possible d’exploiter les champs calculés par triangulation.

En exploitant les données du tableau 4.2 et en les couplant avec les champs 3D $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$, il est possible de calculer l’écart-type en chacun des nœuds associé à la variation de forme estimée. De cette manière, l’impact des incertitudes d’étalonnage sur l’estimation de la mesure de forme pourra être quantifié et permettra également d’identifier les zones de la pièce qui sont les plus impactées par ces erreurs d’étalonnage. La figure 4.13 présente donc l’écart-type de forme calculée au niveau de chacun des nœuds du modèle nominal grâce aux champs $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$.

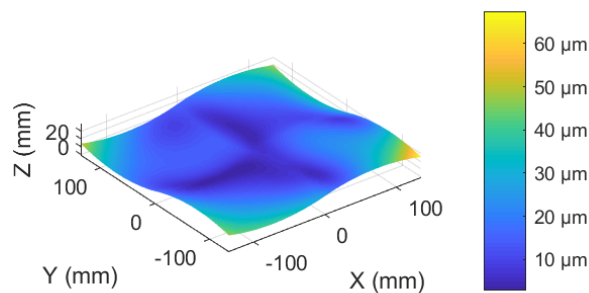


FIGURE 4.13 – Estimation de la variation de forme perçue par le système de photogrammétrie (écart-type au nœud) associée aux erreurs de reproductibilité (dépendance à la solution initiale) d’étalonnage.

D’après les résultats présentés à la figure 4.13, les incertitudes de mesure de forme induites par les incertitudes d’étalonnage n’excèdent pas $70 \mu\text{m}$ localement, et la moyenne quadratique associée est de $20.7 \mu\text{m}$.

Avant de commenter davantage l’allure de cette figure, une étude similaire peut être réalisée pour analyser l’effet de la méconnaissance de forme lors de l’autoétalonnage sur les résultats de mesure. Cette étude est présentée dans la sous-section suivante.

6.2 Impact des erreurs liées à l'autoétalonnage sur la mesure de forme

Dans le chapitre précédent, une seconde étude portant sur l'impact de la méconnaissance de forme sur les résultats d'autoétalonnage avait été menée. Les valeurs moyennes et les écarts-types associés à chacun des paramètres extrinsèques sont rappelés dans le tableau ci-dessous.

	Caméra gauche		Caméra droite	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
α (deg)	170.594	6.74×10^{-2}	169.667	1.21×10^{-1}
β (deg)	-25.892	4.87×10^{-2}	21.003	9.24×10^{-2}
γ (deg)	-172.856	3.79×10^{-2}	168.102	5.59×10^{-2}
t_x (mm)	226.779	5.93×10^{-2}	-184.263	6.00×10^{-2}
t_y (mm)	74.974	3.59×10^{-2}	101.782	4.96×10^{-2}
t_z (mm)	400.144	1.26×10^{-1}	446.426	1.60×10^{-1}

TABLEAU 4.3 – Écart-type des paramètres extrinsèques estimés lorsque le défaut de forme de la pièce est de ± 3 mm

De manière analogue, il est possible d'exploiter les champs 3D $(\frac{\partial X}{\partial a} \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ pour traduire ces incertitudes de paramètres extrinsèques en incertitude de mesure de défaut de forme. La figure 4.14 présente donc les écarts-types aux noeuds calculés pour les incertitudes issues du tableau 4.3.

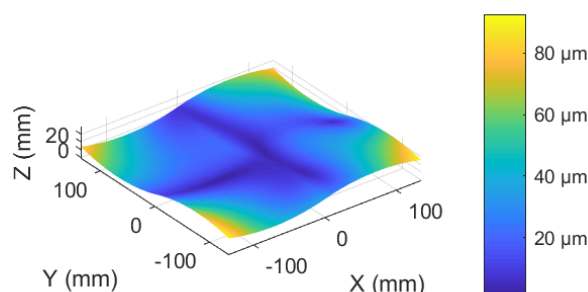


FIGURE 4.14 – Estimation de la variation de forme perçue par le système de photogrammétrie (écart-type au nœud) liée à une méconnaissance de forme de 3 mm lors de l'autoétalonnage

D'après la figure 4.14, la méconnaissance de forme lors de l'autoétalonnage entraîne des incertitudes sur la mesure de forme n'excédant pas localement $90 \mu\text{m}$ et dont la moyenne quadratique associée est de $34.9 \mu\text{m}$.

En analysant simultanément les figures 4.13 et 4.14, nous remarquons que l'allure générale des incertitudes est assez similaire. Les incertitudes minimales sont situées sur un motif en forme de croix centrée au milieu de la pièce et dont les branches sont alignées avec les axes X et Y. Les incertitudes maximales sont quant à elles situées sur les coins de la pièce et n'excèdent pas $90 \mu\text{m}$.

Les allures de ces deux figures sont alors cohérentes avec ce qui pouvait être intuité initiale-

ment. En effet, il était prévisible que les incertitudes d'étalonnage entraînent des effets plus visibles sur les coins de la pièce, aux endroits où les bras de levier sont les plus importants.

Les figures 4.13 et 4.14 présentent donc les effets de l'autoétalonnage sur la mesure de forme. Il peut alors être intéressant de comparer ces incertitudes 3D avec les incertitudes directement liées à la mesure de forme. En effet, dans le chapitre 2, une étude portant sur la répétabilité des résultats de mesure de forme avait été réalisée dans quatre configurations caméras/pièces différentes (voir figure 2.12). Pour faciliter la lecture, cette figure est rappelée ici à la figure 4.15.

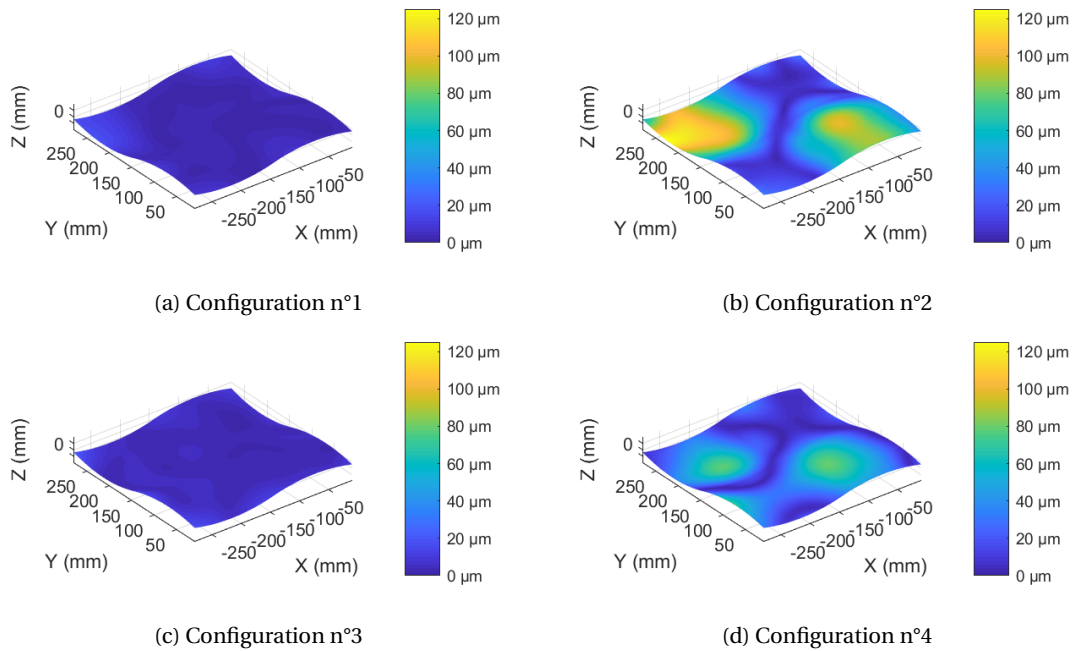


FIGURE 4.15 – Incertitudes de répétabilité liées à l'algorithme de déformation du modèle numérique

Les écarts-types aux noeuds variaient alors entre $17 \mu\text{m}$ (configuration $n^{\circ} 1$) et $120 \mu\text{m}$ (configuration $n^{\circ} 2$), notamment au niveau du creux et de la bosse de la pièce comme le montre la figure 4.15. Ainsi, selon la configuration de mesure retenue, l'autoétalonnage peut induire des incertitudes comparables voire supérieures à celles directement issues de la mesure de forme. Une maîtrise de l'étalonnage est donc nécessaire pour assurer des résultats de mesure de forme avec une incertitude faible.

Une dernière exploitation possible des champs $(d\mathbf{Xa}^l \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ consiste à les utiliser pour coupler la phase d'autoétalonnage et l'étape de mesure de défaut de forme. À l'instar de l'algorithme ICP non rigide, cette fusion de l'étape de recalage (ici l'étalonnage) et de déformation du modèle numérique permettrait de compenser itérativement la méconnaissance de forme et ainsi améliorer les résultats de mesure de défaut de forme. Les champs $(d\mathbf{Xa}^l \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ étant construits selon le même formalisme que les modes de défauts de forme \mathbf{q}_i , le couplage des deux problèmes peut être envisagé. En revanche pour que ce problème puisse donner des résultats cohérents, il est nécessaire que les champs $(d\mathbf{Xa}^l \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ et les modes de la base \mathbf{Q} soient indépendants. Cette étude d'indépendance fait l'objet de la sous-section suivante.

6.3 Indépendance des effets de l'étalonnage et des modes déformants

Puisque ces champs obtenus par triangulation sont exprimés sous le même formalisme que les modes de la base de défaut de forme, il est possible de les comparer. Pour ce faire, il est envisagé d'étudier la décomposition modale des champs de triangulation sur la base de défauts de forme. Grâce à cette étude, il sera possible de déterminer si l'effet d'une erreur d'étalonnage aura un impact sur la détermination des amplitudes modales lors de l'étape de déformation du modèle numérique.

Pour étudier l'indépendance des effets d'étalonnage sur la mesure de forme, une solution consiste à projeter chacun des champs $(d\mathbf{X}\mathbf{a}^l \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ sur la base modale \mathbf{Q} . Pour obtenir une grandeur quantifiable, il est proposé ici de projeter le champ $(d\mathbf{X}\mathbf{a}^l \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ sur la base de défauts de forme et de comparer l'amplitude du champ résiduel par rapport à l'amplitude du champ initial. Si les effets d'étalonnage sont totalement indépendants de la base modale considérée, l'amplitude du champ résiduel ne devrait pas trop différer de l'amplitude du champ initial. En revanche si cette amplitude est beaucoup plus faible, cela traduira le fait que le champ considéré peut être obtenu par combinaison linéaire de différents modes déformants. Dans ce dernier cas, il sera impossible de distinguer les effets de l'étalonnage par rapport à un mode de défaut de forme, rendant impossible le couplage des deux problèmes.

Ainsi pour étudier l'indépendance des effets d'autoétalonnage et des modes déformants, nous nous intéresserons à l'amplitude du champ 3D résiduel après projection. Le tableau 4.4 présente alors l'amplitude du champ résiduel après projection, normée par rapport à l'amplitude du champ 3D initial.

	α^l	β^l	γ^l	t_x^l	t_y^l	t_z^l
$\frac{\text{Amplitude champ résiduel}}{\text{Amplitude champ initial}}$	0.62%	2.99%	2.39%	1.67%	0.75%	0.64%

TABLEAU 4.4 – Amplitude des résidus associés à la décomposition des champs sur la base modale

D'après le tableau 4.4, quel que soit le champ $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l})_{\text{projeté sans CR}}$ considéré, les résidus après décomposition modale sur la base de défaut de forme sont inférieurs à 3% de l'amplitude initiale du champ. Ainsi, les champs de triangulation se décomposent quasiment entièrement sur la base de défaut de forme. Puisque les champs de triangulation se décomposent sur la base modale, le problème d'étalonnage et de mesure de défaut de forme sont liés. Ainsi, il sera impossible de réécrire un problème permettant simultanément de déformer le modèle numérique tout en compensant les erreurs d'étalonnage.

7 Conclusion

Puisque l'étape de déformation du modèle numérique est précédée d'une phase d'autoétalonnage, il a été proposé dans ce chapitre d'étudier l'impact d'un défaut d'étalonnage sur la détermination du défaut de forme. En effet, les incertitudes d'étalonnage couplées aux potentielles erreurs

que l'autoétalonnage peut induire lorsque le modèle utilisé diffère de la géométrie réelle peuvent avoir un impact sur la détermination des paramètres de pose du système, ce qui par conséquent peut impacter l'identification du défaut de forme.

L'objectif de ce chapitre consistait donc à développer une approche pour traduire les incertitudes portant sur les paramètres extrinsèques en incertitudes 3D. Pour cela, la stratégie retenue consistait à s'appuyer sur des champs 3D construits à partir de techniques de triangulation.

L'emploi de champs tridimensionnels pour représenter l'effet de l'étalonnage sur la mesure de forme permettait - en plus de convertir les incertitudes des paramètres de pose en incertitudes 3D - d'obtenir un formalisme similaire aux modes de la base de défauts de forme. S'appuyant sur une écriture similaire, il était alors possible de comparer les champs de triangulation avec les modes de la base de défauts pour estimer si un éventuel couplage du problème d'étalonnage et du problème de déformation du modèle numérique était réalisable.

Après avoir mis en œuvre et comparé plusieurs techniques usuelles de triangulation, l'algorithme du point milieu a finalement été retenu pour calculer les champs 3D $\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{a}}$. Cette méthode permettait d'obtenir les champs tridimensionnels et donnait une estimation de l'effet des incertitudes de triangulation dans l'espace 3D, permettant ainsi de vérifier la validité des champs calculés.

Les champs $\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{a}}$ ont ensuite été projetés selon la normale locale et les composantes de corps rigides leur ont été retirées pour décrire l'impact sur le défaut de forme associée à une variation de paramètre extrinsèque. En projetant ces nouveaux champs 3D sur la base de défauts de forme, il a été montré que l'impact des défauts d'étalonnage pouvait en grande partie se représenter par des modes de la base considérée. Ce constat a alors permis de rejeter l'éventualité d'un couplage du problème d'étalonnage et du problème de déformation du modèle numérique. De plus, cette projection a confirmé l'hypothèse qu'un défaut d'étalonnage aurait une répercussion sur la détermination des amplitudes modales associées à la base de défauts de forme.

Enfin, après avoir en partie validé la cohérence des champs de triangulation par rapport à une variation de forme perçue expérimentalement, les champs $(d\mathbf{X}\mathbf{a}^l \cdot \mathbf{n})_{\text{sans CR}}$ ont été exploités pour convertir les incertitudes d'étalonnage déterminées dans le chapitre 3 en incertitudes dans l'espace 3D. En utilisant le formalisme développé dans ce chapitre, il a été estimé que les incertitudes de reproductibilité d'étalonnage induisaient une incertitude sur la mesure de forme inférieure à 70 μm et que la méconnaissance de forme lors de l'étalonnage entraînait des incertitudes n'excédant pas 90 μm localement. Ces valeurs sont alors comparables aux incertitudes de répétabilité de la mesure de forme, ces dernières variant entre 17 μm et 120 μm selon la configuration de mesure employée.

Ainsi le facteur le plus influent sur les incertitudes de mesure de défaut de forme semble être le choix de la configuration des caméras par rapport à la pièce. Lorsque la configuration de ces dernières est correctement choisie, la seconde source d'incertitudes provient alors de l'étape d'étalonnage. Les incertitudes liées à la reproductibilité et à la méconnaissance de la forme de la pièce lors de l'autoétalonnage peuvent induire des incertitudes de quelques dizaines de micromètres

localement.

Sur la pièce exemple, ces incertitudes représentent environ 5 % du défaut de forme global. La méthode de corrélation semble donc adaptée pour déterminer le défaut de forme dans ce cas. En revanche, lorsqu'une mesure de défaut de forme nécessite des incertitudes plus faibles, une solution consiste alors à utiliser un étalonnage sur une géométrie mieux maîtrisée (par exemple la géométrie du porte-pièce) ou d'utiliser des éléments extérieurs (sphère d'étalonnage, barres étalons) afin d'obtenir une solution initiale d'autoétalonnage plus proche de la solution réelle recherchée.

La méthode de corrélation d'images semble donc adaptée pour la mesure de défauts de forme pour des pièces de dimensions moyennes (surface inférieure à 1 m^2). Cependant, l'un des enjeux de cette thèse consiste à développer un système adapté aux pièces de grandes dimensions. La mesure de telles pièces induisant de nombreuses contraintes, le chapitre suivant vise donc à recenser ces nouvelles problématiques et à proposer des solutions pour y répondre.

Chapitre 5

Application aux pièces de grandes dimensions

Sommaire

1	Introduction	125
2	Mesure de pièces de grandes dimensions : composants aéronautiques	127
2.1	Perte de résolution	127
2.2	Diminution du contraste	128
2.3	Problème de visibilité	129
3	Mesure de référence	130
3.1	Pastillage et photogrammétrie de cibles TRITOP	130
3.2	Couplage de TRITOP avec système à projection de franges ATOS Core	131
4	Détermination du défaut de forme via ICP non rigide	132
4.1	Préparation du modèle nominal	132
4.2	Obtention du défaut de forme par ICP non rigide	133
4.3	Estimation des paramètres de pose TRITOP après recalage non rigide	135
5	Mesure par corrélation d'images avec masques	137
5.1	Prises de vue pour la corrélation d'images	137
5.2	Masquage des images	137
5.3	Prise en compte des masques dans le calcul de corrélation d'images	140
5.4	Faisabilité de la mesure avec visibilité réduite	140
5.4.1	Mesure avec autoétalonnage sur géométrie mesurée par ATOS Core	141
5.4.2	Mesure avec autoétalonnage sur géométrie nominale	145
5.4.3	Mesure sans autoétalonnage	146
6	Conclusion	147

1 Introduction

Les travaux présentés dans ce manuscrit se sont attachés à développer et qualifier une méthode de mesure de défaut de forme par stéréocorrélation (chapitre 2). Grâce à cette méthode, il

est possible d'obtenir une mesure dense de la pièce tout en gardant un nombre limité d'inconnues dû à l'emploi d'une base de défauts. Pour une pièce d'environ 300 mm de côté, les résultats obtenus étaient comparables à ceux issus d'un système industriel, avec des différences quadratiques de quelques dizaines de micromètres pour un défaut global de 2 mm. D'autre part, suite à la réécriture du problème d'étalonnage (chapitre 3), il a été possible de convertir les incertitudes d'étalonnage obtenues (portant sur les paramètres extrinsèques) en incertitudes tridimensionnelles (portant sur le défaut de forme mesuré) dans le chapitre 4.

Néanmoins pour illustrer ces différentes approches, les précédents chapitres se sont appuyés sur une pièce de dimensions moyennes (surface inférieure à $1/2 \text{ m}^2$). Or, l'un des enjeux de cette thèse consiste à développer un système de mesure adapté aux pièces de grandes dimensions. Cependant, le passage à l'échelle supérieure ne peut se faire par simple transposition puisqu'une mesure de pièce cette envergure induit des contraintes supplémentaires. L'objectif de ce chapitre consiste donc à recenser les nouvelles difficultés liées à ce changement de dimensions, proposer des solutions pour répondre à ces problématiques, adapter la méthode de corrélation d'images en conséquence et valider cette solution de mesure sur des pièces de grande taille.

Les différents concepts et problématiques évoqués dans ce chapitre seront donc illustrés en s'appuyant sur un nouveau cas d'application. Il s'agit d'une portion de cylindre d'environ $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ présentant des renforts verticaux (cadres), horizontaux (lices) et des évidements (hublots) (voir figure 5.1). Ce cas d'application nous place alors dans le contexte de mesure de grandes dimensions, plus spécifiquement sur des pièces du type composants aéronautiques.



FIGURE 5.1 – Photographie du nouveau cas d'application

Dans ce chapitre, la section 2 recensera les différents problèmes liés à la mesure de pièces de grandes dimensions, notamment dans le cadre de la mesure de composants aéronautiques. Cette section conclura alors sur la nécessité d'adaptation de la méthode de corrélation d'images afin de prendre en compte les contraintes de visibilité de la pièce.

Avant d'appliquer la méthode de corrélation d'images sur le nouveau cas d'application, celui-ci sera mesuré dans la section 3 par un système industriel. Un algorithme ICP non rigide sera

ensuite appliqué dans la section 4, donnant une estimation de référence du défaut de forme.

Enfin dans la section 5, la méthode de corrélation d'images sera adaptée à l'aide de masque 2D pour prendre en compte les problèmes de visibilité. Plusieurs stratégies d'étalonnage seront alors mises en oeuvre pour vérifier la faisabilité de la méthode pour cette typologie de pièce. Cette étude conclura sur la nécessité de maîtriser l'estimation des paramètres extrinsèques afin d'obtenir une identification correcte du défaut de forme.

2 Mesure de pièces de grandes dimensions : composants aéronautiques

Le but de cette section consiste à recenser les difficultés rencontrées lors de la mesure de pièces de grandes dimensions, plus particulièrement dans le cas des composants aéronautiques, et de proposer d'éventuelles solutions pour pallier ces problèmes.

2.1 Perte de résolution

La première contrainte induite par la mesure de pièce de grandes dimensions réside dans la perte de résolution de la mesure. En effet, pour permettre d'imager l'intégralité de la surface de la pièce, il est nécessaire de reculer davantage les appareils photographiques lorsque les dimensions de cette dernière sont importantes. De ce fait, un pixel dans l'espace image correspondra à une longueur plus importante dans l'espace 3D. Ainsi pour un même système optique, la résolution de mesure sera plus faible pour une pièce de grandes dimensions comparée à celle obtenue sur une pièce plus petite.

À titre d'exemple, la résolution d'une image avec l'appareil photographique employé dans ces travaux est de 8688×5792 pixels. Pour la pièce d'illustration de 300×300 mm, la résolution de mesure maximale est obtenue lorsque la pièce occupe toute la hauteur de la photographie, soit une résolution de $300/5792 \approx 0.05$ mm/pixel. En revanche pour la nouvelle pièce considérée, de par la géométrie de la pièce, la résolution maximale est obtenue lorsque la pièce occupe toute la longueur de la photographie, soit une résolution maximale d'environ $2000/8688 \approx 0.23$ mm/pixel. Ainsi, il est prévisible que les incertitudes de mesure soient approximativement 4 fois plus importantes sur cette nouvelle pièce comparées aux résultats obtenus sur la pièce de plus faibles dimensions.

