

Contribution à l'inspection des pièces mécaniques souples sans le recours à des opérations de conformation

Par

Marwa HAJ IBRAHIM

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

MONTREAL, LE 31 AOÛT 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Antoine Tahan, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mohamed Ali Mahjoub, codirecteur de thèse
Département d'électronique industrielle à l'École nationale d'ingénieur de Sousse

M. Michel Rioux, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Chatelain, membre du jury
École de technologie supérieure

M. Borhen Louhichi, Membre de jury
Institut supérieur des sciences appliquées et de technologie de Sousse

M. Mounir Sayadi, Membre de jury
École nationale supérieure d'ingénieurs de Tunis

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 18 Août 2021

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

La présente thèse est le fruit d'une approche multidisciplinaire et d'une cotutelle. Informaticienne à la base, mon doctorat est dans le domaine de la métrologie dimensionnelle.

Le présent travail n'aurait pas été possible sans le soutien de mes directeurs de thèse. Je tiens à remercier le professeur Antoine Tahan pour la confiance qu'il m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissante pour sa grande disponibilité pour avancer mes travaux, de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme. Je remercie également le codirecteur de cette thèse, le professeur Mohamed Ali Mahjoub pour m'avoir accueilli au sein de son équipe. Je lui suis également reconnaissante pour ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie ce qui m'a toujours poussé pour avancer. Je lui adresse ma gratitude pour tout cela. Je tiens à exprimer aussi mes profondes gratitude au professeur Borhen Louhichi qui m'a toujours épaulée durant les travaux de cette thèse.

Je désire aussi remercier tout particulièrement monsieur Ali Aidibe pour son soutien qui m'a apporté pour avancer mes travaux de recherche. Aussi pour ces précieuses interventions qui m'ont été un grand secours particulièrement dans la réalisation de mes articles. Sa disponibilité a été une aide précieuse pour moi.

J'ai eu l'opportunité d'être impliquée dans un projet professionnel '*Advanced Manufacturing Automation, Digitization and Optimization* –AMADO avec la compagnie Siemens et l'ÉTS. Je tiens à adresser mes vifs remerciements à Ugo Dal Bianco, Nicolas Hardy et Katherine Schmidt pour leur soutien et leur disponibilité durant le stage réalisé chez Siemens. J'y ai beaucoup acquis dans le domaine de métrologie, ce qui m'a permis de développer mes compétences pour intégrer mes connaissances informatiques dans le domaine de la métrologie dimensionnelle. De plus, je remercie également l'École de Technologie supérieure (ÉTS), l'Institut Supérieur d'Informatique et des Techniques de Communication de Hammam Sousse (ISITCom).

J'adresse également mes très sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Je remercie également tous les ami(e)s de l'ÉTS, les membres du Laboratoire d'Ingénierie des Produits, Procédés et Systèmes (LIPPS) et les membres d'AÉROÉTS pour les bons moments partagés.

Enfin, je ne pourrais finir ces remerciements sans penser à ma famille dont l'affection, l'amour, le soutien et l'encouragement constants m'ont été d'un grand réconfort et ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Contribution à l'inspection des pièces mécaniques souples sans le recours à des opérations de conformation

Marwa HAJ IBRAHIM

RÉSUMÉ

L'inspection des pièces fabriquées est une étape importante de la fabrication. En raison des variations inhérentes des procédés de fabrication, les composants produits contiennent des écarts dimensionnels et géométriques par rapport à la forme nominale telle que définie dans un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO). Ces écarts sont désignés '*défauts*'. À noter que les défauts peuvent être acceptables ou pas, en fonction de la tolérance allouée. Dans le cas spécifique des pièces dites flexibles (ou souples), la forme (géométrie) à l'état libre peut être significativement différente de la géométrie nominale. Ces '*déformations*' sont causées par la force de gravité et/ou des distorsions induites par des contraintes résiduelles. Traditionnellement, la séparation des déformations et des défauts est réalisée en conformant le composant sur un gabarit qui reproduit la forme nominale. L'inspection des défauts est donc effectuée par des gabarits de conformation dédiés à cette tâche. Si on veut s'affranchir du gabarit et procéder à l'inspection sans dispositif de conformation, une manipulation mathématique devient nécessaire pour conformer virtuellement la pièce par une opération de recalage (registration) dite non rigide.

L'objectif de cette recherche est donc de proposer un outil pour manipuler des nuages de points obtenus d'une numérisation, réalisée sans gabarit de conformation, d'un composant mécanique flexible. Ainsi, les coûts de processus d'inspection se trouvent réduits et la productivité améliorée. Plus spécifiquement, le projet vise l'amélioration d'un algorithme de recalage nommé CPD (*Coherent Point Drift*) développé à l'origine pour l'industrie de l'animation graphique et inadapté pour le cas des composants mécaniques. Nos travaux améliorent la recherche de correspondance entre le nuage des points mesurés et un nuage de points issu de la pièce nominale en réalisant un recalage dit '*flexible*'. En d'autres termes, le recalage développé garantit une transformation isométrique restreinte à des contraintes qui reflètent les propriétés physiques de la pièce mesurée (rigidité en tension, flexibilité en torsion). L'idée maitresse de nos travaux est que, lors de l'alignement avec l'algorithme CPD qui est lancé de manière itérative pour aligner les maillages CAO sur les maillages SCAN, nous minimisons simultanément deux critères : la distance point à point entre CAO et SCAN et une représentation cohérente de la distorsion (métrique qui reflète l'étirement) du modèle CAO à chaque itération.

Le projet est basé sur deux contributions. La première est l'amélioration du processus d'alignement qui a été obtenue en développant une méthode d'optimisation basée sur un algorithme génétique (AG) qui a permis d'identifier les paramètres optimaux de régularisation de l'algorithme CPD. Ces paramètres contrôlent la qualité de la phase d'alignement. De plus

VIII

nous avons introduit une méthode qui adapte les hyperparamètres de l'algorithme CPD à la rigidité locale. Cette approche est performante surtout dans le cas des pièces qui présentent des variations de rigidité situées dans des régions à forte courbure. Une reformulation de la fonction objective de l'algorithme est mise en avant. Une matrice de correction associée à l'importance de chaque point de mesure, et donc à la rigidité locale de la pièce lors de la phase d'alignement, a été introduite et intégrée. Les points de mesure représentant la même rigidité ont été regroupés et classifiés en utilisant l'algorithme des *c-moyens flous* (*fuzzy c-means*). L'efficacité de l'approche proposée est démontrée sur différentes études de cas issus de l'industrie de transport. Les résultats obtenus démontrent une meilleure détection et quantification des erreurs dimensionnelles et géométriques.

La deuxième contribution de ce projet de cette thèse est de proposer une approche complémentaire pour optimiser la phase d'alignement. Il s'agit d'une amélioration du critère de calcul de la distance euclidienne entre les deux modèles, CAO et SCAN. Le but est de déterminer la méthode la plus efficace pour estimer la distance entre les deux modèles. La métrique utilisée est basée sur une approximation du Hausdorff distance en proposant différente implémentation afin de réduire les erreurs algorithmiques induisant une mauvaise estimation de défaut de fabrication présenté sur la pièce.

Mots-clés: CPD, algorithme génétique, recalage rigide, recalage non rigide, inspection, pièces flexibles, pièces souples, classification, *fuzzy c-means*, déformations.

Contribution à l'inspection des pièces mécaniques souples sans le recours à des opérations de conformation

Marwa HAJ IBRAHIM

ABSTRACT

The dimensional inspection of manufactured parts is an essential step during the manufacture and assembly of components. Due to inherent variations in manufacturing processes, produced components contain dimensional and geometric deviations from their nominal shape as defined in computer-aided design (CAD) software. These deviations are referred to as "defects". Note that the defects may or may not be acceptable, depending on the tolerance allowed. In addition, and in the specific case of non-rigid (or flexible) parts, the shape (geometry) in the Free State can be significantly different from the nominal shape. These "deformations" are caused by gravity and / or by the distortion induced by residual stresses. Traditionally, the separation of deformations and defects is achieved by conforming the component to a jig which reproduces the nominal shape. Therefore, the defect inspection is carried out on a template specifically dedicated to this task. If we want to proceed the inspection without a conforming device, mathematical manipulation becomes necessary to virtually conform the part based on registration operation called non-rigid.

Therefore, the goal of this research is to provide a digital tool to manipulate a point cloud resulting from a digitization without using special conforming template for a flexible mechanical component. Thus, inspection process decreases costs and increases productivity. More specifically, the project aims to improve CPD algorithm (Coherent Point Drift) widely used in imaging applications and not adapted for mechanical components. Our work improves the search for correspondence between the measured points cloud and a nominal point cloud by performing a flexible registration. In other words, the developed registration operation guarantees an isometric transformation restricted constraints reflecting the physical properties of the mechanical part (tensile rigidity, torsional flexibility). The main idea of our work is that during the alignment phase with the CPD algorithm (iteratively executed to align the CAD meshes on the SCAN meshes), two criteria are simultaneously minimized: the point to point distance between CAD and SCAN and a scalar representation of change of parameter size of CAD mesh at each iteration of CPD algorithm.

The proposed project is based on two main contributions. The first is to improve the alignment process by developing an optimization method based on genetic algorithm (GA) to find the optimal regularization parameters of CPD algorithm that control the alignment phase. Also, we have adapted the hyper-parameters Of CPD to the local stiffness. This approach is effective especially in the case of those representing rigidity variations located in regions with strong curvature.

A reformulation of the objective function of the algorithm is put forward. A correction matrix associated with the importance of each measurement point, and therefore with the local stiffness of the part during the alignment phase, has been introduced and integrated. The measurement points representing the same stiffness were grouped and classified using the fuzzy c-means algorithm. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated on various case studies from the transport industry. The results obtained demonstrate better detection and quantification of dimensional and geometric errors.

The second contribution of this thesis project is to propose another approach complementary to the first contribution to optimize the alignment phase. This is an improvement of the Euclidean distance calculation criterion between the two CAD and SCAN models by defining metrics based on a distance calculation approximation in order to obtain a good estimate of defects.

Keywords: CPD, genetic algorithm, rigid wedging, non-rigid wedging, inspection, flexible parts, flexible parts, classification, fuzzy c-means, deformations.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVU DE LA LITTÉRATURE ET MÉTHODOLOGIE	7
1.1 Introduction.....	7
1.2 Définition et objectif de l’inspection	7
1.3 Classification des pièces mécaniques - <i>qu’est-ce qu’une pièce flexible?</i>	9
1.4 Recalage/Registration	11
1.4.1 Recalage rigide.....	12
1.4.2 recalage affine.....	13
1.4.3 recalage affine avec une mise à échelle	14
1.4.4 recalage non rigide.....	14
1.5 Recalage ‘Flexible’	17
1.6 Revue de littérature sur les approches d’inspection dimensionnelle des pièces flexibles sans l’utilisation d’un gabarit	18
1.6.1 Approches topologiques.....	19
1.6.2 Approches basées sur des simulations des éléments finis (EF)	21
1.7 Objectif de recherche	28
1.8 Structure de la thèse	29
CHAPITRE 2 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU ACPD, PERFORMANCE ACTUELLE ET STRATÉGIE D’OPTIMISATION PROPOSÉE	33
2.1 Introduction.....	33
2.2 Algorithme IDB-ACPD, principe et méthodologie	33
2.3 Performance actuelle.....	37
2.4 Stratégie d’amélioration proposée	39
2.5 Conclusion	45
CHAPITRE 3 UNE APPROCHE D’INSPECTION DES PIÈCES FLEXIBLES EN ADAPTANT LE CPD ET EN SE BASANT SUR UNE MÉTHODOLOGIE DE CLASSIFICATION.....	47
3.1 Introduction.....	47
3.2 Méthodologie	47
3.2.1 Présentation de l'approche proposée	48
3.2.2 Études de cas et validation.....	54
3.2.2.1 Description des études de cas	54
3.2.2.2 Résultats et discussion	55
3.3 Conclusion	62

CHAPITRE 4	AMÉLIORATION DE L'ALIGNEMENT FLEXIBLE BASÉE SUR UNE ESTIMATION DE DISTANCE EUCLIDIENNE POUR UNE INSPECTION SANS GABARITS DES PIÈCES CONFORMES	65
4.1	Introduction.....	65
4.2	Évaluation de qualité d'Alignement basée sur un métrique d'erreur de distance	65
4.2.1	Distance Point-Point	67
4.2.2	Distance Point-Courbe	68
4.2.3	Distance Point-Triangle	68
4.3	Résultats expérimentaux	70
4.4	Conclusion	75
CONCLUSION.....		76
RECOMMANDATIONS		79
ANNEXE I	GENETIC ALGORITHM FOR THE INSPECTION OF DEFORMABLE BODIES BY ADAPTING THE COHERENT POINT DRIFT	85
BIBLIOGRAPHIE.....		107

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Signification des paramètres de l'algorithme CPD.....16
Tableau 2.1	Résultat de l'approche d'optimisation44
Tableau 3.1	Estimation des meilleures valeurs α e pour la pièce A57
Tableau 3.2	Estimation des meilleures valeurs α e pour la pièce B58
Tableau 4.1	Comparaison entre les différentes méthodes d'estimation de distance entre CAD et SCAN-Cas A72

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Classification de la rigidité10
Figure 1.2	Classification des pièces selon la flexibilité11
Figure 1.3	Schéma de recalage.....12
Figure 1.4	Différence entre une transformation rigide et non rigide.....17
Figure 1.5	Placement de recalage flexible dans une échelle de recalage/registration18
Figure 1.6	Organigramme présentant la structure de thèse31
Figure 2.1	Les étapes de l'algorithme IDB-ACPD37
Figure 2.2	Stratégies d'amélioration40
Figure 2.3	AG incorporé dans l'étape d'optimisation de l'algorithme original IDB-ACPD43
Figure 2.4	Description de cas d'étude44
Figure 2.5	Temps de calcul des différents techniques d'optimisation45
Figure 3.1	Les deux principales courbures.....51
Figure 3.2	Résumé de l'approche proposée53
Figure 3.3	Description des études de cas (a) Cas A (b) Cas B (c) Les valeurs des défauts imposés55
Figure 3.4	Résultats de la méthode de classification; (a) Cas A, (b) Cas B.....58
Figure 3.5	Évaluation de l'erreur quadratique moyenne par génération pour le cas A-V1; (a) <i>RMSD</i> , (b) <i>RMSstretch</i>59
Figure 3.6	Fréquence relative cumulée pour le critère de distance euclidienne60
Figure 3.7	Fréquence relative cumulée pour le critère de <i>stretch</i>61

Figure 4.1	Histogramme de distribution de distance euclidienne (exécuté par IDB-ACPD-1)67
Figure 4.2	La Distance Point-à-Triangle (ΔP) comparé à la distance Point-à-Point (ΔD).....69
Figure 4.3	Les cas d'études utilisés pour validation de cas (a) Cas A (b) Cas B (c) Les valeurs des défauts imposés71
Figure 4.4	Fréquence relative cumulée pour le critère de distance euclidienne.72
Figure 4.5	Comparaison des effets des méthodes d'estimation de critère de distance euclidienne sur la qualité d'alignement - Cas A-V173
Figure 4.6	Comparaison des effets des méthodes d'estimation de critère de distance euclidienne sur la qualité d'alignement - Cas B-V174

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3D	<i>Three Dimensional Space</i>
AG	Algorithme Génétique
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAI	<i>Computer Assisted Inspection</i>
CAO	Conception assistée par ordinateur
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CPD	<i>Coherent Point Drift</i>
CQ	Contrôle de Qualité
DDL	Degrés de Liberté
EF	Éléments Finis
EM	<i>Expectation-Maximization</i>
EM-ICP	<i>Expectation-Maximization Iterative Closest Point</i>
FCM	<i>Fuzzy C-mean</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FENR	<i>Finite Element Non-rigid Registration</i>
GD&T	<i>Geometric Dimensioning and Tolerancing</i>
GMM	<i>Gaussian Mixture Module</i>
GNIF	<i>Generalized numerical Inspection Function</i>
ICP	<i>Iterative Closest Point</i>
IDB-ACPD	<i>Inspection of Deformable bodies-Adapting the Cohrent Point Drift</i>
IDB-CTB	<i>Inspection of Deformable Bodies by Curvature and Thompson-Biweight</i>
IDI	<i>Iterative Displacement Inspection</i>
MCT	<i>Motion Coherence Theory</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
RBF	<i>Radial Basis Function</i>

XVIII

RGNIF	<i>Robust Generalized numerical Inspection Function</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RPM	<i>Robust Point Matching</i>
TPS	<i>Thin Plate Spline</i>
TPS-RPM	<i>Thin Plate Spline Robust Point Matching</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

T	Matrice de transformation telle que calculée par l'algorithme CPD
R	Matrice de rotation
t	Vecteur de translation.
Y	Position initiale à l'ensemble initiale à transformer
v	Une fonction de déplacement pour transformation rigide
β	Paramètre qui représente le modèle de régularisation de lissage.
λ	Paramètre qui représente le compromis entre la qualité de l'ajustement du maximum de vraisemblance et la régularisation
β_0, λ_0	Valeur initiale des paramètres β et λ
$\beta_{opt}, \lambda_{opt}$	Valeur optimisée des paramètres β et λ
S'	Transformation de S dans un nouveau système de coordonnées après alignement en utilisant l'algorithme <i>Coherent Point Drift</i> (CPD)
C	Ensemble de points de P correspondant aux points les plus proches de la surface nominale S
c	Paramètre qui contrôle la distance du centre d'une distribution d'un échantillon de données
C_i	Point de l'ensemble P correspondant au point le plus proche du point s_i de la surface nominale, $c_i \in C$
$stretch$	Valeur du critère de la somme des d_i par rapport à $N_e[mm]$
$\Delta_{stretch}$	Valeur absolue de la différence entre la valeur du $stretch$ de S et $S'[mm]$
d_i	Distance entre s_i et ses voisinages de premier niveau $[mm]$
d'_i	Distance entre s'_i et ses voisinages de premier niveau $[mm]$

N_e	Nombre d'éléments au voisinage immédiat du point p_i
Δ_D	Valeur absolue de la différence entre C et S'
$D_{reference}$	Valeur idéale entre c_i et s_i qui doit être égal à zéro
$D_{c,s'}$	Distance euclidienne entre s'_i et son point correspondant c_i
RMS	Erreur moyenne quadratique
$RMS_{stretch}$	Erreur quadratique de critère de distance curviligne
RMS_D	Erreur quadratique de critère de la distance euclidienne
F	La fonction objective à optimiser
s_i	Point de $S, s_i \in S$
s'_i	Point obtenu par alignement avec le CPD
α	Poids associé au critère de <i>stretch</i> (distance curviligne)
$K(p)$	La courbure gaussienne au point p
k_1 et k_2	Les deux principales courbures (minimum et maximum)
HK^c	représente la courbure gaussienne de l'ensemble des nœuds C
Z	L'ensemble des zones présentées dans S'
α_j	le poids associé au point j dans la zone m de S'
A	le vecteur représentant l'ensemble des poids associés à chaque zone k
n_{z_k}	le nombre de points dans la zone k
RMS_Z	Le vecteur représentant l'ensemble des erreurs quadratiques moyennes pour chaque zone k .
α_{vect}	Un ensemble de valeurs α à partir duquel A_{1xm}^T .

