



HAL
open science

Mesure In-situ par moyens optiques

Lorène Dubreuil

► **To cite this version:**

| Lorène Dubreuil. Mesure In-situ par moyens optiques. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Paris Saclay (COMUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLN018 . tel-01630313

HAL Id: tel-01630313

<https://theses.hal.science/tel-01630313>

Submitted on 7 Nov 2017

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.

NNT : 2017SACLN018

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PREPAREE A
l'École Normale Supérieure de Cachan
(École Normale Supérieure de Paris-Saclay)

ECOLE DOCTORALE N° 579 Smemag
Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences
Spécialité Génie Mécanique

Par

Madame Lorène DUBREUIL

Mesure In-situ par moyens optiques

Thèse présentée et soutenue à l'ENS Paris-Saclay, le 26 avril 2017 :

Composition du Jury :

Mme. CHANAL Hélène	Maître de conférence, HDR, Sigma Clermont-Ferrand, Institut Pascal	Rapporteur
M. ORTEU Jean-José	Professeur des Universités, Ecole des Mines d'Albi, Institut Clément Ader	Rapporteur
M. HASCOET Jean-Yves	Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes, GeM	Président
M. PERRY Nicolas	Professeur des Universités, ENSAM de Bordeaux, I2M	Examineur
M. NOZAIS Dominique	Ingénieur CEA	Membre invité
Mme. LARTIGUE Claire	Professeur des Universités, Université Paris-Sud, LURPA	Directeur de thèse
M. QUINSAT Yann	Professeur agrégé, HDR, ENS Paris-Saclay, LURPA	Co-encadrant

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Liste des tableaux	xi
Introduction Générale	1
1 Mesure in-situ multi-capteurs des pièces usinées	3
1 Introduction	4
1.1 Principaux écarts géométriques des pièces usinées	5
1.2 Position de la mesure vis-à-vis du procédé de fabrication	6
1.3 Contraintes associées à la mesure <i>In-situ</i>	8
2 Mesure <i>In-situ</i> , intégration de la phase mesure dans le contexte de fabrication .	9
2.1 Intégration du moyen de mesure dans l'environnement de fabrication . .	9
2.2 Gammes de fabrication/mesure - Computer-Aided Inspection process Planning	10
2.3 Synthèse	12
3 La mesure, un problème multi-échelles/multi-systèmes	12
3.1 Systèmes de mesure	13
3.2 Étude multi-systèmes	15
3.3 Synthèse	19
4 Cadre de l'étude - Présentation des capteurs utilisés	20
4.1 Palpeur mécanique à contact	20
4.2 Capteur laser-plan	21
4.3 Microscope confocal	22
4.4 Système de stéréovision	23
5 Problématique générale	28
2 Modèle d'échanges de données de fabrication et mesure In-situ	31
1 Introduction	32
2 Modèle de gestion des données pour le procédé fabrication/mesure In-situ . . .	32
2.1 Utilisation du langage SysML	32
2.2 Gestion des données du système <i>Post-process</i>	34

2.3	Gestion des données du système <i>In-situ</i>	39
2.4	Flux de données et activités du système <i>In-situ</i>	42
2.5	Synthèse	43
3	Étude d'association des écarts géométriques aux capteurs [Dubreuil et al., 2014]	43
3.1	Réalisation de la pièce test	44
3.2	Mesure de la pièce test	45
3.3	Étude de faisabilité	50
3.4	Synthèse et activité de pré-mesure par vision	51
4	Conclusion	53
3	Pré-mesure par vision : Calibration et Analyse par stéréo corrélation	55
1	Définition d'un outil de pré-mesure	57
2	Calibration sur modèle CAO [Dubreuil et al., 2015]	58
2.1	Modèle de caméra et principales méthodes de calibration	59
2.2	Principe général de la calibration sur modèle CAO	65
2.3	Écriture du problème	67
2.4	Faisabilité de la méthode	69
2.5	Application <i>In-situ</i> et analyse de sensibilité	73
2.6	Synthèse sur la calibration sur modèle CAO	81
3	Mesure par stéréo corrélation sur facette - GéoDIC-3D [Quinsat et al., 2016] . .	81
3.1	Évaluation du score de corrélation par facette	83
3.2	Stéréo-corrélation par torseur des petits déplacements (SDT)	90
3.3	Recherche d'une solution initiale	93
3.4	Analyse du déplacement des facettes	97
4	Conclusions	99
4	Fabrication et mesure In-situ multi-capteurs	103
1	Introduction	104
2	Description de la démarche	104
2.1	Présentation de la pièce d'étude	105
2.2	Gamme de fabrication et mesure In-situ	105
2.3	Génération des modèles FAO	107
3	Mise en place de la démarche et résultats	108
3.1	Réalisation du contournage et pré-mesure GéoDIC-3D	108
3.2	Usinage des rainures et mesure multi-capteurs	111
4	Conclusions	117
	Conclusions & Perspectives	119
	Bibliographie	122
A	Calibration sur modèle CAO - Choix des entités	131

B	Intégration du laser Kréon dans la machine-outil	135
C	Visibilité du maillage par un système multi-caméras	147

Table des figures

1.1	Pièces de forme complexe : (a) impeller, (b) outillage, (c) prothèse de genou . . .	4
1.2	Processus d'élaboration des pièces de forme complexe sur centre UGV	4
1.3	Topographie 3D en fraisage 3-axes	5
1.4	Défauts localisés (a) overcut (b) undercut [Schmitz et al., 2008]	6
1.5	Ecart de décalage sur une pièce usinée	6
1.6	Mesure <i>Post-process</i>	6
1.7	Mesure <i>In-process</i>	7
1.8	Mesure <i>In-situ</i>	8
1.9	Intégration de capteurs optiques dans des moyens de production	10
1.10	Différents procédés de mesure des pièces [Cho and Seo, 2002]	11
1.11	Séquence de fabrication et mesure obtenue par [Lee et al., 2004]	11
1.12	Modèle de données proposé par [Zhao et al., 2008]	12
1.13	Description d'un système de mesure/numérisation [Audfray et al., 2012]	13
1.14	Classification des moyens de mesure (inspiré de [Audfray et al., 2012])	14
1.15	Classification et comparaison des systèmes de mesure optiques par [Savio et al., 2007]	14
1.16	Base de données de systèmes de mesure réalisée à partir du protocole Qualipso [Audfray et al., 2012]	15
1.17	Principe de la mesure multi-capteurs [Weckenmann et al., 2009]	16
1.18	Différentes configurations d'utilisation de la mesure multi capteurs [Zhao, 2010]	16
1.19	Mesure multi-capteurs sur MMT : système de vision et palpeur [Nashman et al., 1997]	17
1.20	Mesure multi-capteurs proposée par [Zexiao et al., 2005] : système de mesure par triangulation et palpeur sur MMT	18
1.21	L'instrument de mesure multi capteurs <i>HN – 6060</i> fabriqué par Nikon	19
1.22	Systèmes de mesure utilisés : (a) palpeur à contact Renishaw, (b) laser plan Kréon, (c) microscope confocal Stil, (d) système de vision	20
1.23	Classification des moyens de mesure - Diagramme de définition des blocs du système capteur	21
1.24	Acquisition de points par palpeur mécanique	21
1.25	Capteur laser plan - Résultat de mesure	21
1.26	Microscope confocal Stil	22

1.27	Mesure par vision - (a) Photogrammétrie de points; (b) Photogrammétrie de lignes [Simoes, 2012]; (c) Stéréo-corrélation [Garcia et al., 2002]	23
1.28	Minimisation de la fonction de similarité pour le voisinage de 2 pixels m_1 et m_2 [Besnard, 2010]	24
1.29	Reconstruction 3D par rectification d'images	25
1.30	Principe de la déformation du domaine de corrélation pour la détermination des propriétés différentielles des surfaces [Harvent et al., 2013]	26
1.31	Résultat de stéréo-corrélation fine d'images [Harvent et al., 2013]	26
1.32	Déformation du modèle numérique NURBS par analyse des scores de corrélation sur les projections [Beaubier et al., 2013]	27
1.33	Positionnement des travaux	28
2.1	Descriptif complet du processus d'élaboration des pièces par usinage	34
2.2	Diagramme SysML de définition des blocs dans le cas de la fabrication et mesure <i>Post-process</i>	35
2.3	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le modèle CAO	36
2.4	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le modèle FAO	37
2.5	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le moyen de production	38
2.6	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le moyen de mesure	38
2.7	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant la gamme de fabrication	38
2.8	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant la gamme de mesure	38
2.9	Diagramme SysML de définition des blocs décrivant la pièce réelle	39
2.10	Diagramme SysML de bloc interne dans le cas de la fabrication et mesure <i>In-situ</i>	40
2.11	Diagramme SysML de définition des blocs du composant "machine-outil" dans le cas de la mesure <i>In-situ</i>	41
2.12	Diagramme SysML de définition des blocs du composant "Gamme de fabrication et mesure"	42
2.13	Diagramme SysML d'activité dans le cas de la fabrication et mesure <i>in situ</i>	43
2.14	Modèles numériques de la pièce test : (a) modèle CAO, (b) description géométrique des différents défauts sur la pièce test (plan de vue orthogonal à la direction de balayage)	44
2.15	Représentation de la géométrie usinée simulée du modèle FAO de la pièce test	45
2.16	Photographie de la pièce test usinée comprenant les différents écarts géométriques d'usinage	46
2.17	Entités mesurées avec le capteur mécanique et construction du repère de dégau-chissage X, Y, Z	46
2.18	Post-traitement de la mesure sur Catia V5 ©	47
2.19	Résultats de mesure du capteur Stil analysés sur Moutains Map © : (a) décalage ΔZ_2 , (b) hauteurs de crête R_{t1}	48
2.20	Cartographie des écarts entre les points acquis au Kréon et le modèle CAO de la pièce test	48

2.21 (a) Pièce test avec un mouchetis noir et blanc, (b) Cartographie des résidus de corrélation après calibration du système stéréoscopique	49
2.22 Cartographie des résidus de stéréo-corrélation avant et après optimisation pour la zone représentant l'overcut	50
2.23 Diagramme SysML d'activité dans le cas de la fabrication et mesure <i>In-situ</i>	52
3.1 Diagramme d'activité avec l'étape de pré-mesure par vision	57
3.2 Principe général de l'outil de pré-mesure par vision	57
3.3 Principe général de la méthode de calibration proposée	58
3.4 Modèle de Sténopé d'une caméra	59
3.5 Phénomène de distorsion [Weng et al., 1992]	61
3.6 Principe de fonctionnement d'un système stéréoscopique	62
3.7 Différentes prises de vues d'une mire d'étalonnage pour la calibration d'une caméra [Bouguet, 2010]	63
3.8 Détermination des matrices de passage M^l et M^r par stéréo-corrélation sur images [Beaubier et al., 2013]	64
3.9 Schéma général de la méthode de calibration proposée	66
3.10 Principe général de la calibration sur modèle CAO - Détermination de la transformation T	66
3.11 Éléments 2D et 3D dans le cas du cylindre	67
3.12 2 premières étapes de la méthode de calibration sur modèle CAO	68
3.13 Appariement des éléments droite et point - Calcul des erreurs de projections	69
3.14 Choix des points pour la définition de la solution initiale Φ_0	70
3.15 Espace de Hough - Recherche de points alignés dans l'image [Hough, 1962]	70
3.16 Extraction des éléments 2D par analyse d'image - cas du cylindre	71
3.17 Appariement des éléments 2D et calculs des erreurs de projections - cas du cylindre	72
3.18 Validation de la calibration sur modèle CAO	72
3.19 Moyen de production et caméras	73
3.20 Erreur de reconstruction en fonction de la configuration des caméras dans un plan [Sandwith and Cork, 2000]	74
3.21 Intégration des caméras dans la machine	74
3.22 Cas d'étude pour la réalisation de la calibration <i>In-situ</i>	75
3.23 Calibration sur modèle CAO dans un environnement <i>In-situ</i>	75
3.24 Principe de la reprojection	76
3.25 Erreur de reprojection sur le montage d'usinage	76
3.26 Description de la simulation Monte-Carlo appliquée à la méthode de calibration sur modèle CAO	77
3.27 Différents paramètres étudiés	78
3.28 Détermination de l'ordonnée à l'origine	78
3.29 Distribution de l'erreur de reprojection en considérant les incertitudes associées aux éléments 2D extraits	78

3.30	Distribution de l'erreur de reprojection en considérant les 2 sources d'incertitudes	79
3.31	Schéma général de la méthode GéoDIC-3D	82
3.32	Projections et définition des ROI gauche et droite	84
3.33	Régions d'intérêt pour le calcul du score de corrélation d'une facette	84
3.34	Discretisation de la facette 3D pour le calcul du score de corrélation	84
3.35	Calcul du score en chacun de points de la discrétisation	85
3.36	Projection des points obtenus par discrétisation de la facette _i pour le calcul du score de corrélation de la facette	85
3.37	Description de la pièce réalisée et mesurée pour la validation de la méthode GéoDIC-3D	86
3.38	Comparaison de la surface réelle et du maillage théorique plan	86
3.39	Modèle numérique du maillage dans le repère FAO du montage d'usinage	87
3.40	Images gauche et droite utilisées pour la calibration et l'analyse par stéréo corrélation sur facette (pièce test dans le montage d'usinage)	87
3.41	Projection du maillage 3D du repère FAO sur les images	88
3.42	Cartographie des scores de corrélation χ sur l'ensemble du maillage 3D	88
3.43	Décalage dans le plan image de la projection sur l'image de droite de la facette _i	89
3.44	Scores de corrélation pour différentes positions 2D de la projection sur l'image de droite	89
3.45	Scores de corrélation pour différents décalages de la projection de droite	90
3.46	Principe de l'optimisation en position et orientation de chacune des facettes	91
3.47	Maillage initial et maillage déformé par stéréo corrélation sur facette	92
3.48	Cartographies des résidus de corrélation	93
3.49	Principe de la recherche d'une solution initiale - Optimisation par recherche d'heuristique suivant la normale à la facette	94
3.50	Résultat de la recherche d'une heuristique pour une facette	95
3.51	Maillages avant et après recherche d'heuristiques suivant les normales aux facettes	95
3.52	Cartographies des scores de corrélation par facette	96
3.53	Cartographies des valeurs des décalages des facettes suivant leurs normales	96
3.54	Méthode de tri des facettes dans les plans image	97
3.55	Calcul des déplacements (pixels) et application de l'algorithme de tri des facettes	99
3.56	Outil de pré-mesure par vision <i>In-situ</i>	100
4.1	Modèle d'activités et flux dans le contexte <i>In-situ</i>	104
4.2	Pièce réalisée pour l'application <i>In-situ</i>	105
4.3	Les différentes opérations de fabrication - modèles CAO	106
4.4	Initialisation : recalage des repères FAO et programmation	107
4.5	Description de la gamme de fabrication et mesure <i>In-situ</i>	107
4.6	Modèle FAO du surfaçage et du contournage	108
4.7	Stratégies d'usinage pour la réalisation des rainures	108
4.8	Photographie de la pièce après réalisation du surfaçage et du contournage	109

4.9	Prise de vue de l'opération de contournage pour la mesure GéoDIC-3D	110
4.10	Résultats de l'analyse GéoDIC-3D pour le contournage (déplacement en <i>mm</i>) .	110
4.11	Photographie de la réalisation des différentes rainures	111
4.12	Photographie de la pièce usinée et préparée pour la mesure	112
4.13	Prise de vue des rainures pour la mesure GéoDIC-3D	112
4.14	Résultat attendu avec un maillage adapté au problème (déplacement en <i>mm</i>) .	112
4.15	Cartographie des résidus de stéréo-corrélation	113
4.16	Résultats de l'analyse GéoDIC-3D sur la pièce finie	114
4.17	Déplacement 3D des facettes en <i>mm</i>	114
4.18	Capteur laser Kréon monté dans un porte-outil	115
4.19	Mesure In-situ laser Kréon	116
4.20	Mesure In-situ au capteur laser Kréon, écarts en <i>mm</i>	116
A.1	Tracé du conditionnement de A en fonction du nombre de droites utilisées pour la calibration	132
B.1	Principe de triangulation	135
B.2	Modélisation du laser Kréon sur un robot	136
B.3	Principe complet de mise en place technique du laser Kréon dans la machine-outil	137
B.4	Schéma de la marche étalon utilisée pour la mesure de l'erreur de justesse . . .	137
B.5	Exemple de cartographie représentant le bruit de numérisation (Kréon+MOCN)	139
B.6	Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kréon dans la MOCN (longueur)	139
B.7	Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kréon dans la MOCN (largeur)	139
B.8	Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche	140
B.9	Justesse de numérisation pour la marche de 20mm j_2	140
B.10	Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche	140
B.11	Mesure du bruit de numérisation	141
B.12	Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kréon (longueur)	141
B.13	Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kréon (largeur) .	141
B.14	Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche	142
B.15	Justesse de numérisation pour la marche de 5 j_1	142
B.16	Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche	142
C.1	Images d'un même objet avec deux angles de vues différents	147
C.2	Problème de visibilité d'une caméra	148
C.3	Position du centre caméra O_c par rapport au nuage de points issu du maillage initial	149
C.4	Inversion sphérique du nuage de points initial par rapport au centre caméra . .	149

C.5	Maillage après prétraitement avec l'algorithme HPR [Katz et al., 2007] pour l'analyse de la visibilité	150
C.6	Résultats de visibilité	150
C.7	Prétraitement du maillage - Suppression des facettes non observées par les 2 caméras	151
C.8	Différentes formes de projection de facettes dans le plan image	152
C.9	Cartographie des valeurs moyennes des rapports μ_i^g et μ_i^d	153

Liste des tableaux

1.1	Résumé des études multi-capteurs	18
2.1	Système <i>Post-process</i>	39
2.2	Système <i>In-situ</i>	39
2.3	Valeurs nominales des écarts géométriques générés par usinage	45
2.4	Résultats des différentes mesures	50
3.1	Résumé des techniques de calibration courantes	64
3.2	Éléments utilisés pour la calibration sur modèle CAO	67
3.3	Erreurs de reprojction	76
3.4	Valeurs des paramètres intrinsèques [Bouguet, 2010]	79
3.5	Ensemble des combinaisons minimums "point-droite" pour définir T	80
3.6	Valeurs de bruit de calibration pour les 2 caméras	81
B.1	Bruit de mesure (Kréon+MOCN)	139
B.2	Justesse de mesure du laser Kréon montée dans la broche de la MOCN (d_{min}) .	140
B.3	Justesse de mesure du laser Kréon montée dans la broche de la MOCN (d_{max})	140
B.4	tab :bruitMMT	141
B.5	Justesse de mesure du laser Kréon montée sur la tête de la MMT avec la distance de numérisation maximale	142
B.6	Justesse de mesure du laser Kréon montée sur la tête de la MMT avec la distance de numérisation minimale	142
B.7	Tableau comparatif des différentes numérisations (cartographie des écarts et extraction de profil suivant le plan du laser)	145

Introduction Générale

Dans le domaine de la production industrielle, l'efficacité, le taux de service, la qualité et les coûts sont les indicateurs pertinents pour atteindre un management d'entreprise performant et concurrentiel. Le processus d'élaboration des pièces se compose de nombreuses étapes et fait l'objet de différents savoir-faire du besoin du client jusqu'à la livraison du produit fini. La maîtrise de l'ensemble de ces étapes et compétences est observable à travers les indicateurs utilisés pour manager une entreprise. L'amélioration de la production est directement contrainte à l'amélioration de l'ensemble de maillons du processus de réalisation du produit.

Dans le cadre de la qualité et la maîtrise des spécifications exigées par le client, de nombreux moyens de contrôle permettent de conclure quant au respect de la géométrie des pièces. En particulier, les Machines à Mesurer Tridimensionnelles, MMT, associées à des palpeurs à contact sont très utilisées dans les entreprises et leurs résultats d'acquisitions sont maîtrisés avec de faibles incertitudes. Depuis plusieurs années, de nombreux travaux sur l'utilisation de capteurs de mesure 3D sans contact par moyens optiques ont permis de proposer de nouvelles applications de mesure. Par leur acquisition d'un grand nombre de données en des temps restreints, il est possible d'obtenir une représentativité des pièces importantes, ce qui est très recherché dans le cas de surfaces complexes. Par leurs variétés technologiques, l'association de différents capteurs optiques permet de mesurer l'ensemble des échelles de défauts rencontrés en usinage. Ainsi, la mesure à 100% des pièces produites peut être imaginée à travers l'utilisation de plusieurs systèmes optiques. Ce type de mesure multi-capteurs permet de s'assurer de la maîtrise totale de la qualité du processus.

De plus, la stratégie politique des entreprises se dirige vers des industries du futur 4.0 ; elles aspirent à une automatisation, intégration et interopérabilité de l'ensemble du processus d'élaboration du produit. Dans ce contexte, l'intégration de la mesure dans les moyens de production est un des axes de recherches répondant à cette stratégie. On parle alors de mesure *In-situ*. À la différence de la mesure plus classique, dite *Post-process*, pour laquelle la phase de mesure se positionne à la suite du procédé de fabrication, en général dans un espace dédié, la mesure *In-situ* s'effectue quant à elle directement dans le moyen de production sans démontage de la pièce. D'un point de vue productivité, l'intégration de la mesure dans le moyen de production permet une suppression de la chaîne de mesure, une acquisition et une prise de décision rapide, d'où une amélioration du temps de cycle. D'un point de vue mesure, un repère identique entre la fabrication et la mesure permet de faciliter la réalisation et le traitement de la mesure. Si cela ouvre de nouvelles possibilités, comme une plus grande interopérabilité, un gain de temps, etc., cela entraîne cependant de nouvelles contraintes ou

changements de pratiques, en particulier au niveau de la gamme de fabrication qui doit être repensée afin d'intégrer la phase de mesure. Cela doit se faire en respectant des contraintes à la fois de cadences de production, mais également de qualité de mesure. Ainsi, le temps dédié à la phase mesure et de traitement doit être le plus restreint possible, mais permettre la mesure des différentes typologies de défauts. En effet, l'intégration de la mesure au sein du procédé de fabrication ne doit pas être réalisée au détriment de la productivité de celui-ci. Dans le cadre de la fabrication par usinage, plusieurs typologies de défauts liés au procédé peuvent être rencontrées à différentes échelles. La mesure des défauts devient donc multi-échelles et nécessite de s'appuyer sur des moyens de mesure adaptés. En parallèle, les moyens de mesure de géométrie ont évolué depuis une dizaine d'années et les systèmes de mesure sans contact sont de plus en plus répandus dans l'industrie. Face à la diversité des technologies proposées, il devient difficile de sélectionner un système de mesure adapté à une typologie donnée. Ce choix de systèmes est d'autant plus difficile que plusieurs systèmes de mesure peuvent être utilisés. La qualification des systèmes de mesure relativement à leur aptitude à mesurer une échelle de défauts devient nécessaire afin de mettre en place un ordonnancement de la mesure multi-capteurs pour finalement obtenir une mesure automatique, rapide et avec une qualité adaptée de numérisation.

Dans ce contexte général, nous proposons une **mesure *In-situ* par moyens optiques multi-capteurs appliquée au procédé de fabrication par usinage**. Les travaux réalisés prétendent à la maîtrise de la qualité du processus d'élaboration des pièces et à la diminution du Takt Time d'une pièce, temps écoulé entre le produit brut et le produit final, sans être au détriment de la productivité des machines.

Le premier chapitre de ce manuscrit s'articule selon deux axes de réflexion. La description de plusieurs travaux portant sur les systèmes de mesure optiques et la mesure multi-capteurs représente un des axes. Le second porte sur une étude bibliographique dédiée à la mesure en contexte *In-situ*. Ces axes de recherche nous ont permis de dégager les deux problématiques majeures qui seront abordées dans notre travail : **l'intégration de la mesure dans le contexte de fabrication et la mesure multi-échelles** respectant les contraintes et attentes industrielles. Le second chapitre présente une première contribution sur la modélisation du processus fabrication/mesure qui met en avant la possibilité de proposer une gamme de mesure hiérarchisée basée sur une étape de pré-mesure. À cet effet, un outil de pré-mesure par vision est proposé dans le chapitre 3 qui constitue notre seconde contribution. Enfin, l'ensemble de la démarche est mis en oeuvre au chapitre 4 montrant ainsi l'efficacité de l'approche que nous proposons pour la mesure en contexte *In-situ* multi-capteurs.

Chapitre 1

Mesure in-situ multi-capteurs des pièces usinées

Sommaire

1	Introduction	4
1.1	Principaux écarts géométriques des pièces usinées	5
1.2	Position de la mesure vis-à-vis du procédé de fabrication	6
a)	Mesure <i>Post-process</i>	6
b)	Mesure <i>In-situ</i>	7
1.3	Contraintes associées à la mesure <i>In-situ</i>	8
2	Mesure <i>In-situ</i>, intégration de la phase mesure dans le contexte de fabrication	9
2.1	Intégration du moyen de mesure dans l'environnement de fabrication	9
2.2	Gammes de fabrication/mesure - Computer-Aided Inspection process Planning	10
2.3	Synthèse	12
3	La mesure, un problème multi-échelles/multi-systèmes	12
3.1	Systèmes de mesure	13
3.2	Étude multi-systèmes	15
a)	Association de 2 systèmes de mesure	17
b)	Systèmes commerciaux	18
3.3	Synthèse	19
4	Cadre de l'étude - Présentation des capteurs utilisés	20
4.1	Palpeur mécanique à contact	20
4.2	Capteur laser-plan	21
4.3	Microscope confocal	22
4.4	Système de stéréovision	23
5	Problématique générale	28

1 Introduction

L'usinage de pièces de forme complexe est couramment utilisé dans de nombreux domaines industriels, tels que l'automobile, l'aéronautique, la fabrication d'outillages ou encore la réalisation de prothèses (figure 1.1).

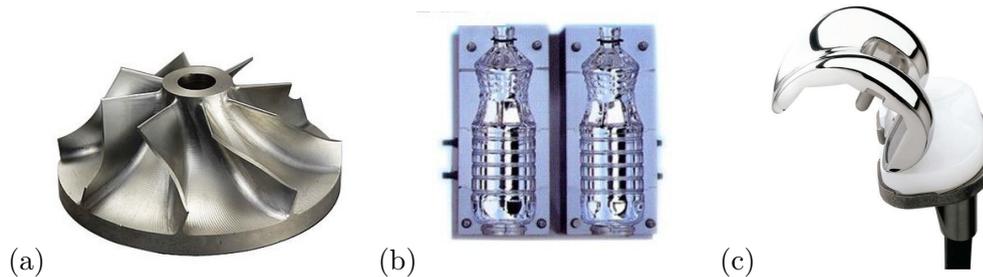


Figure 1.1 – Pièces de forme complexe : (a) impeller, (b) outillage, (c) prothèse de genou

La maîtrise du processus complet d'élaboration de pièces de forme complexe est indispensable dans le contexte industriel actuel. Cependant, ce processus est composé de plusieurs étapes, faisant intervenir chacune d'elles de nombreux paramètres et échanges d'informations (figure 1.2) : l'étape de FAO consiste à générer les trajectoires outils à partir du modèle CAO de la pièce, les trajectoires sont interprétées puis exécutées sur la MOCN, et finalement la réalisation de la coupe permet d'obtenir la pièce usinée.

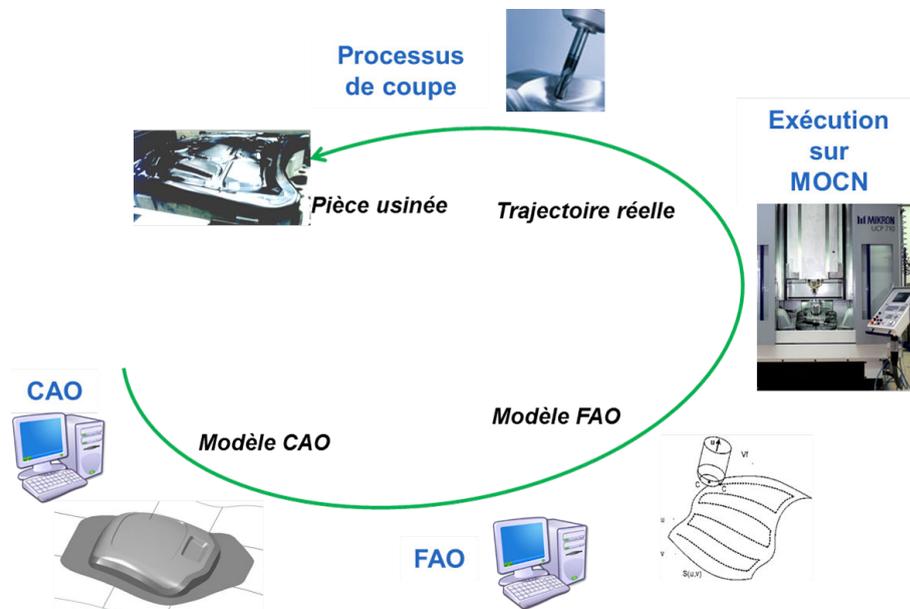


Figure 1.2 – Processus d'élaboration des pièces de forme complexe sur centre UGV

Chaque étape du processus est ainsi source potentielle d'erreur, ce qui induit des écarts géométriques sur la pièce usinée ([Prévost, 2011][Lavernhe, 2006][Thiebaut et al., 1999]) pouvant conduire à sa non conformité géométrique.

Bien que de nombreux travaux de recherche portent sur l'amélioration de chacune des étapes du processus, des écarts géométriques subsistent. Il convient de les contrôler au travers

d'une phase de mesure qui doit être pertinente vis-à-vis des écarts géométriques à quantifier. Pour cela, il est nécessaire de connaître d'une part les différentes typologies d'écarts géométriques résultant des erreurs de fabrication par usinage, et d'autre part les moyens de mesure permettant d'évaluer ces écarts. Il se pose alors la question de la position de la phase de mesure au sein du processus. En effet, l'intégration de la phase de mesure dans le contexte de fabrication, ou mesure *In-situ*, contribue grandement à l'automatisation du processus de production grâce, en particulier, à une grande interopérabilité entre la fabrication et le contrôle. Parallèlement, la mesure *In-situ* impose de nouvelles contraintes.

1.1 Principaux écarts géométriques des pièces usinées

Une surface usinée peut être décrite géométriquement par des défauts de différents ordres de grandeur. Les défauts de 1^{er} ordre et 2^{ème} ordre sont de type macro-géométrique (défaut de forme, ondulation) et résultent essentiellement des défauts de structure, des défauts de mise en position, de la géométrie de l'outil ou encore de la déformation de la pièce en cours d'usinage. Les défauts de 3^{ème} et 4^{ème} ordres définissent la micro-géométrie de la surface usinée, ou topographie de surface 3D. Cet état de surface 3D provient de la géométrie de l'outil et du choix de la stratégie d'usinage, c'est à dire du mode de parcours et des paramètres d'usinage associés (tolérance d'usinage, hauteur de crête et conditions de coupe) (figure 1.3). Ainsi, dans le cas du fraisage 3 axes avec un outil à bout hémisphérique, les motifs résultent de la juxtaposition de calottes de sphère comme présenté sur la figure 1.3 dans le cas où la tolérance d'usinage est importante par rapport aux autres paramètres [Quinsat et al., 2011].

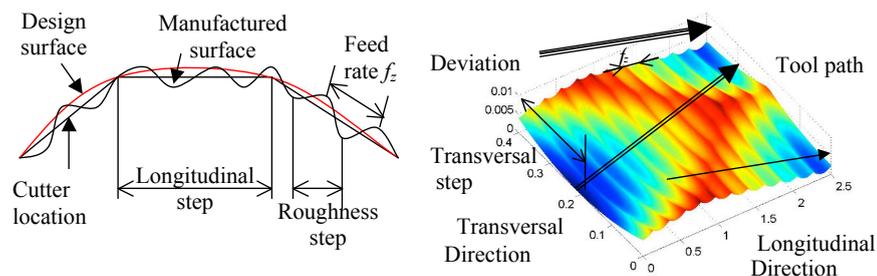


Figure 1.3 – Topographie 3D en fraisage 3-axes

À ces défauts classiques s'ajoutent les défauts que l'on peut qualifier de *localisés*, par exemple les décalages (ou défauts de raccordements) et les overcuts/undercuts. Ces derniers sont associés à des erreurs sur le rayon d'outil, sur la jauge outil ou encore de mise en position. Ils peuvent être de deux natures : soit un excédent de matière sur la pièce, cas de l'overcut ; soit un déficit de matière sur la pièce, cas de l'undercut (figure 1.4).

Lors de changements d'outils, de changements de stratégies d'usinage ou encore lors de la réalisation de différentes entités d'usinage, des décalages peuvent apparaître sur les surfaces. Les décalages sont des marques macro-géométriques laissées sur la surface ; ils peuvent être assimilés à des marches droites ou courbes. L'image de la figure 1.5 montre une pièce présentant un décalage avec une marche entre deux surfaces courbes.

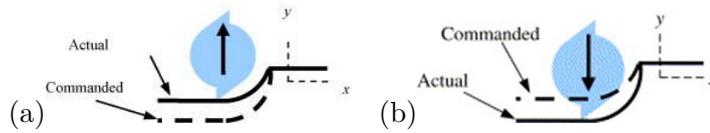


Figure 1.4 – Défauts localisés (a) overcut (b) undercut [Schmitz et al., 2008]



Figure 1.5 – Ecart de décalage sur une pièce usinée

Cette brève analyse des principaux écarts géométriques rencontrés en usinage de forme met en avant une diversité de typologies d’écarts et plus spécifiquement différentes échelles d’écarts. Le problème de mesure des écarts provenant de l’usinage de forme est donc un problème multi-échelles. La phase de mesure conduisant à identifier l’ensemble des écarts géométriques doit prendre en compte cette diversité d’échelles. Avant de présenter les différents systèmes de mesure, nous nous intéressons à la position de la phase de mesure vis-à-vis du procédé de fabrication, de façon à définir explicitement le concept de mesure *In-situ*.

1.2 Position de la mesure vis-à-vis du procédé de fabrication

Dans la chaîne de production, la position de la phase de mesure vis-à-vis du procédé de fabrication peut se faire soit *Post-process* soit *In-situ*. Dans ce cas, il est possible de distinguer le cas de la mesure *On-machine* de la mesure dite *In-process*. Ces différents niveaux sont explicités dans les paragraphes suivants.

a) Mesure *Post-process*

La mesure appelée *Post-process* est la plus courante. La phase de mesure se positionne à la suite du procédé de fabrication dans un espace dédié à la mesure, par exemple une salle climatisée avec une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), ou en bord de ligne (figure 1.6). Dès la fin de la phase de fabrication du procédé i , le produit est démonté puis extrait de la machine de fabrication afin d’être mesuré dans l’espace dédié à la mesure.



Figure 1.6 – Mesure *Post-process*

La mesure *Post-process* est donc chronophage, car elle nécessite un déplacement du produit depuis la machine vers l'espace de mesure dédié. De plus, le démontage et remontage du produit dans la machine de fabrication sont sources d'erreurs de remise en position qui impacteront nécessairement sur la qualité géométrique de la pièce.

Cependant, la mesure *Post-process* permet de rendre le moyen de production disponible ; il est donc possible de réaliser d'autres produits durant les opérations de mesure. Par ailleurs, les mesures sont réalisées dans un environnement contrôlé (en température et humidité) sur des machines dédiées (en général sur des MMT de faible incertitude de mesure dans le volume), elles sont donc réalisées avec des incertitudes de mesure plus faibles.

b) Mesure *In-situ*

La mesure *In-situ* s'effectue directement dans le moyen de fabrication sans démontage du produit. Il convient de différencier la mesure *In-process* pour laquelle le moyen de production n'est pas stoppé durant la phase de la mesure, de la mesure *On-machine* réalisée lorsque la fabrication est arrêtée.

a) *In-process*

La mesure *In-process* s'effectue en même temps que la fabrication [Poulhaon et al., 2014] (figure 1.7). La mesure est ainsi réalisée en temps réel, ce qui permet d'être très réactif sur les corrections à apporter au procédé. Néanmoins, la mesure *In-process* est délicate à mettre en œuvre, car les phases de fabrication et de mesure doivent cohabiter et surtout fonctionner en même temps, interagir sans pour autant se gêner (risques de collisions, etc.). Il s'agit le plus souvent de surveillance d'usinage, et la mesure effectuée n'est pas nécessairement la géométrie de la pièce, mais une caractéristique autre telle qu'un effort de coupe, les vibrations de la broche, etc.

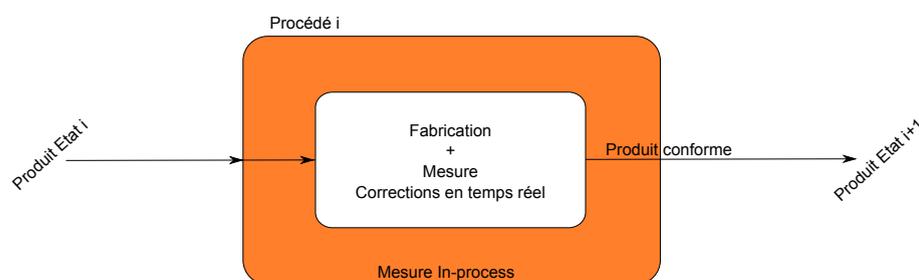
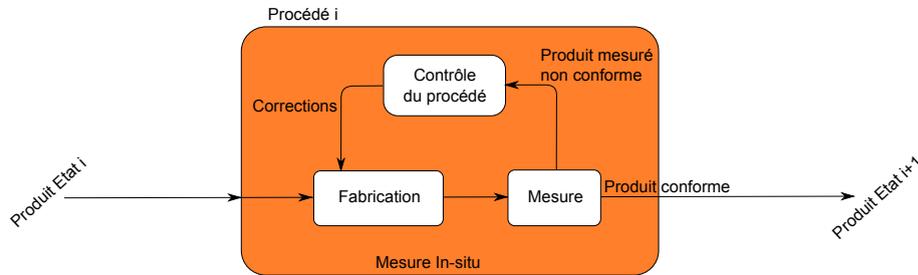


Figure 1.7 – Mesure *In-process*

Difficile à mettre en œuvre dans un environnement industriel à cause des nombreuses contraintes associées, la mesure *In-process* permet cependant d'améliorer la qualité de la production sans défavoriser les temps de production

b) *Mesure On-machine*

Effectuée lorsque la fabrication est à l'arrêt, la mesure *On-machine* permet également d'être réactif vis-à-vis des défauts rencontrés pour proposer d'éventuelles actions correctives (figure 1.8). Dans ce cas, le procédé de fabrication est considéré comme l'ensemble de 3 éléments : opérations de fabrication pour réaliser le produit, phase de mesure pour s'assurer de la conformité du produit et proposition d'éventuelles corrections à appliquer aux opérations de fabrication (figure 1.8). Cela a pour conséquence que la gamme de fabrication doit être repensée de façon à y intégrer la phase de mesure et les éventuelles actions correctives.

Figure 1.8 – Mesure *In-situ*

Cependant, dans le cas de la mesure *On-machine*, la fabrication est à l'arrêt durant toute la phase de mesure. La machine de production étant utilisée pour la phase de mesure, la cadence de production se trouve donc réduite. Inversement, la conformité des produits fabriqués est vérifiée au plus tôt dans la gamme de fabrication, avec mise en place de potentielles actions correctives pour garantir la conformité géométrique du produit.

Ainsi, le choix de la position de la mesure vis-à-vis du procédé de fabrication dépend de plusieurs paramètres tels que la cadence de production, la difficulté de mise en œuvre, la vérification de la conformité des produits au plus tôt, etc.

Dans nos travaux, nous nous intéressons à l'amélioration du procédé de fabrication par la réalisation d'une mesure *In-situ*, le produit étant directement mesuré dans son environnement de fabrication. Le respect des exigences de cadence de production et de qualité des produits réalisés impose cependant des contraintes dont il faut tenir compte.

1.3 Contraintes associées à la mesure *In-situ*

L'intégration de la phase de mesure dans l'environnement de fabrication entraîne une modification de la gamme de fabrication qui doit intégrer la phase de mesure. Deux contraintes principales doivent être respectées afin de proposer une gamme de fabrication/mesure *In-situ* répondant aux exigences de cadence de production et de conformité des produits :

- le temps alloué pour la phase de mesure et les traitements des données doit être le plus restreint possible.

Pour satisfaire cette contrainte, il est nécessaire de proposer une gamme de mesure adaptée à la typologie de défauts à évaluer sur le produit. Ces défauts, ou écarts géométriques, de différentes natures et échelles doivent être mesurés à l'aide de capteurs appropriés. Il est donc

essentiel de disposer d'une base de connaissance des capteurs, regroupant leurs spécificités, et leurs capacités vis-à-vis des écarts géométriques rencontrés. Il sera alors possible de définir une stratégie de mesure adaptée en réponse à la contrainte de temps minimal.

- l'interopérabilité entre les données de fabrication et les données de mesure doit être la plus grande possible.

L'interopérabilité représente la capacité de plusieurs systèmes à travailler et fonctionner ensemble. Dans notre cas, l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure est définie par l'intégration de la phase de mesure dans la gamme de fabrication et la gestion des échanges de données entre ces deux systèmes. Le système global "fabrication/mesure *In-situ*" aura une interopérabilité forte si les deux systèmes sont capables de communiquer, d'échanger et de fonctionner rapidement. Pour satisfaire cette contrainte, une intégration de la phase mesure dans le moyen de production associée à la modélisation des échanges de données entre ces deux systèmes cohabitants doivent être proposées.

Les deux contraintes précédentes mettent en avant deux problématiques sur lesquelles nous proposons d'apporter des contributions :

- **Comment intégrer la phase de mesure dans le contexte de fabrication ?**
- **Comment effectuer une mesure multi-échelles ?**

La première problématique est associée à la mesure *In-situ*, et comprend à la fois le problème de l'intégration des capteurs et/ou systèmes de mesure dans l'environnement de production, ainsi que la gestion de la phase de mesure dans la gamme de fabrication. La seconde correspond au choix du (ou des) système(s) de mesure approprié(s) pour une typologie et échelle d'écarts géométriques, ainsi que la définition des stratégies de mesure adaptée au contexte multi-échelles. Nous présentons dans un premier temps une analyse bibliographique pour chacune des problématiques proposées, avant de terminer ce chapitre par l'introduction de notre méthode mise en place pour répondre à ces problématiques.

2 Mesure *In-situ*, intégration de la phase mesure dans le contexte de fabrication

Dans cette partie, nous nous intéressons aux travaux portant sur la mesure *In-situ*, que ce soit en termes d'intégration d'un capteur dans le moyen de production qu'en termes de proposition de gestion de la mesure par rapport à la fabrication dans le contexte *In-situ*.

2.1 Intégration du moyen de mesure dans l'environnement de fabrication

Dans la littérature, plusieurs méthodes de mesure sont associées au moyen de production : mécanique (figure 1.9(a)), optique, électrique, etc. [Vacharanukul and Mekid, 2005, Shiraiishi, 1988, Yandayan and Burdekin, 1997].

Les méthodes optiques sont les plus utilisées, car elles permettent d’avoir un grand nombre de données acquises en un temps restreint. Poulhaon et al. [Poulhaon et al., 2014] propose une méthode pour la mesure de défauts des pièces obtenues par fraisage afin d’adapter la trajectoire d’usinage. La mesure est réalisée *In-process* à l’aide d’un capteur laser. Cependant, les géométries testées restent simples (contournages, poches). Dans le cas du tournage, Shabahi et al. [Shabahi and Ratnam, 2016] maîtrisent par la mesure la qualité de l’état de surface. Lors d’une opération de polissage, la maîtrise de l’évolution de l’état de surface de la pièce est réalisée par une mesure micro-géométrique [Quinsat and Tournier, 2012] (figure 1.9(b)). Des premiers résultats de mesure suite à l’intégration d’un laser plan dans la broche d’une machine-outil sont proposés par Ko et al. [Ko et al., 2007].

Plus particulièrement, les systèmes de mesure par vision sont très utilisés dans le moyen de production [Everton et al., 2016]. Une méthode de vérification *In-situ* des montages d’usinage par vision est proposée par Karabagli [Karabagli et al., 2012]. La vérification des non-collisions peut être aussi réalisée par vision [Ahmad et al., 2011].

Cependant, le palpeur à contact reste le moyen de mesure le plus intégré dans les machines-outils, et permet ainsi de considérer la machine-outil comme une MMT [Mears et al., 2009].

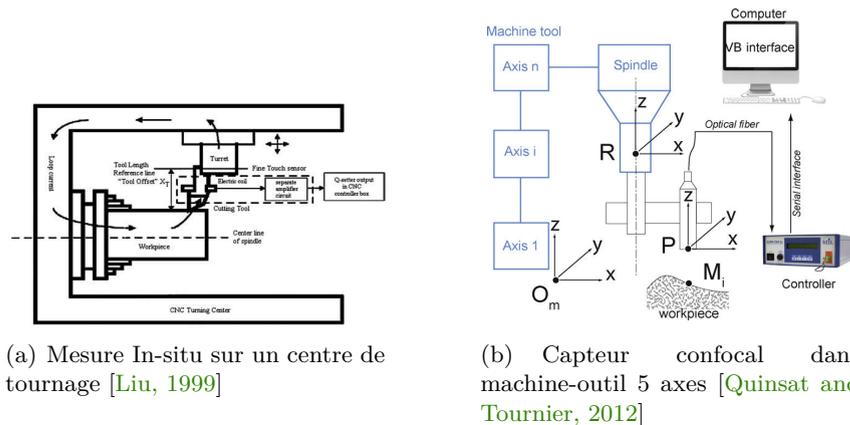


Figure 1.9 – Intégration de capteurs optiques dans des moyens de production

2.2 Gammes de fabrication/mesure - Computer-Aided Inspection process Planning

Indépendamment du système de mesure intégré, la réalisation d’une mesure *In-situ*, répondant aux contraintes mises en avant précédemment, nécessite une amélioration de la gestion des gammes de fabrication et mesure. Plusieurs études portent sur la proposition de stratégies de palpement adaptées à l’environnement *On-machine*. Par exemple, Cho et Seo [Cho and Seo, 2002] proposent des stratégies pour la mesure de surfaces complexes dans une machine-outil. L’interaction entre la trajectoire de l’outil pour l’usinage et la stratégie de mesure au palpeur permettent de positionner les points de palpement sur des zones stratégiques et ainsi éviter les lignes formées par les hauteurs de crêtes lors de l’usinage. Ainsi, il est important d’avoir un lien

entre les données de fabrication (CAM) et les données de la mesure (CAI) (figure 1.10) pour finalement être dans un contexte *In-situ* ou la mesure est totalement intégrée à la fabrication [Chen and Su, 1996].

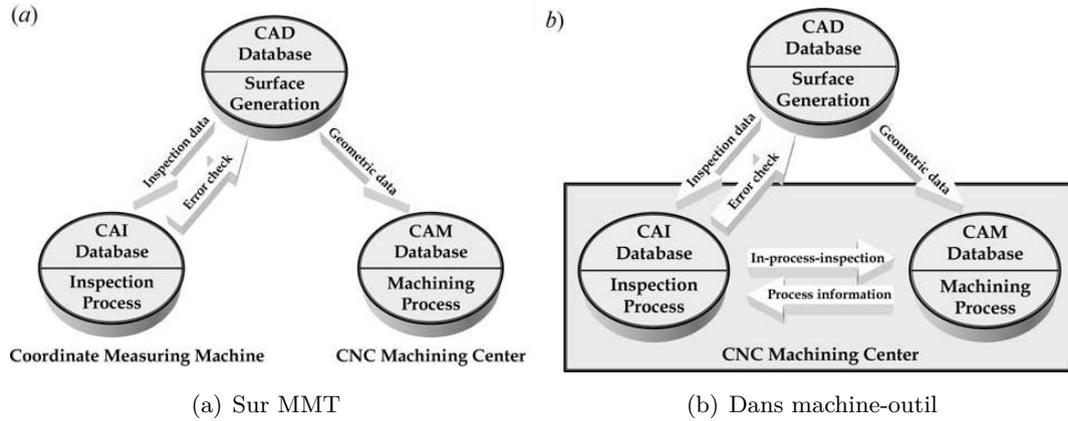


Figure 1.10 – Différents procédés de mesure des pièces [Cho and Seo, 2002]

Lee et al. [Lee et al., 2004] et Cho et al. [Cho et al., 2004] définissent plus particulièrement la stratégie de mesure à deux échelles : globale et locale. Dans la première approche globale [Lee et al., 2004], une séquence de fabrication/mesure répondant aux exigences est générée (figure 1.11). Dans une seconde phase, dite locale, détaillée dans [Cho et al., 2004], les nombres de points de mesure, leurs localisations ainsi que la trajectoire de mesure sont déterminés.

Sequence	Setup	Features	Processes
1	S ₁		Inspection-Setup
2			Inspection-Alignment
3		F ₁	Endmilling
4		F ₂	Endmilling
5		F ₂ -F ₁	Inspection-Features
6		F ₃	Endmilling
7		F ₄	Endmilling
8		F ₄ -F ₃	Inspection-Features
9	S ₄		inspection-Setup
10			Inspection-Alignment
11		F ₁₅	Endmilling
12		F ₁₆	Endmilling
13		F ₁₆ -F ₁₅	Inspection-Features
14	S ₂		Inspection-Setup
15			Inspection-Alignment
16		F ₅	Endmilling
17		F ₆	Drilling and Reaming
18		F ₆ -F ₅	Inspection-Features
19	S ₃		Inspection-Setup
20			Inspection-Alignment
21		F ₇	Endmilling
22		F ₈	Endmilling
23		F ₁₁	Endmilling
24		F ₁₂	Drilling and Reaming
25		F ₁₂ -F ₁₁ -F ₈ -F ₇	Inspection-Features
26	S ₅		inspection-Setup
27			Inspection-Alignment
28		F ₉	Endmilling
29		F ₁₀	Endmilling
30		F ₁₃	Endmilling
31		F ₁₄	Drilling and Reaming
32		F ₁₄ -F ₁₃ -F ₁₀ -F ₉	Inspection-Features

Figure 1.11 – Séquence de fabrication et mesure obtenue par [Lee et al., 2004]

La technique de séquencement globale, proposée par Lee et al. [Lee et al., 2004], a l'avantage de mesurer les entités réalisées dans une même opération de fabrication (figure 1.11). Pour des entités nécessitant des contraintes importantes, il est possible de réaliser des opérations de mesure avant finition. Néanmoins, cette construction de séquence n'est réalisée que sur des pièces de forme canonique et ne prend pas en compte d'éventuelles corrections durant la fabrication. La séquence obtenue ne peut donc être modifiée en fonction des résultats de mesure obtenus.

Plus récemment, une étude menée par Zhao et al. [Zhao et al., 2010] propose une méthode complète de réalisation d'une gamme de fabrication et mesure intelligente basée sur le format ISO STEP-NC. Les différentes étapes de fabrication et mesure *In-situ* au palpeur sont définies dans ces travaux (figure 1.12).

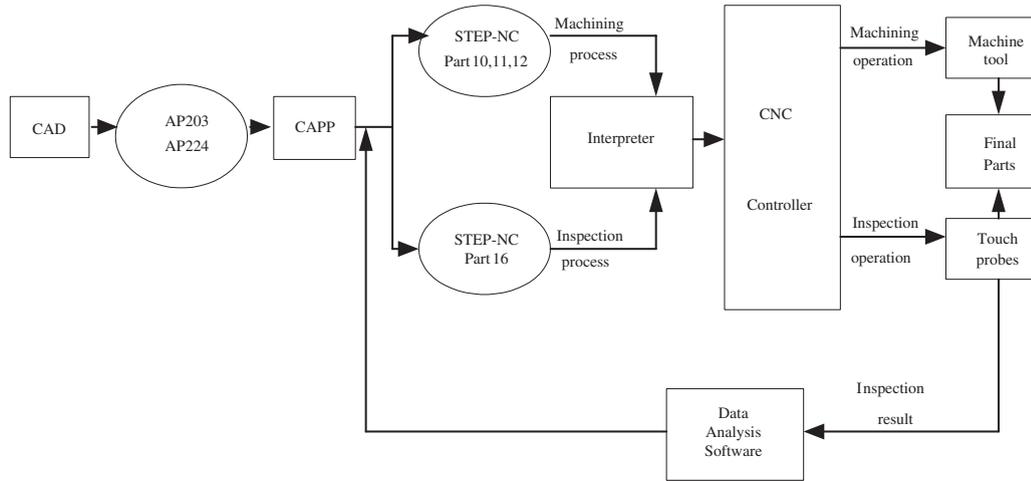


Figure 1.12 – Modèle de données proposé par [Zhao et al., 2008]

2.3 Synthèse

Différents moyens de mesure ont déjà été intégrés dans un système de production, avec des objectifs variés : mesure de géométries, vérification de montage d'usinage ou encore vérification d'évitement de collision. À l'exception de quelques travaux, peu de systèmes sont parfaitement intégrés dans le moyen de production et fonctionnent de manière automatique. Concernant la réalisation automatique de gamme de mesure intégrée au procédé de fabrication, la majorité des gammes de mesure proposées sont réalisées dans le cas de la mesure par palpeur mécanique. Plusieurs étapes conduisent à l'élaboration de la gamme : un partitionnement de la pièce puis un séquençement de la mesure par la mise en place de règles heuristiques, une élaboration d'une trajectoire de mesure adaptée aux entités mesurées (nombre de points de mesures et trajectoires les plus courtes et hors collision). La prise en compte de la phase de mesure dans la réorganisation de la gamme de fabrication/mesure n'est que peu traitée. De même, seuls Zhao et al. [Zhao et al., 2010] proposent la prise en compte des corrections par la modification de la gamme complète en plus de sa création dans une démarche complète STEP-NC. Cependant, cette étude n'est pour le moment qu'une réflexion de gestion des ressources et des données et n'a encore jamais été testée complètement sur un cas réel.

3 La mesure, un problème multi-échelles/multi-systèmes

Compte tenu de la typologie et de l'échelle des défauts d'usinage, nous avons mis en avant que la mesure est un problème multi-échelles. Ainsi, il est nécessaire de connaître les différentes technologies de capteurs ainsi que leurs caractéristiques afin de répondre aux problèmes d'une

mesure multi-échelles. Dans cette partie, l'analyse et la comparaison des différents capteurs permettent d'associer le problème de mesure multi-échelles à la nécessité d'utiliser un système multi-capteurs.

3.1 Systèmes de mesure

Un système de mesure est défini comme l'ensemble comprenant le capteur de mesure et le porteur [Audfray et al., 2012]. Par exemple, une machine à mesurer tridimensionnelle, MMT, est considérée comme un porteur. Lorsque des capteurs, palpeurs à contact ou laser, sont montés sur le bras de la MMT, l'ensemble {capteur + MMT} est donc le système de mesure (figure 1.13).



Figure 1.13 – Description d'un système de mesure/numérisation [Audfray et al., 2012]

Les données constructeurs associées au capteur sont à considérer lors du choix du capteur. En effet, il est nécessaire de qualifier l'ensemble du système de mesure pour chaque ensemble {capteur + porteur} utilisé pour définir les caractéristiques du système de mesure.

De nombreux travaux s'intéressent à l'étude de capteur et donc système de mesure. Généralement, des études comparatives de différents résultats de mesure avec plusieurs capteurs permettent de proposer des classifications des moyens de mesure en fonction de différents critères. Ces études sont nécessaires, car il existe un très grand nombre de capteurs, en termes de technologie, mais aussi de fabricant. Elles permettent ainsi l'aide au choix du système de mesure utilisé en fonction des exigences attendues.

Le palpeur mécanique (figure 1.22 (a)), utilisé souvent sur une MMT, est très utilisé dans les entreprises ; cependant dans le contexte actuel, des moyens de mesures optiques permettent de compléter la mesure au palpeur et ainsi répondre aux exigences industrielles de qualité. Ces technologies de capteurs optiques innovantes sont commercialisées depuis quelques dizaines d'années, elles permettent d'obtenir des résultats de mesure sans contact denses en des temps plus courts comparé au palpeur à contact. Avec ces moyens de mesure, il est ainsi possible d'obtenir une représentativité du produit importante en des temps réduits. Les différentes technologies de capteurs sont classifiées sur la figure 1.14.