Pour cette première contrainte, la perte de résolution peut être compensée en améliorant la qualité du système optique employé. Cette solution n'est pas envisagée dans ces travaux, le composant aéronautique sera photographié avec les mêmes caméras que dans le chapitre précédent. Bien que ce choix induise une perte de résolution de mesure, il permet cependant d'estimer les capacités de la méthode de corrélation d'images pour un matériel optique donné.

2.2 Diminution du contraste

La seconde difficulté rencontrée lors de la mesure de pièces de grandes dimensions repose sur la perte de contraste obtenue sur la pièce. En effet, de manière analogue à la section précédente, il est également nécessaire d'éloigner le projecteur de la pièce pour que le mouchetis recouvre l'intégralité de la surface. Cet éloignement s'accompagne d'une perte de résolution, pouvant être compensée en choisissant un mouchetis plus fin à projeter, mais induit également une seconde contrainte : une perte notable de contraste. Pour illustrer ce phénomène, les deux pièces précédentes ont été photographiées en projetant un mouchetis régulier (voir figure 5.2).

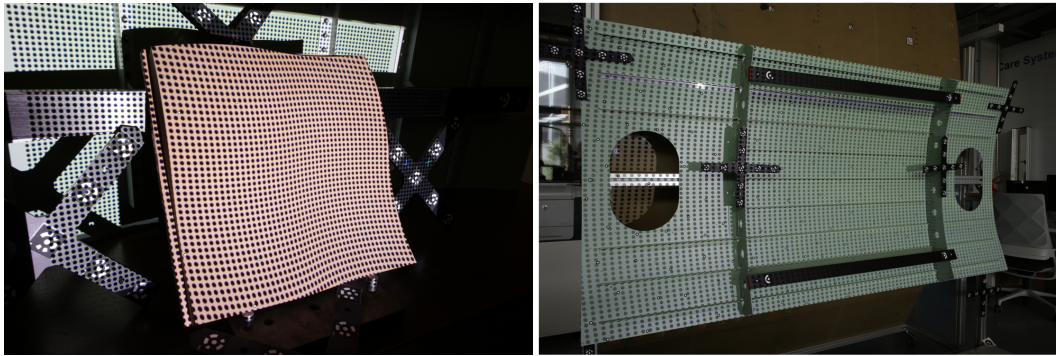


FIGURE 5.2 – Projection de mouchetis régulier sur pièces de moyennes et grandes dimensions

Visuellement, il est possible de remarquer que les taches circulaires apparaissent plus grises sur le panneau comparées aux taches présentes sur la pièce de dimensions moyennes. En analysant les dynamiques des images - autrement dit l'étendue des niveaux de gris visibles - sur la région d'intérêt, nous pouvons remarquer une diminution d'environ 10 % des nuances de gris sur la pièce possédant de plus grandes dimensions (voir tableau 5.1). Ce rétrécissement du spectre peut sembler relativement faible néanmoins lorsque nous calculons les normes des gradients sur la zone d'intérêt, nous remarquons une diminution d'un facteur 2.5 de leur valeur moyenne indiquant une très nette perte de contraste sur la région étudiée.

	Pièce chapitre 2 (300 × 300 mm)	Panneau aéronautique (2000 × 1000 mm)
Dynamique des images	235	200
Norme moyenne des gradients ∇f	5.44	2.02

TABLEAU 5.1 – Quantification de la perte de contraste pour les pièces de grandes dimensions

Or puisque la méthode de corrélation d'images se base sur la notion de variation de niveau de gris, il est prévisible que cette perte de contraste ralentisse notablement la vitesse de convergence de l'algorithme, voire ne permette plus de le faire converger correctement.

Ce problème de perte de contraste peut être pallié en amont de la mesure en employant un projecteur plus puissant, mais également en aval grâce à des traitements numériques pour "étaler" à nouveau le spectre. Pour permettre une comparaison directe des résultats de mesure, ces deux options ne seront pas mises en place dans ces travaux mais seront discutées dans les perspectives (voir chapitre 6).

2.3 Problème de visibilité

Le dernier problème rencontré provient cette fois-ci de la typologie de la pièce étudiée. En effet pour les composants aéronautiques, la présence de raidisseurs peut induire des problèmes de visibilité : l'intégralité de la peau de l'élément ne peut être vue simultanément par les caméras.

Lors du contrôle de ces panneaux, de par les contraintes de préhension et d'assemblage, la surface présentant les renforts est souvent la seule accessible pour la mesure. Dans ce type de situation, afin d'appliquer la méthode de corrélation d'images proposée dans les chapitres précédents, il est essentiel de déterminer les points qui ne sont pas visibles par l'une ou l'autre des deux caméras. En effet, si un point 3D de la peau est masqué par un obstacle, le calcul de la différence de niveau de gris n'a plus de sens. Dans ce cas-ci, le point ne doit pas intervenir dans le calcul des fonctionnelles présentées dans les chapitres 2 et 3 ; il faut donc séparer les points visibles du modèle numérique de ceux qui ne le sont pas.

Une possibilité consiste à délimiter dans chacun des espaces 2D image les pixels appartenant à la peau de la pièce et masquer le reste (voir figure 5.3).



FIGURE 5.3 – Image du panneau et masque 2D associé

Après avoir réalisé le masquage 2D dans chacune des images, il est possible de déterminer les points du modèle numérique visibles simultanément par les deux caméras : le point 3D doit alors être projeté dans une zone non masquée sur l'image de gauche et sur l'image de droite. Dans ce cas-ci, le calcul de la différence des niveaux de gris a un sens. En revanche, si le point n'est pas vu par l'une ou l'autre des caméras, il n'y a pas lieu de le faire intervenir dans le calcul. Ainsi, en fonction de la projection des points 3D dans chacune des images, le nombre de points d'évaluation des différences de niveau de gris peut sensiblement varier, impactant légèrement la stabilité de l'algorithme d'optimisation. La présence de cadres et de lices sur les pièces de grandes dimensions réduit donc la quantité d'information exploitable dans chacune des images. Cette perte d'information peut alors devenir préjudiciable et conduire à une mauvaise détermination du défaut de forme de la pièce, notamment dans les zones non visibles.

Pour compenser ces problèmes de visibilité, il est nécessaire de rajouter de l'information utile : pour cela, une solution consiste à employer plus de prise de vue afin de réduire les zones non visibles par au moins une paire stéréoscopique. En contrepartie, l'augmentation du nombre de caméras utilisées complexifie les fonctionnelles à optimiser : il ne s'agirait plus d'une simple différence de niveaux de gris au sens des moindres carrés (voir les chapitres 2 et 3) mais une différence

entre chaque paire possible de caméras. Dans ce manuscrit, seules deux prises de vue seront employées pour la mesure de pièces de grandes dimensions pour permettre une comparaison des résultats de ce chapitre avec ceux des chapitres précédents, néanmoins il est bon de garder à l'esprit que cette approche peut être adaptée avec plus de caméras en modifiant les fonctionnelles en conséquence.

La mesure de composants aéronautiques de grandes dimensions induit donc des problématiques de résolution, de contraste et de visibilité. Des solutions peuvent être envisagées pour compenser ces difficultés, néanmoins il peut être intéressant d'étudier si, en l'état, la méthode de corrélation d'images permet d'obtenir une mesure cohérente du défaut de forme sur une telle pièce.

De manière analogue aux chapitres précédents, pour vérifier la pertinence du défaut de forme déterminé par corrélation d'images, il sera nécessaire de la comparer à une mesure de référence. Cette dernière sera obtenue en couplant de la photogrammétrie de cibles via le système TRITOP et de la projection de franges avec le système ATOS Core. Bien que le principe de mesure ait été présenté dans le chapitre 1, pour faciliter la lecture de ce document, les principaux éléments de mesure seront rappelés dans la section suivante.

3 Mesure de référence

Afin d'obtenir une mesure de référence représentative de la géométrie du panneau, il est nécessaire de disposer d'une mesure dense. Pour cela, à l'instar des chapitres 2 et 4, une mesure par lumière structurée est réalisée. Pour limiter la propagation d'erreurs de recalage entre les différents patches de mesure, ces derniers sont recalés en s'appuyant sur une mesure préalable basée sur la photogrammétrie de cibles via TRITOP. Cette section rappelle donc les éléments principaux du protocole de mesure employé.

3.1 Pastillage et photogrammétrie de cibles TRITOP

Pour réaliser la mesure de photogrammétrie de cibles TRITOP, 241 pastilles ont été disposées sur l'intégralité du panneau (représentées en bleu sur la figure 5.4) ainsi que 56 points codés (représentés en rouge).

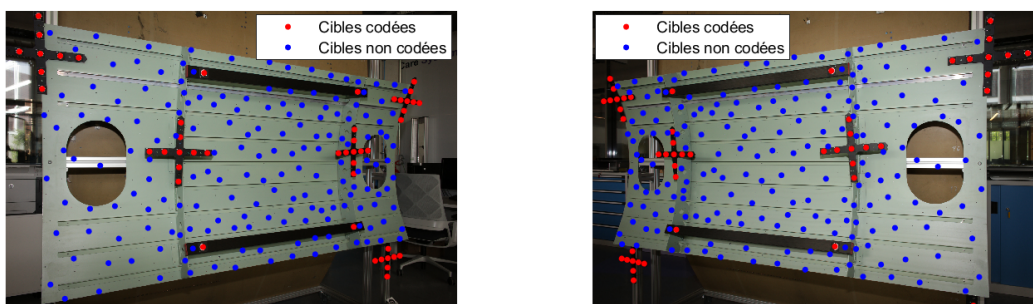


FIGURE 5.4 – Repérage des points codés (rouge) et non codés (bleu) présents sur le panneau.

Une fois la préparation de la scène réalisée, 40 photographies ont été prises tout autour de la pièce. En retirant les images présentant des problèmes de surexposition ou de netteté, seules 29 photographies ont été exploitées pour la photogrammétrie de cibles (voir figure 5.5).



FIGURE 5.5 – Disposition des 29 prises de vue TRITOP par rapport au panneau.

Le centre des cibles a ensuite été identifié par le logiciel GOM, puis en s'appuyant sur la présence de cibles codées et connaissant les longueurs des barres étalons, le logiciel a pu déterminer les coordonnées de chacune des cibles dans un repère 3D associé à la mesure. Les incertitudes moyennes dans les images étaient alors de 0.077 pixels et l'incertitude moyenne dans l'espace 3D de 0.040 mm.

3.2 Couplage de TRITOP avec système à projection de franges ATOS Core

Une fois les 241 cibles repérées dans l'espace 3D, une mesure par lumière structurée a pu être réalisée. Dus à la dimension de la pièce et aux problèmes de visibilité, au total 88 patchs de mesures ATOS Core ont été effectués pour mesurer la géométrie intérieure du panneau.

Après avoir fusionné l'ensemble de ces patchs de mesure, un maillage contenant approximativement 30 millions de sommets a été obtenu (voir figure 5.6 (a)). Ce maillage a ensuite été détourné manuellement pour ne garder que les points appartenant à la peau intérieure du panneau. En retirant les sommets appartenant aux cadres, aux lices, aux barres étalons et aux croix d'étalonnages, le nombre de sommets du maillage détourné a alors été réduit à 19 millions de points (voir figure 5.6 (a)). Au vu du nombre de points disponibles et pour limiter les volumes de stockage de données, un maillage de 1.2 millions de sommets a été créé en décimant le maillage de mesure détourné.

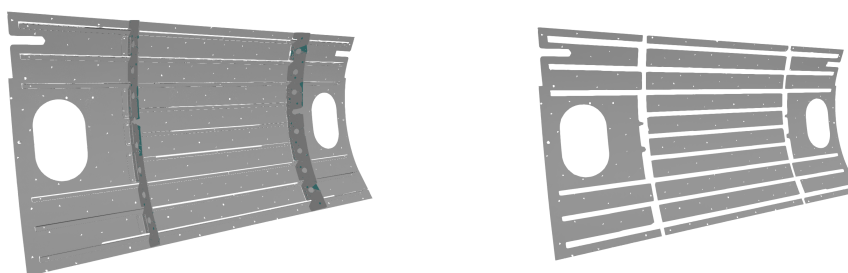


FIGURE 5.6 – Maillage issu de la mesure et maillage détourné décimé

4 Détermination du défaut de forme via ICP non rigide

Grâce au couplage de la photogrammétrie de cibles et de la mesure par lumière structurée, un nuage de points de mesure a été obtenu. Pour estimer le défaut de forme du panneau, il faut désormais traiter ces données. Cette section est donc consacrée à l'identification du défaut de forme via ICP non rigide.

4.1 Préparation du modèle nominal

Le panneau est nominalelement une portion de $2000 \times 1000 \text{ mm}^2$ d'un cylindre de 2450 mm de diamètre. Le modèle nominal a été reconstruit à l'aide du logiciel de CAO Catia (V5R19) puis maillé avec un pas régulier de 10 mm, créant ainsi 2500 sommets et 4750 éléments.

Cependant, puisque le panneau réel présente des renforts, il peut être pertinent d'en tenir compte lors de la modélisation. En effet, la présence de ces raidisseurs peut induire des variations de géométrie localisées, notamment dans les zones inter cadres. Ainsi, si la modélisation ne tient pas compte de ces renforts, il sera nécessaire de monter haut en fréquence pour obtenir une base de modes capables d'identifier un défaut localisé ; à l'inverse, si la modélisation tient compte de la présence de renforts, la décomposition modale fera apparaître des modes locaux plus rapidement.

Ainsi, au niveau des positions nominales des cadres forts, deux bandes de 2 mm de large ont été créées. Ces bandes ont ensuite été maillées avec un pas de 2 mm et raccordées de manière rigide au précédent maillage (voir figure 5.7). Une épaisseur de 100 mm a alors été affectée sur ces deux bandes tandis que l'épaisseur du maillage principal est restée inchangée à 2 mm.

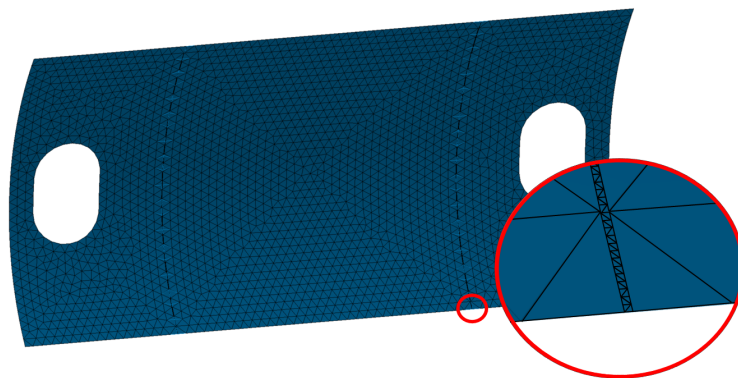


FIGURE 5.7 – Maillage du panneau avec renforts verticaux.

Pour ces deux modèles, une analyse de vibration libre a été menée et 50 modes propres ont été extraits. Afin d'analyser l'influence des raidisseurs sur le calcul des modes de manière qualitative, l'annexe L présente deux modes basse fréquence (mode n°7 et n°8) ainsi qu'un mode haute fréquence (mode n°50). Sur cette figure, il est possible de remarquer que la présence de renforts ne semble pas modifier le premier mode déformant (mode n°7) correspondant au vrillage du panneau. En revanche les tendances diffèrent dès le mode n°8 : le mode correspondant à une variation du rayon du cylindre sur le maillage régulier n'est pas permis de par la présence des raidisseurs.

Cette tendance se retrouve également à haute fréquence : les longueurs d'ondes des défauts restent comparables sur le maillage avec renfort, en revanche la rigidité des cadres vient limiter les déplacements sur la partie centrale du panneau.

Une fois le modèle nominal construit et l'analyse modale libre effectuée, il est possible d'exploiter ces deux bases modales pour déterminer le défaut de forme présent sur la pièce. Pour cela, la sous-section suivante présente les résultats de l'ICP non rigide avec les deux bases considérées.

4.2 Obtention du défaut de forme par ICP non rigide

Pour traiter le nuage de points issu de la mesure, un algorithme de recalage non rigide est de nouveau employé ici. Pour chacun des deux maillages envisagés, les participations modales sont optimisées afin de minimiser les écarts selon la normale locale (voir annexe A).

Le maillage de mesure retenu pour ce traitement est le maillage détouré et décimé (voir figure 5.6) avec 1.2 millions de sommets. Les deux maillages nominaux (avec et sans présence de renforts) sont exploités avec leurs 50 premiers modes propres de vibration. Au vu de la densité de points et de l'importance du défaut de forme, l'appariement des deux nuages se fait en liant chaque sommet du maillage nominal avec le barycentre des 5 plus proches voisins appartenant au nuage de mesure, dans un cylindre d'axe la normale locale du maillage, de rayon 3 mm et de hauteur 40 mm.

Une fois un premier appariement réalisé, il est possible d'obtenir les distances entre les sommets du maillage nominal et les barycentres associés au maillage de mesure. Ces distances peuvent alors être projetées sur la normale locale afin d'obtenir les écarts de forme entre le modèle nominal et la pièce mesurée. Ces écarts initiaux sont présentés sur la figure 5.8 et sont identiques pour les deux maillages. Puisque le maillage de mesure a été détouré au niveau des cadres et des lices, certains sommets du maillage nominal ne peuvent pas respecter le critère d'appariement. Ainsi, il est cohérent de trouver des zones évidées sur la figure 5.8 au niveau de ces renforts.

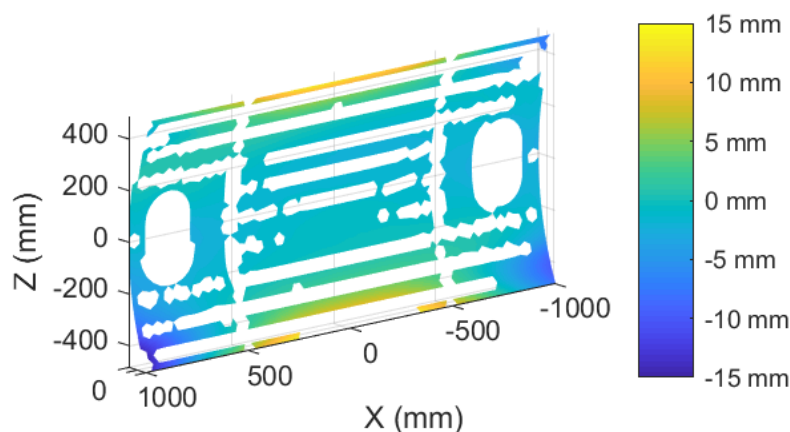


FIGURE 5.8 – Écarts initiaux entre le maillage nominal et le maillage de mesure ATOS Core

Sur la figure 5.8, les écarts initiaux sont compris entre -15 mm et $+15$ mm, notamment au niveau des coins du panneau et au milieu des bords supérieurs et inférieurs. À partir de ces écarts, il est possible de déterminer la décomposition modale permettant d'approcher au mieux cette cartographie initiale. La figure 5.9 présente le défaut de forme identifié pour les deux maillages nominaux envisagés ainsi que leur décomposition modale associée.

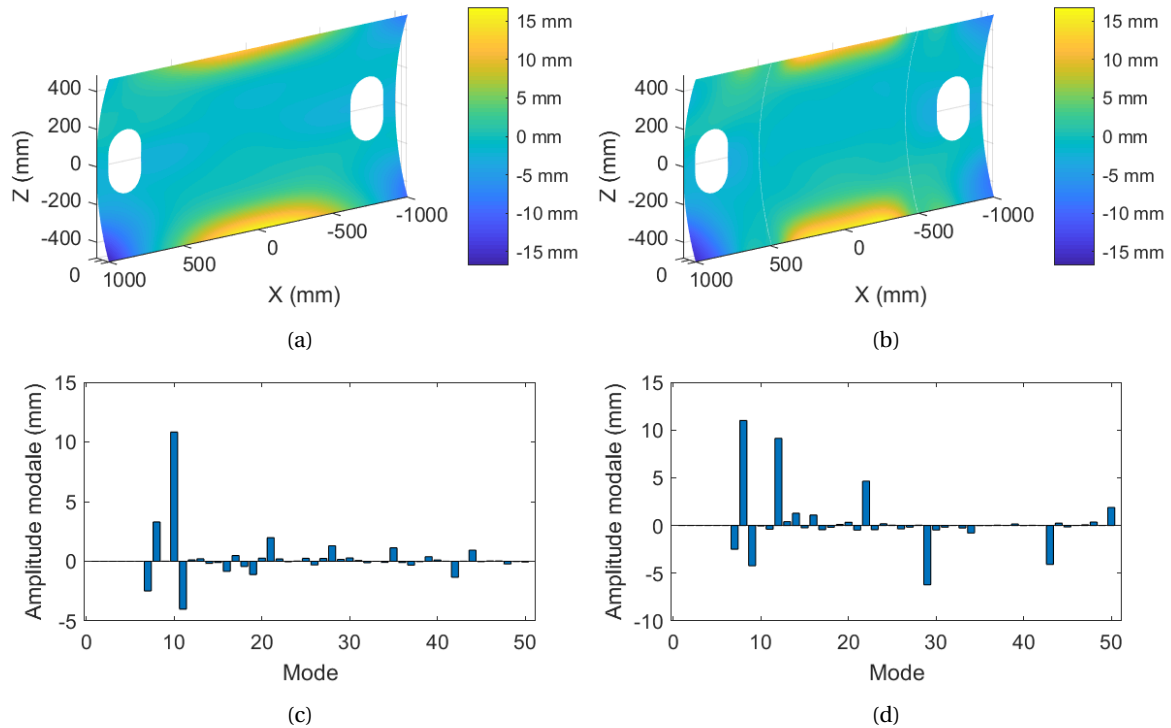


FIGURE 5.9 – Défaut de forme et participations modales identifiés par ICP non rigide avec le maillage régulier (a,c) et le maillage avec renforts (b, d)

Une rapide analyse de la figure 5.9 permet de mettre en évidence que le défaut retrouvé est sensiblement identique sur les deux maillages nominaux considérés. Le défaut de forme ainsi retrouvé varie alors entre approximativement -16 mm et $+16$ mm et semble cohérent avec la cartographie d'écarts présentée à la figure 5.8(a). En revanche, comme les deux bases modales sont différentes, la décomposition modale n'est évidemment pas identique. Une tendance émerge cependant : la plupart de l'information provient de quelques modes possédant une fréquence relativement faible.