$F_{ACPD-1}(x)$	Fréquence de la distribution commutative empirique de $\Delta_{stretch}$ obtenue par la nouvelle reformulation de l'algorithme IDB-ACPD
$F_{ACPD}(x)$	Fréquence de la distribution commutative empirique de $\Delta_{stretch}$ obtenue par l'algorithme IDB-ACPD
U	L'énergie de déformation
σ	La contrainte induite ($N.m^{-2}$),
ε	L'élongation
V	Le volume [m^3]
E	Le module d'Young ($N.m^{-2}$),

INTRODUCTION

Le contrôle dimensionnel et géométrique des pièces fabriquées est une tâche fondamentale dans les processus de fabrication et d'assemblage des produits. À la fin d'une étape de fabrication, et en considérant les tolérances (spécifications géométriques) imposées *a priori*, l'inspection vérifie et s'assure si la pièce produite respecte les exigences géométriques et dimensionnelles telles que définies sur une géométrie idéale dite « nominale ». Cette dernière est généralement définie dans un modèle mathématique à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO).

Aujourd'hui, l'évolution technologique a rendu accessible diverses technologies de mesure très sophistiquées. À titre d'exemple, nous pouvons citer les scanners optiques (ex. triangulation laser, photogrammétrie ou lumière structurée) qui peuvent procurer un nuage dense et précis de points très rapidement ($\approx 10^5$ points/sec). Dans le cas de composants mécaniques rigides, le contrôle dimensionnel et géométrique a été étudié et résolu par de nombreux chercheurs. Il existe des solutions robustes, encadrées par des normes et déjà déployées dans l'industrie. L'identification des défauts pour ce type de pièce est aujourd'hui adéquatement accomplie par un logiciel d'inspection assistée par ordinateur (CAI) comme *Polyworks®* ou *Geomagic®*. Ce n'est pas le cas pour les pièces flexibles.

Le terme '*flexible*' est un terme relatif. On utilise dans la littérature spécialisée, et d'une manière équivalente, les termes *non rigides*, *déformables* ou encore *souples* pour désigner des composants dont la géométrie est facilement modifiable. Nous parlons ici de déformations dans un domaine strictement élastique et dont les amplitudes sont supérieures aux tolérances imposées. Beaucoup de composants dans l'industrie du transport (automobile et aéronautique) peuvent être considérés et classés comme tels. Pour les composants mécaniques, il y a un consensus de considérer qu'une pièce est flexible si nous pouvons la déformer avec une force raisonnable (de l'ordre de 50-100 N) d'une manière à modifier significativement sa géométrie.

Les pièces flexibles possèdent donc à l'état libre une forme significativement différente que celle définie par le modèle CAO (nominal), en raison des défauts de fabrication, mais surtout à cause des effets de la gravité et de la distorsion induite par les contraintes résiduelles. La géométrie de ces pièces peut être modifiée lors de l'assemblage en appliquant des efforts induits sur les surfaces d'appuis et les attaches.

L'inspection de telles pièces pose des difficultés et des coûts importants à cause de la nécessité d'avoir des gabarits (ou *fixtures*) de conformation, dédiés à l'usage exclusif de l'inspection. À titre d'exemple, le contrôle dimensionnel des pièces non rigides (ex. revêtement d'un avion ou pièce de carrosserie d'auto) nécessite une approche particulière : conformer la pièce sur un gabarit spécifique avec des efforts contrôlés (*Voir Figure 0.1*). Plusieurs méthodes ont été proposées récemment pour le contrôle de qualité (CQ) de ce type de pièces sans le recours à un gabarit. Si certaines solutions semblent prometteuses, la majorité de ces méthodes souffrent encore de carences reflétant des prédictions limitées à des scénarios bien spécifiques. Pour résumer, dans le cas spécifique d'une pièce flexible, il n'y a toujours pas de solution fiable pour automatiser leur inspection.

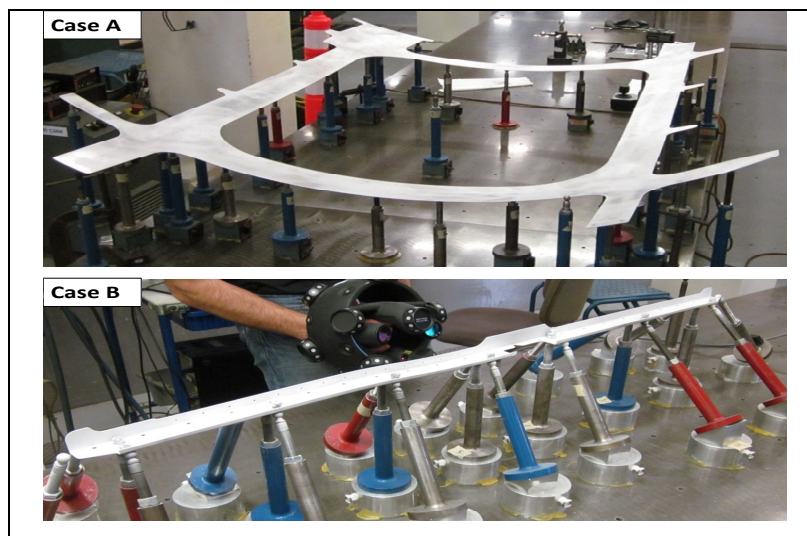


Figure 0.1 Exemple d'inspection avec gabarit de conformation
(avec l'autorisation de Bombardier Aéronautique Inc.)

Le but de cette thèse est de développer (ou améliorer) des algorithmes permettant une meilleure quantification de l'amplitude et de la localisation des défauts de fabrication à partir d'un nuage de points capté à l'état libre sans le recours à un gabarit de conformation.

Ce projet de thèse propose des outils pour manipuler numériquement un nuage de points afin d'éliminer le recours coûteux à des gabarits de conformation. Les principales contributions sont :

- une nouvelle approche pour automatiser le contrôle de la phase d'alignement entre le modèle CAO et le nuage de points numérisé de la pièce (SCAN), la nouvelle approche réduit le temps de calcul et assure une meilleure solution.
- des nouvelles métriques sont proposées pour évaluer la qualité de recalage (registration) entre les deux modèles CAO et SCAN. Ces métriques sont adaptées aux cas des pièces mécaniques (grande rigidité en tension, faible rigidité en modes flexion ou torsion).
- la rigidité locale de la pièce mécanique est prise en compte dès la phase d'alignement, ce qui a permis d'adapter les hyperparamètres de l'algorithme de recalage non rigide CPD à chaque zone.

Les approches proposées sont validées sur différentes études de cas présentant les erreurs de profil ($\bigcap$) et de localisation ($\oplus$) définies selon les normes GD&T (ex. ASME Y14.5 ou ISO-GPS).

La norme ASME-Y14.5 de dimensionnement géométrique et de tolérancement (2009, GD&T) est un système symbolique reconnu internationalement pour la communication des exigences dimensionnelles et géométriques. Le modèle CAO est utilisé pour définir la géométrie nominale (théoriquement parfaite, idéale) des pièces (et des assemblages), et une variété de variations autorisées pour la forme, l'orientation, le positionnement et la taille est décrite avec le symbolisme et les conventions définis dans la norme. Dans cette dernière, il est spécifié que, sauf indication contraire, les inspections des pièces doivent être effectuées à l'état libre sans une force appliquée. Une telle hypothèse est problématique lorsqu'il s'agit de pièces flexibles

en raison de l'écart géométrique significatif (dû à la gravité et aux contraintes résiduelles) entre les formes d'état d'utilisation et les formes d'état libre.

Les dernières versions de la norme ASME-Y14.5 (2009 et 2018) présentent quelques exemples de tolérancement de pièces souples. Le premier en utilisant la conservation des distances curling (ex. diamètre AVG)¹ et le deuxième illustre un cas où l'hyperstatisme est permis avec l'application d'un niveau contrôlé d'effort². Il convient également de mentionner qu'il existe des normes GPS-ISO équivalentes à la norme ASME Y14.5. Et que dans ces normes, on y trouve des indications similaires pour le traitement permis lors de l'inspection des pièces souples. À titre d'exemple, nous citons les normes GPS ISO-10579: 2010 (équivalentes aux sections 4.20 et 5.5 de la norme ASME-Y14.5 (2009)) qui permettent l'application d'une force raisonnable (ne dépassant pas les forces d'assemblage typiques, $\approx 50\text{N}$) pour conformer les pièces non rigides sur des gabarits de conformation reproduisant la géométrie nominale. Dans un tel cas, les forces requises pour simuler les conditions d'assemblage doivent être clairement définies dans les spécifications d'une pièce, ce qui n'est pas toujours simple pour toutes les conditions aux limites de l'assemblage.

Dans cette recherche, des hypothèses sont retenues pour toutes les étapes du développement.

- le modèle CAO de la pièce numérisée (scannée) est disponible et est considéré comme la référence pour la pièce mesurée. Il sera désigné par modèle CAO (ou simplement, CAO).
- la pièce fabriquée est numérisée à l'état libre, sur une position arbitraire, mais connue. Une représentation de la pièce sous forme d'un nuage de points (x, y, z) est donc disponible.
- le nuage de points triangulés (maillage) de la pièce scannée est disponible. Il contient les défauts de fabrication et les déformations à l'état libre. Les déformations élastiques sont

¹ Fig. 5-13, p. 97, ASME Y14.5 - 2009

² Fig. 4 -42, p. 81, ASME Y14.5 - 2009

- plus grandes que les tolérances prescrites (la méthode demeure correcte même si le niveau de déformation est du même ordre de grandeur que la tolérance). Il sera désigné par SCAN.
- la densité de maillage de la pièce numérisée est supérieure à celle du maillage qui sera généré à partir du modèle CAO (la densité des points a été prise arbitrairement deux à trois à quatre fois plus élevée l'origine est que le recalage est réalisé point à point et il faut trouver un point correspondant proche.). Un maillage à faible densité d'une pièce à l'état libre pourrait ne pas représenter tous les détails réels (défauts potentiels) en raison de la déformation considérable induite par la gravité. La même résolution n'est pas nécessaire sur le maillage du modèle CAO étant donné que les régions planes sont connues (il n'y a pas de défaut sur le modèle CAO) et peuvent être représentées avec précision même avec un maillage de densité plus faible.
 - le bruit de mesure provenant de l'équipement d'acquisition est beaucoup plus petit que l'amplitude des défauts.
 - les zones défectueuses ne couvrent pas la majorité de la pièce.
 - l'inspection est limitée aux défauts de profil de surface et de localisation tels que définis par l'ASME Y14.5 (2009).

CHAPITRE 1

REU DE LA LITTÉRATURE ET MÉTHODOLOGIE

1.1 Introduction

La revue de la littérature permettra de situer la présente recherche par rapport aux autres recherches effectuées sur le même sujet. En premier lieu une revue générale sur les méthodes d'inspection automatisée et leurs objectifs est présentée. Ensuite, une revue des algorithmes d'alignement (recalage) y est exposée. Par la suite une revue générale des méthodes de classification des composants mécaniques est présentée. Finalement la problématique de l'inspection des pièces flexibles sans gabarit est présentée. Cette revue nous permet d'exposer notre point de départ et nos hypothèses, de présenter les fondements de la méthodologie retenue et finalement de dégager nos propres contributions.

1.2 Définition et objectif de l'inspection

D'une manière générale on peut définir l'inspection d'une pièce industrielle comme étant la vérification des dimensions et tolérances imposées lors de sa conception. Les dimensions déterminent la géométrie d'une pièce, en définissant les tailles, les formes, les caractéristiques, les positions, les orientations et les distances entre caractéristiques nominales de la pièce.

L'inspection dimensionnelle a pour but le contrôle de la qualité d'un produit et de s'assurer de sa conformité par rapport au cahier des charges (requis dimensionnels et géométriques). Concrètement, les résultats d'une inspection sont jugés satisfaisants si, et seulement si, le processus (incluant la captation des données et le traitement mathématique qu'on effectue sur le nuage de points) procure des estimations précises de la position spatiale des *défauts* et de leurs amplitudes. Les résultats de l'inspection, par ailleurs, permettent de contrôler le processus de fabrication et ainsi d'ajuster différents paramètres pour obtenir les résultats désirés.

Les pièces mécaniques doivent être inspectées et contrôlées en utilisant des gabarits de conformation pour s'assurer que les variations de ces pièces respectent les spécifications du concepteur. En raison de la complexité des surfaces et de la croissance de la demande d'outils d'une précision supérieure, le coût de ces gabarits est élevé. Pour réduire ces coûts, Les opérations de conformation sont remplacées par des applications numériques. En effet, plusieurs recherches ont été développées pour contourner le problème de l'inspection sans gabarit de fixation. Dans le cas de pièces rigides, le processus d'inspection a été étudié et résolu par divers chercheurs (Li et Gu, 2004). Citons en 2013, (Viana et al., 2013) ont présenté une méthodologie d'inspection automatisée d'assemblages mécaniques basée sur l'utilisation d'un bras manipulateur, équipé en-tête d'effecteur d'un capteur de vision artificielle. La méthodologie d'inspection proposée se base sur le couplage d'informations 2D et 3D, pour tirer profit de la rapidité de l'analyse en 2D et l'information contenue dans les données 3D. Malheureusement, leur méthode bien qu'elle présente des avantages (productivité, précision) n'est simplement pas adaptée au cas des pièces souples. En 2015, (Kamrani et al., 2015) ont défini une stratégie pour planifier efficacement le processus d'inspection pour CMM. Le travail proposé décrit les différentes étapes pour générer un fichier d'instruction qui peut être exécuté sur CMM. Ce travail commence par l'extraction et la reconnaissance, suivi par un ensemble d'activités (planification de la configuration pour aboutir à l'orientation de la pièce et la distribution de points de contact sur les fonctionnalités.). Ces étapes conduisent à un plan d'inspection efficace. Le plan d'inspection généré est ensuite utilisé pour produire un fichier DMIS et après un post-traitement, ce fichier sera exécuté sur CMM. Aucune mention spécifique au cas des pièces souples n'est rapportée (opération de conformation, recalage, etc.).

Cependant, l'inspection des pièces flexibles à l'état libre n'est pas envisageable en raison des grandes amplitudes de *déformation*. En conformant la pièce sur un gabarit reproduisant la géométrie nominale, on peut annuler l'effet des déformations. C'est l'approche qui est encore largement employée dans l'industrie.

Depuis environ une décennie, différentes solutions ont été proposées par les chercheurs pour permettre, via une opération mathématique de recalage (registration) du nuage de points, de conformer virtuellement la pièce afin de créer l'état de conformation d'une manière numérique. À ce stage, nous pouvons soulever deux questions élémentaires, mais nécessaires : (i) *à partir de quel critère peut-on qualifier un composant mécanique de 'pièce flexible'?* Et, (ii) *Qu'elle est l'opération de recalage (registration) optimale à appliquer sur le nuage de points issu d'une numérisation à l'état libre?*

1.3 Classification des pièces mécaniques - *qu'est-ce qu'une pièce flexible?*

La première interrogation n'a pas une réponse évidente. La flexibilité est une notion relative. Pour y remédier, nous pouvons imaginer une classification en différentes classes qui fera la différence entre un composant très rigide (ex. ailette d'un turboréacteur), d'un composant comme un panneau à paroi mince ou encore d'un tissu mou. Nous conjecturons sur le fait que les méthodologies d'inspection ne seront adaptées que sur une classe à la fois.

(Abenhaim, 2009) ont proposé une définition de la flexibilité (ou rigidité) sur une échelle allant de 0% à 100% en se basant sur une notion qualitative pour représenter les pièces parfaitement rigides (déformation nulle pour une force infinie) et se terminant par un hypothétique 100% pour les pièces très flexibles (ex. courroie, tissu...). Ils ont classifié les pièces arbitrairement en trois zones A, B et C (*Voir Figure 1.1*). La zone A est caractéristique des pièces très rigides. C'est-à-dire que dans cette zone, les déformations induites par une force raisonnable (≈ 50 N) ont un effet (déplacement) négligeable par rapport aux tolérances demandées ($\leq 2\%$). La zone B décrit les pièces relativement flexibles. Cette zone est déterminée par des déformations (dans le sens 'déplacements') et dans le même ordre de grandeur ou dépassant la tolérance exigée. Bien sûr, ceci dépend de la taille de la pièce, de la direction et du stade de l'assemblage sur lequel l'inspection est effectuée. Les pièces de cette zone présentent la quasi-majorité des composants mécaniques flexibles employés dans les industries aéronautique et automobile. Le présent projet a pour domaine la recherche d'une solution robuste pour l'inspection de ces

composants. La zone C qualifie les pièces très flexibles (ex. tissu, corde, etc.) qui subissent de grands déplacement et distorsion à l'état libre.

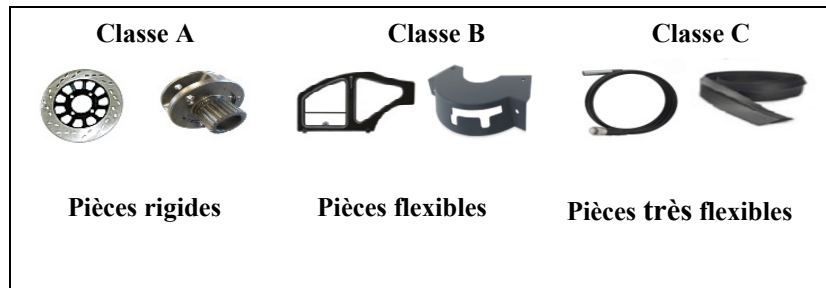


Figure 1.1 Classification de la rigidité
Adaptée de Abenhaim, (2009, p.2)

(Aidibe et Tahan, 2014) ont proposé une autre méthode basée sur une notion quantitative pour classifier l'effet de la flexibilité (ou rigidité) d'une pièce. La flexibilité y est représentée en utilisant une échelle logarithmique pour la taille des composants et un ratio R qui reflète les déformations/déplacements sous effet de la gravité (ou sous l'effet d'une force raisonnable) par rapport à la taille du composant (*Voir* Figure 1.2). Ceci permet de classer les pièces mécaniques en trois différentes catégories. La zone A pour les parties relativement rigides ($R < 0,1$). Le déplacement causé par une force raisonnable pendant l'inspection est inférieur à 10% de la tolérance assignée des pièces. La zone B regroupe les pièces flexibles ($0,1 < R < 100$). Les pièces classées dans cette zone sont les plus problématiques en ce qui concerne la spécification de la tolérance et de l'inspection de leurs exigences géométriques et dimensionnelles. La dernière zone (C) regroupe les pièces très flexibles ($R > 100$). Dans cette zone, de très grands déplacements et distorsions sont produits uniquement par l'effet de la gravité. Notre recherche s'intéresse à l'inspection des pièces situées dans la zone B.