Schwenke et al. [Schwenke et al., 2002] présentent les principales familles de capteurs optiques et leurs applications dans le domaine de la métrologie dimensionnelle. Savio et al. [Savio et al., 2007] classifient les techniques de mesure de surfaces complexes par rapport aux dimensions et caractéristiques des pièces à mesurer. Ainsi un tableau récapitulatif et une classification

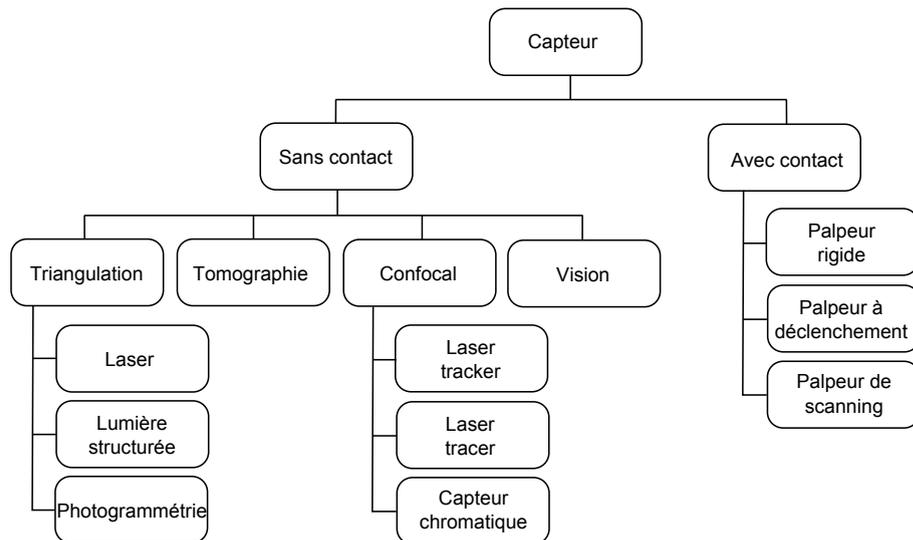


Figure 1.14 – Classification des moyens de mesure (inspiré de [Audfray et al., 2012])

des systèmes de mesure optiques sont proposés afin de déterminer les moyens de mesure les plus adaptés pour la mesure d'un produit (figure 1.15). Par exemple, le laser tracker est privilégié dans le cas de la mesure de produits de grandes dimensions ; pour des produits flexibles, les moyens optiques sont indispensables et pour de la mesure de topographies de surface à échelle micro des capteurs de type microscope confocal doivent être utilisés.

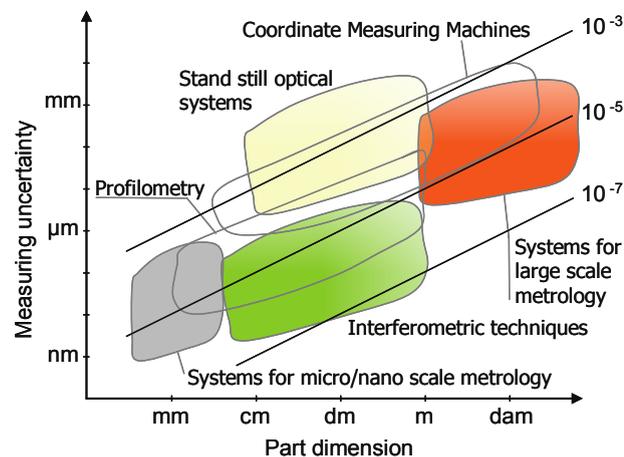


Figure 1.15 – Classification et comparaison des systèmes de mesure optiques par [Savio et al., 2007]

Les travaux de Li et Gu [Li and Gu, 2004] permettent de décrire les différentes méthodes d'acquisition des données des moyens de mesure adaptés aux surfaces complexes. Cuyper et al. [Cuyper et al., 2009] décrivent des méthodes de mesure optiques spécifiques à la mesure de très grandes pièces, par exemple la carrosserie d'un train. La photogrammétrie est une technique très adaptée dans le cas de la mesure de pièce de grandes dimensions.

Afin d'apporter des réponses quant au choix du système de mesure à utiliser, plusieurs études proposent de qualifier les systèmes de mesure utilisés pour ensuite déterminer celui qui répond au mieux aux exigences souhaitées. Une étude comparative de 5 systèmes de me-

sure optiques est proposée dans [Barbero and Ureta, 2011]. Pour cela, plusieurs critères sont proposés et évalués pour chacun des systèmes : la justesse du système de mesure est définie et la qualité du nuage de points acquis par exemple. Des critères pour l'évaluation des systèmes de mesure optiques sont proposés dans [Zuquete-Guarato et al., 2012] : l'évaluation de l'accessibilité des surfaces devant être mesurées et l'analyse de l'aire mesurée permettent de comparer les systèmes de mesure optiques. Audfray et al. [Audfray et al., 2012] proposent une méthodologie pour la qualification des systèmes de mesure en termes de justesse et de bruit de mesure, Qualipso. La réalisation du protocole Qualipso sur un système de mesure permet d'enrichir une base de données des différents systèmes de mesure et ainsi utiliser cette base pour le choix du système (figure 1.16).

Capteur		K Z25	LC 60Dx	LC 60Dx	TP 2	CL 2	ATOS CS2M	Optimus xt
Porteur		Seiv	Metris	MCA11-7axis	Seiv	Seiv	Trépied	main
Qual.	Bruit* δ	0,009	0,011	0,12	N/A	$3,66 \cdot 10^{-5}$	0,005 1	0,061
	Justesse* ϵ	0,01	0,01	0,04	0,003	$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,003 4	0,017 4
Perf.	Ds (mm ² /s)	2 500	6 000	N/A	1 250	2 500	750 000	31 250
	Dsd (mm ² /s)	$30000/\rho$	$75000/\rho$	$75000/\rho$	$1/\rho$	$1000/\rho$	$2000000/\rho$	$500000/\rho$
Contraintes	d qualifiée	120-145	95-115	95-155	0	11-11.4	450-1 200	400-550
	bruit (mm)							
	d qualifiée	140-160	110-145	95-155	0	11-11.4	450-1,200	400-550
	justesse (mm)							
	α qualifié (°)	0-20	35-60	-	-	-	-	-

Figure 1.16 – Base de données de systèmes de mesure réalisée à partir du protocole Qualipso [Audfray et al., 2012]

Dans cette partie, nous avons constaté que beaucoup de travaux de recherche portent sur la qualification des moyens ou système de mesure par la mise en place de critères afin de proposer des classifications. Ces classifications permettent de comparer les différents systèmes de mesure et d'aider au choix des systèmes de mesure les plus adapter en fonction des exigences souhaitées. Cependant, elles ne répondent pas à la problématique de la réalisation de la mesure du produit à 100%. En effet, de par la variété des défauts rencontrés sur les produits, plusieurs systèmes de mesure doivent être utilisés afin d'obtenir un résultat de mesure répondant au problème multi-échelles.

3.2 Étude multi-systèmes

Afin de proposer une phase de mesure adaptée à l'échelle et la typologie du défaut à mesurer, il est souvent nécessaire de faire intervenir plusieurs systèmes de mesure. Une mesure multi-systèmes est nécessaire pour caractériser au mieux les défauts sur le produit réalisé (figure 1.17).

Il existe différents travaux de recherche portant sur la mesure multi-systèmes, et plus particulièrement sur les différentes manières d'utiliser les différents systèmes de mesure, les uns par rapport aux autres. Weckenmann et al. [Weckenmann et al., 2009] réfèrent les différents points clés nécessaires à la réalisation d'une mesure multi-systèmes : le choix des systèmes, la configuration de travail des capteurs, le recalage et la fusion des différentes données. La

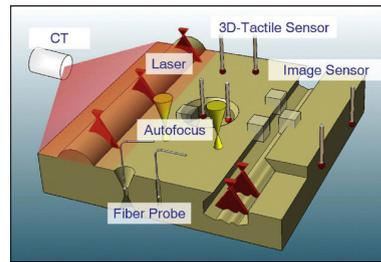


Figure 1.17 – Principe de la mesure multi-capteurs [Weckenmann et al., 2009]

configuration des capteurs permet de décrire la manière dont vont fonctionner les différents capteurs, les uns par rapport aux autres. Durrant-Whyte [Durrant-Whyte, 1988] propose 3 configurations de capteurs : compétitif, complémentaire et coopératif. Ces 3 configurations sont généralement utilisées dans les travaux portant sur la mesure multi capteurs, par exemple Zhao [Zhao, 2010] utilise ses configurations dans ses travaux (figure 1.18).

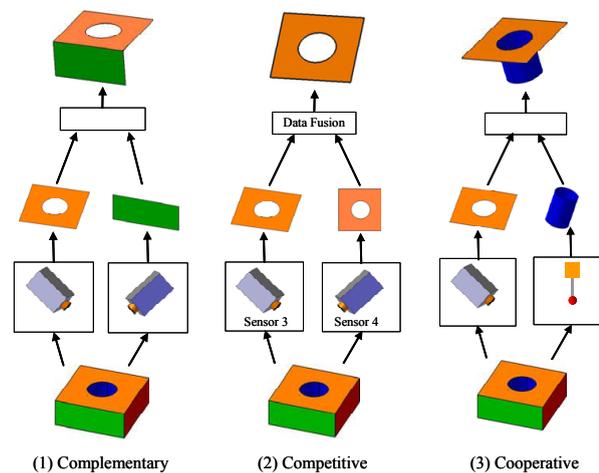


Figure 1.18 – Différentes configurations d'utilisation de la mesure multi capteurs [Zhao, 2010]

Les 3 configurations schématisées sur la figure 1.18 sont explicitées :

- Complémentaire : un système de mesure multi-systèmes est qualifié de complémentaire si les différents capteurs fonctionnent de manière indépendante, mais sont de la même technologie. La combinaison des données acquises permet d'obtenir un résultat de mesure plus complet.
- Compétitif : un système de mesure multi-systèmes est dit compétitif si les différents capteurs délivrent des données indépendantes du même élément. La combinaison de ces données permet de réduire les incertitudes de mesure.
- Coopératif : un système de mesure multi-systèmes est dit coopératif si les capteurs le composant sont indépendants et de technologies différentes. De plus, les informations obtenues par un premier capteur ne peuvent être obtenues avec le second et inversement. Cette configuration de mesure permet d'obtenir plus d'informations sur le produit mesuré.

a) Association de 2 systèmes de mesure

Certaines études portent sur l'association de 2 capteurs, souvent un palpeur mécanique et un système optique. Chan et al. [Chan et al., 2001] utilisent un palpeur mécanique et une caméra CCD, les 2 montés sur le bras d'une MMT et travaillant dans une configuration coopérative permettent de réaliser des opérations de rétro-conception lorsque les modèles numériques de produits ne sont pas connus. Ainsi les données obtenues par la caméra CCD sont utilisées pour guider le palpeur mécanique. Les images permettent de définir les zones à palper, en jouant le rôle d'un modèle CAO de la pièce à mesurer. Dans la même idée que [Chan et al., 2001], Nashman et al. [Nashman et al., 1997] proposent un système de mesure composé d'un système de vision et d'un palpeur. Le palpeur mécanique est positionné sur le bras de la MMT tandis que le système de vision est positionné sur la table (figure 1.19). Le système de mesure par vision permet de construire l'espace de travail de la future mesure au palpeur grâce à l'analyse des contours de la pièce d'étude. Le système multi-capteurs combinant une mesure par stéréovision et un palpeur proposé par Carbone et al. [Carbone et al., 2001] fonctionne de manière compétitive contrairement aux 2 précédentes études. La surface mesurée par stéréovision est aussi palpée afin d'avoir une incertitude de mesure plus faible.

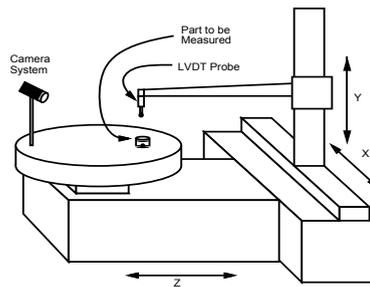


Figure 1.19 – Mesure multi-capteurs sur MMT : système de vision et palpeur [Nashman et al., 1997]

L'association d'un capteur à lumière structurée et d'un palpeur mécanique, montés sur une MMT et une table rotative, est proposée par Zexiao et al. [Zexiao et al., 2005] (figure 1.20(a)). Dans une configuration coopérative également, le capteur à lumière structurée permet de mesurer les profils de la pièce. Le palpeur mécanique est utilisé pour la mesure des zones non mesurables par le capteur à lumière structurée, par exemple les coins des pièces (figure 1.20(b)). Huang et al. [Huang et al., 2007] associent une mesure par triangulation laser et un palpeur mécanique dans une configuration coopérative. La pièce est dans un premier temps scannée avec le laser. À partir de cette mesure, des points de palpation sont automatiquement déterminés sur la pièce. La mesure au palpeur permet ainsi de réduire l'incertitude de mesure. En utilisant ces technologies de mesure identiques, Zhao et al. [Zhao et al., 2012] proposent une inspection hybride automatique en 5 étapes : identification des zones à mesurer à partir du modèle CAO, sélection des capteurs pour chacune des zones, création automatique des trajectoires de mesure, mesure puis analyse des données. Les systèmes de mesure sont utilisés de manière complémentaire, chaque zone devant être mesurée par un seul système de mesure.

Les travaux sur la mesure multi-capteurs présentés dans cette partie proposent des instru-

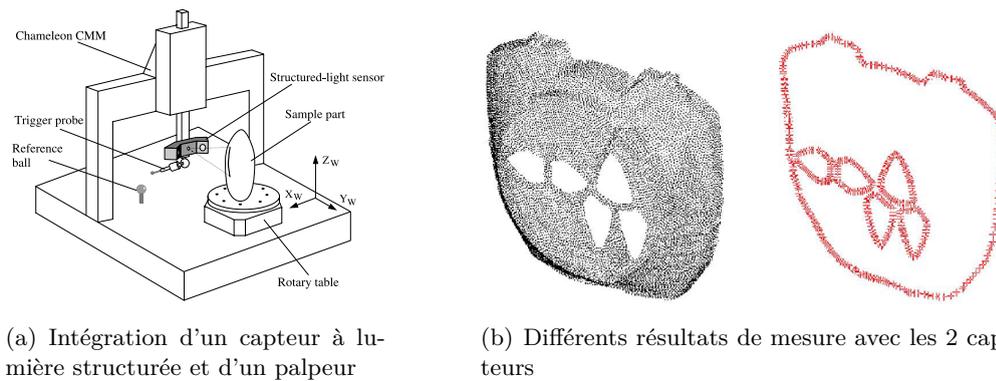


Figure 1.20 – Mesure multi-capteurs proposée par [Zexiao et al., 2005] : système de mesure par triangulation et palpeur sur MMT

ments de mesure combinant généralement deux systèmes de mesure de technologie différents. Dans la plupart des études, un système de vision ou un système de triangulation est associé à un palpeur mécanique (tableau 1.1).

	Palpeur mécanique	Système confocal
Vision	[Chan et al., 2001] [Nashman et al., 1997] [Carbone et al., 2001] [Shen et al., 2001]	
Triangulation	[Zexiao et al., 2005] [Huang et al., 2007] [Zhao et al., 2012]	[Sokolov et al., 2006]

Tableau 1.1 – Résumé des études multi-capteurs

Dans la majorité de ces travaux, des mesures multi-systèmes sont proposées. L'ensemble des travaux porte sur l'association de 2 capteurs de technologie différente. Généralement, les résultats de mesure obtenus par un premier système permettent de proposer une seconde mesure avec le second système de mesure. Les systèmes de mesure fonctionnent de manière compétitive pour réduire les incertitudes ou de manière coopérative pour augmenter le nombre de zones mesurées [Weckenmann et al., 2009]. Ces premières études duo-capteurs sont nécessaires en vue de proposer une mesure multi-capteurs générique qui s'adapte automatique à la géométrie des pièces et à la typologie des écarts.

b) Systèmes commerciaux

Plusieurs systèmes commerciaux existent tels que des MMT multi-capteurs associés à des logiciels de traitement des données dédiés et directement utilisables. La société Nikon [Nikon, 2016] propose la machine *HN – 6060* (figure 1.21), machine à mesurer multi-capteurs. Celle-ci comprend un laser scanner, un système de vision et un palpeur mécanique.

La société HEXAGON Metrology [Metrology, 2016] propose un produit de mesure multi



Figure 1.21 – L'instrument de mesure multi capteurs *HN – 6060* fabriqué par Nikon

capteurs, OPTIV. En combinant un capteur de vision, une tête de mesure scanning Leitz *LSP – X1*, un capteur de lumière blanche chromatique, un laser et des capteurs tactiles.

La société ZEISS [ZEISS, 2016] combine métrologie optique et métrologie tactile avec la gamme O-INSPECT. Les moyens de mesure présents sont un objectif zoom télécentrique Discovery, un capteur scanning à contact VAST XXT et un capteur lumière blanche.

AYONIS Métrologie - Vision [AYONIS, 2016] a conçu DELTEC LEOS 200 un système de mesure automatique 3D multi capteurs. Celui-ci comprend un système de vision, un palpeur tactile et un capteur confocal Stil.

L'association des deux sociétés Werth [Werth, 2016] et AGIE [AGIE, 2016] propose une application industrielle de son système de mesure multi-capteurs. Celui-ci est équipé d'un capteur de traitement de l'image qui va permettre d'enregistrer des contours complets de pièce. Les écarts de contours sont obtenus automatiquement à partir du calcul des écarts par rapport à la pièce théorique. Les nouvelles données géométriques sont transmises online à la machine AGIE (érosion à fil).

3.3 Synthèse

De nombreux travaux s'intéressent à l'automatisation d'une mesure multi-capteurs en associant généralement 2 capteurs de technologie différente sur une MMT. Ces méthodes permettent d'obtenir des résultats de mesure de manière complémentaire ou coopérative. Cependant, les configurations de travail des deux capteurs (complémentaires, compétitifs et coopératifs) ne sont pas modifiables et sont construites en fonction de la géométrie du produit à mesurer. De plus, les méthodes de mesure multi-capteurs présentées ne répondent pas au problème de mesure du produit en fonction de ses écarts géométriques. Il en est de même pour les systèmes de mesure multi-capteurs "tout-en-un" proposés par de nombreux industriels. Ces systèmes nécessitent une expertise forte sur les écarts devant être identifiés afin de les utiliser au mieux et obtenir des résultats de mesure pertinents.

4 Cadre de l'étude - Présentation des capteurs utilisés

Comme nous l'avons vu précédemment, la mesure *In-situ* amène deux problématiques majeures qui sont :

- **Comment intégrer la phase de mesure dans le contexte de fabrication ?**
- **Comment effectuer une mesure multi-échelles ?**

La littérature a montré que la mesure multi-échelles peut être réalisée au travers d'une mesure multi-capteurs, en choisissant le capteur approprié pour chaque échelle de défauts. Ainsi, le problème posé devient *comment effectuer une mesure multi-capteurs dans un contexte In-situ* tout en respectant les contraintes de temps minimal alloué à l'étape de mesure et de forte interopérabilité entre mesure et fabrication.

Dans nos travaux, quatre capteurs de technologies différentes sont utilisés (figure 1.22) : un palpeur à contact, un capteur laser-plan, un microscope confocal et un système de mesure par stéréo-vision.

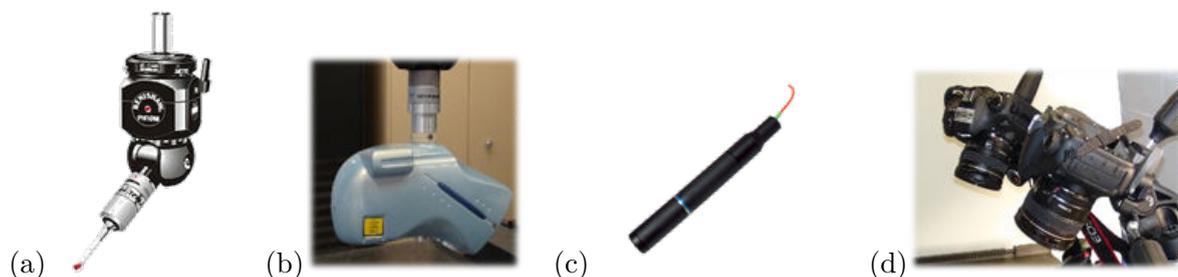


Figure 1.22 – Systèmes de mesure utilisés : (a) palpeur à contact Renishaw, (b) laser plan Kréon, (c) microscope confocal Stil, (d) système de vision

Ces quatre capteurs (en rouge sur la figure 1.23) ont été choisis pour plusieurs raisons : ils ont déjà fait l'objet d'études au sein du laboratoire [Quinsat and Tournier, 2012], [Audfray et al., 2012], [Zuquete-Guarato et al., 2012], [Zhao, 2010] ; ils représentent une bonne diversité technologique (figure 1.23) ; ils permettent de mesurer des écarts de types macro et micro-géométriques ; ils sont tous intégrables dans un environnement de fabrication.

4.1 Palpeur mécanique à contact

Le palpeur mécanique à contact est le capteur de mesure dimensionnelle le plus utilisé en industrie et en recherche (figure 1.24).

Par sa technologie à contact bien maîtrisée, il permet d'obtenir des résultats de mesure avec une faible incertitude de mesure. Cependant, le palpeur à contact ne permet d'acquérir que quelques points par seconde, il est ainsi essentiellement utilisé dans le cas de la mesure de formes canoniques qui ne nécessitent pas une représentativité complète de la forme.

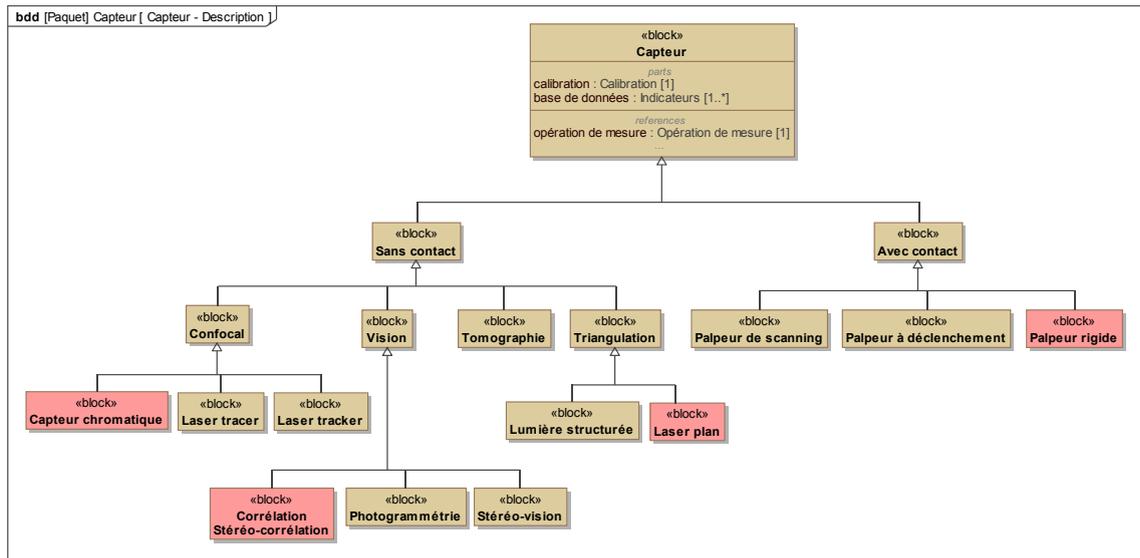


Figure 1.23 – Classification des moyens de mesure - Diagramme de définition des blocs du système capteur

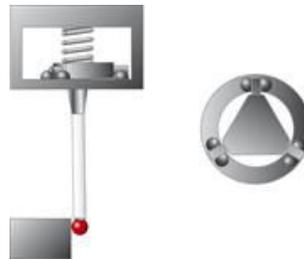


Figure 1.24 – Acquisition de points par palpeur mécanique

4.2 Capteur laser-plan

Le capteur laser-plan Zéphyr II développé par la société Kréon est un système de mesure par triangulation. La triangulation est la détermination d'un point de l'objet mesuré grâce à une relation trigonométrique entre le projecteur (laser plan), la caméra et l'objet lui-même (figure 1.25(a)).

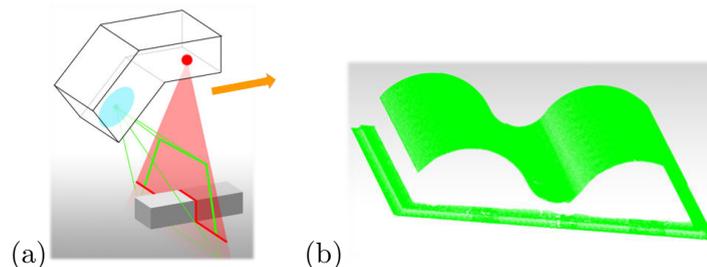


Figure 1.25 – Capteur laser plan - Résultat de mesure

Un plan laser est projeté sur la pièce. L'intersection entre ce plan et la pièce forme une ligne rouge sur la figure 1.25(a) directement enregistrée par la caméra CCD. La connaissance de la position du laser dans son environnement de travail permet d'obtenir une image 3D de

l'objet mesuré sous forme d'un nuage de points (figure 1.25 (b)).

Ce capteur a pour avantage d'acquérir une grande quantité de points pour une vitesse relativement faible (10 000 pts/s [Mehdi-Souzani, 2006]). Il est adapté à la mesure de surfaces complexes, ainsi qu'à la mesure de pièces déformables. La qualité des résultats de mesure est liée à différents facteurs. La position relative entre l'objet et le laser, l'angle de vue de l'objet ou encore la nature de la surface à mesurer peuvent influencer le résultat de la mesure. Audfray et al. [Audfray et al., 2012] qualifient le système de mesure {Laser plan Kréon + MMT} par un bruit de mesure de $9\mu m$ et une justesse de mesure de $2\mu m/mm$ dans le cas de la meilleure configuration laser/surface.

4.3 Microscope confocal

Le capteur Stil est un microscope basé sur l'imagerie confocale chromatique, utilisé pour des applications de mesure de micro-géométrie. Sa résolution en position donnée par le constructeur est de $0,1\mu m$. Son principe de fonctionnement est représenté sur la figure 1.26 (a).

À partir d'une source lumineuse blanche ponctuelle (W) passant par un jeu de lentille, séparateur de réseau et diaphragme, la longueur d'onde (λM représentée par les lignes vertes) entrant en contact avec la surface (point M) est enregistrée. Cette longueur d'onde permet de connaître l'altitude du capteur par rapport à la surface mesurée. Ainsi, le capteur Stil permet d'obtenir une information sur l'altitude z d'un point (x,y) de la surface. Contrairement au capteur laser-plan Kréon, le capteur Stil utilise la réflexion de la surface pour effectuer la mesure. La résolution de la mesure n'est donc pas influencée par la luminescence de l'environnement de travail. Le bruit de mesure ainsi que la justesse de mesure du système de mesure {Capteur Stil + MOCN Mikron} ont été évalués [Quinsat and Tournier, 2012] : $0.328\mu m$ pour le bruit de mesure et moins de $0.1\mu m/mm$ pour sa justesse de mesure.

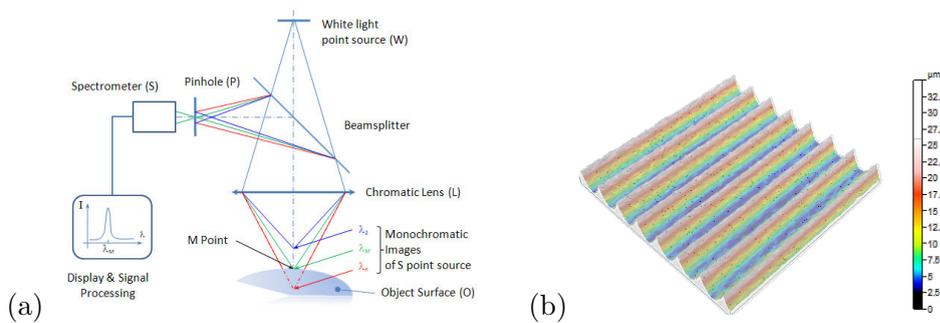


Figure 1.26 – Microscope confocal Stil

Un déplacement du capteur selon une direction orthogonale à l'axe du capteur permet d'obtenir un profil linéique de l'objet. Un balayage dans la troisième direction conduit à la mesure de la surface (figure 1.26 (b)).

4.4 Système de stéréovision

La mesure par vision est de plus en plus utilisée, car elle permet d'acquérir des milliers de données en un temps très restreint, de mesurer des pièces de toutes dimensions et a l'avantage d'être un instrument de mesure peu onéreux en comparaison des capteurs précédents.

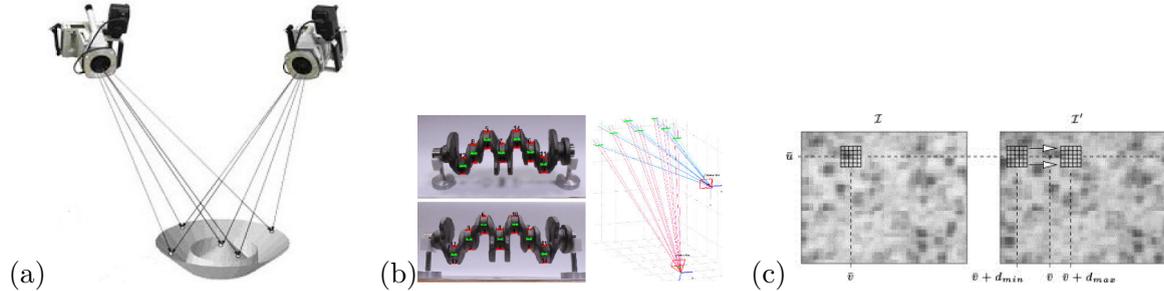


Figure 1.27 – Mesure par vision - (a) Photogrammétrie de points; (b) Photogrammétrie de lignes [Simoes, 2012]; (c) Stéréo-corrélation [Garcia et al., 2002]

Le principe de mesure est l'acquisition d'images 2D qui servent de support à la reconstruction 3D de l'objet. Dans le cas de la photogrammétrie de points (figure 1.27 (a) [Mitchell et al., 1999]) la détection de cibles sur les différentes images et leurs appariements permettent de reconstruire un point 3D associé à chacune des cibles positionnées et observées par les caméras [Sapirstein, 2016]. Cette technique de mesure génère donc un nombre limité de points 3D reconstruits.

La photogrammétrie de lignes est réalisée à partir de la détection de lignes caractéristiques sur les images, par exemple les contours d'un objet [Simoes, 2012] (figure 1.27 (b)). Cette technique, plus complexe en terme de traitement des données, permet néanmoins d'obtenir une meilleure représentativité de l'objet mesuré.

La stéréo-corrélation d'images aussi appelée photogrammétrie dense consiste en l'appariement d'un grand nombre de points de l'objet afin d'en obtenir une grande représentativité. Cette mesure est donc réalisée sur des objets ou scènes constitués de surfaces texturées naturellement ou artificiellement, et permet d'obtenir des mesures 3D de déplacements ou de surfaces ([Helm et al., 1996, Sutton et al., 2009, Hild and Roux, 2012]). L'analyse par corrélation des textures des différentes images permet de réaliser l'appariement de l'ensemble des textures observées figure 1.27. La reconstruction de l'objet 3D passe souvent par la recherche du minimum de corrélation sur les régions d'intérêt définies dans chacune des images. La stéréo-corrélation d'images est donc la méthode de mesure par vision la plus adaptée pour la mesure de pièces 3D comprenant des défauts de fabrication de géométries aléatoires.

Dans nos travaux, une méthode de stéréo-corrélation d'images, répondant aux contraintes de la mesure *In-situ* et à la mesure de pièce réalisées par enlèvement de matière, est proposée et se base sur les techniques de photogrammétrie dense déjà existantes. Nous en rappelons le principe succinctement.

La mesure par stéréo-corrélation consiste en la mise en correspondance d'images locales

issues d'au moins deux images de points de vue différents. L'appariement par corrélation des imagettes ainsi que la connaissance de l'étalonnage du système de vision permettent de reconstruire la forme 3D de l'imagette par un nuage de points. Elle est qualifiée de stéréovision dense, car l'appariement est réalisé sur l'ensemble des pixels de la zone d'étude. Deux éléments majeurs distinguent les méthodes : le critère de corrélation choisi, et la méthode de reconstruction 3D.

a) Critères de corrélation

Ils sont établis à partir des valeurs des niveaux de gris des pixels des images considérées. Ainsi, la scène d'étude nécessite une texture comprenant de forts contrastes afin d'obtenir des résultats concluants. Des textures artificielles peuvent être ajoutées sur des scènes peu texturées, par exemple un ajout de peinture de type mouchetis, ou la projection de motifs aléatoires lumineux. Les scores de corrélation sont des fonctions évaluées sur le voisinage d'un pixel à appairier. L'objectif est d'estimer des fonctions de similarité à minimiser afin d'obtenir un appariement de qualité au voisinage du pixel (figure 1.28).

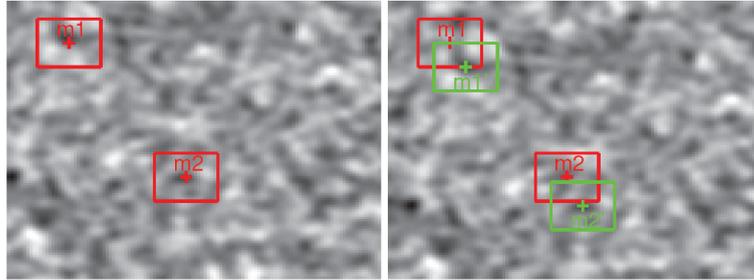


Figure 1.28 – Minimisation de la fonction de similarité pour le voisinage de 2 pixels m_1 et m_2 [Besnard, 2010]

Plusieurs scores de corrélation (ou fonctions de similarité) sont utilisés dans la littérature. Deux exemples sont présentés (les notations utilisées font référence à la figure 1.28).

Score SSD

Ce premier critère évalue la différence des niveaux de gris entre les deux zones d'images. Soient $f^g(\tilde{u}^g, \tilde{v}^g)$ la valeur du niveau de gris au point m_1 sur l'image gauche et $f^d(\tilde{u}^d, \tilde{v}^d)$ la valeur du niveau de gris au point m_1 sur l'image droite, le critère SSD (Sum of Squared Differences) est défini par :

$$\chi_{m_1}^2 = \sum_{i,j} \left[f^g(\tilde{u}^g + i, \tilde{v}^g + j) - f^d(\tilde{u}^d + \tilde{d}u^d + i, \tilde{v}^d + \tilde{d}v^d + j) \right]^2 \quad (1.1)$$

avec i balayant la hauteur et j la largeur de la fenêtre de corrélation. $\tilde{d}u^d$ et $\tilde{d}v^d$ sont les déplacements de la fenêtre de l'image droite à évaluer par minimisation du score de corrélation. Un inconvénient concernant le mode de calcul de ce score de corrélation est qu'il ne prend pas en compte les variations de luminance entre les deux images, et n'est donc pas adapté lorsque les images présentent des intensités lumineuses différentes.

Critère ZSSD

La mise à "moyenne nulle" du *SSD* conduit à définir le score *ZSSD* (Zero-mean Sum of Squared Differences) [Sutton et al., 2009] qui permet de corriger les intensités lumineuses des images.

$$\chi_{m_1}^2 = \sum_{i,j} \left[f^g(\tilde{u}^g + i, \tilde{v}^g + j) - \overline{f^g}(\tilde{u}^g, \tilde{v}^g) - (f^d(\tilde{u}^d + d\tilde{u}^d + i, \tilde{v}^d + d\tilde{v}^d + j) - \overline{f^d}(\tilde{u}^d, \tilde{v}^d)) \right]^2 \quad (1.2)$$

$\overline{f^g}(\tilde{u}^g, \tilde{v}^g)$ et $\overline{f^d}(\tilde{u}^d, \tilde{v}^d)$ sont les moyennes locales des intensités des images respectivement gauche et droite. Nous retiendrons le score de corrélation de type *ZSSD* dans nos travaux qui permet d'intégrer la différence de luminosité des images, ce qui est indispensable pour une mesure effectuée dans un environnement de fabrication.

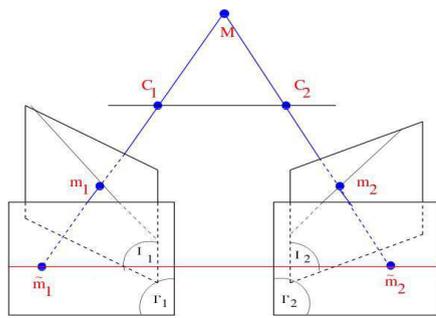
Les méthodes de corrélation dites "locales" utilisant ces différents scores de corrélation sont apparues dans les années 80 [Sutton et al., 1983, Peters and Ranson, 1982]. Elles ont la particularité d'évaluer la fonction de similarité (score de corrélation) sans prendre en compte l'environnement de la fenêtre de corrélation. Ainsi, pour chacune des imagerie de l'image de référence l'imagerie correspondante sur l'image secondaire est déterminée.

b) Différentes approches pour la reconstruction 3D

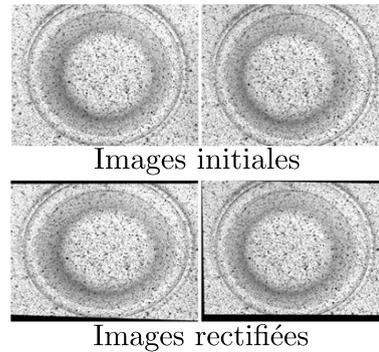
Beaucoup de travaux portent sur la reconstruction de forme 3D par stéréo-corrélation.

La rectification d'images

La première méthode qui a été mise en place pour la reconstruction 3D est la rectification d'image. Elle consiste en la transformation des repères images pour amener les images dans un même plan (figure 1.29).



(a) Opération de rectification [Ducarouge et al., 2009]



(b) Résultat de rectification d'images [Harvent et al., 2013]

Figure 1.29 – Reconstruction 3D par rectification d'images

Pour un point \tilde{m}_1 de l'image de gauche (figure 1.29(a)), le point correspondant \tilde{m}_2 sur l'image de droite se situe sur la ligne horizontale passant par \tilde{m}_1 . Dans ce cas, les scores de corrélations sont calculés suivant une unique direction, la ligne horizontale passant par \tilde{m}_1 , la valeur minimum du score de corrélation sera obtenue pour le point \tilde{m}_2 .

La stéréo-corrélation fine [Harvent et al., 2013]

La méthode de stéréo-corrélation fine proposée par Harvent et al. [Harvent et al., 2013] consiste en la déformation de la fenêtre de corrélation. Cette méthode a été initialement proposée par Frédéric Devernay en 1997 et mise en œuvre dans la thèse de Dorian Garcia soutenue à Mines d'Albi en 2001 [Garcia et al., 2002]. Les fenêtres de corrélation carrées sont déformées de manière à minimiser les scores de corrélation (figure 1.30), soit par une approximation au premier ordre si les images sont préalablement rectifiées, soit par une approximation au second ordre.

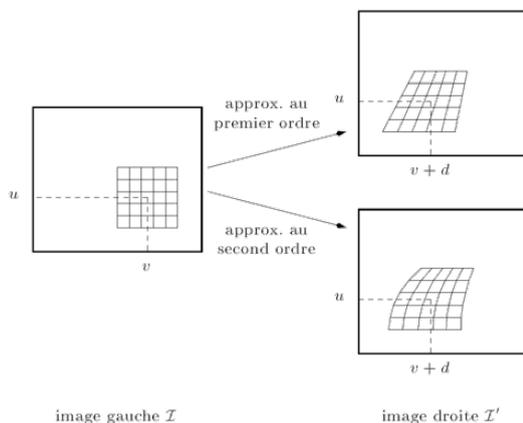


Figure 1.30 – Principe de la déformation du domaine de corrélation pour la détermination des propriétés différentielles des surfaces [Harvent et al., 2013]

Les déformations obtenues permettent de déterminer les propriétés différentielles des surfaces. En effet, l'adaptation locale de la géométrie des domaines de corrélation par minimisation des scores de corrélation mène à la courbure et à l'orientation locale de la surface observée et permet ainsi de reconstruire l'ensemble de la surface 3D (figure 1.31).

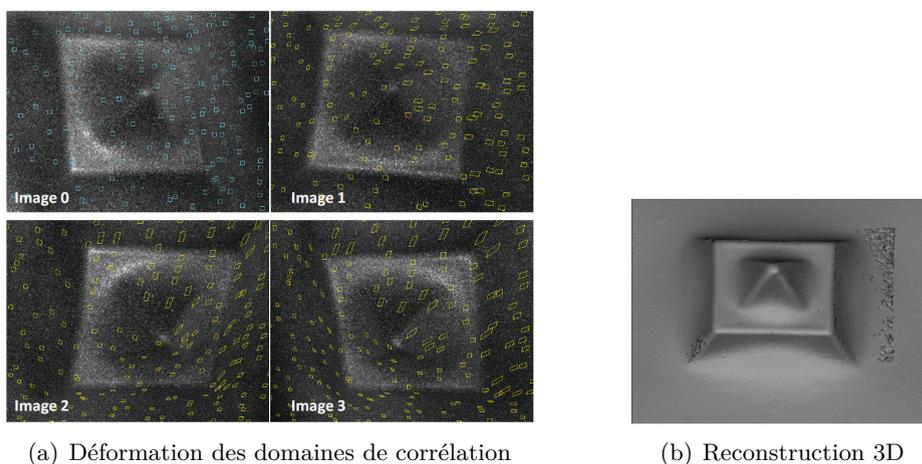


Figure 1.31 – Résultat de stéréo-corrélation fine d'images [Harvent et al., 2013]

La stéréo-corrélation basée sur modèle CAO [Beaubier et al., 2013]

La méthode de stéréo-corrélation proposée par Beaubier et al. [Beaubier et al., 2013] s'appuie sur le modèle numérique de la surface mesurée. Contrairement aux méthodes de stéréo-corrélation locales présentées précédemment, cette méthode est globale. En effet, la fenêtre de corrélation utilisée pour l'analyse par corrélation est unique et représente l'ensemble de la zone d'étude de la pièce. À partir de la connaissance des relations de passage entre le repère numérique CAO et les repères images, le modèle numérique (connu sous forme d'une surface NURBS) est projeté sur les images. Les projections obtenues permettent de générer automatiquement des domaines de corrélation déformés (fenêtres de corrélation gauche et droite) et ainsi obtenir un modèle de la surface par une minimisation globale des scores de corrélation sur l'ensemble de la surface (figure 1.32).

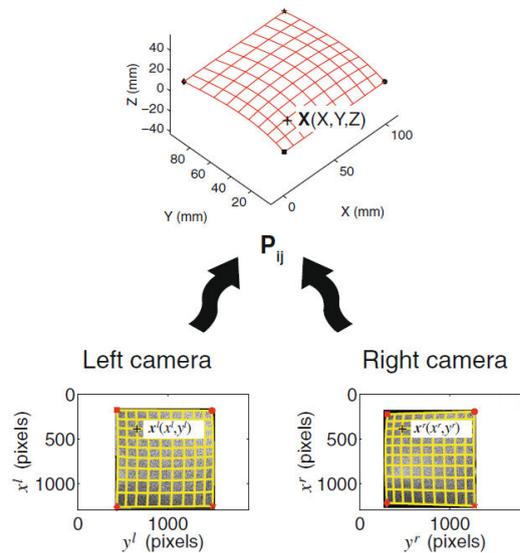


Figure 1.32 – Déformation du modèle numérique NURBS par analyse des scores de corrélation sur les projections [Beaubier et al., 2013]

La méthode d'optimisation du résidu de corrélation, calculée à partir des projections, est réalisée à partir de la déformation du modèle numérique 3D par le déplacement des points de contrôle P_{ij} . En effet, la déformation du modèle numérique 3D modifie les projections et donc la valeur du score de corrélation. La surface 3D obtenue après minimisation des scores de corrélation correspond à un modèle de la surface réelle.

Cette approche de mesure d'écart de forme 3D, nous paraît la plus pertinente vis-à-vis de l'identification des défauts sur la surface d'une pièce. Ainsi, nous proposons de retenir une méthode de mesure par stéréo-vision basée sur modèle CAO. Nous présenterons plus spécifiquement l'utilisation d'une méthode globale [Dubreuil et al., 2016] dans le chapitre 2 mettant en avant certaines limites qui nous conduiront à proposer notre propre méthode, GéoDIC-3D, que nous détaillerons dans le chapitre 3.

5 Problématique générale

Rappelons que nous positionnons nos travaux dans le cadre de l'amélioration du procédé de fabrication, plus particulièrement du procédé d'usinage, grâce à la mesure *In-situ* (figure 1.33). Après une étape de fabrication, une phase de mesure est proposée directement dans l'environnement de la machine-outil. Compte tenu des différentes typologies d'écart géométriques, cette phase de mesure doit être réalisée à l'aide de plusieurs capteurs. Nous avons restreint notre cadre d'étude à 4 capteurs de technologies variées facilement intégrable sur une machine-outil. À l'issue de la phase de mesure, des actions correctives peuvent être mises en place afin d'assurer la conformité géométrique du produit. Nous avons reformulé notre problématique en *comment effectuer une mesure multi-capteurs dans un contexte In-situ* tout en respectant les contraintes de temps minimal alloué à l'étape de mesure et de forte interopérabilité entre mesure et fabrication. L'interopérabilité entre la fabrication et la mesure est définie par l'intégration de la mesure dans la fabrication et les différents échanges de données entre ces 2 systèmes. Une forte interopérabilité permettra une grande réactivité en particulier vis-à-vis des actions correctives à mener.

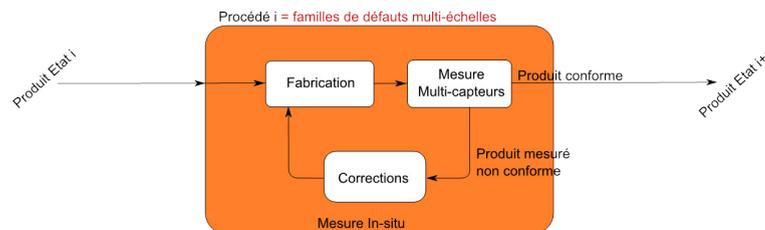


Figure 1.33 – Positionnement des travaux

Le premier axe de travail concerne l'intégration de la phase de mesure dans la gamme de fabrication en respectant les contraintes précédemment évoquées. Afin de prendre en compte ces contraintes, nous proposons dans le chapitre 2 un modèle de gestion des données pour la fabrication et la mesure *In-situ*. Ce modèle permet de décrire les systèmes (fabrication et mesure), ainsi que les différents flux et échanges de données entre eux. Cette modélisation met en avant la simplification du système fabrication/mesure *In-situ* par rapport à la démarche classique fabrication/mesure *Post-process*. Considérant le contexte multi-capteurs, une première étude est alors proposée sur l'association capteur/écarts géométriques. Celle-ci met en avant la nécessité d'une hiérarchisation des capteurs vis-à-vis des défauts à évaluer. Il en découle alors une évolution de la gamme fabrication/mesure *In-situ* avec la proposition d'intégration d'une phase de pré-mesure réalisée par vision. Cette étape de pré-mesure joue le rôle d'un outil d'aide à la décision en amont de la phase de mesure proprement dite. La mesure n'est déclenchée que si des zones de défauts sont détectées, ce qui diminue significativement le temps alloué à la mesure. Le chapitre 3 est alors consacré à la présentation de l'outil de pré-mesure par stéréo-vision, que nous proposons afin de détecter les potentielles zones de défauts. Cet outil de pré-mesure devant assurer le respect des 2 contraintes liées à la mesure *In-situ*, se base sur une méthode originale de stéréo-corrélation, GeoDIC-3D, que nous proposons dans

ces travaux. Celle-ci assure une forte interopérabilité grâce à l'utilisation du modèle CAO, à la fois pour la méthode de calibration du système, mais également pour la définition de zones d'intérêt dans les images. Lorsqu'une zone de défauts est détectée, une phase de mesure multi-capteurs automatique peut alors être déclenchée. Dans le chapitre 4, nous proposons la mise en œuvre de la démarche complète dans l'environnement d'une machine-outil pour un exemple de pièce simple avec défauts. Ces défauts étant de type macro-géométriques, seuls le capteur laser plan et l'outil de pré-mesure par stéréo-corrélation sont utilisés. Ces défauts étant connus, nous mettons en avant la robustesse de notre démarche pour la mesure d'écarts géométriques dans un contexte *In-situ*.

Chapitre 2

Modèle d'échanges de données de fabrication et mesure In-situ

Sommaire

1	Introduction	32
2	Modèle de gestion des données pour le procédé fabrication/mesure In-situ	32
2.1	Utilisation du langage SysML	32
2.2	Gestion des données du système <i>Post-process</i>	34
	a) Modèle d'échanges principal	35
	b) Description des composants principaux	35
2.3	Gestion des données du système <i>In-situ</i>	39
	a) Modèle d'échanges principal	40
	b) Description des nouveaux composants	40
2.4	Flux de données et activités du système <i>In-situ</i>	42
2.5	Synthèse	43
3	Étude d'association des écarts géométriques aux capteurs [Du-breuil et al., 2014]	43
3.1	Réalisation de la pièce test	44
3.2	Mesure de la pièce test	45
3.3	Étude de faisabilité	50
3.4	Synthèse et activité de pré-mesure par vision	51
4	Conclusion	53

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un modèle d'échanges de données pour une gamme de fabrication et mesure *In-situ*. La modélisation, basée sur le langage SysML, s'appuie sur la connaissance du procédé d'usinage et de la mesure *Post-process* et prend en compte les différentes exigences et contraintes liées à la mesure *In-situ* : le temps de mesure et de traitement des données réduit et l'augmentation de l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure. Pour cela, un premier modèle d'échanges de données est exposé dans le cas classique du procédé de fabrication et mesure *Post-process*. Ce premier modèle sert de support au second modèle décrivant les échanges de données dans le cas du procédé de fabrication et mesure *In-situ*. La comparaison de ces 2 modèles permet de constater l'augmentation de l'interopérabilité lors de la mise en place d'une mesure *In-situ* (intégration de la phase de mesure dans la gamme de fabrication en cours).

Ainsi dans la seconde partie de ce chapitre, une étude comparative des 4 capteurs utilisés est proposée à partir d'une analyse de la capacité de mesure d'un capteur vis-à-vis des écarts géométriques liés à l'usinage. Cette étude est réalisée afin de proposer une future phase de mesure répondant à la contrainte du temps de mesure le plus restreint possible. De plus, nous avons pu constater, grâce à cette étude, que le capteur de mesure par stéréovision peut être un outil de détection rapide des écarts géométriques. Ainsi, une nouvelle modélisation prenant en compte cet outil de détection des écarts permet d'assurer "au mieux" les contraintes liées à la mesure *In-situ*.

2 Modèle de gestion des données pour le procédé fabrication/mesure *In-situ*

Dans cette partie, nous nous intéressons à la gestion des différentes données de la fabrication et de la mesure. Nous présentons un modèle d'échanges des données fabrication/mesure basé sur le langage SysML et répondant aux contraintes liées la mesure *In-situ* : temps de mesure et de traitement réduit et augmentation de l'interopérabilité fabrication/mesure. Un premier modèle d'échanges dans le cas de la mesure *Post-process* est proposé, à partir des nombreuses connaissances sur ce type de mesure vis-à-vis de la fabrication [Audfray et al., 2012, Zhao, 2010] et basé sur les travaux du groupe de recherche GAMA [Villeneuve and Bourdet, 1990]. Ce modèle sert de support au modèle que nous suggérons dans le cas de la mesure *In-situ*.

2.1 Utilisation du langage SysML

De nombreux standards de langage de modélisation sont utilisés afin de représenter les systèmes, leurs comportements ainsi que les échanges entre leurs différents composants. Par exemple, Zhao et Xu [Zhao and Xu, 2010] utilisent plusieurs langages pour modéliser les échanges de données dans le cas de la mesure *In-situ* avec un palpeur mécanique : les langages EXPRESS-G, IDEF1X, et XML permettent de définir conjointement l'ensemble du modèle de fabrication et mesure au palpeur.

Le langage SysML [Roques, 2011] est un langage de modélisation récent mis en place pour uniformiser la modélisation système. Il permet de décrire un système complet avec une seule modélisation structurée à partir de 10 diagrammes utilisant une typologie équivalente. Ce type de modélisation apporte plusieurs avantages : une modélisation homogène et complète des systèmes, un transfert uniforme des données inter-industrie ou entre les industries.

Dans le cas de la fabrication et/ou de la mesure de pièce, très peu d'études de modélisation SysML ont été réalisées. Dans nos travaux, nous proposons d'utiliser le langage SysML afin de mettre en place une modélisation objective des flux de données associés au procédé fabrication/mesure. Le procédé de fabrication/mesure est considéré comme le système à modéliser dans le langage SysML. Cette modélisation doit s'adapter aux contraintes liées à la mesure *In-situ*, par le respect de la forte interopérabilité entre les données de la fabrication et celles de la mesure. Plus particulièrement, 3 diagrammes du langage SysML sont utilisés : le diagramme de définitions des blocs, le diagramme des blocs internes et le diagramme d'activités.

c) Diagramme de définition des blocs

Ce diagramme décrit les différents composants du système modélisé. Il met en avant la hiérarchie du système ainsi que les classifications système/composants et sous-composants. Chaque composant du système considéré est ainsi représenté par un diagramme de définition des blocs. Dans chaque diagramme sera défini précisément le composant modélisé : la description de ses sous-composants, leurs nombres et leurs liens avec le composant principal ainsi que les caractéristiques des différents composants/sous-composants.

d) Diagramme des blocs internes

Ce diagramme décrit les échanges entre les composants principaux du système. Il permet de modéliser les interactions majeures du système en définissant la structure interne principale du système. Contrairement au diagramme de définitions des blocs, il n'y a pas de hiérarchisation/appartenance entre les différents composants de celui-ci : seules des interactions et liaisons contextuelles sont modélisées.

e) Diagramme d'activités

Ce diagramme décrit l'enchaînement d'une ou plusieurs activités du système. Il a pour but de modéliser les flux entre les différentes actions du système. Faisant partie de la famille des diagrammes dynamiques de la modélisation SysML, il exprime la logique de contrôle et d'entrées/sorties du système ; il peut être comparé au diagramme fonctionnel SADT.

Ces modélisations nécessitent l'utilisation d'un vocabulaire spécifique lié à la fabrication et la mesure ; l'ensemble des termes proposés et utilisés sur l'ensemble des modèles est explicité à travers des définitions et des exemples appliqués au cas de la fabrication et de la mesure.

- Associer : Réunir des choses en vue de les rendre solidaires, de les mettre en accord (ex. :

à chaque outil est associé une jauge outil, définie par une longueur et un rayon)

- Comporter : contenir quelque chose (ex. : une phase de mesure comporte des opérations de mesure)
- Générer : Produire quelque chose, l'avoir pour conséquence inéluctable, l'engendrer, en être la source (ex. Le modèle FAO est généré à partir du modèle CAO et de la gamme de fabrication)
- Modéliser : procéder à une modélisation (ex. : le modèle CAO modélise la pièce réelle dans son état "parfait")
- Piloter : contrôler les mouvements d'un mécanisme (ex. : le code généré par le modèle FAO permet de piloter la machine de production)
- Réaliser : Production physique de quelque chose (ex. : une opération d'usinage permet de réaliser une entité usinée)
- Utiliser/appuyer : exploiter quelque chose afin de réaliser sa tâche (ex. : la machine de production s'appuie sur la gamme de fabrication pour générer la pièce)
- Vérifier : soumettre quelque chose à un examen ou à des tests pour en contrôler l'état ou le fonctionnement, établir son exactitude.

Les modélisations des systèmes proposés porteront dans un premier temps sur le système, procédé de fabrication/mesure *Post-process*, que nous noterons **système *Post-process***; puis sur le système, procédé de fabrication/mesure *In-situ*, qui sera noté **système *In-situ*** dans la suite de nos travaux.

2.2 Gestion des données du système *Post-process*

Dans le processus complet d'élaboration des pièces par usinage, plusieurs éléments interviennent (figure 2.1).

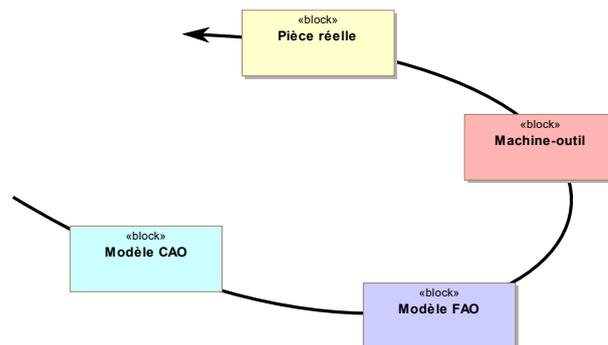


Figure 2.1 – Descriptif complet du processus d'élaboration des pièces par usinage

Au départ, le modèle CAO de la pièce associé à sa gamme de fabrication permet de générer un modèle FAO de la pièce. Ce dernier pilote la machine-outil afin de générer la pièce réelle.

La pièce produite est finalement comparée à son modèle CAO. Pour cela, une gamme de mesure générée à partir du modèle CAO de la pièce permet de piloter la machine de mesure (par exemple une MMT associée à un capteur). Cette dernière étape permet de vérifier la conformité de la pièce produite.

a) Modèle d'échanges principal

Cette première approche du système *Post-process* nous permet de présenter un modèle d'échanges de données entre 7 composants principaux à travers le diagramme des blocs internes défini sur la figure 2.2.