Une deuxième remarque peut être faite, notamment sur la décomposition modale associée au maillage avec renfort : puisque le maillage a été réalisé pour que les modes puissent mieux représenter les variations géométriques entre les cadres, il serait légitime d'attendre une meilleure représentativité des modes et donc espérer une décomposition modale avec moins de modes influents. Ici, l'ajout de l'information de rigidité des cadres forts ne semble pas diminuer le nombre de modes ayant une participation importante. L'explication de ce comportement peut être illustrée en affichant les écarts résiduels après recalage non rigide (voir figure 5.10).

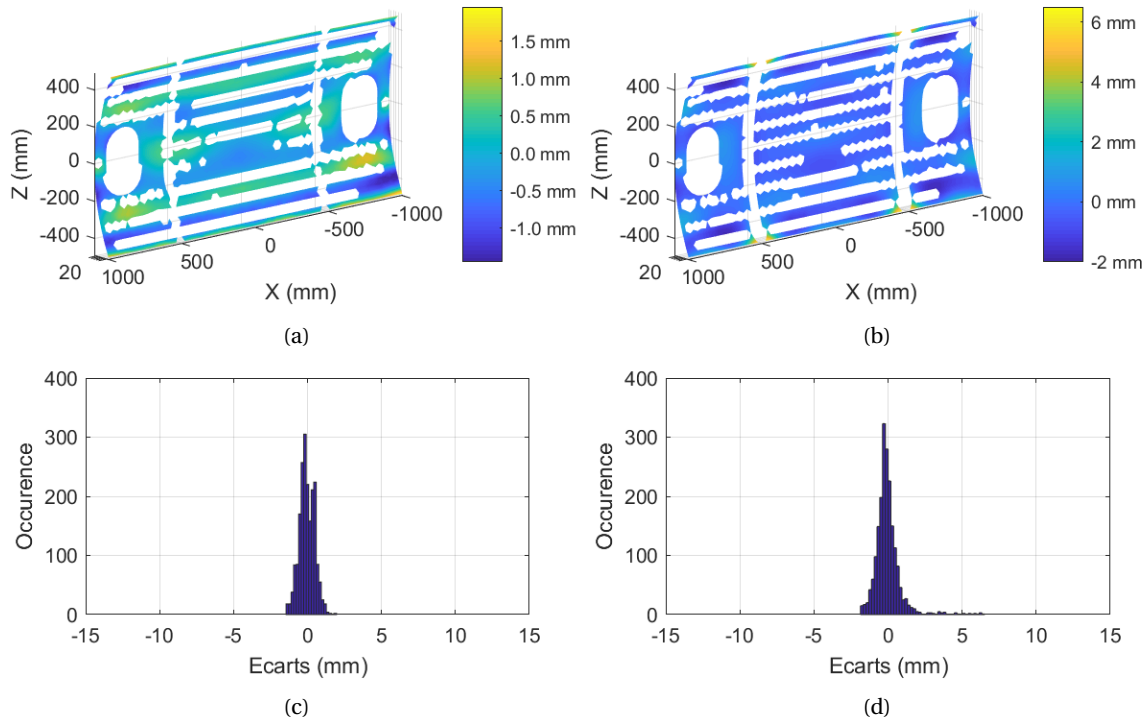


FIGURE 5.10 – Écartés résiduels après ICP non rigide sur maillage régulier (a,c) et avec renforts (b, d)

Sur la figure 5.10 (a), les écarts résiduels après recalage ICP non rigide varient entre -1.4 mm et $+1.9$ mm lorsque le maillage régulier est utilisé. Il est également intéressant de noter que ces écarts sont situés dans des parties très locales de la pièce. Ce type de résidu indique alors la présence d'une légère bosse locale ne pouvant être représentée avec seulement 50 modes. En revanche, la majeure partie du défaut semble être capturée et les écarts hautes fréquences sont filtrés grâce à l'utilisation de la base modale.

En revanche pour le maillage avec renfort (figure figure 5.10 (b)), les écarts résiduels sont plus importants et varient entre -1.4 mm et $+6.3$ mm. Or, ces écarts sont notamment localisés au niveau des extrémités des cadres. Ainsi, il est possible que la décomposition modale cherche à amplifier des modes à haute fréquence pour compenser des écarts proches des renforts (ce qui peut avoir un impact sur l'identification des amplitudes modales associées aux modes de plus basse fréquence). Ainsi, même si ce maillage était initialement envisagé pour être plus représentatif, il ne sera pas conservé par la suite. Seul le maillage régulier sera conservé, et le défaut de forme obtenu par recalage ICP non rigide avec ce dernier servira de référence.

4.3 Estimation des paramètres de pose TRITOP après recalage non rigide

En plus de permettre l'estimation du défaut de forme sur le nuage de points issu de la mesure, le recalage ICP non rigide permet également d'estimer les participations modales associées aux 6 premiers modes, autrement dit aux modes de corps rigides. Cette estimation permet alors de corriger d'éventuelles erreurs de position et d'orientation, permettant le recalage de la mesure dans le même repère que le modèle CAO.

Après avoir recalé les données de mesure dans le repère \mathcal{R}_{CAO} , à l'instar du chapitre 3, il est envisagé d'estimer les paramètres de pose du système stéréoscopique à l'aide de la photogrammétrie de cibles. Pour cela, les paramètres extrinsèques sont optimisés de sorte à minimiser l'erreur de reprojection entre les centres mesurés des cibles et la projection des points 3D dans chacune des images.

Pour les images gauche et droite considérées, les paramètres extrinsèques estimés par cette approche sont donnés dans le tableau 5.2. Ces valeurs de paramètres extrinsèques sont conservées et serviront par la suite pour initialiser le problème d'autoétalonnage par corrélation d'images.

	Caméra gauche	Caméra droite
α (deg)	90.897	91.079
β (deg)	-27.508	23.061
γ (deg)	179.788	179.833
t_x (mm)	938.913	-892.683
t_y (mm)	1403.940	1424.096
t_z (mm)	29.883	36.561

TABLEAU 5.2 – Paramètres extrinsèques déterminés via TRITOP

En s'appuyant sur ces valeurs estimées, la position et l'orientation des caméras par rapport au panneau sont présentées sur la figure 5.11.

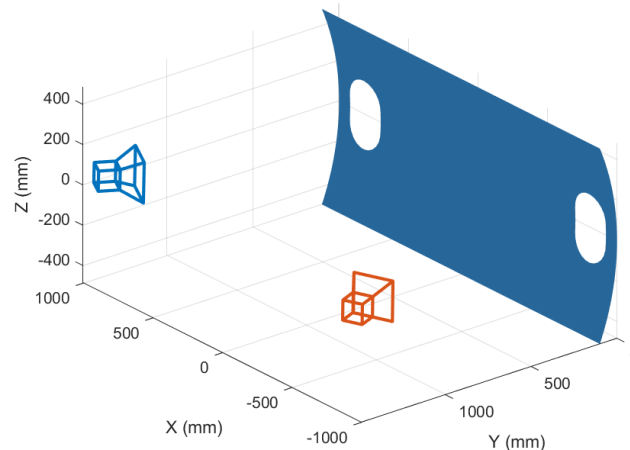


FIGURE 5.11 – Configuration estimée des caméras pour la mesure du panneau

Une fois le défaut de forme de référence obtenu et les paramètres extrinsèques initiaux estimés, il est désormais possible d'exécuter l'algorithme de corrélation d'images sur les photographies avec masques 2D. Le protocole employé ainsi que les résultats obtenus avec cette méthode font l'objet de la section suivante.

5 Mesure par corrélation d'images avec masques

5.1 Prises de vue pour la corrélation d'images

En s'appuyant sur les conclusions du chapitre 3, deux mouchetis ont été employés pour pouvoir appliquer les calculs de corrélation d'images (voir figure 5.12) :

1. **un mouchetis régulier** constitué d'un quadrillage de 100×75 taches circulaires noires sur fond blanc. Le rayon de chacune de ces taches est de 10 pixels dans l'espace image du projecteur. La résolution du projecteur étant de 4096×2160 pixels, les taches sont donc distantes d'environ 40 pixels sur l'axe horizontal et 30 pixels selon l'axe vertical.
2. **un mouchetis aléatoire** dont le ratio noir/blanc est de 60% et dont la taille moyenne des taches dans l'espace image projecteur est de 3 pixels.

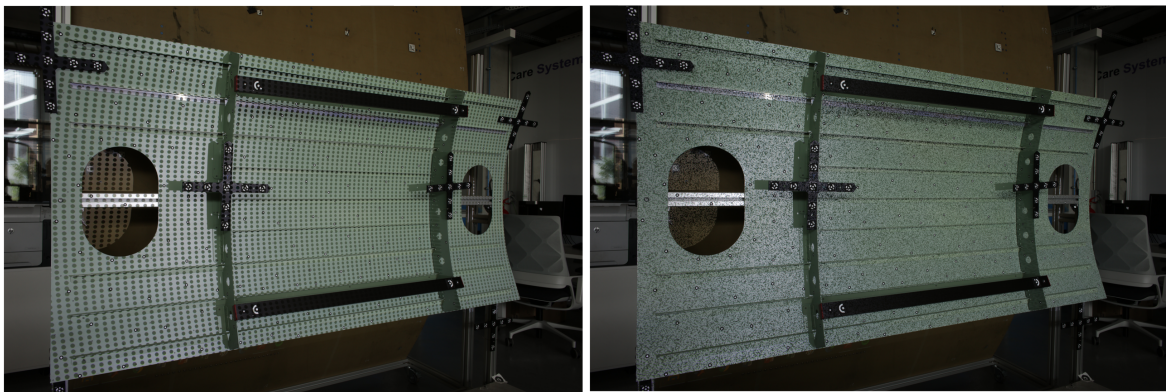


FIGURE 5.12 – Mouchetis régulier et mouchetis aléatoire employés pour la mesure du panneau.

Le panneau a ensuite été photographié dans les deux configurations de mesure présentées sur la figure 5.11 avec ces deux mouchetis.

5.2 Masquage des images

Comme décrit dans la section 2, la présence de renforts sur le panneau risque de masquer des zones de la peau. Pour que ce problème de visibilité n'interfère pas avec la méthode de corrélation d'images proposée, il est important d'identifier les zones utiles de l'image. Pour cela, un masque 2D doit être créé sur chacune des images.

Dans ces travaux, la création des masques est réalisée manuellement. Pour cela, une interface graphique basique a été développée (voir figure 5.13). Cette dernière permet de parcourir l'explorateur de fichier et d'importer l'image à traiter. Une fois cette dernière affichée, l'interface permet :

1. **importer un masque existant** afin de compléter ou modifier le masquage de la même image ;
2. **masquer une forme extérieure**, notamment pour retirer les bordures et l'arrière-plan ;
3. **masquer une forme intérieure**, notamment pour masquer les hublots, les renforts ou les obstacles présents sur la pièce ;
4. **sauvegarder le masque réalisé** afin de pouvoir l'exploiter ou le modifier ultérieurement.

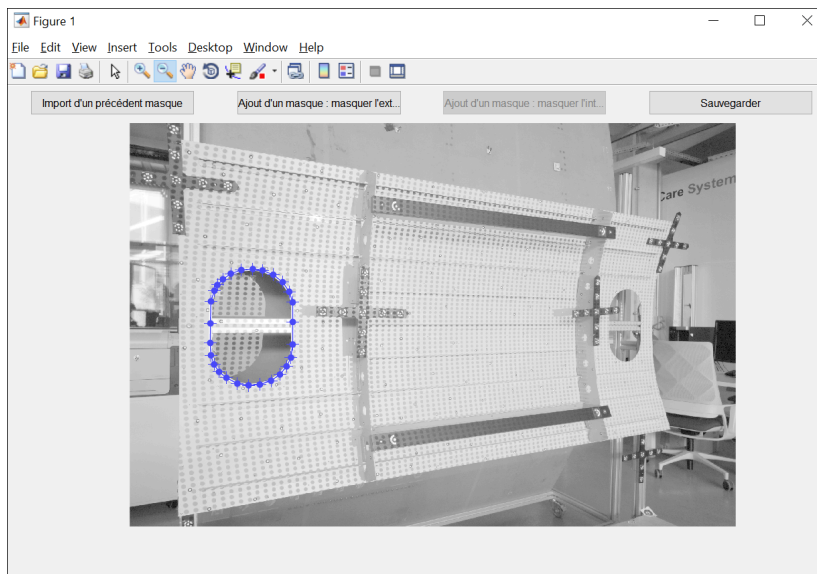


FIGURE 5.13 – Réalisation du masque du panneau avec l'interface graphique développée.

Dans ces travaux, un choix a été fait de réaliser le masque 2D sous forme d'une simple image binaire possédant les mêmes dimensions que la photographie à traiter. Ainsi, si l'un des pixels de la photographie ne correspond pas à la peau de la pièce, le pixel aux mêmes coordonnées dans le masque doit être affecté de la valeur 0. En utilisant des opérations booléennes, il est alors possible de combiner plusieurs masques, permettant de créer un masque complexe à partir de masques élémentaires.

Pour réaliser les masques élémentaires, il suffit de sélectionner sur l'image les contours de la zone à détourer, de construire l'enveloppe convexe passant par ces points et d'affecter la valeur 0 à l'ensemble des pixels se trouvant à l'intérieur (respectivement à l'extérieur selon l'option choisie) de cette enveloppe. Sur la figure 5.13, la zone intérieure correspondante au hublot gauche est en train d'être masquée. Les points bleus correspondent aux pixels sélectionnés par l'utilisateur tandis que les contours bleus sont les limites de l'enveloppe convexe passant par ces points.

Une fois chacun des obstacles détournés, les masques élémentaires peuvent être combinés afin d'obtenir le masque global. La figure 5.14 présente une photographie du panneau et le masque complet correspondant. Les parties blanches correspondent aux zones utiles de l'image (autrement dit la peau du panneau) et les parties noires correspondent aux zones masquées.

Ici, de par l'inclinaison de chacun des appareils photographiques par rapport à la pièce, environ la moitié de l'image correspond à l'arrière-plan et n'est donc pas utile. Au total, après la création des masques, seul un tiers de la surface des images correspond à la peau de la pièce (36.6% pour l'image gauche et 36.6% pour l'image de droite). En utilisant les paramètres extrinsèques estimés initialement, il est possible de projeter les points du modèle nominal dans chacune des images. Au final, 56.9% des sommets du maillage sont visibles simultanément par les deux caméras comme l'illustre la figure 5.15 (les points visibles sont représentés en vert, et ceux masqués dans au moins l'une des images sont représentés en rouge).

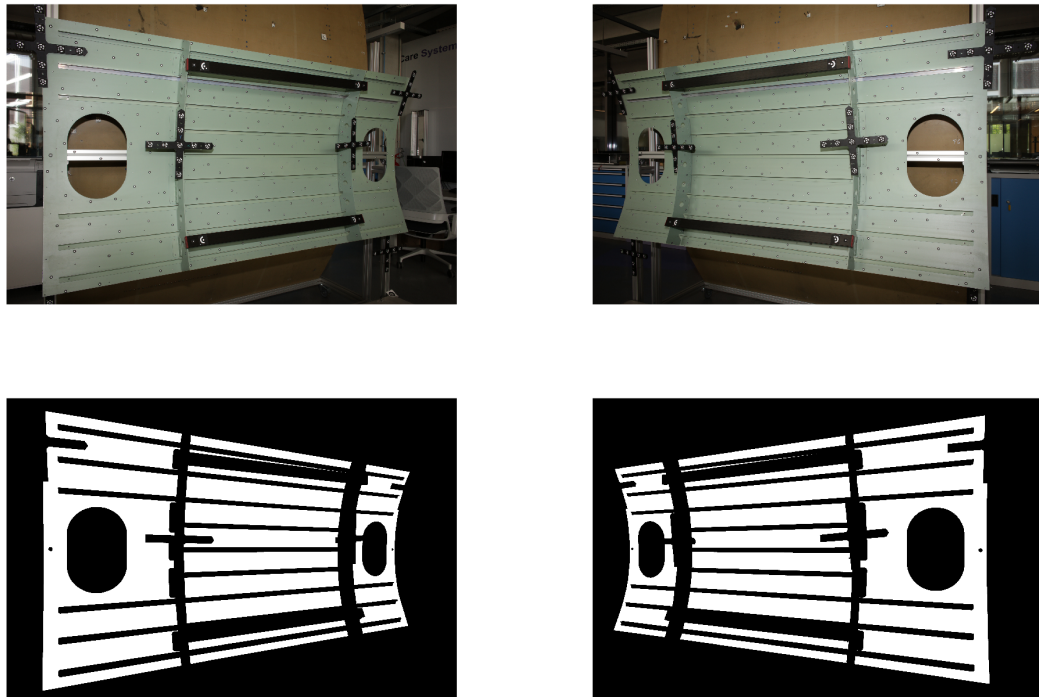


FIGURE 5.14 – Image gauche et droite du panneau et masques associés

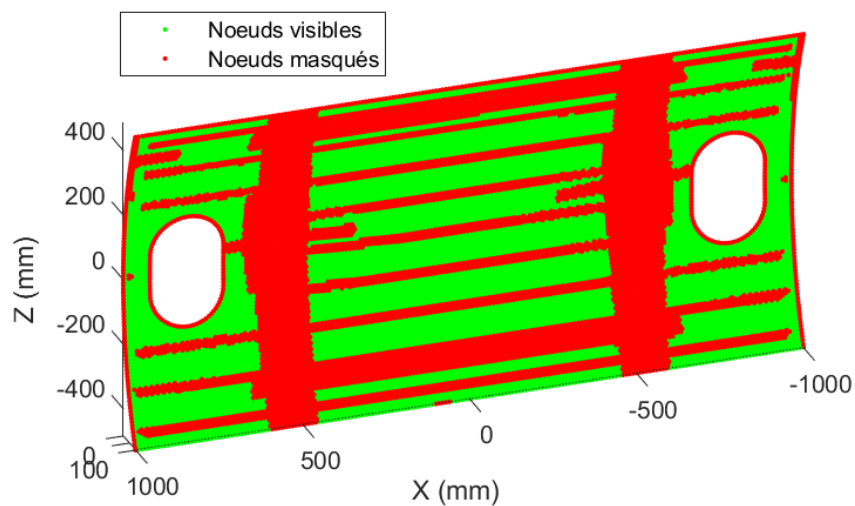


FIGURE 5.15 – Répartition des noeuds du maillage visibles simultanément par les deux caméras

Ainsi, environ la moitié des noeuds de la pièce sont masqués par les renforts dans l'une ou l'autre des caméras. Pour éviter que ces points ne contribuent au calcul de corrélation d'images, il est nécessaire de tenir compte des masques dans l'étude de corrélation. La section suivante traite donc de l'adaptation de la méthode pour prendre en compte les problèmes de visibilité.

5.3 Prise en compte des masques dans le calcul de corrélation d'images

Après avoir identifié les points 3D $X_{\text{masqués}}$ qui ne peuvent être vus simultanément dans les deux caméras (noeuds rouges sur la figure 5.15), il est nécessaire de les retirer du calcul de corrélation d'images. En effet, lorsqu'un point est masqué par un renfort, le critère de conservation de niveau de gris n'a pas de sens; le point masqué ne doit donc pas intervenir dans le calcul de la fonctionnelle.

Or, lorsque les paramètres extrinsèques sont modifiés ou que la géométrie du modèle nominal est déformée, la projection des points 3D X dans chacune des images change. Ainsi, il est nécessaire d'actualiser la cartographie de visibilité à chaque itération de la phase d'autoétalonnage et de l'étape de déformation du modèle numérique.

Ainsi, d'une itération à l'autre, certains points initialement identifiés comme visibles pourront se retrouver masqués et inversement, modifiant par conséquent les fonctionnelles optimisées. Ce phénomène pourra entraîner de potentiels problèmes d'instabilité lors de convergence de l'algorithme. De plus, le calcul ne s'appuyant pas sur les mêmes points d'une itération à l'autre, il sera nécessaire d'être vigilant lors de l'analyse des résidus de corrélation.

Néanmoins, puisque la projection initiale du modèle dans chacune des images n'est pas trop éloignée de la solution recherchée, la très grande majorité des points identifiés comme masqués initialement le resteront après convergence de l'algorithme. Seuls les points X situés à la limite de visibilité (frontière entre les zones verte et rouge sur la figure 5.15) pourront être retirés du calcul ou être à nouveau pris en compte d'une itération à l'autre. Ainsi, la modification des fonctionnelles restera faible et les résidus calculés pourront être considérés comme représentant correctement la convergence du problème de corrélation.

Une fois les images masquées, il est désormais possible d'appliquer l'algorithme de corrélation d'images pour déterminer le défaut de forme de la pièce. La validité de la méthode n'étant pas vérifiée à cette échelle et la présence de masques sur les images pouvant perturber la convergence de l'algorithme, il est proposé de vérifier la faisabilité de la méthode lorsque la visibilité est restreinte. Pour cela, plusieurs stratégies d'étalonnage seront envisagées dans la section suivante.