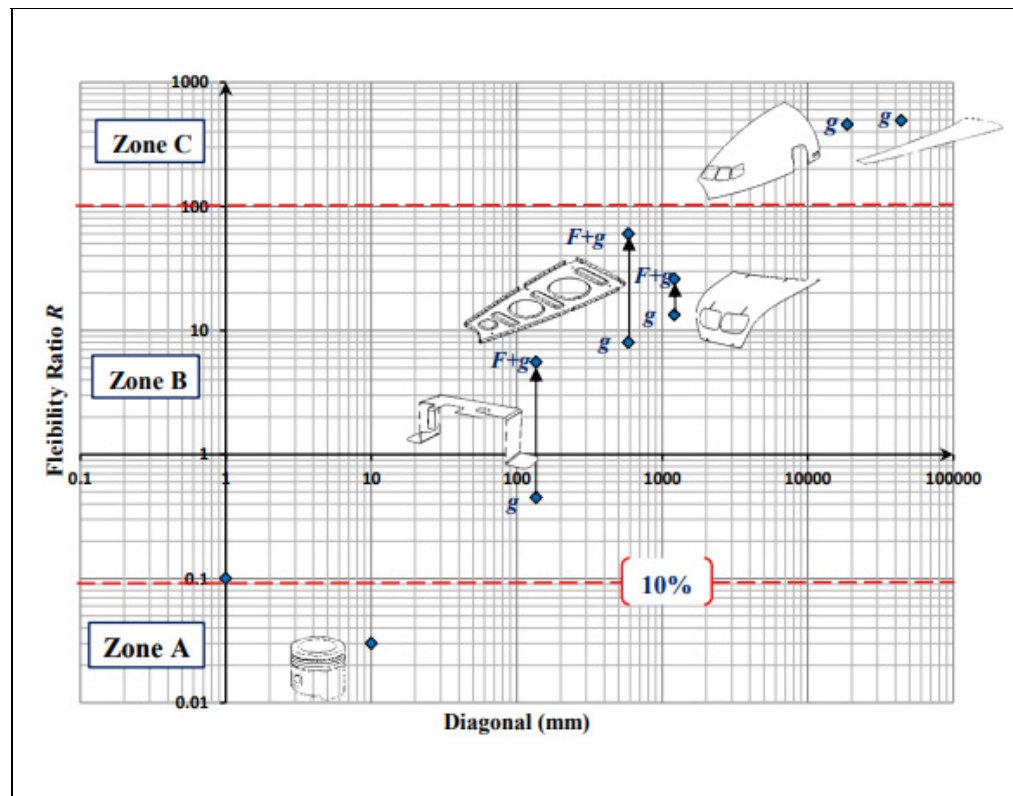


Figure 1.2 Classification des pièces selon la flexibilité
(Aidibe et Tahan, 2014)

1.4 Recalage/Registration

Le terme recalage (ou *registration*) désigne une opération mathématique pour fusionner deux systèmes de référence. Typiquement, un nuage de points (ex. issu d'une numérisation) est une structure de données servant à représenter un ensemble de points dans l'espace 3D. Dans le contexte de scanneurs laser 3D, chaque point possède une coordonnée spatiale en (x, y, z) . L'opération qui consiste à ramener le nuage de points vers le système CAO est désignée *recalage* ou *registration*. C'est un processus pour identifier la meilleure transformation géométrique à appliquer aux points d'un des nuages afin d'obtenir une correspondance de deux ensembles (Voir Figure 1.3).

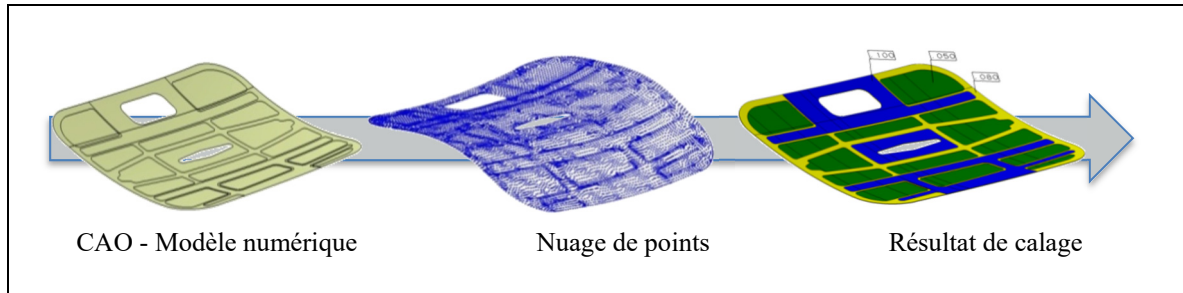


Figure 1.3 Schéma de recalage

La transformation se situe habituellement en deux grandes catégories: **rigide** ou **non rigide**. Une transformation rigide peut être définie par une matrice de rotation R et un vecteur de translation t . Une autre transformation, désignée *Affine*, conserve les distances euclidiennes, mais pas les angles. D'autres transformations vont permettre une mise à l'échelle (changement de repère). Pour les différentes catégories de recalage, nous référons le lecteur à (Myronenko et Song, 2010).

1.4.1 Recalage rigide

Le recalage rigide comprend une transformation rigide entre deux nuages de points; un appelé **source** et l'autre **cible**. Cette transformation est définie comme une transformation qui préserve la distance entre quelconques deux points et l'angle entre deux lignes. Elle consiste à appliquer une opération de translation et de rotation dans l'espace euclidien. En d'autres termes, le recalage rigide n'autorise que 6 degrés de liberté au maximum (les translations t selon les axes X , Y et Z et les rotations R autour des axes X , Y et Z). La taille et la forme du nuage de points transformé ne seraient pas modifiées. Si le nuage de point à transformer est noté y_m , alors la transformation géométrique peut être effectuée selon l'équation suivante :

$$T(y_m; R, t) = R y_m + t \quad (1.1)$$

La qualité de registration est évaluée en utilisant une fonction d'erreur $\varepsilon(R, t)$. Si le recalage est bon, la fonction d'erreur retourne une faible valeur. Par conséquent, le problème consiste à trouver les R et t optimaux selon l'équation (1.2);

$$(R, t) = \text{Argmin } \varepsilon(R, t) \quad (1.2)$$

L'algorithme *Iterative Closest Point* (ICP), proposé par à l'origine par (Besl et McKay, 1992) est un des plus connus. L'algorithme original et ses variantes (Combès et Prima, 2012) sont couramment utilisés pour ce type de recalage. Le ICP est caractérisé par sa simplicité, sa faible complexité de calcul (rapidité) et sa robustesse. Le principe de cet algorithme est défini comme suit, à partir d'une matrice de transformation initiale, l'algorithme estime, par itération sur la base du critère de la distance la plus proche entre deux points correspondants, la matrice de transformation rigide nécessaire à l'alignement de la pièce numérisée avec le modèle nominal. À chaque itération, la distance de Hausdorff des combinaisons de points entre le modèle numérisé et le nominal est évaluée, et ainsi elle est minimisée jusqu'à la satisfaction d'un critère d'arrêt prédéfini. Les faiblesses de cet algorithme sont qu'il ne garantit pas de trouver la solution optimale; il converge toujours vers une solution locale, et que les zones avec des défauts influencent la qualité du recalage.

Cet algorithme est bien adapté pour les pièces rigides (zone A), mais il ne parvient pas à produire de bons résultats pour des pièces flexibles situées dans la zone B (Aidibe et Tahan, 2014). Néanmoins, plusieurs chercheurs continuent à utiliser l'algorithme ICP comme première étape de recalage pour un alignement initial avant le lancement du recalage non rigide.

1.4.2 Recalage affine

Cette méthode de transformation autorise, en plus des rotations et des translations, un facteur d'échelle anisotrope qui permet de modéliser des cisaillements (les distances seront conservées, mais pas les angles). Ce recalage ne consiste pas seulement d'un recalage dans les

6 degrés de liberté (DDL) couverts par l'alignement rigide, mais permet également jusqu'à 6 autres DDL pour l'étirement par rapport aux axes X , Y et Z le long des plans XY , YZ et XZ .

1.4.3 Recalage affine avec une mise à échelle

Cette méthode de transformation autorise en plus une mise à échelle moyennant un vecteur s qui étire (ou compresse) les distances euclidiennes.

$$T(y_m; R, t, s) = sRy_m + t \quad (1.3)$$

1.4.4 Recalage non rigide

Le recalage non rigide consiste à des transformations effectuées, non pas globalement, mais localement sur chaque point de l'ensemble. Une modification en forme et taille de nuage de point source peut être ainsi engendrée. Elle consiste à définir des transformations sur chaque point du nuage indépendamment des autres points, ce qui n'est pas possible dans une transformation affine. Cela signifie que le recalage non rigide peut aligner différentes formes (par exemple, une ligne avec une courbe, ou une surface courbée à un plan).

À l'origine, les algorithmes de recalage non rigide ont été développés pour l'imagerie médicale et pour l'industrie d'animation vidéo. Ces algorithmes sont caractérisés par un grand nombre de DDL. Le vrai modèle de transformation non rigide est souvent inconnu et difficile à modéliser (Li, Sumner et Pauly, 2008). L'approximation simpliste de la véritable transformation non rigide, y compris affine par morceaux et modèles polynomiaux, sont souvent insuffisants pour un alignement correct dans les cas des pièces mécaniques et peuvent produire des correspondances erronées, ils permettent un étirement entre les points. Cet étirement est peut-être plausible dans le cas de l'imagerie médicale, mais incohérent dans le cas des pièces mécaniques. Ce type de recalage ne correspond donc pas à la physique du comportement des pièces mécaniques qui se caractérisent par de grands déplacements en

modes flexion et torsion, mais aussi d'une bonne rigidité en mode tension (Voir Figure 1.4). Finalement, les méthodes de recalage non rigides ont tendance à être sensibles au bruit et aux valeurs aberrantes (ex. défauts) et des points manquants.

La transformation T dans le cas de recalage non rigide est définie par une fonction de déplacement v plus la position initiale :

$$T(Y, v) = Y + v(Y) \quad (1.4)$$

L'algorithme *Coherent Point Drift* (CPD) a été proposé par (Myronenko et Song, 2010). C'est un algorithme populaire dans l'industrie de l'animation. Il est basé sur une approche probabiliste pour aligner des ensembles de points. L'approche considère l'alignement entre deux nuages de points comme un problème d'estimation de la densité de probabilité, où les points du premier nuage représentent un mélange de gaussiennes (*Gaussian Mixture Model* - GMM) dont les centroïdes sont les points du deuxième ensemble déplacé par une déformation. Cette déformation est estimée en utilisant l'algorithme *Expectation-Maximization* (EM) (Dempster, Laird et Rubin, 1977). À l'optimum, les deux ensembles de points s'alignent et la correspondance est obtenue en minimisant une fonction objective. Le processus d'adaptation des centres de gravité des gaussiennes de leurs positions initiales à leurs positions finales est considéré comme un processus de mouvement cohérent et temporel en imposant une contrainte de cohérence de mouvement sur-le-champ de vitesse. Le concept de cohérence de mouvement a été proposé dans la théorie *Coherence Motion Theorie* (MCT). Elle est détaillée dans (Yuille et Grzywacz, 1988; 1989). À noter que le CPD peut créer des distorsions sur le nuage de points. En d'autres termes, le critère d'une transformation isométrique (qui conserve les distances curvilignes entre les points sur le même nuage) n'est pas respecté. Ce dernier point, s'il est acceptable dans le cas de l'animation 3D ou dans le cas de l'imagerie médicale, est tout à fait inapproprié dans le cas des pièces mécaniques.

Les performances (qualité du recalage telle que mesurée par une métrique euclidienne) du CPD sont directement corrélées au bon choix de **trois hyper paramètres** introduits à l'origine par (Myronenko et Song, 2010): ω , β et λ . En particulier, les paramètres β et λ contrôlent l'influence de la contrainte de régularité sur la transformation. Un mauvais choix de ces paramètres ne permettra pas la convergence vers une solution non triviale. Les auteurs qui ont proposé l'algorithme mentionnent que le CPD est plus sensible au paramètre β car il définit le modèle de la transformation MCT (rigide ou non rigide) proposée à l'origine par (Yuille et Grzywacz, 1988; 1989). Une description de l'influence de ces paramètres est résumée dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Signification des paramètres de l'algorithme CPD

Paramètre	Signification
ω	Reflète la quantité de bruit (points aberrants) dans les ensembles de points et le nombre de valeurs aberrantes dans GMM. $0 \leq \omega \leq 1$
λ	Représente le compromis entre la qualité de l'ajustement du maximum de vraisemblance (EM) et de régularisation du mouvement. En d'autres termes, cet hyper paramètre règle la force de la fonction de lissage. Si $\lambda > 0$, il contrôle la force de régularisation
β	Contrôle la rigidité de la transformation Définit le modèle de régularisation Définit la régularisation de lissage (largeur de filtre de lissage gaussien)

Comme mentionné, l'algorithme CPD a été utilisé avec succès dans le domaine d'imagerie médicale et l'animation (Liao et al., 2010) (Ahmadian, Bohun et Ebrahimi, 2016; Saval-Calvo et al., 2018). Dans le domaine mécanique, il est très efficace pour des pièces très flexibles situées dans la zone C (Aidibe et Tahan, 2015). Dans ce cas, un étirement de la surface est autorisé, ce qui ne correspond pas aux caractéristiques des pièces de la zone B.

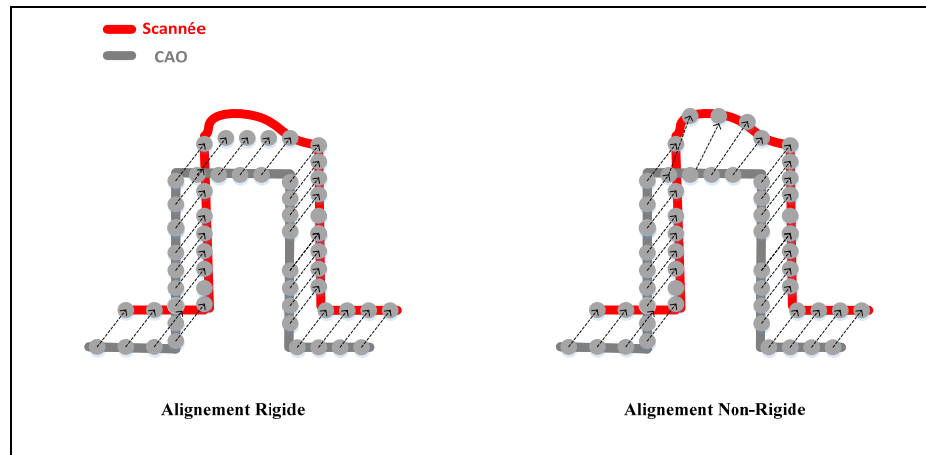


Figure 1.4 Différence entre une transformation rigide et non rigide

1.5 Recalage ‘Flexible’

Le terme *recalage flexible* a été introduit pour la première fois par (Aidibe et Tahan, 2015). Ce type de recalage se réfère à tout type d’alignement non rigide entre ensembles de données dans le cadre d’une transformation qui respecte des considérations physiques intrinsèques à des pièces mécaniques relativement rigides (ex. zone B) en conservant certaines propriétés telles que la préservation des distances géodésiques (curvilignes) entre deux points sur la surface mesurée. Les conservations de ces propriétés garantissent que la registration est réaliste et est similaire au mouvement physique (déformations mécaniques élastiques). En d’autres termes, un recalage flexible est une sous-catégorie de transformation non rigide qui est restreinte à des contraintes supplémentaires reflétant les propriétés physiques. Alors qu’un recalage non rigide n’a pas de telles contraintes. De là, nous pouvons avancer que la conservation des distances géodésiques (curvilignes) est un critère essentiel à toute opération de recalage flexible. En d’autres termes, le recalage flexible consiste à déformer les données acquises d’une pièce mécanique à l’état libre, pour qu’elle soit utilisée dans une phase d’identification des défauts. La Figure 1.5 reflète la position du recalage flexible par rapport au recalage rigide et non rigide ainsi les travaux associés à chaque type de recalage. L’échelle est corrélée avec le nombre de DDL.

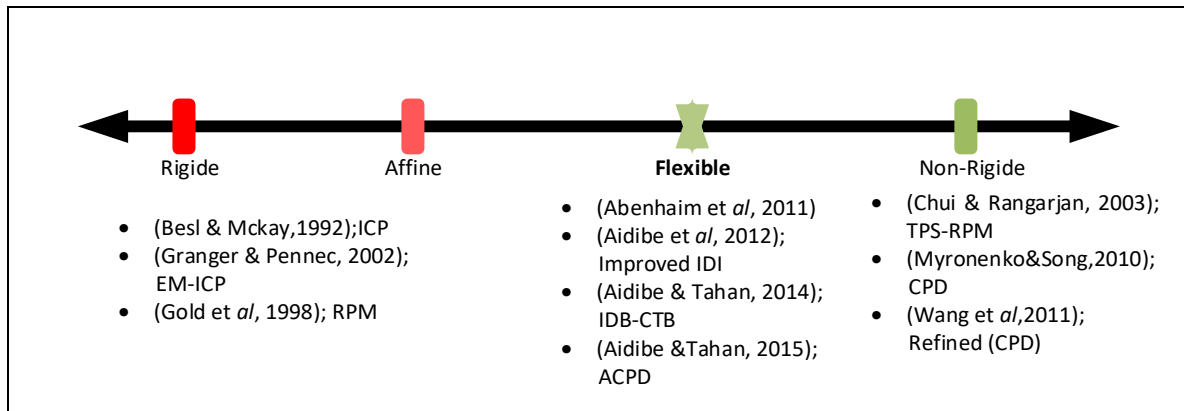


Figure 1.5 Placement de recalage flexible dans une échelle de recalage/registration

1.6 Revue de littérature sur les approches d'inspection dimensionnelle des pièces flexibles sans l'utilisation d'un gabarit

L'inspection dimensionnelle sans gabarit de conformation est un domaine de recherche pluridisciplinaire qui profite des travaux entrepris et développés séparément par diverses communautés de pratique scientifiques et industrielles (mathématique, métrologie, optimisation, informatique...). Plusieurs projets de recherche ont été développés pour contourner le problème de l'inspection de pièces non rigides sans gabarits en automatisant le processus d'inspection pour inclure la condition à l'état libre. Une revue sur les méthodes de spécification et des méthodes d'inspection des pièces non rigides est présentée par (Abenham, Desrochers et Tahan, 2012). Cette revue présente les concepts, les défis et les récentes recherches faits dans ce domaine;

Inspiré par cette revue, ces méthodes d'inspection peuvent être classées en deux groupes; celles qui sont basées sur une approche **topologique** et celles qui sont basées sur une modélisation par la méthode des **éléments finis**. La partie suivante présente une revue succincte sur ces méthodes.