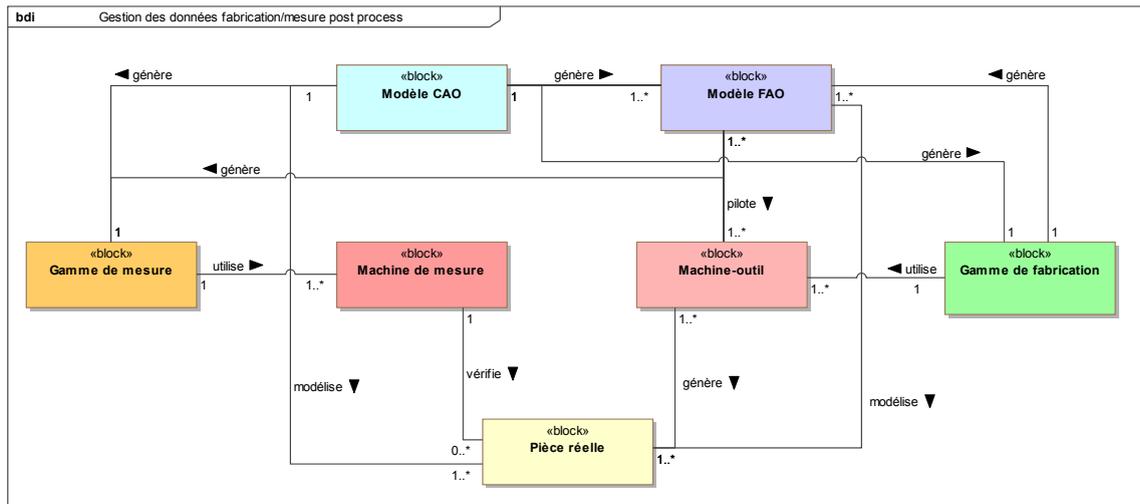


Figure 2.2 – Diagramme SysML de définition des blocs dans le cas de la fabrication et mesure *Post-process*

Nous remarquons un parallélisme entre la partie du modèle concernant la fabrication et celle concernant la mesure, il est d'autant plus observé dans la suite de ce chapitre. Nous nous appuyons sur ce parallélisme pour la modélisation du système *In-situ*.

De plus, plusieurs boucles d'échanges de données apparaissent sur ce modèle (figure 2.2), elles représentent les nombreuses interactions nécessaires entre les différents composants du système. L'ensemble de ces interactions, mais aussi les composants du système modélisé doit être maîtrisé afin de proposer un processus général de la fabrication et mesure *Post-process*. Ainsi, nous décrivons les 7 composants principaux du système *Post-process*, c'est à dire : le modèle CAO, le modèle FAO, la gamme de fabrication, la gamme de mesure, la pièce réelle, la machine-outil et la machine de mesure.

b) Description des composants principaux

Les 7 diagrammes de définitions des blocs, correspondant aux composants principaux du système *Post-process*, sont proposés dans cette partie.

a) *Modèle CAO*

Le **modèle CAO** est le maillon de départ de la fabrication. En effet, il est le résultat du bureau des études et modélise la pièce dans son état idéal. Le modèle de définition des blocs de la figure 2.3 décrit le modèle CAO, et ses sous-composants. Il comporte des **entités CAO**, qui peuvent être des formes canoniques (cône, cylindre, etc.) ou des formes complexes, ainsi que des spécifications géométriques et dimensionnelles (**GD&T**) associées aux surfaces fonctionnelles selon la norme ISO en vigueur.

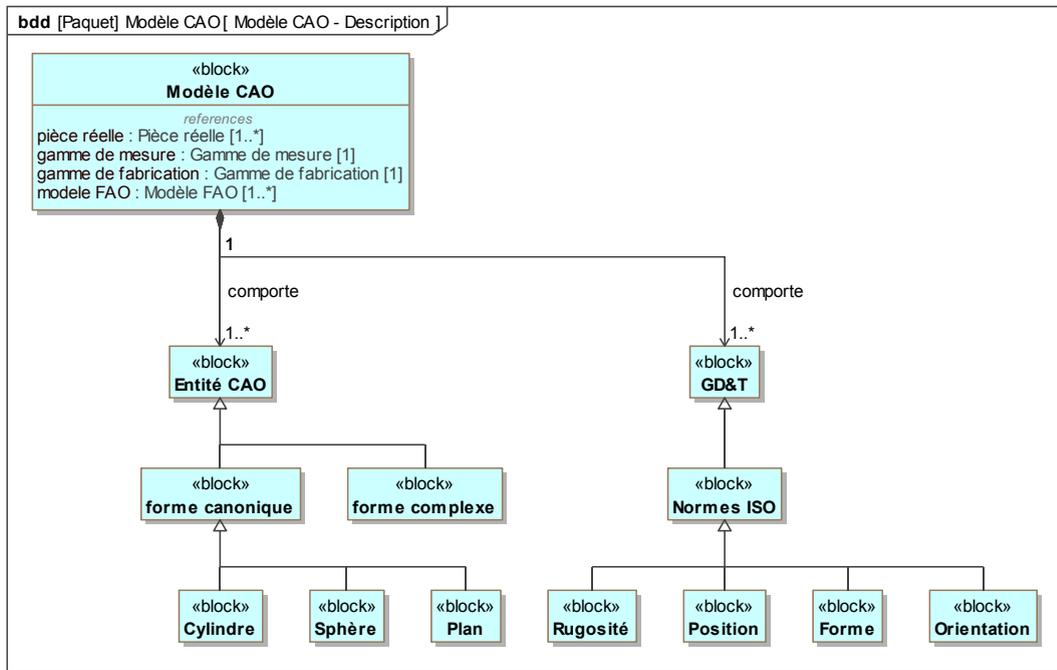


Figure 2.3 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le modèle CAO

Les 4 références apparaissant sous le bloc **modèle CAO** de la figure 2.3, représentent des références dynamiques issues du modèle d'échanges principal (figure 2.2).

b) *Modèle FAO*

Le **modèle FAO** est un ensemble de représentation des états de fabrication de la pièce (figure 2.4). Il se compose des **entités d'usinage** qui sont des ensembles de **géométries** et de **stratégie d'usinage**. Les **entités d'usinage** comportent aussi les différents **états intermédiaires de la matière** [Xú et al., 2016] : ces états correspondent aux géométries d'usinage simulées et peuvent être sous forme de maillage ou bien de voxel. Ce modèle se compose aussi d'un **référentiel de programmation**, des **modèles numériques des outils** et des **machines** utilisées ainsi que les **cotations de fabrications**.

c) *Machine-outil*

La **machine-outil** est le composant qui permet de réaliser l'usinage (figure 2.5). Elle est modélisée par son modèle numérique et comporte des **outils** ainsi que des **porte-pièces**. De la même manière, un **outil** est modélisé par son modèle numérique et lui est associé une **jauge**.

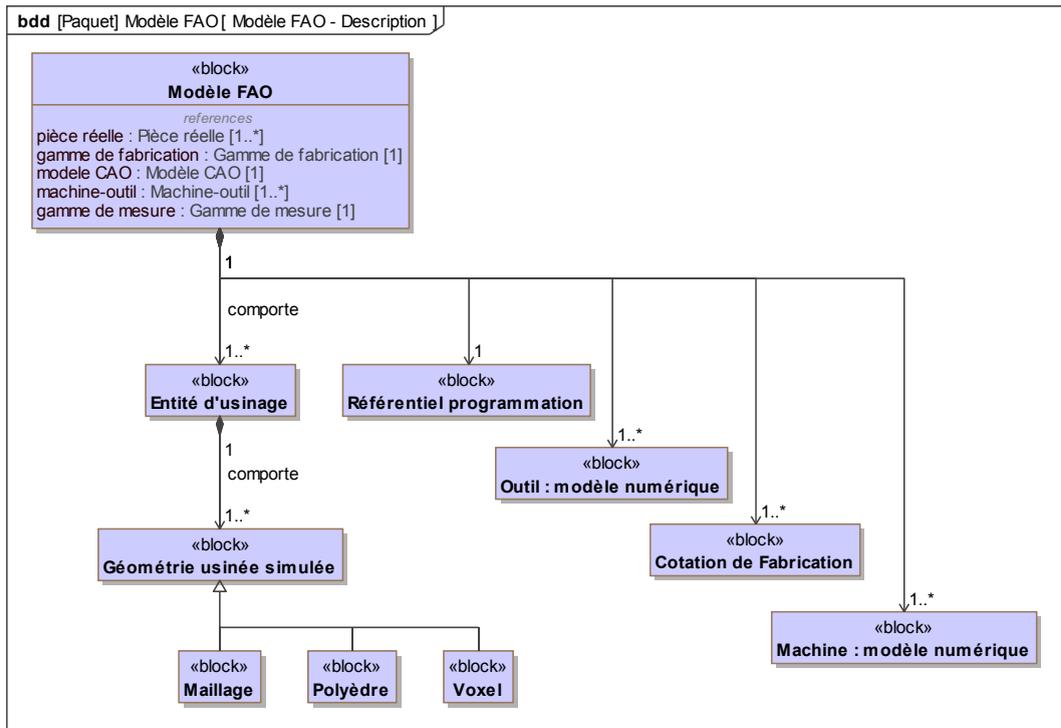


Figure 2.4 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le modèle FAO

d) *Machine de mesure*

Parallèlement à la machine-outil, la **machine de mesure** est le composant qui permet le contrôle des pièces (figure 2.6). Elle comporte les différents **capteurs** nécessaires à l'acquisition de la mesure. Le **capteur** est modélisé par son **modèle numérique** et une **calibration** et des **indicateurs** lui sont associés. Cette machine peut être soit une MMT, une machine dédiée ou encore un bras robotisé.

e) *Gamme de fabrication*

La **gamme de fabrication** représente l'ordonnancement complet de la réalisation d'un produit (figure 2.7). Elle comporte une ou plusieurs **phases de fabrication** utilisant chacune une **mise en position**. De la même manière, chacune des phases de fabrication comporte une ou plusieurs **opérations de fabrication**. Chaque opération réalisant une ou plusieurs **entités usinées** avec un même **outil**.

f) *Gamme de mesure*

La **gamme de mesure** représente l'ordonnancement complet de la mesure d'un produit (figure 2.8). Sa définition est similaire à celle de la gamme de fabrication. En effet, comme nous pouvons le constater par comparaison des figures 2.7 et 2.8, une structuration identique entre la gamme de fabrication et la gamme de mesure est proposée, l'unique différence étant l'utilisation d'un **capteur** contrairement à un outil lors d'une **opération de mesure**.

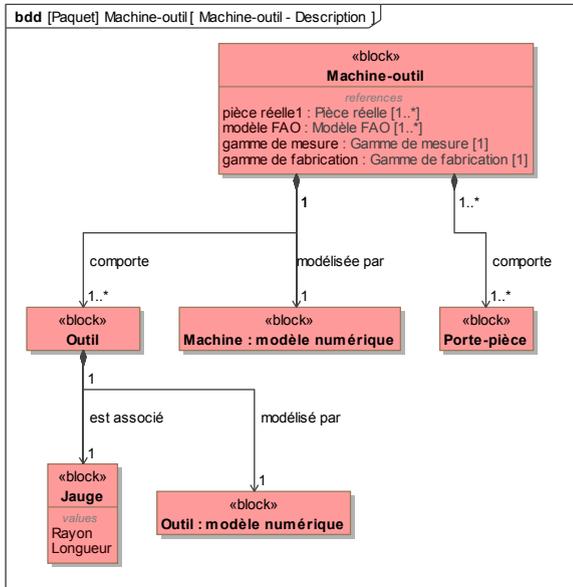


Figure 2.5 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le moyen de production

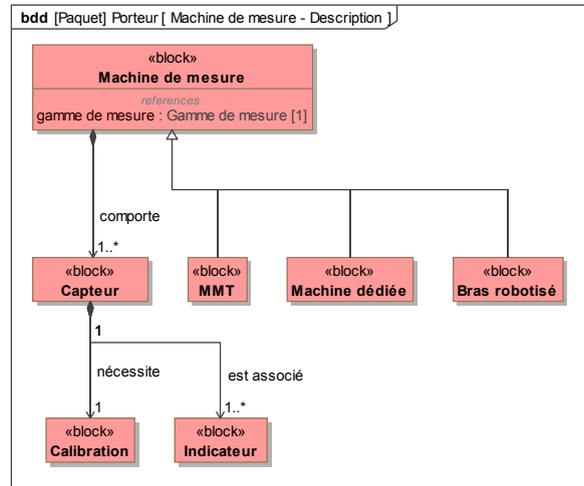


Figure 2.6 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant le moyen de mesure

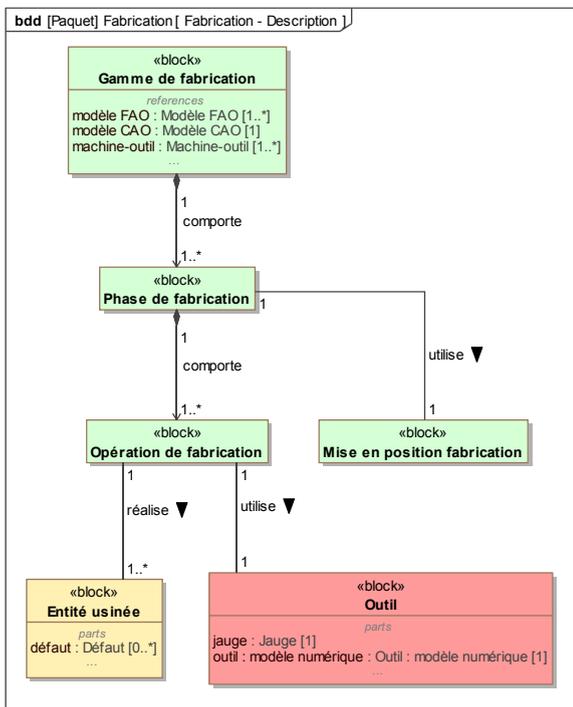


Figure 2.7 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant la gamme de fabrication

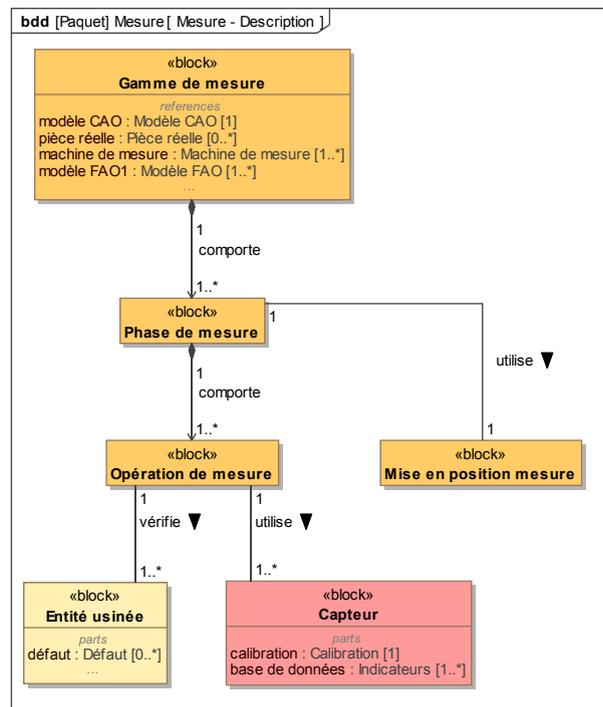


Figure 2.8 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant la gamme de mesure

g) *Pièce réelle*

Le composant **pièce réelle** représente le produit/la pièce réalisé par le système (figure 2.9). Elle comporte une à plusieurs **entités usinées** qui idéalement correspondent aux entités CAO du modèle CAO. Chaque **entité usinée** peut comporter des **défauts** ou écarts géométriques.

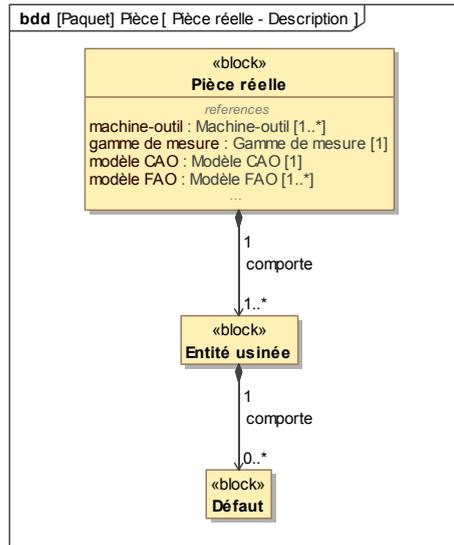


Figure 2.9 – Diagramme SysML de définition des blocs décrivant la pièce réelle

Les modèles proposés et décrivant le système *Post-process* permettent de mettre en avant la ressemblance des modèles entre la fabrication et la mesure. Les différentes équivalences entre la fabrication et la mesure constatées sont résumées dans le tableau 2.1.

Pour le cas du système *In-situ* (tableau 2.2), l'intégration de la mesure au moyen de production génère la réunion de certains composants équivalents : Gamme de fabrication et de mesure, et la machine de mesure qui devient ainsi la machine-outil.

Fabrication	Mesure
Gamme de fabrication	Gamme de mesure
Machine-outil	Machine de mesure
Outil	Capteur
Jauge	Calibration

Tableau 2.1 – Système *Post-process*

Fabrication/Mesure
Gamme de fabrication/mesure
Machine-outil
Outil + Capteur
Jauge + Calibration

Tableau 2.2 – Système *In-situ*

2.3 Gestion des données du système *In-situ*

Le cas de la mesure *In-situ* est décrit dans cette partie. Suite à la première modélisation du système *Post-process*, nous proposons une transposition de la modélisation au système *In-situ*. Le modèle d'échanges de données doit satisfaire les contraintes liées à la mesure *In-situ* en termes de temps de mesure et de traitement réduit et d'augmentation de l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure.

a) Modèle d'échanges principal

Le modèle d'échanges de données proposé pour le système *In-situ*, s'appuie sur les équivalences entre la fabrication et la mesure mises en avant dans le cas du système *Post-process* (tableau 2.1). L'intégration de la mesure à la fabrication nécessite ainsi l'association de la gamme de fabrication et de mesure ainsi que l'utilisation de la machine-outil comme machine de mesure (tableau 2.2).

De ce fait, le modèle d'échanges proposé pour le système *In-situ*, à travers le diagramme des blocs internes de la figure 2.10 est formé de 5 composants principaux : 2 composants issus de la réunion des gammes et des machines, et les 3 composants non modifiés (modèle CAO, modèle FAO et pièce réelle).

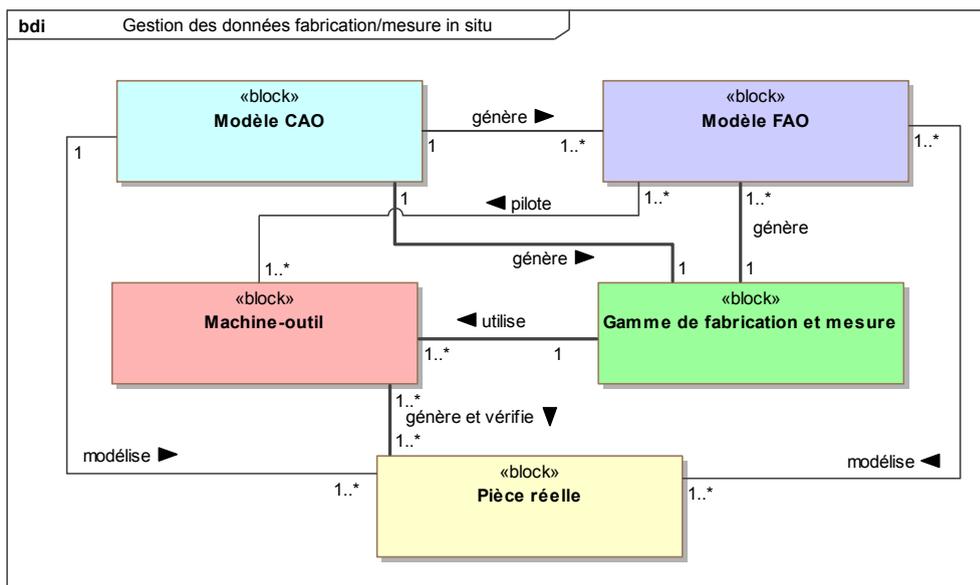


Figure 2.10 – Diagramme SysML de bloc interne dans le cas de la fabrication et mesure *In-situ*

Une comparaison entre le système *Post-process* de la figure 2.2 et le système *In-situ* de la figure 2.10 permet de mettre en avant les différences majeures et les avantages liés à la mesure *In-situ*.

L'intégration des capteurs dans la machine-outil et la réalisation de la gamme de mesure conjointement avec la gamme de fabrication permettent d'augmenter l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure. Cette augmentation est observée par comparaison des 2 systèmes : les boucles de flux de données sont plus courtes dans le cas de la mesure *In-situ*.

b) Description des nouveaux composants

L'intégration de la mesure dans le moyen de production mène à un système *In-situ* basé sur 5 composants principaux, dont 2 nouveaux composants issus de l'association de composants du système *Post-process*.

a) *Machine-outil*

Une nouvelle modélisation du composant **Machine-outil** est proposée à travers le diagramme de définition des blocs de la figure 2.11. Ce modèle correspond au modèle de la machine-outil dans le cas du système *In-situ*.

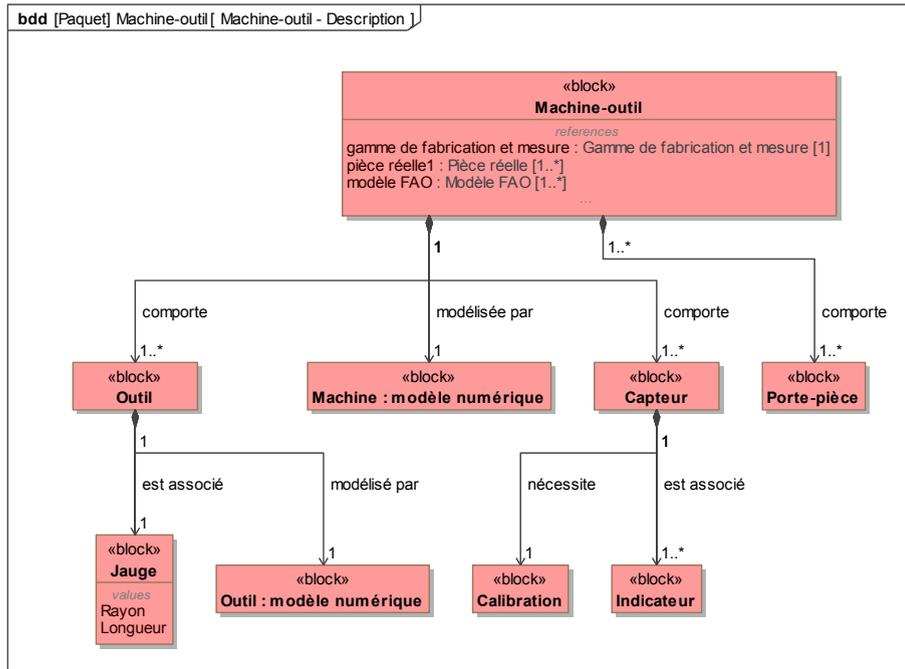


Figure 2.11 – Diagramme SysML de définition des blocs du composant "machine-outil" dans le cas de la mesure *In-situ*

Dans ce modèle, tous les sous-composants associés à la machine de mesure du système *Post-process* (figure 2.6) sont intégrés au modèle de la machine-outil de ce même modèle (figure 2.5). Ainsi les capteurs et leurs sous-composants de la machine de mesure sont intégrés dans la machine-outil (figure 2.11).

b) *Gamme de fabrication et mesure*

L'équivalence entre la gamme de fabrication et la gamme de mesure constatée pour le système *Post-process* permet de suggérer une **gamme de fabrication et mesure** globale dans laquelle se succèdent des phases de fabrication et des phases de mesure (figure 2.12).

Dans ce nouveau modèle de définition de la gamme de fabrication et mesure, les sous-composants sont identiques aux 2 gammes distinctes. Réalisant la mesure dans la machine-outil, la mise en position de la pièce, pour une phase mesure, est identique à celle de la phase de fabrication précédant cette phase de mesure.

Les 3 derniers composants principaux (modèle CAO, modèle FAO et pièce réelle) du modèle restent inchangés pour les systèmes *Post-process* et *In-situ*.

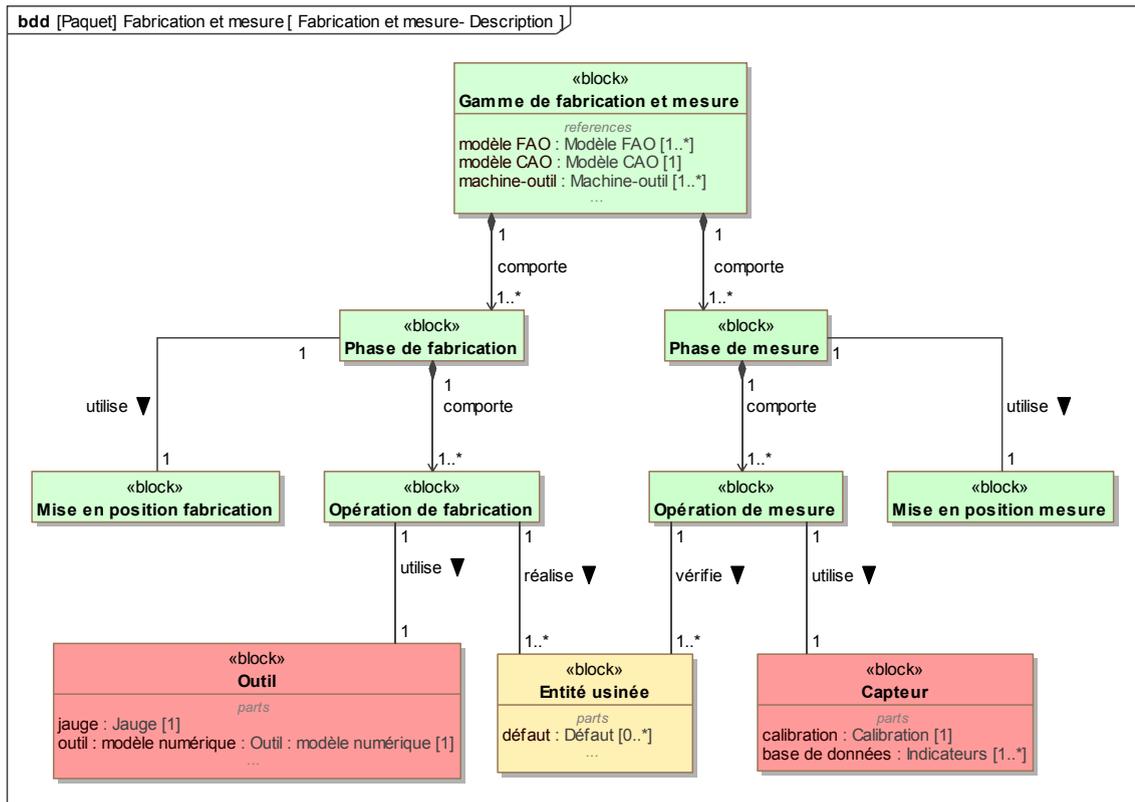


Figure 2.12 – Diagramme SysML de définition des blocs du composant "Gamme de fabrication et mesure"

2.4 Flux de données et activités du système *In-situ*

Les modèles proposés définissent les échanges possibles entre les différents composants principaux du système. Cependant, ils ne permettent pas de décrire l'ordonnancement des opérations de fabrication et de mesure *In-situ*. Le diagramme d'activités présenté dans cette partie modélise le fonctionnement réel du système *In-situ*.

Dans le cas du système *Post-process*, une opération de fabrication permet de passer d'une pièce dans son état i à la pièce dans son état $i + 1$. Généralement, une phase de mesure *Post-process* sur une machine dédiée est réalisée à la fin d'une phase de fabrication, soit donc après plusieurs opérations d'usinage dans la même mise en position de la pièce. De ce fait, les éventuels écarts géométriques sur la pièce sont évalués à la fin de la phase de fabrication.

Dans le cas du modèle d'activités proposé pour le système *In-situ* (figure 2.13), une phase de mesure de la pièce est réalisée après chacune des opérations d'usinage. Cette phase de mesure est ensuite poursuivie par d'éventuelles opérations de corrections. Ces enchaînements de phases et d'opérations permettent de passer de la pièce dans son état i à son état $i + 1$ (figure 2.13).

La mise en place d'un contrôle directement après chacune des opérations de fabrication permet de prendre en compte les éventuelles erreurs de fabrication et les corriger au plus tôt. Cependant, la mesure *In-situ* nécessite un temps d'acquisition et de traitement des données réduit afin d'immobiliser la production le moins possible. Il est important de proposer une

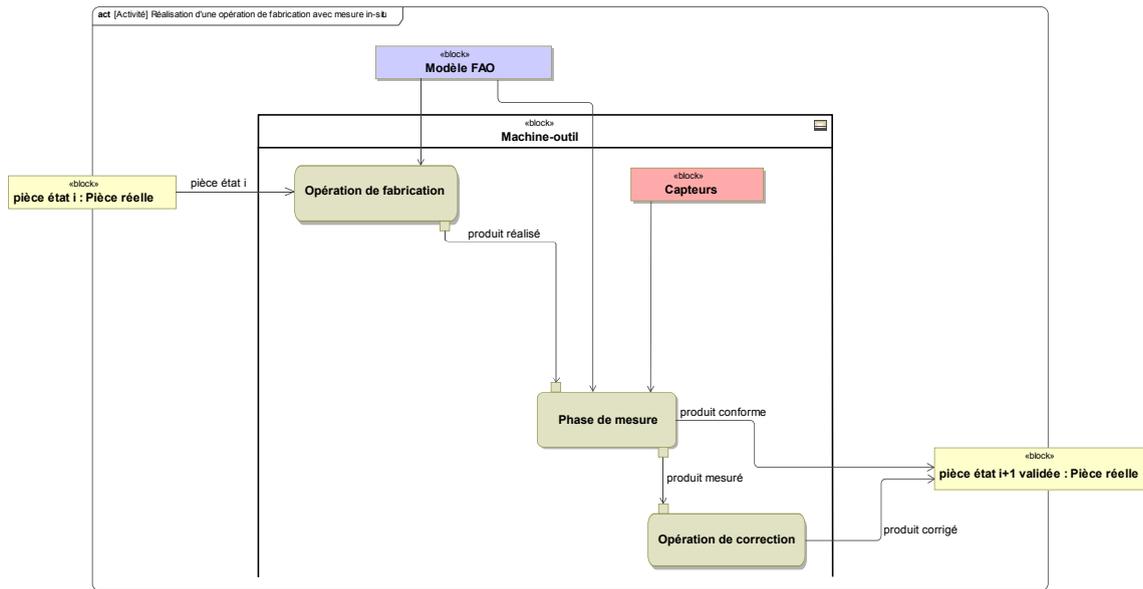


Figure 2.13 – Diagramme SysML d'activité dans le cas de la fabrication et mesure *in situ*

phase de mesure adaptée à l'opération de fabrication et répondant aux contraintes liés à la mesure *In-situ*. Celle-ci repose notamment sur le choix du capteur permettant de réaliser la mesure.

2.5 Synthèse

Dans cette partie, des modèles de gestion des données dans le cas de la fabrication et de la mesure *Post-process*, puis de la mesure *In-situ* sont proposés. Ces modèles mettent en avant la nécessité de l'interopérabilité dans le cas de la mesure *In-situ*. Un diagramme d'activité permet de décrire l'enchaînement des opérations dans le cas de la mesure *In-situ* et de montrer les attentes de la phase de mesure *In-situ*.

Afin de soumettre une phase de mesure adaptée, il est nécessaire d'évaluer les capteurs que l'on peut intégrer dans la machine-outil. Une première étude d'analyse de capacité des moyens de mesure vis-à-vis des écarts géométriques à mesurer est présentée dans la partie suivante. L'objectif est de déterminer le ou les systèmes de mesure les plus adaptés aux écarts géométriques à mesurer tout en minimisant les temps de mesure et de traitement. Ainsi, nous présentons une étude d'association de systèmes de mesure à des écarts géométriques de fabrication. Cette étude fait l'objet de la partie suivante et permet de proposer une phase de mesure répondant aux contraintes de la mesure *In-situ*.

3 Étude d'association des écarts géométriques aux capteurs [Dubreuil et al., 2014]

L'objectif de cette partie est de présenter une première étude afin de donner une indication quant au choix d'un capteur vis-à-vis d'écarts géométriques/défauts à mesurer sur la pièce.

Pour cela, une étude de faisabilité a été menée dans un contexte *Post-process* afin de

proposer une classification des systèmes de mesure en fonction du temps d'acquisition et de la taille des écarts géométriques qu'ils sont aptes à mesurer.

Pour réaliser l'étude d'association capteurs/défauts, une pièce, comprenant les écarts géométriques couramment rencontrés en usinage (chapitre 1), a été fabriquée. Cette pièce est ensuite mesurée avec les différents capteurs et les résultats de mesure sont finalement comparés.

3.1 Réalisation de la pièce test

La géométrie de la pièce test est conçue de manière à comprendre les principaux écarts géométriques liés à la fabrication par usinage : hauteurs de crêtes, décalages et défauts de forme.

La figure 2.14 présente le modèle CAO (a) ainsi qu'une représentation des différents écarts géométriques devant être présents sur la pièce usinée (b). Cette pièce comprend principalement 3 portions cylindriques sur lesquelles apparaîtront les différents défauts. Des plans sont aussi réalisés sur la pièce afin de mettre en place un repère de référence pour la mesure.

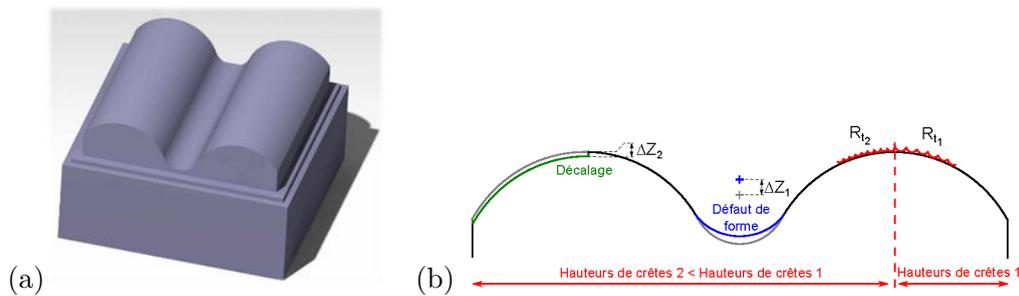


Figure 2.14 – Modèles numériques de la pièce test : (a) modèle CAO, (b) description géométrique des différents défauts sur la pièce test (plan de vue orthogonal à la direction de balayage)

La pièce test a été réalisée sur un centre d'usinage 3 axes à grande vitesse, avec une stratégie d'usinage de type zigzag suivant des plans parallèles. La trajectoire de l'outil durant l'usinage est colinéaire aux axes des cylindres.

L'outil utilisé pour cet usinage est une fraise hémisphérique de rayon 5mm. La connaissance de la géométrie de cet outil permet de contrôler les hauteurs de crêtes sur la pièce test en faisant varier la distance entre les différentes passes. Deux dimensions de hauteurs de crêtes sont proposées afin de définir deux niveaux de défauts différents.

Sur la figure 2.14(b), les différents défauts mentionnés précédemment sont représentés sur une coupe orthogonale à la direction de balayage de la pièce test. En rouge, sur la figure 2.14(b) sont représentées les deux topographies de hauteurs de crêtes (R_{t_1} et R_{t_2}).

La géométrie usinée simulée du modèle FAO de la pièce est quant à elle représentée à la figure 2.15. Les déviations correspondants aux écarts géométriques souhaités sont observées à la suite de la simulation d'usinage. Par exemple, les hauteurs de crêtes sont facilement observables par l'alternance des lignes bleues et vertes sur la figure 2.15.

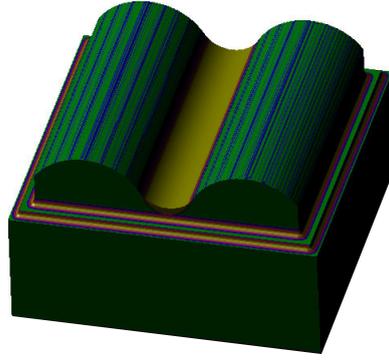


Figure 2.15 – Représentation de la géométrie usinée simulée du modèle FAO de la pièce test

Un défaut de forme de type overcut a été réalisé : zone jaune sur la figure 2.15(b), défaut bleu ΔZ_1 sur la figure 2.14 (b). En choisissant un outil hémisphérique de rayon 5mm, supérieur au rayon de la portion cylindrique centrale, le défaut de type overcut sera volontairement réalisé. ΔZ_1 est évalué à partir de la différence entre la position attendue de l'outil et la position réalisée, au niveau du centre de la sphère de l'outil.

Le dernier écart géométrique mis en avant est un défaut de décalage, il a été réalisé par la mise en place d'un offset de 0.1mm ΔZ_2 suivant la direction de l'outil (axe Z) durant l'usinage. Une modification de la valeur de la jauge outil permet de réaliser cet offset ΔZ_2 Il est représenté en vert sur la figure 2.14 (b).

Le tableau 2.3 récapitule l'ensemble des écarts géométriques générés sur la pièce test par usinage ainsi que leurs valeurs nominales.

Défauts d'usinage	Nomination	Unité	Valeur nominale
Overcut	ΔZ_1	mm	2
Décalage	ΔZ_2	mm	0.1
Hauteur de crête	R_{t1}	μm	12
Hauteur de crête	R_{t2}	μm	5

Tableau 2.3 – Valeurs nominales des écarts géométriques générés par usinage

Après l'usinage de la pièce test, les principaux écarts géométriques sont connus. La pièce test ainsi usinée est représentée sur la photographie de la figure 2.16.

L'étude de faisabilité des différents capteurs vis-à-vis de la possibilité de mesurer les différents écarts géométriques est proposée dans la suite de cette partie.

3.2 Mesure de la pièce test

Dans cette partie, les différentes mesures, les traitements des données ainsi que les résultats de comparaison des mesures sont proposés.

Dans un premier temps et afin de définir une mesure de référence, l'ensemble des écarts géométriques ont été mesurés avec le palpeur mécanique sur une MMT et avec le capteur Stil sur une machine dédiée à ce capteur. Ces 2 capteurs sont utilisés pour la mesure de référence, car leurs indicateurs de performance (justesse et bruit de mesure) sont les plus faibles vis-à-

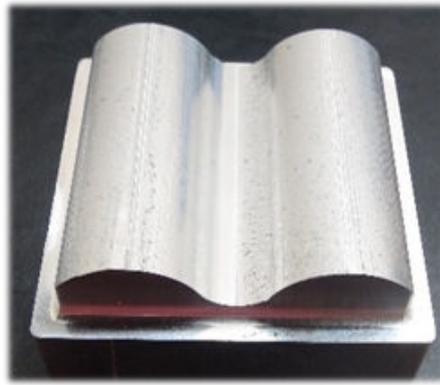


Figure 2.16 – Photographie de la pièce test usinée comprenant les différents écarts géométriques d'usinage

vis des autres capteurs utilisés. Ainsi les écarts géométriques de défauts de forme ΔZ_1 et de décalage ΔZ_2 sont mesurés avec le palpeur mécanique. Les hauteurs de crêtes ne pouvant être mesurées avec le palpeur mécanique, car elles correspondent à des écarts de micro-échelles, le capteur Stil est utilisé comme mesure de référence pour ces écarts géométriques (R_{t_1} et R_{t_2}). Le décalage ΔZ_2 , mesuré avec le palpeur, est aussi mesuré avec le capteur Stil, les 2 valeurs peuvent être ainsi comparées.

Dans un second paragraphe, les différents écarts géométriques sont mesurés avec le capteur laser plan Kréon et le système de mesure par stéréo-corrélation d'images. Une étude comparative entre ces différents résultats de mesure est menée.

c) Mesures de référence de la pièce test

Comme présenté précédemment, le palpeur mécanique permet de mesurer avec une densité de points faible des surfaces canoniques (plan, sphère, cylindre, cône, etc.). Les différentes portions cylindriques de la pièce ont été mesurées ainsi que les 3 plans de référence (YZ), (XZ) et (XY) permettant la réalisation d'un repère de référence (repère de dégauchissage). La figure 2.17 permet de visualiser les entités géométriques mesurées avec le palpeur mécanique sur une MMT.

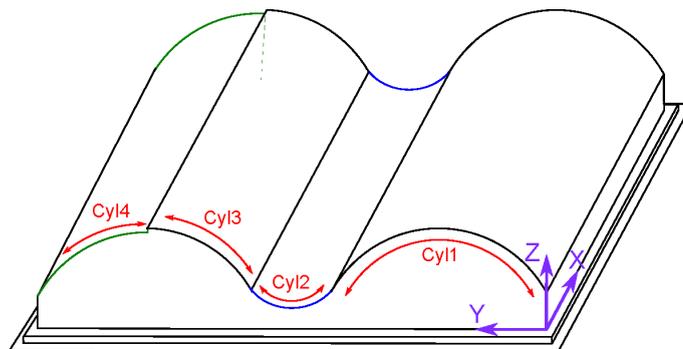


Figure 2.17 – Entités mesurées avec le capteur mécanique et construction du repère de dégauchissage X, Y, Z

Le système de référence (repère de dégauchissage X, Y, Z sur la figure 2.17) permet d'analyser directement les coordonnées suivant Z et ainsi de déterminer les valeurs de ΔZ_1 et ΔZ_2 à identifier.



Figure 2.18 – Post-traitement de la mesure sur Catia V5 ©

Les points acquis suite au palpage de ces différentes surfaces ont été post-traités de manière à obtenir les valeurs des ΔZ_1 et ΔZ_2 . L'environnement de travail "Quick Surface Reconstruction" du logiciel Catia V5©est utilisé. La figure 2.18 décrit le post-traitement appliqué au nuage de points obtenu par palpage pour la détermination des ΔZ_1 et ΔZ_2 . Un premier plan est associé aux points palpés du plan réel par le critère des moindres carrés. Ce plan (figure 2.18(b)) est le plan de référence Z. En utilisant le même outil de post-traitement, les 4 cylindres correspondant aux 4 portions cylindriques, Cyl1, Cyl2, Cyl3 et Cyl4 (figure 2.14(b)), sont construits. La figure 2.18(c) représente les constructions des 4 cylindres. Il est choisi de contraindre les constructions des cylindres en imposant la direction du cylindre et son diamètre. Les axes des cylindres devront être parallèles au plan de référence et leurs diamètres doivent correspondre aux diamètres nominaux définis par le modèle FAO. De ce fait, il est possible de déterminer les valeurs des ΔZ_1 et ΔZ_2 par combinaisons linéaires des positions théoriques et mesurées des axes des cylindres.

$$\Delta Z_1 = Z_{axeCyl2th} - Z_{axeCyl2mes} \quad (2.1)$$

$$\Delta Z_2 = Z_{axeCyl3mes} - Z_{axeCyl4mes} \quad (2.2)$$

Les résultats de ces mesures préliminaires au palpeur mécanique sont donnés dans la partie suivante (étude de faisabilité, tableau 2.4).

Le palpeur mécanique ne peut être utilisé pour la mesure des hauteurs de crêtes (défauts d'échelles microscopiques), car il n'est pas possible de mesurer des zones plus petites que le diamètre de la bille de capteur. Le capteur Stil, adapté pour la mesure de la micro-géométrie de surface, est utilisé pour mesurer la mesure de référence des hauteurs de crêtes R_{t1} et R_{t2} . Ayant une plage de mesure de $300\mu m$ sur le capteur Stil, le défaut de décalage a aussi pu être identifié avec ce système. Néanmoins, le défaut de forme de type overcut ne peut être quantifié avec ce système, car ce défaut est plus grand que la plage de mesure du capteur.

La figure 2.19 met en avant des résultats de mesure au capteur Stil. Des profils de surface sont obtenus, le premier (a) représente le défaut de décalage ΔZ_2 , le second (b) représente le résultat de mesure des hauteurs de crêtes R_{t1} .

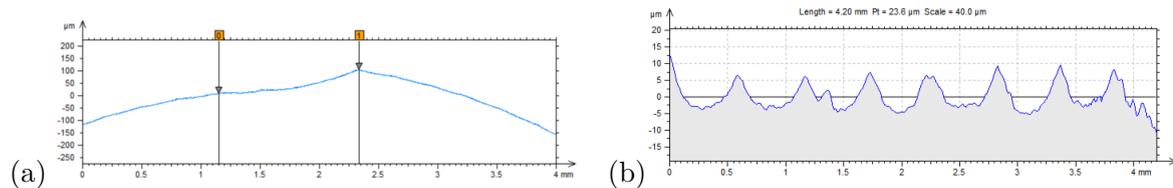


Figure 2.19 – Résultats de mesure du capteur Stil analysés sur Moutains Map © : (a) décalage ΔZ_2 , (b) hauteurs de crête R_{t1}

Les résultats bruts obtenus suite à la mesure au capteur confocal chromatique Stil (figure 2.19) ont été analysés grâce au logiciel associé Moutains Map©. Les valeurs retenues par ces analyses sont répertoriées dans le tableau 2.4.

d) *Étude comparative, mesure au laser plan Kréon et système de stéréo-corrélation*

Dans ce paragraphe, les résultats des mesures avec le système laser plan Kréon et le système stéréoscopique (3D-DIC) [Dubreuil et al., 2016] sont comparés aux résultats des mesures préliminaires. Les traitements des données acquises pour la détermination des ΔZ_1 et ΔZ_2) ont été réalisées de la même manière que lors du traitement des données dans le cas de la mesure avec le palpeur (figure 2.18).

En ce qui concerne la mesure avec le laser plan Kréon, il a été choisi d'utiliser une unique orientation du capteur pour l'ensemble de la mesure, afin d'éviter des chevauchements des nuages de points et ainsi minimiser le bruit de mesure. La figure 2.20 présente une cartographie des écarts entre les points acquis avec le laser plan Kréon et le modèle CAO de la pièce test. Cette cartographie a été obtenue à partir d'un recalage par un algorithme ICP (Iterative Closest Point) [Besl and McKay, 1992] du nuage de points acquis sur le modèle CAO nominal de la pièce test.

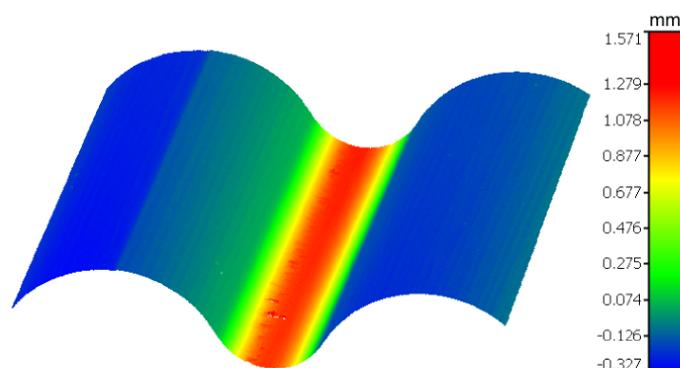


Figure 2.20 – Cartographie des écarts entre les points acquis au Kréon et le modèle CAO de la pièce test

Sur cette cartographie (figure 2.20) le défaut de forme de type overcut ΔZ_1 ainsi que le décalage ΔZ_2 sont immédiatement identifiés. Inversement, les défauts de hauteurs de crêtes ne sont pas observés. Les résultats des écarts ΔZ_1 et ΔZ_2 sont donnés et comparés dans la partie

suivante (tableau 2.4).

La dernière méthode de mesure mise en œuvre sur cette pièce est une mesure par stéréocorrélation [Dubreuil et al., 2014]. Cette méthode se base sur la mesure par stéréocorrélation globale développée par Beaubier et al. [Beaubier et al., 2013] et est adaptée à la mesure de pièce obtenue par enlèvement de matière. En effet, la méthode globale sur NURBS [Beaubier et al., 2013] permet de quantifier des écarts de forme 3D pour des surfaces de géométrie continue en tangence. Dans le cas de surfaces obtenues par enlèvement de matière, nous avons vu dans ce chapitre qu'il existe un ensemble de défauts discontinus en tangence pouvant apparaître sur la surface à cause de la géométrie de l'outil ou encore des trajectoires d'usinage. De ce fait, nous proposons une méthode de corrélation globale utilisant non pas un modèle de surface NURBS, mais un modèle discontinu en tangence : un maillage. Les déplacements des nœuds du maillage 3D modélisant la surface sont réalisés par minimisation globale du score de corrélation sur l'ensemble de la surface.

Afin de réaliser la mesure par stéréocorrélation (3D-DIC) présentée dans le chapitre 1, un mouchetis noir et blanc a été peint sur la pièce (figure 2.21(a)). Suite à la calibration du système stéréoscopique via l'utilisation du modèle CAO maillé de la pièce, une cartographie des résidus de stéréocorrélation peut être tracée. La figure 2.21(b) présente la cartographie des résidus de stéréocorrélation après calibration et avant optimisation (déplacements des nœuds du maillage).

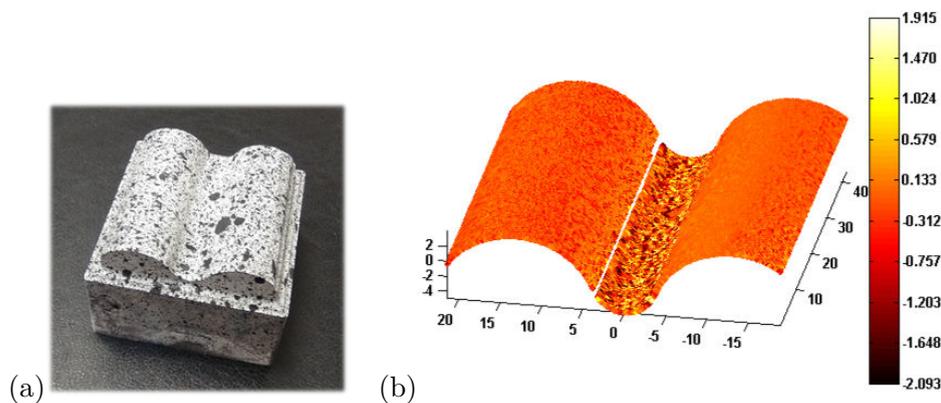


Figure 2.21 – (a) Pièce test avec un mouchetis noir et blanc, (b) Cartographie des résidus de corrélation après calibration du système stéréoscopique

Le mouchetis a été réalisé avec des bombes de peinture, la taille des gouttes a été conseillée par un expert. Il n'est donc pas optimisé, mais les résultats de mesure mettent en avant des zones dont les résidus de corrélation sont éloignés de zéro et avec de grandes variations, par exemple la zone centrale sur la figure 2.21. Ces zones, pour lesquelles la corrélation entre les projections du maillage sur les 2 images n'est pas bonne, représentent les lieux des écarts géométriques sur la pièce. Ici, la zone correspond au lieu du défaut de forme de type overcut.

Cependant, les autres types de défauts présents sur la pièce ne sont pas observés (décalage et hauteurs de crêtes). Une étude plus approfondie sur la taille du mouchetis, mais aussi sur la

taille du maillage utilisé pour la mesure par stéréo-corrélation permettrait peut-être de réaliser la localisation des défauts de plus faible échelle.

Concernant la mesure de la pièce test avec le système stéréoscopique, seul le défaut de forme de type overcut est donc observé. L'objectif est de reconstruire la forme 3D de la pièce réelle par déplacements des nœuds du maillage nominal et par minimisation des résidus de stéréo-corrélation. Cette méthode de reconstruction a donc été appliquée sur la partie centrale de la pièce test. La figure 2.22 représente les deux cartographies obtenues pour cette zone : avant optimisation par le déplacement des nœuds du maillage (gauche) et après optimisation par le déplacement des nœuds (droite). Une diminution du résidu de stéréo-corrélation est observée entre les deux cartographies, ce qui conduit à la surface 3D et à l'évaluation du défaut de type overcut ΔZ_1 .

Le post-traitement présenté précédemment (figure 2.18) est utilisé pour obtenir cette valeur.

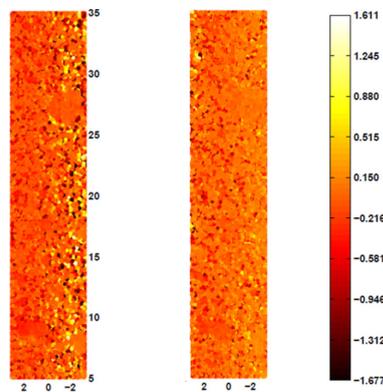


Figure 2.22 – Cartographie des résidus de stéréo-corrélation avant et après optimisation pour la zone représentant l'overcut

3.3 Étude de faisabilité

Le tableau 2.4 présente les résultats de mesure post-traitée obtenus avec les 4 moyens de mesure.

Défauts d'usinage	Nominal	TP2	TP2 erreur %	Stil	Stil erreur %	Kréon	Kréon erreur %	3D-DIC	3D-DIC erreur %
Overcut ΔZ_1 (mm)	2	2.077	3.85			2.059	2.95	1.934	3.3
Décalage ΔZ_2 (mm)	0.1	0.111	11	0.097	3	0.118	18		
Hauteur de crête R_{t1} (μm)	12			11.9	0.83				
Hauteur de crête R_{t2} (μm)	5			5.32	6.4				

Tableau 2.4 – Résultats des différentes mesures

Ce tableau met en avant les différentes possibilités d'association du moyen de mesure à

un type d'écarts géométriques. Les cases comprenant des croix sont les couples incompatibles. Par exemple, seul le capteur Stil est capable de mesurer les micro-défauts de type hauteurs de crêtes.

Le système Kréon est comparable au palpeur mécanique en terme d'échelle de défauts (macro-défauts), avec des valeurs de défauts comparables. Un choix quant à l'utilisation du laser plan Kréon plutôt que du palpeur mécanique, ou inversement, doit être proposé. Par exemple et compte tenu des temps d'acquisition, ce choix peut s'appuyer sur la géométrie de la surface à mesurer : pour une surface complexe, le laser plan sera privilégié, pour des surfaces de formes canoniques ne nécessitant pas beaucoup de points pour réaliser une reconstruction, le palpeur mécanique pourra être utilisé.

Le système de mesure par stéréo-corrélation conduit à un résultat uniquement pour le défaut de forme de type overcut ΔZ_1 . Cependant, la valeur de ce défaut reste éloignée de celle obtenue par la mesure de référence (TP2). Cette étude montre néanmoins que le système de mesure par vision stéréoscopique est efficace dans le cas de la localisation de macro-défauts. Il conduit rapidement une cartographie de macro-écarts. Dans le cas de la localisation de micro-défauts, l'adaptation des tailles du mouchetis et du maillage permettrait à ce système d'être tout aussi efficace.

3.4 Synthèse et activité de pré-mesure par vision

Cette première étude d'association des moyens de mesure aux écarts géométriques rencontrés en usinage a permis de mettre en avant plusieurs conclusions.

Dans un premier temps une étude de faisabilité sur les différents moyens de mesure quant à la capacité de mesurer des défauts est proposée. Cette étude conduit à une "idée" de classification des moyens de mesure en fonction des échelles et géométries d'écarts à mesurer et des temps d'acquisition. Le capteur confocal chromatique Stil sera utilisé pour toute mesure de topographie, des écarts de micro-échelles. Pour des macro-défauts, les systèmes laser plan Kréon et palpeur mécanique sont comparables. Néanmoins, de par sa rapidité d'acquisition, le capteur Kréon sera choisi en priorité pour la mesure des macro-défauts. Le palpeur mécanique pourra cependant être utilisé dans les cas où le système Kréon ne peut être utilisé, par exemple pour des problèmes de visibilité : cas de zone concave de forte profondeur, donc trous dans l'objet. Dans le cas de surface de formes canoniques, le palpeur mécanique pourra aussi être privilégié au système laser plan, car ces surfaces ne nécessitent pas beaucoup de points d'acquisition pour obtenir des résultats de mesure pour des défauts liés à une mauvaise position et/ou orientation.

En ce qui concerne la mesure par stéréo-corrélation, il est possible de mesurer des écarts de macro-géométriques. Cependant, cette étude a permis de mettre en avant l'efficacité de ce moyen de mesure pour la localisation de macro-défauts. En effet, il est très rapide d'obtenir une cartographie indiquant les zones géographiques des écarts géométriques sur l'objet. Par un ajustement des paramètres tailles du mouchetis, de maillage et du pixel, il serait sans doute possible d'obtenir une cartographie de localisation de défauts de plus petite échelle.