5.4 Faisabilité de la mesure avec visibilité réduite

Dans cette section, il est envisagé d'étudier la faisabilité de la mesure de défaut de forme par corrélation d'images lorsque la mesure présente des contraintes de visibilité. D'après les constats réalisés dans les chapitres précédents, la qualité de la mesure de défaut de forme est directement conditionnée par la qualité de l'autoétalonnage. Ainsi, pour valider la faisabilité de la méthode, trois stratégies d'étalonnage sont étudiées dans cette section :

- un autoétalonnage basé sur la géométrie mesurée par l'ATOS Core. Cette solution, analogue au chapitre 2, permet de limiter les sources d'erreur lors de l'étalonnage en évitant l'introduction d'un biais lié à la méconnaissance de la forme. En revanche, elle nécessite une mesure préalable du panneau par un moyen de mesure dense;

- un autoétalonnage basé sur la géométrie nominale du panneau. Cette approche est celle envisagée initialement dans ces travaux et ne nécessite pas de mesure préalable de la géométrie. En revanche, si la pièce présente un défaut de forme conséquent, l'écart entre la géométrie réelle et la géométrie nominale pourra faire converger l'algorithme d'autoétalonnage vers une solution biaisée, induisant des erreurs sur l'identification du défaut de forme du panneau;
- la dernière solution consiste en un pré-étalonnage uniquement. Les paramètres de pose calculés par le système externe ne sont alors pas optimisés et servent directement de solution pour la phase de déformation du modèle numérique. En s'affranchissant de la phase d'autoétalonnage, cette solution permet d'éviter l'introduction de biais sur les paramètres extrinsèques liés à la méconnaissance de la géométrie de la pièce.

Pour chacune de ces stratégies, les paramètres extrinsèques estimés via TRITOP (voir tableau 5.2) sont employés pour initialiser l'étalonnage. Lorsque l'autoétalonnage sera réalisé, celui-ci s'appuiera successivement sur le mouchetis régulier puis sur le mouchetis aléatoire. Enfin, la phase de déformation du modèle numérique se basera sur le mouchetis aléatoire uniquement.

Objectif de la section 5.4	
Valider la faisabilité de mesure de défauts de forme sur pièce de grandes dimensions présentant des contraintes de visibilité	
Étalonnage	
Modèles numériques :	- Modèle nominal - Modèle mesuré via ATOS Core
Solution initiale :	Paramètres extrinsèques déterminés via TRITOP
Mouchetis employés :	- Mouchetis régulier - Mouchetis aléatoire
Mesure de forme	
Modèle numérique :	Modèle nominal
Mouchetis employé :	Mouchetis aléatoire

5.4.1 Mesure avec autoétalonnage sur géométrie mesurée par ATOS Core

Afin de valider la faisabilité de la méthode lorsque la visibilité de la pièce est limitée, la première solution envisagée consiste à utiliser le modèle mesuré par l'ATOS Core pour s'autoétalonner. Cette solution est évidemment contraignante et nécessite une mesure préalable par un système industriel, néanmoins elle permet de s'assurer que l'identification du défaut de forme par corrélation d'images est possible si les paramètres extrinsèques sont correctement identifiés.

Une première optimisation des paramètres de pose est donc réalisée sur le mouchetis régulier. Cependant, même en régularisant le problème, les corrections da estimées sur ce mouchetis sont extrêmement faibles et ne permettent pas de diminuer le résidu. Ce phénomène s'explique notamment de par la faible quantité d'information présente sur ce motif (les gradients de niveau de gris sont situés uniquement sur les contours des taches circulaires). De plus, la perte de contraste induite par la dimension de la pièce (voir section 2.2) et le manque de visibilité pénalisent fortement la convergence de l'algorithme.

Les paramètres extrinsèques initiaux n'ayant pas été modifiés par l'autoétalonnage sur le mouchetis régulier, ceux-ci sont utilisés comme solution initiale sur le mouchetis aléatoire. Sur ce nouveau motif l'algorithme d'autoétalonnage converge en 8 itérations, diminuant le résidu de 3.675% à 3.593% (voir figure 5.16).

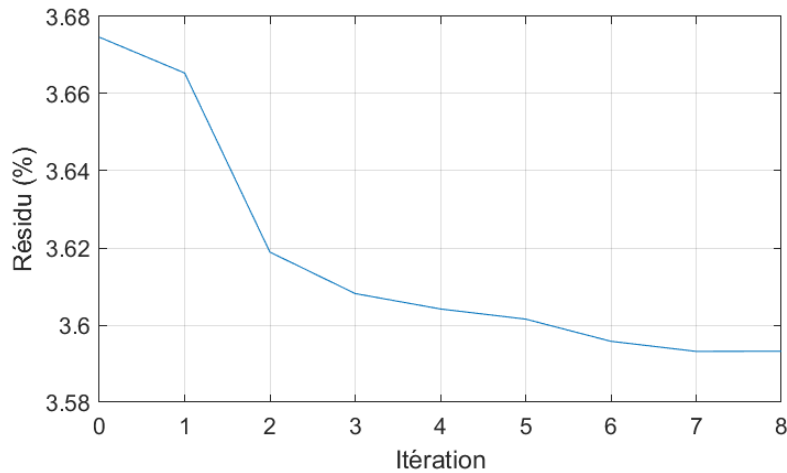


FIGURE 5.16 – Convergence de l'autoétalonnage sur mouchetis aléatoire avec modèle mesuré

Cette décroissance du résidu inférieure à 0.1 % ainsi que le faible nombre d'itérations nécessaires indiquent que la solution initiale d'autoétalonnage est proche de la solution recherchée. En analysant les variations da obtenues, ces dernières sont inférieures à 3×10^{-4} deg pour les rotations et 1.5×10^{-2} mm pour les translations. Vu les faibles amplitudes des variations da identifiées, il n'est donc pas étonnant qu'elles n'aient pas été perçues avec le mouchetis régulier. De plus, ce constat indique également que la solution estimée par le système TRITOP permet d'obtenir une solution initiale proche de celle recherchée, confortant l'idée qu'un pré-étalonnage uniquement pourrait être suffisant.

Après convergence de l'algorithme d'autoétalonnage, l'étape de déformation du modèle numérique est réalisée en repartant du modèle nominal avec 44 modes déformants (modes 7 à 50). La figure 5.17 présente la courbe de convergence associée à ce problème.

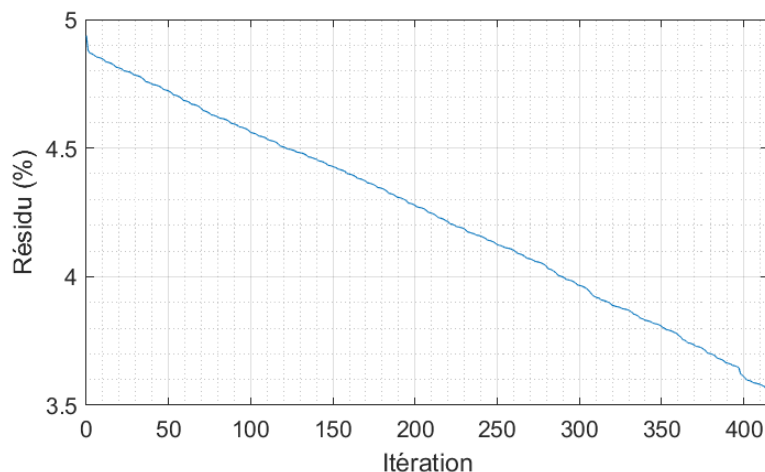


FIGURE 5.17 – Convergence de la correction de forme sur mouchetis aléatoire avec modèle mesuré

En s'appuyant sur la courbe de convergence présentée à la figure 5.17, plusieurs remarques peuvent être dressées :

- la valeur du résidu initial est de 4.94 % ce qui est bien plus élevé que le résidu final de l'étape d'autoétalonnage (de 3.59%). Cette variation s'explique facilement par le fait que l'autoétalonnage est réalisé sur le modèle issu de la mesure ATOS Core tandis que la déformation du modèle numérique se base sur le modèle nominal. Ainsi, il est tout à fait cohérent de trouver un résidu plus important lorsque la géométrie du modèle est plus éloignée de la géométrie réelle de la pièce;
- le résidu de corrélation d'images réussit à diminuer. Cette remarque peut sembler triviale, néanmoins la convergence du problème n'était pas assurée du fait de la faible visibilité des noeuds du maillage (56.9 % de visibilité, voir figure 5.15);
- la convergence du problème est très lente, nécessitant plusieurs centaines d'itérations. Ce phénomène s'explique d'une part à cause du manque de visibilité (certains modes possèdent des amplitudes maximales dans les zones masquées par les renforts, leur amplitude est donc plus difficile à estimer) mais également par le faible contraste présent sur les images. À cause de la faible amplitude des gradients et de la perte d'information liée aux masques, les corrections modales $d\lambda$ calculées à chaque pas sont faibles;
- même si la décroissance du résidu semble linéaire, elle se stabilise au bout de 415 itérations. La correction calculée pour l'itération 416 ne permet plus de diminuer le résidu, l'algorithme a réussi à converger vers un minimum;
- le résidu final après optimisation est de 3.57 %, ce qui est très légèrement inférieur au résidu obtenu sur le même mouchetis avec la forme mesurée par l'ATOS Core. Ainsi, il est possible que la forme identifiée par corrélation d'images représente mieux la géométrie de la pièce dans les zones non masquées. En revanche sur le reste de la pièce, il est possible que la géométrie identifiée par projection de franges soit plus fidèle à la géométrie réelle de la pièce. Cette différence étant de 0.02 %, elle reste cependant très faible comparée au 1.35 % de différence obtenue entre la forme nominale et la forme mesurée.

Ainsi, même si la décroissance du résidu est lente, le problème de déformation du modèle numérique réussit à converger même avec la présence de masques dans les images. Les participations modales calculées et le défaut de forme identifié par cette méthode sont présentés dans la figure 5.18.

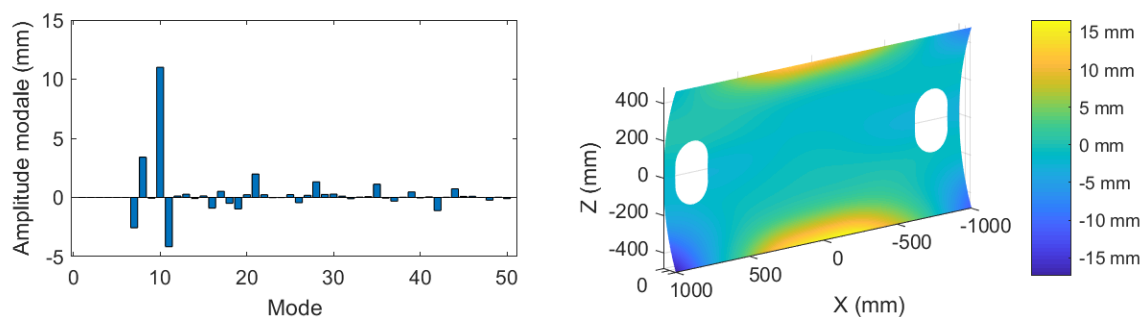


FIGURE 5.18 – Participations modales identifiées par corrélation d'images et défaut de forme associé

Bien qu'une grande partie de la pièce ne soit pas visible dans le problème de corrélation d'images, le défaut de forme retrouvé est comparable avec celui identifié par la mesure via ATOS Core. Pour faciliter cette comparaison, la figure 5.19 présente sur le même graphique les participations modales calculées via ICP non rigide sur la forme mesurée par l'ATOS Core ainsi que les participations modales obtenues par corrélation d'images.

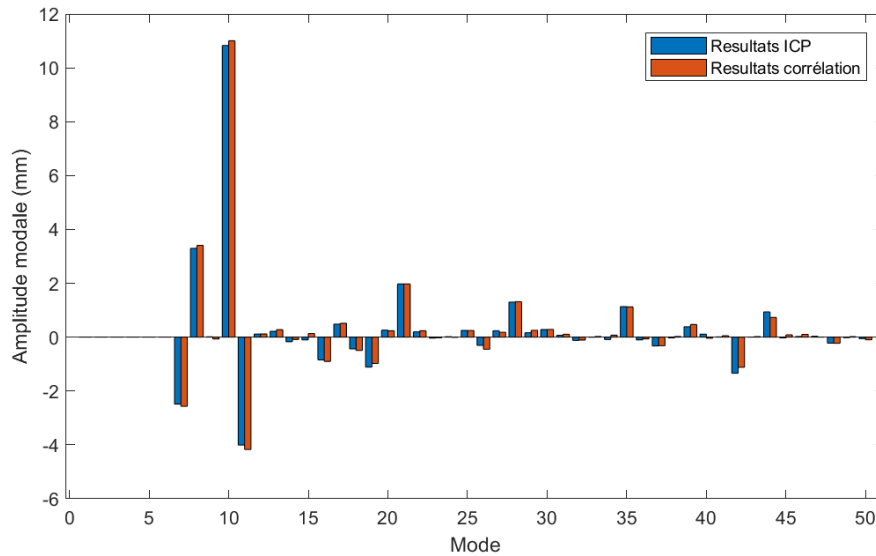


FIGURE 5.19 – Comparaison des participations modales issues de l'ICP non rigide (bleu) et de corrélation d'images (rouge) sur le panneau

La figure 5.19, illustre le fait que les participations modales identifiées par les deux mesures sont extrêmement similaires. De légères variations peuvent être relevées sur quelques amplitudes modales, néanmoins l'allure générale des résultats reste comparable. Pour approfondir cette comparaison des résultats, la figure 5.20 présente la différence de défaut de forme obtenu entre les deux méthodes étudiées.

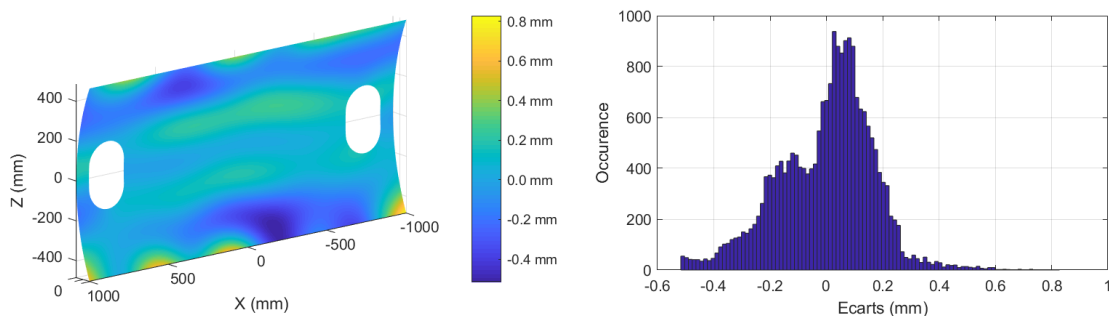


FIGURE 5.20 – Écarts entre la forme obtenue par ICP non rigide et la mesure par corrélation d'images

La figure 5.20 met en évidence le fait que les défauts de forme identifiés par les deux méthodes sont similaires, avec des écarts ne dépassant pas localement 0.81 mm pour un défaut de forme dont l'amplitude est de ± 16 mm. De plus, la majorité de ces écarts est inférieure à ± 0.25 mm et la moyenne quadratique de ces différences est de 0.17 mm.

Puisque la taille de la pièce a une influence directe sur l'éloignement des caméras, et donc la résolution de mesure, il peut être intéressant de comparer la valeur de ces écarts par rapport à la dimension de la pièce mesurée. La dimension retenue pour réaliser ce calcul correspondra à la plus grande longueur de la pièce, autrement dit la taille de la diagonale.

	Pièce moyenne (300 × 300 mm)	Panneau aéronautique (2000 × 1000 mm)
Plus grande dimension	424 mm	2236 mm
Écarts maximaux	71 μm (Config. n°3) 170 μm (Config. n°2)	812 μm
Erreur relative	167 $\mu\text{m}/\text{m}$ 401 $\mu\text{m}/\text{m}$	363 $\mu\text{m}/\text{m}$

TABLEAU 5.3 – Écarts de défaut de forme estimés par corrélation d'images et par mesure ATOS Core pour les deux cas d'étude

En s'appuyant sur les valeurs estimées dans le tableau 5.3, il est possible de remarquer que les erreurs relatives varient entre 71 et 401 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la pièce de dimensions moyenne selon la configuration de mesure employée. Pour la pièce de grandes dimensions, cette erreur relative possède une valeur intermédiaire de 363 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ainsi, malgré les problèmes de contraste et de visibilité, les erreurs relatives de mesure restent comparables pour des pièces de grandes dimensions.

5.4.2 Mesure avec autoétalonnage sur géométrie nominale

Dans la section précédente, à l'instar du chapitre 2, lorsque l'autoétalonnage est réalisé avec une géométrie proche de la géométrie réelle, les positions caméras sont correctement estimées et permettent une bonne identification du défaut de forme même avec une visibilité réduite.

Cependant la connaissance à priori de la géométrie n'est généralement pas accessible, c'est pourquoi il est envisagé ici de s'autoétalonner non plus sur la géométrie mesurée mais sur la géométrie nominale de la pièce.

Lorsque l'autoétalonnage est réalisé avec la même solution initiale que précédemment en s'appuyant sur le modèle nominal, l'algorithme converge en 18 itérations vers un minimum local. Comparés à la solution optimale déterminée avec le modèle mesuré, les paramètres extrinsèques optimisés avec le modèle nominal diffèrent d'environ 2×10^{-1} deg pour les paramètres de rotation et de 3×10^{-1} mm pour les paramètres de translation. Cette forte variation, notamment sur les paramètres angulaires, ne permet pas à l'algorithme de déformation du modèle numérique de converger vers la bonne solution. Le défaut de forme identifié avec cette approche est alors incohérent, c'est pourquoi il n'est pas présenté ici.

De la même manière que dans le chapitre 3, une méconnaissance de la géométrie réelle de la pièce peut mener à une mauvaise identification des paramètres de pose du système stéréoscopique. Pour ce cas d'application, ce phénomène est d'ailleurs accentué par la forte amplitude du défaut de forme et également par la réduction de visibilité liée à la présence de renforts. Dans ce cas-ci, un autoétalonnage sur la forme nominale ne permet pas d'identifier correctement le défaut de forme présent sur le panneau.

Ainsi, malgré les efforts portés dans le chapitre 3 sur l'autoétalonnage, celui-ci ne semble pas adapté lorsque de contraintes de visibilité sont introduites. Des améliorations doivent donc être apportées pour l'adapter aux difficultés rencontrées sur les pièces de type composants aéronautiques.

Une autre possibilité consiste non plus à améliorer l'autoétalonnage mais à s'en affranchir. Pour cela, il est envisagé d'étudier la déformation du modèle numérique en s'appuyant uniquement sur les paramètres extrinsèques déterminés en amont à l'aide d'un système de mesure externe. La section suivante présente donc cette possibilité en basant la mesure de défaut de forme à partir des paramètres extrinsèques estimés via le système de photogrammétrie TRITOP.

5.4.3 Mesure sans autoétalonnage

Pour pallier l'introduction d'un biais sur les paramètres extrinsèques lié à une méconnaissance de la géométrie lors de l'autoétalonnage, il est envisagé ici de s'affranchir de cette étape.

Dans cette partie, l'algorithme de déformation du modèle numérique est donc directement appliqué à partir de l'estimation des paramètres extrinsèques obtenus via TRITOP. La courbe de convergence obtenue sur le mouchetis aléatoire est présentée sur la figure 5.21.

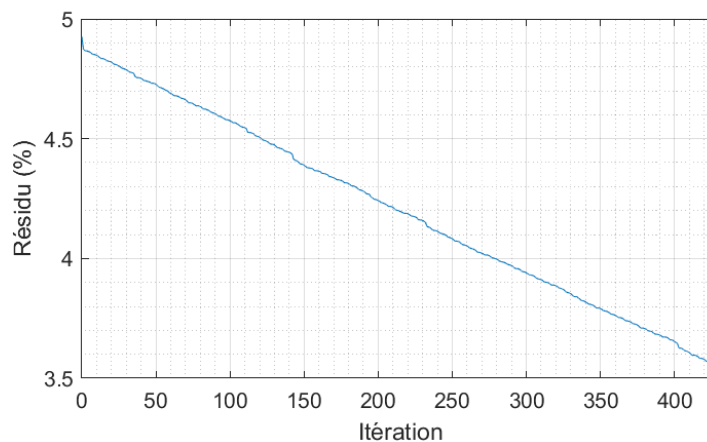


FIGURE 5.21 – Convergence de la correction de forme sur mouchetis aléatoire sans autoétalonnage

En analysant cette courbe de convergence, il est possible de remarquer de très forte similarité avec celle présentée à la figure 5.17 lorsque l'algorithme était précédé d'un autoétalonnage avec la forme mesurée :

- la convergence est atteinte au bout de 427 itérations, contre 415 itérations précédemment ;
- le résidu final est de 3.5677 % contre 3.5643 %, soit seulement 3.4×10^{-3} % de différence.

Le défaut de forme identifié avec cette approche est quant à lui présenté sur la figure 5.22. Ce résultat étant très similaire au défaut trouvé précédemment, la figure présente également sa différence par rapport au défaut déterminé lorsque le défaut est calculé après autoétalonnage sur forme mesurée.

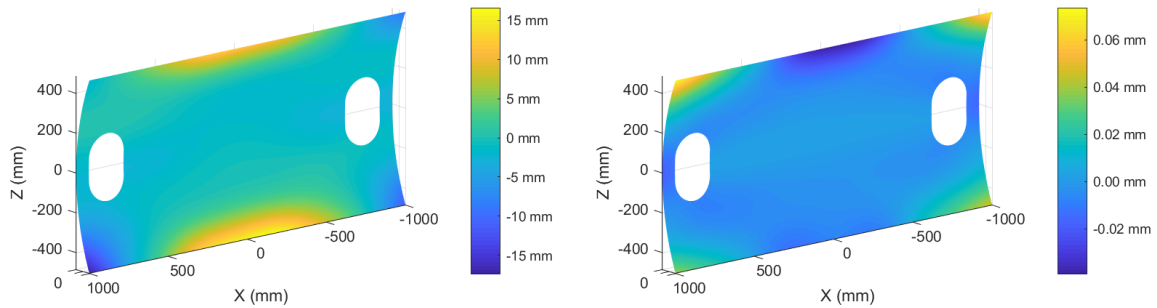


FIGURE 5.22 – Défaut de forme identifié sans autoétalonnage et écart avec le défaut calculé après autoétalonnage sur géométrie mesurée

En s'appuyant uniquement sur les paramètres extrinsèques estimés avec un système de photogrammétrie de cibles, il est possible d'obtenir des résultats très similaires avec des écarts de forme inférieurs à 90 μm pour un défaut global de $\pm 16\text{mm}$.