1.6.1 Approches topologiques

Dans ces approches, le recalage est réalisé sans calcul de contraintes et déformations mécaniques. En d'autres termes, dans ces approches, on s'affranchit d'une simulation par éléments finis. (Abenhaim et al., 2011) ont présenté une première approche pour l'inspection des pièces non rigides. Ils décrivent une méthode d'inspection nommée Inspection par Déplacement Itératif (IDI), (*Iterative Displacement Inspection*). L'approche est validée sur 32 pièces simulées. L'algorithme IDI déforme le modèle CAO maillé jusqu'à ce qu'il ressemble à la pièce fabriquée numérisée, ce qui permet leur comparaison (CAO $\Rightarrow$ SCAN). Un modèle d'identification est développé pour séparer les défauts qui sont dus au processus de fabrication des déformations qui sont dues à la flexibilité de la pièce. Les défauts sont identifiés comme des valeurs aberrantes de la distance euclidienne par une méthode itérative. L'identification est réalisée en utilisant un seuil prédéfini par l'utilisateur. (Aidibe, Tahan et Abenhaim, 2012) améliorent le IDI en y introduisant le *Maximum Normed Residual Test* développé à l'origine par (Grubbs, 1969). L'algorithme IDI et sa variante présentent un inconvénient de taille : la nécessité d'avoir le même nombre de nœuds dans les deux modèles (CAO et SCAN).

(Aidibe et Tahan, 2014) ont proposé une méthode originale, IDB-CTB (*Inspection of Deformable Bodies by Curvature and Thompson-Biweight Test*). En profitant des propriétés de courbure locale (courbure gaussienne et moyenne), combinée à un module d'identification, les défauts de fabrication sont identifiés et séparés. La courbure locale est une propriété intrinsèque de la surface, elle est donc invariante sous les transformations isométriques. Le module d'identification est basé sur un test basé sur la théorie des valeurs extrêmes (*Thompson-Biweight Test*), (Thompson, 1985). Le IDB-CTB prépare d'abord les deux modèles (CAO et SCAN) en utilisant une opération de recalage rigide via l'algorithme ICP (Besl et McKay, 1992). Ensuite, la fonction *dsearchn* MATLAB® (basée sur l'algorithme *Quickhull* (Barber, Dobkin et Huhdanpaa, 1996)) est appliquée pour obtenir une liste de correspondance entre les deux modèles. Les valeurs de courbure gaussienne et moyenne sont ensuite estimées pour chaque sommet (CAO et SCAN séparément). Ces informations seront utilisées dans le module

d'identification des défauts. Compte tenu de la différence entre les courbes locales gaussiennes et moyennes estimées, les données qui sont numériquement éloignées de leur voisinage sont marquées comme des défauts de fabrication. L'IDB-CTB a été validé en utilisant des études de cas virtuelles (simulées) et expérimentales (réelles) pour estimer ses performances en identifiant l'emplacement et l'amplitude des défauts du profil. Cependant, il a été démontré que l'IDB-CTB n'est performant que dans le cas de défauts localisés (ex. bosse).

(Aidibe et Tahan, 2015) ont proposé une nouvelle approche : ACPD (*Adapting the Coherent Point Drift Algorithm to the Fixtureless Dimensional Inspection of Compliant Parts*) en adaptant l'algorithme CPD (Myronenko et Song, 2010) au problème de contrôle dimensionnel et géométrique pour les pièces mécaniques. Cette méthode démarre par un préalignement rigide en utilisant l'algorithme ICP (Besl et McKay, 1992) pour mettre le SCAN et la maquette virtuelle (CAO) dans le même système de coordonnées. Les paramètres de régularisation sur la transformation (λ et β) sont ensuite initialisés.

Avec chaque combinaison de λ et β , le modèle CAO est aligné sur la partie numérisée en utilisant l'algorithme CPD. Deux nouveaux critères (reflétant la spécificité des pièces mécaniques) sont introduits : la conservation de la distance curviligne (étirement critère ou transformation isométrique) et la minimisation de la distance euclidienne entre les deux modèles (critère de distance euclidienne). Pour chaque critère, l'erreur quadratique moyenne est calculée à chaque itération et un autre hyper paramètre (α) a été introduit. Il est déterminé a priori pour assurer l'homogénéité (même ordre de grandeur) des deux erreurs quadratiques moyennes. La qualité d'alignement dépend de valeurs initiales attribuées par l'utilisateur. Cette phase nécessite une certaine expertise pour aborder le minimum global. C'est une sérieuse limitation pour le potentiel d'application de la méthode. (Hajibrahim et al., 2016) ont proposé l'utilisation de l'algorithme génétique (GA) comme technique d'optimisation des paramètres de régularisation qui contrôlent la phase d'alignement de l'algorithme CPD. La méthode réduit le temps de calcul de l'algorithme ACPD tout en préservant de bons résultats d'alignement. Dans la même année (Babanezhad et al., 2016) ont proposé une nouvelle méthode d'optimisation

des paramètres de régularisation (λ et β) de l'algorithme CPD en utilisant une méthode biobjective par opposition à une formulation singulière en (Aidibe et Tahan, 2015). La méthode est nommée BOFR 1; une première version pour identification des défauts de profil et de localisation. En 2020, la méthode a été améliorée pour assurer une meilleure qualité d'alignement nommée BOFR 2 (Babanezhad et al., 2020). La méthode proposée BOFR (version 1 ou version 2) déforme les données acquises par un système de mesure sans contact (SCAN) en position libre jusqu'à ce qu'elle atteigne la forme CAO nominale, pour pouvoir réaliser l'inspection avec des outils CAI conventionnels (rigides) comme Polyworks®. En d'autres termes, les données acquises peuvent être traitées comme si elles étaient obtenues à partir d'une pièce rigide, en neutralisant les écarts provoqués par les effets de gravité et des contraintes résiduelles.

Notre recherche est une contribution additionnelle aux méthodes d'inspection basées sur une approche topologique. Elle consiste à développer des méthodes d'alignement flexible basées sur une estimation de la densité de probabilité. Deux propositions ont été faites pour poursuivre les travaux antérieurs entrepris.

Le but est de résoudre des limitations des approches précédentes telles que: saisie manuelle de l'utilisateur, manque de convergence, le piège des optimums locaux, les méthodes employées pour l'estimation des distances (ex. point à point) tout en réduisant le temps de calcul et garantir une meilleure robustesse et une qualité d'alignement satisfaisante. Les contributions proposées comprennent ainsi des améliorations en termes d'exactitude, d'automatisation, d'exécution, de robustesse et de précision (répétabilité) et d'interopérabilité.

1.6.2 Approches basées sur des simulations des éléments finis (EF)

Dès 2006, (Lartigue et al., 2006) ont introduit le concept d'utilisation de torseur de petits déplacements (SDT) développé par (Bourdet et Clément, 1976) pour la métrologie dimensionnelle des pièces flexibles. En fait, le but est de résoudre le problème d'alignement

d'un modèle CAO à un ensemble de points scannés. La méthode cherche une corrélation entre le nuage scanné des pièces rigides et les données CAO maillées où l'effet de gravité ainsi la situation spatiale de la pièce sont considérées. En effet, ils ont profité des avantages de la représentation voxel de nuage de point et la méthode SDT. En effet, le SDT est plus adapté à une petite déformation. Des résultats plus précis peuvent même être obtenus si l'on considère l'effet de la flexibilité du matériau.

La même année, (Weckenmann et Weickmann, 2006) ont proposé une méthode de compensation de distorsion virtuelle dans laquelle la pièce déformée (SCAN) a été altérée virtuellement sur le modèle nominal CAO en déplaçant les points du modèle scanné (obtenu en utilisant une technique de balayage sans contact, projection marginale). Les auteurs ont utilisé des caractéristiques extraites manuellement, telles que des trous et des bords pour trouver la correspondance entre le SCAN et le modèle nominal CAO tout en supposant que les points de fixation ne contiennent pas des défauts. Le motif de bordure est projeté sur la pièce déformée, et une ou plusieurs caméras acquièrent des données. Un maillage triangulaire (*.stl) de la surface est généré à partir du nuage des points mesurés. Ce maillage triangulaire est utilisé dans la fixation virtuelle en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) pour simuler le processus de fixation et calculer ainsi l'écart entre leur position réelle et leur position nominale en se basant sur deux types d'analyse (qualitative et quantitative). Cette méthode présente un inconvénient majeur qui est l'absence d'automatisation (nécessite l'intervention des utilisateurs pour identifier la corrélation entre certains points spéciaux et les conditions d'assemblage afin de définir les conditions aux limites du problème des EF). De plus, la méthode présente un haut niveau d'incertitude (précision). (Weckenmann, Weickmann et Petrovic, 2007) ont amélioré l'approche en inversant le sens de déformation (déformant le modèle CAO $\Rightarrow$ SCAN). Ils ont appliqué les conditions aux limites sur le modèle nominal (CAO) en utilisant une position déjà connue des points de fixation sur la pièce scannée. Par conséquent, le prétraitement des données de mesure n'était pas nécessaire. Par cette méthode, ils ont diminué le temps d'inspection et ont obtenu des résultats plus précis. Toutefois, la méthode proposée nécessite toujours une intervention de l'utilisateur afin de trouver la

correspondance entre les modèle CAO et SCAN. En outre, la modélisation des conditions aux limites dans l'ensemble de données FEM devait être améliorée pour simuler la pièce non fixée. Bref, une limitation majeure de la méthode est sa sensibilité vis à vis le bruit dans la mesure et l'incertitude lors de la construction du modèle.

(Jaramillo, Boulanger et Prieto, 2009) ont proposé une approche similaire; la déformation inverse virtuelle, qui nécessite moins de ressources informatiques. Basée sur la fonction de base radiale (RBF), l'approche minimise la densité du maillage des EF requise pour prédire correctement le comportement de la pièce. Ils ont amélioré cette approche dans (Jaramillo, Prieto et Boulanger, 2013a) où ils ont introduit un recalage partiel flexible en utilisant uniquement des vues partielles à partir des zones qui doivent être inspectées. Ils ont appliqué une technique d'interpolation basée sur les RBF pour estimer les positions des points de fixation manquants, car les données scannées partiellement ne contiennent pas toutes les données. Dans (Jaramillo, Prieto et Boulanger, 2013b), les auteurs ont proposé une approche pour effectuer l'inspection sans avoir besoin de balayer la surface complète de la pièce ou les zones proches des positions de fixation. Dans cet algorithme, au lieu de positions de fixation typiques, les points de surface sont utilisés pour calculer la transformation non rigide.

En 2010, (Ascione et Polini, 2010) ont présenté une méthode de mesure des surfaces de forme libre non rigides par une machine à mesure tridimensionnelle pour combler les contraintes de variation d'état libre qui est principalement en raison du poids et de la libération des contraintes internes résultant de la fabrication. Un composant aéronautique est considéré comme un cas d'étude où la pièce est mesurée sur une machine de mesure des coordonnées (CMM). Une analyse est effectuée afin d'évaluer l'impact de la force mesurée sur la déformation des surfaces mesurées qui montre que cet impact n'a pas de valeur significative dans le cas étudié. L'incertitude de mesure doit être correctement estimée dans cette méthode.

(Radvar-Esfahlan et Tahan, 2012) ont proposé un dispositif d'inspection numérique généralisée (GNIF). La méthode recherche la correspondance optimale entre SCAN et CAO lors d'une

déformation isométrique. L'approche proposée est basée sur la conservation des distances curvilignes (distance géodésique inter point, entre deux points quelconques sur les pièces) au cours d'une déformation isométrique, malgré les grandes déformations. Une fois la correspondance trouvée entre les deux espaces métriques, la transformation non rigide des éléments finis (FENR) est utilisée en appliquant sur le contour (périphérie) du modèle CAO les coordonnées du contour SCAN comme des conditions aux limites. L'identification de l'écart géométrique est calculée. Une version robuste de la méthode (RGNIF) est proposée par la suite en filtrant les points qui provoquent des distances géodésiques incohérentes (Radvar-Esfahlan et Tahan, 2014). La méthode améliorée était capable de traiter des pièces avec des données manquantes.

(Sabri et al., 2016) ont amélioré la définition des conditions aux limites du déplacement pour l'algorithme GNIF. En effet, l'algorithme GNIF est appliqué entre le modèle CAO et le SCAN pour générer une liste de correspondance. Des régions particulières du modèle CAO sont prédéfinies par l'utilisateur manuellement comme régions d'intérêt (par exemple, les points de référence (*datums*), la circonférence des perçages ou des découpages, etc.). En utilisant la liste de correspondance obtenue, les régions équivalentes sont signalées sur le SCAN. Le centroïde pour chacune de ces régions d'intérêt est calculé indépendamment dans les deux modèles (CAO et SCAN). Ensuite, les conditions limites de déplacement sont définies. Des déplacements simulés sont effectués sur le modèle CAO (en utilisant la méthode d'éléments finis) jusqu'à ce qu'elle soit superposée au SCAN en utilisant une définition améliorée des conditions aux limites de déplacement. Par la suite, les distances entre les sommets de SCAN et le maillage CAO déformé sont considérées comme un indicateur pour identifier les défauts. La qualité de l'identification des défauts dépend de la précision de la liste de correspondance déjà obtenue. La robustesse de la méthode a été étudiée en induisant un bruit gaussien simulé dans les études de cas utilisées. (Sabri et al., 2017) ont amélioré l'approche en augmentant le niveau d'automatisation; ils ont proposé de projeter d'abord chaque centroïde d'un élément géométrique (ex. trou) calculé sur la surface du maillage d'appartenance, puis insérer la projection dans le maillage via l'insertion d'un point supplémentaire

(Borouchaki, George et Lo, 1996). L'efficacité globale de la méthode a également été améliorée dans (Sabri et al., 2017) en développant une version GNIF-64 bits (par opposition à sa mise en œuvre initiale de 32 bits).

(Karganroudi et al., 2016) ont introduit une méthode pour filtrer automatiquement les points susceptibles d'être des défauts en se basant sur un critère de contrainte mécanique. D'abord, le GNIF est appliqué pour renvoyer une liste de correspondance entre le modèle CAO et le modèle SCAN. Ensuite, cette liste permet de déformer le modèle CAO sur le modèle scanné à l'aide de la méthode d'éléments finis. À la fin, un filtre qui combine la courbure et le niveau des contraintes von Mises est appliqué. Une fois filtrés, les points restants sont utilisés dans une nouvelle itération, ce qui permet d'identifier et quantifier les défauts plus précisément. La méthode proposée est validée sur des pièces employées dans l'industrie aéronautique. Aussi en 2017, (Thiébaud et al., 2017) ont proposé d'évaluer les défauts de forme de pièces flexibles obtenus via des scanners optiques dans une configuration de mesure indépendante des conditions d'assemblage. Le modèle CAO nominal a été déformé par une simulation EF de la force de gravité de la pièce induisant une déformation dans une configuration connue. La méthode a été validée par rapport à un exemple trivial. En fait, les écarts de forme ont été reconnus en soustrayant les déplacements simulés induits par la gravité des données de mesure. Les auteurs ont utilisé la configuration connue pour la mesure optique de la pièce sur la base de laquelle le vecteur de déplacement pour la simulation EF à chaque nœud du modèle CAO maillé a été calculé en utilisant l'intersection d'un voisinage cylindrique de son vecteur normal et du nuage de points.

En 2018, (Karganroudi et al., 2018) ont proposé une nouvelle méthode d'inspection sans gabarit pour des pièces non rigides basée sur la configuration d'un montage virtuelle d'état d'assemblage. En effet, la méthode vise à prédire la forme fonctionnelle de l'état d'assemblage d'une pièce non rigide déformée. Cette méthode est capable de monter virtuellement la pièce scannée à l'état libre. Ceci est réalisé en appliquant des forces sur les surfaces de la pièce. La forme fonctionnelle est ensuite prédite via une transformation linéaire basée sur une simulation

par éléments finis. Les mêmes auteurs (Karganroudi et al., 2017) ont proposé un nouveau métrique de validation destiné à valider la robustesse des outils CAI pour les pièces non rigides. Il repose sur l'utilisation d'un test d'hypothèse statistique non paramétrique test de *Kolmogorov-Smirnov*.

En 2020, (Lindau et al., 2020) ont proposé une méthode de fixation virtuelle. La méthode consiste à estimer virtuellement la forme d'une pièce non rigide à partir des données acquises lorsque la pièce ne repose que sur 3 points. L'objectif est de minimiser la perte d'information liée à la géométrie, les raideurs de pièce, les contacts de pièce à pièce et les effets de gravité. La méthode est basée sur des techniques de scan 3D pour acquérir la forme de la pièce mesurée. Les compensations nécessaires pour les raideurs des pièces et les effets de gravité sont basées sur l'analyse par éléments finis (FEA) et la méthode des coefficients d'influence. Les résultats montrent que les formes sur-contraintes estimées présentent une bonne ressemblance avec les mesures acquises lorsque la pièce est sur-contrainte par le gabarit de fixation. Par contre, la méthode proposée présente des limites; le post traitement de nuage de points scanné prends un temps de calcul relativement long. En effet, il nécessite un traitement manuel ce qui doit être plus automatisé. Ainsi, pour le post-traitement des nuages de points, une méthode pour gérer les mesures des limites extérieures est manquante dans l'outil utilisé.