Ainsi, utiliser la stéréo-corrélation comme outil de localisation d'écarts géométriques, plutôt que pour la mesure permet de proposer une première localisation rapide des potentiels écarts géométriques. Cette première mesure peut s'intégrer dans la modélisation de la chaîne de fabrication et mesure *In-situ* et permet de répondre à la contrainte du temps de mesure réduit. En effet, une activité de pré-mesure par vision placée après l'opération d'usinage et avant la phase de mesure (figure 2.13) permet de localiser les éventuels écarts géométriques sur la pièce et ainsi déclencher une phase de mesure directement sur les zones comprenant d'éventuels défauts.

Ainsi une nouvelle activité de pré-mesure par vision est rajoutée au modèle défini précédemment. La figure 2.23 met en avant le modèle de la chaîne d'actions proposé sous forme de diagramme d'activité.

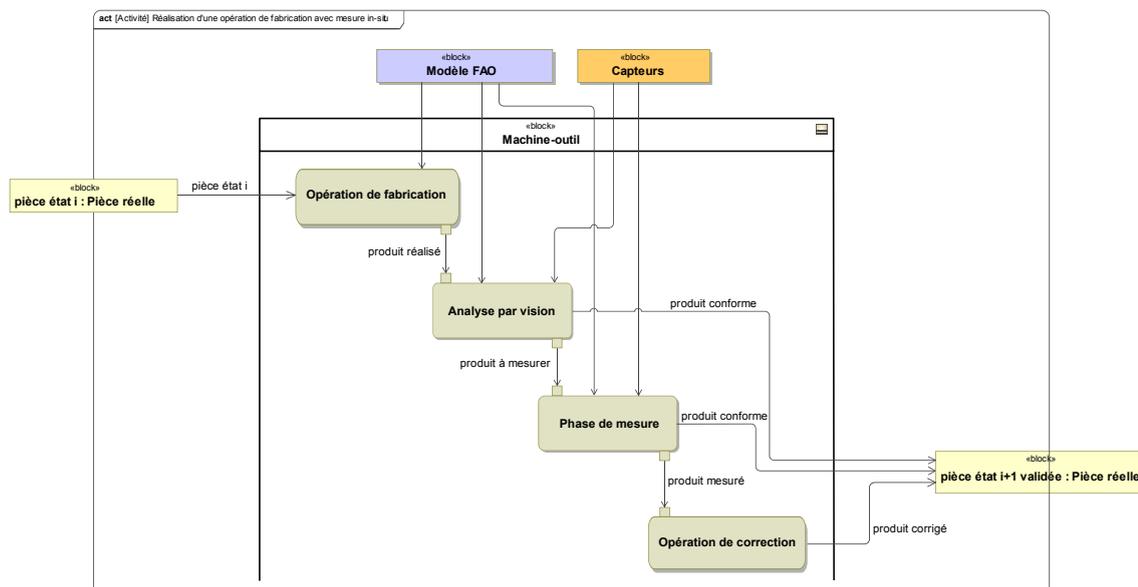


Figure 2.23 – Diagramme SysML d'activité dans le cas de la fabrication et mesure *In-situ*

Une nouvelle activité de **pré-mesure par vision** située après l'opération d'usinage et avant la phase de mesure sera utilisée comme outil d'aide à la décision. Cet outil permettra de conclure rapidement quant à la nécessité de réaliser une phase de mesure ou plutôt la possibilité de passer directement à une nouvelle opération d'usinage. Si une mesure est nécessaire (localisation de défauts par le système stéréoscopique), la phase de mesure sera déclenchée et réalisée, puis d'éventuelles opérations de corrections pourront être effectuées afin d'obtenir la pièce dans son état $i+1$. Sinon, l'opération d'usinage suivante pourra être lancée (pièce alors dans son état $i+1$).

Cette nouvelle activité répond à la contrainte principale de la mesure *In-situ* : un temps alloué pour la phase de mesure et les traitements de données le plus restreint possible et une interopérabilité entre les données de fabrication et de mesure la plus grande possible.

En effet, la pré-mesure via le système stéréoscopique est quasi-instantanée (one-shot et

temps d'analyse rapides). De plus si l'activité de pré-mesure ne localise pas d'écarts géométriques, la phase de mesure ainsi que les opérations de corrections seront évitées, l'opération d'usinage suivante peut être réalisée.

Dans ce cas, le temps de mesure aura considérablement été diminué, car les phases de mesure et de corrections auront complètement été supprimées. Inversement si l'objet présente des défauts, une phase de mesure adaptée aux résultats de localisation sera enclenchée. Les choix des moyens de mesure utilisés en fonctions des zones de défauts localisés, et la mesure réduite de l'objet (uniquement aux lieux des défauts) permettra de réduire le temps de la phase de mesure.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons des modèles de circulation des données dans différents cas de positionnement de la mesure vis-à-vis de la fabrication : *Post-process* ou *In-situ*. À partir de ces différents modèles, nous avons constaté la nécessité de travailler avec une forte interopérabilité entre les différentes données de fabrication et de mesure. De plus, une première proposition d'enchaînement des différentes tâches dans le cas de la mesure *In-situ* est proposée (figure 2.13).

Cet enchaînement met en avant la nécessité de proposer une phase de mesure répondant aux deux contraintes associées à la mesure *In-situ*. De ce fait, nous avons proposé dans la seconde partie de ce chapitre une étude portant sur les systèmes de mesure et sur les défauts rencontrés en usinage. Dans cette étude, nous nous intéressons à l'association de système de mesure à différentes géométries d'écarts géométriques provenant de l'usinage. Nous avons ainsi défini une hiérarchisation des systèmes de mesure vis-à-vis de leur capacité à mesurer des familles de défauts (échelles) ainsi que vis-à-vis des temps de mesure. Le système Stil pourra être utilisé pour la mesure de la micro-topologie de surface, le système Kréon et le palpeur mécanique à contact seront utilisés pour des écarts d'échelle macroscopique, finalement le système de mesure par vision sera utilisé non pas pour la quantification, mais pour la localisation de macro-défauts. En effet, la mesure par vision permet d'obtenir rapidement une cartographie des lieux des écarts géométriques sur l'objet d'étude. À l'inverse, il est plus contraignant de quantifier les écarts par vision, car de nombreuses contraintes techniques comme la taille du mouchetis ou encore la taille du maillage doivent être prises en compte pour obtenir un résultat pertinent.

Grâce à cette étude, nous avons remarqué le fort intérêt de la mesure par vision dans le cas de la mesure *In-situ*. La localisation des écarts géométriques est obtenue quasi instantanément suite à la prise de vue et est donc très utile pour limiter la phase de mesure. Ainsi une activité de pré-mesure par vision est modélisée dans la dernière partie de ce chapitre. Cette activité est réalisée après l'usinage et avant la phase de mesure (figure 2.23). Cette nouvelle activité est un outil d'aide à la décision, qui permettra de réduire considérablement le temps alloué à la phase de mesure. Si la pré-mesure par vision localise des écarts géométriques sur la pièce, une phase de mesure adaptée permettra de les mesurer.

Cette nouvelle activité d'aide à la décision par une pré-mesure par vision fait l'objet du chapitre suivant. Dans celui, nous détaillerons précisément cet outil d'aide à la décision ainsi que les solutions proposées et apportées à celui-ci pour répondre aux contraintes de la mesure *In-situ*.

Chapitre 3

Pré-mesure par vision : Calibration et Analyse par stéréo corrélation

Sommaire

1	Définition d'un outil de pré-mesure	57
2	Calibration sur modèle CAO [Dubreuil et al., 2015]	58
2.1	Modèle de caméra et principales méthodes de calibration	59
a)	Modèle stéréoscopique	59
b)	Méthodes de calibration les plus courantes	62
2.2	Principe général de la calibration sur modèle CAO	65
2.3	Écriture du problème	67
2.4	Faisabilité de la méthode	69
a)	Solution initiale et projection	69
b)	Extraction d'éléments 2D	70
c)	Appariement et résultats de l'étude de faisabilité	71
2.5	Application <i>In-situ</i> et analyse de sensibilité	73
a)	Moyen de production et intégration des caméras	73
b)	Description du cas d'étude	74
c)	Résultats de la calibration <i>In-situ</i>	75
d)	Étude de sensibilité de la calibration sur modèle CAO	77
e)	Bruits de calibration	80
2.6	Synthèse sur la calibration sur modèle CAO	81
3	Mesure par stéréo corrélation sur facette - GéoDIC-3D [Quinsat et al., 2016]	81
3.1	Évaluation du score de corrélation par facette	83
a)	Calcul des scores de corrélation sur facette	83
b)	Analyse des scores de corrélation	85
3.2	Stéréo-corrélation par torseur des petits déplacements (SDT)	90
3.3	Recherche d'une solution initiale	93
a)	Recherche d'une heuristique par facette	93

b)	Résultats obtenus par la recherche d'heuristiques	94
c)	Traitement des facettes isolées	96
3.4	Analyse du déplacement des facettes	97
4	Conclusions	99

1 Définition d'un outil de pré-mesure

La modélisation développée dans le chapitre précédent a mis en avant la nécessité d'une étape de pré-mesure par vision (figure 3.1) située entre l'opération de fabrication et la phase de mesure. Cette étape permet d'éviter la phase de mesure et les potentielles actions de correction dans le cas d'un produit conforme : le temps de mesure est donc réduit.

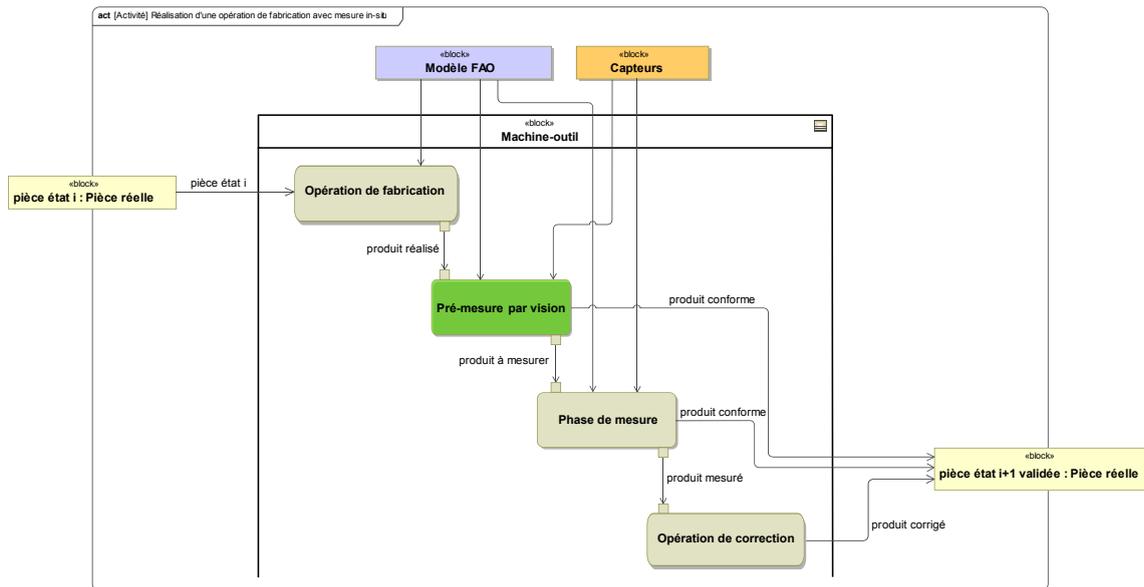


Figure 3.1 – Diagramme d'activité avec l'étape de pré-mesure par vision

Néanmoins, cette étape doit répondre aux deux contraintes liées à la mesure *In-situ* : temps de mesure et de traitement des données réduits, forte interopérabilité entre la fabrication et la mesure. L'outil de pré-mesure proposé doit donc permettre de localiser les zones d'écarts géométriques afin de déclencher une phase de mesure adaptée uniquement si nécessaire, tout en assurant l'interopérabilité entre les données de fabrication et de mesure. La description complète de cette nouvelle étape de pré-mesure par vision fait l'objet de ce chapitre.

L'outil de pré-mesure par vision proposé se base sur une analyse par stéréo-corrélation d'images (figure 3.2), il permet de détecter rapidement d'éventuelles zones comprenant des écarts géométriques.

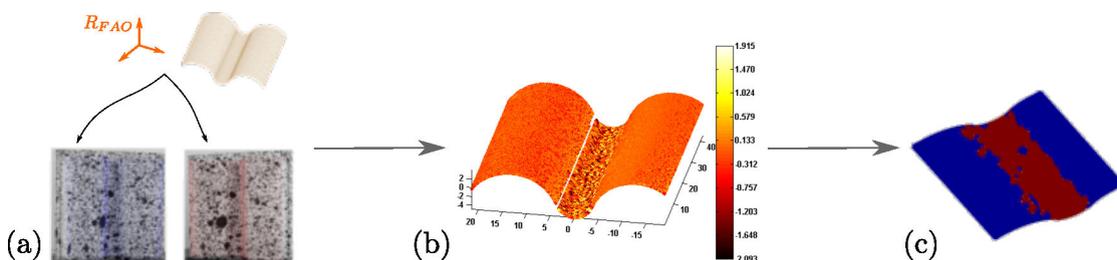


Figure 3.2 – Principe général de l'outil de pré-mesure par vision

À partir de la projection du modèle numérique sur les deux images (figure 3.2 (a)), une

analyse par stéréo-corrélation d'images est menée (figure 3.2 (b)), conduisant à la détermination et à la localisation de zones d'écarts géométriques sur la surface mesurée (figure 3.2 (c)).

Cette méthode d'analyse par stéréo-corrélation s'appuie sur une méthode de calibration originale basée sur le modèle CAO qui permet d'exprimer les résultats de mesure dans le repère de fabrication assurant ainsi une forte interopérabilité entre la fabrication et la mesure. Cette méthode de calibration se base sur la mesure du montage d'usinage de la pièce (figure 3.3). Ainsi, il est possible de réaliser l'analyse par stéréo-corrélation sur un modèle numérique de

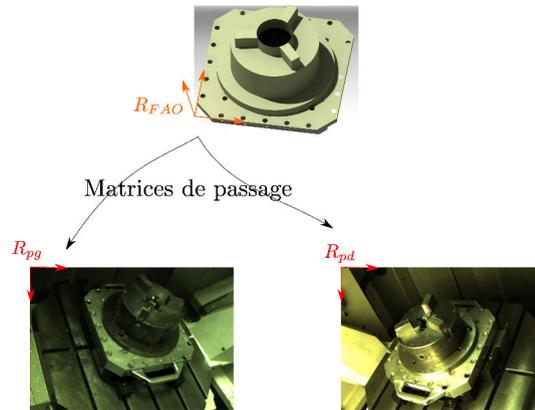


Figure 3.3 – Principe général de la méthode de calibration proposée

la pièce dans l'espace FAO, et les résultats de localisation des zones d'écarts sont directement obtenus dans ce repère.

L'association de la méthode de calibration et de l'analyse par stéréo-corrélation permet finalement de proposer un outil de pré-mesure par vision répondant aux contraintes de la mesure *In-situ*. Le développement de cet outil de pré-mesure est détaillé dans la suite de ce chapitre. Celui-ci se compose donc de deux principales parties : la première portant sur la méthode de calibration proposée et la seconde sur l'analyse par stéréo-corrélation pour la localisation des éventuels écarts géométriques.

2 Calibration sur modèle CAO [Dubreuil et al., 2015]

La mesure par vision nécessite la connaissance des différents paramètres du modèle de vision utilisé. Une calibration est donc nécessaire afin de réaliser une mesure par caméra. Dans cette partie, une méthode de calibration originale basée sur le modèle CAO du montage d'usinage est présentée. La présentation du modèle stéréoscopique utilisé ainsi que la description des principales techniques de calibration sont nécessaires pour comprendre et situer la nouvelle méthode de calibration proposée. Elles font l'objet de la partie 2.1. Les parties suivantes portent alors sur la description complète de la méthode de calibration sur modèle CAO.

2.1 Modèle de caméra et principales méthodes de calibration

L'identification de l'ensemble des paramètres du modèle stéréoscopique est aussi appelée la calibration. Dans cette partie, les différentes techniques de calibration de caméra ou d'ensemble de caméras basées sur le modèle de caméra le plus courant, le modèle de Sténopé, sont présentées.

a) Modèle stéréoscopique

Le modèle de Sténopé (figure 3.4) permet d'exprimer la relation entre les coordonnées 3D (X, Y, Z) dans le repère monde R_w et les coordonnées pixels (\tilde{u}, \tilde{v}) dans le repère image R_p . Il décrit le processus de formation des images au sein d'une caméra. L'utilisation de la notation matricielle des coordonnées homogènes permet de décrire simplement l'ensemble du modèle. Celui-ci est composé de plusieurs transformations : la transformation rigide T qui exprime les relations de passage entre le repère monde R_w et le repère caméra R_c , la projection le long de l'axe optique P du repère caméra dans le plan image, la correction des distorsions de la caméra D et enfin la transformation affine A conduisant aux coordonnées dans le repère image R_p . L'identification des paramètres du modèle permet de déterminer la relation entre les coordonnées homogènes 2D/3D définie par l'équation 3.1.

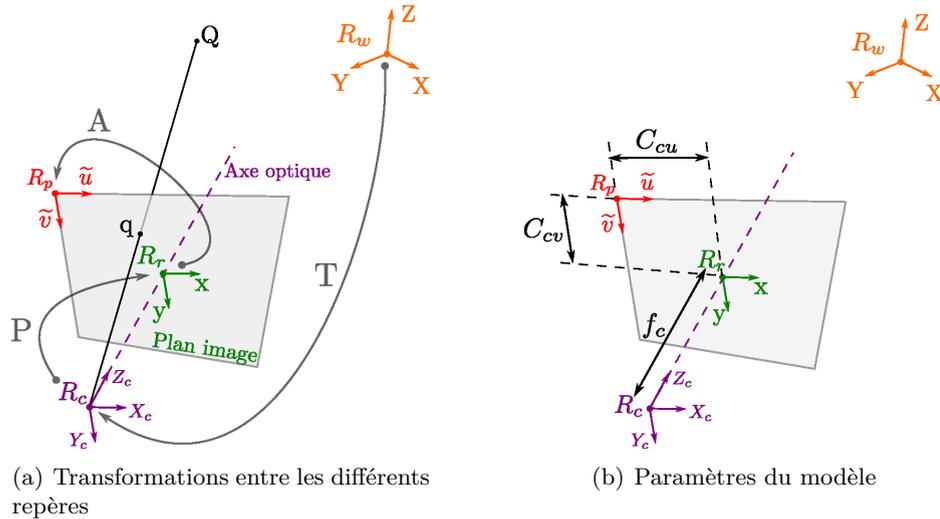


Figure 3.4 – Modèle de Sténopé d'une caméra

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix}_{R_p} = A \cdot D \cdot P \cdot T \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w} = M \cdot T \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w} \quad (3.1)$$

La relation entre les coordonnées pixels 2D du repère image et les coordonnées métriques 3D du repère monde est ainsi la combinaison des différentes transformations géométriques : A , D , P et T (figure 3.4).

La matrice A correspond à la transformation affine entre le repère du centre de l'image R_r et le repère image R_p . Cette transformation réalise la conversion des coordonnées images (\tilde{x}, \tilde{y}) , définies en unité métrique, en coordonnées images (\tilde{u}, \tilde{v}) en pixels (coordonnées images discrètes).

Cette transformation est définie par l'équation 3.2 :

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ 1 \end{bmatrix}_{R_p} = A \cdot \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix}_{R_r} = \begin{bmatrix} k_u & k_u * \alpha_{uv} & C_{cu} \\ 0 & k_v & C_{cv} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ 1 \end{bmatrix}_{R_r} \quad (3.2)$$

où

- C_{cu} et C_{cv} (en pixels) désignent les coordonnées du point à l'intersection de l'axe optique avec le plan image (théoriquement au centre de l'image)
- k_u et k_v désignent le nombre de pixels par unité de longueur suivant les directions \tilde{u} et \tilde{v} de la caméra (respectivement)
- α_{uv} traduit la non-orthogonalité éventuelle des lignes et des colonnes de l'image ; il désigne l'angle entre \tilde{u} et \tilde{v} .

La transformation D (équation 3.3) correspond aux effets de distorsions géométriques du système optique. Les lentilles des caméras provoquent une déformation de l'image réelle par leur symétrie sphérique. La distorsion se décompose en une composante radiale et une composante tangentielle (figure 3.5). La première est due à l'asymétrie des lentilles. Elle peut être de type barillet comme représenté par la courbe 1 sur la figure 3.5(a), ou de type coussinet comme représenté par la courbe 2. La composante tangentielle est due au mauvais alignement des lentilles (figure 3.5(b)). Par souci de visibilité, cette transformation n'a pas été représentée sur la figure 3.4. Elle relie les coordonnées "idéales" aux coordonnées "réelles" de l'image. Le modèle le plus courant est celui proposé par [Brown, 1971] et utilisé par [Bouguet, 2010] qui définit 5 paramètres de distorsions k_i (avec $i = 1..5$) permettant ainsi la correction des distorsions radiales et tangentielles de la caméra.

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{bmatrix}_{R_r} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_{R_r} + dx \quad (3.3)$$

$$\text{avec } dx = \begin{bmatrix} 2k_3 xy + k_4(r^3 + 2x^2) \\ k_3(r^2 + 2y^2) + 2k_4 xy \end{bmatrix} \text{ et } r^2 = x^2 + y^2 \quad (3.4)$$

La transformation P (équation 3.5) représente la matrice de projection dans le plan rétinien, projection perspective du repère caméra R_c au repère centre image R_r suivant l'axe optique. Elle transforme les coordonnées 3D d'un point du repère caméra en des coordonnées 2D du point image (en unité métrique). La focale f_c de l'objectif utilisé est l'unique paramètre de cette transformation. Elle représente la longueur entre le centre caméra et le plan image selon l'axe optique (figure 3.4).

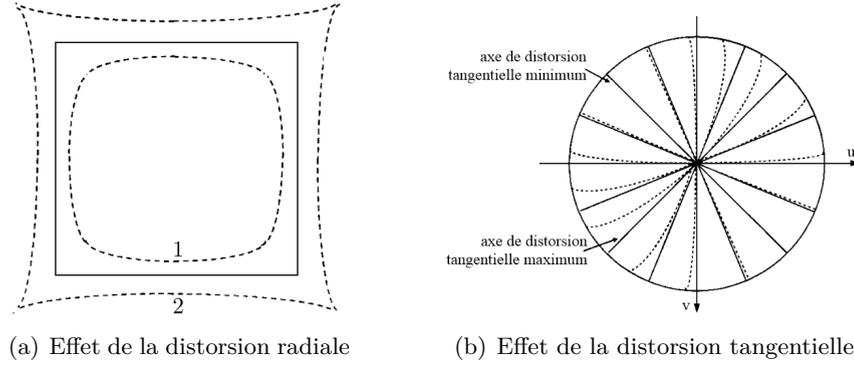


Figure 3.5 – Phénomène de distorsion [Weng et al., 1992]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}_{R_r} = P \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{R_c} = \begin{bmatrix} f_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{R_c} \quad (3.5)$$

Si on définit $M = A \cdot D \cdot P$, les paramètres associés à ces 3 transformations sont les paramètres liés à la géométrie interne de la caméra et sont couramment appelés **paramètres intrinsèques** de la caméra. Ils dépendent de l'objectif et du réglage interne de la caméra.

La dernière transformation T , est la transformation entre le repère monde R_w et le repère caméra R_c . Il s'agit d'une transformation rigide entre 2 repères 3D, qui est donc définie par une rotation R_{3*3} et une translation t . La matrice T est donc la matrice homogène de la transformation définie par l'équation 3.6.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix}_{R_c} = T \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w} = \begin{bmatrix} R_{3*3} & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_{R_w} \quad (3.6)$$

Les paramètres associés à la transformation T sont couramment appelés **paramètres extrinsèques** de la caméra.

La calibration d'une caméra peut donc se résumer en la détermination de l'ensemble des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra.

Pour un système stéréoscopique (au moins deux caméras), la calibration complète consiste en la détermination des paramètres intrinsèques de chacune des caméras et en la détermination des transformations de corps rigide entre les différentes caméras et l'espace 3D. Un système à 2 caméras est schématisé sur la figure 3.6. La calibration extrinsèque du système stéréoscopique peut être définie de 2 façons : soit par la détermination des 2 relations entre le repère monde R_w et chacun des repères caméra R_{c1} et R_{c2} (T_1 et T_2 sur la figure 3.6(a)) ; soit par la détermination de l'unique relation entre les 2 repères caméra R_{c1} et R_{c2} (T_{12} sur la figure 3.6(b)). Dans notre

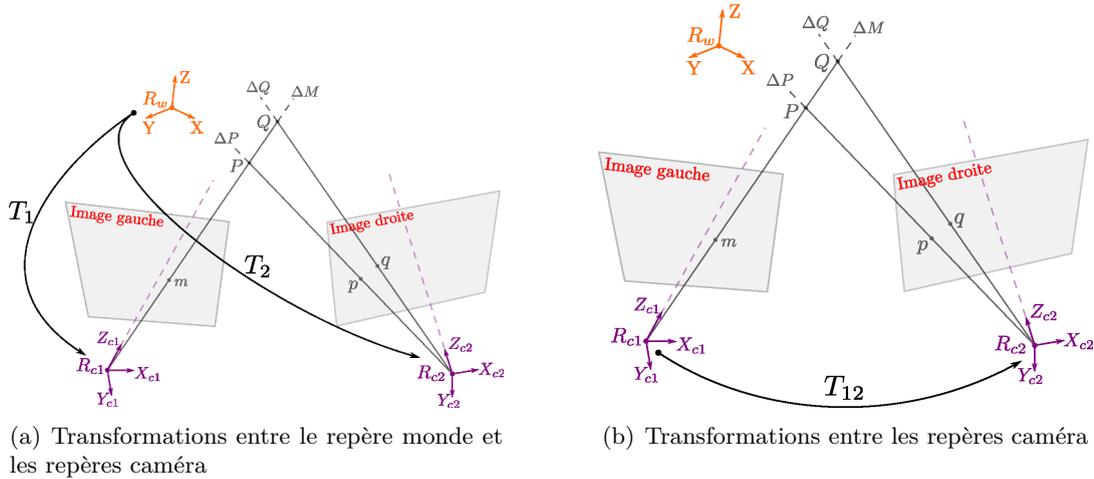


Figure 3.6 – Principe de fonctionnement d'un système stéréoscopique

cas, nous nous intéressons à la première modélisation du système stéréoscopique (figure 3.6(a)). L'objectif est de déterminer les relations entre le repère 3D de l'objet et les repères image.

b) Méthodes de calibration les plus courantes

Dans cette partie, un ensemble non exhaustif de méthodes de calibration de caméra ou d'ensemble de caméras est présenté. Un grand nombre de méthodes existent dans la littérature et les plus courantes sont rappelées et classifiées en fonction du type d'entités utilisées.

a) Calibration à partir de points

L'identification des paramètres de la transformation $M \cdot T = MT$, définissant les paramètres intrinsèques et extrinsèques, est réalisée par un appariement entre des points 3D de la scène et les points 2D équivalents du plan image. Soit un ensemble de points correspondant $X_i \leftrightarrow \tilde{u}_i$ entre le repère 3D R_w et le repère image R_p , l'objectif est de déterminer MT telle que pour tout i , $\tilde{u}_i = MT \cdot X_i$. Un appariement minimum de 6 points entre la scène 3D et l'image permet de déterminer l'ensemble des paramètres du modèle (12 paramètres si les distorsions ne sont pas prises en compte). En effet, pour chacun des points, un système de 2 équations indépendantes est défini, ce qui pour n points donne $2 * n$ équations linéairement indépendantes.

L'application de l'algorithme DTL (Direct Linear Transformation) permet d'estimer directement la transformation MT par résolution de l'ensemble des $2 * n$ équations sous la forme $A \cdot mt = 0$ avec mt le vecteur contenant les données de la matrice MT recherchée ([Sutherland, 1963, Faugeras and Toscani, 1987]). Dans les travaux de Salma et al. [Jones, 1982] et Lavest et al. [Lavest et al., 1999], la solution de l'algorithme DLT est utilisée comme solution initiale pour la minimisation par itération de l'erreur d'appariement des points (Algorithm Gold Standard). Fischer et al. [Fischler and Bolles, 1981] appliquent la méthode de RANSAC (Random Sample Consensus) afin de déterminer la transformation MT à partir de 3 points. Des méthodes quasi-linéaires sont aussi proposées pour estimer la transformation MT à partir

d'un minimum de 7 points ([Quan and Lan, 1998, Triggs, 1999]).

Bouguet [Bouguet, 2010] propose une toolbox Matlab R2014 © *Camera Calibration* basée sur la détermination de l'ensemble des éléments du modèle de Sténopé (dont les distorsions) à partir de l'appariement de points entre plusieurs vues d'une même mire d'étalonnage (figure 3.7). La toolbox développée se base sur la méthode proposée par [Lavest et al., 1999].

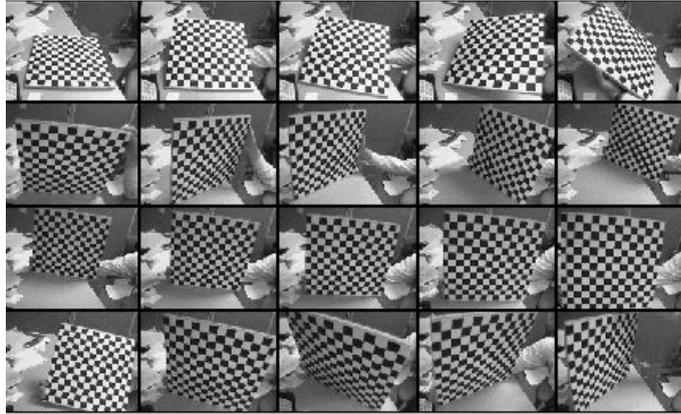


Figure 3.7 – Différentes prises de vues d'une mire d'étalonnage pour la calibration d'une caméra [Bouguet, 2010]

b) Calibration sur droites

La calibration d'une caméra peut aussi être obtenue par un appariement de droites. Dornaika et al. [Dornaika and Garcia, 1997] proposent des extensions aux méthodes linéaires et non linéaires développées par [Sutherland, 1963, Faugeras and Toscani, 1987] et [Lavest et al., 1999] avec un appariement de droites, modélisées par un point et un vecteur directeur. Ma et al. [Ma et al., 1993] modélisent les droites comme des intersections de plans et proposent une résolution linéaire de la calibration. Ces différentes méthodes de calibration permettent d'évaluer les transformations $M_i T_i$ entre les repères $R_{pi} \leftrightarrow R_w$. Devernay et al. [Devernay et al., 1995] proposent une méthode pour déterminer les distorsions radiales. Elle se base sur l'analyse de lignes droites de l'image.

c) Calibration sur modèle numérique

Beaubier et al. [Beaubier et al., 2013] proposent une méthode de calibration originale d'un système stéréoscopique. L'objet d'étude est directement utilisé comme artefact de calibration, les images utilisées pour la future mesure par stéréovision sont donc les mêmes que celles utilisées pour la calibration. L'objectif de la méthode est de déterminer les matrices de calibration (gauche M^l et droite M^r) telles que le modèle numérique 3D de l'objet se projette au mieux sur les deux images (figure 3.8). Pour cela, une analyse par stéréo-corrélation est réalisée sur les zones de projections du modèle numérique (zones jaunes sur la figure 3.8). La minimisation des scores de corrélation sur ces zones permet de déterminer les matrices de projections, donc les calibrations gauche et droite du modèle stéréoscopique. Les relations entre le repère virtuel du modèle numérique de la pièce R_{CAO} et les repères image gauche et droite R_{p1} et R_{p2} sont

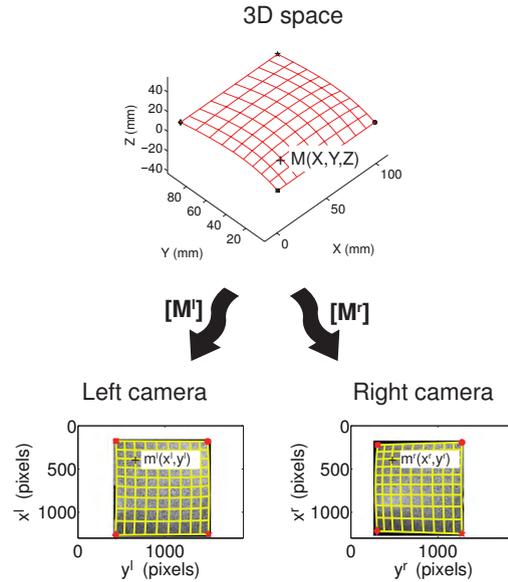


Figure 3.8 – Détermination des matrices de passage M^l et M^r par stéréo-corrélation sur images [Beaubier et al., 2013]

obtenues.

d) Synthèse des méthodes de calibration

Le tableau 3.1 résume les différents techniques d'appariement pour l'évaluation de la calibration d'un système stéréoscopique.

Éléments	Point	Droite	Modèle CAO
Résolution linéaire	[Sutherland, 1963] [Faugeras and Toscani, 1987]	[Ma et al., 1993]	
Résolution non-linéaire	[Lavest et al., 1999] [Quan and Lan, 1998] [Triggs, 1999]	[Dornaika and Garcia, 1997]	[Beaubier et al., 2013]

Tableau 3.1 – Résumé des techniques de calibration courantes

La majorité des méthodes de calibration présentées consiste en l'appariement d'éléments (points, droites) connus dans deux espaces différents afin de déterminer la transformation entre l'espace 3D R_w et l'espace image 2D R_p . Ces techniques nécessitent la prise de vue d'un artefact d'étalonnage comprenant des éléments de type "point" et/ou "droite". Les mires d'étalonnage ou artefacts de calibration sont principalement utilisées (figure 3.7).

Cependant, l'utilisation d'artefacts de calibration ne répond pas aux contraintes d'augmentation de l'interopérabilité fabrication/mesure et de diminution des temps de traitement des données de la mesure *In-situ*. En effet, les résultats de la mesure stéréoscopique seront obtenus dans un repère 3D R_w n'ayant pas de lien avec le repère de fabrication de la pièce. Une étape de recalage des données mesurées devra donc être effectuée ensuite afin d'obtenir les résultats de mesure dans un repère lié à la fabrication : le temps de traitement des données est ainsi augmenté et l'interopérabilité est réduite. Ces méthodes utilisant une mire d'étalonnage

extérieure à la scène de mesure ne peuvent donc être utilisées dans le cas de la mesure *In-situ*.

La méthode de calibration proposée par Beaubier et al. [Beaubier et al., 2013] permet de travailler directement dans le repère virtuel du modèle numérique de la pièce (repère CAO). Ainsi le repère monde R_w devient le repère CAO R_{CAO} et les résultats de mesure par vision sont obtenus directement dans ce repère et peuvent être reliés à la fabrication. L'étape de recalage des données est évitée et le temps de traitement est ainsi limité. Cette méthode de calibration répond donc à la contrainte de temps de mesure réduit et d'augmentation de l'interopérabilité fabrication/mesure nécessaire au cadre de la mesure *In-situ*. Cependant, l'artefact de calibration est l'objet d'étude et dans le cas de la fabrication par enlèvement de matière, l'objet d'étude comporte des écarts géométriques liés à la fabrication. Ces écarts devant être identifiés, il n'est pas possible d'utiliser l'objet comme artefact de calibration. Cette méthode de calibration ne peut donc être utilisée directement dans notre démarche.

Cependant cette méthode de calibration se détache des méthodes classiques, car elle permet de lier les repères image de la mesure au repère virtuel CAO de l'objet. La méthode de calibration que nous proposons s'inspire de la méthode de Beaubier et al. [Beaubier et al., 2013]. Afin de répondre aux contraintes de la mesure *In-situ*, nous proposons d'utiliser le montage d'usinage comme artefact de calibration. En effet, le montage d'usinage de la pièce est présent dans l'environnement de la machine-outil et permet de générer le modèle numérique FAO de la pièce. Dans le modèle FAO de la pièce, nous retrouvons ainsi les modèles numériques des états intermédiaires de la pièce [Xú et al., 2016], les modèles numériques du montage d'usinage et des outils, les trajectoires d'usinage et le référentiel de programmation, lié au repère FAO. De ce fait, dans le cas de la méthode de calibration sur modèle numérique du montage d'usinage proposée le repère monde R_w devient de repère FAO R_{FAO} . Ainsi les relations de passage entre le repère FAO et les repères images peuvent être identifiées, et les résultats de mesure sont obtenus dans le repère FAO.

2.2 Principe général de la calibration sur modèle CAO

L'originalité de la méthode que nous proposons est l'utilisation d'un artefact de calibration présent dans la scène, différent de la pièce fabriquée et dont le modèle numérique CAO est connu et associé à celui de la pièce fabriquée. Il serait par exemple possible d'utiliser des sphères de calibration positionnées sur la table de la machine-outil. Cependant, il serait nécessaire de connaître la position relative entre les différentes sphères et la pièce fabriquée et ainsi créer un modèle numérique CAO comprenant la pièce et les différentes sphères.

Le montage d'usinage est un élément présent directement dans la scène. De plus, son positionnement vis-à-vis de la pièce est connu et effectué durant la phase de FAO. Il paraît donc judicieux d'utiliser le montage d'usinage comme artefact de calibration. Tout comme la méthode développée par [Beaubier et al., 2013], le temps de traitement des données acquises est réduit par la suppression de l'étape de recalage des données. De plus, l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure est augmentée. En effet, les résultats de la mesure sont

directement obtenus dans le repère FAO, même repère que celui utilisé pour la génération des trajectoires des différents outils et donc même repère également pour les éventuelles trajectoires de corrections.

Nous proposons dans la suite de cette partie la description des différentes étapes de notre méthode de calibration (figure 3.9) ainsi que l'étude de sa faisabilité en contexte *In-situ*.

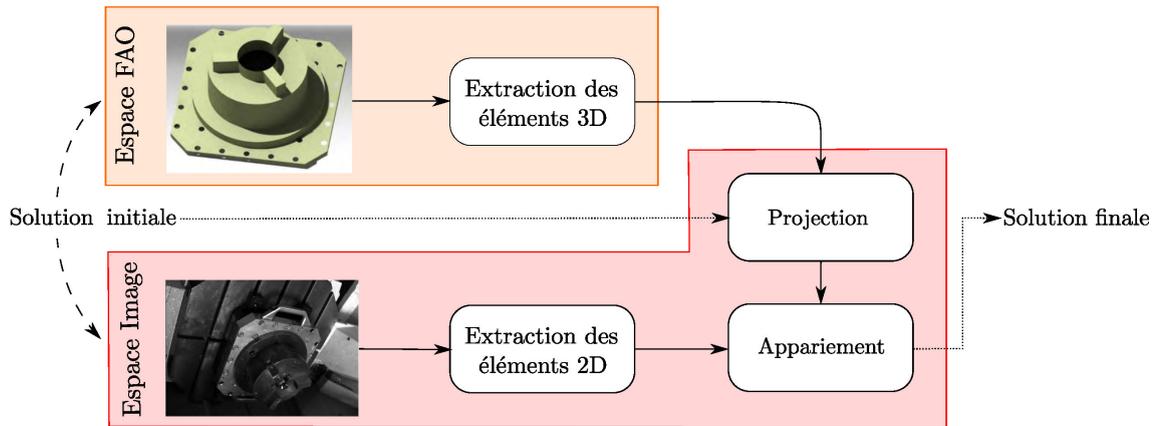


Figure 3.9 – Schéma général de la méthode de calibration proposée

La méthode de calibration proposée permet de réaliser la calibration d'une ou plusieurs caméras indépendamment les unes des autres. L'objectif est de déterminer la transformation rigide (T) entre le repère FAO R_{FAO} et le repère caméra R_c . La figure 3.10 schématise le principe général de la méthode de calibration développée. La calibration intrinsèque $M = A \cdot D \cdot P$ entre le repère R_c et le repère R_p est supposée connue. Elle peut être réalisée préalablement (hors machine).

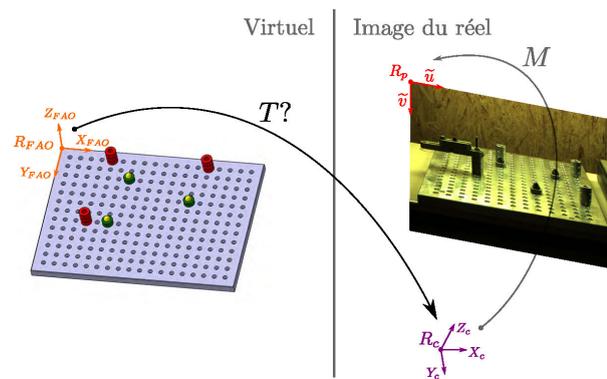


Figure 3.10 – Principe général de la calibration sur modèle CAO - Détermination de la transformation T

Afin de déterminer la calibration extrinsèque entre le repère du modèle numérique du montage d'usinage (R_{FAO}) et celui de la caméra (R_c), un appariement entre des éléments du repère (R_{FAO}) et des éléments de l'image est nécessaire. Pour cela, des éléments remarquables du montage d'usinage doivent être identifiés au préalable sur le modèle numérique du montage d'usinage et sur l'image utilisée pour la calibration. Des éléments du modèle numérique, comme

des cylindres par exemple, sont reconnus sur la photographie de la figure 3.10.¹

Une fois l'appariement des différents éléments réalisé, la transformation générale $G = M \cdot T$ entre le repère R_{FAO} et le repère R_p est obtenue. Finalement, la transformation rigide T cherchée est obtenue par :

$$T = M^{-1} \cdot G \quad (3.7)$$

La méthode repose sur l'appariement d'éléments canoniques détectables et identifiables à la fois sur le modèle numérique et sur l'image. Le tableau 3.2 résume les principaux éléments présents sur un montage d'usinage. À ces éléments sont associés les éléments 3D théoriques extraits sur le modèle numérique et leurs équivalents dans l'image. Ainsi, dans le cas du cylindre, l'élément 3D extrait est son axe, celui-ci étant défini comme la bissectrice des 2 droites génératrices détectées sur l'image (figure 3.11).

Modèle numérique (R_{FAO})		Image (R_p)	
Élément 3D	Élément 3D extrait	Élément 2D	Élément 2D extrait
Cylindre	Droite (Axe)	2 Génératrices	Droite (Bissectrice)
Sphère	Point (Centre)	Cercle	Point (Centre)
Intersection de 2 plans	Droite	Droite	Droite
Cercle	Point (Centre)	Ellipse	Point (Centre)

Tableau 3.2 – Éléments utilisés pour la calibration sur modèle CAO

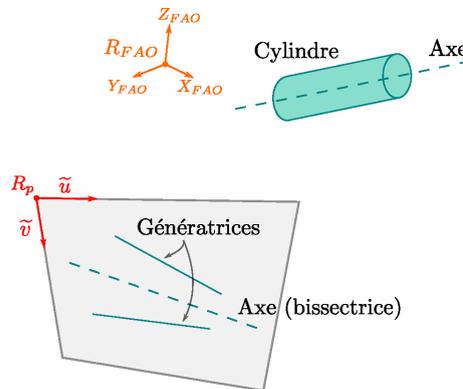


Figure 3.11 – Éléments 2D et 3D dans le cas du cylindre

La calibration est réalisée à partir de l'appariement d'éléments de types droite et point (colonnes 2 et 4 du tableau 3.2). L'ensemble de la méthode est décrit pour ces éléments dans la suite.

2.3 Écriture du problème

Comme présenté dans la partie 2.1 et plus particulièrement par l'équation 3.6, la transformation T représente la rotation ($R_{3 \times 3}$) et la translation (t) entre le repère R_{FAO} et le repère R_c . Elle peut être caractérisée par 6 paramètres extrinsèques :

1. Hypothèse pertinente si l'on considère que le montage réel est mesuré et que son modèle numérique découle de la mesure

- 3 angles d'Euler (ϕ, θ, ψ) pour la rotation $R_{3 \times 3}$
- 3 distances "longueurs" (t_x, t_y, t_z) pour la translation t .

Notons $\Phi = (\phi, \theta, \psi, t_x, t_y, t_z)$ le vecteur comprenant l'ensemble des paramètres extrinsèques à identifier. Un minimum de 6 équations indépendantes est nécessaire pour définir entièrement la transformation T .

La méthode que nous proposons se compose de 3 étapes principales : la projection des éléments 3D sur le plan image, l'extraction des éléments 2D équivalents de l'image et l'appariement de ces éléments.

La projection des éléments 3D sur l'image est effectuée à partir d'une transformation rigide initiale T_{init} définie par la donnée d'un vecteur Φ_0 . Cette projection est réalisée à partir de l'équation 3.1 du modèle complet de la caméra (paramètres intrinsèques et extrinsèques). La figure 3.12(a) schématise cette étape. La projection de la droite d_{FAO} du repère R_{FAO} sur l'image permet d'obtenir la droite d_{im} dans le repère R_p . De la même manière, le point P_{FAO} du repère R_{FAO} projeté sur l'image devient le point P_{im} dans le repère R_p .

En parallèle de cette étape, les éléments équivalents 2D sont détectés puis extraits de l'image : le point équivalent P_{detect} et la droite équivalente d_{detect} dans le repère R_p (figure 3.12(b)).

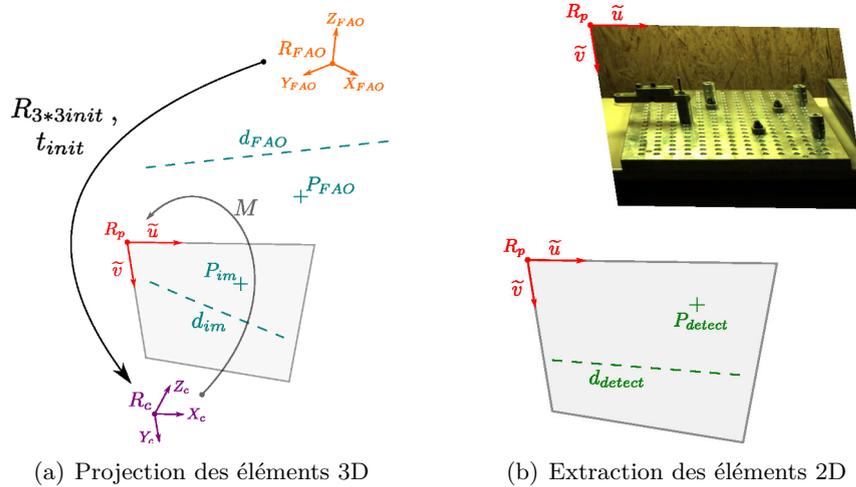


Figure 3.12 – 2 premières étapes de la méthode de calibration sur modèle CAO

La dernière étape est la réalisation de l'appariement des éléments équivalents. Pour cela, des erreurs de projection (erreurs en pixels dans R_p) des différents éléments peuvent être définies. La figure 3.13 illustre les erreurs de projection dans le cas du point et de la droite.

Dans le cas du point, l'erreur de projection est définie comme la distance entre les 2 points équivalents P_{im} et P_{detect} . Pour le cas de la droite, deux erreurs de projection sont calculées : les distances entre les points extrêmes de la droite d_{im} à la droite d_{detect} (distances point-droite). Les erreurs de projection sont définies par l'équation 3.8.

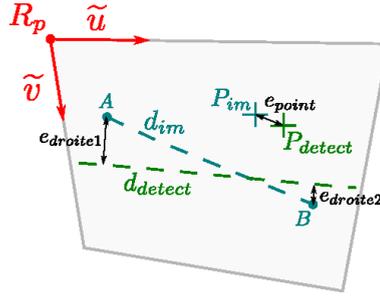


Figure 3.13 – Appariement des éléments droite et point - Calcul des erreurs de projections

$$\begin{cases} e_{point} = dist(P_{im}, P_{detect}) \\ e_{droite1} = dist(A, d_{detect}) \\ e_{droite2} = dist(B, d_{detect}) \end{cases} \quad (3.8)$$

Pour un ensemble de m droites et de n points, un vecteur erreur $E(\Phi)$ de dimension $2*m+n$ est donc défini.

Ainsi la résolution du problème de calibration selon le critère des moindres carrés revient à chercher Φ qui minimise la fonction $F = E^T \cdot E$. Ce qui peut s'écrire :

$$\left[\frac{\partial F}{\partial \Phi} \right] = 2E^T \cdot \left[\frac{\partial E}{\partial \Phi} \right] = 0 \quad (3.9)$$

Considérons un développement limité au premier ordre du vecteur erreur autour de la solution initiale :

$$E(\Phi) = E(\Phi_0) + \left[\frac{\partial E}{\partial \Phi} \right]_{\Phi_0} \cdot d\Phi \quad (3.10)$$

Soit, la matrice $J = \left[\frac{\partial E}{\partial \Phi} \right]_{\Phi_0}$ considérée comme le jacobien de E , l'équation 3.9 devient :

$$J^T \cdot E = 0 \quad (3.11)$$

soit

$$J^T \cdot E = J^T \cdot (E(\Phi_0) + J \cdot d\Phi) = J^T \cdot E(\Phi_0) + J^T \cdot J \cdot d\Phi = 0 \quad (3.12)$$

Finalement,

$$d\Phi = -(J^T \cdot J)^{-1} \cdot (J^T \cdot E(\Phi_0)) \quad (3.13)$$

Par itération, la solution Φ minimisant la fonction F est obtenue avec $\Phi_0 = \Phi_0 + d\Phi$.

2.4 Faisabilité de la méthode

La méthode proposée est validée en considérant le montage d'usinage de la figure 3.10. La calibration intrinsèque de la caméra est réalisée préalablement en utilisant la toolbox de Matlab© Camera Calibration [Bouguet, 2010]. Les paramètres intrinsèques sont identifiés et par suite, la transformation M est connue.

a) Solution initiale et projection

La méthode s'appuie sur la donnée d'une transformation initiale définissant le vecteur Φ_0 . La solution initiale est obtenue par un appariement manuel d'un minimum de 6 points,

ces points étant choisis de manière à être observés sur l'image et identifiables sur le modèle numérique du montage d'usinage. Les points utilisés pour la recherche de la solution par appariement manuel sont représentés par des croix blanches sur la figure 3.14.

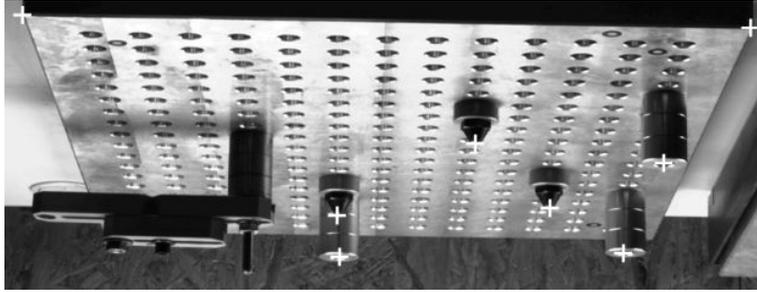


Figure 3.14 – Choix des points pour la définition de la solution initiale Φ_0

Une fois la transformation rigide initiale T_{init} déterminée, les éléments 3D extraits du modèle numérique sont projetés sur l'image (repère R_p) à partir de l'équation 3.1 avec $T = T_{init}$.

b) Extraction d'éléments 2D

Parallèlement à la projection des éléments 3D, les éléments équivalents 2D sont extraits de l'image. Pour cela, la toolbox Matlab© Image Processing est utilisée : 3 opérations de traitement d'image sont nécessaires.

La première opération est un filtrage de l'image, qui est réalisé à partir d'un filtre de Canny [Canny, 1986]. Cette opération permet d'extraire les différents contours présents sur l'image. Le calcul des gradients d'intensité de l'image permet d'obtenir une cartographie des gradients en chacun des points de l'image et par application d'un seuillage, seuls certains contours sont conservés (figure 3.16(a)).

La seconde opération consiste en l'extraction des différents éléments 2D (3^{ème} colonne du tableau 3.2) à partir des contours de l'image. Cette opération est réalisée à l'aide de la transformée de Hough qui permet d'extraire des lignes par recherche de points alignés [Hough, 1962]. En effet, dans l'espace de Hough, espace des paramètres polaires θ et ρ , chaque point est représenté par une sinusoïde et l'intersection de plusieurs sinusoïdes représente une droite dans l'espace de l'image (figure 3.15).

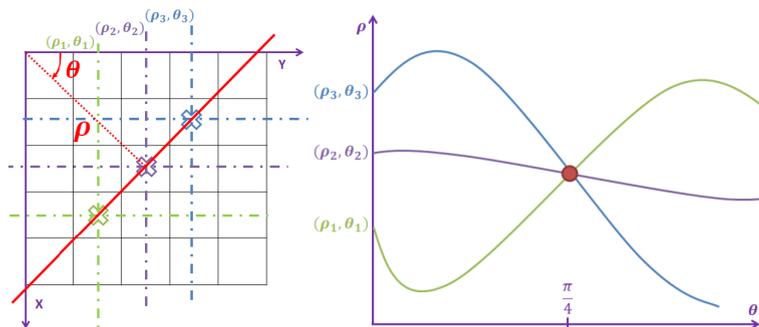


Figure 3.15 – Espace de Hough - Recherche de points alignés dans l'image [Hough, 1962]

Une extension de la transformée de Hough pour la détection d'ellipses, proposée par [Xie

and Ji, 2002] et implémentée dans Matlab© par [Simonovsky, 2011], est utilisée dans les cas d'extraction d'ellipses et cercles.

Ces 2 premières opérations de traitements de l'image ont été mises en place afin d'extraire les lignes, les ellipses et les cercles de l'image. Une dernière opération d'extraction de l'élément associé (4^{ème} colonne du tableau 3.2) permet d'obtenir les éléments 2D extraits de l'image dans le repère R_p . L'ensemble des opérations d'analyse d'image présentées dans cette partie est résumé sur la figure 3.16 dans le cas du cylindre :

1. détection des contours par l'utilisation d'un filtre de Canny
2. extraction des éléments par la transformée de Hough (2 génératrices du cylindre)
3. construction de l'élément 2D extrait utilisé pour la calibration (axe du cylindre - droite bissectrice des 2 génératrices vertes)

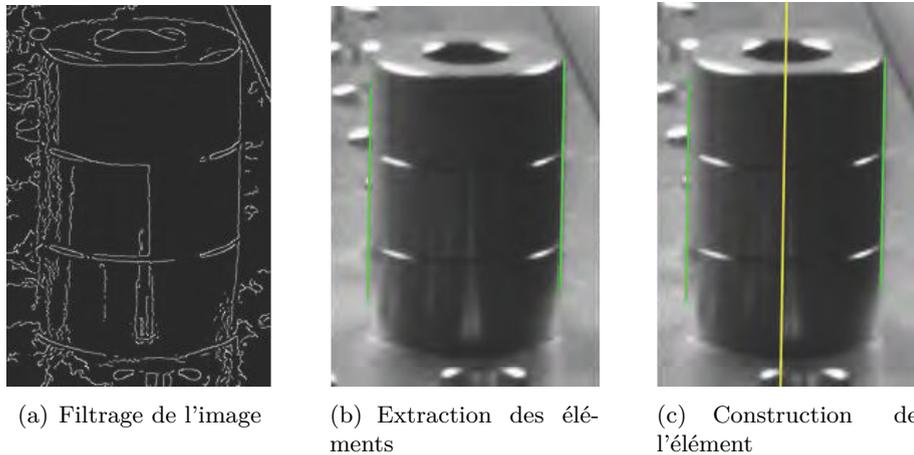


Figure 3.16 – Extraction des éléments 2D par analyse d'image - cas du cylindre

Différentes techniques d'analyse d'images existent dans la littérature ; les plus courantes ont été utilisées dans nos travaux pour extraire les éléments 2D. Cependant, ces techniques nécessitent le réglage de plusieurs paramètres. La sensibilité de la méthode de calibration vis-à-vis des variations des paramètres de l'analyse d'image est testée dans la partie 2.5.

c) Appariement et résultats de l'étude de faisabilité

La dernière étape consiste en l'appariement des différents éléments pour le calcul des erreurs de projections (équations 3.8 et figure 3.13). Ainsi, la définition du vecteur $E(\Phi)$ permet de résoudre le problème de calibration (équations 3.9 à 3.13) et d'obtenir la transformation T . Cette étape est illustrée dans le cas du cylindre sur la figure 3.17 : les erreurs de projection $e_{droite1}$ et $e_{droite2}$ entre les 2 éléments équivalents, d_{im} et d_{detect} , sont évaluées pour la résolution du problème de calibration.

La faisabilité de la méthode de calibration est testée sur un ensemble de 7 droites provenant de cylindres ou d'intersection de plans pour le montage d'usinage présenté sur la figure 3.10.