En se basant sur les résultats obtenus via les trois stratégies d'étalonnage, il est possible de conclure quant à la faisabilité de la mesure de défauts de forme pour les pièces de grandes dimensions. En effet, même avec une visibilité de la pièce réduite, une identification correcte du défaut de forme est possible dès lors que les paramètres extrinsèques sont correctement estimés. En revanche lorsque le défaut de forme présent sur la pièce est trop important, l'autoétalonnage sur modèle nominal ne permet pas d'obtenir des résultats cohérents. Pour pallier ce problème, une stratégie consiste alors à ne plus s'appuyer sur un autoétalonnage mais seulement sur un pré-étalonnage en utilisant un système de mesure externe. Cette stratégie permet alors d'obtenir des résultats proches à $\pm 0.09\text{ mm}$ du défaut de forme obtenu lorsque la forme est identifiée avec un autoétalonnage non biaisé.

Ainsi, en utilisant les paramètres extrinsèques estimés via un système externe, il est possible d'identifier le défaut de forme de composants aéronautiques en exploitant la méthode de corrélation d'images proposée dans ces travaux.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés aux pièces de grandes dimensions et plus particulièrement aux composants aéronautiques afin de vérifier la validité de la méthode proposée sur ce type de pièces. Outre la perte de résolution et de contraste lié à la grande taille de ces pièces, l'un des problèmes majeurs lors de la mesure de telles pièces réside dans le manque de visibilité. En effet, puisque ces dernières sont généralement élancées, elles présentent des raidisseurs afin de garantir une rigidité importante tout en gardant une masse relativement faible. Or, la présence de ces renforts peut engendrer des problèmes d'accessibilité et de visibilité lorsqu'un moyen optique est utilisé. Dans le cadre de ces travaux, une adaptation de la méthode de corrélation d'images a donc été nécessaire afin de tenir compte de ces contraintes.

La stratégie retenue ici reposait alors sur la création de masques 2D dans chacune des images.

En délimitant les zones appartenant à la peau de la pièce dans chacune des photographies, il était possible d'identifier les points du modèle 3D masqués par ces renforts. Une fois identifiés, ces points devaient être retirés des calculs de corrélation d'images afin de garder la cohérence du critère de conservation de niveaux de gris.

Pour s'assurer que cette modification apportée à notre approche permette de mesurer des pièces de grandes dimensions, un panneau d'environ $2000 \times 1000 \text{ mm}^2$ a servi de cas d'application. Malgré la faible visibilité des points du modèle (approximativement 50 % du panneau était visible simultanément dans les deux caméras), les résultats obtenus étaient proches du défaut de forme estimé par un système industriel de référence. Les différences avec la mesure TRITOP et ATOS Core étaient alors inférieures à 0.8 mm pour un défaut global d'environ $\pm 16 \text{ mm}$.

Pour obtenir de tels résultats, une estimation correcte des paramètres de pose du système était nécessaire. Pour cela, à l'instar du chapitre 2, l'autoétalonnage s'est appuyé sur la forme mesurée par le système de référence. En revanche lorsque l'autoétalonnage reposait sur le modèle nominal, la méconnaissance de la géométrie réelle conduisait à une mauvaise estimation des paramètres de pose, entraînant une mauvaise identification du défaut de forme de la pièce.

Malgré les efforts portés sur l'étalonnage dans le chapitre 3, la méconnaissance de la forme réelle de la pièce conduit dans ce cas à de fortes erreurs sur la mesure de forme. Pour pallier ce problème, l'option envisagée a consisté à s'affranchir de l'étape d'autoétalonnage en estimant les paramètres de pose du système à l'aide d'éléments extérieurs. En s'appuyant sur une estimation de paramètres extrinsèques basés sur de la photogrammétrie de cibles, les résultats obtenus étaient alors proches à $\pm 0.09 \text{ mm}$ du défaut de forme identifié lorsque l'étalonnage était réalisé sans introduction de biais.

Ainsi, malgré les difficultés liées à l'autoétalonnage, des solutions peuvent être envisagées pour obtenir une mesure dense des défauts de forme associés aux pièces de grandes dimensions. Cette stratégie permettrait alors d'identifier le défaut de forme de telles pièces en ne nécessitant que quelques minutes d'immobilisation, rendant son application adéquate aux contraintes de mesure *in-situ*.

Conclusions et perspectives

Conclusion

L'inspection géométrique des produits est une étape essentielle dans le cycle de fabrication et d'assemblages des pièces mécaniques. Cette opération permet de vérifier que la géométrie du composant mesuré est conforme aux exigences dimensionnelles et géométriques définies par le bureau d'études, permettant son montage et le bon fonctionnement de l'assemblage lors de sa phase d'utilisation. Pour réaliser cette inspection, la géométrie de la pièce étudiée est généralement mesurée par un système d'acquisition puis comparée à sa définition nominale. Les écarts obtenus entre la mesure et la forme théorique sont ensuite analysés et comparés par rapport aux différentes tolérances présentes sur le dessin de définition de la pièce.

Généralement, cette inspection repose sur l'utilisation d'une machine à mesurer tridimensionnelle équipée d'un palpeur mécanique à contact afin de garantir des incertitudes de mesure faibles. Cependant, la faible vitesse d'acquisition de ce système nécessite l'immobilisation de la pièce pendant quelques minutes voire plusieurs heures. De plus, la faible densité de points acquis rend la mesure peu adaptée pour les pièces de géométrie complexe. Pour pallier ces deux difficultés, une mesure par moyen optique peut être envisagée.

Bien que les systèmes optiques présentent des avantages certains pour la mesure de pièces de grandes dimensions, leur inconvénient majeur réside dans le post-traitement des données acquises. En effet, les données de sortie sont généralement des nuages de points bruités, parfois hétérogènes et pouvant présenter des lacunes de numérisation. Le recalage de la mesure peut alors être complexe et l'identification des défauts présents sur la pièce devenir un véritable défi.

Ainsi, pour obtenir une mesure dense sur des pièces de grandes dimensions tout en limitant la phase de post-traitement des données de mesure, une méthode de mesure de défauts de forme a été proposée dans ces travaux. Cette dernière, basée sur des techniques de corrélation d'images globales, permet d'acquérir la géométrie de la pièce en ne nécessitant que quelques minutes d'immobilisation, rendant cette approche envisageable pour la mesure *in-situ*. Notre première contribution a alors consisté à utiliser une base modale lors de la déformation du modèle numérique afin d'obtenir une description des défauts directement exploitable, réduisant ainsi fortement le temps lié au post-traitement des résultats de mesure.

Afin de valider la faisabilité de la méthode, le chapitre 2 consistait à présenter et appliquer la

phase de déformation du modèle numérique lorsque les paramètres de pose du système stéréoscopique étaient correctement identifiés. Les résultats obtenus sur une pièce d'environ 300 mm de coté présentant un défaut de forme d'environ 2 mm étaient alors similaires à une mesure issue d'un système de référence, avec des différences quadratiques variant entre 18 μm et 53 μm selon la configuration de mesure employée. Une seconde contribution de ces travaux consistait en l'analyse de la matrice hessienne du problème de corrélation, permettant l'étude de la sensibilité de la méthode et donnant accès aux défauts les plus influents sur l'algorithme.

Une fois la méthode validée lorsque le système est correctement étalonné, le chapitre 3 s'est concentré sur la phase d'autoétalonnage. Une écriture explicite couplée à une technique de régularisation et une normalisation des paramètres extrinsèques a alors été proposée afin d'améliorer la convergence de l'algorithme. Une étude de sensibilité a permis d'aboutir à une démarche pour limiter l'impact de la solution initiale : un mouchetis régulier est préalablement utilisé pour calculer les paramètres extrinsèques, puis cette solution est utilisée pour initialiser l'autoétalonnage avec un mouchetis aléatoire, permettant d'affiner les résultats. Enfin, l'étude de sensibilité a permis de quantifier l'impact de la méconnaissance de forme sur la détermination des paramètres extrinsèques.

Une troisième contribution de ces travaux a consisté à traduire ces incertitudes portant sur les paramètres extrinsèques en incertitudes tridimensionnelles via l'emploi de techniques de triangulation. Dans le chapitre 4, l'impact d'une variation de paramètre extrinsèque sur la détermination de la forme a alors été décrit sous forme de champs tridimensionnels. Ces derniers étant en grande partie décomposables sur la base de défauts, il a été conclu que l'étalonnage et la mesure de défaut de forme ne pouvaient être couplés dans une seule et même étape. De plus, cette remarque renforce l'idée qu'un défaut d'étalonnage a une conséquence sur l'identification des participations modales λ . Une dernière application de ces champs a alors permis d'estimer que les erreurs d'étalonnages liées à la méconnaissance de forme et à l'incertitude sur la solution initiale entraînaient des incertitudes inférieures à 90 μm sur la mesure de forme.

Une fois l'ensemble de ces études appliquées sur la pièce de moyennes dimensions, le chapitre 5 s'est porté sur l'application de la méthode sur une pièce de grandes dimensions. Il s'agit alors d'adapter la méthode de corrélation d'images pour prendre en considération les problèmes de visibilité grâce à l'utilisation de masques 2D. Sur un nouveau cas d'application d'environ 2000 \times 1000 mm^2 , la méthode proposée a permis de retrouver un défaut de forme d'approximativement ± 16 mm. Malgré une visibilité du panneau de 56.9 %, le défaut de forme identifié était alors semblable à celui déterminé par un moyen de mesure industriel avec des écarts inférieurs à 0.8 mm lorsque la paire stéréoscopique était correctement étalonnée. En revanche les résultats après autoétalonnage sur forme nominale n'ont pas convergé vers le bon minimum ; des efforts supplémentaires doivent être effectués afin d'obtenir une meilleure estimation des paramètres de pose des caméras par rapport à la pièce. Une autre stratégie envisagée consisterait à ne plus s'appuyer sur un autoétalonnage mais sur une détermination des paramètres extrinsèques via un système externe. Ces deux options sont notamment discutées dans la section suivante.

Perspectives

La méthode de stéréocorrélation permet donc d'estimer le défaut de forme de pièces de grandes dimensions, cependant quelques verrous techniques et scientifiques restent à lever pour faciliter sa mise en oeuvre. L'objectif de cette section consiste donc à recenser les différentes actions devant être menées afin de permettre le développement de cette méthode .

Amélioration de la phase d'étalonnage

Une première action devant être menée repose sur l'amélioration de la phase d'étalonnage. Bien que des améliorations aient été apportées dans le chapitre 3, il semble qu'elles ne permettent pas d'obtenir un étalonnage suffisamment robuste lorsque la pièce présente un défaut de forme important. Or, il a été montré à plusieurs reprises dans ces travaux que les résultats de la mesure de défauts de forme étaient directement liés à la qualité de l'étalonnage. Ainsi, une réflexion supplémentaire doit être portée sur cette étape.

Une première solution permettant d'améliorer l'estimation des paramètres extrinsèques consisterait à réduire le nombre d'inconnues dans le problème d'autoétalonnage. Pour ce faire, la position relative des caméras serait figée, seule la position de la paire stéréoscopique par rapport à la pièce serait optimisée. Cette option permettrait de réduire le nombre d'inconnues, passant de 12 à 6, diminuant par conséquent le nombre de minima locaux et donc les possibilités de converger vers la mauvaise solution. L'impact de la méconnaissance de la géométrie réelle de la pièce aurait par conséquent moins d'impact. En revanche, pour permettre la mise en oeuvre de cette stratégie, il est nécessaire de connaître en amont la position relative des caméras; ainsi, un étalonnage préalable de la paire stéréoscopique serait nécessaire.

Une seconde possibilité consisterait à exploiter des éléments géométriques mieux maîtrisés (par exemple le porte-pièce, à l'instar des travaux de [Dubreuil et al., 2015]) ou en employant des éléments externes (de type barre étalon de longueur connue, croix d'étalonnage, cibles codées, sphères d'étalonnage). L'exploitation d'artefacts d'étalonnage de géométrie connue permettrait alors de réduire les incertitudes portant sur l'estimation des paramètres de pose du système stéréoscopique. Cependant, une phase de recalage serait alors nécessaire pour exprimer la mesure dans le repère \mathcal{R}_{CAO} (et non dans le repère $\mathcal{R}_{Artefact}$ associé à ces éléments géométriques).

Amélioration de l'étape de déformation du modèle nominal

Un second verrou limitant l'application de la méthode dans le cadre de pièces de grandes dimensions repose sur le temps de calcul lié à la déformation du modèle numérique. Pour la pièce de $2\text{ m} \times 1\text{ m}$, environ 1h20 était nécessaire pour réaliser les 415 itérations. Une modification de l'algorithme utilisé pendant cette phase peut alors être envisagée. Pour accélérer ces calculs, une proposition consisterait à pénaliser dans un premier temps les modes à faible longueur d'onde, puis de relaxer progressivement cette pénalisation. Cette option permettrait d'obtenir un problème de départ mieux conditionné et d'identifier plus aisément les modes à hautes longueurs d'onde, autrement dit les modes possédant généralement les plus fortes amplitudes modales et étant les plus sensibles vis-à-vis de la méthode de corrélation d'images (voir chapitre 2).

Une autre perspective d'amélioration consisterait à utiliser des modes technologiques pour déformer le modèle numérique. En effet, il a été montré que la sensibilité de la méthode diminuait au-delà d'une trentaine de modes. Lorsque davantage de modes sont utilisés, le conditionnement du problème diminue fortement, pénalisant l'estimation des participations modales λ . Afin de garder une base de modes réduits tout en garantissant une bonne représentativité des défauts de la pièce, les modes technologiques semblent être une solution intéressante comparée aux modes de vibration libre. Cette possibilité permettrait de faciliter la phase de déformation du modèle numérique mais nécessiterait d'apporter une connaissance supplémentaire (soit par expérience en relevant les défauts couramment présents sur un lot de pièces, soit par connaissance en analysant le procédé de fabrication et la mise en position de la pièce lors de la mesure).

Une perspective à plus long terme concernant la mesure de défauts de forme consisterait en une analyse multi-échelle. En effet dans ces travaux, seuls des modes de défaut de forme globaux ont été employés, permettant d'identifier l'allure générale de la pièce. Cependant si une mesure plus locale de la géométrie est nécessaire, une possibilité consisterait à n'étudier qu'une sous-région des images et appliquer l'algorithme de déformation du modèle numérique uniquement sur cette sous-région. Cette stratégie permettrait alors de concentrer l'analyse de défaut localement mais nécessiterait un travail supplémentaire afin de garantir une cohérence entre le défaut global et le défaut local. L'emploi de plusieurs bases modales pourrait alors devenir complexe à gérer, c'est pourquoi une solution envisageable consisterait à employer une méthode non intrusive de déformation du maillage (en utilisant par exemple des techniques de morphing, à l'instar des travaux de [Chapelier et al., 2021]).

Amélioration du mouchetis et des images acquises

La méthode de corrélation d'images étant basée sur la texture présente sur les photographies, une dernière piste d'amélioration consisterait à parfaire la phase précédant le traitement des données. Pour cela, des efforts supplémentaires peuvent être réalisés sur le mouchetis à projeter et sur les images acquises.

Le chapitre 5 a mis en évidence la perte notable de contraste sur les images lorsque des pièces de grandes dimensions sont mesurées. Les gradients de niveaux de gris sur les images étant alors moins marqués, la convergence de l'algorithme peut alors être ralentie. De plus, si l'intensité lumineuse sur la pièce est plus faible, la variation de luminosité ambiante de la scène peut davantage affecter la qualité des mesures. Pour pallier ce problème, deux stratégies peuvent être mises en place :

- la première solution consisterait à remplacer le projecteur utilisé par un projecteur plus puissant. Il serait alors possible de passer d'une intensité lumineuse d'environ 1 800 lumens (projecteur utilisé dans ces travaux) à une puissance variant entre 2 000 et 5 000 lumens, pouvant même atteindre 10 000 lumens pour les projecteurs les plus puissants;
- une seconde solution consisterait à employer plusieurs projecteurs, à l'instar de travaux déjà existant [Harvent, 2010];
- une dernière solution consisterait à réhausser artificiellement les contrastes en dilatant le spectre lumineux des images. Cette stratégie permettrait d'obtenir des contrastes plus pro-

noncés dans les zones d'intérêt, cependant des précautions doivent être prises pour que le critère de conservation des niveaux de gris soit toujours respecté.

Une autre piste d'amélioration consisterait à adapter l'image projetée afin d'obtenir une taille de motif identique sur toute la pièce. En effet, lorsqu'un motif uniforme dans l'espace projecteur est appliqué, certaines taches peuvent s'étirer en fonction de la courbure de la pièce et de l'orientation du projecteur par rapport à celle-ci. Or si la finesse du motif n'est pas uniforme sur l'intégralité de la pièce, il est possible que certaines zones deviennent plus influentes pour le problème de corrélation que d'autres. Des travaux préliminaires ont été initiés sur un mouchetis régulier constitué de taches circulaires (voir figure 5.23). Bien que les résultats obtenus soient encourageants, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour adapter cette approche quelque soit le motif à projeter et une analyse de l'impact de ces nouveaux mouchetis doit être réalisée.

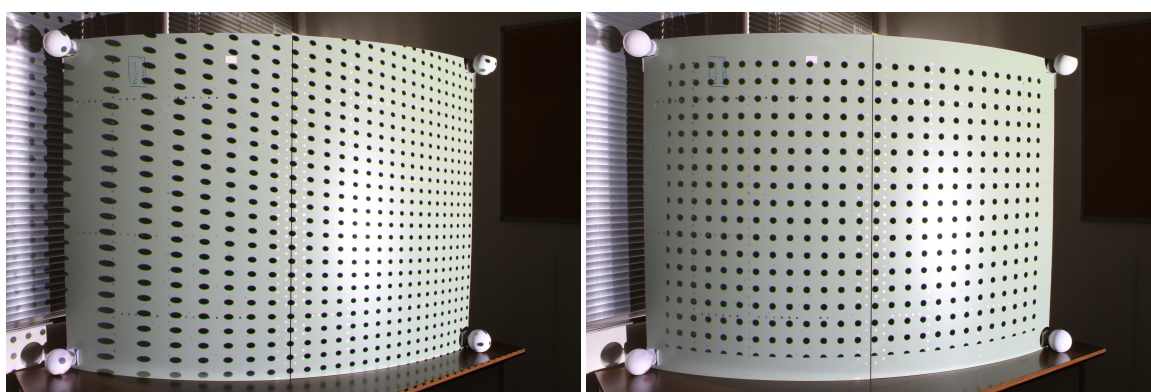


FIGURE 5.23 – Motif régulier dans l'espace projecteur (gauche) et motif adapté pour être régulier sur la pièce (droite) pour la même configuration projecteur/pièce

Pour améliorer la phase précédant la mesure, une dernière possibilité consisterait à optimiser la position relative des caméras par rapport à la pièce. En effet, il a été montré dans le chapitre 1 que cette dernière avait un impact sur l'identification du défaut de forme. Une solution consisterait alors à analyser davantage la matrice hessienne du problème de déformation du modèle numérique. Puisque cette matrice permet de connaître les défauts les plus influents pour une configuration de mesure donnée, il s'agirait d'obtenir le problème inverse. En connaissant le défaut de forme typiquement présent sur la pièce, il serait possible d'estimer la variation de paramètre extrinsèque permettant d'augmenter la sensibilité de la mesure vis-à-vis de ce défaut.