Une autre étude publiée récemment propose une optimisation d'une séquence de soudage par points dans le cas des pièces flexibles (Sadeghi Tabar et al., 2021).

Les auteurs proposent une simulation numérique des déformations d'assemblage en respectant la déviation de la pièce lorsque la pièce est encore maintenue sur le dispositif de montage et avant d'être montée sur un gabarit d'inspection. Il a été démontré que le temps total d'optimisation avec la méthode proposée est amélioré jusqu'à 30%.par rapport à la méthode traditionnelle (l'évaluation des déformations est effectuée à la phase d'inspection).

À la même année 2021, Une autre revue toute récente proposée par (Claus, Hagen et Hamann, 2021) présente une méthode d'estimation de forme des pièces sans gravité à partir d'une mesure optique. En fait ils ont proposé un algorithme itératif basé sur les éléments finis (FE) pour obtenir la forme géométrique des pièces en tôle sans l'influence d'aucune force, inclue la force de gravité. Un modèle de simulation de la mesure est créé à l'aide des méthodes disponibles de rétro-ingénierie. L'application de cette méthode concerne principalement la pièce métallique, couramment utilisée dans l'industrie automobile ou aérospatiale. Différentes géométries et des matériaux ont été utilisés pour la validation. Les résultats montrent des écarts en dessous de l'incertitude des appareils de mesure typiques utilisé pour évaluer la géométrie des pièces en tôle. D'un autre côté, le coût global d'exécution de la méthode est également relativement élevé par rapport à d'autres approches.

Après avoir examiné la revue de littérature, les méthodes d'alignement flexibles basées sur la méthode d'EF présentent des importants inconvénients. Nous pouvons citer la difficulté à mettre en place une définition correcte des conditions aux limites et le recours à des ressources de calcul importantes par rapport aux méthodes d'alignement flexibles probabilistes (approche topologique). L'avantage de ces méthodes réside principalement dans le fait qu'elles procurent une estimation des niveaux des contraintes (MPa) induites lors de l'opération de conformation virtuelle.

Les méthodes d'inspection basées sur une approche topologique ont réussi à augmenter l'automatisation par rapport aux méthodes d'alignement flexible basées sur EF. Par contre, comme constaté dans cette revue, le choix des hyper paramètres des algorithmes (ex. β, λ et ω pour le CPD, et ex. α, β, λ et ω pour le ACPD) demeurent leur point faible. Aussi, toutes les études recensées ont employé des scalaires comme hyper paramètres; les mêmes hyper paramètres pour la totalité du nuage de points.

Ces méthodes ne prennent donc pas en compte la flexibilité (ou rigidité) locale de la pièce mécanique lors de la phase d'alignement. Cette condition est respectée lorsqu'il existe des cas

avec des paramètres géométriques identiques (ex. peau d'avion avec épaisseur constante). Cependant, dans le cas général, la présence de paramètres géométriques différents (variation d'épaisseurs, renforts, plis, courbures, etc.) entraîne des variations importantes de la rigidité locale de la pièce. Nous proposons donc dans notre recherche d'introduire une matrice de correction associée et correspondante à la rigidité locale de la pièce. C'est notre hypothèse de départ pour tenter d'y améliorer l'approche topologique.

1.7 Objectif de recherche

L'objectif de cette recherche est de proposer un outil pour manipuler un nuage de points issu d'une numérisation à l'état libre (SCAN) d'une pièce flexible. Idéalement, ce processus doit être **robuste** (vis-à-vis le bruit de mesure, l'amplitude et le nombre de défauts) et **automatisé** (dépendance des choix *a priori* des hyper paramètres). Nous visons à développer une technique d'inspection pour pièces non rigides pour éliminer le besoin de dispositifs d'inspection spécialisés en utilisant un système de mesure sans contact et en comparant le nuage de points obtenu de la pièce déformée (SCAN) avec le modèle nominal CAO pour identifier les défauts de fabrication. Concrètement, à l'aide d'une méthode de recalage (registration), nous visons l'emploi d'un dispositif d'inspection virtuel (numérique) comme substitut robuste et fiable d'un montage (gabarit) physique.

Les sous-objectifs de la recherche proposée seront:

Objectif 1 : Les récents travaux (Aidibe et Tahan, 2015) (Babanezhad et al., 2016) qui ont adapté l'algorithme CPD au cas des pièces mécaniques seront employés comme point de départ pour notre développement.

Le premier objectif est de proposer une stratégie d'optimisation en automatisant le choix des paramètres de régularisation de l'algorithme CPD tout en améliorant le temps de calcul et en tentant de s'échapper du piège du minimum local.

Objectif 2: Le deuxième objectif consiste à améliorer l'algorithme ACPD en évaluant la courbure locale d'une pièce et en l'employant comme l'un des paramètres géométriques pertinents décrivant la rigidité locale. Plus précisément, on tentera de prendre en considération les propriétés géométriques locales de la pièce afin de contrôler l'opération d'alignement (SCAN-CAD). L'idée est d'associer une matrice de correction (poids) associée à l'importance de chaque point de mesure durant l'opération de recalage, le poids doit refléter la rigidité locale de la pièce. En d'autres mots, associer une plus grande vraisemblance aux zones 'relativement rigides' du composant par rapport à des zones 'plus souples'.

Objectif 3: Le troisième objectif consiste à améliorer le calcul de la distance entre les deux nuages de points (nominal (CAO) et le numérisé (SCAN)). Nous conjecturons que ceci améliorera la qualité d'alignement, et par conséquent, nous permettra une meilleure détection de défaut. Actuellement dans BOFR et ACPD, les distances sont évaluées point à point. Le but est d'identifier le meilleur indicateur pour identifier les défauts de fabrication en proposant d'autres méthodes d'évaluation de distance euclidienne entre les deux modèles candidats (nominal et scanné). En effet, la qualité d'identification des défauts dépend de l'exactitude d'estimation de distances entre le modèle CAO et SCAN.

En résumé, nous visons à **automatiser** le processus d'alignement. Cette proposition élimine l'intervention de l'utilisateur pour éviter de tomber dans des optimums locaux. Aussi, nous visons à introduire une méthode qui reflète le cas **des pièces avec des rigidités locales variées** (ex. épaisseur variante, présence de raidisseurs, présence de plies) et finalement, proposer des pistes pour améliorer les **performances de calcul**.

1.8 Structure de la thèse

La suite de cette thèse comporte quatre (4) chapitres et une conclusion suivie de quelques recommandations pour les travaux futurs. Commençons par une revue de la littérature sur les principaux aspects du problème présenté dans le CHAPITRE 1. Au CHAPITRE 2, une

présentation générale de l'algorithme IDB-ACPD y est introduite avec ses performances actuelles. Il s'agit là du point de départ de nos travaux. La stratégie adoptée d'amélioration et d'optimisation est présentée dans le CHAPITRE 3; une première contribution consiste à optimiser le choix des hyper paramètres de l'algorithme ACPD utilisant les algorithmes génétiques. Ce travail a été publié au *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation – MOSIM 2016*. Une deuxième contribution présentée dans le même chapitre qui consiste à améliorer la qualité d'alignement; la notion de flexibilité (ou rigidité) locale de la pièce mesurée lors de la phase d'alignement est introduite. La courbure locale a été retenue comme descripteur pour classer les zones de quasi-homogénéité (même rigidité). Cette contribution a fait l'objet d'un article de revue (*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*). La troisième contribution est présentée dans le CHAPITRE 4 qui consiste à améliorer le critère de distance euclidienne. En effet, nous avons proposé différentes méthodes de mesure de distance possibles basées sur la distance de Hausdorff entre les deux ensembles de points (CAO et SCAN). En Fait, les deux modèles contenant différents niveaux de bruit ce qui peut affecter la qualité de mesures de distance, et par conséquent, les résultats d'alignement peuvent être détériorés. Notre contribution vise à obtenir de meilleures performances pour l'opération de recalage entre les deux nuages de points. L'organigramme présenté par la Figure 1.6 présente la structure globale de cette thèse. Finalement, suivront la conclusion et les recommandations.

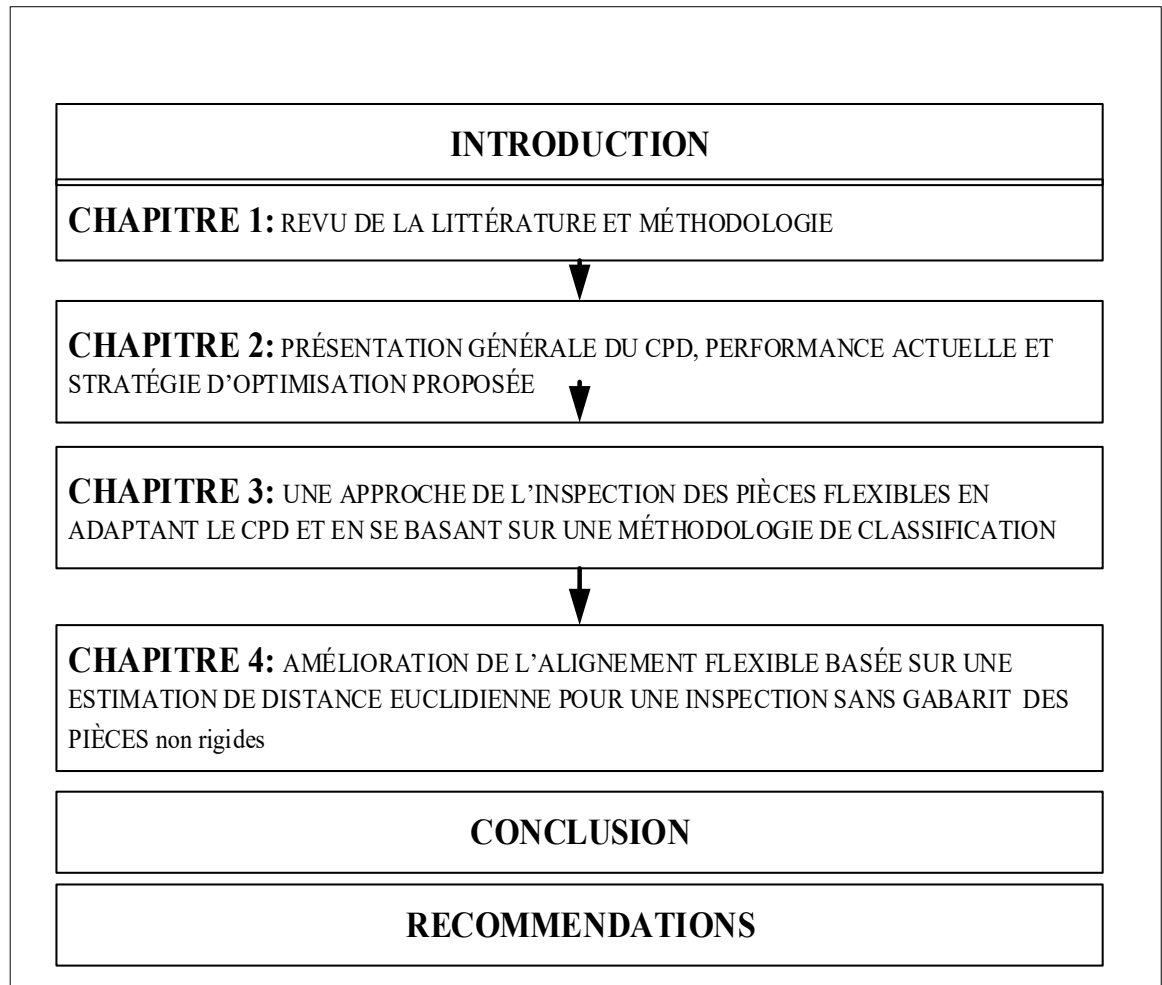


Figure 1.6 Organigramme présentant la structure de thèse

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU ACPD, PERFORMANCE ACTUELLE ET STRATÉGIE D'OPTIMISATION PROPOSÉE

2.1 Introduction

L'approche IDB-ACPD est l'approche sur laquelle se base cette recherche. Ce chapitre est une brève présentation de la méthode de cet algorithme. De plus les performances actuelles sont exposées et par suite la première contribution est présentée qui consiste à optimiser la phase d'alignement de l'approche ACPD utilisant les algorithmes génétiques. Cette contribution sera notre premier objectif et le point de départ de la suite des travaux.

2.2 Algorithme IDB-ACPD, principe et méthodologie

L'algorithme IDB-ACPD est une approche de recalage utilisée lors de l'inspection des pièces souples. Il s'agit d'une adaptation (variante) de l'algorithme CPD pour la problématique du contrôle dimensionnel de ce type de pièces. L'objectif de la méthode consiste à établir une distinction (identification, séparation) entre les défauts dus au procédé de fabrication et les déplacements élastiques dus à la flexibilité d'une pièce mécanique souple. Les étapes sont énumérées comme suite (*Voir* Figure 2.1).

① L'algorithme IDB-ACPD démarre par un premier alignement rigide (donc, approximatif) entre deux ensembles S et P en utilisant l'algorithme ICP pour aligner les deux ensembles de nœuds dans un système de coordonnées commun. Le premier ensemble des nœuds S de taille n représentant le modèle CAO maillé ; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Le deuxième ensemble des nœuds P de taille m représentant la pièce numérisée ; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, tel que $m > n$

À cette étape, le choix de réaliser un alignement initial est argumenté par le fait que la solution ne converge pas sur un minimum local, les estimations initiales doivent être proches des

solutions optimales. L'algorithme IDB-ACPD demande un premier alignement (même approximatif) comme point de départ pour améliorer la vitesse de convergence de l'opération de recalage.

② La deuxième étape consiste à initialiser les paramètres (λ et β) qui seront optimisés par la suite. Typiquement, des valeurs sont proposées $\lambda_0 \in [1, 100]$ et $\beta_0 \in [1, 20]$, où λ_0 et β_0 sont les paramètres initiaux de λ et β .

③ La troisième étape consiste à aligner le modèle CAO représenté par S sur la partie numérisée P en utilisant l'algorithme CPD. Le résultat de l'alignement est une nouvelle série $S' = \{s_1', s_2', \dots, s_n'\}$.

④ La quatrième étape consiste à calculer un ensemble $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ par la fonction *dsearchn* qui est une fonction de Matlab® basée sur l'algorithme *QuickHull* (Barber, Dobkin et Huhdanpaa, 1996) retournant les points c_i qui correspondent au mieux aux points les plus proches des points de la surface nominale S' . À ce stade, deux critères appartenant au problème des pièces mécaniques flexibles sont introduits : **la conservation de la distance géodésique (curviligne)** et **la minimisation de distance entre deux objets** (ex. critère de la distance euclidienne ou encore la distance de Hausdorff).

Le critère de la distance géodésique (curviligne) est défini comme la différence (delta) de distance géodésique entre l'ensemble des points initiaux du modèle original CAO et le nouveau modèle CAO modifié (c'est-à-dire entre les ensembles S et S'). Ce critère est représenté par une valeur de $\Delta_{stretch}(m)$ qui est la différence entre les valeurs moyennes du *Stretch* de S et de S' :

$$\Delta_{Stretch} = |Stretch_{S'} - Stretch_S| = \left| \frac{\sum_{i=1}^{N_e} d'_i}{N_{e'}} - \frac{\sum_{i=1}^{N_e} d_i}{N_e} \right| \quad (2.1)$$

Où $Stretch_s$ est la valeur du critère de la somme des d_i par rapport à Ne ; Ne est le nombre d'éléments au voisinage immédiat du point s_i ; d_i est la distance entre s_i et son voisinage.

Le critère de la distance euclidienne est défini comme la distance entre C et S' :

$$\Delta D = |D_{c,s'} - D_{reference}| \quad (2.2)$$

Où: $D_{reference}$ est la valeur idéale entre c_i et s_i qui doit être égal à zéro; $D_{c,s'}$ est la distance euclidienne entre s'_i et son point correspondant c_i avec $D_{c,s'} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (s'_i - c_i)^2}$.

Pour chaque critère décrit précédemment, l'erreur quadratique moyenne est calculée comme présenté dans les équations:

$$RMS_{stretch} = \sqrt{\frac{\sum \|\Delta_{stretch}\|^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

$$RMS_D = \sqrt{\frac{\sum \|\Delta_D\|^2}{n-1}} \quad (2.4)$$

Après avoir calculé les deux erreurs quadratiques (équations (2.3) et (2.4)), la fonction objective est calculée:

$$F(\beta, \lambda | C, S, S') = \alpha RMS_{stretch} + RMS_D \quad (2.5)$$

Où α est un paramètre déterminé *a priori*, et qui a été estimé après avoir examiné les ordres de grandeur de ces deux critères dans le cas d'où poutre (typiquement $\alpha \in [5, 25]$). Et on cherche:

$$(\beta, \lambda) = \arg \min F \quad (2.6)$$

À l'origine, la fonction objective décrite précédemment dans l'équation (2.5) est optimisée en utilisant la méthode du gradient avec contrainte (*fmincon* fonction de Matlab®). Elle consiste à trouver un minimum d'une fonction scalaire de plusieurs variables à partir d'une estimation tout en respectant un ensemble de contraintes linéaires. En effet, cette phase d'optimisation se base sur un processus qui détermine la quantité de lissage nécessaire et la largeur de filtre de lissage gaussien, en d'autres mots en optimisant les paramètres de l'algorithme CPD (β, λ) . La technique d'optimisation *fmincon* présente plusieurs limites. D'une part, elle nécessite une estimation initiale des paramètres (β, λ) . Le choix de ces paramètres doit être proche de l'optimum recherché ce qui nécessite une expérience de l'utilisateur. D'autre part, les critères d'arrêts utilisés sont insuffisants pour converger vers un optimum global, ils sont fixés par un seuil de tolérance de l'erreur ou par un nombre d'itérations maximal, aussi cette technique nécessite un temps de réponse élevé.