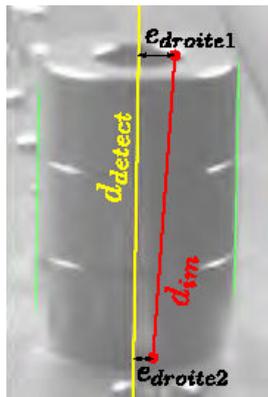


Figure 3.17 – Appariement des éléments 2D et calculs des erreurs de projections - cas du cylindre

Le résultat de la calibration est illustré sur la figure 3.18. Les éléments 2D extraits de l'image sont représentés en jaune. Les éléments 3D du modèle numérique projetés sur l'image avec la transformation rigide initiale T_{init} et la matrice des paramètres intrinsèques M sont représentés en rouge.

Finalement, les éléments 3D du modèle numérique projetés sur l'image, après résolution du problème de calibration et évaluation de la transformation T , sont représentés en vert sur la figure 3.18.

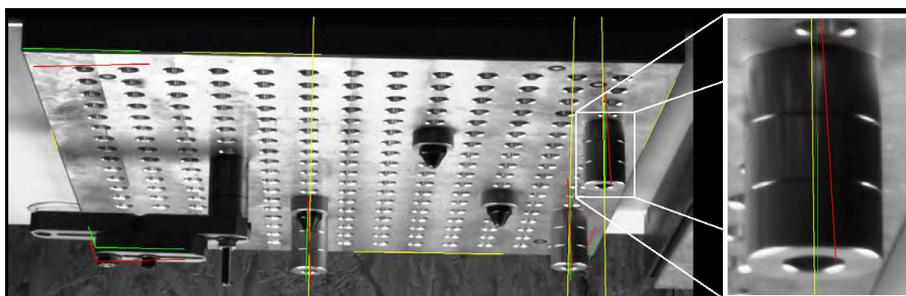


Figure 3.18 – Validation de la calibration sur modèle CAO

La méthode de calibration proposée permet de diminuer l'erreur maximale de projection de 80% avant et après optimisation, et valide la faisabilité de la méthode de calibration sur modèle CAO.

Néanmoins, un décalage subsiste toujours entre les éléments 3D de la CAO projetés et les éléments extraits 2D de l'image ce qui peut être pénalisant. Trois principales causes expliquent ces écarts : l'écart entre le modèle CAO du montage et le montage réel, l'erreur réalisée sur l'extraction des entités présentes dans l'image et l'erreur sur la détermination des paramètres intrinsèques.

Le montage d'usinage utilisé pour cette calibration est un montage composé d'un ensemble d'éléments modulaires. Malgré la grande qualité des pièces servant à la réalisation du montage d'usinage, les dimensions et les positions des composants du montage ne sont pas dans une configuration identique au modèle CAO.

L'analyse d'image utilisée pour extraire les éléments 2D dépend de la qualité de l'image

réalisée, mais aussi des paramètres choisis pour le filtrage de Canny et l'extraction par la transformée de Hough.

Enfin, des incertitudes sur les valeurs de paramètres intrinsèques identifiées par la méthode de [Bouguet, 2010] sont connues et génèrent des écarts.

Afin d'évaluer l'influence de chacune des sources d'écarts sur le résultat de calibration, une étude de sensibilité a été menée. Elle a été réalisée *In-situ* pour se rapprocher de notre problématique générale de mesure dans un contexte *In-situ*.

2.5 Application *In-situ* et analyse de sensibilité

Dans cette partie, la méthode de calibration sur modèle CAO proposée est réalisée *In-situ*. Une analyse de sensibilité de notre méthode est proposée. En effet, la détermination des incertitudes associées à la calibration est un enjeu majeur pour la mesure par vision.

a) Moyen de production et intégration des caméras

La calibration est réalisée dans un centre UGV 5 axes, *Mikron UCP710*, avec deux caméras industrielles, *Matrix Vision MvBlueFOX3*, comprenant des capteurs Haute Qualité de résolution $3856 * 2764$ et de taille de pixel $1.67 * 1.67 \mu\text{m}$ (figure 3.19). Les objectifs (système de lentilles) associés aux caméras sont choisis de manière à observer l'espace des tâches de la machine-outil.



(a) Machine-outil 5 axes *Mikron UCP710* et baie de mesure



(b) Caméra industrielle *Matrix Vision MvBlueFOX3*

Figure 3.19 – Moyen de production et caméras

Le positionnement des caméras dans le moyen de production nécessite de respecter plusieurs contraintes. La première est la position relative entre les 2 caméras. En effet, la position relative entre les 2 caméras génère des erreurs de reconstruction (figure 3.20). L'erreur de reconstruction est fortement liée à l'orientation relative des axes optiques des caméras. Simoes [Simoes, 2012] montre que le positionnement des caméras à 60 degrés permet de minimiser l'erreur de reconstruction 3D.

De plus, les caméras doivent être positionnées de manière à ne pas encombrer l'espace de la machine et gêner l'usinage. Elles sont donc positionnées sur le carter de part et d'autre de

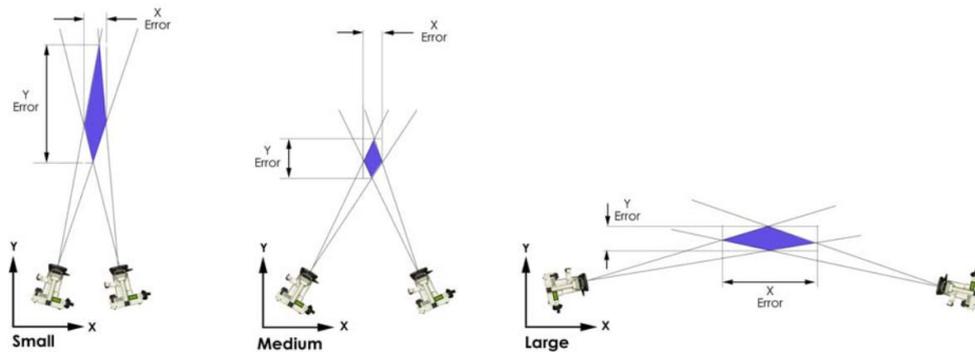
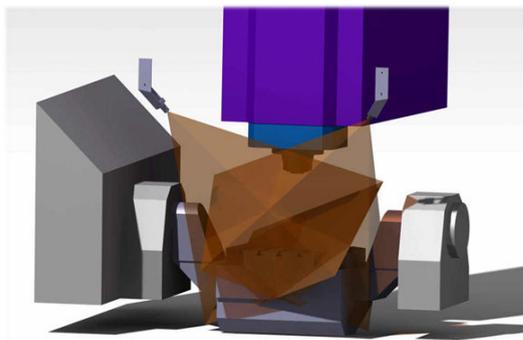


Figure 3.20 – Erreur de reconstruction en fonction de la configuration des caméras dans un plan [Sandwith and Cork, 2000]

l'ouverture principale de la machine (figure 3.21). Des supports permettent de fixer les caméras sur la machine. Ces supports sont réalisés de manière à respecter l'angle de 60 degrés entre les caméras ainsi que d'observer l'ensemble du volume de fabrication de la machine-outil.



(a) Modèle numérique des caméras dans la machine-outil



(b) Caméra sur support positionnée dans la machine-outil

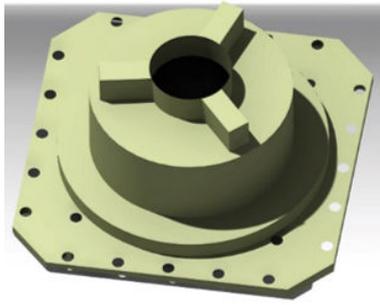
Figure 3.21 – Intégration des caméras dans la machine

b) Description du cas d'étude

Le montage d'usinage utilisé pour valider la méthode de calibration sur modèle CAO dans machine-outil est composé uniquement d'éléments de type droite. Son modèle numérique ainsi que l'image utilisée pour la calibration sont représentés sur la figure 3.22.

Afin de minimiser les écarts entre le montage d'usinage réel et son modèle CAO, ce dernier a été construit par rétroconception [Varady et al., 1997]. Une mesure du montage réel avec un palpeur mécanique monté sur MMT permet de reconstruire l'ensemble du montage d'usinage.

Suite à l'acquisition des points sur les différentes surfaces canoniques, l'environnement de travail "Quick Surface Reconstruction" du logiciel Catia V5© est utilisé. Le modèle CAO reconstruit à partir de la mesure au palpeur mécanique du montage d'usinage réel est représenté sur la figure 3.22(a). Il est considéré comme modèle de référence pour la calibration sur modèle CAO



(a) Modèle CAO du montage d'usinage - Catia V5©



(b) Image du montage d'usinage utilisée pour la calibration *In-situ*

Figure 3.22 – Cas d'étude pour la réalisation de la calibration *In-situ*

c) Résultats de la calibration *In-situ*

Les résultats de la calibration *In-situ* sont présentés sur la figure 3.23. Cette calibration a été réalisée avec 17 éléments de type droite. Le choix des éléments pour la résolution du problème de calibration est un choix arbitraire. Une étude sur le choix des entités utilisées pour la calibration est proposée en Annexe A.

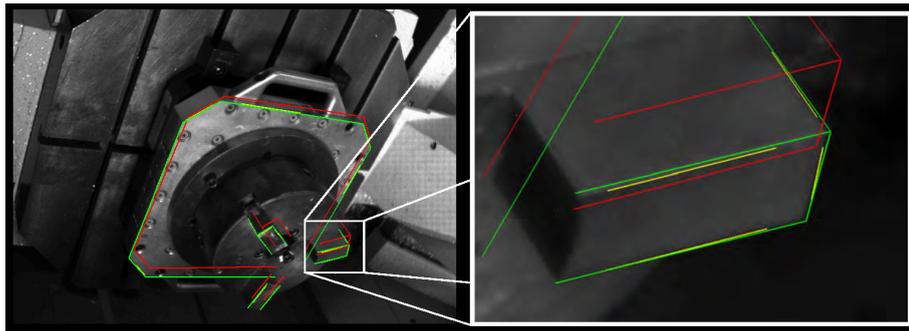


Figure 3.23 – Calibration sur modèle CAO dans un environnement *In-situ*

Comme précédemment, la nette diminution des écarts entre la solution initiale et la solution après optimisation est facilement appréciable (figure 3.23) : les éléments 2D extraits de l'image sont représentés en jaune, les éléments 3D du modèle numérique projetés sur l'image avec la transformation rigide initiale T_{init} et la matrice des paramètres intrinsèques M sont représentés en rouge et les éléments 3D du modèle numérique projetés sur l'image, après résolution du problème de calibration et évaluation de la transformation T , sont représentés en vert sur la figure 3.23.

Afin de qualifier ce résultat de calibration, les erreurs de reprojection sont calculées (figure 3.24). L'erreur de reprojection est évaluée sur l'image à partir d'éléments n'ayant pas été utilisés pour la résolution de la calibration. Sur la figure 3.24, elle est représentée par la distance en pixels entre un point vert, issu de l'extraction sur l'image, et le point équivalent bleu, projection du point 3D noir sur l'image à partir du résultat de calibration. Les écarts entre les points CAO projetés et les points équivalents détectés sur l'image permettent d'évaluer l'erreur de reprojection de la calibration.

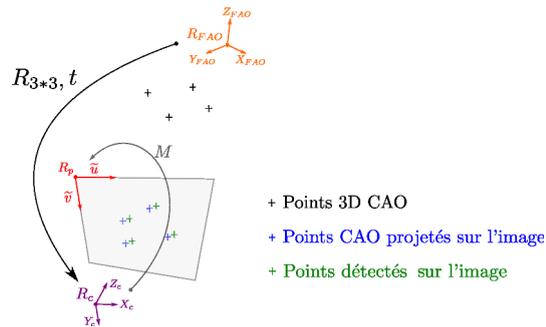


Figure 3.24 – Principe de la projection

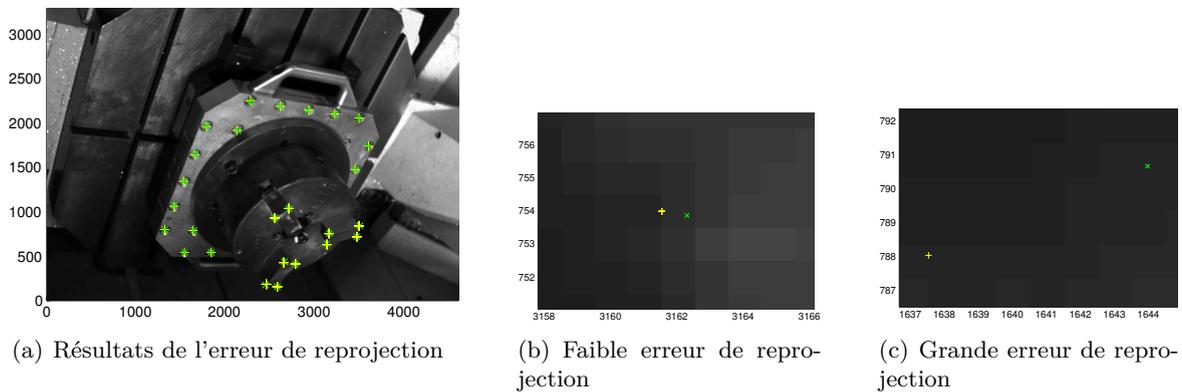


Figure 3.25 – Erreur de projection sur le montage d'usinage

Sur la figure 3.25(a), 26 points ont été utilisés pour calculer les erreurs de projection. Les points 3D issus du modèle numérique et projetés sur l'image sont représentés par des croix \times vertes. Les points directement détectés sur l'image sont représentés par des croix $+$ jaunes. Les figures 3.25(b) et 3.25(c) mettent en avant 2 des 26 erreurs de projection utilisées pour évaluer le résultat de calibration : une erreur de projection inférieure au pixel pour la première et une erreur de projection de plusieurs pixels pour la seconde.

Les résultats de reprojection suivant les deux directions pixel (\tilde{u} et \tilde{v}) sont reportés dans le tableau 3.3. La valeur absolue moyenne de l'erreur de reprojection ne dépasse pas 0.3 pixel suivant les deux directions.

	Moyenne (pixel)	Écart-type (pixel)
$e_{\tilde{u}}$	-0.282	3.688
$e_{\tilde{v}}$	0.234	3.058

Tableau 3.3 – Erreurs de reprojection

Les valeurs des écarts-types suivant les 2 directions de l'image sont cependant élevées. Cela s'explique, car les points utilisés pour l'étude de reprojection sont plus ou moins éloignés des entités utilisées pour la résolution du problème de calibration. Par exemple, un point très proche d'une des entités de calibration a une erreur de reprojection faible < 1 pixel (figure 3.25(b)). Inversement, un point plus éloigné d'une entité de calibration a une erreur de reprojection de

plusieurs pixels (figure 3.25(c)).

L'erreur de reprojection permet de quantifier la qualité de la calibration et donc le résultat de la mesure par vision. Il est important de maîtriser cette valeur sur la zone de l'image où la mesure par vision est effectuée. Les entités utilisées pour la calibration doivent donc être réparties sur l'ensemble de l'image et particulièrement dans la zone d'étude pour la mesure par vision.

d) Étude de sensibilité de la calibration sur modèle CAO

L'étude de faisabilité de la méthode de calibration proposée dans la partie 2.4 montre qu'il existe toujours un décalage entre les éléments 3D de la CAO projetés et les éléments 2D extraits de l'image. Plusieurs sources expliquent ces écarts : l'erreur entre le modèle CAO et le montage d'usinage réel, l'erreur d'extraction des entités et la détermination des paramètres intrinsèques.

Dans cette partie, une étude de sensibilité de la méthode de calibration sur modèle CAO est présentée. Sous l'hypothèse que l'erreur de représentativité du modèle numérique du montage d'usinage est négligeable, seules les erreurs d'extraction et d'évaluation des paramètres intrinsèques sont testées. L'influence de la variabilité des différents facteurs sur le résultat de calibration sur modèle CAO est étudiée au travers d'une étude Monte-Carlo. La figure 3.26 schématise cette étude, avec en entrée les différents paramètres influant et leur variabilité, en sortie les différents résultats de la calibration.

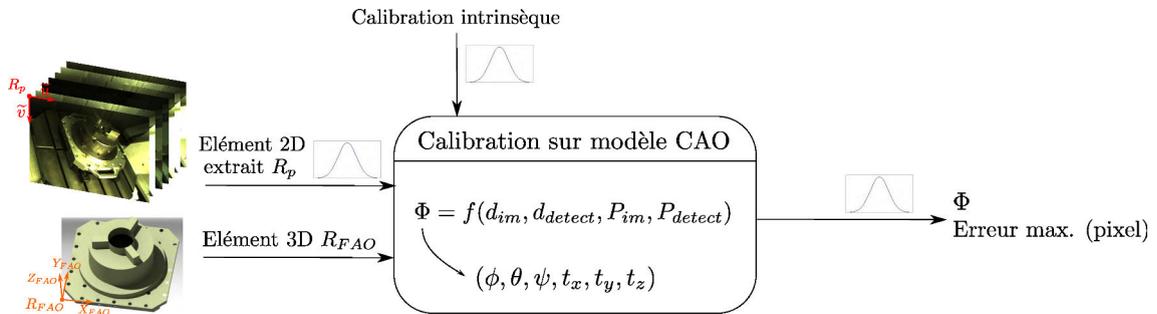


Figure 3.26 – Description de la simulation Monte-Carlo appliquée à la méthode de calibration sur modèle CAO

Des incertitudes sont associées aux paramètres d'extraction des éléments 2D ainsi qu'aux valeurs des paramètres intrinsèques afin de rendre compte de leur variabilité. En sortie, les incertitudes associées à la méthode de calibration sur modèle CAO sont obtenues grâce à 1000 simulations de la calibration.

a) Incertitudes liées à l'extraction des éléments 2D

L'extraction des éléments 2D sur l'image dépend de plusieurs paramètres tels que la luminosité de la scène lors de la prise de vue, les paramètres du filtre de Canny et ceux de la détection par transformée de Hough (figure 3.27).

La droite, modélisée par son équation $\tilde{v} = a.\tilde{u} + b$, est définie par les paramètres : a , la

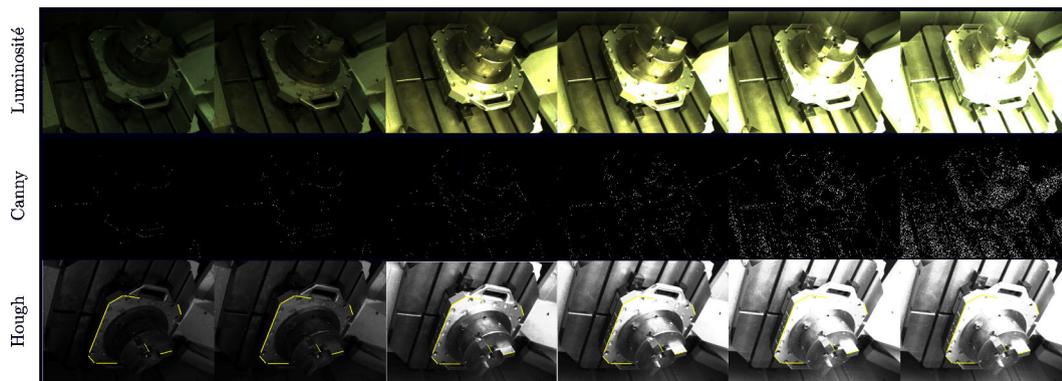


Figure 3.27 – Différents paramètres étudiés

pente, et b , l'ordonnée à l'origine (figure 3.28). Des incertitudes, modélisées par des distributions gaussiennes caractérisées par les écarts types δa et δb respectivement, sont associées à ces 2 paramètres. δa et δb sont obtenus en considérant les variations en position et en orientation de droites extraites du même élément lorsque l'on fait varier les conditions d'éclairage et les différents paramètres associés à l'analyse d'image.

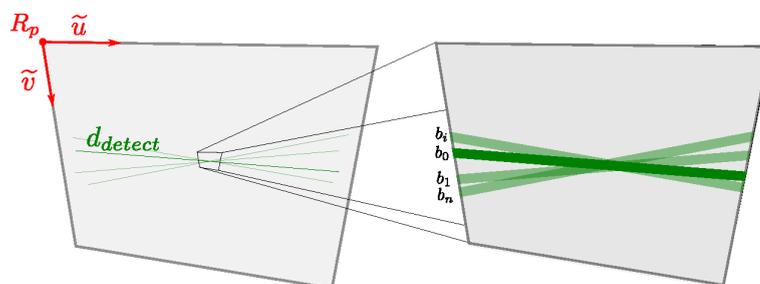


Figure 3.28 – Détermination de l'ordonnée à l'origine

Dans une première étude, seule l'influence de l'incertitude sur les éléments extraits est envisagée. Les 1000 simulations Monte-Carlo conduisent aux distributions reportées sur la figure 3.29.

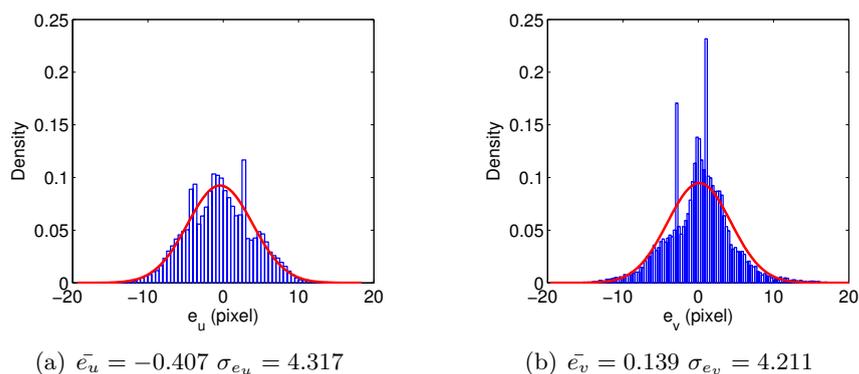


Figure 3.29 – Distribution de l'erreur de reprojection en considérant les incertitudes associées aux éléments 2D extraits

Les résultats montrent que l'écart-type des erreurs de reprojection ne dépasse pas 4.317

pour σ_{e_u} et 4.211 pour σ_{e_v} et que des valeurs moyennes restent inférieures au pixel.

b) *Incertitudes liées aux paramètres intrinsèques*

La calibration intrinsèque de la caméra, réalisée préalablement à partir de la toolbox de Matlab © Camera Calibration [Bouguet, 2010], fournit les paramètres intrinsèques résumés dans le tableau 3.4 ainsi que leur incertitude associée.

	$f_c \cdot \delta_u$ (mm)	$f_c \cdot \delta_v$ (mm)	C_{cu} (pixel)	C_{cv} (pixel)	k_1 -	k_2 -	k_3 -	k_4 -	k_5 -
Moyenne	6596.9	6583.4	2332.1	1744.13	-0.245	0	$5.8 e^{-4}$	$18 e^{-4}$	0
Écart-type	11.9	12.0	16.3	16.94	0.003	0	$4.2 e^{-4}$	$3.9 e^{-4}$	0

Tableau 3.4 – Valeurs des paramètres intrinsèques [Bouguet, 2010]

Les distributions tracées sur la figure 3.30 correspondent aux résultats de la simulation Monte-Carlo prenant en compte les deux sources d’incertitudes (extraction des éléments 2D et calibration intrinsèque).

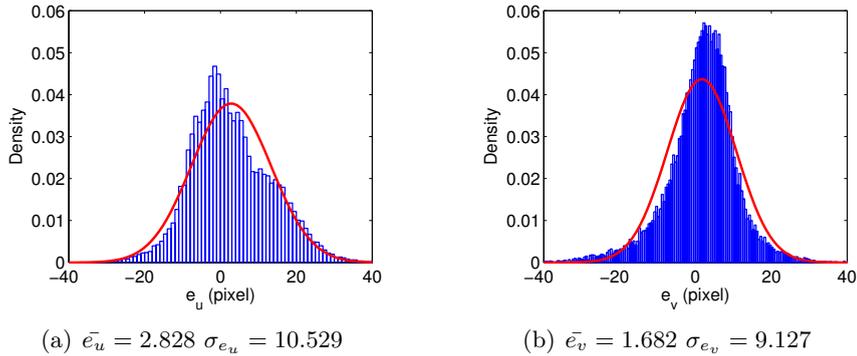


Figure 3.30 – Distribution de l’erreur de reprojection en considérant les 2 sources d’incertitudes

Les valeurs obtenues suivant les 2 directions de l’image sont plus de 2 fois plus grandes que celles obtenues lors de la première simulation (figure 3.29). Les écarts liés à la calibration intrinsèque sont donc prépondérants sur la méthode de calibration sur modèle CAO. Ces résultats permettent de conclure sur la bonne stabilité de la méthode vis-à-vis des écarts associés aux éléments 2D extraits. La qualité de l’image ainsi les paramètres associés au traitement de l’image ne sont pas les plus influant sur la méthode. L’environnement *In-situ* du moyen de production est un environnement difficile à contrôler en terme de luminosité. Il ne sera cependant pas plus influant sur le résultat de calibration sur modèle CAO que la calibration intrinsèque.

c) *Bilan sur la sensibilité de la méthode*

Dans cette étude de sensibilité, les 2 sources d’écarts principales ont été étudiées grâce à des simulations Monte-Carlo : l’extraction des éléments 2D et la calibration intrinsèque. Les écarts

associés aux éléments 3D extraits du modèle numérique (figure 3.26) n'ont pas été étudiés. Nous faisons l'hypothèse que la mesure MMT sert de référence et que la reconstruction n'entraîne pas d'écart supplémentaire. Les erreurs liées à l'évaluation des paramètres intrinsèques sont donc prépondérantes sur la méthode de calibration sur modèle CAO.

e) Bruits de calibration

La méthode de calibration développée se base sur les éléments remarquables présents sur le montage d'usinage. Afin de résoudre le problème de calibration (équations 3.9 à 3.13) et ainsi obtenir la valeur des 6 paramètres extrinsèques du modèle de caméra, un ensemble minimum d'éléments de types droite et point est nécessaire. En effet, un minimum de 6 équations indépendantes doit être défini pour caractériser entièrement la transformation T . Le tableau 3.5 résume l'ensemble des combinaisons minimums "point-droite" pour définir l'ensemble des paramètres extrinsèques, sous l'hypothèse que les éléments utilisés forment des équations indépendantes.

	Nombre de droites	Nombre de points
Combinaison 1	0	6
Combinaison 2	1	4
Combinaison 3	2	2
Combinaison 4	3	0

Tableau 3.5 – Ensemble des combinaisons minimums "point-droite" pour définir T

Les différentes combinaisons de ce tableau permettent d'imposer une contrainte minimum quant au choix des entités pour la résolution du problème de calibration. Une étude portant sur l'influence du choix des entités est proposée en Annexe A. Elle se base sur l'évaluation du conditionnement du système d'équations défini par les entités choisies pour la détermination de la calibration.

L'estimation du bruit de calibration proposé par Lavest et al. [Lavest et al., 1999] permet de s'assurer de la qualité du résultat de calibration obtenu. L'équation 3.13, permettant de déterminer la solution $d\Phi$ du problème de calibration, peut se mettre sous la forme d'un système de type :

$$Ax = b \tag{3.14}$$

avec $A = J^T \cdot J$ et le second membre associé $b = -(J^T \cdot E(\Phi_0))$.

L'estimation théorique de la qualité de la calibration, proposée par [Lavest et al., 1999], se base sur l'estimation du vecteur résiduel V :

$$V = (I - A \cdot (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A) \cdot E(\Phi) \tag{3.15}$$

Il est ainsi possible de définir une estimation du bruit de calibration σ_0 (pixel)

$$\sigma_0^2 = \frac{V^T \cdot V}{r} \tag{3.16}$$

avec r la redondance du système (différence entre le nombre d'équations indépendantes et le nombre d'inconnues).

	Caméra de gauche	Caméra de droite
σ_0 (pixel)	1.64	1.68

Tableau 3.6 – Valeurs de bruit de calibration pour les 2 caméras

Les valeurs des bruits de calibration calculés, σ_0 , pour les deux caméras représentent une estimation de la qualité des résultats de calibration. Ces valeurs sont nécessaires pour la suite de la pré-mesure. En effet, elles sont utilisées lors de la détection des écarts géométriques sur la pièce par stéréo-corrélation : elles représentent les valeurs seuils nécessaires à la distinction entre les lieux comprenant et ne comprenant pas d'écarts géométriques sur la pièce par rapport au modèle numérique de celle-ci.

2.6 Synthèse sur la calibration sur modèle CAO

Dans cette partie, une méthode originale de calibration sur modèle CAO est présentée. Basée sur l'appariement d'éléments 3D du modèle CAO, aux éléments équivalents 2D extraits de l'image d'un objet présent dans la scène, cette méthode a la particularité de fournir une calibration extrinsèque du modèle de caméra dans le repère virtuel liée au modèle numérique. La mesure par vision est donc directement obtenue dans le repère lié au modèle numérique. De plus, lorsqu'elle est appliquée sur le montage d'usinage, la calibration répond à la contrainte de la mesure *In-situ*. Il est alors possible de travailler directement dans le repère lié à la fabrication, repère FAO du modèle numérique du montage d'usinage. Ainsi l'interopérabilité entre les données liées à la mesure et celles liées à la fabrication est fortement augmentée.

Grâce à une étude de sensibilité, nous avons montré que cette méthode de calibration peut être réalisée dans l'environnement du moyen de production. Le calcul des bruits de calibration permet de s'assurer de la qualité du résultat de calibration. Ces bruits de calibration seront utiles pour la mesure par vision proposée dans la suite de ce chapitre.

3 Mesure par stéréo corrélation sur facette - GéoDIC-3D [Quinsat et al., 2016]

L'objectif de l'outil de mesure par vision, répondant aux contraintes de la mesure *In-situ*, est de détecter au plus tôt des éventuels écarts géométriques sur la pièce durant sa fabrication. L'utilisation de la stéréo-corrélation permet d'obtenir un résultat de mesure de l'ensemble de la surface en un temps restreint.

Nous proposons une méthode innovante, GéoDIC-3D, basée sur la stéréo-corrélation et s'appuyant sur les résultats de la calibration sur modèle CAO. Cette méthode permet d'obtenir des informations quant à l'éventuelle présence de zones d'écarts géométriques ainsi que les ordres de grandeur associés à ces écarts dans le repère FAO lié à la fabrication. Son originalité vient du fait que la calibration étant réalisée dans le repère FAO, la méthode d'analyse par stéréo-corrélation d'images (Digital Image Correlation - DIC) peut être réalisée à partir du modèle numérique de la pièce dans le repère FAO (figure 3.31).

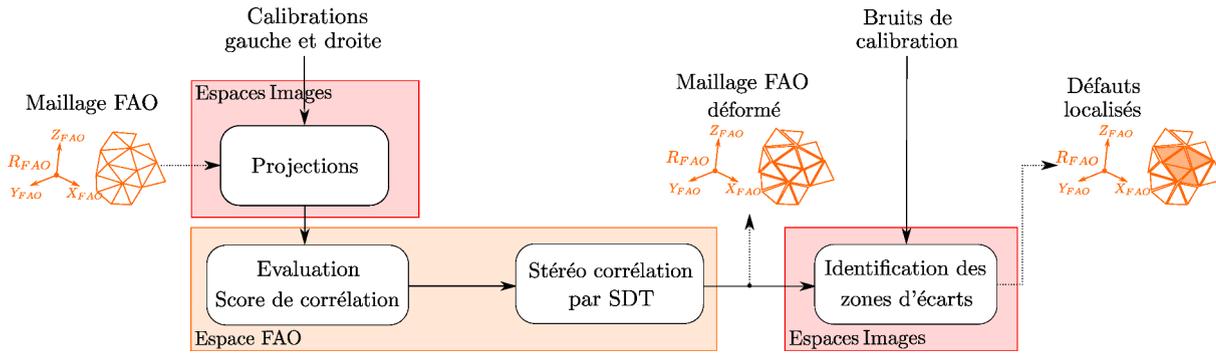


Figure 3.31 – Schéma général de la méthode GéoDIC-3D

De plus, la calibration dans le repère FAO permet également d'utiliser le modèle numérique de la pièce comme base pour la détermination des régions d'intérêt (ROI) sur les images. Les ROI représentent les régions ou zones des images sur lesquelles l'analyse par corrélation d'images est effectuée. Par exemple, dans le cas d'un modèle numérique sous forme de maillage représentant la pièce nominale, les projections d'une facette 3D sur les images deviennent des facettes 2D déformées. Ces facettes 2D projetées forment une région d'intérêt triangulaire sur chacune de images (figure 3.32) et sont ensuite analysées en 3 étapes :

- évaluer le score de corrélation sur les ROI droite et gauche pour chaque facette 3D projetée,
- déterminer le déplacement, à imposer à la facette 3D, minimisant le score de corrélation évalué, par torseur des petits déplacements,
- identifier les facettes 3D modélisant des zones d'écarts géométriques.

En présence d'écarts géométriques sur la surface de la pièce, les facettes du modèle nominal numérique 3D ne correspondent pas à la surface réelle. Dans ce cas, l'analyse des scores de corrélation sur les régions d'intérêt, construites à partir des projections de ces facettes 3D, met en avant des scores de corrélation élevés. En effet, l'écart entre le modèle numérique et la pièce réelle génère un mauvais appariement des 2 régions d'intérêt triangulaire et le score de corrélation est élevé. Inversement, lorsque les facettes du modèle numérique 3D représentent la surface réelle, l'appariement des régions d'intérêt est correct et le score de corrélation est faible.

Afin de différencier les facettes représentant une zone d'écarts géométriques de celles modélisant correctement la surface réelle, une méthode de déformation du maillage basée sur l'analyse des scores de corrélation et s'appuyant sur le torseur des petits déplacements (SDT) est proposée. Un déplacement 3D d'une facette du modèle numérique génère par projection sur les images de nouvelles zones d'intérêt triangulaire et ainsi une valeur de score de corrélation différente. À chacune des facettes 3D du modèle nominal, une minimisation du score de corrélation sur les zones d'intérêt est effectuée par application d'un ensemble de torseurs des petits déplacements à la facette 3D. Le maillage comprenant l'ensemble des facettes 3D déplacées après minimisation représente une image de la surface réelle. Les facettes ayant subi

les plus grands déplacements modélisent potentiellement des zones de surface comprenant des écarts géométriques.

Une dernière étape permet d'identifier les facettes modélisant des zones d'écarts géométriques. Elle s'appuie sur la comparaison des valeurs de déplacements des facettes, après minimisation des scores de corrélation, et des valeurs des bruits de calibration.

L'ensemble des étapes de la méthode GéoDIC-3D est décrit et illustré dans la suite de ce chapitre.

3.1 Évaluation du score de corrélation par facette

La première étape de la méthode GéoDIC-3D est l'évaluation des scores de corrélation à partir du maillage numérique FAO de la surface d'étude dans son état intermédiaire. Le modèle FAO d'une pièce comprend autant d'états intermédiaires de la pièce que d'opération d'usinage : ces états correspondent à des modèles numériques géométriques de la pièce suite aux différentes simulations d'opération d'usinage [Xú et al., 2016]. Le modèle numérique de la pièce dans son état intermédiaire utilisé pour la mesure par stéréo-corrélation est donc celui correspondant à l'opération d'usinage en cours d'inspection/contrôlée.

a) Calcul des scores de corrélation sur facette

La pièce, dans son état intermédiaire après l'opération d'usinage, est photographiée dans l'espace de la machine-outil par les deux caméras, situées de part et d'autre de l'ouverture principale de la machine-outil (figure 3.21). Au moment de la prise de vue, un mouchetis numérique est projeté sur la surface de la pièce étudiée grâce à un vidéo projecteur situé entre les 2 caméras.

Deux images de la pièce dans son état intermédiaire sont obtenues dans les repères R_{pg} et R_{pd} . Le maillage FAO, représentant la pièce dans son état intermédiaire, est projeté sur les 2 images à partir des 2 calibrations réalisées précédemment ($M_g \cdot T_g$ et $M_d \cdot T_d$). Chacune des facettes 3D du repère R_{FAO} se projette en facettes 2D (pixels) sur chaque image. Ainsi la facette $_i$ (figure 3.32) devient les facette $_i^g$ et facette $_i^d$ dans les repères image gauche R_{pg} et droite R_{pd} , chaque projection devient une région d'intérêt, appelées respectivement ROI g et ROI d .

La figure 3.33 illustre les projections gauche et droite d'une facette 3D sur les images. Les ROI obtenues sont des triangles déformés dans les 2 plans images, rouge pour l'image de gauche et bleu pour l'image de droite. Le calcul du score de corrélation est réalisé à partir de ces 2 régions triangulaires.

Les scores de corrélation présentés dans l'étude bibliographique du premier chapitre sont calculés sur des régions d'intérêts rectangulaires par différences de niveaux de gris pixel/pixel. Dans le cas de la stéréo-corrélation sur facette, il n'est pas possible de réaliser une différence pixel/pixel directement, car les régions d'intérêt 2D triangulaires sont de dimensions et d'aires différentes. Un pixel de la zone d'intérêt gauche (figure 3.33(a)) ne correspond donc pas au pixel de la zone d'intérêt droite (figure 3.33(b)). Pour évaluer le score de corrélation de la zone

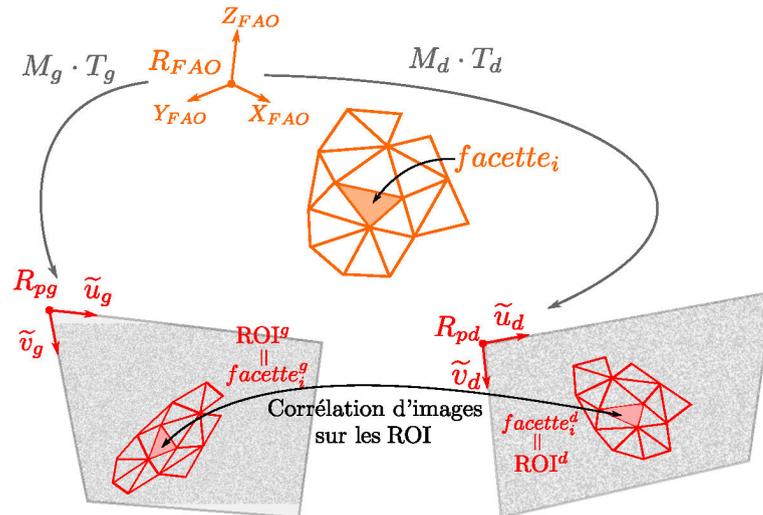
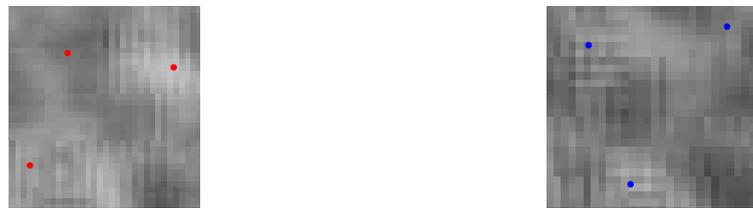


Figure 3.32 – Projections et définition des ROI gauche et droite



(a) Projection gauche

(b) Projection droite

Figure 3.33 – Régions d'intérêt pour le calcul du score de corrélation d'une facette

d'intérêt, une discrétisation de la facette 3D est réalisée dans le repère FAO. Sur la figure 3.34 la discrétisation de la facette_{*i*} 3D dans le repère FAO est schématisée. Les valeurs de niveau de gris de l'ensemble des points $X_{i,j}$ projetés sont utilisées pour déterminer le score de corrélation de la facette_{*i*}. Le pas de la discrétisation peut être variable, il doit être défini en fonction de plusieurs paramètres : taille de la facette, nombre de pixels par facette, taille du mouchetis, etc.

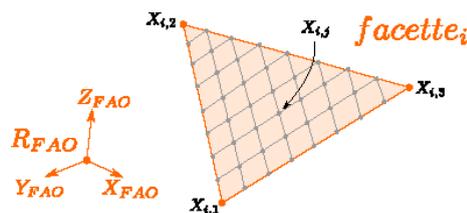
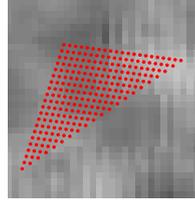


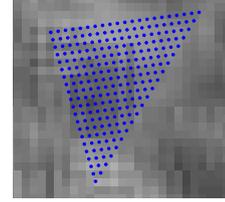
Figure 3.34 – Discretisation de la facette 3D pour le calcul du score de corrélation

Les points 3D $X_{i,j}$ générés à partir de la discrétisation de la facette_{*i*} sont projetés sur les images gauche et droite (figures 3.35 et 3.36), respectivement $x_{i,j}^g$ et $x_{i,j}^d$. Le score de corrélation peut ainsi être calculé en chacun des points de la discrétisation. La valeur du niveau de gris associé à un point projeté, $f^g(x_{i,j}^g)$ pour un point de l'image de gauche, est déterminée par une

interpolation bilinéaire des valeurs en niveaux de gris des pixels autour de ce point. Dans le cas du critère $ZSSD$ défini dans le chapitre 1, le score de corrélation de la facette, $\chi_{facette_i}^2$ est calculé en réalisant la somme au carré des résultats des différents points de la discrétisation. L'équation 3.17 est un exemple de calcul du score de corrélation pour la facette_{*i*} (critère $ZSSD$), avec $\bar{f}^g(x_i^g)$ et $\bar{f}^d(x_i^d)$ les valeurs moyennes des niveaux de gris des facettes g_i et d_i . La prise en compte des valeurs moyennes des niveaux de gris des facettes permet de compenser la variation de luminosité sur celles-ci.



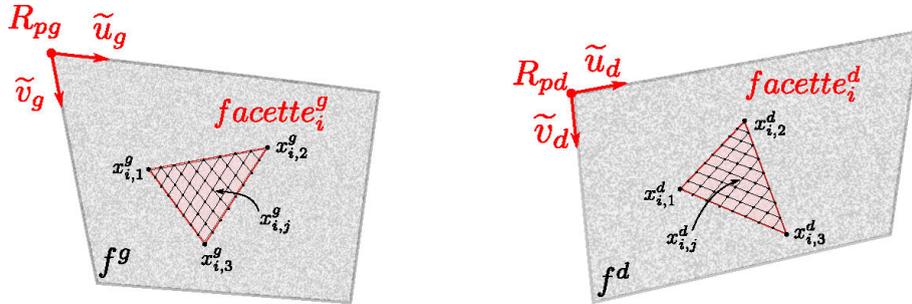
(a) Projection discrétisée gauche



(b) Projection discrétisée droite

Figure 3.35 – Calcul du score en chacun de points de la discrétisation

$$\chi_{facette_i}^2 = \sum_j \left[(f^g(x_{i,j}^g) - \bar{f}^g(x_i^g)) - (f^d(x_{i,j}^d) - \bar{f}^d(x_i^d)) \right]^2 \quad (3.17)$$


 Figure 3.36 – Projection des points obtenus par discrétisation de la facette_{*i*} pour le calcul du score de corrélation de la facette

La valeur du score de corrélation d'une facette 3D par analyse des ROI gauche et droite dépend de 2 paramètres : les résultats des calibrations gauche, droite et les écarts entre le modèle numérique représenté par la facette 3D et la surface réelle mesurée.

b) Analyse des scores de corrélation

Dans cette partie, le calcul et l'analyse des scores de corrélation sont réalisés sur un cas d'application afin de valider la faisabilité de la méthode d'évaluation des scores de corrélation. Pour cela, une surface plane est usinée sur une pièce de base circulaire. Un maillage plan est ainsi utilisé comme modèle FAO de la pièce dans son état intermédiaire. Cependant, durant l'opération de fabrication des écarts géométriques sont volontairement générés : une zone conique de pente faible $< 10^\circ$ est réalisée sur une partie de la surface plane (figure 3.37(a)). Une

zone plane reste présente sur la surface réelle, elle est considérée comme plan de référence : zone sans écarts géométriques. De ce fait, le maillage numérique plan représentant l'état intermédiaire de la pièce théorique ne correspond pas totalement à la surface réelle (figure 3.37(b)).

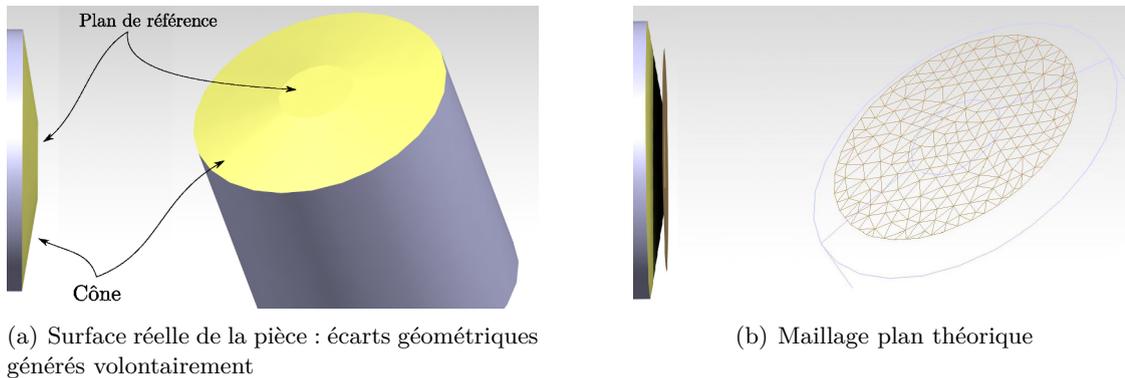


Figure 3.37 – Description de la pièce réalisée et mesurée pour la validation de la méthode GéoDIC-3D

La réalisation volontaire de la partie conique sur la pièce génère des écarts géométriques entre le maillage théorique et la surface réelle (figure 3.38(a)) : les scores de corrélation devront être élevés aux lieux des écarts géométriques (figure 3.38(b)).

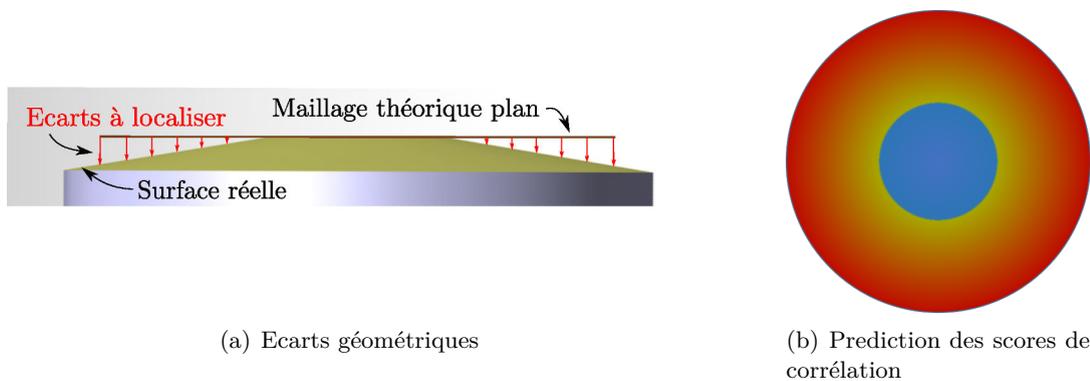


Figure 3.38 – Comparaison de la surface réelle et du maillage théorique plan

La figure 3.38(b) présente la cartographie de la prédiction attendue des scores de corrélation. La partie centrale en bleue correspond à la zone plane de la surface réelle (plan de référence de la figure 3.37(a)) : lieux théoriquement sans écarts géométriques entre la surface réelle et le maillage et donc avec de faibles scores de corrélation. Inversement la partie périphérique de la figure 3.38(b) correspond aux lieux des écarts géométriques entre la surface réelle et le maillage plan : les scores de corrélation devraient être élevés.

Cette pièce de validation est réalisée sur un tour et est ensuite mesurée avec un palpeur à contact monté sur une MMT. Le modèle CAO représentant une image de la surface réelle est réalisé par retroconception à la suite de la mesure. Ainsi, nous pouvons prédire les écarts géométriques par comparaison du modèle CAO reconstruit et du maillage plan du modèle FAO

de la pièce dans son état intermédiaire (figure 3.38(a)). La pièce est ensuite positionnée dans les mors du montage d'usinage présenté dans la partie 2.5. Ce positionnement est mesuré avec le palpeur mécanique sur la MMT afin de réaliser l'assemblage CAO $\{porte - pièce + pièce\}$ et ainsi avoir l'ensemble des modèles numériques dans le repère FAO, ce repère tant le repère de calibration (figure 3.39).

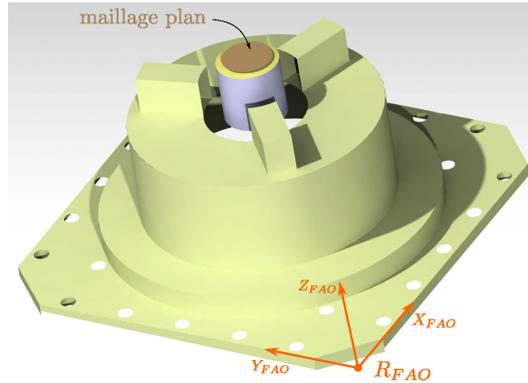


Figure 3.39 – Modèle numérique du maillage dans le repère FAO du montage d'usinage

La position du maillage plan construit sur la base de la pièce réelle est ainsi définie par rapport au repère FAO. Les 2 caméras ont préalablement été calibrées à partir du montage d'usinage, de ce fait la mesure peut directement être effectuée dans le repère FAO. Les images utilisées pour la mesure et la calibration sont représentées sur la figure 3.40.

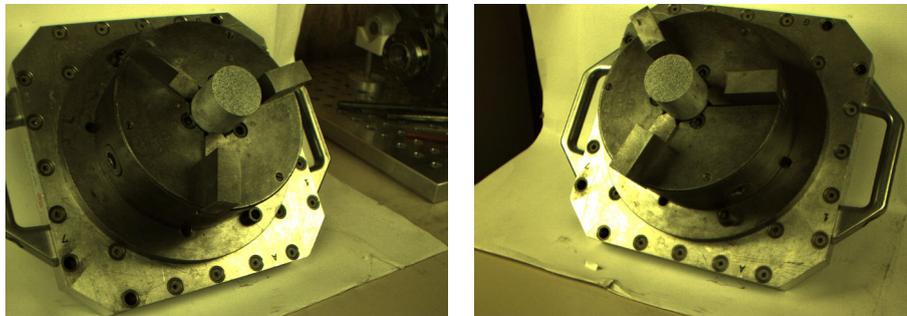


Figure 3.40 – Images gauche et droite utilisées pour la calibration et l'analyse par stéréo corrélation sur facette (pièce test dans le montage d'usinage)

a) Influence des écarts entre le modèle numérique et le modèle réel

Après calibration des 2 caméras, le maillage plan 3D, représentant la pièce dans son état intermédiaire, est projeté sur chacune des images. Les projections obtenues sont représentées sur la figure 3.41 : en bleu, la projection du maillage 3D sur l'image de gauche et en rouge, la projection du maillage 3D sur l'image de droite.

Les calculs des scores de corrélation définis précédemment sont réalisés sur les ROI définies par les projections gauche et droite (figure 3.41). Les scores de corrélation χ sont évalués sur chacune des facettes du modèle FAO de l'état intermédiaire. La cartographie des valeurs du score de corrélation sur le maillage est représentée sur la figure 3.42.

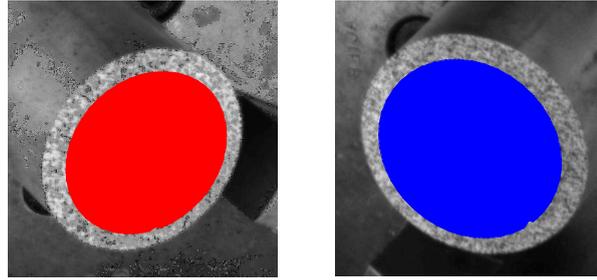
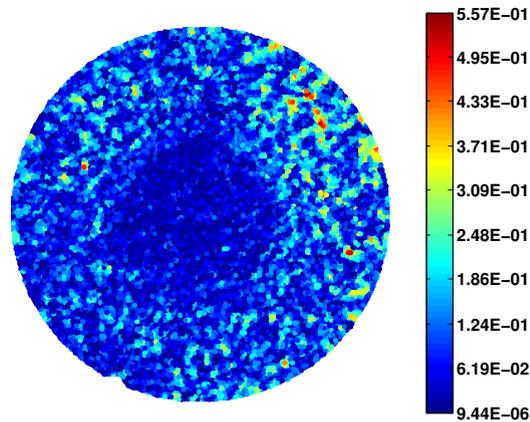


Figure 3.41 – Projection du maillage 3D du repère FAO sur les images

Figure 3.42 – Cartographie des scores de corrélation χ sur l'ensemble du maillage 3D

Sur la partie centrale de la pièce, les résidus de corrélation sont faibles, comme attendus (figure 3.38) : le maillage plan théorique correspond à la surface réelle sur cette partie de la surface. Des variations de résidus apparaissent sur toute la périphérie de la pièce, en cohérence avec les écarts géométriques que l'on cherche à évaluer : le maillage plan théorique ne correspond pas à la surface réelle sur la périphérie de la pièce.

L'analyse des scores de corrélation sur le maillage FAO proposée permet d'obtenir très rapidement une information sur la présence d'écarts géométriques ou non. Cependant, les bruits de calibration, mis en avant dans la partie 2.5, ne sont pas pris en compte. Ces bruits génèrent des écarts de projection du maillage sur les images et donc des écarts sur les valeurs des scores de corrélation évalués. Les résultats obtenus précédemment (figure 3.42) permettent en première approximation de localiser les écarts géométriques.

b) Influence des bruits de calibration

Une calibration différente génère des projections différentes du maillage 3D sur chacune des images. Afin d'évaluer l'influence des bruits de calibration de chacune des caméras sur les valeurs des scores de corrélation, des calculs de score de corrélation pour différentes positions de projection ont été effectués, correspondant à différentes calibrations. La projection de la facette 3D sur l'image de gauche est la même pour l'ensemble des essais, alors que la projection sur l'image de droite est décalée de quelques pixels dans le plan image pour la série de tests suivant les 2 directions, \tilde{u}_d et \tilde{v}_d du repère pd (figure 3.43).

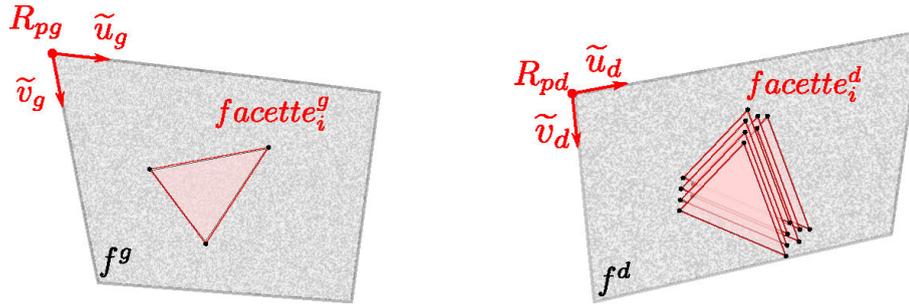


Figure 3.43 – Décalage dans le plan image de la projection sur l’image de droite de la facette_{*i*}

À chacune des positions de la projection droite, un score de corrélation χ est calculé, et les valeurs des scores de corrélation ainsi calculés en fonction des différentes positions de la projection de la facette_{*i*} sont reportées sur la figure 3.44. Une nette diminution du score de corrélation peut-être observée pour un décalage particulier de $\Delta\tilde{u}_d$ et $\Delta\tilde{v}_d$ de la facette sur l’image droite.

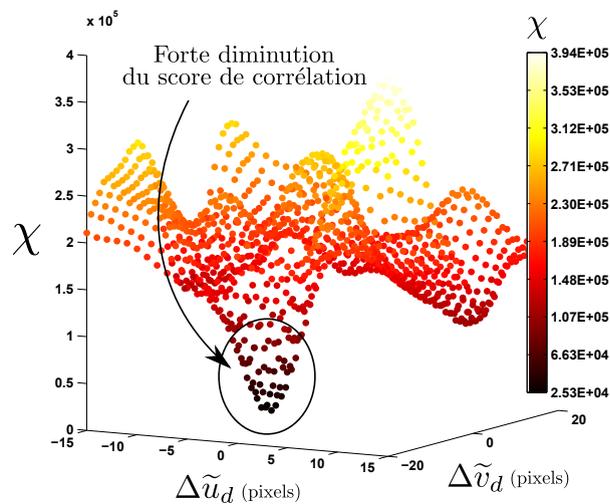


Figure 3.44 – Scores de corrélation pour différentes positions 2D de la projection sur l’image de droite

Cette étude met en avant l’influence du résultat de calibration sur le résultat de l’analyse par corrélation. En effet, un décalage de quelques pixels de la projection droite de la facette dans le plan image (suivant \tilde{u}_d et \tilde{v}_d) modifie significativement le résultat d’analyse par corrélation. Une zone comprenant des écarts géométriques peut ainsi avoir un score de corrélation faible, et inversement une zone sans écarts peut être considérée comme mauvaise du fait de son grand score de corrélation.