Références

- [Abenhaim et al., 2012] Abenhaim, G. N., Desrochers, A., and Tahan, A. (2012). Nonrigid parts' specification and inspection methods : notions, challenges, and recent advancements. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(5-8) :741–752. 6
- [Abenhaim et al., 2011] Abenhaim, G. N., Tahan, A. S., Desrochers, A., and Maranzana, R. (2011). A novel approach for the inspection of flexible parts without the use of special fixtures. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133(1) :011009. 6
- [Argyros, 2008] Argyros, I. K. (2008). *Convergence and applications of Newton-type iterations*. Springer Science & Business Media. 70
- [Ascione and Polini, 2010] Ascione, R. and Polini, W. (2010). Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(9-12) :1055–1067. 6
- [ASME Y14.5, 2018] ASME Y14.5 (2018). Dimensioning and Tolerancing. Standard, The American Society of Mechanical Engineers. 6
- [Audfray, 2012] Audfray, N. (2012). *Une approche globale pour la métrologie 3D automatique multi-systèmes*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan. 38
- [Ballu et al., 2017] Ballu, A., Gomes, R., Mimoso, P., Cristovao, C., and Correia, N. (2017). Comparison of mode decomposition methods tested on simulated surfaces. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*, pages 1053–1062. Springer. 24
- [Beardsley et al., 1997] Beardsley, P. A., Zisserman, A., and Murray, D. W. (1997). Sequential updating of projective and affine structure from motion. *International journal of computer vision*, 23(3) :235–259. 105, 107
- [Beaubier et al., 2014] Beaubier, B., Dufour, J.-E., Hild, F., Roux, S., Lavernhe, S., and Lavernhe-Taillard, K. (2014). Cad-based calibration and shape measurement with stereodic. *Experimental Mechanics*, 54(3) :329–341. 20, 21, 22, 23, 38, 39, 40, 49, 51, 63
- [Bertin et al., 2016] Bertin, M. B. R., Hild, F., and Roux, S. (2016). Optimization of a cruciform specimen geometry for the identification of constitutive parameters based upon full-field measurements. *Strain*, 52(4) :307–323. 51, 57
- [Besl and McKay, 1992] Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-d shapes. In *Sensor Fusion IV : Control Paradigms and Data Structures*, volume 1611, pages 586–607. International Society for Optics and Photonics. 10, 38

- [Besnard, 2010] Besnard, G. (2010). *Caractérisation et quantification de surfaces par stéréocorrélation pour des essais mécaniques du quasi statique à la dynamique ultra-rapide*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan. 21
- [Besnard et al., 2006] Besnard, G., Hild, F., and Roux, S. (2006). "finite-element" displacement fields analysis from digital images : application to portevin-le châtelier bands. *Experimental Mechanics*, 46(6) :789–803. 22
- [Blais and Levine, 1995] Blais, G. and Levine, M. D. (1995). Registering multiview range data to create 3d computer objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(8) :820–824. 10
- [Bouguet, 2004] Bouguet, J.-Y. (2004). Camera calibration toolbox for matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html. 17
- [Brown, 1971] Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogramm. Eng.* 37(8) :855–866. 16, 17, 46
- [Cao et al., 2014] Cao, V.-T., Tran, T.-T., Ali, S., Laurendeau, D., et al. (2014). Non-rigid registration for deformable objects. In *2014 International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (GRAPP)*, pages 1–10. IEEE. 29
- [Chapelier et al., 2021] Chapelier, M., Bouclier, R., and Passieux, J.-C. (2021). Free-form deformation digital image correlation (ffd-dic) : a non-invasive spline regularization for arbitrary finite element measurements. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 384 :113992. 152
- [Chen and Medioni, 1992] Chen, Y. and Medioni, G. (1992). Object modelling by registration of multiple range images. *Image and vision computing*, 10(3) :145–155. 10
- [Colantonio et al., 2020] Colantonio, G., Chapelier, M., Bouclier, R., Passieux, J.-C., and Mareníć, E. (2020). Noninvasive multilevel geometric regularization of mesh-based three-dimensional shape measurement. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 121(9) :1877–1897. 23
- [Dantan et al., 2017] Dantan, J.-Y., Huang, Z., Goka, E., Homri, L., Etienne, A., Bonnet, N., and Rivette, M. (2017). Geometrical variations management for additive manufactured product. *CIRP Annals*, 66(1) :161–164. 24
- [Dorai et al., 1998] Dorai, C., Wang, G., Jain, A. K., and Mercer, C. (1998). Registration and integration of multiple object views for 3d model construction. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 20(1) :83–89. 10
- [Dornaika and Garcia, 1997] Dornaika, F. and Garcia, C. (1997). Robust camera calibration using 2d-to-3d feature correspondences. In *Videometrics V*, volume 3174, pages 123–134. International Society for Optics and Photonics. 19, 20
- [Dubreuil et al., 2016] Dubreuil, L., Dufour, J.-E., Quinsat, Y., and Hild, F. (2016). Mesh-based shape measurements with stereocorrelation. *Experimental Mechanics*, 56(7) :1231–1242. 20, 21, 22, 33, 38, 39, 40, 49, 52
- [Dubreuil et al., 2015] Dubreuil, L., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2015). Calibration based on part set-up measurement for on-machine inspection using vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 9(4) :317–323. 19, 21, 151

- [Dufour et al., 2015a] Dufour, J.-E., Beaubier, B., Hild, F., and Roux, S. (2015a). Cad-based displacement measurements with stereo-dic. *Experimental Mechanics*, 55(9) :1657–1668. 22
- [Dufour et al., 2015b] Dufour, J.-E., Hild, F., and Roux, S. (2015b). Shape, Displacement and Mechanical Properties from Isogeometric Multiview Stereocorrelation. *J. Strain Analysis*, 50(7) :470–487. 51
- [Dufour et al., 2016] Dufour, J.-E., Leclercq, S., Schneider, J., Roux, S., and Hild, F. (2016). 3d surface measurements with isogeometric stereocorrelation-application to complex shapes. *Optics and Lasers in Engineering*, 87 :146–155. 22, 40, 49
- [Etievant et al., 2020] Etievant, D., Quinsat, Y., Thiebaut, F., and Hild, F. (2020). A modal approach for shape defect measurement based on global stereocorrelation. *Optics and Lasers in Engineering*, 128 :106030. 37, 100
- [Faugeras, 1987] Faugeras, O. (1987). Camera calibration for 3d computer vision, proc. of international workshop on industrial application of machine vision and machine intelligence. *IEEE*, 166 :240–247. 18, 19, 20, 63
- [Faugeras, 1993] Faugeras, O. (1993). *Three-dimensional computer vision : a geometric viewpoint*. MIT press. 40, 51
- [Faugeras, 1992] Faugeras, O. D. (1992). What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In *European conference on computer vision*, pages 563–578. Springer. 104
- [Faugeras et al., 1992] Faugeras, O. D., Luong, Q.-T., and Maybank, S. J. (1992). Camera self-calibration : Theory and experiments. In *European conference on computer vision*, pages 321–334. Springer. 40
- [Franciosa et al., 2011] Franciosa, P., Gerbino, S., and Patalano, S. (2011). Simulation of variational compliant assemblies with shape errors based on morphing mesh approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4) :47–61. 24
- [Ganti and Bhushan, 1995] Ganti, S. and Bhushan, B. (1995). Generalized fractal analysis and its applications to engineering surfaces. *Wear*, 180(1-2) :17–34. 23
- [Garcia, 2001] Garcia, D. (2001). *Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT. 19
- [Gavin, 2019] Gavin, H. P. (2019). The levenberg-marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems. *Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University* <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf>, pages 1–19. 71
- [Ghaoui et al., 2019] Ghaoui, S., Ledoux, Y., Ballu, A., Hoang, T., Museau, M., Vignat, F., and Ville-neuve, F. (2019). Analyse de la variation géométrique des pièces produites en fabrication additive ebm-cas de pièces avec volume surplombant. In *16e Colloque National S-mart*. 24
- [Guerra et al., 2019] Guerra, M., Lavecchia, E., Maggipinto, G., Galantucci, L., and Longo, G. (2019). Measuring techniques suitable for verification and repairing of industrial components : A comparison among optical systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 28
- [Guo et al., 2016] Guo, H., Zhu, D., and Mordohai, P. (2016). Correspondence estimation for non-rigid point clouds with automatic part discovery. *The Visual Computer*, 32(12) :1511–1524. 29

- [Hall et al., 1982] Hall, E. L., Tio, J. B., McPherson, C. A., and Sadjadi, F. A. (1982). Measuring curved surfaces for robot vision. *Computer*, 15(12) :42–54. 40, 63
- [Han et al., 2018] Han, X.-F., Jin, J. S., Wang, M.-J., and Jiang, W. (2018). Guided 3d point cloud filtering. *Multimedia Tools and Applications*, 77(13) :17397–17411. 38
- [Hartley, 1992] Hartley, R. I. (1992). Estimation of relative camera positions for uncalibrated cameras. In *European conference on computer vision*, pages 579–587. Springer. 107, 108
- [Hartley, 1993] Hartley, R. I. (1993). Euclidean reconstruction from uncalibrated views. In *Joint European-US workshop on applications of invariance in computer vision*, pages 235–256. Springer. 39
- [Hartley, 1997] Hartley, R. I. (1997). In defense of the eight-point algorithm. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 19(6) :580–593. 105
- [Hartley et al., 1992] Hartley, R. I., Gupta, R., and Chang, T. (1992). Stereo from uncalibrated cameras. In *CVPR*, volume 92, pages 761–764. 104
- [Hartley and Sturm, 1997] Hartley, R. I. and Sturm, P. (1997). Triangulation. *Computer vision and image understanding*, 68(2) :146–157. 107, 110
- [Harvent, 2010] Harvent, J. (2010). *Mesure de formes par corrélation multi-images : application à l'inspection de pièces aéronautiques à l'aide d'un système multi-caméras*. PhD thesis, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier. 152
- [Harvent et al., 2008] Harvent, J., Bugarin, F., Orteu, J.-J., Devy, M., Barbeau, P., and Marin, G. (2008). Inspection of aeronautics parts for shape defect detection using a multi-camera system. In *Proceedings of SEM XI International Congress on Experimental and Applied Mechanics. Orlando, FL, USA*, pages 2–5. 18, 22
- [Heikkila and Silvén, 1997] Heikkila, J. and Silvén, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In *Proceedings of IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition*, pages 1106–1112. IEEE. 63
- [Helm et al., 1996] Helm, J. D., McNeill, S. R., and Sutton, M. A. (1996). Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement. *Optical Engineering*, 35(7) :1911–1921. 12
- [Hild and Roux, 2012a] Hild, F. and Roux, S. (2012a). Comparison of local and global approaches to digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 52(9) :1503–1519. 22
- [Hild and Roux, 2012b] Hild, F. and Roux, S. (2012b). *Digital image correlation*. Wiley-VCH, Weinheim. 12
- [Hild and Roux, 2012c] Hild, F. and Roux, S. (2012c). Digital image correlation. In Rastogi, P. and Hack, E., editors, *Optical Methods for Solid Mechanics. A Full-Field Approach*, pages 183–228, Weinheim (Germany). Wiley-VCH. 40
- [Huang and Ceglarek, 2002] Huang, W. and Ceglarek, D. (2002). Mode-based decomposition of part form error by discrete-cosine-transform with implementation to assembly and stamping system with compliant parts. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(1) :21–26. 23

- [ISO 10110-5, 2015] ISO 10110-5 (2015). Optics and photonics - Preparation of drawings for optical elements and systems - Part 5 : surface form tolerances. Standard, International Organization for Standardization. 23
- [ISO 10579, 2013] ISO 10579 (2013). Geometrical product specifications (GPS) - Dimensioning and tolerancing - Non-rigid parts. Standard, International Organization for Standardization. 6
- [ISO 12181-1, 2011] ISO 12181-1 (2011). Geometrical product specifications (gps) – roundness – part 1 : Vocabulary and parameters of roundness. Standard, International Organization for Standardization. 24
- [ISO 25178-73, 2019] ISO 25178-73 (2019). Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture : Areal - Part 73 : terms and definitions for surface defects on material measures. Standard, International Organization for Standardization. 10
- [ISO 4287, 1997] ISO 4287 (1997). Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture : Profile method. Terms, definitions and surface texture parameters. Standard, International Organization for Standardization. 37
- [ISO 4288, 1998] ISO 4288 (1998). Geometrical product specifications (gps) - surface texture : Profile method - rule and procedures for the assessment of surface texture. Standard, International Organization for Standardization. 10
- [ISO/IEC Guide 98-3, 2014] ISO/IEC Guide 98-3 (2014). Uncertainty of measurement - Part 3 : Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM : 1995). Standard, International Organization for Standardization. 47
- [ISO/IEC Guide 99, 2011] ISO/IEC Guide 99 (2011). International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). Technical report, International Organization for Standardization. 47
- [Jones et al., 2018] Jones, E. M., Iadicola, M. A., et al. (2018). A good practices guide for digital image correlation. *International Digital Image Correlation Society*, 10. 53
- [Koch, 1995] Koch, R. (1995). 3-d surface reconstruction from stereoscopic image sequences. In *Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on*, pages 109–114. IEEE. 12
- [Lavest et al., 1999] Lavest, J.-M., Viala, M., and Dhome, M. (1999). Quelle précision pour une mire d'étalonnage? dowe really need an accurate calibration pattern? *Traitement du signal*, 16(3). 63, 64
- [Leclerc et al., 2015] Leclerc, H., Neggers, J., Mathieu, E., Hild, F., and Roux, S. (2015). Correli 3.0. IDDN.FR.001.520008.000.S.P.2015.000.31500, Agence pour la Protection des Programmes, Paris (France). 49
- [Levenberg, 1944] Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2) :164–168. 69
- [Longuet-Higgins, 1981] Longuet-Higgins, H. C. (1981). A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293(5828) :133–135. 108
- [Ma et al., 1993] Ma, S., Wei, G., and Huang, J. (1993). Segment based camera calibration. *Journal of Computer Science and Technology*, 8(1) :11–16. 19, 20

- [Marquardt, 1963] Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2) :431–441. 69
- [Masuda et al., 1996] Masuda, T., Sakaue, K., and Yokoya, N. (1996). Registration and integration of multiple range images for 3-d model construction. In *Proceedings of 13th international conference on pattern recognition*, volume 1, pages 879–883. IEEE. 10
- [Morvan, 2009] Morvan, Y. (2009). *Acquisition, compression and rendering of depth and texture for multi-view video*. PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven. 19, 20
- [Pierré et al., 2017] Pierré, J.-E., Passieux, J.-C., and Périé, J.-N. (2017). Finite Element Stereo Digital Image Correlation : Framework and Mechanical Regularization. *Experimental Mechanics*, 57(3) :p.443–456. 40
- [Quinsat et al., 2017] Quinsat, Y., Dubreuil, L., et al. (2017). A novel approach for in-situ detection of machining defects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(5-8) :1625–1638. 20, 21
- [Rebergue et al., 2017] Rebergue, G., Blaysat, B., Chanal, H., and Duc, E. (2017). Dic in machining environment, constraints and benefits. In *International Digital Imaging Correlation Society*, pages 77–80. Springer. 22
- [Rebergue et al., 2018] Rebergue, G., Blaysat, B., Chanal, H., and Duc, E. (2018). Advanced dic for accurate part deflection measurement in a machining environment. *Journal of Manufacturing Processes*, 33 :10–23. 22
- [Renishaw, 2021] Renishaw (2021). Famille des palpeurs analogiques de scanning SP600 Renishaw. <https://www.renishaw.fr/fr/sp600-6687>. 9
- [Rothwell et al., 1997] Rothwell, C., Faugeras, O., and Csurka, G. (1997). A comparison of projective reconstruction methods for pairs of views. *Computer Vision and Image Understanding*, 68(1) :37–58. 105
- [Roux et al., 2008] Roux, S., Hild, F., Viot, P., and Bernard, D. (2008). Three-dimensional image correlation from x-ray computed tomography of solid foam. *Composites Part A : Applied science and manufacturing*, 39(8) :1253–1265. 22
- [Rusinkiewicz and Levoy, 2001] Rusinkiewicz, S. and Levoy, M. (2001). Efficient variants of the icp algorithm. In *Proceedings third international conference on 3-D digital imaging and modeling*, pages 145–152. IEEE. 10
- [Ruto et al., 2006] Ruto, A., Lee, M., and Buxton, B. (2006). Comparing principal and independent modes of variation in 3d human torso shape using pca and ica. Technical Report 4, ICA Research Network International Workshop. 24
- [Salvi et al., 2002] Salvi, J., Armangué, X., and Batlle, J. (2002). A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation. *Pattern recognition*, 35(7) :1617–1635. 19, 20, 39
- [Samper and Formosa, 2007] Samper, S. and Formosa, F. (2007). Form defects tolerancing by natural modes analysis. *Journal of computing and information science in engineering*, 7(1) :44–51. 24, 163

- [Savio et al., 2007] Savio, E., De Chiffre, L., and Schmitt, R. (2007). Metrology of freeform shaped parts. *CIRP annals*, 56(2) :810–835. vii, 8, 9, 11
- [Scholefield et al., 2019] Scholefield, A., Ghasemi, A., and Vetterli, M. (2019). Bound and conquer : Improving triangulation by enforcing consistency. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 105
- [Schwenke et al., 2002a] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., and Kunzmann, H. (2002a). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CirP Annals*, 51(2) :685–699. 12
- [Schwenke et al., 2002b] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., and Kunzmann, H. (2002b). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *CIRP Annals*, 51(2) :685 – 699. 38
- [Senin et al., 2013] Senin, N., Colosimo, B., and Pacella, M. (2013). Point set augmentation through fitting for enhanced icp registration of point clouds in multisensor coordinate metrology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1) :39 – 52. 38
- [Sutherland, 1964] Sutherland, I. E. (1964). Sketchpad a man-machine graphical communication system. *Simulation*, 2(5) :R–3. 19, 20
- [Sutton et al., 2009] Sutton, M. A., Orteu, J. J., and Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements : basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media. 12, 18, 22, 40, 51
- [Thiébaud et al., 2018] Thiébaud, F., Bendjebba, S., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2018). Nonrigid registration for form defect identification of thin parts. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 18(2) :021012. v, vi, 29, 47, 74, 100, 163
- [Thiébaud et al., 2017] Thiébaud, F., Lacroix, C., Andolfatto, L., and Lartigue, C. (2017). Evaluation of the shape deviation of non rigid parts from optical measurements. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5) :1937 – 1944. 6, 24
- [Tsai, 1987] Tsai, R. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(4) :323–344. 17, 19, 20, 40
- [Weng et al., 1992] Weng, J., Cohen, P., Herniou, M., et al. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 14(10) :965–980. 16, 17, 19, 20, 40
- [XP E04-007, 2015] XP E04-007 (2015). Geometrical product specifications (GPS) - Discreet modal decomposition - Analysis method. Standard, Association Française de Normalisation (AFNOR). 24
- [Yun et al., 2002] Yun, W.-S., Ko, J. H., Cho, D.-W., and Ehmann, K. F. (2002). Development of a virtual machining system, part 2 : prediction and analysis of a machined surface error. *International Journal of machine tools and Manufacture*, 42(15) :1607–1615. 24
- [ZEISS,] ZEISS. Tritop : Optical photogrammetry system | flexibility, mobility. <https://www.gom.com/fr-fr/products/3d-scanning/tritop>. iii, 27

- [ZEISS, 2021] ZEISS (2021). Capteur scanning tactile ZEISS VAST XXT. <https://www.zeiss.fr/metrologie/produits/capteurs/sur-mmt/capteurs-scanning-tactiles/vast-xt.html>. 9
- [Zernike, 1942] Zernike, F. (1942). Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects. *Physica*, 9(7) :686–698. 23
- [Zhang et al., 2011] Zhang, M., Anwer, N., Mathieu, L., and Zhao, H. (2011). A discrete geometry framework for geometrical product specifications. Technical Report 20, Proceedings of the 21st CIRP Design Conference, Kaist, MK Thompson, ed., Paper. 17
- [Zhang, 2000] Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(11) :1330–1334. 63
- [Zhu et al., 2007] Zhu, L., Barhak, J., Srivatsan, V., and Katz, R. (2007). Efficient registration for precision inspection of free-form surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(5-6) :505–515. 38
- [Zuquete Guarato, 2013] Zuquete Guarato, A. (2013). *Métrieologie 3D de pièces de formes complexes par moyens optiques : Une application à l'équilibrage de vilebrequins*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan. 38

Annexes

A ICP non rigide

De nombreux algorithmes de recalage rigides et non rigides existent dans la littérature. Dans ces travaux, le choix à été fait d'exploiter la méthode proposée par [Thiébaud et al., 2018]. Cet algorithme étant exploité à plusieurs reprises au cours de ces travaux, cette section vise à expliquer son principe et l'analyse générale de ces résultats de sortie.

Dans cette méthode, chacun des points du modèle nominal est associé avec les K plus proches voisins du nuage numérisé. Pour assurer que l'hétérogénéité de la numérisation et le bruit de mesure ne posent pas de problème lors du calcul des transformations, la correspondance est considérée valide uniquement si l'ensemble des K plus proches voisins sont compris dans le cylindre de rayon R , de hauteur h et d'axe la normale locale de la géométrie nominale. Une fois la correspondance validée, l'écart ξ_i considéré correspond à la projection sur la normale locale de la distance entre le barycentre des K voisins et le point nominal (voir Figure 24).

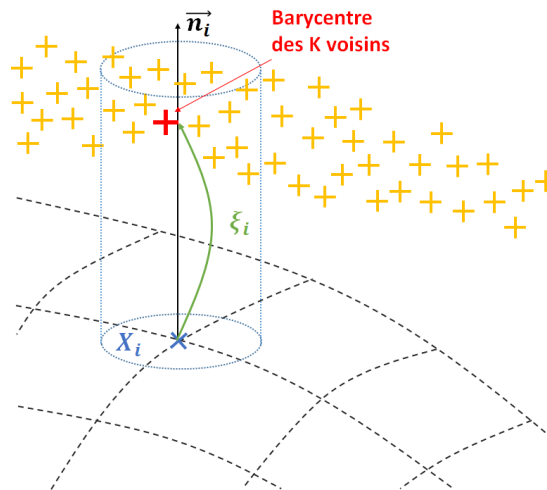


FIGURE 24 – Principe d'appariement de l'ICP non rigide considéré [Thiébaud et al., 2018]

Une fois l'ensemble des écarts ξ_i évalués, la surface nominale est déformée en s'appuyant sur une base modale \mathbf{Q} . Dans ces travaux et à l'instar des travaux de Samper [Samper and Formosa, 2007], la base modale considérée s'appuiera sur les modes propres de vibrations calculés comme solution éléments finis du maillage nominal.

Puisque la base considérée s'appuie sur des modes propres de vibration, les 6 premiers modes de la base correspondent à des corps rigides et les modes restants sont des modes déformants. Ainsi avec cette approche, le recalage rigide et la déformation du modèle sont réalisés simultanément.

Les amplitudes modales λ_j^k associées à chacun des modes \mathbf{q}_j à l'itération k sont alors calculées afin de minimiser les écarts ξ_i selon un critère des moindres carrés :

$$\lambda_j^k = \underset{\lambda_j^k}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_i (\xi_i - \sum_{j=1}^N \lambda_j^k \mathbf{q}_j)^2 \right) \quad (1)$$

En itérant la phase d'appariement et l'étape d'estimation des amplitudes modales, il est possible de réaliser le recalage rigide de la pièce. Après convergence, les données de sortie de l'algorithme sont :

- les valeurs des écarts ξ_i en chacun des points du modèle nominal. Après convergence, ces écarts correspondent au résidu de recalage. Pour vérifier la validité des résultats obtenus, les différents écarts ξ_i seront présentés soit sous la forme d'un histogramme (voir figures 25(a-b)) pour analyser la distribution des écarts résiduels, soit sous la forme d'une cartographie pour voir leur répartition sur la pièce (voir Figures 25(c-d)).