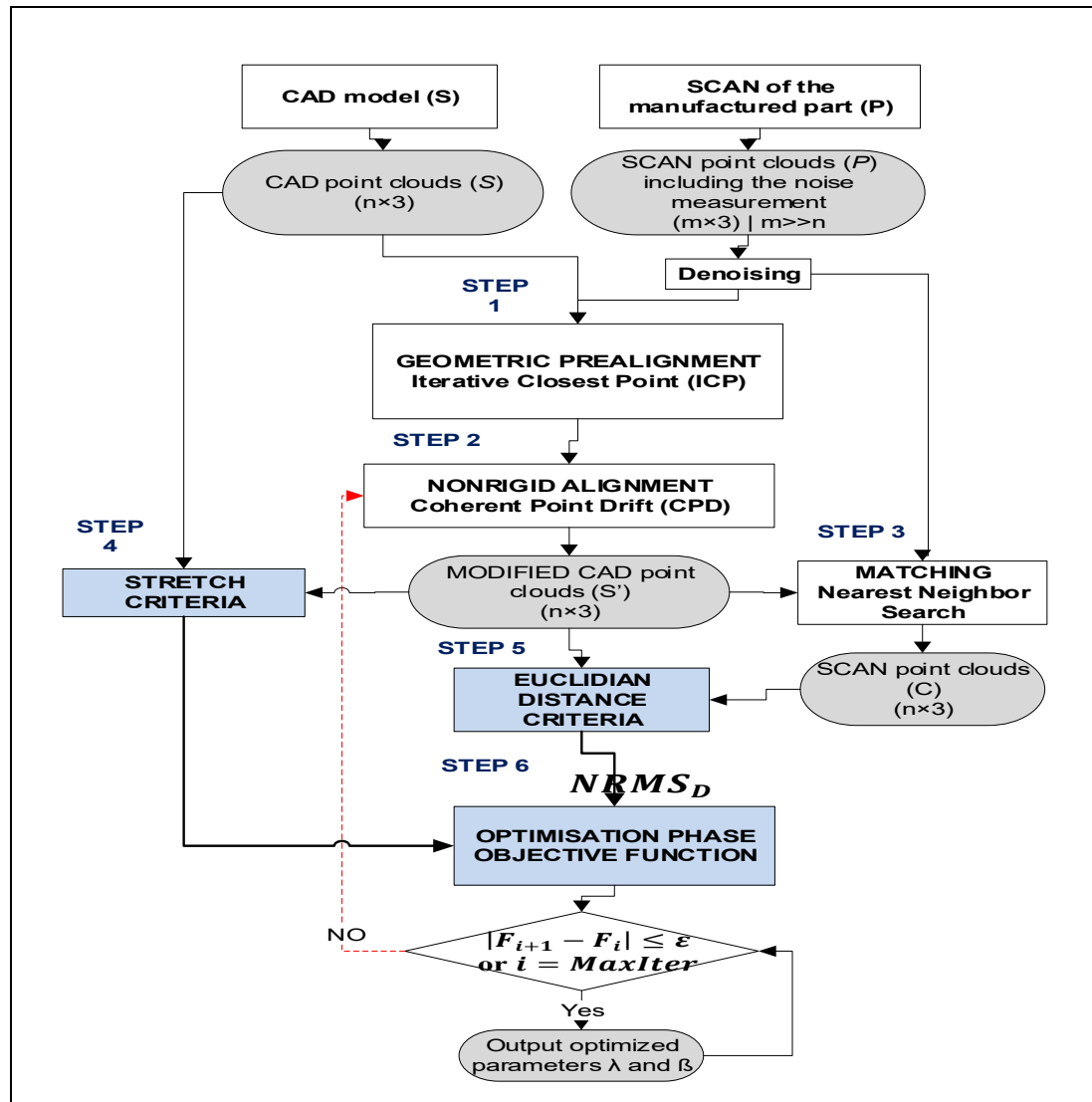


Figure 2.1 Les étapes de l'algorithme IDB-ACPD

2.3 Performance actuelle

Pour améliorer la recherche précédente (IDB-ACPD), une nouvelle méthode d'alignement flexible probabiliste est proposée par (Babanezhad et al., 2016) nommé Bi-Objective Flexible Registration (BOFR1). Une deuxième version améliorée est proposée en (Babanezhad et al., 2020) (BOFR2). La méthode introduit un déplacement des données acquises (SCAN) jusqu'à ce qu'il soit superposé au modèle CAO nominal correspondant pour

obtenir un état d'utilisation optimal tout en évitant de confondre entre le défaut de fabrication et le déplacement élastique. En d'autres termes, la méthode neutralise les écarts provoqués par les effets de gravité et des contraintes résiduelles, de sorte que les données acquises puissent être traitées comme si elles étaient obtenues à partir d'une pièce rigide, en utilisant des outils CAI conventionnels.

Malgré les performances actuelles des algorithmes BOFR1 et BOFR2, il existe encore un problème d'optimisation. En effet, l'optimisation bi-objective pose souvent un problème de contraintes sur les variables de décision. En effet, la méthode contrainte avec double objectif n'est pas toujours évidente et ne garantit pas un résultat optimal. D'autre part, la méthode considère a priori que les pièces sont à rigidité uniforme, ce qui est loin d'être le cas de toutes les pièces flexibles. L'algorithme 2.1 présente la méthodologie adaptée par la méthode BOFR.

Algorithme 2.1 Principales étapes de la méthode BOFR

Entrées: *CAO* : CAO maillé, *SCAN* : SCAN maillé, *T* : T maillé, paramètres de régularisation de l'algorithme CPD $\lambda = \text{lambda_init}$ $\beta = \text{beta_init}$; w : paramètre des valeurs aberrantes
Sorties: *SCAN'* : SCAN aligné optimal.

Début :

Répéter:

1. Aligner le *SCAN* sur le *CAO* à l'aide de l'algorithme d'alignement flexible (CPD), enregistrez-le en tant que maillage *REG*
2. Calculer la distance de Hausdorff entre les maillages *REG* et *CAO*, qui est définie comme la plus grande distance entre les sommets *REG* et les triangles *CAO*;
3. Calculer le critère de déformation défini comme la norme de δ_{STi} : La plus grande déformation de *SCAN* à *REG* de j arêtes $E_{i,j}$ adjacentes au sommet V_i .
4. Optimiser les paramètres λ et β avec des objectifs de distance (2) et de déformation (3)

Jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint : le nombre maximal d'évaluations de fonctions globales et le nombre maximal d'itérations.

5. Calculer les deux fonctions objectives (coût) avec les paramètres optimaux (λ_{opt} et β_{opt}), et sauvegarder le *SCAN'* avec les paramètres (*OPTREG*)
6. Identification manuelle des défauts sur *OPTREG*
7. Identification automatique des défauts sur *OPTREG*

Fin

2.4 Stratégie d'amélioration proposée

Comme mentionné précédemment, ce travail tente de développer une méthode d'alignement flexible pour les pièces flexibles. Le concept sous-jacent derrière la méthode est l'optimisation de deux critères clés (λ et β) qui influencent directement la sortie de l'algorithme d'alignement non rigide. La résolution de ce problème d'optimisation consiste à explorer l'espace de recherche afin de minimiser une fonction objective (équation. (2.5)). La stratégie d'amélioration est résumée en trois interventions principales présentées par la Figure 2.2.

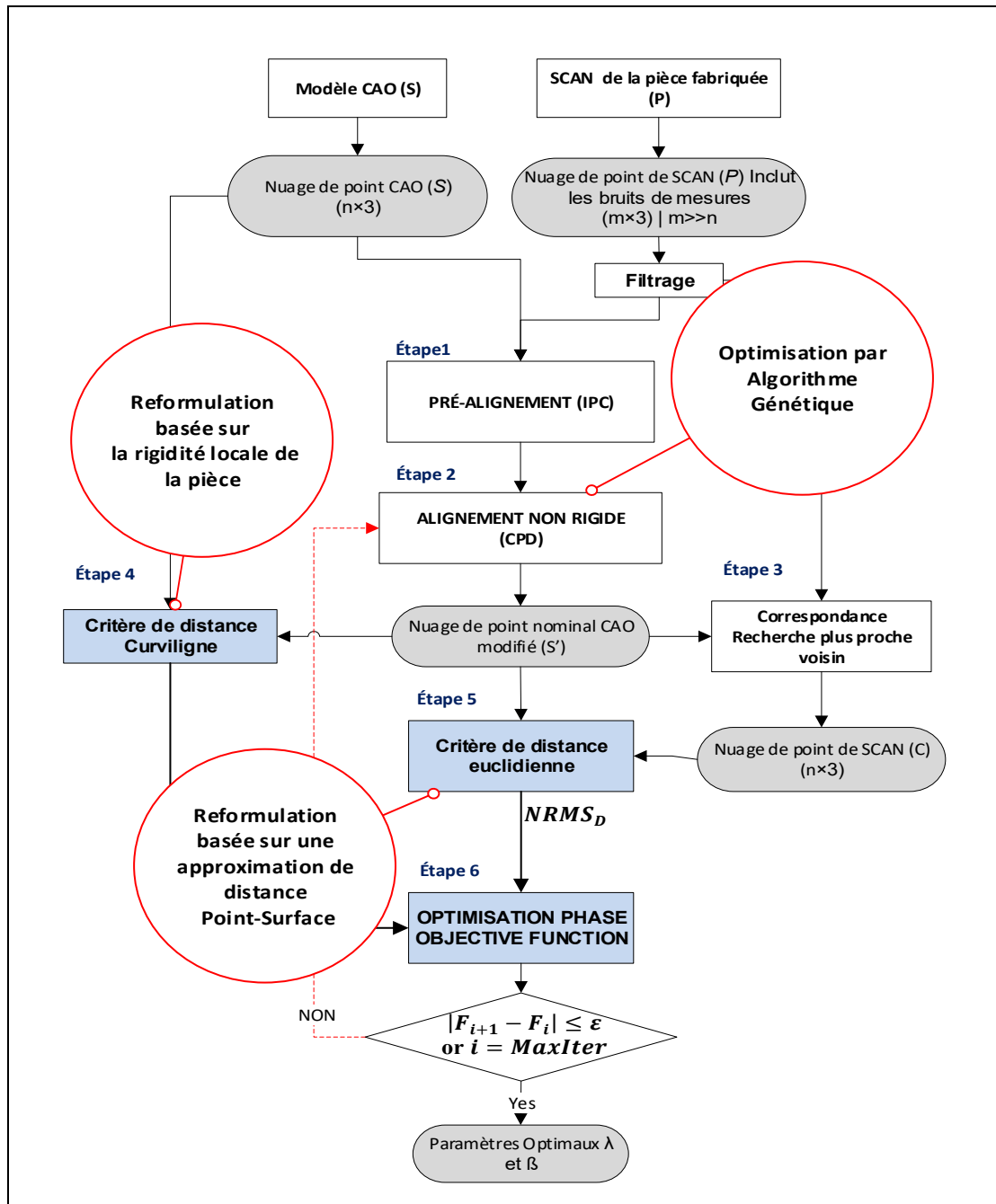


Figure 2.2 Stratégies d'amélioration

Les algorithmes génétiques pour l'IDB-ACPD

Comme mentionné précédemment, la phase d'optimisation de l'approche IDB-ACPD doit être améliorée. Comme première contribution nous avons proposé une méthode d'optimisation basée sur l'algorithme génétique (AG) afin de trouver les paramètres optimaux de régularisation de l'algorithme CPD (β, λ) qui contrôlent la phase d'alignement de l'algorithme. Cette proposition a été publiée dans *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation – MOSIM 2016* (Voir ANNEXE 1). Comparée aux autres méthodes d'optimisation existantes, l'AG pourrait rendre l'algorithme IDB-ACPD plus efficace en automatisant le choix des paramètres susmentionnés, améliorant ainsi le temps de calcul, s'échappant du minimum local et assurant les *meilleures* solutions.

L'algorithme génétique (AG) est une méthode d'optimisation basée sur une technique de recherche aléatoire qui permet d'explorer de vastes champs de recherche, tout en évitant les pièges tels que minima locaux. Le but est de minimiser la fonction objective décrite dans l'équation (2.5). Cette approche maintient une population des solutions (β_i, λ_i) , et repose sur les opérations de sélection, mutation et croisement, tout en garantissant qu'à l'étape $(i + 1)$, les nouvelles valeurs de paramètres seront plus adaptées à l'étape (i) par les opérations de reproduction (mutation et croisement). Cette méthode est robuste en présence des valeurs aberrantes. La méthode d'optimisation proposée élimine la nécessité d'une expertise pour améliorer le choix initial des paramètres en initialisant aléatoirement une population des couples. Le pseudocode figuré ci-dessous (Algorithme 2.2) montre le fonctionnement général de l'Algorithme Génétique.

Algorithme 2.2 Pseudocode Fonctionnement général de l'Algorithme Génétique

Initialisation Tant que (critères d'arrêts = Faux) Évaluation Sélection Production (croisement et mutation) Fin Tant que

Selon le principe de fonctionnement des AGs la résolution de problème d'optimisation de l'algorithme IDB-ACPD est décrite comme suit : Le principe de base consiste à initialiser aléatoirement une population constituée d'un ensemble des individus représentant chacun un couple. Par la suite, les individus seront évalués au moyen des règles heuristiques et probabilistes. Ce choix probabiliste (opérateur de sélection) consiste à attribuer à chaque individu une probabilité qui se base à sa performance calculée à partir de la fonction fitness présentée dans l'équation (2.5) Les individus qui donnent les résultats satisfaisants ont la plus grande probabilité de survivre et de se reproduire en donnant des descendants (une nouvelle génération) encore plus adaptés par des opérations de croisement, de mutation et de migration. On répète ce processus de manière à obtenir une transformation optimale (Voir Algorithme 2.3). La méthodologie d'optimisation incorporée dans l'approche IDB-ACPD est présentée par la Figure 2.3.

Algorithme 2.3 Pseudocode de la méthode d'optimisation proposée (GA)

Entrée: P : Population initiale (β_0, λ_0) ; N : taille de population ; $MaxG$: nombre maximal de génération...

Sortie : Les paramètres optimaux $(\beta_{opt}, \lambda_{opt})$

Début

1. Pré-alignement en utilisant l'algorithme ICP
2. Configuration des paramètres
3. Initialisation de la population P
4. **Répéter**
 1. Aligner le modèle CAO (S) sur la partie numérisée en utilisant l'algorithme CPD, le résultat de l'alignement est l'ensemble S' (CAO modifiée)
 2. Calculer le critère de stretch entre S et S' ;
 3. Trouver les points correspondants C en P à S' ;
 4. Calculer le critère de la distance euclidienne entre P et C ;
 5. Calculer la fonction objective F
 6. Évaluer la population P
 7. Sélectionner les meilleurs individus avec la méthode tournoi
 8. Opération de croisement heuristique
 9. Opération de mutation adaptative
 10. Obtenir une nouvelle population
5. **Jusqu'à un certain critère d'arrêt est satisfait**
6. CPD en utilisant $\beta_{opt}, \lambda_{opt}$
7. Module d'identification statistique *Thompson-Biweight*

FIN

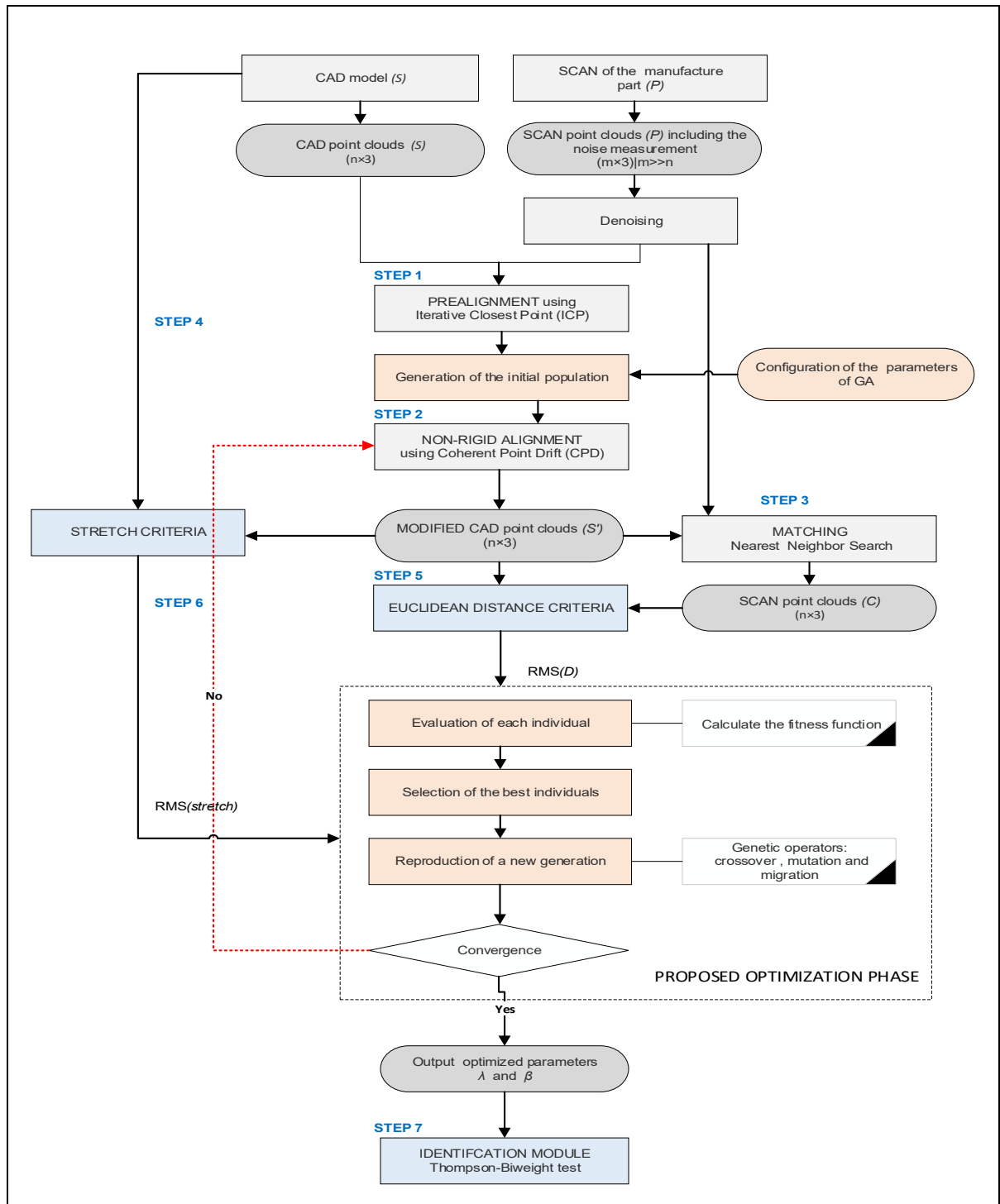


Figure 2.3 AG incorporé dans l'étape d'optimisation de l'algorithme original IDB-ACPD

Résultats expérimentaux

Pour évaluer les performances du stratégie d'optimisation, une pièce en U non rigide inspirée de l'industrie est sélectionnée. Cette pièce est en aluminium de calibre 14 (1.63 mm) avec un module de Young de $7 \times 10^{10} /m^2$ et une densité de $2700kg/m^3$. Des déformations ont été ajoutées à la pièce afin de simuler la condition d'état libre. Les expériences ont été réalisées à l'aide de MATLAB R2015 sur un ordinateur de bureau avec un processeur Intel Core i3 2.4 GHz et une mémoire physique de 4,0 Go.