Deux résultats d’analyse par corrélation sur facette sont représentés sur la figure 3.45. La cartographie des scores de corrélation pour une erreur de projection sur l’image de droite d’environ 5 pixels (suivant \tilde{u}_d et \tilde{v}_d) est représentée sur la figure 3.45(a). Sur la figure 3.45(b), les scores de corrélation de la facette_{*i*} pour une erreur de projection sur l’image de droite de l’ordre du pixel sont représentés. Elle correspond à la zone de faibles scores sur la figure 3.44.

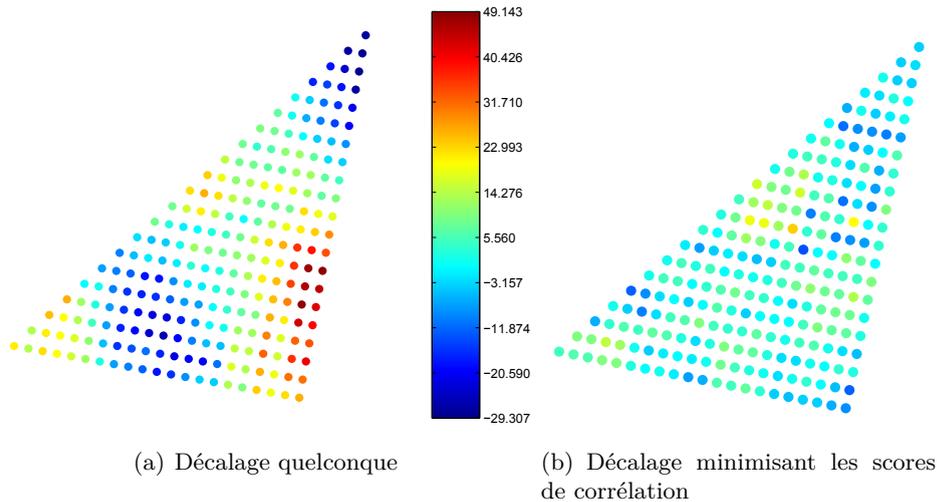


Figure 3.45 – Scores de corrélation pour différents décalages de la projection de droite

Une nette diminution des scores de corrélation est observée entre les deux cartographies de la figure 3.45. Le calcul des scores de corrélation sur facette est donc une méthode sensible au résultat des bruits de calibration. Afin d’obtenir une première approximation de la localisation des écarts géométriques par analyse des scores de corrélation comme sur la figure 3.42, il est nécessaire que les bruits de calibration n’excèdent pas quelques pixels (environ 3-4 pixels maximum).

Cependant, l’analyse des scores de corrélation proposée n’est pas suffisante pour conclure quant à la présence d’écarts géométriques ou non sur la pièce. Ainsi, nous proposons une méthode permettant d’identifier les facettes représentant une zone qui comprend des écarts géométriques. Cette méthode est une optimisation basée sur la minimisation de la valeur du score de corrélation pour chacune des facettes. La minimisation du score de corrélation est réalisée à travers la recherche de la position et de l’orientation de la facette 3D dans le repère FAO par l’utilisation des torseurs des petits déplacements. Les facettes ayant subi les plus grands déplacements seront considérées comme représentant une zone d’écarts géométriques.

3.2 Stéréo-corrélation par torseur des petits déplacements (SDT)

La méthode que nous proposons est une méthode locale appliquée à chacune des facettes du maillage, indépendamment les unes des autres. Elle s’appuie sur l’évaluation du score de corrélation par facette détaillé dans la partie précédente. L’originalité de cette méthode est la minimisation du score de corrélation de la facette évaluée par l’application du torseur des petits déplacements à la facette 3D. Les petits déplacements du barycentre de la facette et les petites rotations de la normale à la facette autour du barycentre permettent de trouver la configuration 3D de la facette minimisant le score de corrélation (figure 3.46).

Dans l’espace 3D, repère FAO, la configuration d’une facette est définie par la position de son barycentre X_{B_i} et par son orientation caractérisée par sa normale \vec{n}_i . Le déplacement de la facette i dans le repère FAO R_{FAO} conduit à des modifications de chaque projection dans

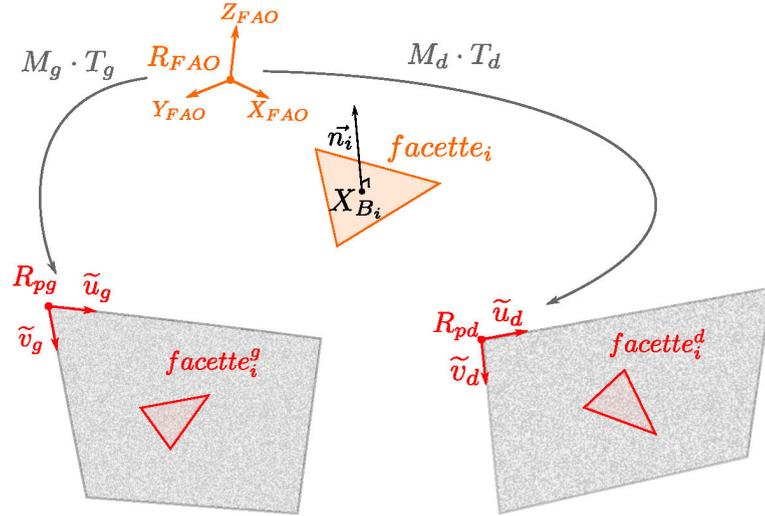


Figure 3.46 – Principe de l'optimisation en position et orientation de chacune des facettes

les 2 plans image, chaque nouvelle configuration donnant lieu à un nouveau score de corrélation. L'objectif de la stéréo-corrélation par torseur des petits déplacements est de déterminer le déplacement de la facette tel que le score de corrélation pour la facette considérée soit minimal.

Soit f^g et f^d les valeurs en niveau de gris des images gauche et droite. À l'image gauche f^g est associée le repère R_{pg} et à l'image droite f^d , le repère R_{pd} (figure 3.36). La facette $_i$ 3D du repère FAO a pour projections sur les 2 images les facettes $_i^g$ et facettes $_i^d$. Les points de la facette discrétisée sont notés $X_{i,j}$ dans le repère FAO et $x_{i,j}^g$, $x_{i,j}^d$ respectivement dans les repères R_{pg} et R_{pd} (figures 3.34 et 3.36).

Soit un point x_i^g de l'image de gauche et $f^g(x_i^g)$ la valeur du niveau de gris calculée en ce point, et soit x_i^d le point équivalent sur l'image de droite et $f^d(x_i^d)$ la valeur du niveau de gris de ce point sur cette image, la conservation de la luminance revient à écrire :

$$f^g(x_i^g + dx_i^g) = f^d(x_i^d + dx_i^d) \quad (3.18)$$

où dx_i^g et dx_i^d sont les champs de déplacement calculés par minimisation de la différence entre l'image de gauche f_g et l'image de droite f_d sur chacun des points de discrétisation j de la facette $_i$ (figure 3.36) :

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^n |f^g(x_{i,j}^g + dx_{i,j}^g) - f^d(x_{i,j}^d + dx_{i,j}^d)|^2 \quad (3.19)$$

Afin de simplifier la résolution du problème précédent, une estimation des valeurs de $f^g(x_{i,j}^g + dx_{i,j}^g)$ et de $f^d(x_{i,j}^d + dx_{i,j}^d)$ est obtenue par un développement limité au premier ordre :

$$\begin{cases} f^g(x_{i,j}^g + dx_{i,j}^g) \cong f^g(x_{i,j}^g) + \frac{\partial f^g}{\partial x_{i,j}^g} \cdot dx_{i,j}^g \\ f^d(x_{i,j}^d + dx_{i,j}^d) \cong f^d(x_{i,j}^d) + \frac{\partial f^d}{\partial x_{i,j}^d} \cdot dx_{i,j}^d \end{cases} \quad (3.20)$$

La fonction à minimiser devient alors :

$$\chi_{lin,i}^2 = \sum_{j=1}^n \left| f^g(x_{i,j}^g) + \frac{\partial f^g}{\partial x_{i,j}^g} \cdot dx_{i,j}^g - f^d(x_{i,j}^d) - \frac{\partial f^d}{\partial x_{i,j}^d} \cdot dx_{i,j}^d \right|^2 \quad (3.21)$$

Les déplacements 2D recherchés $dx_{i,j}^g$ et $dx_{i,j}^d$ peuvent être définis par le déplacement dB_i dans repère FAO :

$$dx_{i,j}^g = \frac{\partial x_{i,j}^g}{\partial X_{i,j}} \cdot \frac{\partial X_{i,j}}{\partial B_i} \cdot dB_i \quad \text{et} \quad dx_{i,j}^d = \frac{\partial x_{i,j}^d}{\partial X_{i,j}} \cdot \frac{\partial X_{i,j}}{\partial B_i} \cdot dB_i \quad (3.22)$$

avec, $\frac{\partial x_{i,j}^{g/d}}{\partial X_{i,j}}$ matrice $n * n$, $\frac{\partial X_{i,j}}{\partial B_i}$ matrice $n * 6$ et

$$dB_i = [dn_i \quad dX_{B_i}]' = [\alpha_i \quad \beta_i \quad \gamma_i \quad u_i \quad v_i \quad w_i]' \quad (3.23)$$

Où dB_i représente les composantes du torseur de petits déplacements de la facette $_i$ en son barycentre dans le repère FAO (équation 3.24), avec le petit déplacement du barycentre dX_{B_i} de la facette dans le repère FAO et la petite rotation de la normale à la facette dn_i en son barycentre X_{B_i} dans le système d'axes du repère FAO. La valeur du petit déplacement déterminée dB_i est imposée à la facette $_i$ par itération jusqu'à convergence du minimum du score de corrélation sur la facette.

$$\{T_{sd}(facette_i)\} = \begin{Bmatrix} \alpha_i & u_i \\ \beta_i & v_i \\ \gamma_i & w_i \end{Bmatrix}_{X_{B_i}, R_{FAO}} \quad (3.24)$$

À partir de cette méthode d'optimisation, une position et une orientation sont imposées au barycentre et à la normale pour chacune des facettes du maillage numérique. Les nouvelles positions des 3 nœuds de la facette $_i$ dans le repère FAO ($X_{i,1}, X_{i,2}$ et $X_{i,3}$) sont calculées à partir de déplacements du point X_{B_i} et de la rotation de la normale \vec{n}_i . Ces positions sont déterminées sous l'hypothèse que la facette est indéformable. Chacune des facettes subit ainsi un mouvement de corps rigide dans le repère FAO. Le maillage final est donc un maillage discontinu (figure 3.47).

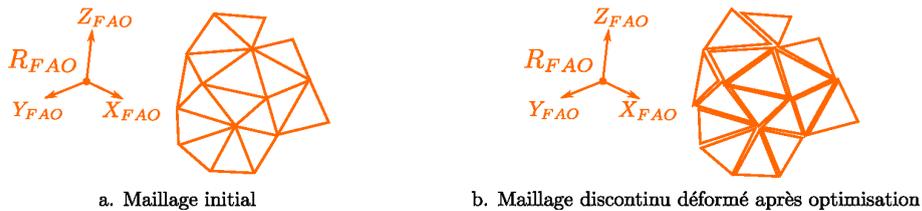


Figure 3.47 – Maillage initial et maillage déformé par stéréo corrélation sur facette

La méthode de stéréo corrélation par torseur des petits déplacements proposés est réalisée sur la pièce présentée précédemment (figure 3.37(a)). La solution initiale utilisée est le maillage plan (figure 3.37(b)) issu du modèle FAO de la pièce dans son état intermédiaire. La cartographie d'analyse des scores de corrélation pour cette solution initiale est représentée sur la figure 3.48(a). Le résultat final, après convergence des scores de corrélation par SDT, est

représenté sur la figure 3.48(b). Une forte diminution des scores de corrélation est observée sur l'ensemble de la surface et particulièrement sur la partie périphérique modélisant la zone conique de la pièce, lieux des écarts géométriques.

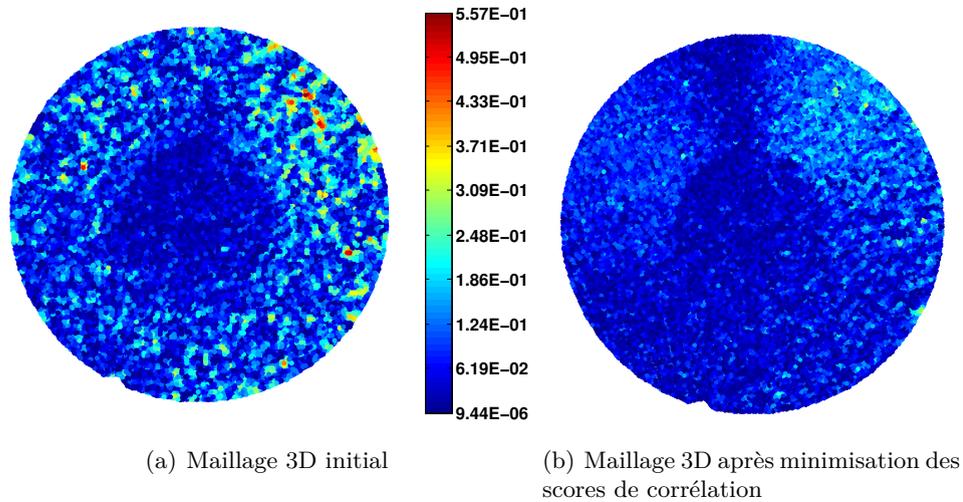


Figure 3.48 – Cartographies des résidus de corrélation

Cependant, afin d'obtenir ce résultat d'optimisation, il est nécessaire d'utiliser une solution initiale proche de la solution finale. En effet, comme nous l'avons remarqué sur la figure 3.44, plusieurs minimums locaux du score de corrélation existent sur un faible zone d'étude (environ 10 pixels). Une méthode permettant de déterminer une solution initiale proche de la solution optimisée et basée sur la recherche d'heuristique est proposée dans la partie suivante. Cette méthode de recherche d'heuristique s'applique à chacune des facettes du maillage et à l'avantage de proposer un résultat proche du résultat final en un temps restreint.

3.3 Recherche d'une solution initiale

Dans cette partie, nous proposons une démarche de recherche de solution initiale pour que l'algorithme d'optimisation par torseur des petits déplacements converge directement vers la solution recherchée. La recherche d'heuristique pour chacune des facettes proposée permet d'obtenir une solution initiale proche de la solution finale.

a) Recherche d'une heuristique par facette

La recherche d'heuristique est une technique d'optimisation consistant à évaluer la fonction à optimiser pour différentes solutions, solutions choisies de manière aléatoire ou imposée. Dans le cas de la mesure par stéréo-corrélation sur facette, l'objectif est de déterminer la position et l'orientation de la facette dans l'espace 3D telles que le score de corrélation soit le minimum. 6 inconnues sont estimées par cette mesure les 3 valeurs de déplacements de barycentre de la facette dans le repère FAO et l'orientation de la normale à la facette autour du barycentre. Dans le cas de la détermination d'une solution initiale par la recherche d'une heuristique, l'analyse des 6 degrés de liberté du problème d'optimisation devient une explosion combinatoire.

Afin de déterminer une solution initiale en un temps restreint, nous avons choisi d'étudier une seule direction de recherche : la direction suivant la normale à la facette. Le principe de recherche d'une solution minimale par heuristique suivant la direction de la normale à la facette est schématisé par la figure 3.49. La facette_{*i*} est décalée suivant sa normale dans différentes positions dans un intervalle choisi. À chaque position de la facette_{*i*} dans le repère FAO, le score de corrélation est évalué. Finalement, la position pour laquelle le score de corrélation est le minimum est retenue et sera considérée comme la nouvelle position initiale de la facette_{*i*}.

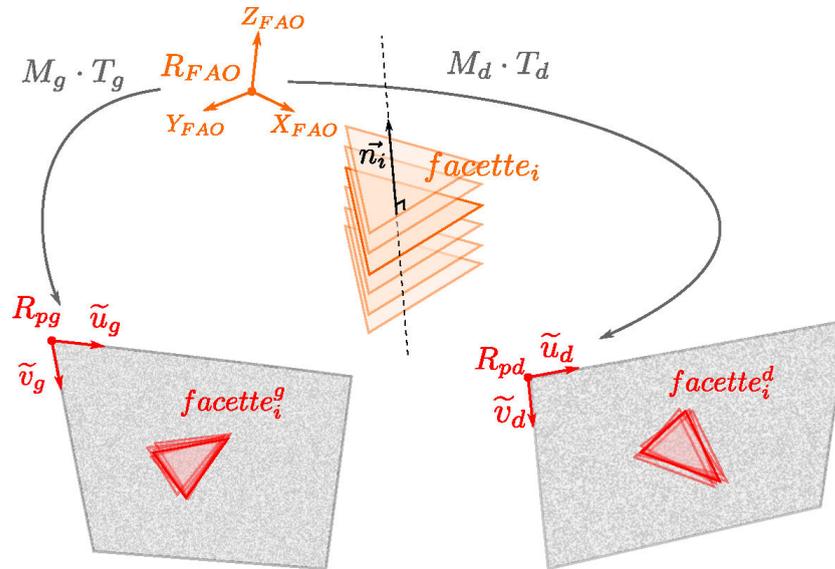


Figure 3.49 – Principe de la recherche d'une solution initiale - Optimisation par recherche d'heuristique suivant la normale à la facette

L'intervalle de recherche est défini par expertise sur la connaissance des ordres de grandeur des écarts géométriques obtenus en d'usinage (environ 2-3mm). Il est donc choisi de rechercher la valeur du décalage de la facette suivant sa normale dans l'intervalle $[-3; +3]$ par rapport à sa position initiale 0.

b) Résultats obtenus par la recherche d'heuristiques

Cette méthode d'optimisation est appliquée à la surface supérieure de la pièce test (cône et plan de référence définie précédemment). Les résultats pour une facette_{*i*} modélisant une zone de la surface conique sont présentés sur la figure 3.50. Sur la première figure 3.50(a), la valeur du résidu de la facette_{*i*} par rapport à la valeur du décalage de cette facette suivant sa normale dans l'intervalle défini $[-3; +3]$ est tracée. Plusieurs minimums locaux des scores de corrélation sont déterminés dans cet intervalle : cela justifie d'autant plus la nécessité de proposer une solution initiale proche de la solution recherchée.

L'analyse de l'ensemble des résidus évalués dans l'intervalle $[-3; +3]$ permet de déterminer le décalage de la facette_{*i*} pour lequel le résidu de corrélation est le minimum. Dans le cas de la facette_{*i*} (figure 3.50(a)), le minimum du score de corrélation est obtenu pour un décalage de $-1.7mm$ suivant la normale à la facette_{*i*}. Sur les figures 3.50(b) et 3.50(c), les cartographies des résidus en chacun des points de discrétisation de la facette_{*i*} sont tracés. Les résidus de

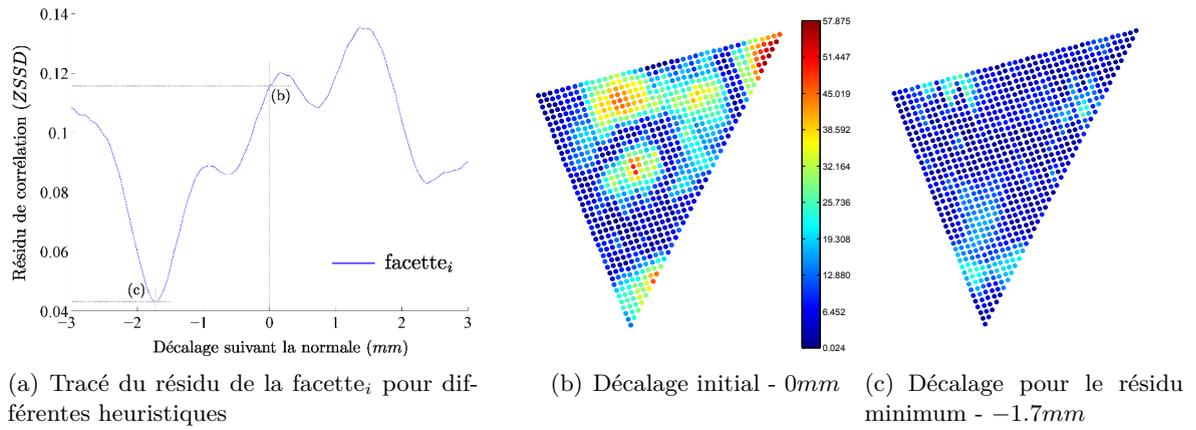


Figure 3.50 – Résultat de la recherche d’une heuristique pour une facette

la figure 3.50(b) sont obtenus dans le cas d’un décalage nul de la facette_i, c’est à dire avec la facette dans son état initial. Les résidus de la figure 3.50(c) sont obtenus dans le cas du décalage minimisant le résidu de la facette_i, soit $-1.7mm$. La nette diminution du résidu de corrélation remarquée sur la courbe de la figure 3.50(a) est aussi observée par comparaison des 2 cartographies (figures 3.50(b) et 3.50(c)).

Le maillage complet de la surface supérieure de la pièce test obtenue après recherche d’heuristique suivant les normales aux facettes est représenté en vert sur la figure 3.51. En orange, le maillage initial de la surface est représenté (plan circulaire figure 3.37(b)). Le maillage obtenu par recherche d’heuristique suivant la normale à la facette définit la solution initiale pour l’optimisation par SDT.

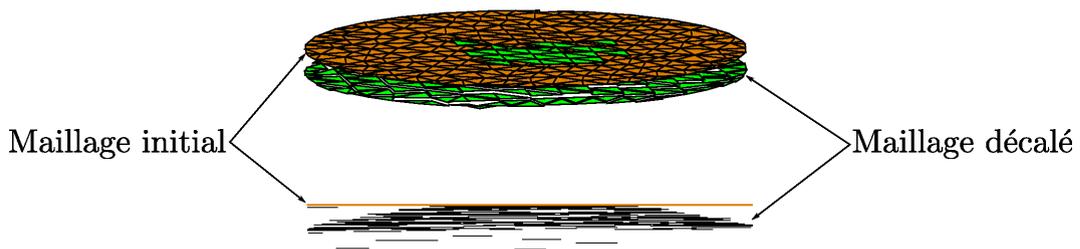


Figure 3.51 – Maillages avant et après recherche d’heuristiques suivant les normales aux facettes

Sur les figures 3.52, les cartographies des résidus de corrélation des différentes facettes sont représentées. Comme précédemment une nette diminution des résidus de corrélation est observée entre ces deux cartographies.

Le maillage obtenu suite à la recherche d’heuristique (maillage discontinu vert sur la figure 3.51) est utilisé alors comme solution initiale pour la mesure par stéréo-corrélation sur facette. Cependant, comme la recherche d’heuristique est effectuée suivant l’unique direction de la normale à la facette, certaines solutions d’heuristique ne sont correctes. Sur la figure 3.51, plusieurs déplacements de facettes (facettes vertes du maillage décalé) ne correspondent pas à la solution prédite. Ces erreurs sont des cas isolés, mais doivent être prises en considération

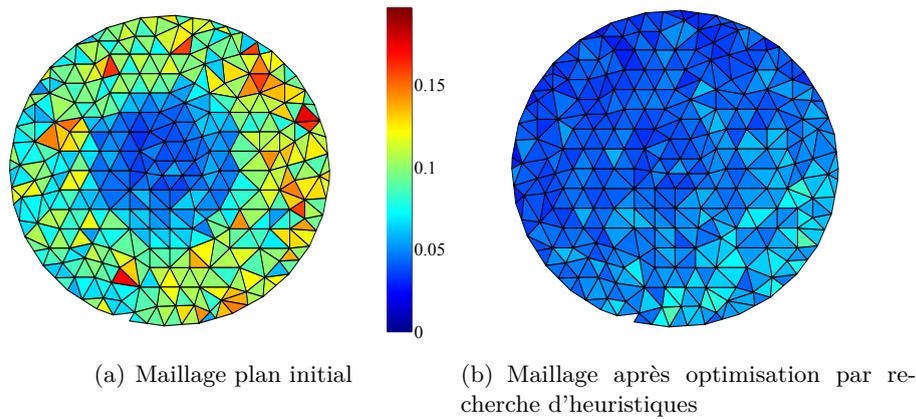


Figure 3.52 – Cartographies des scores de corrélation par facette

dans la suite de la méthode Géo3D-DIC.

c) Traitement des facettes isolées

L'objectif de cette partie est de prendre en compte les éventuelles erreurs liées à la recherche d'heuristique et ainsi proposer un maillage initial pour la mesure par stéréo corrélation sur facette par SDT. Pour cela, un lissage est effectué sur les résultats de la recherche d'heuristiques afin d'obtenir un maillage sans facettes isolées. Les cartographies des valeurs des décalages de chacune des facettes avant et après lissage sont représentées sur la figure 3.53. Quelques facettes isolées sont observées sur la première cartographie (figure 3.53(a)).

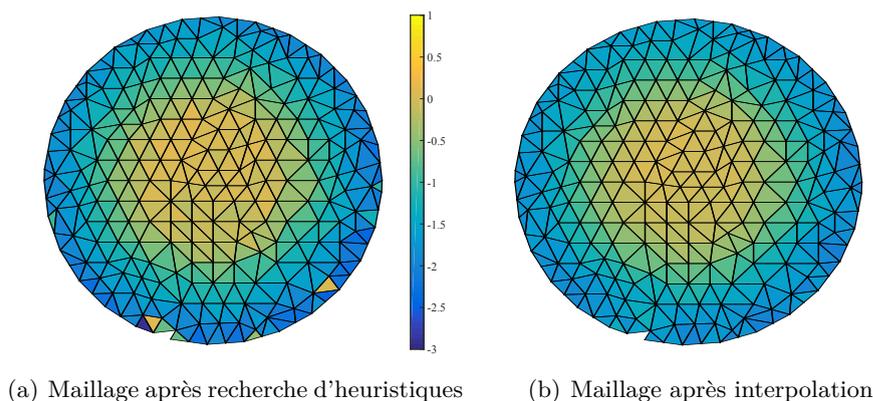


Figure 3.53 – Cartographies des valeurs des décalages des facettes suivant leurs normales

Un lissage du maillage permet de s'affranchir de ces cas isolés. Soit une facette_{*i*} du maillage obtenu par recherche d'heuristiques, le décalage de cette facette est égal à la moyenne des décalages des facettes voisines à la facette_{*i*}. Une facette est considérée comme facette voisine à la facette_{*i*}, si au moins un de ses sommets est un sommet de la facette_{*i*}. Ainsi, la cartographie de la figure 3.53(b) est obtenue. Ce maillage est utilisé comme solution initiale pour la mesure par stéréo corrélation sur facette par SDT.

3.4 Analyse du déplacement des facettes

La méthode de stéréo corrélation proposée permet de déformer le maillage 3D numérique de manière à minimiser les scores de corrélation de chacune des facettes. À chaque itération, un torseur de petits déplacements est associé à la facette considérée. Après convergence du score de corrélation de la facette, le mouvement complet de celle-ci est la somme de l'ensemble des petits déplacements 3D de la facette. Il se peut alors que la facette ait subi un grand déplacement 3D dans sa globalité.

Le but de l'outil de pré-mesure, développé dans l'ensemble de ce chapitre, est de fournir une réponse sur la présence ou non d'écarts géométriques sur la pièce, ainsi que leurs éventuelles localisations. Des valeurs seuils sur les déplacements des facettes dans les plans images gauche et droite sont définies afin de distinguer les facettes modélisant des zones d'écarts géométriques et les facettes correspondant aux zones sans écarts géométriques. Ces valeurs seuils sont définies à partir des résultats de bruit de calibration en pixels des caméras (partie e)). Les bruits de calibration sont comparés aux déplacements des facettes. Un déplacement de la facette supérieur au bruit de calibration permet de conclure sur la présence d'écarts géométriques sur la zone modélisée par la facette. Inversement, un déplacement de la facette inférieur au bruit de calibration ne permettra pas de conclure quant à la présence d'écarts géométriques. La méthode d'analyse proposée pour permettre la distinction des facettes du maillage correspondant ou non à des zones d'écarts géométriques est schématisée sur la figure 3.54.

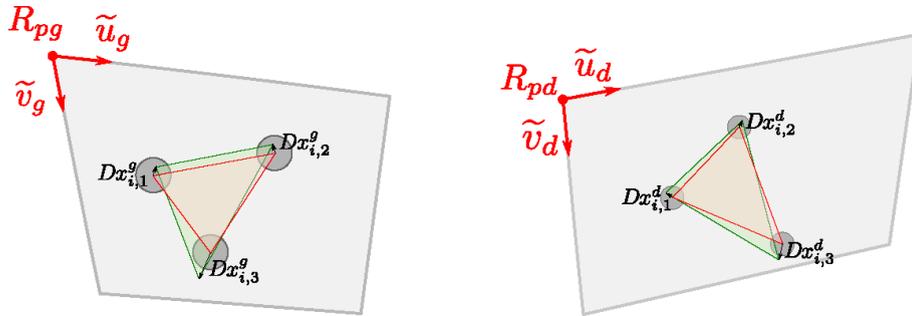


Figure 3.54 – Méthode de tri des facettes dans les plans image

Cette analyse est réalisée directement dans les plans image gauche et droite, les bruits de calibration obtenus à l'issue des calibrations et résumés dans le tableau 3.6 sont utilisés comme valeurs seuils pour l'analyse. À chaque point 3D projeté dans un des plans image, une incertitude sur la projection est associée et peut être représentée par un cercle ayant pour rayon la valeur du bruit de calibration. Les cercles d'incertitudes des projections droite et gauche sont représentés par des cercles gris autour des nœuds initiaux de la facette rouge sur la figure 3.54. Les rayons des cercles étant respectivement σ_0^g et σ_0^d pour l'image de gauche et de droite du tableau 3.6. Après déformation du maillage initial suite à l'optimisation, il est possible de réaliser les projections de la nouvelle facette dans les 2 plans image (triangles verts sur la figure 3.54). Ainsi, le calcul des distances entre les nœuds initiaux et les nœuds optimisés permet d'obtenir les éléments de comparaison aux bruits de calibration. Si au minimum, une des distances entre les nœuds initiaux et les nœuds optimisés $Dx_{i,j}^g$ ou $Dx_{i,j}^d$ est supérieure

aux bruits en pixels de calibration (respectivement σ_0^g et σ_0^d) alors la facette modélise une zone comprenant des écarts géométriques. Sur la figure 3.54, il suffit qu'au moins un des nœuds des triangles verts soit en dehors des cercles gris pour que la facette modélise une zone comprenant des écarts géométriques. L'analyse des déplacements de la facette proposée est synthétisée par l'algorithme 1.

Algorithme 1 Analyse des déplacements de la facette

```

 $Dx_{i,j}^g \leftarrow$  déplacement en pixels du nœud $_j$  de la facette $_i$  sur l'image gauche
 $Dx_{i,j}^d \leftarrow$  déplacement en pixels du nœud $_j$  de la facette $_i$  sur l'image droite
 $\sigma_0^g \leftarrow$  bruit de calibration en pixels de la caméra gauche
 $\sigma_0^d \leftarrow$  bruit de calibration en pixels de la caméra droite
for  $i=1$  to nombre de facettes do
    if  $\{Dx_{i,j}^g\} < \sigma_0^g$  or  $\{Dx_{i,j}^d\} < \sigma_0^d$  then
        facette $_i$  ok
    else
        facette $_i$  ko
    end if
end for
    
```

Les résultats de l'analyse des déplacements pour la pièce test sont présentés sur la figure 3.55. Les figures 3.55(a) et 3.55(b) présentent les cartographies des déplacements moyens gauche et droite en pixels de chacune des facettes, ces déplacements étant définis par l'équation 3.25 pour la facette $_i$.

$$D_{i,moy}^g = \frac{1}{3} \sum_{j=1:3} Dx_{i,j}^g \quad \text{et} \quad D_{i,moy}^d = \frac{1}{3} \sum_{j=1:3} Dx_{i,j}^d \quad (3.25)$$

La figure 3.55(c) représente les résultats de l'analyse des déplacements et ainsi le résultat de tri des facettes après déplacements.

Plusieurs remarques peuvent être apportées par l'analyse des cartographies des déplacements moyens des facettes représentées sur les figures 3.55(a) et 3.55(b). Des déplacements en pixels quasi nuls peuvent être observés au centre de la pièce. Les facettes 3D équivalentes à la zone centrale de la pièce ont été très peu déplacées par la mesure par stéréo-corrélation sur facette. À l'opposé, plus les facettes sont éloignées du centre de la pièce, plus les déplacements en pixels augmentent : environ 12 pixels de décalages pour les facettes les plus éloignées. Ces résultats sont cohérents avec ceux attendus, connaissant la géométrie de la surface réelle de la pièce (figure 3.38).

Finalement, un léger décalage de l'ensemble des déplacements est observé sur les figures 3.55(a) et 3.55(b)). Cette excentration est due aux prises de vues des caméras et à leur position par rapport à la pièce. Pour des déplacements 3D équivalents, les déplacements 2D dans les images ne sont pas les mêmes.

Concernant le tri des facettes, les bruits de calibration estimés dans la partie précédente sont utilisés comme valeurs seuils : $\sigma_0^g = 1.64$ pixels et $\sigma_0^d = 1.68$ pixels. Les facettes répondant à la condition définie dans l'algorithme 1 sont représentées en jaune sur la figure 3.55(c). Ces facettes n'ont quasiment pas subi de déplacement, le modèle numérique initial de ces facettes

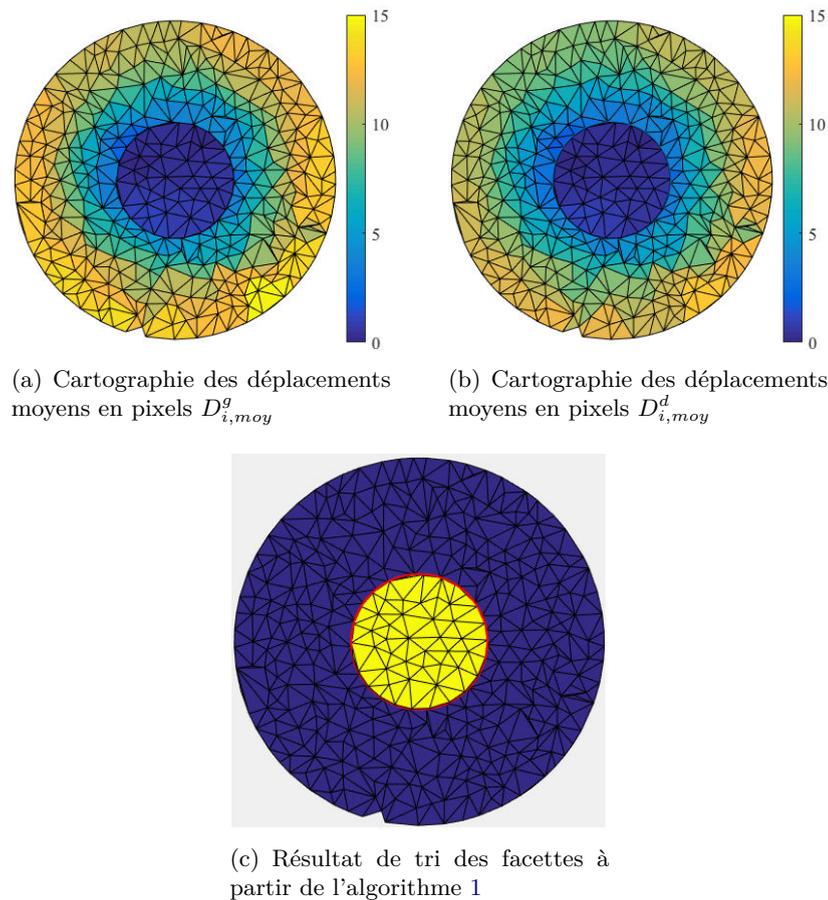


Figure 3.55 – Calcul des déplacements (pixels) et application de l'algorithme de tri des facettes

correspond à la surface réelle de la pièce. La zone jaune correspond alors à une zone de la pièce sans écarts. À l'inverse, les facettes ne répondant pas au critère défini précédemment sont représentées en bleu. Le modèle numérique initial associé à ces facettes ne correspond donc pas à la surface réelle de la pièce. La zone bleue correspond alors à une zone d'écarts géométriques sur la pièce réelle. L'excentration remarquée sur la cartographie précédente figure 3.55(a) est aussi constatée sur le résultat de tri du maillage.

Dans cette partie, une méthode originale de mesure par stéréo corrélation par torseur de petits déplacements sur facette est présentée. Cette méthode se base sur la minimisation du score de corrélation de la facette par déplacements de la facette dans l'espace 3D (repère FAO). L'analyse des résultats de cette mesure et la comparaison aux résultats de calibration permettent de valider et distinguer les zones de la pièce comprenant des zones d'écarts de celles n'en comprenant pas.

4 Conclusions

Dans cette partie, un outil de pré-mesure par vision est proposé. Il est composé de 2 principales étapes :

- la calibration sur modèle CAO

- la méthode GéoDIC-3D de mesure par stéréo-corrélation sur facette et SDT.

Cet outil s'intègre entre une opération de fabrication et une éventuelle phase de mesure de la surface usinée ; il a l'avantage de donner une réponse quant à la présence d'écarts géométriques sur la surface usinée (figure 3.56). Ainsi, il permet de déclencher une phase de mesure si des écarts sont présents, ou bien de passer directement à l'opération d'usinage suivante.

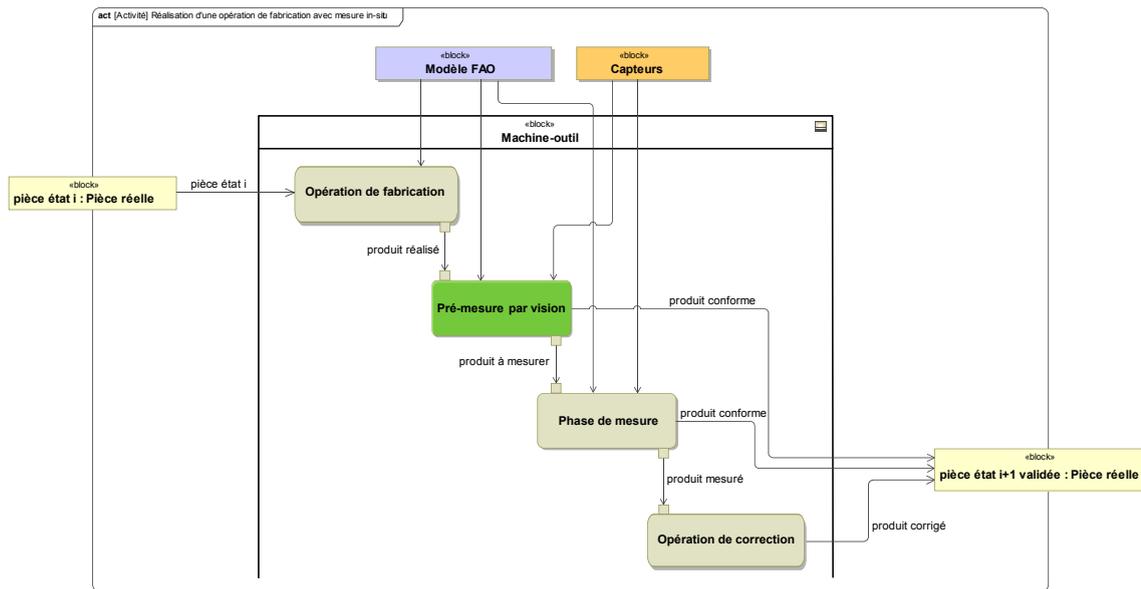


Figure 3.56 – Outil de pré-mesure par vision *In-situ*

De plus, la pré-mesure par vision proposée répond aux contraintes liées à la mesure *In-situ* : temps de mesure et de traitement des données réduit et augmentation de l'interopérabilité entre la partie fabrication et la partie mesure. Un temps de mesure réduit, car la mesure par stéréo-corrélation permet de localiser les écarts géométriques sur la pièce et ainsi il sera possible de proposer une phase de mesure adaptée aux écarts localisés (systèmes de mesure utilisés, trajectoires de mesure optimisées, etc.). Grâce à la méthode de calibration sur modèle CAO proposée, la mesure par vision est réalisée dans le même repère FAO que celui de la fabrication de la pièce, ainsi l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure est augmentée. De plus, la mesure dans le repère FAO permet de s'affranchir des opérations de recalage des données ; le résultat de localisation est obtenu dans le repère FAO, il n'y a pas opérations de traitement des données supplémentaires.

La calibration sur modèle CAO permet d'obtenir les relations entre les repères images et le repère numérique FAO. Un appariement entre des éléments 2D extraits sur les images et les éléments 3D équivalents du modèle FAO est réalisé pour obtenir les transformations entre les différents repères. Une étude de sensibilité montre que les résultats de la méthode de calibration proposée ne sont pas affectés par l'environnement extérieur.

Plusieurs perspectives sont envisagées pour améliorer la méthode de calibration sur modèle CAO. La proposition d'une méthode permettant de déterminer les entités les plus adaptées pour résoudre le problème de calibration est une perspective importante. Il pourrait être en-

visagé de proposer un outil d'aide aux choix des entités. En effet, des entités peuvent être ajoutées dans le moyen de production si le montage d'usinage ne satisfait pas les contraintes de cette calibration. Par exemple, des sphères de calibration peuvent être positionnées autour du montage d'usinage pour augmenter le nombre d'entités et ainsi résoudre le problème de calibration. Une méthode doit être proposée pour positionner ces nouvelles entités au mieux dans le moyen de production.

Une seconde perspective est envisagée : il s'agit de trouver la meilleure position articulaire de la machine (axes A et C) telle que les entités soient positionnées de manière à assurer la qualité de la calibration. Connaissant le modèle géométrique du moyen de production, il est possible de réaliser les calibrations gauche et droite dans des orientations de la table de la machine différentes, tout en obtenant le résultat final dans le même repère : par exemple, le repère FAO en position $A = 0^\circ$ et $C = 0^\circ$.

L'outil de mesure GeoDIC-3D proposée utilise l'analyse par stéréo-corrélation d'images et le torseur des petits déplacements (SDT). Il se base sur le modèle numérique de la pièce dans son état intermédiaire, ainsi que sur les résultats de calibration sur modèle CAO. La minimisation des scores de corrélation sur des régions d'intérêts (ROI) définies par le modèle numérique maillé est réalisée grâce à l'association de torseurs des petits déplacements aux facettes 3D du maillage de la pièce. Elle permet de déterminer les déplacements des facettes 3D minimisant les scores de corrélation et d'obtenir une image de la surface réelle. Une comparaison de ces déplacements évalués aux résultats de calibration permet d'identifier les facettes modélisant des zones d'écarts géométriques.

L'amélioration de cet outil de pré-mesure GeoDIC-3D peut être effectuée suivant plusieurs axes. Il est important de qualifier la mesure par stéréo corrélation. Actuellement, cet outil est utilisé comme pré-mesure pour la détection et la localisation des écarts géométriques. Sa qualification permettrait de quantifier les résultats de pré-mesure et ainsi obtenir un résultat de mesure directement.

Tout comme la calibration, il peut être intéressant de trouver l'orientation de la table de la machine-outil, A et C , tel que la surface mesure soit la mieux observée par les caméras. La connaissance du modèle géométrique de la machine permettra de recalculer automatiquement les données dans le repère lié à la fabrication.

Chapitre 4

Fabrication et mesure In-situ multi-capteurs

Sommaire

1	Introduction	104
2	Description de la démarche	104
2.1	Présentation de la pièce d'étude	105
2.2	Gamme de fabrication et mesure In-situ	105
a)	Opérations de fabrication	106
b)	Phases de mesure	106
2.3	Génération des modèles FAO	107
3	Mise en place de la démarche et résultats	108
3.1	Réalisation du contournage et pré-mesure GéoDIC-3D	108
a)	Première opération d'usinage	108
b)	Pré-mesure GéoDIC-3D d'initialisation	109
3.2	Usinage des rainures et mesure multi-capteurs	111
a)	Usinage des rainures	111
b)	Pré-mesure GéoDIC-3D des rainures	111
c)	Mesure au capteur laser plan Kréon	115
4	Conclusions	117

1 Introduction

Les travaux décrits dans le chapitre 2 ont abouti à la proposition d'un modèle de gestion des données pour le procédé fabrication/mesure *In-situ*. Cette modélisation a conduit à proposer un outil de pré mesure par vision afin d'améliorer l'efficacité de la mesure *In-situ* et de ne réaliser une phase de mesure que lorsqu'un écart géométrique est détecté sur la pièce. La mise au point de l'outil que nous proposons, basé sur la stéréo corrélation d'images, a fait l'objet du chapitre 3. Nous avons pu montrer la pertinence de cet outil de détection sur un cas d'application bien maîtrisé en dehors du moyen de production.

L'objet du présent chapitre est de montrer la cohérence de notre approche de mesure multi-capteurs en contexte *In-situ*. Ainsi, ce chapitre s'articule en deux parties. La première partie est consacrée à la présentation de l'ensemble de la démarche de mesure *In-situ*, ainsi qu'à la description de la géométrie de la pièce qui nous sert de cas d'étude. La seconde partie de ce chapitre porte sur la mise en oeuvre de la démarche complète qui alterne des opérations d'usinage et des phases de mesure.

2 Description de la démarche

Dans cette première partie, nous décrivons la démarche mise en oeuvre pour réaliser une gamme de fabrication et mesure *In-situ*. Cette démarche s'appuie sur les modèles d'échanges de données développés dans le chapitre 2 et plus particulièrement sur l'enchaînement des différentes activités proposées (figure 4.1). Pour rappel, le déroulement standard dans le cas de la mesure *In-situ* comporte 4 tâches principales : la réalisation de l'opération de fabrication, la mise en place d'une pré-mesure par l'outil de vision GéoDIC-3D, suivie si nécessaire d'une phase de mesure et d'une éventuelle dernière étape de correction.

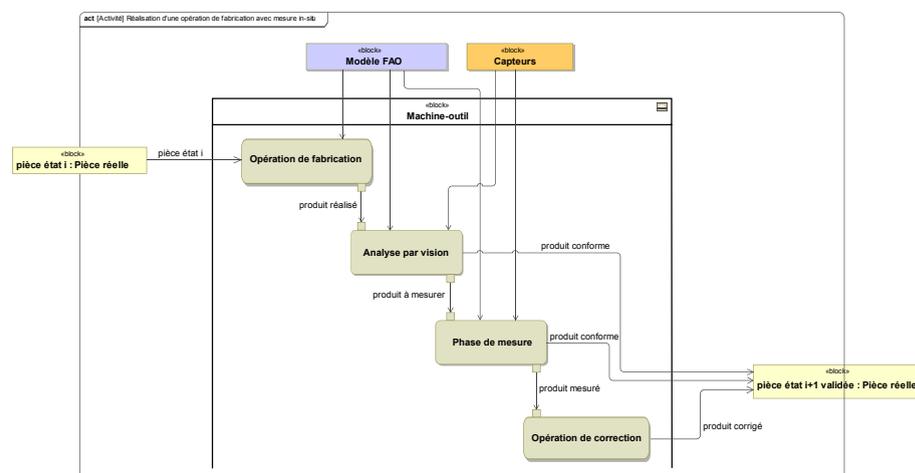
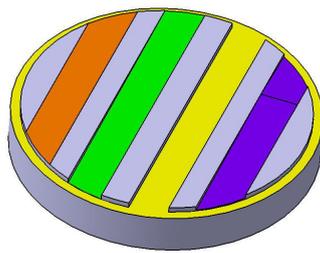


Figure 4.1 – Modèle d'activités et flux dans le contexte *In-situ*

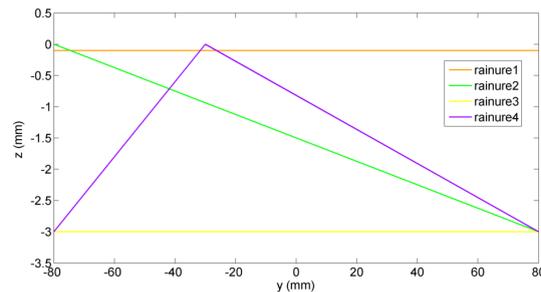
2.1 Présentation de la pièce d'étude

Afin de montrer la pertinence de notre approche de mesure *In-situ* multi-capteurs, la fabrication et la mesure d'une pièce sont nécessaires. Ainsi, nous avons choisi d'usiner une pièce comprenant plusieurs entités, de géométries variées, et pour lesquelles l'amplitude des défauts est différente. Cette variété de géométries permet de considérer plusieurs typologies de défauts. Nous avons choisi dans un premier temps de faire cette étude sur des entités géométriques de formes simples pour valider l'efficacité de la méthode. Il pourrait cependant être envisagé de réaliser dans de futurs travaux une étude intégrant des surfaces complexes.

La figure 4.2(a) représente le modèle CAO de la pièce utilisée pour cette étude. Sur cette pièce, nous proposons 4 rainures de profondeurs et géométries différentes. La figure 4.2(b) met en avant les profils des 4 rainures suivant leur longueur : une première rainure orange horizontale de profondeur $-0.1mm$, une rainure oblique à droite variant de 0 à $-3mm$, une rainure horizontale de $-3mm$ et une dernière rainure oblique à gauche et à droite de $-3mm$ à $-3mm$ en passant par $0mm$. La largeur de l'ensemble des rainures est de $20mm$.



(a) Modèle CAO



(b) Profil des 4 rainures

Figure 4.2 – Pièce réalisée pour l'application *In-situ*

Le cylindre périphérique (en jaune sur la figure 4.2(a)) est également usiné. Ce cylindre a un rôle important, car il permet de réaliser le recalage (rigide) entre le repère FAO et le repère de programmation réel de la machine-outil. La nécessité de ce recalage sera détaillée dans la suite de ce chapitre.

2.2 Gamme de fabrication et mesure In-situ

Afin de réaliser puis de mesurer la pièce d'étude, il est nécessaire de proposer une gamme de fabrication et de mesure adaptée à la géométrie de la pièce. La gamme de fabrication et mesure, comme définie dans le chapitre 2, permet de générer le modèle FAO de la pièce, lui-même permettra de piloter la machine-outil lors de l'usinage et de la mesure *In-situ* (figure 2.10). Cette gamme de fabrication/mesure comporte l'ensemble des opérations de fabrication et l'ensemble des phases de mesure (figure 2.12) ; elle est obtenue à partir du modèle CAO de la pièce.

a) Opérations de fabrication

À partir d'un disque en alliage d'aluminium de diamètre 150mm et de hauteur 50mm environ, plusieurs opérations de fabrication sont réalisées. L'opération de surfacage permet d'obtenir la surface supérieure de la pièce, surface plane de normale Z . Le contournage permet de générer une surface cylindrique d'axe Z en périphérie du disque. Les surfaces réalisées lors de ces 2 opérations permettront d'identifier le repère de programmation dans l'espace de la machine-outil (cf. paragraphe 3.1). Les différentes géométries de rainures sont obtenues par rainurage. La figure 4.3 met en avant les modèles CAO représentant les états intermédiaires de la pièce : de son état brut à la pièce finie.

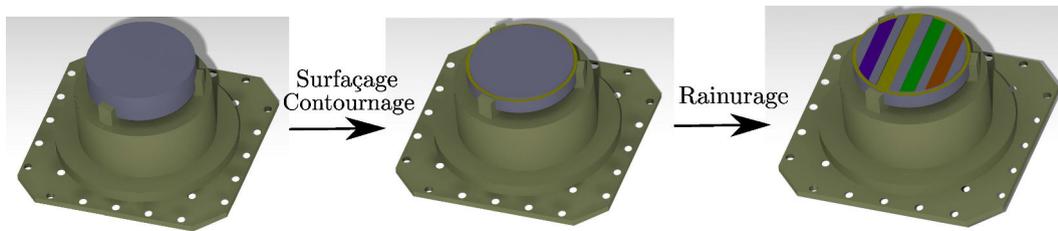


Figure 4.3 – Les différentes opérations de fabrication - modèles CAO

Le montage d'usinage utilisé lors de cet essai est le même que celui présenté précédemment (figure 3.22). Ses mors doux ont été usinés afin de s'adapter au nouveau diamètre de la pièce. De la même manière, la machine-outil UGV 5 axes *Mikron UCP710*, présentée précédemment, est utilisée pour cette étude. L'ensemble des opérations est obtenu à partir d'une fraise standard de diamètre 10mm .

b) Phases de mesure

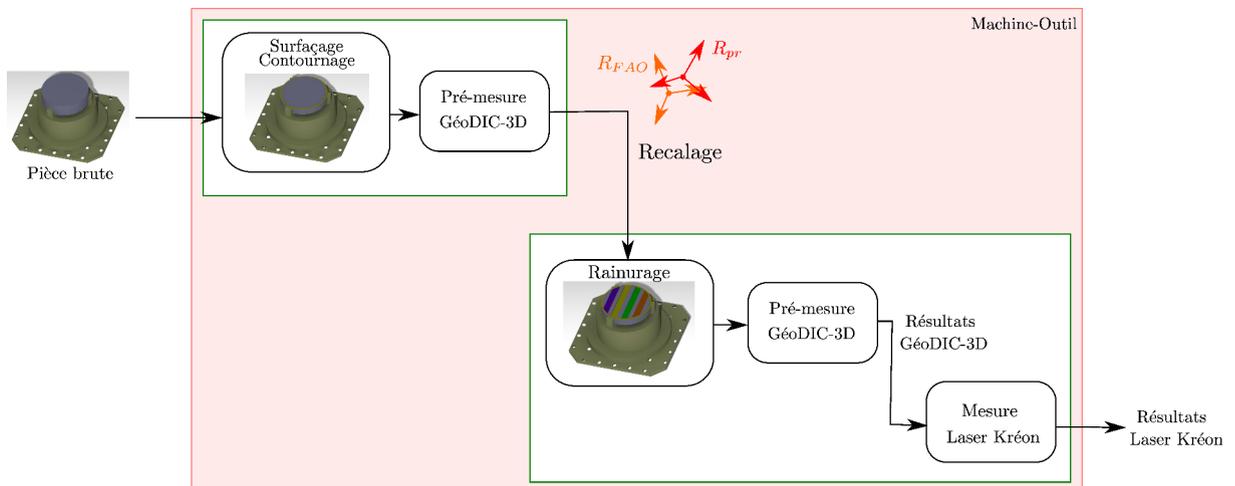
Une des principales difficultés de la mise en œuvre de la méthode GéoDIC-3D concerne les incertitudes liées à l'identification de l'origine FAO dans le repère de travail de la machine et aux incertitudes de mise en position du porte-pièce dans celle-ci. En effet, la calibration des caméras est effectuée par rapport au montage d'usinage et l'étude des défauts est réalisée dans ce même repère. Une mauvaise identification du repère FAO dans l'espace de la machine induit des surfaces usinées mal positionnées dans le repère caméra. Dans la première étude *In-situ* que nous proposons, l'identification du repère de programmation dans la machine n'est pas réalisée. Afin de nous affranchir de ce problème de respect des cotes de liaison au brut, nous proposons d'effectuer deux mesures. Une première mesure, que nous pouvons considérer comme une mesure d'initialisation, est réalisée juste après les opérations de surfacage et de contournage. Une analyse GéoDIC-3D réalisée après ces opérations permet de recalibrer le repère virtuel FAO sur le repère de programmation dans l'espace de la machine-outil (figure 4.4). Ce recalage est effectué sous l'hypothèse que les opérations de surfacage et de contournage sont réalisées sans écart géométrique.

La seconde étape de mesure consiste en l'identification des écarts géométriques après l'opération de réalisation des rainures. Pour cela, une analyse GéoDIC-3D est réalisée. Cette étude



Figure 4.4 – Initialisation : recalage des repères FAO et programmation

permet de localiser les écarts géométriques sur la pièce. Puis une mesure *In-situ* avec le laser plan Kréon permet de quantifier ces écarts. L'ensemble de la gamme de fabrication et mesure *In-situ* est représenté sur la figure 4.5.

Figure 4.5 – Description de la gamme de fabrication et mesure *In-situ*

2.3 Génération des modèles FAO

Le premier modèle FAO généré correspond à la réalisation du surfaçage et du contournage. Les entités d'usinage obtenues sont les deux surfaces planes reliées par un cylindre court. La surface supérieure est réalisée par une succession d'interpolations circulaires de diamètres décroissants. Le cylindre et la surface plane inférieure sont réalisés par contournage. La figure 4.6 met en avant les trajectoires outils du premier modèle FAO.

Le second modèle FAO correspond à la génération des différentes rainures. Les entités d'usinage obtenues sont donc des ensembles de surfaces planes de différentes orientations. Des stratégies classiques de vidage de poche en mode aller-retour sont utilisées pour générer les trajectoires outils sur les différentes rainures. La figure 4.7 présente les trajectoires outils du second modèle FAO.