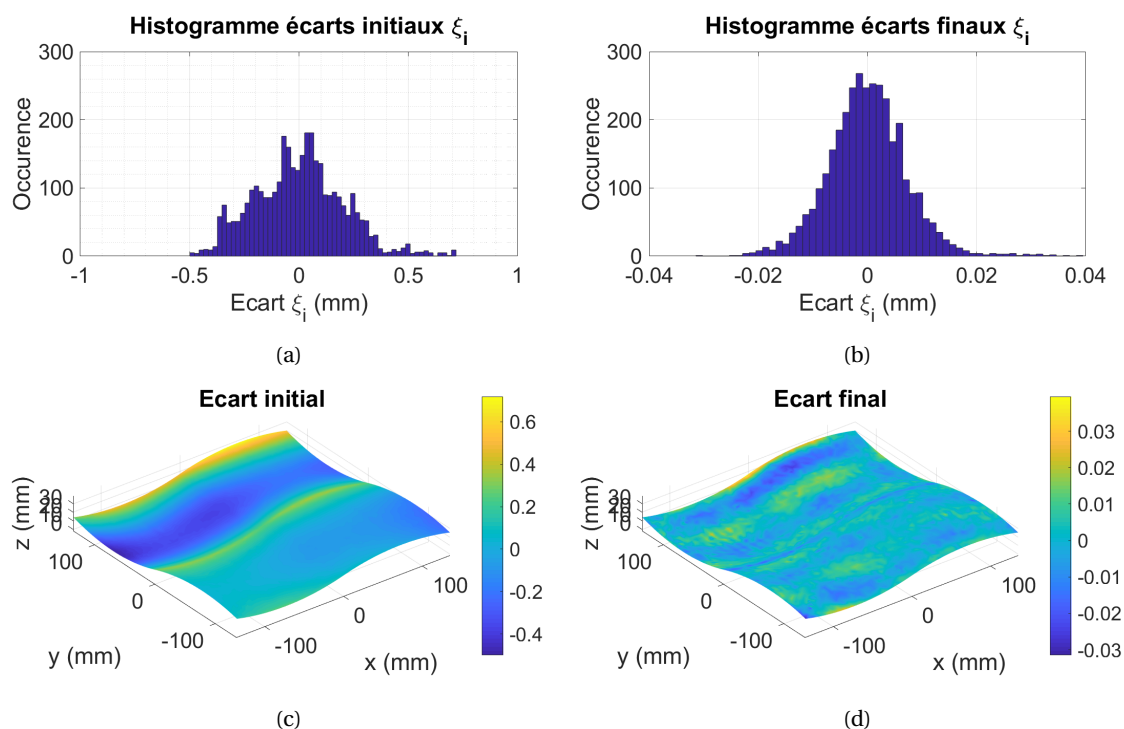


FIGURE 25 – Histogramme des écarts ξ_i avant et après recalage ICP non rigide (a-b) et cartographie d'écarts correspondante (c-d)

- les valeurs modales λ_j associées à chacun des modes \mathbf{q}_j . L'ensemble des valeurs modales λ_j correspondent à la transformation à appliquer au modèle nominal pour s'aligner "au mieux" avec le modèle numérisé. Ces résultats présentés seront par la suite sous la forme

de diagramme à barre (voir Figure 26(a)). De plus, de par la construction de la base modale considérée , les valeurs de λ_j seront analysées différemment selon si elles correspondent à des modes rigides ($j = 1..6$, en rouge sur la figure 26(a)) ou des modes déformants ($j = 7..N$, en bleu sur la figure 26(a)). Les amplitudes des modes rigides seront exploitées pour ajuster la position et l'orientation des deux nuages de points, tandis que les amplitudes des modes déformants serviront à identifier le défaut de forme. Ce dernier pourra alors être présenté sous forme d'une cartographie (voir Figure 26(b)).

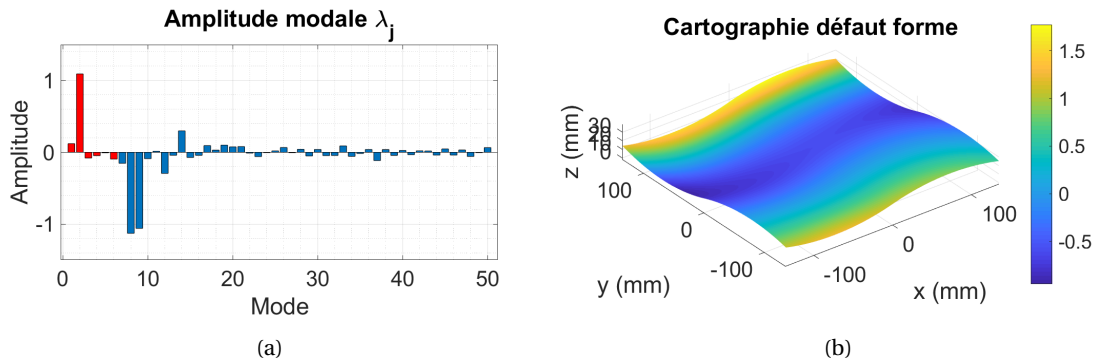


FIGURE 26 – Amplitudes modales λ_j calculées (a) et cartographie de défaut de forme associée (b)

B Mesure par lumière structurée ATOS

B.1 Mesure par photogrammétrie de cibles TRITOP

Le système TRITOP est un système optique portatif basé sur la photogrammétrie de cibles conçu pour la mesure tridimensionnelle de pièce mécanique. Il est constitué d'un appareil photographique, de barres d'étalonnage en fibre de carbone de longueur certifiée et d'un ensemble de cibles codées.



FIGURE 27 – Système de photogrammétrie TRITOP comprenant barres d'étalonnage, croix avec cibles codées et appareil photographique

Parmi l'ensemble des appareils photographiques compatibles avec TRITOP, l'appareil retenu pour ces travaux est un Canon EOS 5DS R équipé d'un objectif à focale fixe et d'un flash, permettant l'obtention de photographies avec une résolution de 8688×5792 pixels. Deux barres d'étalonnage SG 7855 et SG 7856 de longueur respective 952.800 mm et 951.103 mm sont également employées, permettant de mesurer des objets d'environ 1 m d'envergure.

Avant de réaliser les prises de vue, les barres d'étalonnage et les cibles codées doivent être disposées autour de la pièce. Éventuellement, des pastilles non codées peuvent être placées sur la pièce pour permettre la mesure locale de géométrie. Une fois les différentes cibles installées, l'utilisateur peut photographier la scène avec des angles de vues variés tout autour de la pièce. Le logiciel de traitement GOM Inspect détecte alors les centres des cibles dans chacune des photographies, appaire dans chaque image les cibles disposant du même code puis calcule la position de chaque cible dans l'espace 3D.

Le logiciel calcule également l'incertitude des coordonnées 2D des centres de cibles en fonction de la qualité l'image (contraste, taille 2D des cibles et incertitude sur les longueurs des barres d'étalonnage) et l'incertitude sur les coordonnées 3D en prenant également en compte le nombre et les directions d'observation de chacun des points. Les résultats ne sont alors validés par le logiciel que si l'incertitude 2D est inférieure à 0.08 pixels et l'incertitude 3D est inférieure à la valeur définie par la formule suivante :

$$\text{erreur seuil}_{3D} = \frac{\text{Distance max. points codés [mm]}}{10^5} + 2.5 \mu\text{m}$$

B.2 Mesure par projection de franges ATOS Core

Pour obtenir une mesure plus dense, le système de photogrammétrie de cible peut être couplé à un autre système. Dans le présent travail, un système de projection de franges ATOS Core 300 SN : 171215 a été utilisé. Ce système est composé de deux caméras (distance focale : 12.5mm) et d'un projecteur (distance focale : 8.0 mm), permettant d'étudier un volume d'environ $300 \times 230 \times 230 \text{ mm}^3$.



FIGURE 28 – Système ATOS Core composé de deux caméras et d'un projecteur

Ce système industriel de l'entreprise GOM a été certifié pour caractériser l'erreur de forme et l'erreur de dimension que l'appareil pouvait percevoir. Pour cela, deux sphères de diamètre 25.0003 mm et 25.0073 mm ont été mesurées avec 3 orientations différentes, et pour chacune d'entre elles, 10 acquisitions ont été effectuées. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.

		Erreur de forme : Écart-type σ	Erreur de dimension : $D_{mes} - D_{nom}$
Sphere 1	Mesure 1	2 μm	-6 μm
	Mesure 2	2 μm	-19 μm
	Mesure 3	2 μm	-10 μm
Sphere 2	Mesure 1	2 μm	-6 μm
	Mesure 2	3 μm	-19 μm
	Mesure 3	2 μm	-9 μm
Erreur maximale		3 μm	-19 μm

TABLEAU 4 – Résultats de la caractérisation de l'ATOS Core

D'après cet essai, l'erreur de forme maximale obtenue avec ce système est de 3 μm , ce qui représente une erreur relative de $1.9 \times 10^{-2}\%$ par rapport au diamètre nominal de la sphère. Ainsi, le système ATOS Core sera considéré par la suite comme un système de référence.

C Calcul de la fonction d'autocorrélation d'une image

Pour déterminer la taille des motifs présents sur une image, une technique classiquement employée consiste à étudier la fonction d'autocorrélation de cette même image. Pour cela, introduisons \mathbf{I} une matrice de taille $M \times N$ correspondant aux valeurs de niveau de gris de l'image considérée. La matrice \mathbf{I} étant réelle, la fonction d'auto-corrélation est alors définie par

$$\mathbf{C}(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \mathbf{I}(x, y) \mathbf{I}(x - u, y - v) \quad (2)$$

avec

$$-(M - 1) \leq u \leq (M - 1) \quad (3)$$

$$-(N - 1) \leq v \leq (N - 1) \quad (4)$$

Cette fonction d'autocorrélation peut prendre des valeurs positives ou négatives et atteint son maximum lorsque $u = v = 0$. Il est donc possible de normaliser la fonction d'autocorrélation pour que son résultat soit compris entre -1 et 1 :

$$\mathbf{C}_{norm}(u, v) = \frac{\mathbf{C}(u, v)}{\mathbf{C}(0, 0)} = \frac{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \mathbf{I}(x, y) \mathbf{I}(x - u, y - v)}{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \mathbf{I}(x, y) \mathbf{I}(x, y)} \quad (5)$$

Une fois calculée, la fonction d'autocorrélation apporte des informations concernant la taille des motifs présents sur l'image ainsi qu'une éventuelle périodicité. Un critère classiquement retenu pour estimer la dimension des motifs d'une image consiste à calculer la largeur à mi-hauteur de la fonction d'auto-corrélation (ou *Full width at half maximum (FWHM)*), autrement dit le diamètre du cercle défini lorsque la fonction d'autocorrélation normalisée vaut 0.5.

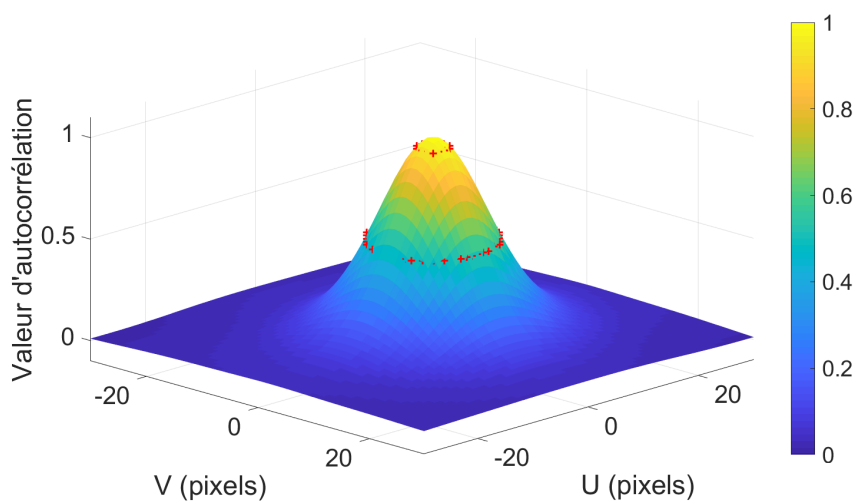


FIGURE 29 – Exemple d'autocorrélation et détermination des rayons à 50

D Autocorrélation des mouchetis employés

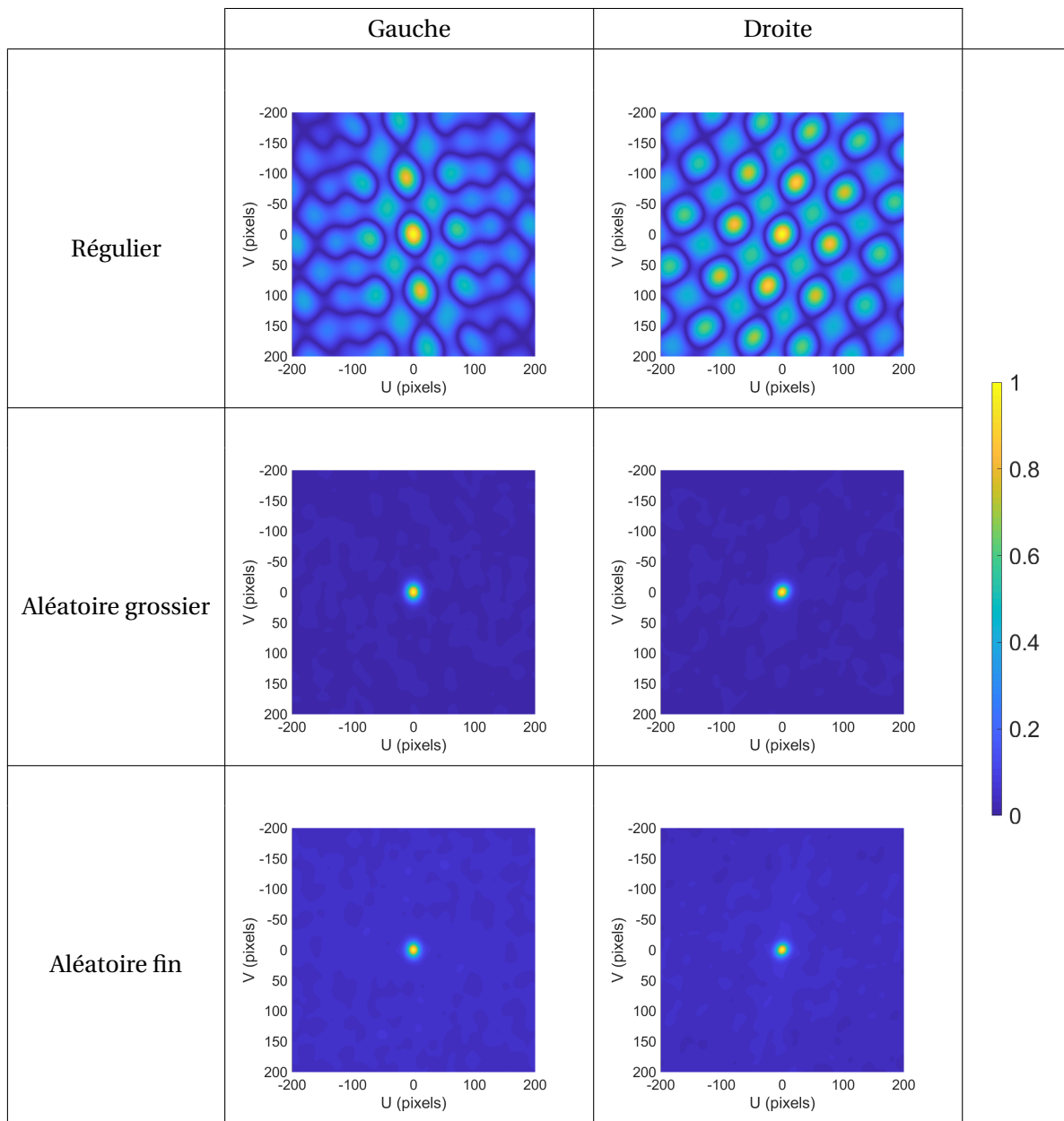


TABLEAU 5 – Fonction d'autocorrélation normalisée pour les trois mouchetis employés

E Champs 3D projetés obtenus par triangulation linéaire

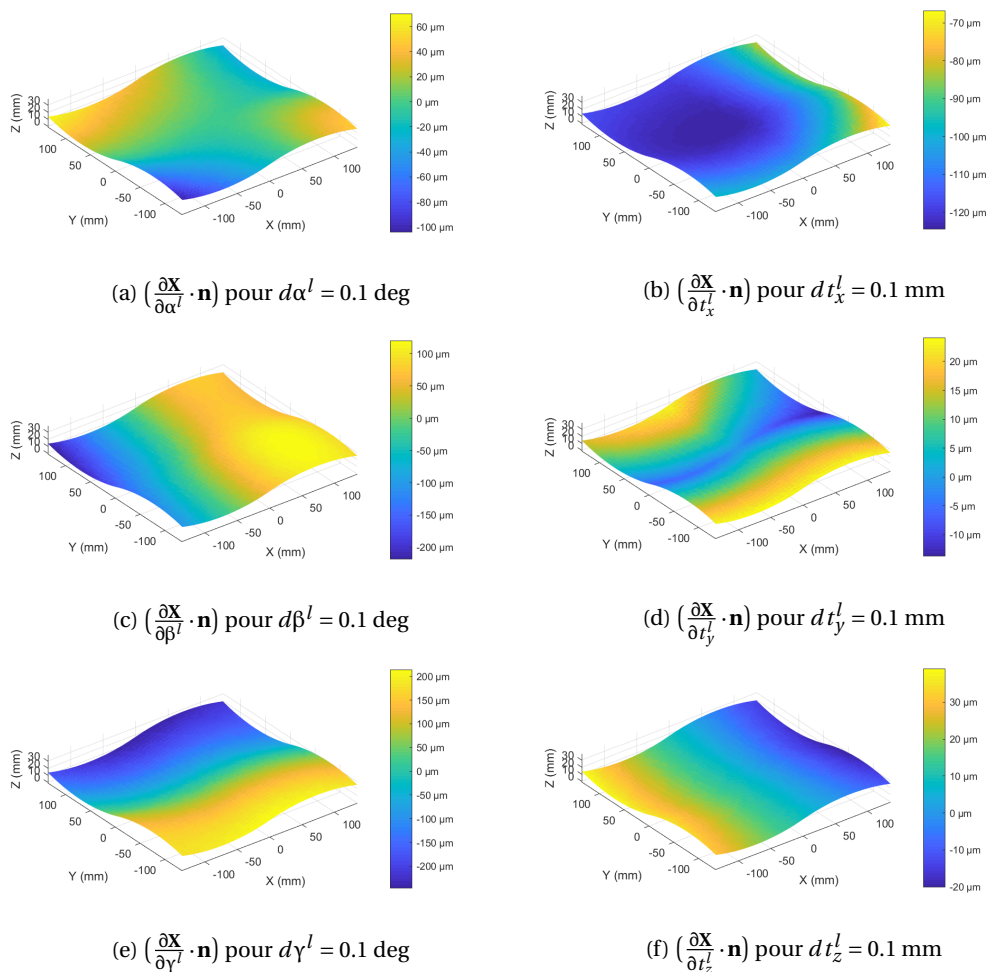


FIGURE 30 – Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par triangulation linéaire

F Champs 3D projetés obtenus par point milieu

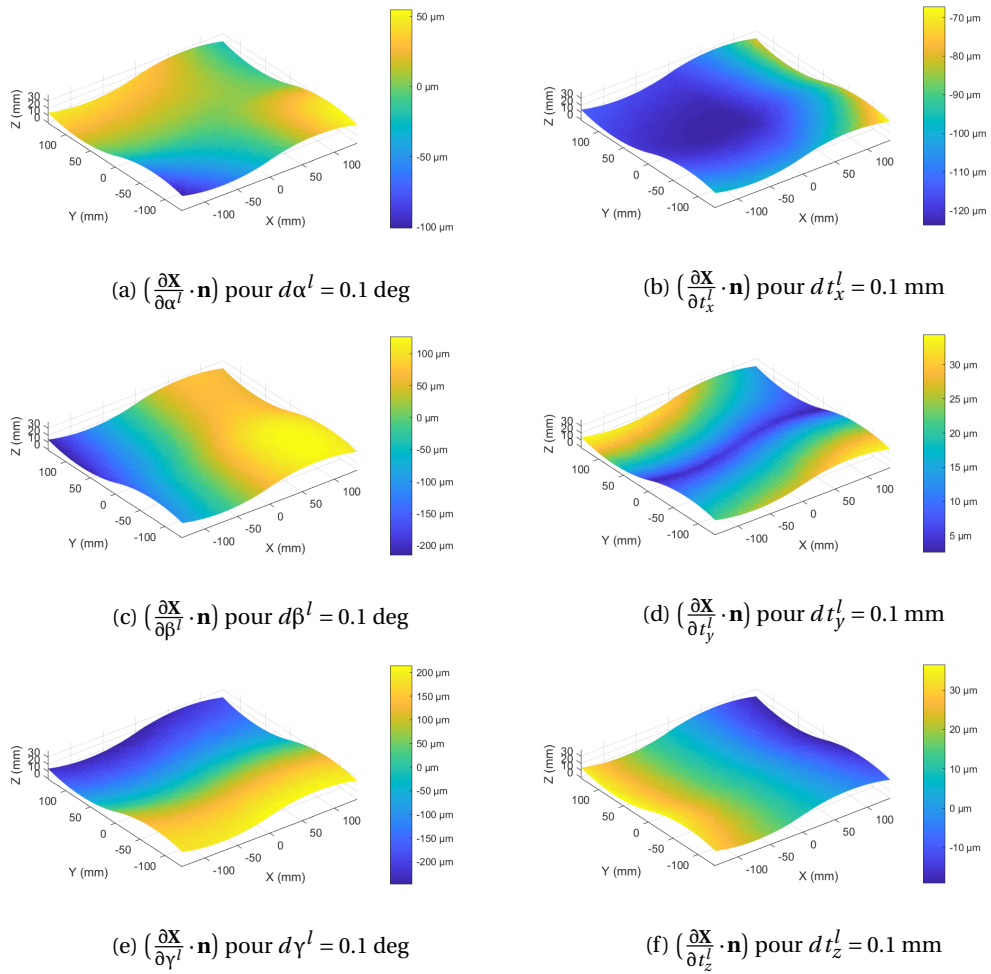


FIGURE 31 – Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par la méthode du point milieu