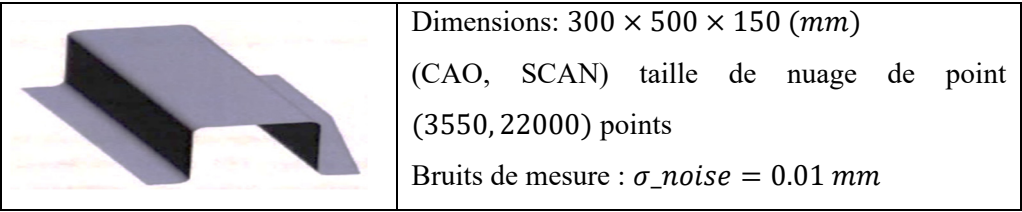
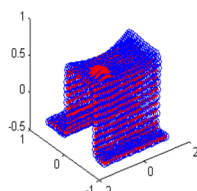
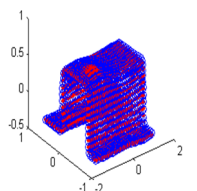
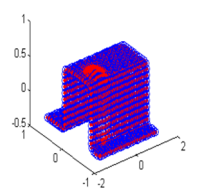
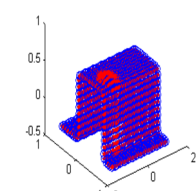


Figure 2.4 Description de cas d'étude

La convergence de la solution est présentée par le Tableau 2.1. La variation de la fonction objective sur 30 générations est inférieure à la fonction de tolérance.

Tableau 2.1 Résultat de l'approche d'optimisation

Generations				
Results	1 th	5 th	20 th	31 th (Last)
Registration				
λ_{opt}	1.8	2.25	2.5	2
β_{opt}	0.9	1.3	0.5	0.9
$F_{approached}$	3.219×10^{-2}	2.737×10^{-2}	2.733×10^{-2}	2.719×10^{-2}

Une autre analyse est effectuée prouvant que l'approche d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques améliore le temps de calcul par rapport aux autres techniques d'optimisation de *Toolbox* MATLAB® (*fminmax*, *fminsearch* et *fminsearch*) (Voir Figure 2.5).

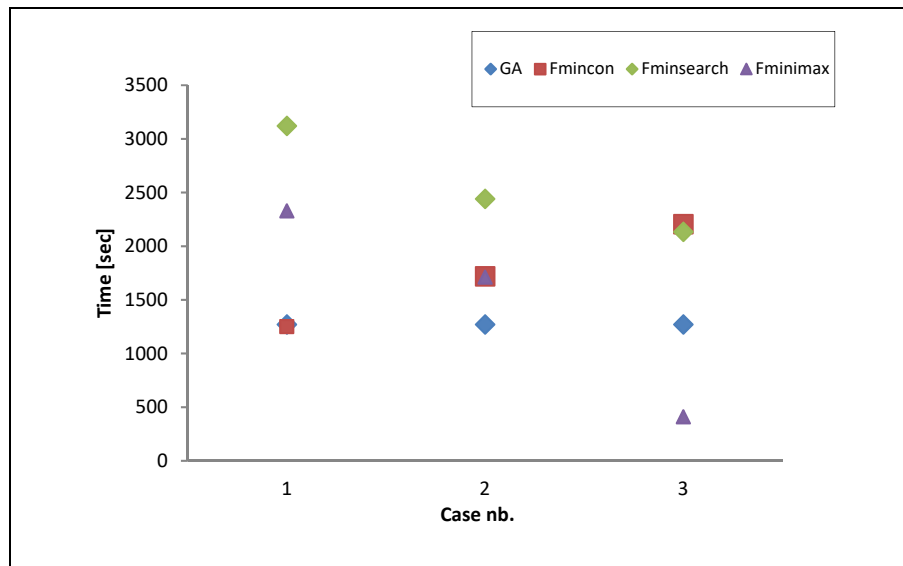


Figure 2.5 Temps de calcul des différents techniques d'optimisation

Pour résumer, l'approche d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques permet d'éviter d'être piégé dans un minimum local, réduire le temps d'optimisation et éliminer l'intervention de l'utilisateur (essai et erreur) (Voir ANNEXE 1).

2.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre expose le principe de l'algorithme IDB-ACPD sur lequel se base cette recherche. Ainsi les performances actuelles sont discutées en exposant les limites des méthodes existantes. Une stratégie d'amélioration est présentée basée sur trois étapes principales; optimisation par algorithme génétique, reformulation de l'approche IDB-ACPD en se basant sur la rigidité locale de la pièce et une estimation efficace de la distance entre les deux modèle CAD et SCAN. La première étape est présentée dans ce chapitre qui est le point de départ de ce travail de recherche. En effet l'approche l'optimisation proposée pour l'algorithme IDB-ACPD est

basée sur les algorithmes génétiques, le principe de base et la méthodologie sont exposés. La configuration proposée a été publiée dans *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation – MOSIM 2016* (Voir ANNEXE 1). En effet, l'efficacité d'AG dépend fortement du réglage de ses différents paramètres qui sont parfois difficiles à déterminer. Ces paramètres dépendent directement de la nature du problème et de sa complexité, et leurs choix doivent représenter un compromis entre la qualité de la solution proposée et le temps d'exécution. La performance de la méthodologie proposée a été démontrée sur une étude de cas simulée inspirée de l'industrie du transport. Les résultats montrent que la méthode d'optimisation par AG automatise la sélection des deux paramètres β et λ et avec un temps de calcul inférieur aux autres méthodes d'optimisation convergeant vers une meilleure solution.

CHAPITRE 3

UNE APPROCHE D'INSPECTION DES PIÈCES FLEXIBLES EN ADAPTANT LE CPD ET EN SE BASANT SUR UNE MÉTHODOLOGIE DE CLASSIFICATION

3.1 Introduction

La plupart des recherches étaient basées sur des méthodes d'alignement pour résoudre le problème des variations dimensionnelles et géométriques des composants mécaniques non rigides. Ces méthodes ne prennent pas en compte la flexibilité / rigidité locale de la pièce mécanique lors de la phase d'alignement. Cette condition est respectée lorsqu'il existe des cas avec des paramètres géométriques identiques (ex.: peau d'avion). Cependant, dans des cas généraux, la présence de paramètres géométriques différents (variation d'épaisseurs, renforts, plis, courbures, etc.) entraîne des variations importantes de la rigidité locale de la pièce. Notre contribution est de présenter une méthodologie pour améliorer l'approche IDB-ACPD proposée par (Aidibe et Tahan, 2015) en évaluant la courbure locale d'une pièce comme l'un des paramètres géométriques pertinents pour la rigidité. La méthodologie proposée tient compte de la flexibilité / rigidité de la pièce pendant la phase d'alignement, combinée aux avantages des méthodes de classification. Plus précisément, il tire parti de la propriété géométrique de la pièce pour identifier le critère de similitude pour la segmentation afin de contrôler l'opération d'alignement (SCAN-CAO) par rapport à la rigidité locale des pièces non rigides.

3.2 Méthodologie

L'approche proposée vise à améliorer la phase d'alignement de l'algorithme IDB-ACPD original en améliorant la qualité d'alignement obtenue avec l'algorithme CPD. Le modèle CAO déformé a été classé en différentes zones en fonction du niveau de rigidité et sur la base de l'estimation de la courbure gaussienne qui est invariante sous déformation isométrique. Une matrice de poids reflétant la rigidité locale de la pièce a été proposée. En d'autres termes, une

plus grande vraisemblance a été proposée d'être associée à des zones relativement rigides par rapport à des zones plus flexibles. Les notations suivantes ont été utilisées:

- $\mathbf{S} = \{s_1, \dots, s_n \mid s_j \in \mathbb{R}^3\}$ — Ensemble de n nœuds représentant le modèle CAO maillé
- $\mathbf{P} = \{p_1, \dots, p_m \mid p_j \in \mathbb{R}^3\}$ — Ensemble de $m \mid m \gg n$ nœuds représentant la partie numérisée
- $\mathbf{S}' = \{s'_1, \dots, s'_n \mid s'_j \in \mathbb{R}^3\}$ — Nouveau ensemble de n nœuds résultant de l'alignement
- $\mathbf{C} = \{c_1, \dots, c_n \mid c_j \in \mathbb{R}^3\}$ — Ensemble de n nœuds représentant les points les plus proches de $\mathbf{P}$ à $\mathbf{S}'$,
- $\mathbf{Z} = \{z_1, \dots, z_k\}$ — Ensemble de k 'zones' de $\mathbf{S}'$ obtenus par la méthode de classification
- n_{z_i} — nombre de points dans la zone z_i ,
- $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_1, \dots, \mu_k\}$ — Ensemble de k entre représentant la moyenne des courbures gaussiennes des points appartenant à la même zone
- $\mathbf{A} = (\alpha_{z_1}, \dots, \alpha_{z_k})$ — Vecteur représentant l'ensemble des poids α associés avec chaque zone z_k
- $\mathbf{RMS}_{stretch_z} = (RMS_{stretch_{z_1}}, \dots, RMS_{stretch_{z_k}})$ — Ensemble des vecteurs représentant l'ensemble des erreurs quadratiques moyennes du critère de stretch pour chaque zone z_k .

3.2.1 Présentation de l'approche proposée

L'approche proposée est divisée en trois étapes: l'étape 1 est la méthode de classification, l'étape 2 est une estimation des meilleures valeurs de paramètre α pour chaque étude de cas et l'étape 3 est une formulation de la nouvelle fonction objective à optimiser.

ÉTAPE 1: Classification basée sur l'algorithme des c-moyens flous (*fuzzy c-means*) et l'estimation de la courbure gaussienne

Cette étape consiste à classer le nuage de points du modèle CAO modifié $\mathbf{S}'$ en zones selon la rigidité locale de chaque point. Pour identifier des zones de rigidité (flexibilité) similaire, un critère de similarité est proposé. La courbure locale est choisie comme descripteur des zones

de rigidité quasi homogène puisqu'il s'agit d'un paramètre géométrique pertinent pour la rigidité. De plus, il est invariant sous rotation et translation. Les courbures moyennes et gaussiennes sont les paramètres les plus courants liés à la courbure. Comme démontré dans (Cai et al., 2011) la courbure gaussienne est choisie comme meilleur paramètre de la surface à partir de laquelle la rigidité du modèle peut être évaluée. En général, la rigidité augmente de manière monotone tandis que la courbure gaussienne augmente. Par conséquent, la rigidité locale de la pièce augmente et le risque de déformation de surface diminue, ce qui implique une diminution de $RMS_{stretch}$ (Voir équation (2.3)). Cette méthode est résumée dans l'algorithme 3.1

Algorithme 3.1 Pseudo-codes de la méthode de classification proposée

Entrées: CAD' : CAO modifié (Algorithme CPD), m : Nombre de groupe, tri_n : CAO maillé
 Sorties: $index$: indice de plus proche centre de chaque point de données Index μ : centre optimal de courbures gaussiennes

Début

1. Calculer la courbure gaussienne G
2. Initialisation: μ_{old} : initialisation aléatoire des centres, J : fonction objective à minimiser, $k = 1$: Nombre d'itération
3. Répéter
 1. Pour $j = 1$: taille (CAD')
 2. Pour $i = 1$: taille (μ_{old})
 1. Calculer l'écart entre chaque G et chaque centre des courbures center μ_{old} ; $GAP = (G(j) - \mu_{old}(i))^2$
 2. Rechercher le centre des courbures μ_{old} le plus proche pour j^{th} points; $min(norm(G(j) - \mu_{old}(i))^2)$
 3. Calculer le degré d'appartenance $\omega_{i,j}$ de $G(j)$ dans le groupe

$$\omega_{i,j} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{size(\mu_{old})} \left(\frac{\|G(j) - \mu_{old}(i-1)\|}{\|G(j) - \mu_{old}(i)\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}$$
; avec m est un nombre réel supérieur à 1
 3. Fin pour
 1. Calculer $index$ de groupe le plus proche de chaque point des données (j)
 2. Calculer la fonction objective: $J(k) = J(k) + sum(\omega * GAP)$
 4. Fin pour
 5. Calculer la somme des coefficients des valeurs porches de chaque centre: N
 6. Calculer μ_{New} avec l'équation suivante: $\mu_{New} = \sum_{i=1}^{size(\mu_{old})} \frac{\omega * G}{N}$
4. Jusqu'à: Condition d'arrêt

Algorithme 3.2 Pseudo-codes de la méthode de classification proposée (Suite)

```

5. Si  $\mu_{New}$  différent de  $\mu_{Old}$ 
     $\mu_{Old} = \mu_{New}$ 
6. Si non
    Retourne  $index$ 
7. Fin si
8.  $k = k + 1$ 
Fin

```

Classification avec l'algorithme *fuzzy c-means*

Le *Fuzzy C-means* (FCM) a été proposé dans (Bezdek, Ehrlich et Full, 1984) comme un algorithme non supervisé qui permet une classification lisse d'un ensemble fini X de n points en assignant chaque point en c groupes flous (clusters) avec différentes appartenances notées entre 0 et 1. Elle repose sur une minimisation des mesures de similarité intergroupes. La matrice d'appartenance qui indique le degré d'appartenance de l'élément $X(j)$ au cluster i est définie comme:

$$\omega_{i,j} = \left[\sum_{i=1}^{size(\mu)} \left(\frac{\|X(j) - \mu(i-1)\|}{\|X(j) - \mu(i)\|} \right)^{\frac{2}{c-1}} \right]^{-1} \quad (3.1)$$

Où $X(j)$ est le point à classer avec $j = 1, \dots, n$, $\mu(i)$ est le centre du groupe i avec $i = 1, \dots, c$; où c est tout nombre réel supérieur à 1 qui présente le nombre de cluster dans X . La fonction de coût est définie comme suit:

$$argmin \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c \omega_{i,j}^m \|X(j) - \mu(i)\|^2 \quad (3.2)$$

Avec $m \geq 1$ où m détermine le niveau de flou du cluster.

Selon ce principe, FCM permet de classer l'ensemble S' à chaque itération de l'algorithme CPD par rapport à la courbure gaussienne locale (rigidité locale) de chaque point de S' .

Méthode d'estimation de la courbure gaussienne

La courbure (dans l'espace 3D) est la mesure de la flexion de la courbe en un seul point. C'est une mesure de la vitesse à laquelle la tangente de l'unité se plie dans la direction de la normale. Les courbures gaussiennes d'une surface régulière dans $\mathbb{R}^3$ en un point p sont formellement définies comme suit:

$$K(p) = k_1 k_2 = \frac{1}{P_1 P_2} \quad (3.3)$$

Où k_1 et k_2 sont les courbures principales (minimum et maximum; Voir Figure 3.1) d'une surface régulière en chaque point. De plus, P_1 et P_2 sont les principaux rayons de courbure. Dans l'approche proposée, la courbure est estimée à partir d'informations de surface discrètes (nœuds de triangulation). Pour cela, l'estimation initiale de la normale à la surface se fait à l'aide du maillage triangulaire. Ensuite, une surface polynomiale quadrique lisse est ajustée à un ensemble local de points autour du point d'intérêt et la courbure de la surface à ce point est utilisée comme estimation de la courbure (Peng et al., 2003).

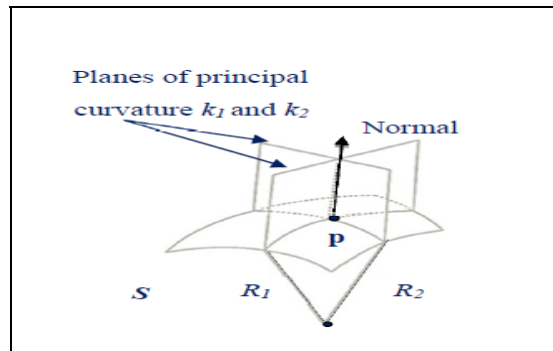


Figure 3.1 Les deux principales courbures (Aidibe et Tahan, 2014)

ÉTAPE 2: Estimation du meilleur ensemble de valeurs alpha

Un vecteur préalable A est défini afin de sélectionner les meilleures valeurs qui permettent une meilleure identification des défauts dans chaque étude de cas spécifique. Le vecteur obtenu sera considéré comme un paramètre d'entrée de l'algorithme proposé. Une nouvelle métrique I_q est proposée pour évaluer la qualité d'alignement (équation (3.4)). Il est défini comme le rapport entre $RMS_{stretch}$ et RMS_D (équations (2.3) et (2.4)). Par conséquent, la meilleure qualité d'alignement est indiquée par la valeur minimale de I_q .

$$I_q = \frac{RMS_{stretch}}{1 + RMS_D} \quad (3.4)$$

ÉTAPE 3: Nouvelle formulation de la fonction objective

Dans cette étape, $RMS_{stretch_z}$ sera calculé. En conséquence, la nouvelle fonction objective présentée par l'équation (3.5). Un résumé de l'approche proposée est représenté par la Figure 3.2.

$$F(\beta, \lambda \mid C, S, S') = A^T [RMS_{stretch_z}] + RMS_D = \sum_{i=1}^k \alpha_{z_i} RMS_{stretch_{z_i}} + RMS_D \quad (3.5)$$

Ainsi, les erreurs quadratiques moyennes pour le critère d'étirement(*stretch*) de chaque zone z_i sont recalculées comme indiqué dans l'équation (3.6):

$$RMS_{stretch_{z_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j=n_{z_i}} \|\Delta_{stretch_j}\|^2}{n_{z_i} - 1}} \quad (3.6)$$

$$\Delta_{stretch_j} = \left| \left(\frac{\sum_{l=1}^{N'_e} d'_l}{N'_e} \right)_{S'} - \left(\frac{\sum_{l=1}^{N_e} d_l}{N_e} \right)_S \right| \quad (3.7)$$

Où N_e est le nombre de voisinages autour du point s_l dans la zone z_k et d_l la distance entre le point s_l et son voisinage.