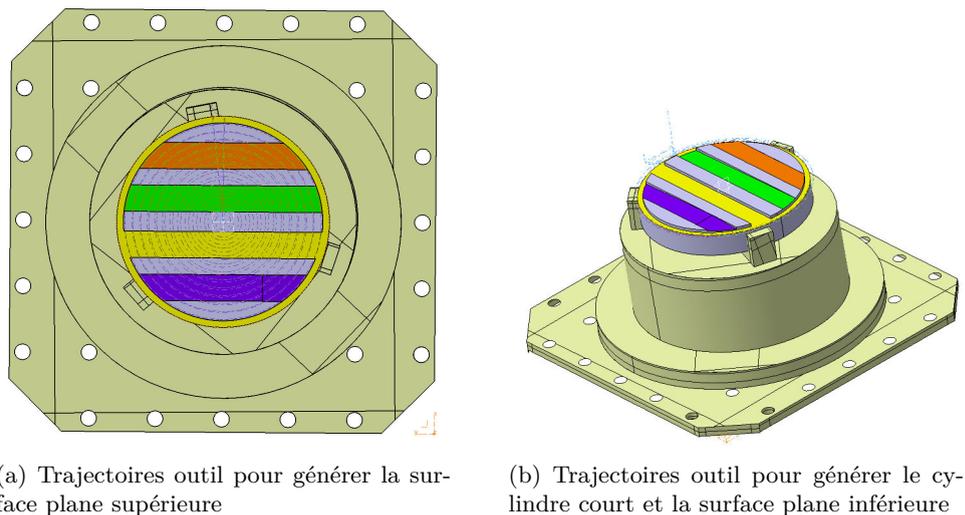


Figure 4.6 – Modèle FAO du surfacage et du contournage

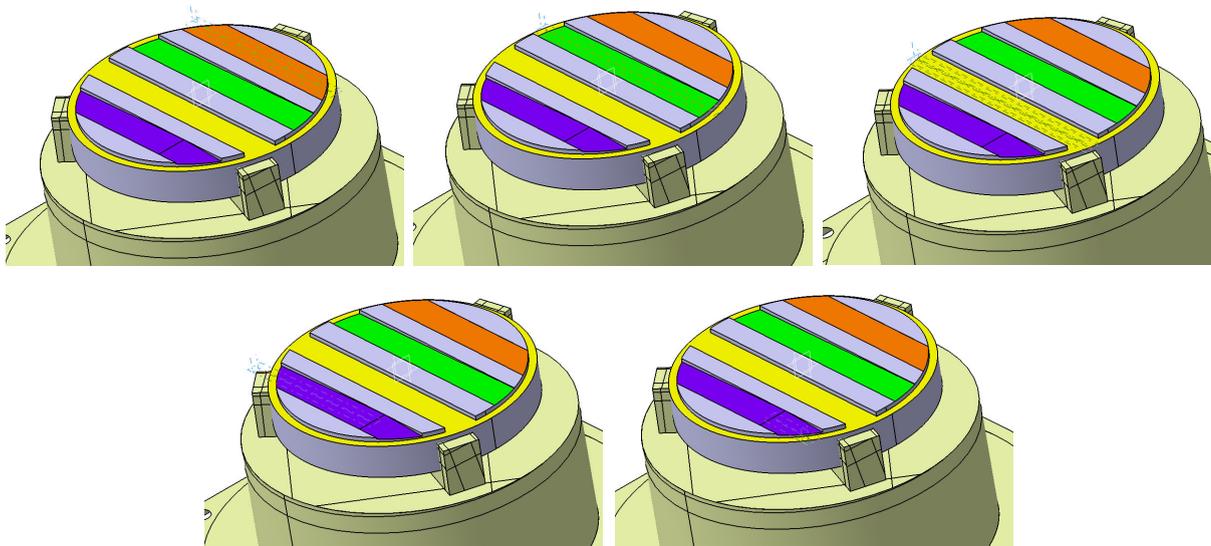


Figure 4.7 – Stratégies d'usinage pour la réalisation des rainures

3 Mise en place de la démarche et résultats

Après avoir décrit l'ensemble de la démarche, nous présentons maintenant sa mise en oeuvre et les résultats obtenus. L'ensemble $\{porte - pièce + pièce\}$ est positionné sur la table du centre d'usinage. L'origine du programme définie dans la FAO est identifiée sur le porte-pièce par un palpé mécanique.

3.1 Réalisation du contournage et pré-mesure GéoDIC-3D

a) Première opération d'usinage

Les premières opérations de fabrication sont réalisées sur le centre d'usinage à partir des programmes issus de la FAO. La figure 4.8 est une photographie prise lors de cet usinage. Sur cette image, nous pouvons voir la pièce montée dans le porte-pièce et l'outil (fraise de diamètre

10mm) s'engageant pour réaliser la seconde passe du contournage.

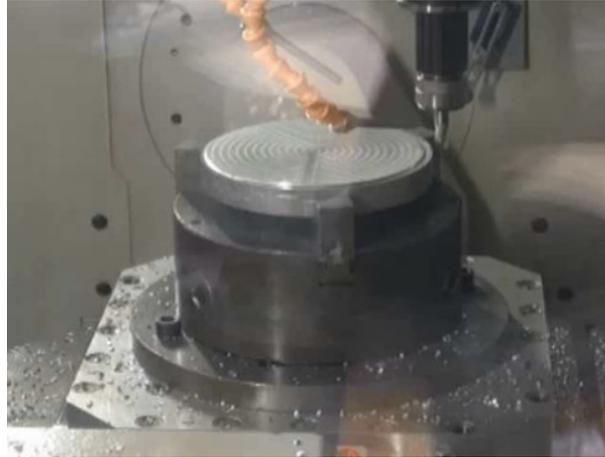


Figure 4.8 – Photographie de la pièce après réalisation du surfacage et du contournage

À l'issue de cet usinage, la pièce est donc dans un état semi-fini. Une analyse GéoDIC-3D est réalisée sur ce modèle semi-fini afin de compenser les erreurs de mise en position de la pièce dans la machine par le recalage des repères FAO et pièce. Afin de réaliser cette première mesure, le berceau (axe A de la machine-outil) est balancé de manière à positionner et orienter la pièce au mieux vis-à-vis des caméras. Dans notre cas, nous avons réalisé cette orientation manuellement en positionnant la surface supérieure orthogonale à la direction des caméras. La modification articulaire de la machine-outil pour positionner et orienter au mieux l'espace de travail vis-à-vis des caméras est un point important qui devra être étudié dans de futurs travaux. Cependant, il est important de noter que cette modification articulaire est réalisée sous l'hypothèse que les défauts des axes de la machine sont négligeables vis-à-vis de notre essai.

Cet essai est réalisé dans le cadre d'une première étude de fabrication et de mesure *In-situ*, ainsi les problèmes tels que la gestion des copeaux et la fine couche de lubrification sur la pièce ne sont pas encore pris en compte. De ce fait, la pièce est nettoyée juste après l'opération d'usinage et avant celle de mesure. Lors de mesure par vision (caméra ou laser) la pièce est aussi matifiée à l'aide d'une projection de poudre blanche. Ces différentes opérations de préparation de la surface de la pièce à la mesure permettent de réaliser une première étude en s'affranchissant des problèmes évoqués ci-dessus. Cependant, pour que cette méthode de fabrication et mesure *In-situ* puissent être par la suite industrialisée, il sera important de prendre en compte l'environnement et l'espace de travail de la machine-outil dans de futurs travaux.

b) Pré-mesure GéoDIC-3D d'initialisation

Comme détaillé précédemment, cette première phase de mesure conduit à réaliser un dégauchissage entre les repères FAO et pièce. L'outil d'analyse GéoDIC-3D mis en place au chapitre précédent est utilisé pour réaliser ce dégauchissage. La figure 4.9 présente les deux images utilisées pour appliquer la méthode de mesure par stéréo-corrélation.

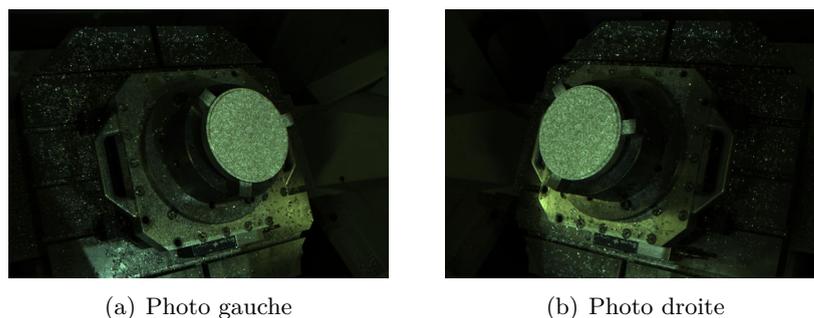
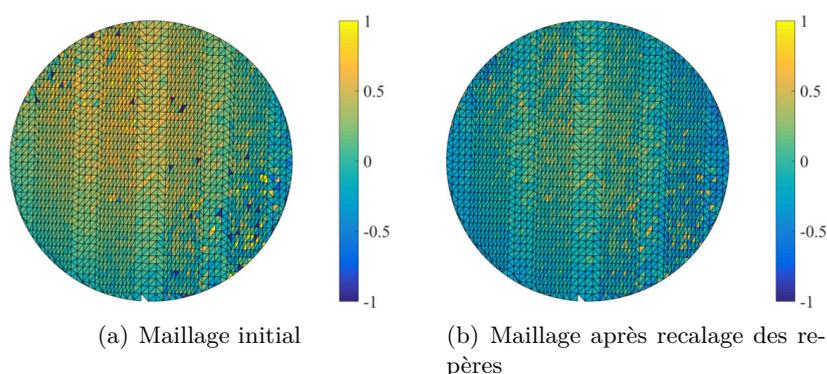


Figure 4.9 – Prise de vue de l’opération de contournage pour la mesure GéoDIC-3D

Sur ces images, nous pouvons voir le mouchetis projeté sur la pièce à partir d’un vidéoprojecteur positionné en haut de la machine au milieu des 2 caméras et orthogonal à la surface de la pièce. Comme nous pouvons le constater sur la figure 4.9, la matification de la surface permet d’obtenir un plus fort contraste sur le mouchetis projeté.

La méthode d’analyse GéoDIC-3D est réalisée sur un maillage représentant l’état intermédiaire de la pièce suite à l’opération de contournage (figure 4.10(a)). Sur cette cartographie, nous pouvons remarquer un décalage homogène des facettes en haut à gauche. Il est possible de trouver un mouvement de corps rigide à imposer à l’ensemble du maillage pour minimiser ce décalage. Après avoir imposé ce mouvement de corps rigide au maillage initial, nous obtenons un nouveau maillage recalé sur le repère de la pièce. Nous pouvons analyser ce nouveau maillage avec la méthode GéoDIC-3D pour vérifier que la transformation rigide appliquée a été correctement évaluée. La figure 4.10(b) représente la cartographie des déplacements des facettes du maillage recalé suite à la méthode GéoDIC-3D.

Figure 4.10 – Résultats de l’analyse GéoDIC-3D pour le contournage (déplacement en mm)

En comparant les deux cartographies de la figure 4.10, nous remarquons que les déplacements des facettes du maillage après recalage (figure 4.10(b)) sont négligeables par rapport aux déplacements obtenus en utilisant le maillage initial. De ce fait, le maillage recalé correspond à la surface réelle. Le dégauchissage obtenu est utilisé dans la suite de cette démarche.

3.2 Usinage des rainures et mesure multi-capteurs

Dans cette seconde étape, les quatre rainures sont usinées sur la surface supérieure de la pièce afin de tester la pertinence de l'outil de pré-mesure GéoDIC-3D pour la détection de défauts. Après usinage, une analyse GéoDIC-3D suivie d'une phase de mesure avec le laser plan Kréon sont réalisées. Cette première étude multi-capteurs *In-situ* est détaillée dans la suite de ce chapitre.

a) Usinage des rainures

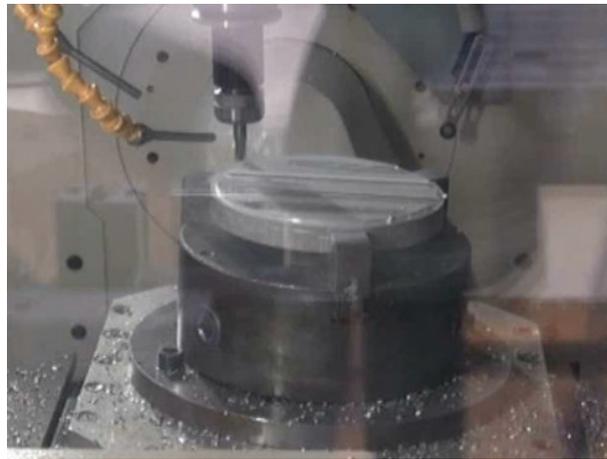


Figure 4.11 – Photographie de la réalisation des différentes rainures

De la même manière que la réalisation du contournage, les rainures sont usinées avec la fraise de diamètre 10mm . La pièce est exactement dans la même mise en position que pour l'opération précédente, car celle-ci n'a pas été démontée pour réaliser la précédente mesure. Le berceau de la machine-outil est repositionné dans son état initial ($A = 0$). Dans le cas des rainures horizontales, seuls les axes X, Y et Z de la machine sont sollicités en vitesse. Dans le cas des rainures obliques, des usinages positionnés avec de légers basculements du berceau sollicitent en position l'axe A. La figure 4.11 décrit l'usinage des rainures sur le centre UGV 5 axes.

Après usinage des quatre rainures et sous les mêmes hypothèses que précédemment, la pièce est préparée pour la réalisation des différentes mesures (figure 4.12).

b) Pré-mesure GéoDIC-3D des rainures

L'objectif de cette étape de mesure est de valider la méthode GéoDIC-3D *In-situ*. La figure 4.13 présente les images gauche et droite utilisées pour réaliser cette analyse par stéréocorrélation.

Le maillage appliqué à la méthode est un maillage plan circulaire de diamètre le diamètre du contournage. Pour cette première étude, la construction du maillage plan a été faite de manière à ce que les nœuds du maillage soient situés sur les frontières des zones de défaut. En effet, cette précaution permet de s'affranchir des effets de bords au niveau des frontières d'écarts



Figure 4.12 – Photographie de la pièce usinée et préparée pour la mesure

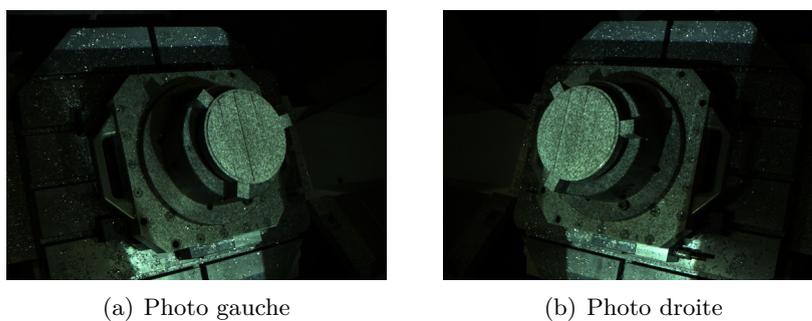


Figure 4.13 – Prise de vue des rainures pour la mesure GéoDIC-3D

géométriques. Cependant, dans le cas de pièces usinées comprenant des écarts géométriques aléatoires et quelconques, il n'est pas possible d'utiliser ce type de maillage. Il faudra donc proposer un critère afin de distinguer les facettes représentant la frontière d'un écart. La figure 4.14 représente le déplacement attendu correspondant aux défauts à détecter après l'analyse par stéréo-corrélation sur un maillage adapté aux géométries de défauts.

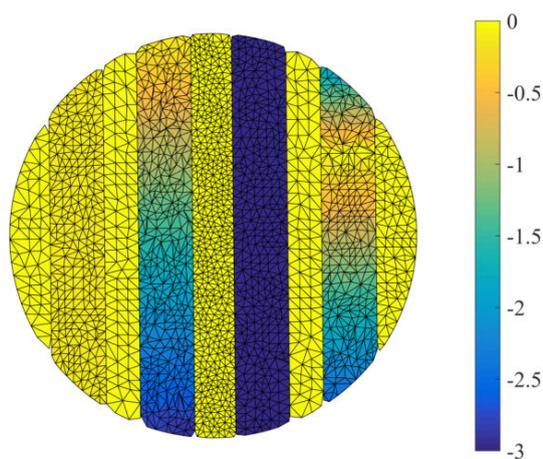


Figure 4.14 – Résultat attendu avec un maillage adapté au problème (déplacement en mm)

De plus, la cartographie ajoutée à ce maillage (figure 4.14) met en avant le résultat de mesure attendu : $3mm$ pour la plus profonde rainure.

Avant de mettre en place la méthode GéoDIC-3D sur ce maillage, nous avons évalué l'intérêt du dégauchissage réalisé précédemment (figure 4.15).

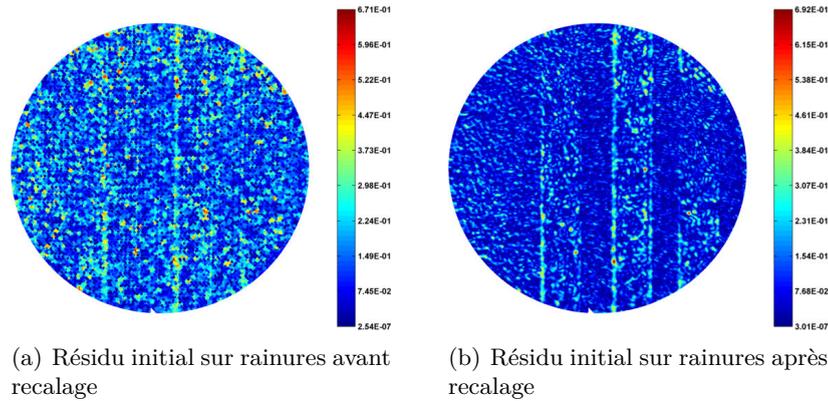


Figure 4.15 – Cartographie des résidus de stéréo-corrélation

Les deux cartographies de la figure 4.15 présentent les scores de corrélation évalués sur le maillage initial (figure 4.15(a)) et sur le maillage après dégauchissage (figure 4.15(b)). Elles mettent clairement en avant l'importance du dégauchissage. En effet, par simple calcul des scores de corrélation, il est possible d'observer les rainures sur la figure 4.15(b) alors qu'elles ne sont pas identifiables sur la figure 4.15(a). L'opération initiale de dégauchissage est donc nécessaire pour avoir une solution initiale au problème d'optimisation correcte.

La figure 4.16 résume l'ensemble des résultats de l'analyse par stéréo-corrélation. Sur les figures 4.16(a) et 4.16(b), les déplacements moyens (en pixels) respectivement de l'image de gauche et de droite sont tracés. La figure 4.16(c) est le résultat de l'algorithme de tri des facettes vis-à-vis de leurs déplacements.

Sur cette dernière cartographie, nous pouvons remarquer sensiblement les écarts géométriques attendus. Sur les lieux des plus grands écarts géométriques, les résultats de GéoDIC-3D sont concluants. Cependant, sur les écarts plus faibles (de l'ordre de $0.1mm$) la méthode de détection de défauts n'est pas robuste. Cela est dû aux conditions de réalisation de l'analyse. En effet, il est important de réaliser cette mesure dans les conditions les plus idéales en termes de taille de mouchetis, taille du maillage, nombre de points d'interpolation ou encore de contraste. Il en est de même pour les facettes situées sur les frontières des écarts géométriques, c'est à dire sur les arêtes des facettes ici. Dans ce cas, certaines erreurs peuvent être associées à un manque de visibilité. Les déplacements de certaines facettes peuvent les rendre non visibles pour l'une des deux caméras. Une réponse à ce problème de visibilité est apportée dans l'Annexe C.

La cartographie des résultats attendus (figure 4.14) peut être finalement comparée à celle

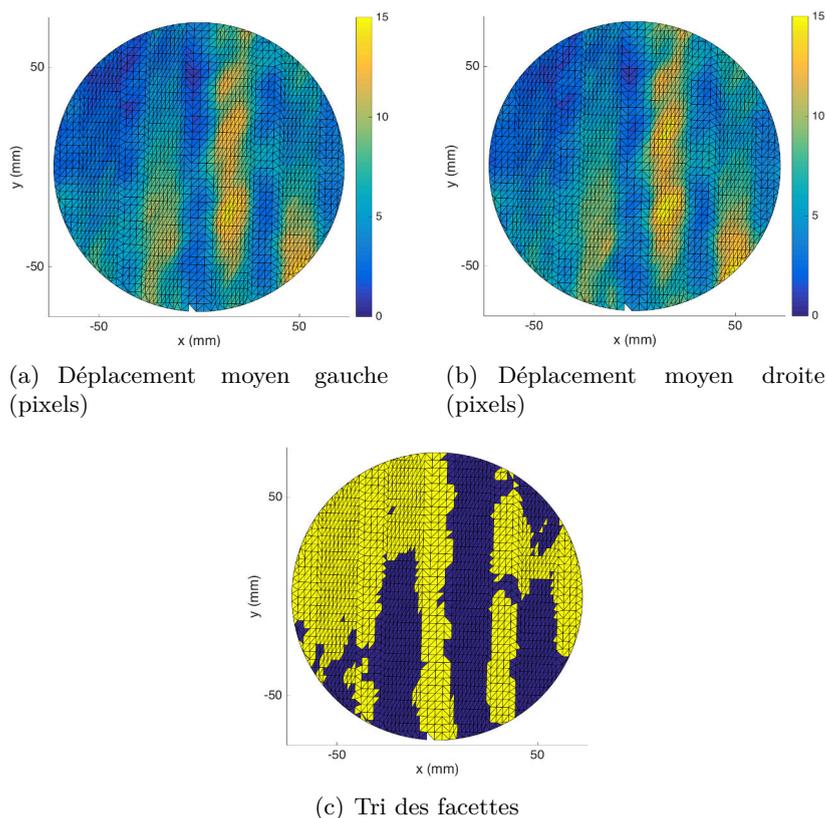


Figure 4.16 – Résultats de l’analyse GéoDIC-3D sur la pièce finie

des résultats obtenus de la figure 4.17.

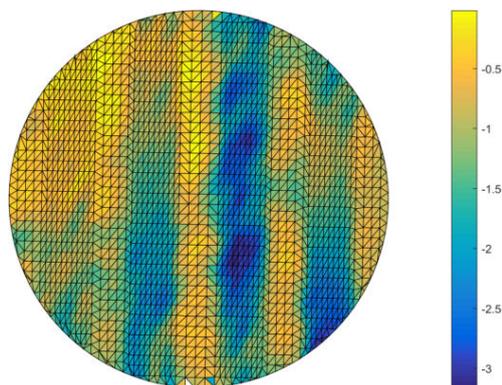


Figure 4.17 – Déplacement 3D des facettes en mm

Les principaux lieux des écarts géométriques peuvent être identifiés grâce à cette analyse. Compte tenu de la difficulté de mise en œuvre ainsi que des nombreux paramètres entrant en jeu dans cette étude (taille de maille, pixels, mouchetis...), les résultats de cette première analyse GéoDIC-3D *In-situ* sont très encourageants.

Plusieurs pistes d’améliorations devront être mises en place dans de futurs travaux. Une analyse multi-échelles utilisant des maillages de dimensions différentes permettrait de localiser les écarts géométriques inférieurs à $0.1mm$. Par exemple, il pourrait être envisagé de réaliser une première analyse GéoDIC-3D avec un macro-maillage, puis générer automatiquement un

maillage raffiné aux lieux des écarts précédemment détectés afin de réaliser une nouvelle analyse GéoDIC-3D. Cette seconde analyse devra alors prendre en compte non seulement la nouvelle taille du maillage, mais aussi une nouvelle taille de mouchetis et de pixels afin d'obtenir des résultats cohérents. Une étude portant sur l'analyse des frontières des écarts géométriques devait aussi être envisagée. De la même manière, le maillage au niveau des frontières peut être raffiné afin de diminuer l'échelle de l'analyse. Ces évolutions multi-échelles permettraient de maîtriser le résultat de détection des défauts. Cependant et afin de satisfaire les contraintes liées à la mesure *In-situ*, ces évolutions de la méthode GéoDIC-3D ne devront pas être réalisées au détriment du temps de mesure et de traitement des données.

c) Mesure au capteur laser plan Kréon

En nous référant au modèle de gamme de fabrication et mesure *In-situ* proposé dans le chapitre 2 (figure 4.1), l'étape de pré-mesure par vision est suivie d'une phase de mesure dans le cas où l'analyse GéoDIC-3D détecte des écarts géométriques. Ainsi, nous proposons dans cette partie de quantifier les écarts géométriques précédemment détectés par une mesure *In-situ* avec le capteur laser plan Kréon.

Le système de mesure est intégré dans la machine-outil à travers l'utilisation d'un porte-outil/laser adapté (figure 4.18). De ce fait, le capteur est monté dans la broche de la machine-outil, son déplacement est piloté par la commande numérique et les données acquises sont obtenues directement par lecture des axes de la machine à travers la baie de mesure (cellule ouverte). Une étape de qualification du capteur dans la machine-outil a été effectuée au travers du protocole QualiPSo [Audfray et al., 2012]. L'intégration du capteur dans la machine-outil ainsi que sa qualification *In-situ* sont détaillées dans l'Annexe B. Le résultat de qualification conduit à un bruit de mesure de $13\mu\text{m}$ et à une justesse de mesure de $1.3\mu\text{m}$ pour le système de mesure $\{\text{machine} - \text{outil} + \text{laser plan}\}$, ce qui est tout à fait comparable aux résultats de qualification du capteur sur MMT.



Figure 4.18 – Capteur laser Kréon monté dans un porte-outil

De la même manière que l'analyse GéoDIC-3D et afin de s'affranchir des différentes contraintes associées à l'environnement de la machine-outil, la pièce est nettoyée et matifiée pour la mesure au capteur laser *In-situ* (figure 4.19).

Compte tenu des nombreuses zones d'écarts géométriques identifiées précédemment et au

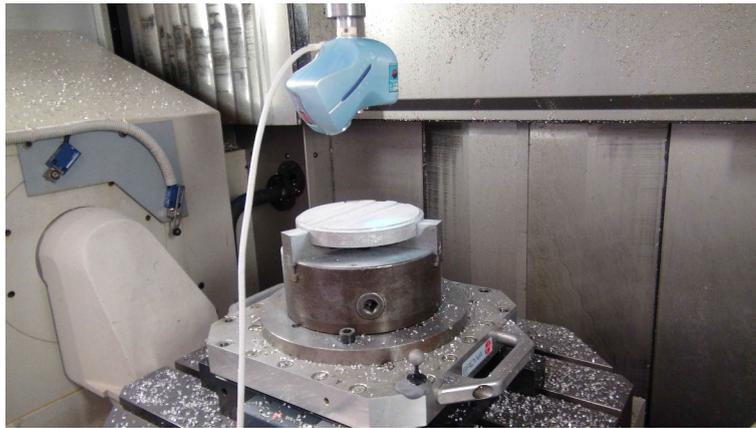
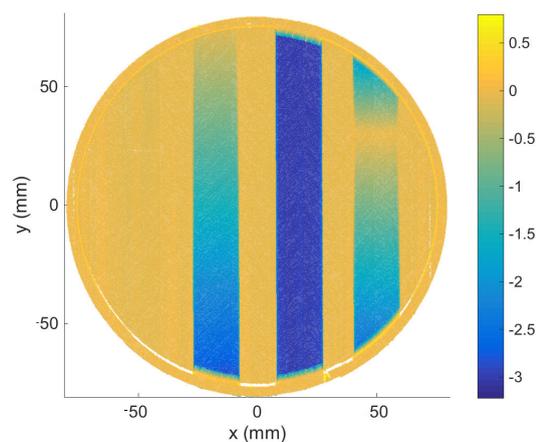


Figure 4.19 – Mesure In-situ laser Kréon

regard des dimensions de la pièce, nous avons choisi de réaliser la mesure au laser Kréon sur l'ensemble de la surface de la pièce. Des travaux en cours s'attachent à proposer une stratégie de mesure 5 axes avec le capteur laser adaptée aux lieux des écarts géométriques détectés par l'analyse GéoDIC-3D [Phan et al., 2016].

Ainsi pour cette mesure, une trajectoire zig-zag de largeur légèrement inférieure à la taille de la nappe du laser est générée. La trajectoire de mesure est réalisée dans un plan de normale Z définie au milieu de la plage de mesure du capteur laser plan.

Le nuage de points obtenu à partir de la mesure au laser plan Kréon et le modèle CAO de la pièce sont recalés par un algorithme ICP (Iterative Closest Point), et les écarts géométriques sont calculés. La cartographie de la figure 4.20 représente les écarts en mm issus de la mesure *In-situ* au capteur laser plan Kréon.

Figure 4.20 – Mesure In-situ au capteur laser Kréon, écarts en mm

La première rainure profonde de $0.1mm$ à gauche sur la figure 4.20 n'est quasiment pas observable sur cette cartographie. Cela provient de la largeur de l'échelle de couleurs choisie. En utilisant par exemple une échelle de couleurs sur les valeurs logarithmiques des écarts, cette rainure est entièrement observée. La troisième rainure est légèrement plus profonde que le résultat de $3mm$ attendu. Cela est dû aux erreurs de recalage et aux incertitudes liées à la

fabrication. Les deux rainures inclinées sont aussi clairement identifiées par cette mesure.

La première mesure *In-situ* au capteur laser Kréon nous apporte plusieurs constats. Il est possible de réaliser des mesures avec ce capteur dans la machine-outil *Mikron UCP710* avec des bruits et justesses de mesure du même ordre de grandeur que sur une MMT (Annexe B). De plus, la comparaison entre le résultat de la mesure au capteur laser Kréon et le résultat de la détection des écarts géométriques par GéoDIC-3D nous conforte sur la proposition d'un outil de pré-mesure pour la détection d'écarts. De futurs travaux permettront de proposer une stratégie coopérative entre ces deux moyens de mesure, afin d'amener le capteur Kréon uniquement aux lieux des écarts détectés.

4 Conclusions

Dans ce chapitre, une première application du processus de fabrication et de mesure *In-situ* est proposée. Elle se base sur les modèles d'échanges de données définis dans le chapitre 2.

Pour cette première application *In-situ*, nous avons choisi d'usiner une pièce comprenant des formes relativement simples dont nous pouvons maîtriser la fabrication et la mesure. Quatre géométries de rainures uniquement formées de surfaces planes sont proposées. Ces différentes géométries permettent de prendre en compte différentes échelles d'écarts géométriques (micro défauts et macro-défauts).

Une première étape d'initialisation est réalisée pour notre étude. Cette étape permet de recalibrer le repère FAO virtuel sur le repère de programmation réel dans le moyen de production. Pour cela une analyse GéoDIC-3D permet de trouver les mouvements de corps rigide à imposer au maillage pour recalibrer ces deux repères. Cette étape n'est pas nécessaire si les positions du porte-pièce et de la pièce sont connues dans le moyen de mesure. Dans un cas industriel d'une production en série, il n'est donc pas nécessaire de réaliser cette étape de recalage.

La seconde étape proposée dans ce chapitre est l'application de la mesure *In-situ*. Les rainures correspondent à des écarts géométriques sur la pièce lorsque l'on considère que le modèle nominal de la pièce est un plan. L'objectif est d'identifier sur le maillage nominal les différents lieux des rainures, donc lieux des écarts géométriques. Les résultats de la méthode GéoDIC-3D pour détecter ces zones d'écarts sont très prometteurs. En effet, les zones d'écarts macro-géométriques sont détectées facilement. Cependant, les frontières des différents écarts ne sont pas précises à cause d'un manque de visibilité sur les frontières (Annexe C) mais aussi à cause de la difficulté quant au choix de la taille du maillage. La taille du maillage est aussi le paramètre limitant pour la détection des micro-écarts. En effet, il est nécessaire d'utiliser une taille de maillage, de pixel et de mouchetis adaptée à l'échelle des écarts que l'on souhaite identifier. Une analyse GéoDIC-3D, version multi-échelles, permettrait de détecter différentes échelles d'écarts.

Suite à la première détection d'écarts géométrique par la méthode GéoDIC-3D *In-situ*, une mesure *In-situ* avec un capteur laser plan est réalisée. Cette mesure ainsi que la qualification du système de mesure (Annexe B) permet de conclure quant à la faisabilité de réaliser une mesure sans contact laser dans un moyen de production. Elle valide également l'ensemble de

la démarche fabrication/mesure que nous proposons. Un travail reste cependant à faire pour la rendre opérationnelle dans un environnement réel de production.

Conclusions & Perspectives

Dans le contexte de la fabrication des pièces de formes complexes par enlèvement de matière, l'intégration des opérations de mesures au plus près du moyen de production permet d'envisager une forte réactivité pour la réalisation d'actions correctives et ainsi d'améliorer le procédé. Nous nous sommes intéressés dans ces travaux à la réalisation d'opérations de mesure au sein du moyen de production. Nous avons ainsi identifié plusieurs problématiques liées à la fois à la mesure dans ce contexte *In-situ* mais également au contexte multi-capteurs multi-échelles. Ces problématiques concernent d'une part l'intégration de la phase de mesure dans le contexte de fabrication et d'autre part la mise en oeuvre effective d'une mesure multi-capteurs dans un environnement de fabrication. Nous avons donc proposé une approche pour la mesure *In-situ* multi-capteurs répondant aux contraintes de diminution du temps alloué pour la phase de mesure et de traitement tout en s'assurant de la qualité de la mesure et d'augmentation de l'interopérabilité entre les données de fabrication et de mesure.

Afin de répondre aux attentes liées à la mesure *In-situ*, notre première contribution consiste en la modélisation du processus de fabrication et de mesure, des différents échanges de données dans le cas de la mesure plus classique dite *Post-process* puis dans le cas de la mesure *In-situ*. Cette contribution permet de proposer une intégration et un positionnement de la phase de mesure dans la gamme de fabrication. Dans le contexte d'une mesure multi-capteurs, et compte tenu de la diversité des moyens de mesure sans contact, nous proposons une étude d'association des systèmes de mesure à des typologies et échelles de défauts d'usinage. Cette étude a conduit à une classification des moyens de mesure, et mis en avant les possibilités offertes par la mesure par vision quant à la détection d'écarts géométriques en des temps très restreints. Ainsi, un modèle de fabrication et mesure *In-situ* intégrant une activité supplémentaire de pré-mesure par vision est proposé. Cette nouvelle activité permet de réduire le temps alloué à la phase de mesure. Si des écarts géométriques sont détectés par vision, une phase de mesure adaptée et focalisée sur les lieux des écarts est mise en oeuvre. Inversement si l'outil de pré-mesure par vision ne détecte pas d'écart géométrique sur la pièce, l'opération d'usinage suivante pourra être effectuée.

La seconde contribution des travaux de thèse porte sur la mise en oeuvre d'un outil de pré-mesure par vision répondant aux deux contraintes liées à la mesure *In-situ*. L'outil de vision proposé se base sur l'analyse par stéréo-corrélation d'images.

Une méthode de calibration du système stéréoscopique originale, basée sur l'appariement

d'éléments 3D CAO du montage d'usinage aux éléments 2D équivalents extraits des images, permet d'obtenir les relations entre les espaces des images et l'espace virtuel FAO lié à la fabrication du produit. Ainsi les résultats de la mesure par vision sont obtenus directement dans le repère FAO de la pièce. L'interopérabilité entre les données de fabrication et de mesure est fortement augmentée grâce à cet outil de calibration, de même que la diminution des temps de traitements des données acquises. Une analyse de sensibilité et le calcul des bruits de calibration montrent que cette méthode peut être réalisée dans un environnement de production. Néanmoins, il existe plusieurs axes d'amélioration pour standardiser cet outil de calibration. L'extraction des éléments 2D sur les images est réalisée par la combinaison d'un filtre de Canny et d'une transformée de Hough. Une étude portant sur le choix des outils et leurs paramètres permettrait de proposer une extraction des éléments 2D plus adaptée à l'environnement de travail. Une étude de choix des entités utilisées pour la calibration permettrait d'assurer une erreur de calibration minimale (Annexe A). En effet, actuellement un nombre minimal d'entités est utilisé pour réaliser la calibration. Cependant, la position et l'orientation des éléments dans l'espace et sur les images sont importantes et doivent être variées pour assurer la qualité du résultat de calibration. Il pourrait être aussi envisagé d'ajouter des éléments de référence, par exemple des sphères, sur la table de la machine-outil dans les cas où les éléments du montage d'usinage ne satisfont pas à la réalisation de la calibration. Finalement, la détermination de la position et de l'orientation articulaire de la table de la machine-outil permettrait d'avoir le meilleur positionnement des entités par rapport aux caméras.

À partir de l'outil de calibration mis en œuvre, nous proposons une analyse des écarts géométriques par stéréo-corrélation. La méthode GéoDIC-3D proposée s'appuie sur le modèle numérique de la pièce dans son état intermédiaire ainsi que sur les bruits de calibration. Une minimisation des scores de corrélation sur des régions d'intérêts définies par le maillage numérique est réalisée par application du torseur des petits déplacements aux facettes du maillage. Après application d'un torseur des petits déplacements sur l'ensemble de la surface maillée, une image numérique de la surface réelle est obtenue. Les différents déplacements des facettes sont comparés au bruit de calibration ; il est ainsi possible de déterminer les facettes modélisant des zones d'écarts géométriques. Tout comme la méthode de calibration, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour la méthode GéoDIC-3D. Une analyse des différents paramètres entrant en compte dans l'optimisation (taille de maille, du pixel et du mouchetis) doit être réalisée afin de déterminer directement les paramètres adaptés à l'application. Afin d'améliorer la résolution en termes d'échelles de défaut détectable, une extension de la méthode par l'ajout d'une analyse multi-échelles permettrait d'affiner les résultats de détection. La mise en place d'un critère et un raffinement du maillage au niveau des frontières des lieux des écarts géométriques permettrait d'affiner la localisation de ces derniers. Finalement et de la même façon que pour la méthode de calibration, il pourrait être envisagé de déterminer la position et l'orientation articulaire de la table telle que la surface mesurée soit la mieux vue par le système stéréoscopique (Annexe C).

Le modèle d'activité de la gamme de fabrication et mesure *In-situ* proposé, a été testé à travers une application dans la *Mikron UCP710*, machine-outil UGV 5 axes (*A* et *C*). Un cas d'étude comprenant des formes géométriques uniquement canoniques est utilisé pour cette première étude *In-situ*. Les résultats de détection des écarts géométriques par la méthode GéoDIC-3D sont très encourageants dans un contexte *In-situ*, connaissant les axes de progrès possibles énoncés précédemment. Une mesure *In-situ* avec le laser plan Kréon monté dans la broche de la machine-outil permet d'obtenir une cartographie des écarts géométriques sur la pièce. Cette mesure a pu être réalisée grâce à l'intégration et la qualification du système Kréon dans la machine-outil (Annexe B). Peu de travaux ont été menés dans ce sens, et les résultats montrent l'efficacité d'une mesure par capteur laser plan monté en broche dans la machine-outil.

Le modèle d'activité décrivant le déroulement de la fabrication et mesure *In-situ* proposé se compose de 4 activités : l'opération de fabrication, la pré-mesure par vision GéoDIC-3D, la phase de mesure et la mise en place des actions correctives. Dans ces travaux, nous nous sommes particulièrement focalisés sur la proposition d'un outil de pré-mesure par vision, soit la deuxième activité de la démarche.

La phase de mesure a été étudiée par l'association de systèmes de mesure à des échelles de défauts. Cependant, il est nécessaire de poursuivre la réflexion sur cette activité afin de proposer une phase de mesure adaptée aux résultats issus de l'analyse GéoDIC-3D et respectant au mieux les contraintes liées à la mesure *In-situ* : temps alloué à la mesure et traitement des données restreint à son minimum, et augmentation de l'interopérabilité entre la fabrication et la mesure. La cartographie des lieux des écarts géométriques doit être analysée afin de proposer une solution de mesure multi-capteurs sur l'ensemble des zones identifiées (mesure au capteur laser, au palpeur mécanique ou au crayon Stil) : quels capteurs doivent être utilisés pour mesurer une zone d'écarts géométriques ? Des travaux sur la détermination de trajectoires de numérisation 5 axes du laser Kréon sont en cours [Phan et al., 2016]. Les résultats de l'analyse GéoDIC-3D étant obtenus directement dans le repère FAO, il est important de proposer une phase de mesure dont les trajectoires sont générées dans ce même repère et dont les résultats sont aussi obtenus dans ce repère. La phase de mesure devra aussi prendre en compte la gestion des données issues des mesures avec les différents capteurs en utilisant des algorithmes de fusion des données.

La proposition d'actions correctives suite à la phase de mesure est aussi un axe de réflexion important dans le contexte de la mesure *In-situ*. L'obtention des résultats de mesure dans le repère FAO et leur comparaison au modèle numérique de la pièce dans son état intermédiaire permettra de générer les nouvelles trajectoires outil pour réaliser les opérations de corrections. La démarche proposée étant réalisée dès la première opération d'usinage, la réactivité quant à la proposition d'actions correctives permettra de prétendre à une production sans rebut.

Bibliographie

- [AGIE, 2016] AGIE (2016). <http://www.gfac.com/>.
- [Ahmad et al., 2011] Ahmad, R., Tichadou, S., and Hascoët, J.-Y. (2011). Integration of vision based image processing for multi-axis cnc machine tool safe and efficient trajectory generation and collision avoidance. *Journal of Machine Engineering*, 10(04) :53–65.
- [Audfray et al., 2012] Audfray, N., Mehdi-Souzani, C., and Lartigue, C. (2012). Qualification et performances des systèmes de mesures optiques : QualiPSO.
- [AYONIS, 2016] AYONIS (2016). <http://www.ayonis.com/>.
- [Barbero and Ureta, 2011] Barbero, B. and Ureta, E. S. (2011). Comparative study of different digitization techniques and their accuracy. *Comput.-Aided Des.*, 43(2) :188 – 206.
- [Beaubier et al., 2013] Beaubier, B., Dufour, J.-E., Hild, F., Roux, S., Lavernhe, S., and Lavernhe-Taillard, K. (2013). Cad-based calibration and shape measurement with stereodic. *Experimental Mechanics*, pages 1–13.
- [Besl and McKay, 1992] Besl, P. and McKay, N. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 14(2) :239–256.
- [Besnard, 2010] Besnard, G. (2010). *Characterization and quantification of surface by using the stereo correlation technique concerning quasi static experiments up to ultra high speed tests*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Bouguet, 2010] Bouguet, J.-Y. (2010). Camera calibration toolbox for matlab.
- [Brown, 1971] Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 37(8) :855–866.
- [Canny, 1986] Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, PAMI-8(6) :679–698.
- [Carbone et al., 2001] Carbone, V., Carocci, M., Savio, E., Sansoni, G., and De Chiffre, L. (2001). Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(4) :263–271.

- [Chan et al., 2001] Chan, V., Bradley, C., and Vickers, G. (2001). A multi-sensor approach to automating co-ordinate measuring machine-based reverse engineering. *Computers in Industry*, 44(2) :105 – 115.
- [Chen and Su, 1996] Chen, F. and Su, C. (1996). Vision-based automated inspection system in computer integrated manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11(3) :206–213.
- [Cho et al., 2004] Cho, M.-W., Lee, H., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement part ii : Local inspection planning . *KSME International Journal*, 18(8) :1358–1367.
- [Cho and Seo, 2002] Cho, M.-W. and Seo, T.-I. (2002). Inspection planning strategy for the on-machine measurement process based on cad/cam/cai integration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19(8) :607–617.
- [Cuyppers et al., 2009] Cuyppers, W., Gestel, N. V., Voet, A., Kruth, J.-P., Mingneau, J., and Bleys, P. (2009). Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology. *Opt. Lasers Eng.*, 47(3-4) :292–300.
- [Devernay et al., 1995] Devernay, F., Faugeras, O., and Antipolis, I. S. (1995). Automatic calibration and removal of distortion from scenes of structured environments. In *In SPIE, volume 2567*.
- [Dornaika and Garcia, 1997] Dornaika, F. and Garcia, C. (1997). Robust camera calibration using 2d to 3d feature correspondences. In *In Proceedings of the International Symposium SPIE Optical Science Engineering and Instrumentation, Videometrics V, Volume 3174*, pages 123–133.
- [Dubreuil et al., 2016] Dubreuil, L., Dufour, J.-E., Quinsat, Y., and Hild, F. (2016). Mesh-based shape measurements with stereocorrelation principle and first results. *Experimental Mechanics*.
- [Dubreuil et al., 2014] Dubreuil, L., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2014). Multi-sensor approach for multi-scale machining defect detection. In *Joint Conference On Mechanical*, volume 4, page 1, Toulouse, France.
- [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)*, pages 1–7.
- [Ducarouge et al., 2009] Ducarouge, B., Sentenac, T., Bugarin, F., and Devy, M. (2009). Rectification Projective d’Images Stéréo non Calibrées Infrarouges avec prise en compte globale de la minimisation des distorsions. In *ORASIS’09 - Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, Trégastel, France.

-
- [Durrant-Whyte, 1988] Durrant-Whyte, H. (1988). Sensor model and multisensor integration. *International Journal of Robotics Research*, 7 :97–113.
- [Everton et al., 2016] Everton, S. K., Hirsch, M., Stravroulakis, P., Leach, R. K., and Iqbal, A. T. C. (2016). Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*.
- [Faugeras and Toscani, 1987] Faugeras, O. and Toscani, G. (1987). Camera calibration for 3D computer vision. *International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, pages 240–247.
- [Fischler and Bolles, 1981] Fischler, M. A. and Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus : A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6) :381–395.
- [Garcia et al., 2002] Garcia, D., Orteu, J., and Penazzi, L. (2002). A combined temporal tracking and stereo-correlation technique for accurate measurement of 3d displacements : application to sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 125:736 – 742.
- [Harvent et al., 2013] Harvent, J., Coudrin, B., Brèthes, L., Orteu, J.-J., and Devy, M. (2013). Shape measurement using a new 3d-dic algorithm that preserves sharp edges. In *SEM 2013 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Lombard, Illinois (USA), 3-6 June 2013*.
- [Helm et al., 1996] Helm, J., McNeill, S., and Sutton, M. (1996). Improved three-dimensional image correlation for surface displacement measurement. *Opt. Eng.*, 35(7) :1911–1920.
- [Hild and Roux, 2012] Hild, F. and Roux, S. (2012). Digital image correlation. In Rastogi, P. and Hack, E. e., editors, *Optical Methods for Solid Mechanics. A full-Field Approach*. Wiley-VCH, Weinheim (Germany).
- [Hough, 1962] Hough, P. (1962). Method and means for recognizing complex patterns.
- [Huang et al., 2007] Huang, Y., bin Lan, Y., Hoffmann, W., and Lacey, R. (2007). Multisensor data fusion for high quality data analysis and processing in measurement and instrumentation. *Journal of Bionic Engineering*, 4(1) :53 – 62.
- [Jones, 1982] Jones, A. D. (1982). Manual of photogrammetry, eds c.c. slama, c. theurer and s.w. hendrikson, american society of photogrammetry, falls church, va., 1980, fourth edition, 180 60mm, xvi and 1056 pages (with index), 72 tables, 866 figures. isbn 0 937294 01 2. *Cartography*, 12(4) :258–258.
- [Karabagli et al., 2012] Karabagli, B., Simon, T., and Orteu, J.-J. (2012). Vérification automatique de conformité des montages d'usinage par vision. In *Journée Thématique AIP-PRIMECA "Mesure 3D sans contact", Cachan (France), 7 juin 2012*.
-

- [Katz et al., 2007] Katz, S., Tal, A., and Basri, R. (2007). Direct visibility of points sets. *ACM Transactions on Graphics*, 26(3).
- [Ko et al., 2007] Ko, T., Park, J., Kim, H., and Kim, S. (2007). On-machine measurement using a noncontact sensor based on a cad model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(7-8) :739–746.
- [Lavernhe, 2006] Lavernhe, S. (2006). *Tool path generation in 5 axis High Speed Machining taking into account constraints linked to the set machine tool, numerical controler*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Lavest et al., 1999] Lavest, J.-M., Viala, M., and Dhome, M. (1999). Quelle précision pour une mire d'étalonnage ?
- [Lee et al., 2004] Lee, H., Cho, M.-W., Yoon, G.-S., and Choi, J.-H. (2004). A computer-aided inspection planning system for on-machine measurement part i : Global inspection planning . *KSME International Journal*, 18(8) :1349–1357.
- [Li and Gu, 2004] Li, Y. and Gu, P. (2004). Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*, 36(13) :1395 – 1417.
- [Liu, 1999] Liu, Z.-Q. (1999). Repetitive measurement and compensation to improve workpiece machining accuracy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15(2) :85–89.
- [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.
- [Mears et al., 2009] Mears, L., Roth, J., Djurdjanovic, D., Yang, X., and Kurfess, T. (2009). Quality and inspection of machining operations : Cmm integration to the machine tool. *ASME. J. Manuf. Sci. Eng*, 131(5) :1–13.
- [Mehdi-Souzani, 2006] Mehdi-Souzani, C. (2006). *Intelligent 3D digitising of unknown shape's object based on quality criterions*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Metrology, 2016] Metrology, H. (2016). <http://www.hexagonmetrology.fr/>.
- [Mitchell et al., 1999] Mitchell, H. L., Kniest, H. T., and Won-Jin, O. (1999). Digital photogrammetry and microscope photographs. *The Photogrammetric Record*, 16(94) :695–704.
- [Nashman et al., 1997] Nashman, M., Yoshimi, B., Hong, T. H., and Herman, M. (1997). A unique sensor fusion system for coordinate measuring machine tasks. In *Proceedings of the SPIE International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing*, pages 10–97.
- [Nikon, 2016] Nikon (2016). <http://www.nikonmetrology.com/>.

-
- [Peters and Ranson, 1982] Peters, W. H. and Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, 21(3) :213427–213427.
- [Phan et al., 2016] Phan, M., Quinsat, Y., and Lartigue, C. (2016). Simulation of laser-sensor digitizing for on-machine part inspection. In *International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Catane, Italy.
- [Poulhaon et al., 2014] Poulhaon, F., Leygue, A., M.Rauch, Hascoët, J.-Y., and Chinesta, F. (2014). Simulation-based adaptative toolpath generation in milling processes. *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, 15(3-4) :263–284.
- [Prévost, 2011] Prévost, D. (2011). *Modélisation avancée du couple Machine Outil / Commande Numérique dans un contexte UGV pour l’optimisation du calcul de trajectoires multi axes*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Quan and Lan, 1998] Quan, L. and Lan, Z.-D. (1998). Linear N⁴-point pose determination. In *6th International Conference on Computer Vision (ICCV ’98)*, pages 778–783, Bombay, India. IEEE Computer Society.
- [Quinsat et al., 2016] Quinsat, Y., Dubreuil, L., and Lartigue, C. (2016). A novel approach for in-situ detection of machining defects. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [Quinsat et al., 2011] Quinsat, Y., Lavernhe, S., and Lartigue, C. (2011). Characterization of 3d surface topography in 5-axis milling. *Wear*, 271(3-4) :590–595.
- [Quinsat and Tournier, 2012] Quinsat, Y. and Tournier, C. (2012). In situ non-contact measurements of surface roughness. *Precision Engineering*, 36(1) :97 – 103.
- [Roques, 2011] Roques, P. (2011). *SysML par l’exemple-Un langage de modélisation pour systèmes complexes*. Editions Eyrolles.
- [Sandwith and Cork, 2000] Sandwith, S. and Cork, G. (2000). V-stars/m system accuracy test results. *Coordinate Measurment System Committee Conference, Dearborn, MI*.
- [Sapirstein, 2016] Sapirstein, P. (2016). Accurate measurement with photogrammetry at large sites. *Journal of Archaeological Science*, 66 :137 – 145.
- [Savio et al., 2007] Savio, E., Chiffre, L. D., and Schmitt, R. (2007). Metrology of freeform shaped parts. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 56(2) :810 – 835.
- [Schmitz et al., 2008] Schmitz, T. L., Ziegert, J. C., Canning, J. S., and Zapata, R. (2008). Case study : A comparison of error sources in high-speed milling. *Precision Engineering*, 32(2) :126 – 133.
-

- [Schwenke et al., 2002] Schwenke, H., Neuschaefer-Rube, U., Pfeifer, T., and Kunzmann, H. (2002). Optical methods for dimensional metrology in production engineering. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 51(2) :685 – 699.
- [Shahabi and Ratnam, 2016] Shahabi, H. and Ratnam, M. (2016). Simulation and measurement of surface roughness via grey scale image of tool in finish turning. *Precision Engineering*, 43 :146 – 153.
- [Shen et al., 2001] Shen, T.-S., Huang, J., and Menq, C.-H. (2001). Multiple-sensor planning and information integration for automatic coordinate metrology. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(2) :167–179.
- [Shiraishi, 1988] Shiraishi, M. (1988). Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes part 1 : In-process techniques for tools. *Precision Engineering*, 10(4) :179 – 189.
- [Simoès, 2012] Simoès, V. (2012). Repérage et recalage de vilebrequins bruts sur un nuage de points par photogrammétrie.
- [Simonovsky, 2011] Simonovsky, M. (2011). Ellipse detection using 1d hough transform. *Mathworks*.
- [Sokolov et al., 2006] Sokolov, D. V., Kazantsev, D. V., Tyrrell, J. W. G., Hasek, T., and Danzebrink, H. U. (2006). *Combined Confocal and Scanning Probe Sensor for Nano-Coordinate Metrology*, pages 131–143. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [Sutherland, 1963] Sutherland, I. E. (1963). Sketchpad : A man-machine graphical communication system.
- [Sutton et al., 2009] Sutton, M., Orteu, J.-J., and Schreier, H. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements : Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- [Sutton et al., 1983] Sutton, M., Wolters, W., Peters, W., Ranson, W., and McNeill, S. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, 1(3) :133 – 139.
- [Thiebaut et al., 1999] Thiebaut, F., Lartigue, C., and Duc, E. (1999). A certification method for the milling process of free-form surfaces using a test part. *International Journal of Production Research*.
- [Triggs, 1999] Triggs, B. (1999). Camera pose and calibration from 4 or 5 known 3d points. In *Computer Vision, 1999. The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on*, volume 1, pages 278–284 vol.1.
- [Vacharanukul and Mekid, 2005] Vacharanukul, K. and Mekid, S. (2005). In-process dimensional inspection sensors. *Measurement*, 38(3) :204 – 218.

- [Varady et al., 1997] Varady, T., Martin, R. R., and Cox, J. (1997). Reverse engineering of geometric modelsan introduction. *Computer-Aided Design*, 29(4) :255 – 268. Reverse Engineering of Geometric Models.
- [Villeneuve and Bourdet, 1990] Villeneuve, F. and Bourdet, P. (1990). *La gamme automatique en usinage*. Groupe GAMA. ED. Hermès.
- [Weckenmann et al., 2009] Weckenmann, A., Jiang, X., Sommer, K.-D., Neuschaefer-Rube, U., Seewig, J., Shaw, L., and Estler, T. (2009). Multisensor data fusion in dimensional metrology. *{CIRP} Annals - Manufacturing Technology*, 58(2) :701 – 721.
- [Weng et al., 1992] Weng, J., Cohen, P., and Herniou, M. (1992). Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10) :965–980.
- [Werth, 2016] Werth (2016). <http://www.werth.de>.
- [Xie and Ji, 2002] Xie, Y. and Ji, Q. (2002). A New Efficient Ellipse Detection Method. In *International Conference on Pattern Recognition*, volume 2, pages 957–960.
- [Xú et al., 2016] Xú, S., Anwer, N., Mehdi-Souzani, C., Harik, R., and Qiao, L. (2016). Step-nc based reverse engineering of in-process model of nc simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pages 1–22.
- [Yandayan and Burdekin, 1997] Yandayan, T. and Burdekin, M. (1997). In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37(10) :1423 – 1439.
- [ZEISS, 2016] ZEISS (2016). <http://corporate.zeiss.com/>.
- [Zexiao et al., 2005] Zexiao, X., Jianguo, W., and Qiumei, Z. (2005). Complete 3d measurement in reverse engineering using a multi-probe system. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(1213) :1474 – 1486.
- [Zhao et al., 2008] Zhao, F., Xu, X., and Xie, S. (2008). Step-nc enabled on-line inspection in support of closed-loop machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2) :200 – 216.
- [Zhao, 2010] Zhao, H. (2010). *MULTISENSOR INTEGRATION AND DISCRETE GEOMETRY PROCESSING FOR COORDINATE METROLOGY*. Theses, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [Zhao et al., 2012] Zhao, H., Kruth, J.-P., Gestel, N. V., Boeckmans, B., and Bleys, P. (2012). Automated dimensional inspection planning using the combination of laser scanner and tactile probe. *Measurement*, 45(5) :1057 – 1066.