G Champs 3D projetés obtenus par la méthode polynomiale

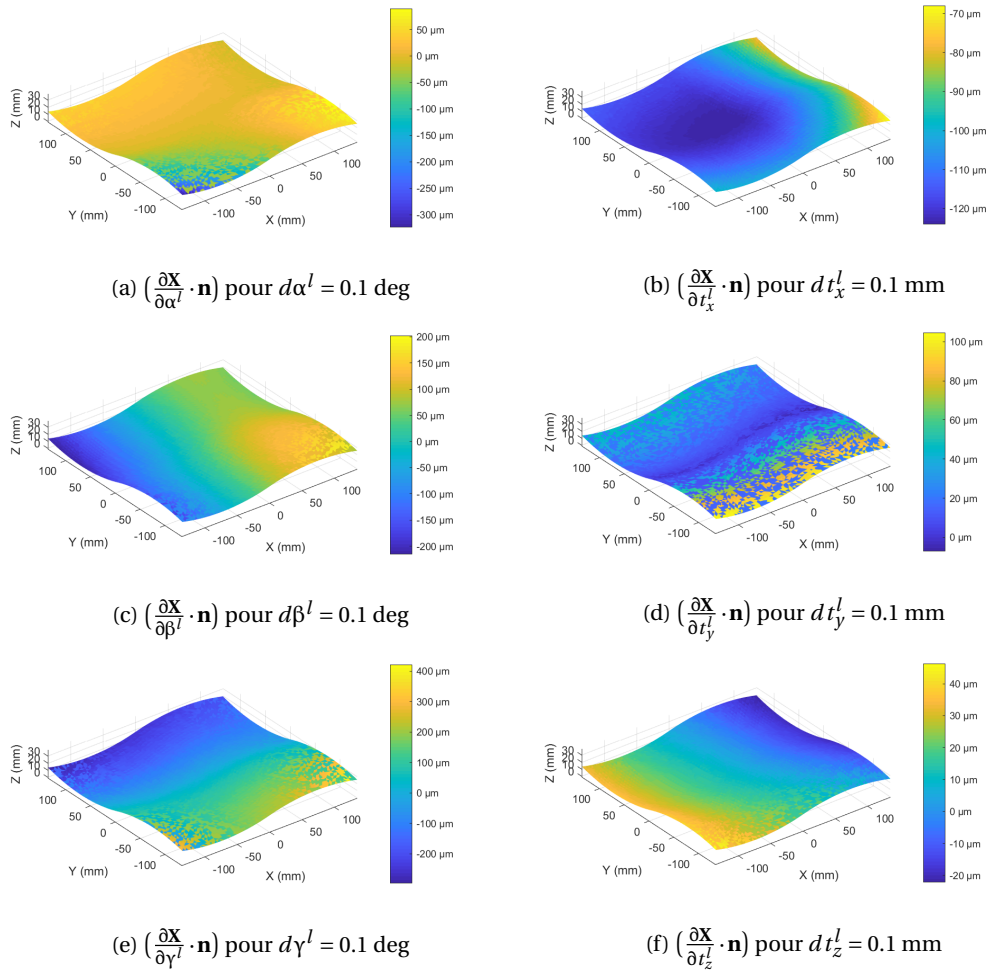


FIGURE 32 – Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par la méthode polynomiale

H Champs 3D projetés obtenus par approximation de Sampson

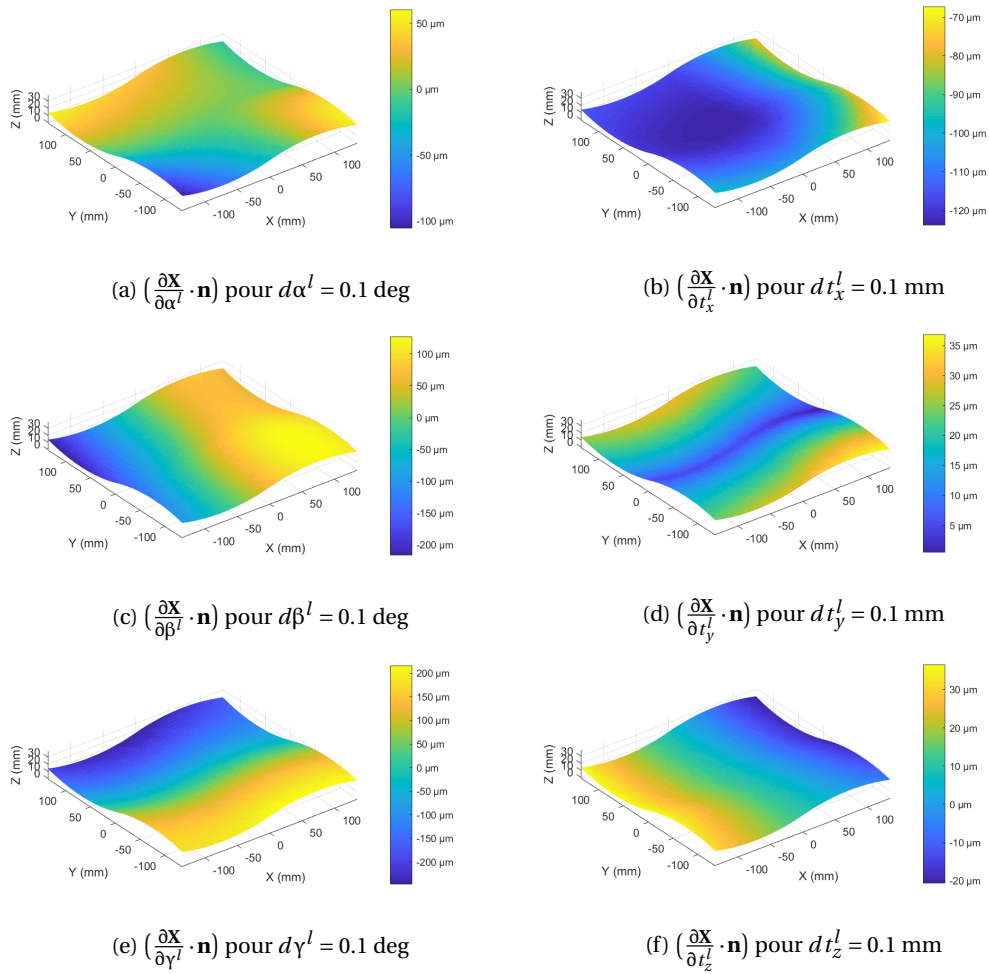
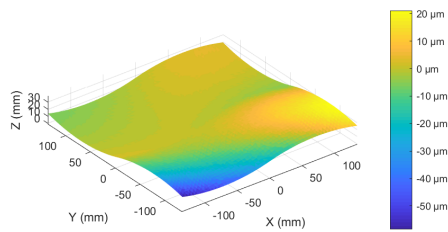
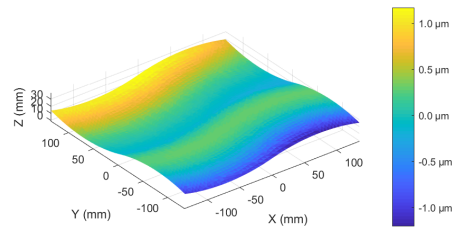


FIGURE 33 – Champs 3D projetés selon la normale locale obtenus par approximation de Sampson

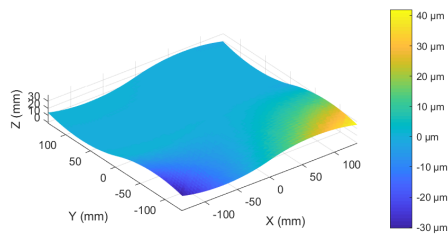
I Influence des approximations de triangulation dans l'espace 3D



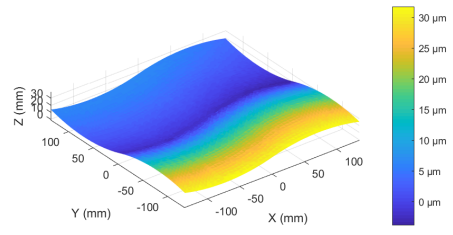
(a) Incertitude de $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha^l} \cdot \mathbf{n})$ pour $d\alpha^l = 0.1 \text{ deg}$



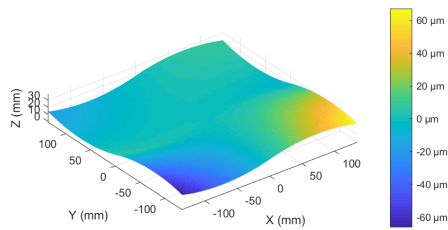
(b) Incertitude de $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n})$ pour $dt_x^l = 0.1 \text{ mm}$



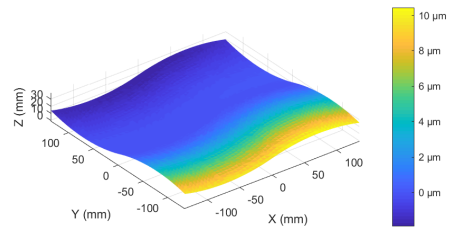
(c) Incertitude de $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \beta^l} \cdot \mathbf{n})$ pour $d\beta^l = 0.1 \text{ deg}$



(d) Incertitude de $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_y^l} \cdot \mathbf{n})$ pour $d\alpha^l = 0.1 \text{ mm}$



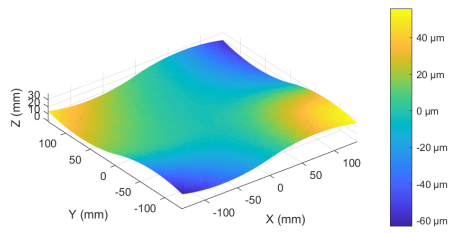
(e) Incertitude de $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \gamma^l} \cdot \mathbf{n})$ pour $d\gamma^l = 0.1 \text{ deg}$



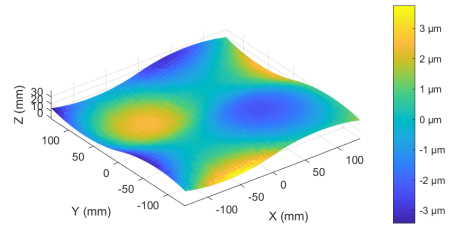
(f) Incertitude de $(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_z^l} \cdot \mathbf{n})$ pour $dt_z^l = 0.1 \text{ mm}$

FIGURE 34 – Projection selon la normale locale de la demi-longueur de la perpendiculaire commune calculée avec la méthode du point milieu

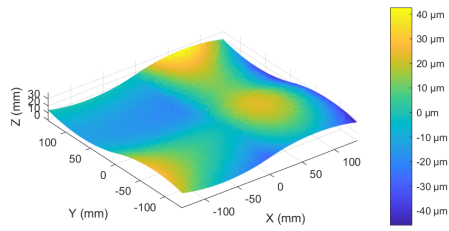
J Champs 3D projetés obtenus par point milieu sans la composante de corps rigide



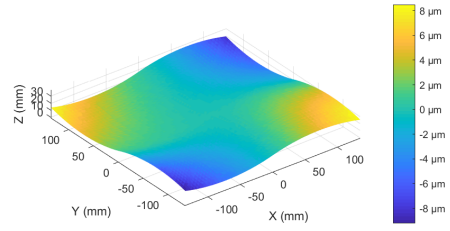
(a) $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \alpha^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ pour $d\alpha^l = 0.1 \text{ deg}$



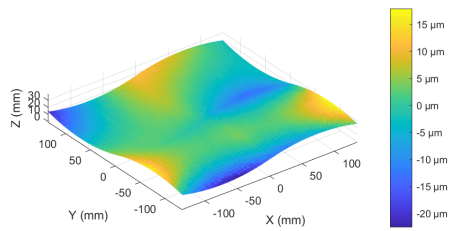
(b) $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_x^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ pour $dt_x^l = 0.1 \text{ mm}$



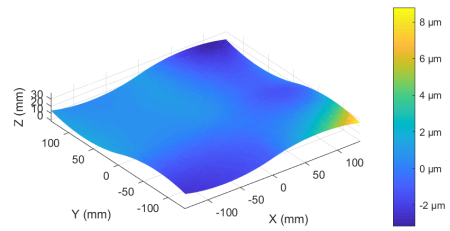
(c) $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \beta^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ pour $d\beta^l = 0.1 \text{ deg}$



(d) $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_y^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ pour $dt_y^l = 0.1 \text{ mm}$



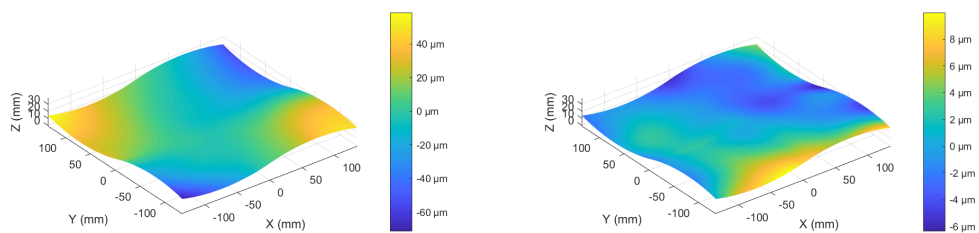
(e) $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \gamma^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ pour $d\gamma^l = 0.1 \text{ deg}$



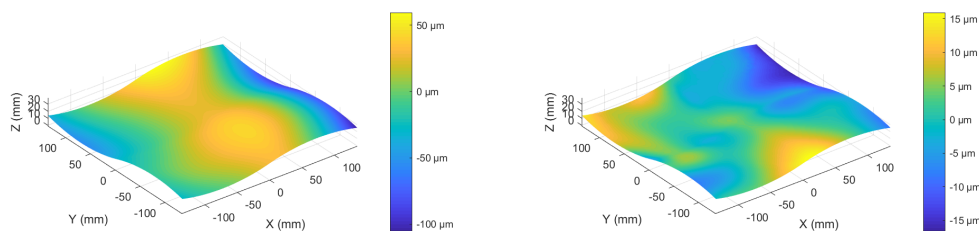
(f) $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t_z^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ pour $dt_z^l = 0.1 \text{ mm}$

FIGURE 35 – Champs 3D $\left(\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{a}^l} \cdot \mathbf{n}\right)_{\text{sans CR}}$ obtenus par point milieu

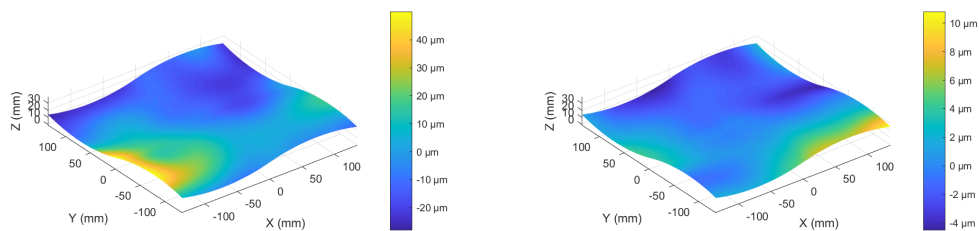
K Champs 3D calculés par corrélation d'images



(a) Variation de défaut de forme pour $d\alpha^l = 0.1 \text{ deg}$ (b) Variation de défaut de forme pour $dt_x^l = 0.1 \text{ mm}$



(c) Variation de défaut de forme pour $d\beta^l = 0.1 \text{ deg}$ (d) Variation de défaut de forme pour $dt_y^l = 0.1 \text{ mm}$



(e) Variation de défaut de forme pour $d\gamma^l = 0.1 \text{ deg}$ (f) Variation de défaut de forme pour $dt_z^l = 0.1 \text{ mm}$

FIGURE 36 – Variation de défaut de forme mesuré par corrélation d'images correspondant à un défaut d'étalement de da^l

L Modes propres du panneau avec prise en compte des cadres forts

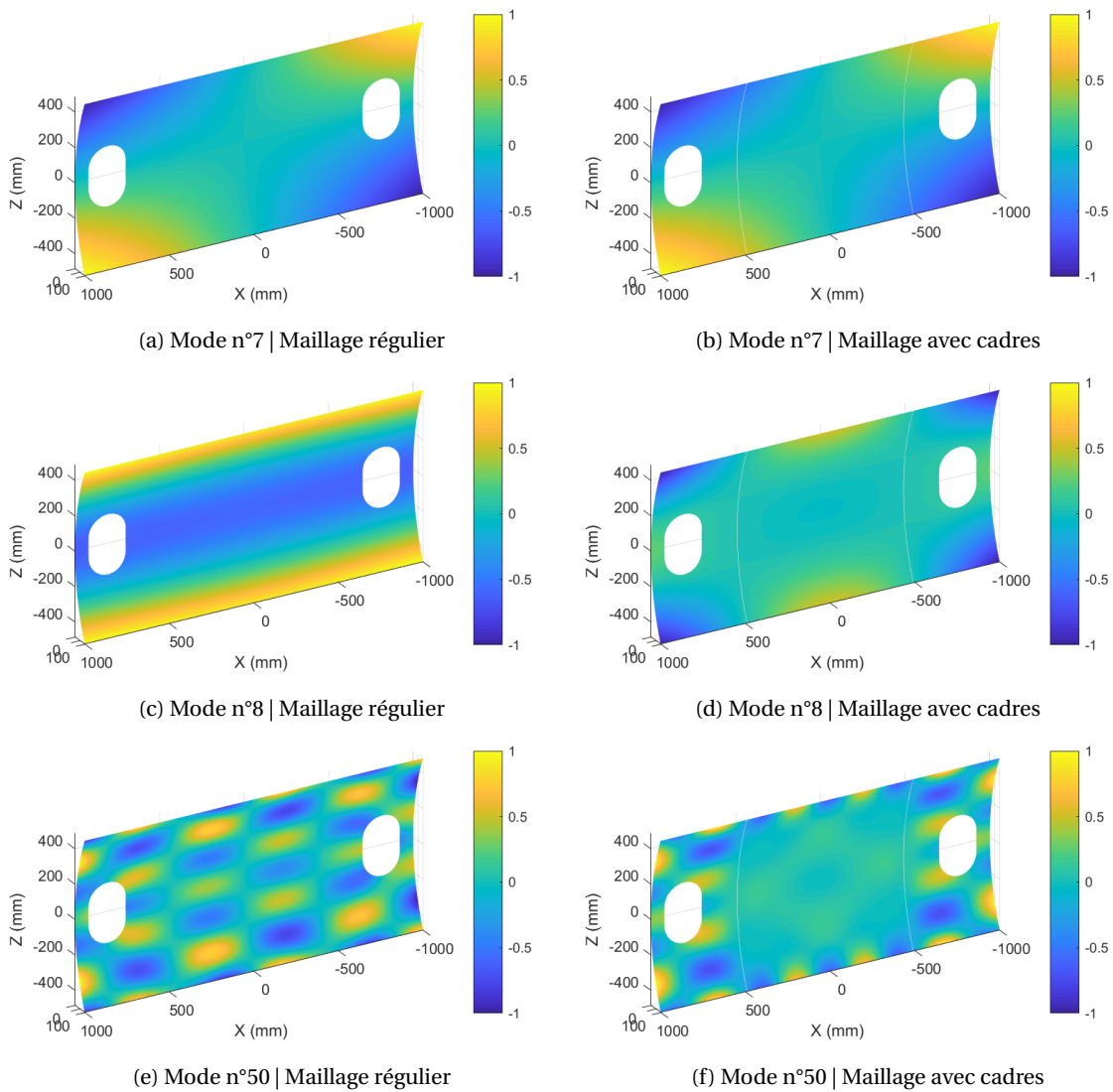


FIGURE 37 – Modes propres de vibration du panneau avec et sans présence de cadres forts

Titre : Une approche unifiée pour la mesure et l'analyse de défauts de forme des pièces mécaniques

Mots clés : Défaut de forme, Base modale, Stéréocorrélation

Résumé : Pour réduire le temps de post-traitement et améliorer la qualité des données acquises, il est envisagé de mettre au point un système de mesure permettant de délivrer une description de la géométrie acquise dans une base de défauts prédéfinie. Ce système s'appuiera sur des techniques de corrélation d'images et des mesures par caméras, et la texturation de la surface mesurée sera réalisée par la projection d'un mouchetis à l'aide d'un projecteur haute définition. Cette technique aurait l'avantage de fournir des mesures directement exploitables pour la qualification de la pièce mesurée et plus particulièrement l'identification des défauts de formes. Dans ce contexte le travail doctoral présenté à pour objectif de proposer et de valider une démarche

de mesure 3D permettant de réduire le temps de post-traitement et d'améliorer l'interopérabilité des données acquises avec leur environnement d'utilisation (étude de la conformité, prédiction d'assemblage, validation de dimensionnement ou de performance, etc.). Plus particulièrement, ces travaux devront être développés pour des pièces de grandes dimensions de type structure aéronautique ou pièce de carrosserie, pour lesquelles la maîtrise des défauts de forme est un véritable enjeu pour l'assemblage. Il est alors envisagé de s'orienter vers l'automatisation de procédure de mesure par corrélation d'images basée sur la description de défauts de forme et projection de mouchetis.

Title : A unified approach for shape defects measurement and analysis on mechanical parts

Keywords : Shape defect, Modal basis, Digital image correlation

Abstract : To reduce post-processing and improve acquired data quality, it is intended to work out a measurement system allowing to deliver a description of the acquired geometry in a predefined base of defects. This system will lean on techniques of correlation of images and camera measurements. The surface texturing will be made by projecting a speckle pattern by means of high definition projector, allowing the realization of a fine texture on mechanical part of big dimensions. This technique would have the advantage to supply directly exploitable measures for the qualification of the considered part and more specifically the identification of the shape defects. In this context, the presented

doctoral work aim to propose and to validate an approach of 3D measurement allowing a post-processing time reduction and improving the interoperability of the data acquired with their environment of use (study of the conformity, the prediction of assembly, validation of sizing or performance, etc.). More particularly, these works must be developed for large scale parts like aeronautic structures or bodywork part for which the control of shape defect is a real stake for the assembly. It is then intended to turn to the automation of procedure of measure using digital image correlation (DIC) based on form defect description and speckle pattern projection.