- [Zhao et al., 2010] Zhao, H., Nabil, A., and Pierre, B. (2010). *A PLM-Based Multi-Sensor Integration Measurement System for Geometry Processing*, pages 469–484. John Wiley & Sons, Inc.
- [Zhao and Xu, 2010] Zhao, Y. F. and Xu, X. (2010). Enabling cognitive manufacturing through automated on-machine measurement planning and feedback. *Advanced Engineering Informatics*, 24(3) :269 – 284. The Cognitive Factory.
- [Zuquete-Guarato et al., 2012] Zuquete-Guarato, A., Mehdi-Souzani, C., Quinsat, Y., Lartigue, C., and Sabri, L. (2012). Towards a new concept of in-line crankshaft balancing by contact less measurement : process for selection the best digitizing system.

Calibration sur modèle CAO - Choix des entités

La calibration *In-situ* est réalisée par appariement d'éléments 3D présent dans la machine-outil et des éléments 2D équivalents extraits de l'image. Le choix des éléments, le nombre d'éléments, leurs positions et orientations ont une incidence sur le résultat de calibration. Ainsi, il est nécessaire de s'assurer que les données d'entrées au problème d'optimisation sont correctement choisies. Dans cette Annexe, nous avons réalisé une première étude d'analyse du conditionnement de matrice. Cette étude permet de conclure quant au nombre d'entités à utiliser pour résoudre le problème de calibration. Il peut être envisagé de déterminer lesquelles utiliser.

L'équation 3.13, permettant de déterminer la solution $d\Phi$ du problème de calibration, est sous la forme d'un système du type :

$$Ax = b \quad (\text{A.1})$$

avec $A = J^T \cdot J$, la matrice de rigidité, et le second membre associé $b = -(J^T \cdot E(\Phi_0))$.

L'étude des variations de la solution lorsque le second membre b subit une perturbation s'écrit

$$Ax = b \Rightarrow A(x + \delta x) = b + \delta b \quad (\text{A.2})$$

Ainsi, on peut écrire

$$\begin{cases} Ax &= b \\ \delta x &= A^{-1}\delta b \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Avec l'utilisation des normes subordonnées, le système d'équations A.3 devient :

$$\begin{cases} \|A\| \|x\| &\geq \|b\| \\ \|\delta x\| &\leq \|A^{-1}\| \|\delta b\| \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

Ainsi, l'estimation de l'erreur relative en norme sur x en fonction de la perturbation sur le second membre s'écrit :

$$\frac{\|\delta x\|}{\|x\|} \leq \|A\| \|A^{-1}\| \frac{\|\delta b\|}{\|b\|} \quad (\text{A.5})$$

La quantité $\|A\| \|A^{-1}\|$ est appelée la condition de la matrice A et est notée $cond(A)$ (conditionnement de A). Plus la condition de la matrice A sera grande, plus la matrice est dite mal conditionnée, et donc plus le système défini par l'équation A.1 est instable.

L'analyse du conditionnement du problème de calibration sur modèle CAO permet d'estimer si les éléments utilisés assurent la stabilité du résultat de calibration.

Sur le montage d'usinage utilisé pour cette application, un maximum de 17 droites peut être utilisé pour la résolution du problème de calibration. Inversement, un minimum de 3 droites est nécessaire pour résoudre ce problème (tableau 3.5). L'étude de conditionnement, $cond(A)$, pour une suite ordonnée de droites, de 3 droites jusqu'à 17 droites, permet de montrer que la valeur du conditionnement diminue lorsque l'on augmente le nombre de droites utilisées pour résoudre le problème puis se stabilise. Le tracé des valeurs de conditionnement par rapport à l'augmentation du nombre de droites utilisées est présenté sur la figure A.1.

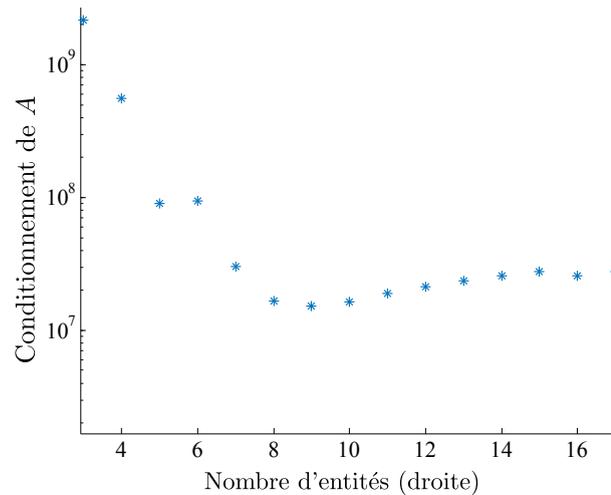


Figure A.1 – Tracé du conditionnement de A en fonction du nombre de droites utilisées pour la calibration

Cette étude montre la nette diminution de la valeur de conditionnement de 3 à 8 entités utilisées, puis une "légère" augmentation par l'ajout d'entités supplémentaires. La combinaison des 8-9 premières droites assure le conditionnement minimum de ce problème et donc la stabilité de la solution, dans le cas de la suite ordonnée de droite choisie. Cependant, ce nombre d'entités n'est pas forcément adapté à toutes les applications possibles de la méthode de calibration sur modèle CAO. Une méthode, permettant de déterminer la combinaison d'entités minimisant le conditionnement du problème, peut être envisagée. L'algorithme 2 décrit un exemple de recherche des entités minimisant le conditionnement de la matrice A .

Dans le cas d'un montage d'usinage ne possédant pas suffisamment d'éléments remarquables pour satisfaire la calibration, il est nécessaire d'ajouter des éléments de référence dans la scène, donc sur la table de la machine-outil. Il peut être envisagé de déterminer la position des éléments de référence dans l'espace de travail de la machine, tel que le conditionnement soit minimisé.

Algorithme 2 Choix des entités pour la calibration sur modèle CAO

$n :=$ nombre de points
 $m :=$ nombre de droites
 $\lambda n \leftarrow 1$ entité point parmi n
 $\lambda m \leftarrow 1$ entité droite parmi n
for l'ensemble des combinaisons minimums (tableau 3.5),
soit $\binom{n}{6} + \binom{m}{1} * \binom{n}{4} + \binom{m}{2} * \binom{n}{2} + \binom{m}{3}$ combinaisons **do**
 calcul de $cond(A)$
end for
 $comb(1) :=$ combinaison qui minimise $cond(A)$
 $cond(1) = \min(cond(A))$
for $i = 1$ **to** $(n + m - size(comb(1)))$ **do**
 for l'ensemble $(comb(i) + \lambda n)$ et $(comb(i) + \lambda m)$ **do**
 calcul de $cond(A)$
 end for
 $comb(i + 1) :=$ combinaison qui minimise $cond(A)$
 $cond(i + 1) = \min(cond(A))$
 if $cond(i + 1) > cond(i)$ **then**
 conditionnement minimum trouver pour la combinaison $comb(i)$
 else

 end if
end for

Annexe B

Intégration du laser Kréon dans la machine-outil

L'objectif de ce document est de présenter la façon dont a été effectuée la mise en place du Kréon dans la Mikron du laboratoire. Il est important de retenir que cette intégration a pu être effectuée grâce à la cellule ouverte rattachée à cette machine. Celle-ci permet d'obtenir directement les valeurs des règles des différents axes de la machine.

La première partie de cette annexe porte sur le laser Kréon ; l'intégration technique et sa comparaison avec celle sur la MMT font l'objet de la partie du second point. Finalement, la qualification du Kréon dans la Mikron est effectuée et comparée à celle dans la MMT ainsi que certaines mesures avec le capteur Stil.

a) Présentation du laser Kréon

Haute densité de points mesurée avec une vitesse d'acquisition relativement rapide. Mesure sans contact donc possibilité de mesurer des surfaces flexibles. Point de vue limité, occlusions, mauvaise sensibilité sur les surfaces mal préparées, bruit, mesures redondantes. Principe de mesure par triangulation, détermination d'un point de l'objet par relation trigonométrique entre le projecteur, la caméra et l'objet lui-même.

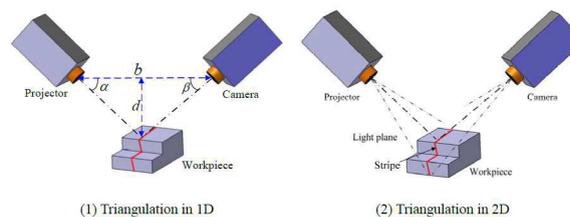


Figure B.1 – Principe de triangulation

$$d = b \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (\text{B.1})$$

b est le seul paramètre donné par le laser.

La précision de la mesure est variable en fonction de différents facteurs : la position relative avec la pièce à mesurer, l'angle de vue, les conditions de la surface à mesurer, etc.

Modélisation : à chaque enregistrement le laser forme une ligne image. Chaque point de la ligne scannée correspond à un point physique de la pièce. Une calibration extrinsèque est nécessaire pour transformer les coordonnées $2D$ de l'image en coordonnées $3D$ dans l'espace. Sur un robot (machine) :

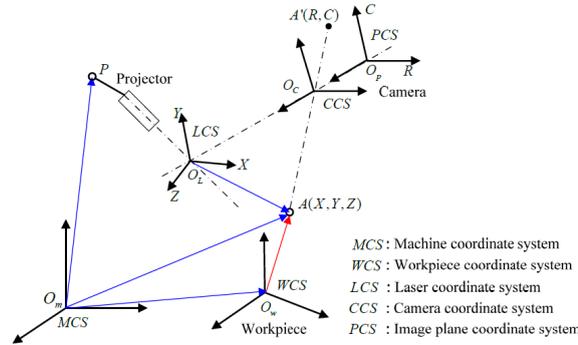


Figure B.2 – Modélisation du laser Kréon sur un robot

Soit A un point physique de la pièce à mesurer :

$$\overrightarrow{O_w A} = \overrightarrow{O_w O_m} + \overrightarrow{O_m P} + \overrightarrow{P O_l} + \overrightarrow{O_l A} \quad (\text{B.2})$$

b) Intégration du Kréon dans la Mikron

Le capteur Kréon et son ECU associé nécessitent de respecter une contrainte de signal afin d'être utilisés sur la machine-outil. En effet, le système de mesure est relié à son ECU qui lui est branché habituellement directement sur les axes de la MMT et de la commande numérique associée. L'ECU du Kréon accepte uniquement un signal TTL. Actuellement l'ECU est branché sur des boîtier IBV permettant de transformer les signaux sinusoïdaux des règles de la MMT en signaux TTL, s'adaptant ainsi à l'ECU du Kréon.

Un modèle Simulink de transformation du signal a été effectué. Ce modèle permet de transformer les différents signaux sinusoïdaux des axes en signaux TTL compris par l'ECU du Kréon.

c) Qualification des systèmes de mesure via Qualipso [Audfray et al., 2012]

Le protocole de qualification des systèmes de mesure optique Qualipso permet d'évaluer la qualité des données acquises, au travers de 2 indicateurs, le bruit et la justesse de mesure. Le système de mesure correspond à l'ensemble $\{\text{capteur} + \text{porteur}\}$. De ce fait, le laser Kréon doit être qualifié dans la machine-outil (porteur). Afin d'obtenir une comparaison des résultats obtenus, le Kréon est aussi qualifié sur la MMT. Afin de réaliser ces différentes qualifications, 2 pièces étalons sont utilisées : un plan étalon pour la qualification du bruit de mesure et des marches étalons pour la qualification de la justesse de mesure.

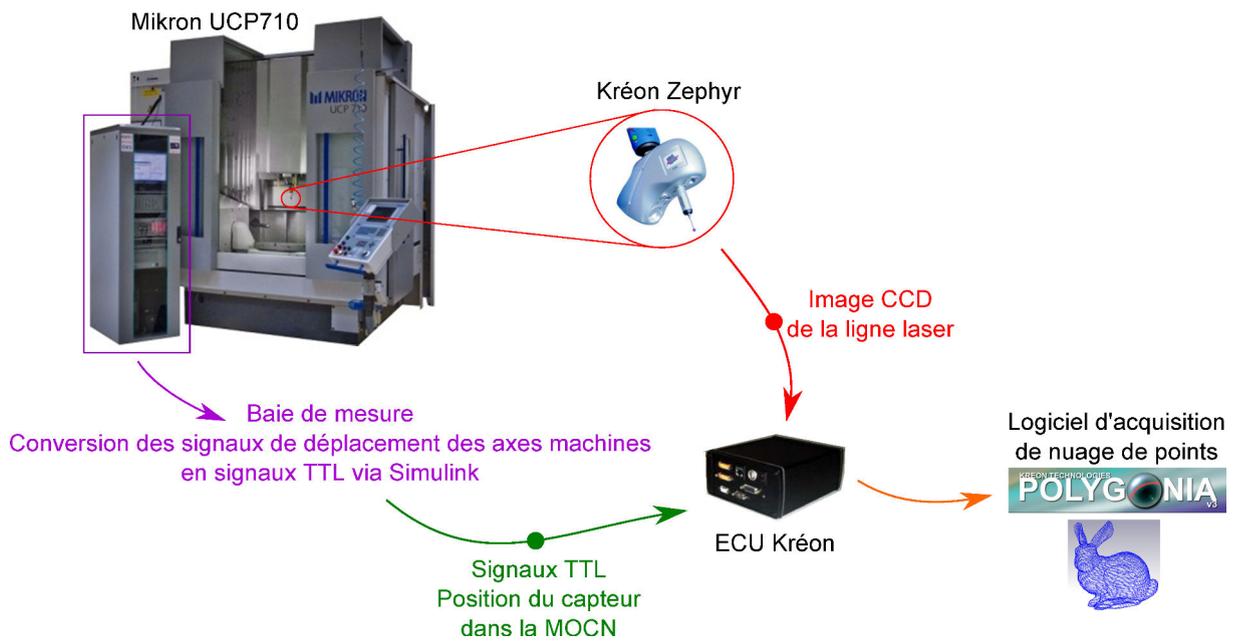


Figure B.3 – Principe complet de mise en place technique du laser Kréon dans la machine-outil

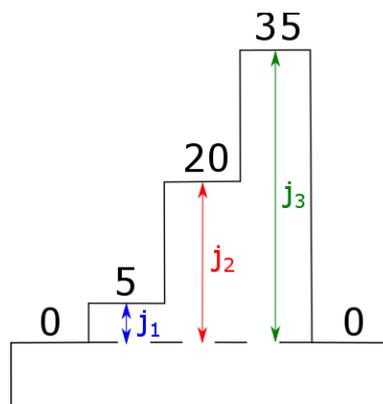


Figure B.4 – Schéma de la marche étalon utilisée pour la mesure de l'erreur de justesse

Bruit de mesure

Définition :

Le bruit de mesure ne fait pas l'objet d'une norme, mais un indicateur souvent utilisé dans la littérature, δ – *bruit* permet de quantifier le bruit de mesure. Sa valeur est donnée par l'équation B.3.

$$\delta = k \cdot \sigma = k \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i (e_i - \tilde{e}_i)^2} \quad (\text{B.3})$$

avec k un facteur d'élargissement (ici égal à 1), p_i le poids de chacun des points, e_i le vecteur erreur de position et \tilde{e}_i la moyenne des écarts. Dans notre cas en réalisant une associant avec le critère des moindres carrés \tilde{e}_i est nulle.

Protocole d'évaluation :

Le bruit de mesure est évalué avec une orientation de la tête du capteur fixe et est fonction de

la distance de numérisation d (cf. figure 1.25). L'artefact référence de planéité est utilisé. En plaçant le capteur normal à la surface plane, il est facile de maîtriser la distance de numérisation d . La première numérisation s'effectue à d_{mas} (distance maximale de la fenêtre de mesure du capteur). De multiples numérisations sont réalisés en diminuant progressivement la distance de numérisation jusqu'à atteindre d_{min} . Finalement, tous les plans acquis sous forme de nuage de point sont analysés de la manière suivante : un plan des moindres carrés est associé au nuage, l'écart type est ensuite calculé grâce à l'équation B.3. Cette méthode permet de trouver la distance optimale permettant de minimiser le bruit de mesure.

Justesse de mesure

Définition :

Celle-ci est évaluée grâce à une distance connue entre 2 plans. L'erreur de justesse est donnée par la différence entre la valeur mesurée et la valeur considérée comme vraie de la marche. Afin de l'évaluer, le nuage de points numérisé est tout d'abord divisé en 2 nuages (représenté par les deux marches). Des plans sont associés aux deux nuages par le critère des moindres carrés. La première distance mesurée est celle entre le barycentre du nuage supérieur et le plan associé du nuage inférieur. La seconde distance est celle entre le barycentre du nuage de points inférieur et le plan associé au nuage supérieur. La distance finale est la moyenne entre ces 2 distances. L'équation B.4 met en avant le calcul de la l'erreur de justesse j_a .

$$j_a = h - h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2} - h_0 = \frac{|(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{inf}| + |(\bar{M}_{sup} - \bar{M}_{inf}) \cdot \vec{N}_{sup}|}{2} - h_0 \quad (\text{B.4})$$

avec

Protocole d'évaluation :

La justesse est évaluée avec une orientation de la tête du capteur fixe, tout comme le bruit de mesure. L'artefact de numérisation est scanné 2 fois (2 distances de numérisation d différentes). L'erreur de justesse est évaluée pour tous les plans par rapport au plan de référence 0 (cf. figure c)). Suite à ces analyses, une erreur de justesse / mm est calculée.

Qualification dans la MOCN

Le tableau B.1 met en avant les résultats de bruit de mesure de l'ensemble $\{Kréon + MOCN\}$ à 5 endroits différents dans la machine-outil et à une distance de numérisation constante (milieu de la fenêtre de mesure).

Nous remarquons un bruit moyen de $0.012mm$. De plus un motif régulier apparaît sur les différentes cartographies d'écart (cf. figure B.5). Étant donné que ce motif est répétitif, il n'est pas fonction de la position dans la machine-outil, mais provient du capteur Kréon (ligne laser).

Suite à la numérisation avec le laser Kréon dans la MOCN, les profils de la pièce ont été extraits. Les figures B.6 et B.7 sont des tracés des profils de longueur et de largeur respective-

Plan	Bruit	Ecart min.	Ecart max.
1	0,012	-0.050	0.056
2	0,013	-0.094	0.057
3	0.012	-0.193	0,056
4	0.011	-0.068	0,107
5	0.012	-0.052	0,079

Tableau B.1 – Bruit de mesure (Kr on+MOCN)

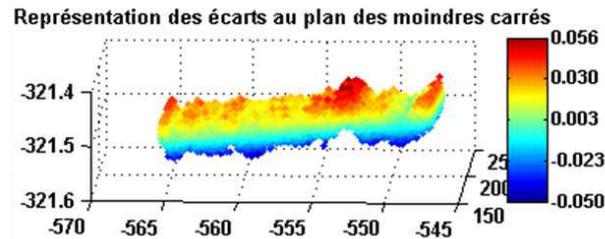


Figure B.5 – Exemple de cartographie représentant le bruit de numérisation (Kr on+MOCN)

ment. Sur ces figures, les données brutes et filtrées sont tracées. Un redressement des valeurs a aussi été réalisé.

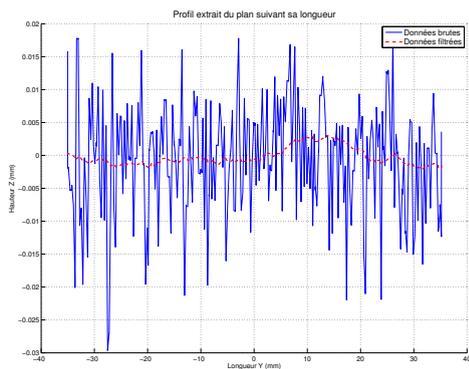


Figure B.6 – Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kr on dans la MOCN (longueur)

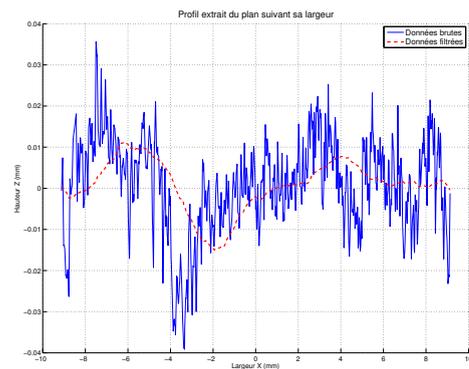


Figure B.7 – Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kr on dans la MOCN (largeur)

Les tableaux B.2 et B.3 mettent en avant les valeurs de justesse des différentes marches. Le premier tableau correspond à une distance de numérisation minimale tandis que le second pour une distance de numérisation maximale. Les figures B.8 et c) sont des tracés de la justesse en fonction de la hauteur de marche. On remarque donc que la fonction n' st pas linéaire et augmente lorsque la hauteur de marche augmente. Enfin la figure B.9 est un exemple de cartographie obtenu suite à la qualification de la justesse (ici pour la marche de 20mm).

Qualification dans la MMT

Dans cette partie les différents résultats de bruit et justesse de mesure sont donnés, suite à la qualification du système de mesure Kr on+MMT. Le tableau B.4 donne les différents résul-

Marche	Valeur référence mm	Valeur mesurée mm	Erreur de justesse mm	Erreur de justesse/mm
j_1	4,99996	4,9949	0.00506	0,001012
j_2	19,99994	19,99	0.00994	0,000497
j_3	35,00009	34,9491	0.05099	0,001456857

Tableau B.2 – Justesse de mesure du laser Kréon montée dans la broche de la MOCN (d_{min})



Figure B.8 – Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche

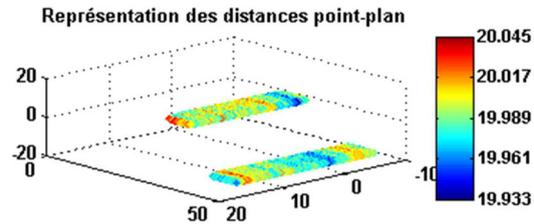


Figure B.9 – Justesse de numérisation pour la marche de 20mm j_2

Marche	Valeur référence mm	Valeur mesurée mm	Erreur de justesse mm	Erreur de justesse/mm
j_1	4,99996	4,9897	0.01026	0,002052
j_2	19,99994	19,9828	0.01714	0,000857
j_3	35,00009	34,9306	0.06949	0,001985429

Tableau B.3 – Justesse de mesure du laser Kréon montée dans la broche de la MOCN (d_{max})

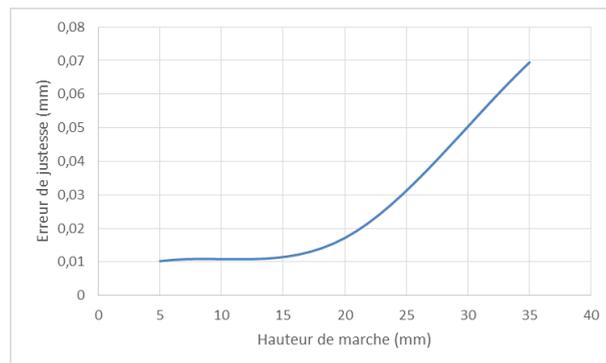


Figure B.10 – Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche

tats de bruit de mesure en fonction de la distance de numérisation. Au total, 8 numérisations du plan étalon ont été effectuées, de manière à utiliser un maximum la fenêtre de mesure du Kréon.

On remarque rapidement que le bruit de mesure diminue plus on se rapproche de la surface (étonnant que ce ne soit pas au milieu de la fenêtre de mesure). Un bruit moyen d'environ $13\mu m$ du même ordre de grandeur que celui obtenu dans la MOCN ($12\mu m$). Par ailleurs, nous pouvons remarquer en observant les cartographies d'écarts (cf. figure c)) une répétition du motif suivant la largeur du plan étalon provenant de la ligne laser.

Plan	Bruit	Ecart min.	Ecart max.
1	0,025	-0,087	0,1
2	0,020	-0,089	0,076
3	0,014	-0,086	0,078
4	0,013	-0,073	0,053
5	0,010	-0,044	0,046
6	0,009	-0,036	0,037
7	0,008	-0,043	0,044
8	0,008	-0,05	0,031

Tableau B.4 – tab :bruitMMT

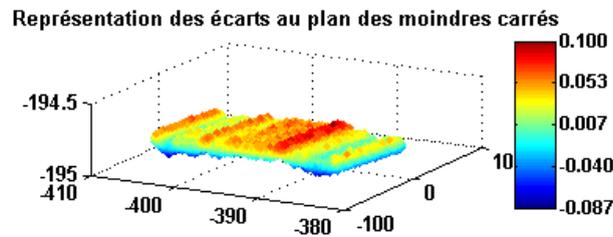


Figure B.11 – Mesure du bruit de numérisation

Des profils suivant la longueur et la largeur ont été extraits au nuage de points obtenu avec le Kréon. Les deux figures B.12 et B.13 sont les résultats obtenus suite à l'extraction des profils après un filtrage ainsi qu'un redressement des courbes.

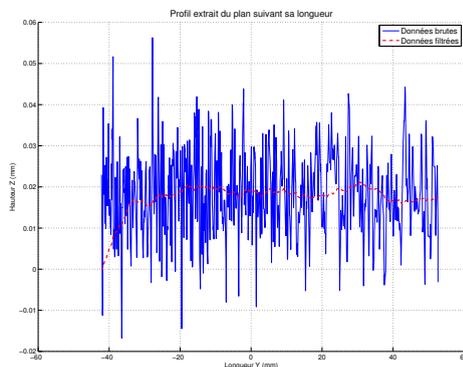


Figure B.12 – Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kréon (longueur)

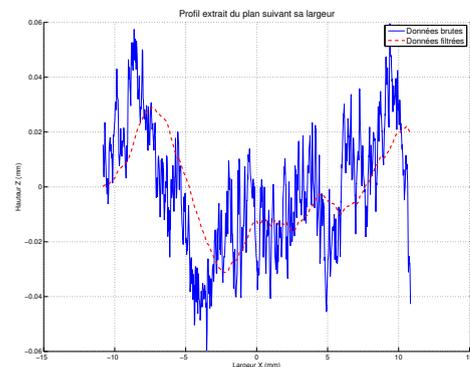


Figure B.13 – Profil extrait du plan étalon suite à sa numérisation au laser Kréon (largeur)

Il est à noter que le profil extrait suivant la longueur du plan représente toute sa longueur contrairement à celui suivant la largeur qui n'est qu'une seule partie de la largeur du plan étalon (largeur de la ligne laser projetée).

Les résultats obtenus ne sont pas en corrélation avec ceux obtenus par la mesure au capteur Stil. Ces déviations sont donc dues aux erreurs du système de mesure (Kréon+MMT). Il serait intéressant de refaire la même analyse suite à la qualification du Kréon sur la MOCN pour déterminer si ces erreurs sont dues au laser Kréon ou plus au porteur...

Le tableau B.6 met en avant les résultats de justesse obtenus suite à la numérisation de la marche étalon sur le MMT. Les valeurs de références sont extraites du certificat de calibration (Annexe) de la marche étalon.

Marche	Valeur référence mm	Valeur mesurée mm	Erreur de justesse mm	Erreur de justesse/mm
j_1	4,99996	4,9913	0.00866	0,001732
j_2	19,99994	19,9861	0.01384	0,000692
j_3	35,00009	34,9444	0.05569	0,001591143

Tableau B.5 – Justesse de mesure du laser Kréon montée sur la tête de la MMT avec la distance de numérisation maximale



Figure B.14 – Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche

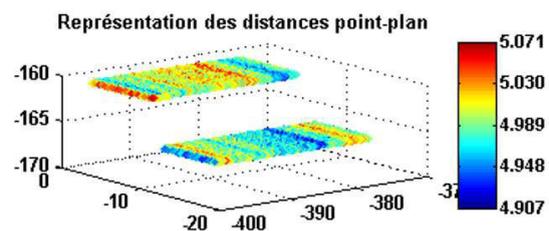


Figure B.15 – Justesse de numérisation pour la marche de 5 j_1

Justesse	Valeur référence mm	Valeur mesurée mm	Erreur de justesse mm	Erreur de justesse/mm
j_1	4,99996	4,995	0.00496	0,000992
j_2	19,99994	19,9789	0.02104	0,001052
j_3	35,00009	34,9331	0.06699	0,001914

Tableau B.6 – Justesse de mesure du laser Kréon montée sur la tête de la MMT avec la distance de numérisation minimale



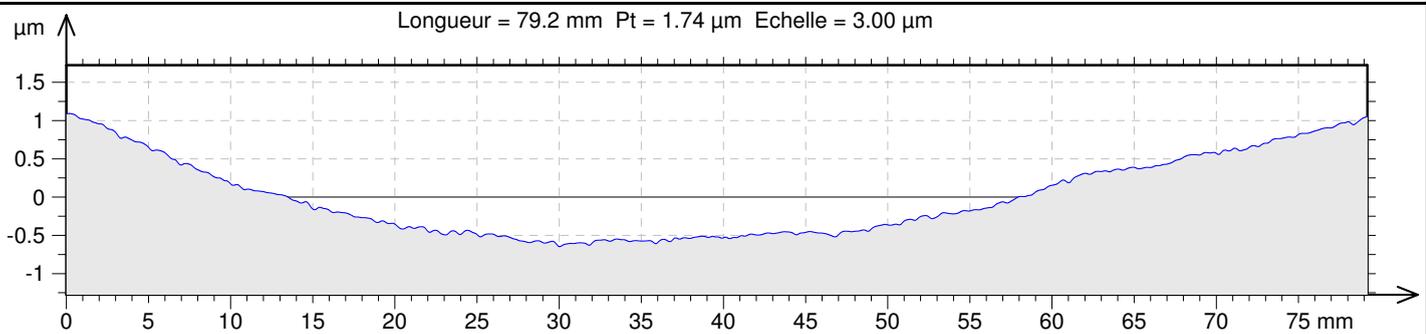
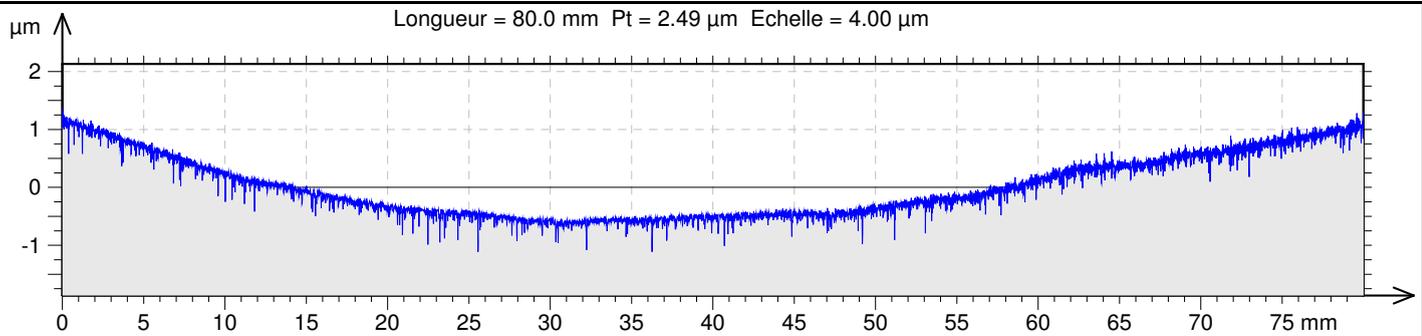
Figure B.16 – Erreur de justesse en fonction de la hauteur de marche

Avant de réaliser la qualification du Kréon sur la MMT et sur la MOCN, le plan étalon servant à la qualification du bruit de mesure a été mesuré avec un capteur confocal Stil per-

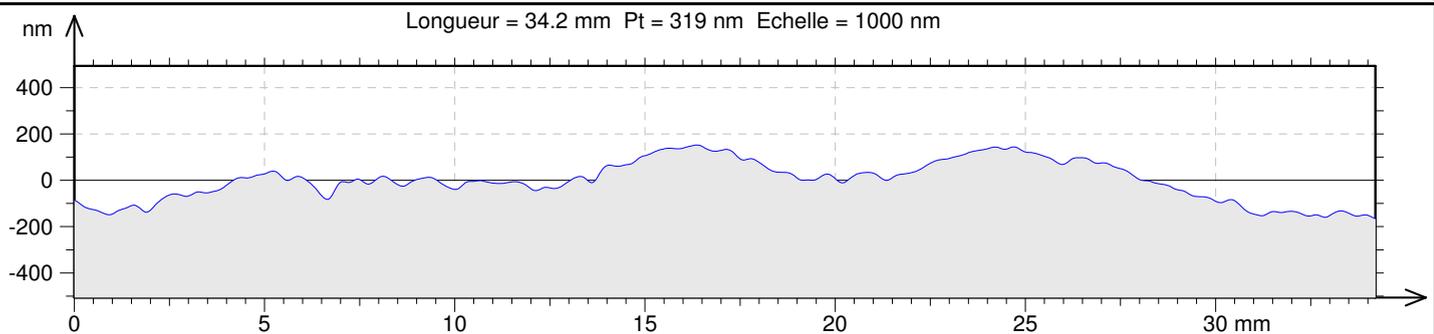
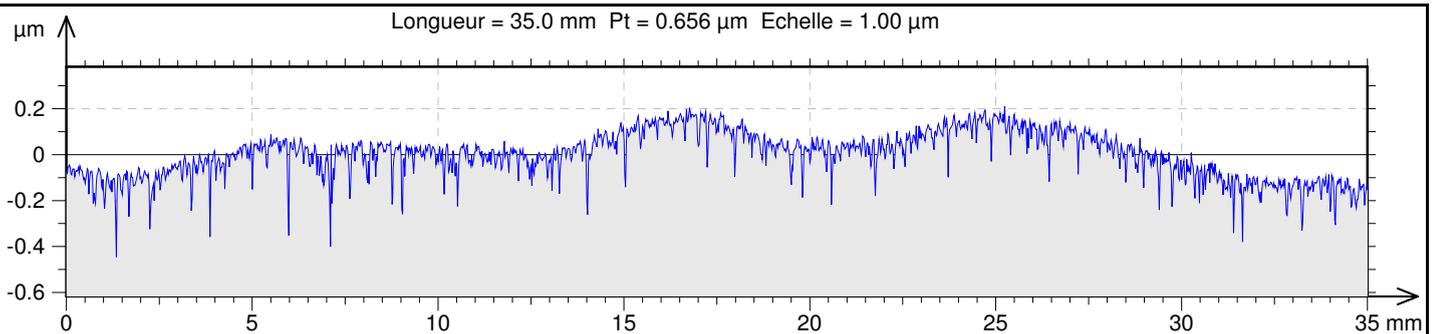
mettant d'obtenir la micro-géométrie de surface. Deux mesures ont été réalisées : un profil suivant la longueur du plan et un suivant sa largeur. Les résultats de ces mesures sont donnés sur la page suivante. On remarque une erreur de forme (concavité) suivant la longueur du plan inférieur à $2\mu m$. Suivant sa largeur un profil plus aléatoire apparait. Celui-ci est faible comparé à l'erreur en forme suivant la longueur (inférieur à $400nm$).

Plan étalon (Stil)

Mesure d'un profil suivant la longueur de 80mm (échantillonnage : 10 μ m)
+
filtrage (suppression des ondulations d'ordre 3)



Mesure d'un profil suivant la largeur de 35mm (échantillonnage : 20 μ m)
+
filtrage (suppression des ondulations d'ordre 3)



Suite à ces différentes études, nous ne remarquons pas de résultats semblables entre la mesure au Stil et la mesure au Kréon (MMT ou MOCN). Les écarts observés par la mesure au Stil peuvent provenir directement de la pièce ou des erreurs de mesure (porteur), néanmoins ces défauts sont trop faibles pour être observés avec le laser Kréon.

Lorsque l'on observe les différentes cartographies obtenues par l'étude du bruit de mesure du Kréon sur la MMT ou sur la MOCN, nous remarquons des similarités. Il a été choisi de réaliser la même étude (bruit de mesure) sur les marches de la pièce étalon utilisé pour la justesse de mesure. Les cartographies du tableau B.7 sont obtenues ainsi que les extractions de profil associées.

Kréon + MOCN		Kréon + MMT	
Plan	Marche	Plan	Marche
<p>Représentation des écarts au plan des moindres carrés</p>	<p>Représentation des écarts au plan des moindres carrés</p>	<p>Représentation des écarts au plan des moindres carrés</p>	<p>Représentation des écarts au plan des moindres carrés</p>
<p>Profil extrait du plan suivant la largeur</p>			

Tableau B.7 – Tableau comparatif des différentes numérisations (cartographie des écarts et extraction de profil suivant le plan du laser)

Visibilité du maillage par un système multi-caméras

Lorsqu'un objet est observé par une caméra ou par plusieurs caméras, des limites liées à la visibilité de l'objet apparaissent. En effet, les informations liées aux différentes zones cachées de l'objet par rapport à la caméra (arrière de l'objet par exemple) sont inconnues. Sur la figure C.1, deux images du même objet ont été prises avec des angles de vues différents. Sur ces images, les parties à l'arrière de l'objet ne sont pas observées. Sur la vue de droite (figure C.1(b)), une partie du plan à l'arrière du dôme est caché. Cette zone est cependant observée par la caméra de gauche (figure C.1(a)), mais elle doit être supprimée durant le prétraitement, car les scores de corrélation ne peuvent pas être évalués.



(a) Angle de vue gauche



(b) Angle de vue droit

Figure C.1 – Images d'un même objet avec deux angles de vues différents

Dans cette annexe un algorithme de visibilité d'un objet par rapport à deux points de vue est proposé. Cet algorithme est utilisé comme outil de prétraitement du maillage initial servant à la mesure par stéréo corrélation sur facette. Il se base sur un algorithme mis en place par Katz et al. [Katz et al., 2007], l'algorithme HPR (Hidden Point Removal).

d) Visibilité d'une caméra

La figure C.2 met en avant la contrainte liée à la visibilité d'une caméra. Une schématisation 2D permet de comprendre les limites liées à la visibilité de l'objet par rapport au point de vue de la caméra. La caméra définie par le repère R_c est dirigée vers le maillage numérique R_{FAO}

par connaissance de la calibration complète de la caméra.

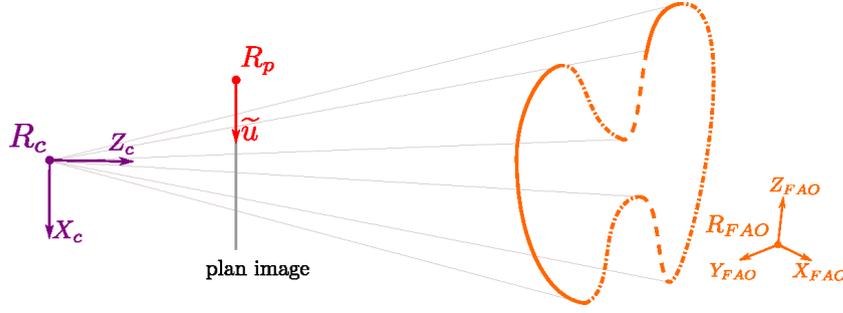


Figure C.2 – Problème de visibilité d'une caméra

Seules les facettes formant les lignes continues sur la figure C.2 du maillage numérique (R_{FAO}) sont observées dans le plan image. Les facettes représentées par des traits mixtes sont des zones "arrières" de l'objet par rapport à ce point de vue. Finalement, les facettes représentées par des traits pointillés sont des zones cachées par une partie de l'objet plus avancé dans le champ de la caméra. Il est nécessaire de réaliser un prétraitement du maillage utilisé pour la mesure par stéréo corrélation sur facette afin de s'affranchir d'erreurs de calcul dues à la visibilité de l'objet par une des deux caméras utilisées.

Katz et al. [Katz et al., 2007] propose un algorithme robuste (HPR Hidden Point Removal) permettant de supprimer les points d'un nuage de points par rapport à un point de vue.

L'algorithme HPR fonctionne sur des données de type nuage de point, il est nécessaire de modéliser chacune des facettes du maillage complet par un point. Le barycentre des facettes est utilisé pour cette étude. La figure C.3 représente différentes vues du nuage de points (barycentre des facettes) et du centre optique (centre caméra), O_c .

Une inversion sphérique du nuage de points par rapport au centre optique O_c est la première étape de l'algorithme HPR. Celle-ci est définie par l'équation C.1.

$$\widehat{X}_B = X_B + 2(R - \|X_B\|) \frac{X_B}{\|X_B\|} \quad (C.1)$$

Dans cette équation, X_B représente les coordonnées des barycentres (nuage de point initial) dans le repère R_C . R est le rayon utilisé pour l'inversion sphérique. Il est défini par la distance la plus grande entre le centre caméra O_c et le nuage de point. \widehat{X}_B est calculé à partir de l'équation C.1 et représente les coordonnées de tous les points inversés dans le repère R_C . La figure C.4 représente le résultat de l'inversion sphérique du nuage de point initial.

Les points oranges sont les barycentres des facettes du maillage initial X_B , positionné par rapport au repère caméra R_c de la même manière que sur la figure C.3. Les points verts représentent les points calculés par inversion sphérique (équation C.1), \widehat{X}_B , avec R la plus grande distance entre le centre optique (origine du repère caméra R_c) et le nuage de point initial (X_B en orange sur la figure C.4).

La seconde étape de l'algorithme HPR est le calcul de l'enveloppe convexe du nuage de points inversé \widehat{X}_B et du centre optique (origine du repère R_c). Les points visibles X_B du nuage

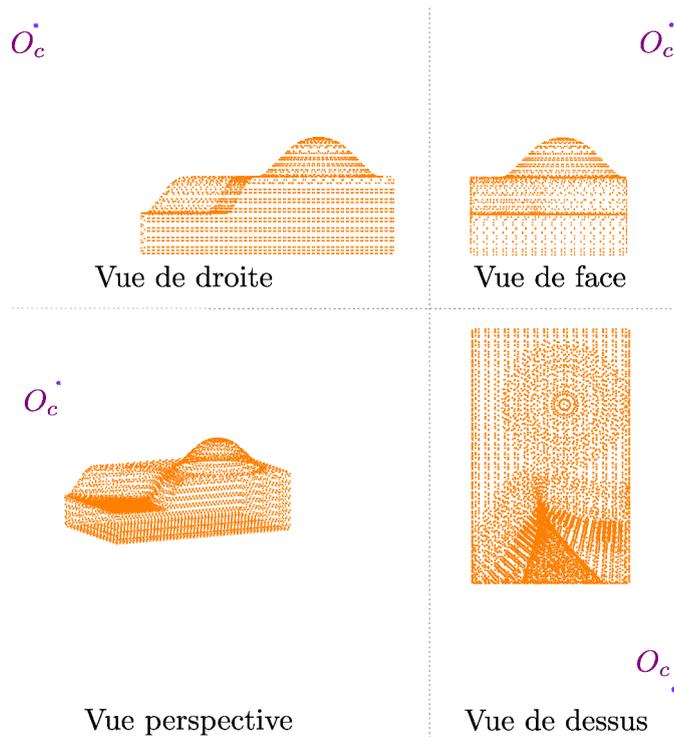


Figure C.3 – Position du centre caméra O_c par rapport au nuage de points issu du maillage initial

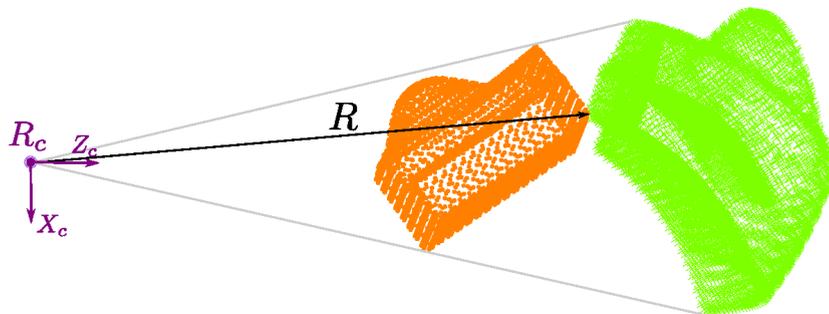


Figure C.4 – Inversion sphérique du nuage de points initial par rapport au centre caméra

de points initial sont ceux dont leur inversion sphérique appartient à l'enveloppe convexe calculée précédemment [Katz et al., 2007]. La fonction *convhulln.m* de Matlab © , utilisée pour le calcul de l'enveloppe convexe, retourne directement les coordonnées des points \widehat{X}_B appartenant à cette enveloppe convexe calculée. Ainsi, les points X_B , ayant pour inversion sphérique les points \widehat{X}_B appartenant à l'enveloppe, sont conservés ; tous les autres sont supprimés. Les facettes associées aux barycentres retenus forment le maillage après prétraitement de la visibilité de la caméra. La figure C.5 représente le résultat obtenu pour l'angle de vue de la caméra de gauche : les facettes du maillage initial non observées sur l'image de gauche sont supprimées pour former le nouveau maillage.

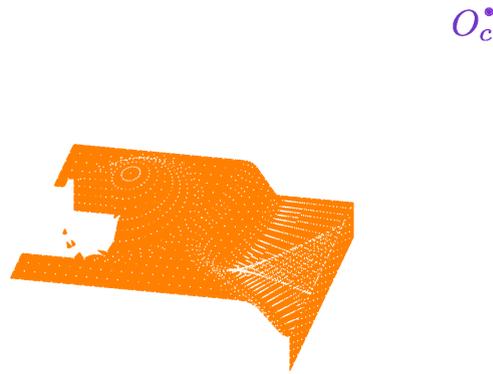


Figure C.5 – Maillage après prétraitement avec l'algorithme HPR [Katz et al., 2007] pour l'analyse de la visibilité

e) Application à un système stéréoscopique

Pour réaliser la mesure par stéréo corrélation sur facette, 2 caméras calibrées sont utilisées. L'algorithme HPR doit donc être effectué avec les 2 angles de vues. Seules les facettes observées sur les 2 images sont alors conservées. Sur les figures C.6(a) et C.6(b) sont représentés les résultats suite au prétraitement du maillage initial par l'algorithme HPR dans le cas de l'angle de vue de la caméra de gauche (figure C.6(a)) et dans le cas de l'angle de vue de la caméra de droite (figure C.6(b)).

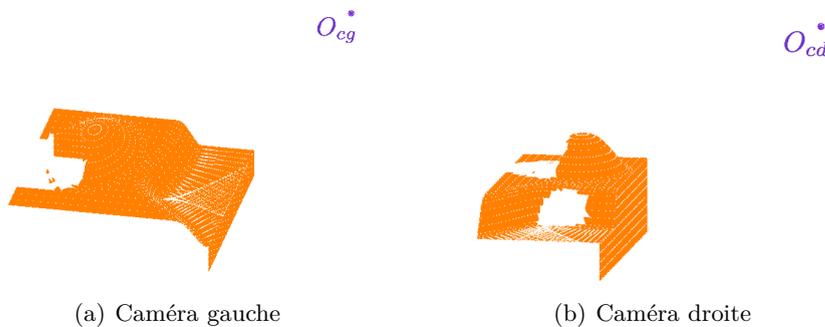


Figure C.6 – Résultats de visibilité

Pour le système stéréoscopique, le maillage final est l'intersection des 2 résultats gauche et droite. La figure C.7 représente le maillage obtenu par intersection des 2 maillages précédents (figure C.6). Les facettes non observées sur les 2 caméras et ne permettant pas la mesure par stéréo corrélation sur facettes sont supprimées. Plus de 50% des facettes ont été supprimées dans cette étape de prétraitement. Ces facettes sont majoritairement des facettes à l'arrière de l'objet. Cependant, un nombre non négligeable de facettes ont été supprimées sur la partie supérieure de l'objet. Il existe certainement une orientation de l'objet dans l'espace 3D permettant d'observer un maximum de facettes sur la zone supérieure de la pièce.

Ce premier prétraitement du maillage numérique permet de s'affranchir des problèmes de visibilité de certaines facettes pour la future mesure par stéréo corrélation. Dans le cas de surfaces complexes, plusieurs orientations de l'objet devant les caméras doivent être envisagées



Figure C.7 – Prétraitement du maillage - Suppression des facettes non observées par les 2 caméras

pour obtenir des résultats de stéréo corrélation sur toute la surface. Il pourrait être intéressant de mettre en place une méthode permettant de trouver la meilleure orientation de l'objet dans l'espace de telle qu'une surface donnée soit le plus observées par le système stéréoscopique.

f) Analyse de l'aire de la facette

Le prétraitement présenté dans cette partie est en continuité avec le prétraitement présenté dans la partie précédente (visibilité du maillage pour un système stéréoscopique). Les facettes non visibles par les systèmes stéréoscopiques sont supprimées à partir du premier prétraitement.

Le second prétraitement du maillage porte sur la taille des facettes. Les projections du maillage 3D sur les images gauche et droite déforment les facettes. Les aires projetées des différentes facettes sur les 2 images sont donc variables, elles peuvent être que de quelques pixels comme de quelques dizaines de pixels. Les aires des facettes projetées doivent être étudiées, car elles conditionnent les futurs calculs par stéréo corrélation de la facette. Afin d'évaluer le score de corrélation de la facette, celle-ci est discrétisée en plusieurs points (figures 3.45 et 3.36). Les niveaux de gris sont évalués en chacun de ces points. Dans le cas d'une facette projetée dont l'aire est de l'ordre de quelques pixels, plusieurs points d'évaluation des niveaux de gris seront sur le même pixel. Ainsi, ils auront la même valeur de niveaux de gris. Cette redondance peut gêner la résolution du problème d'optimisation. Il est nécessaire d'évaluer pour chacune des facettes du maillage les aires (en pixels) liées aux 2 projections sur les images.

Sur la figure C.8 des facettes numériques 3D du repère FAO R_{FAO} et de taille homogène sont projetées sur le plan image de la caméra gauche. L'aire projetée d'une facette peut être de l'ordre de quelques pixels pour 2 raisons : soit la facette 3D est très éloignée de la caméra, soit l'opération de projection "aplatie" la facette. Ces deux cas sont représentés sur la figure C.8.

Dans le cas de maillage 3D inhomogène (taille des facettes variables), il est nécessaire de prendre en compte l'aire de la facette 3D (en mm^2). Soit $Aire_{i,3D}$ l'aire de la facette $_i$ 3D dans le repère FAO, $Aire_{i,projetée}^g$ et $Aire_{i,projetée}^d$ les aires projetées de la facette $_i$ respectivement dans l'image de gauche et de droite, les rapports des aires projetées sur l'aire 3D peuvent être évalués :

$$\mu_i^g = \frac{Aire_{i,projetée}^g}{Aire_{i,3D}} \quad \text{et} \quad \mu_i^d = \frac{Aire_{i,projetée}^d}{Aire_{i,3D}} \quad (C.2)$$

Les 2 rapports calculés (équation C.2) sont comparés à une valeur seuil!!!! si au minimum

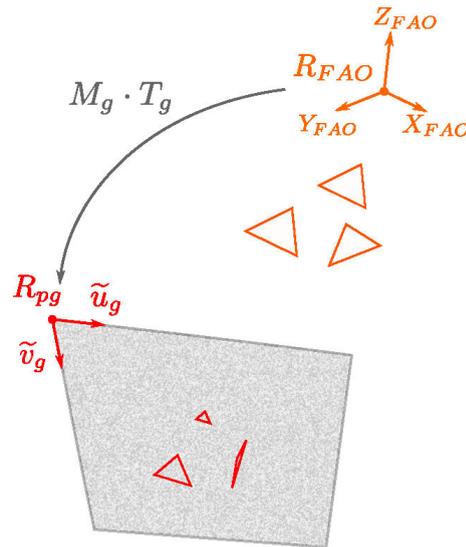


Figure C.8 – Différentes formes de projection de facettes dans le plan image

un des deux rapports est inférieur à la valeur seuil choisi la facette 3D associée sera supprimée du maillage et ne rentrera pas en compte dans la mesure par stéréo corrélation. Cette méthode de prétraitement est résumée par l'algorithme 3.

Algorithme 3 Prétraitement du maillage - Aire de la facette

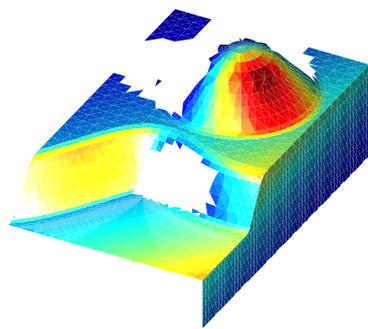
```

 $\mu_i^g \leftarrow$  rapport entre l'aire projetée sur l'image gauche et l'aire 3D de la facettei)
 $\mu_i^d \leftarrow$  rapport entre l'aire projetée sur l'image droite et l'aire 3D de la facettei)
for i=1 to nombre de facettes do
  if  $\mu_i^g < \text{seuil}$  or  $\mu_i^d < \text{seuil}$  then
    facettei ko
  else
    facettei ok
  end if
end for

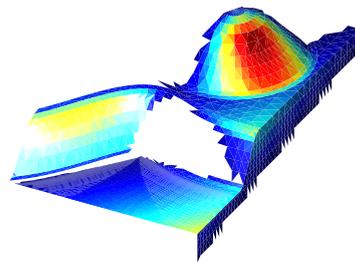
```

Les cartographies de la figure C.9 représentent les valeurs moyennes des rapports μ_i^g et μ_i^d pour chacune des facettes_i. LE premier prétraitement portant sur la visibilité des facettes (partie C) a été réalisé préalablement. Les zones rouges représentent les facettes ayant un rapport moyen grand, inversement les zones bleues représentent les facettes ayant un rapport moyen faible. Ainsi lorsque la valeur seuil est augmentée (figure C.9(b)) les zones bleues initiales (figure C.9(a)) sont supprimées.

L'analyse des aires des différentes facettes présentée dans cette partie à pour but de supprimer les facettes dont une des 2 aires projetées est faible par rapport à son aire dans l'espace 3D. Ainsi ce prétraitement permet de s'affranchir des facettes pouvant conduire à un résultat de mesure par stéréo corrélation "aberrant". Il peut être envisagé de faire varier le nombre de points de discrétisation (utilisés pour la mesure par stéréo corrélation) en fonction des aires projetées des facettes.



(a) Valeur seuil basse



(b) Valeur seuil haute

Figure C.9 – Cartographie des valeurs moyennes des rapports μ_i^g et μ_i^d

Titre : Mesure In-situ par moyens optiques

Mots clés : Modélisation, Mesure In-situ, Interopérabilité, Multi-capteurs, Vision, Stéréo-corrélation

Résumé : Dans le contexte de la fabrication des pièces de formes complexes par enlèvement de matière, l'intégration des opérations de mesures au plus près du moyen de production permet d'envisager une forte réactivité pour la réalisation d'actions correctives et ainsi d'améliorer le procédé. Nous nous sommes intéressés dans ces travaux à la réalisation d'opérations de mesure au sein du moyen de production. Nous avons ainsi identifié plusieurs problématiques liées à la fois à la mesure dans ce contexte In-situ mais également au contexte multi-capteurs multi-échelles. Ces problématiques concernent d'une part l'intégration de la phase de mesure dans le contexte de fabrication et d'autre part la mise en œuvre effective d'une mesure multi-capteurs dans un environnement de fabrication. Nous avons donc proposé une approche pour la mesure In-situ multi-capteurs répondant aux contraintes de diminution du temps alloué pour la phase de mesure et de traitement tout en s'assurant de la qualité de la mesure et d'augmentation de l'interopérabilité entre les données de fabrication et de mesure.

Un modèle des échanges de données entre la fabrication et la mesure In-situ est réalisé dans ces travaux. Il permet de proposer une intégration de la phase de mesure dans la gamme de fabrication.

La phase de mesure devant être réalisée dans un temps restreint, un outil de mesure par caméras (Stéréo-corrélation d'images) est aussi proposé dans ces travaux. Basé sur la connaissance du modèle FAO de la pièce et de l'environnement de travail, cet outil de mesure permet d'obtenir une cartographie des écarts géométriques de la pièce directement dans le repère FAO.

Ainsi, il est possible d'analyser directement les données de mesure dans le même repère que celui de la fabrication : les temps de traitements des données sont réduits.

Une application de la démarche de fabrication et mesure In-situ est réalisée avec l'analyse par vision des écarts géométriques puis par la mesure de la pièce avec le laser plan Kréon.

Cette étude pourra s'étendre vers la proposition d'une phase de mesure adaptée aux écarts localisés ainsi qu'à la mise en place d'actions correctives.

Title: Multi-sensor In-situ measurement

Keywords: Modeling, In-situ measurement, Interoperability, Multi-sensor, Vision, DIC analyse

Abstract: Integrating inspection procedures in the machining process contributes to process optimization. The use of in-situ measurement allows a better reactivity for corrective actions. However, to be highly efficient, Machining and Inspection Process Planning must reach a high level of integration. It is here essential to focus on the compromise measurement time vs precision: the time dedicated to inspection must be limited, but not to the detriment of measurement quality.

A measurement process for in-situ machining defect detection is proposed based on a stereo-DIC. The proposed method allows the direct comparison between images of the machined part and the CAD model by means of a CADmodel based calibration method which links the camera frame to the CAM frame. Therefore, starting from a meshed-model representation of the part, local regions of interest are defined corresponding to the projection of each facet onto the two images.