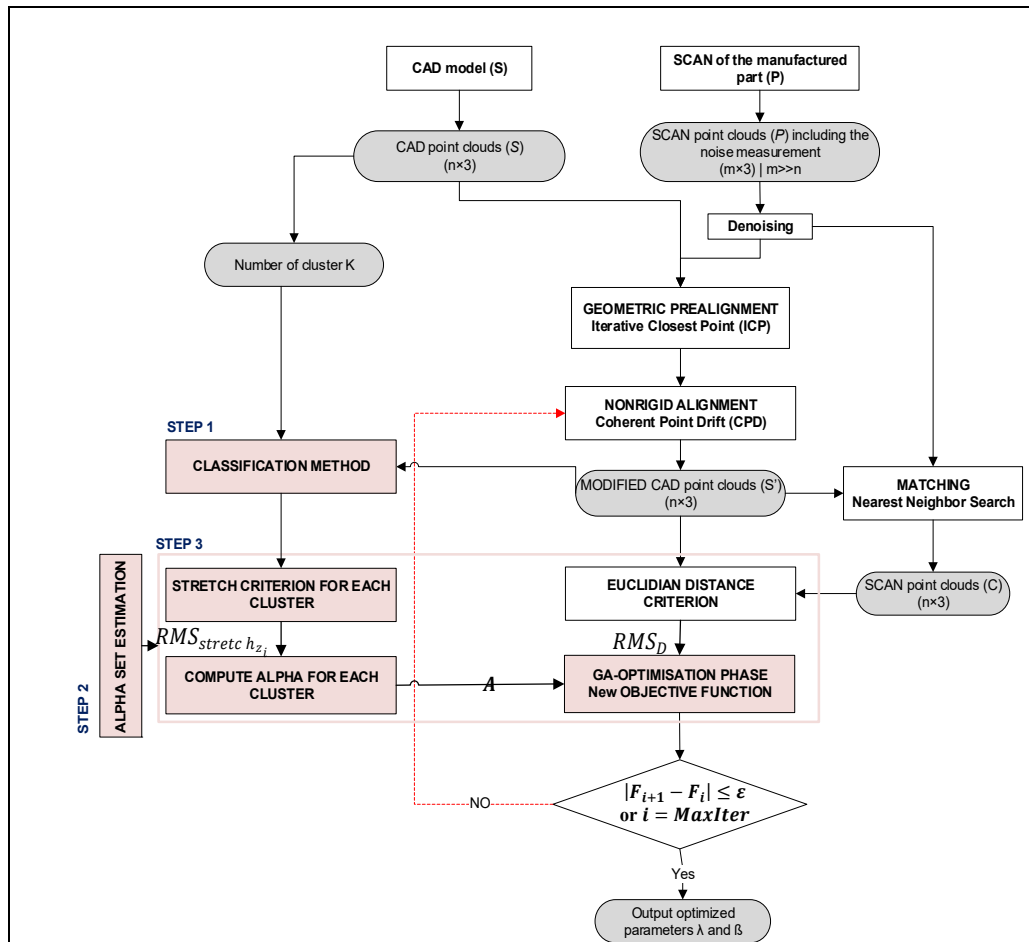


Figure 3.2 Résumé de l'approche proposée

3.2.2 Études de cas et validation

Nous avons utilisé deux études de cas différentes afin de valider l'approche proposée et pour prouver l'amélioration obtenue par rapport à la version originale IDB-ACPD. Des expériences ont été réalisées à l'aide de MATLAB® R2015 sur un PC doté d'un processeur Intel Core i3, 2,4 GHz et d'une mémoire physique de 4,0 Go.

3.2.2.1 Description des études de cas

Deux études de cas représentant des pièces non rigides typiques de l'industrie des transports sont considérées pour valider l'approche proposée. Les deux pièces sont en aluminium de calibre 14 (épaisseur de 1,63 mm) avec un module d'Young de 70 GPa et une densité de 2700 kg.m⁻³. Un bruit de mesure gaussien de moyenne nulle $N(0, \sigma = 20 \mu m)$ a été ajouté à chaque étude de cas.

Les deux cas sont considérés comme des pièces non rigides; des déformations peuvent apparaître sur leurs formes à l'état libre. Le cas A est tiré de l'industrie du transport (forme Ω). Il a été conçu et fabriqué à l'ÉTS (Montréal, Canada). Le cas B présente une forme courbée sans raidisseurs. Des défauts typiques sont appliqués sur ces pièces, principalement en termes de localisation et de défauts de profil. La Figure 3.3 décrit les différentes positions et valeurs des défauts de fabrication imposés. Le défaut 1 représente un défaut de contour (profil). Le défaut 2 représente un défaut de localisation au niveau de trou.

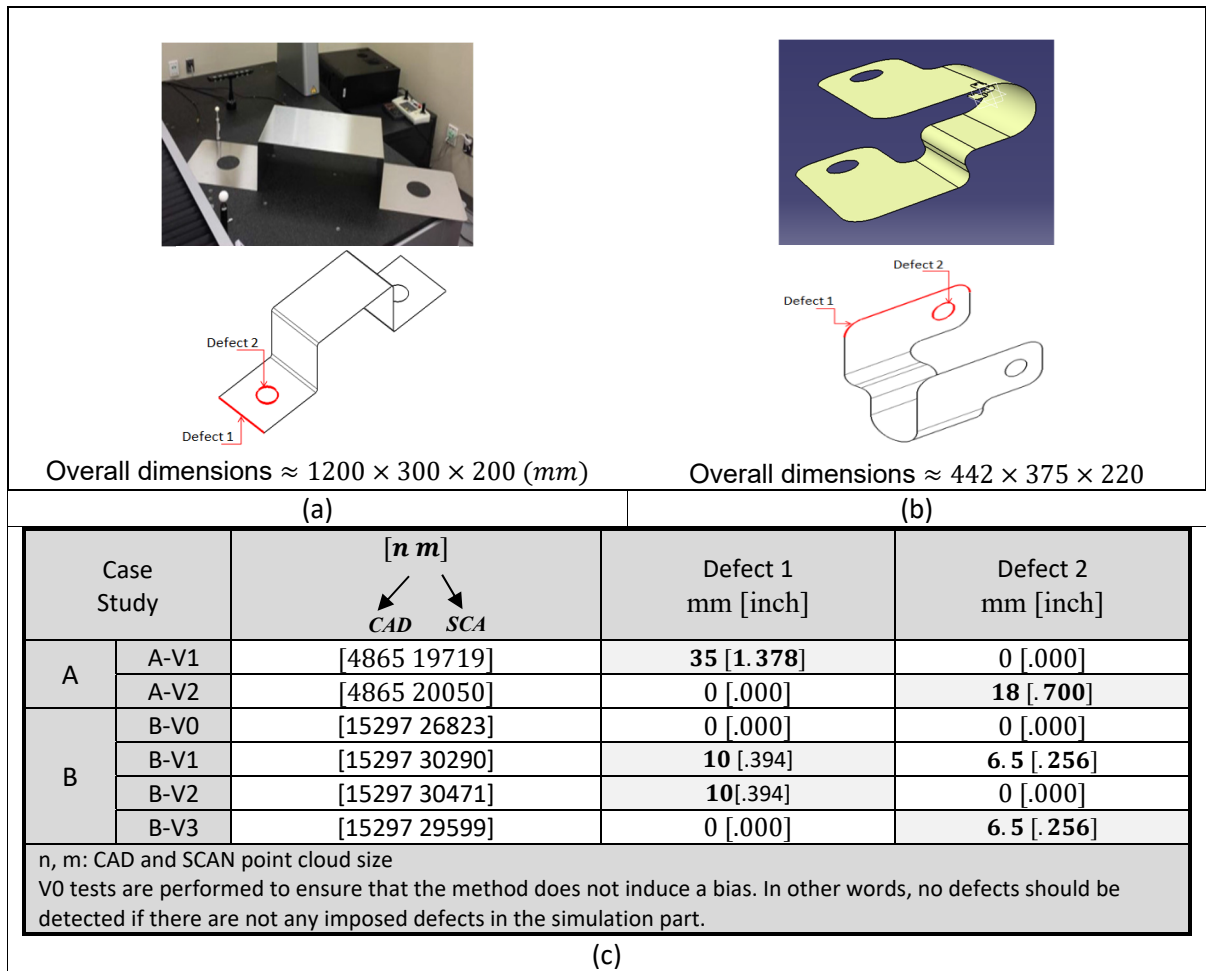


Figure 3.3 Description des études de cas (a) Cas A (b) Cas B (c) Les valeurs des défauts imposés

3.2.2.2 Résultats et discussion

Une liste d'analyses est réalisée afin de valider la performance de l'approche proposée:

- l'estimation des meilleures valeurs α pour chaque étude de cas. Cette analyse est réalisée en utilisant l'approche optimisée IDB-ACPD basée sur l'algorithme génétique (GA-ACPD) (Hajibrahim et al., 2016).
- classification du nuage de points du modèle CAO modifié S' en différentes zones en fonction de l'estimation de la courbure gaussienne de chaque point; les résultats sont présentés à la Figure 3.4.

- évaluation des erreurs quadratiques moyennes RMS_D et $RMS_{stretch}$ au cours des générations de l'algorithme génétique (GA-ACPD).
- analyse de Comportements de distance euclidienne et curviligne en présentant et en comparant les fonctions de distribution cumulative (CDF) entre la version précédente et la plus récente.

Dans la première analyse, des expériences ont été effectuées pour examiner les valeurs des défauts estimés par rapport aux valeurs nominales d'un échantillon aléatoire de valeurs α . Pour ce faire, la qualité d'alignement est évaluée sur la base de la métrique I_q présentée dans l'équation (3.4). Après cela, les valeurs α qui identifient le mieux le défaut de la pièce seront sélectionnées en fonction de l'erreur relative $\delta\alpha_r$, utilisé comme un indicateur à quel point la valeur de défaut est relativement proche de la valeur de défaut nominale (*Voir* l'équation (3.8)). Le tableau (3.1) et le tableau (3.2) présentent la meilleure estimation alpha pour les cas A et B respectivement.

$$\delta\alpha_r = \frac{|Estimated\ defect - Nominal\ defect|}{Nominal\ Defect} \quad (3.8)$$

Tableau 3.1 Estimation des meilleures valeurs α e pour la pièce A

(All dimensions are in <i>mm [inch]</i>)						
Case	α	RMS_D	$RMS_{stretch}$	I_q	Nominal Defect	Estimated Defect
A	V1	5	2.685	.224	35 [1.378]	15.94 [.628]
		10	3.089	.170		21.36 [.841]
		15	3.092	.165		22.91 [.903]
		20	3.105	.167		22.88 [.901]
		25	4.039	.096		33.04 [1.301]
		30	4.098	.094		33.58 [1.323]
		35	4.098	.094		33.58 [1.322]
		40	4.128	.093		33.86 [1.334]
		100	4.306	.090		35.24 [1.395]
		150	4.304	.091		35.22 [1.387]
		200	4.310	.091		35.30 [1.391]
		250	4.346	.091		35.61 [1.403]
		400	4.296	.090		35.22 [1.387]
	V2	5	2.506	.094	18 [.700]	17.22 [.679]
		10	2.512	.097		17.85 [.703]
		15	2.509	.097		17.79 [.701]
		20	2.582	.098		17.84 [.703]
		25	2.514	.098		18.42 [.726]
		30	2.515	.098		18.44 [.726]
		35	2.582	.081		18.44 [.727]
		40	2.510	.081		18.40 [.725]
		100	2.512	.080		18.47 [.728]
		150	2.513	.081		18.45 [.727]
		200	2.524	.081		18.46 [.727]
		250	2.524	.080		18.46 [.727]
		400	2.524	.080		18.46 [.727]

La seconde analyse vise à identifier des zones de rigidité homogène en S' . Le modèle sera ensuite aligné avec l'algorithme CPD et la courbure gaussienne locale sera calculée en chaque point reflétant la rigidité locale de ce dernier. Selon la première analyse, un ensemble de valeurs α est choisi pour chaque étude de cas comme une entrée pour l'algorithme ACPD-1 à partir de laquelle α sous forme vectorielle A_{1xm}^T est défini. Le calcul de A_{1xm}^T est basé sur le résultat de classification (Voir Figure 3.4).

Tableau 3.2 Estimation des meilleures valeurs α e pour la pièce B

(All dimensions are in <i>mm [inch]</i>)											
Case	α	RMS_D	$RMS_{stretch}$	I_q	Nominal Defect		Estimated Defect 1	$\delta\alpha_r$	Estimated Defect 2	$\delta\alpha_r$	
					Defect 1	Defect 2					
B	V1	5	1.592	.040	.015	10[.394]	6.5 [.256]	7.69[.275]	23.1%	6.60 [.031]	1.0%
		10	1.590	.052	.020			8.82[.315]	11.8%	6.56 [.030]	0.9%
		15	1.592	.052	.020			8.82[.315]	11.8%	6.53 [.029]	0.4%
		20	1.591	.041	.015			9.57[.354]	4.3%	6.97 [.287]	7.2%
		25	1.592	.053	.020			9.88[.389]	1.2%	6.56 [.029]	0.9%
		30	1.595	.050	.019			8.75[.344]	12.5%	6.56 [.028]	0.9%
		35	1.594	.053	.020			9.84[.387]	1.6%	6.53 [.028]	0.4%
		40	1.594	.055	.021			10.34[.407]	3.4%	6.50 [.027]	0%
		100	1.592	.051	.019			9.81[.386]	1.9%	6.56 [.029]	0.9%
		150	1.592	.046	.017			10.50[.413]	5%	6.56 [.031]	0.9%
		200	1.591	.054	.020			10.38[.409]	3.8%	6.60 [.032]	1.5%
		250	1.591	.056	.021			10.22[.402]	2.2%	6.56 [.030]	0.9%
		400	1.591	.057	.021			10.19[.401]	1.9%	6.46 [.027]	0.6%
	V3	5	1.372	.084	.035	0 [0]	6.5 [0.256]	0[0]	-	6.80 [.267]	4.6%
		10	1.350	.070	.030					6.76 [.266]	4.0%
		15	1.392	.065	.027					6.75 [.265]	3.8%
		20	1.356	.009	.004					6.59 [.259]	1.3%
		25	1.339	.006	.003					6.64 [.261]	2.1%
		30	1.301	.034	.015					6.63 [.261]	2.0%
		35	1.300	.040	.017					6.61 [.260]	1.6%
		40	1.328	.013	.006					6.50 [.256]	0%
		100	1.306	.015	.007					6.53 [.257]	0.4%
		150	1.304	.010	.004					6.52 [.256]	0.3%
		200	1.310	.021	.009					6.51 [.256]	0.1%
		250	1.346	.021	.009					6.57 [.258]	1.0%
		400	1.455	.024	.010					6.69 [.263]	2.9%

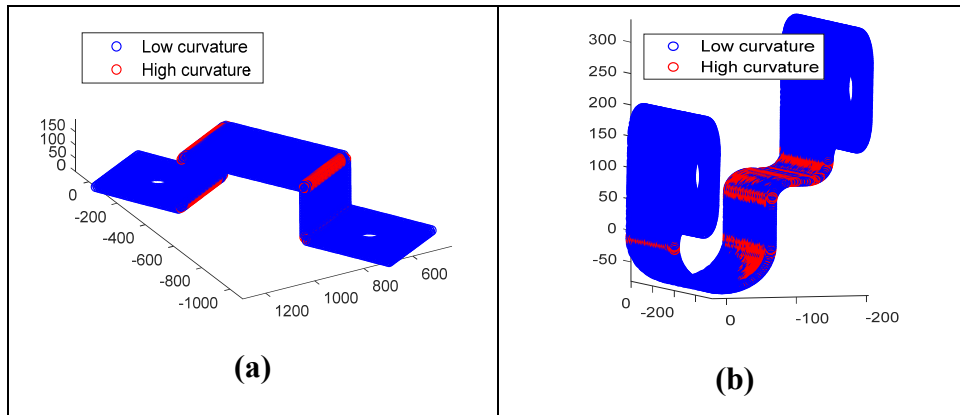


Figure 3.4 Résultats de la méthode de classification; (a) Cas A, (b) Cas B

La troisième analyse consiste à évaluer les erreurs quadratiques moyennes RMS_D et $RMS_{stretch}$ au cours des générations de l'algorithme génétique (Hajibrahim et al., 2016).

Les expériences ont été réalisées en exécutant l'IDB-ACPD-1 optimisé sur des études de cas. L'objectif est de montrer le comportement de convergence de RMS_D et $RMS_{stretch}$ au cours des générations. Les résultats du cas A-V1 sont présentés par la Figure 3.5.

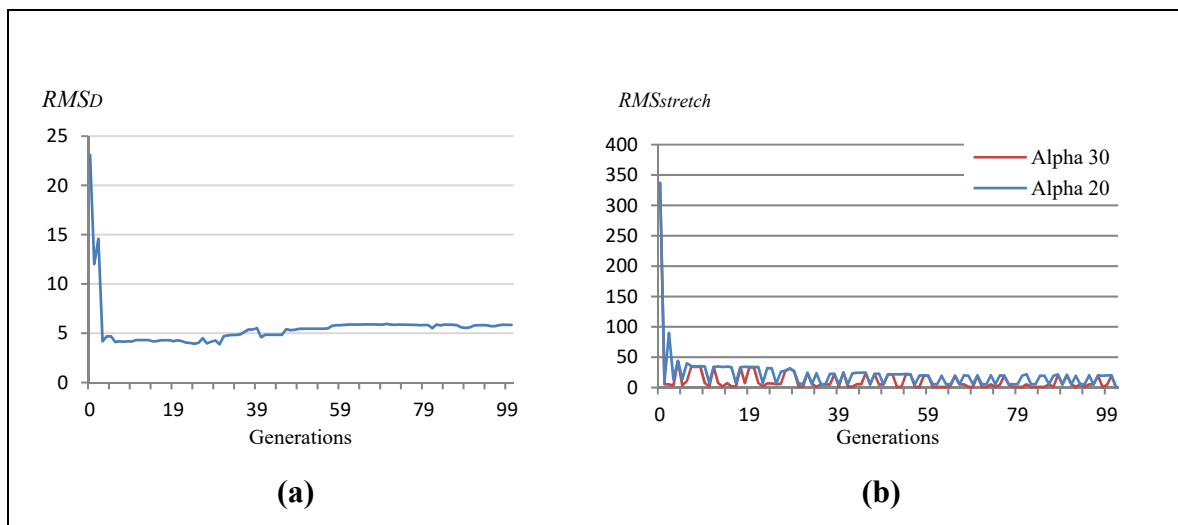


Figure 3.5 Évaluation de l'erreur quadratique moyenne par génération pour le cas A-V1; (a) RMS_D , (b) $RMS_{stretch}$

La quatrième analyse consiste à comparer la fréquence relative cumulée des résultats des distances euclidiennes (Figure 3.6) et curvilignes (Figure 3.7) obtenus avec la méthode proposée par rapport à ceux obtenus avec l'original ($F_{ACPD-1}(x)$ vs $F_{ACPD}(x)$).

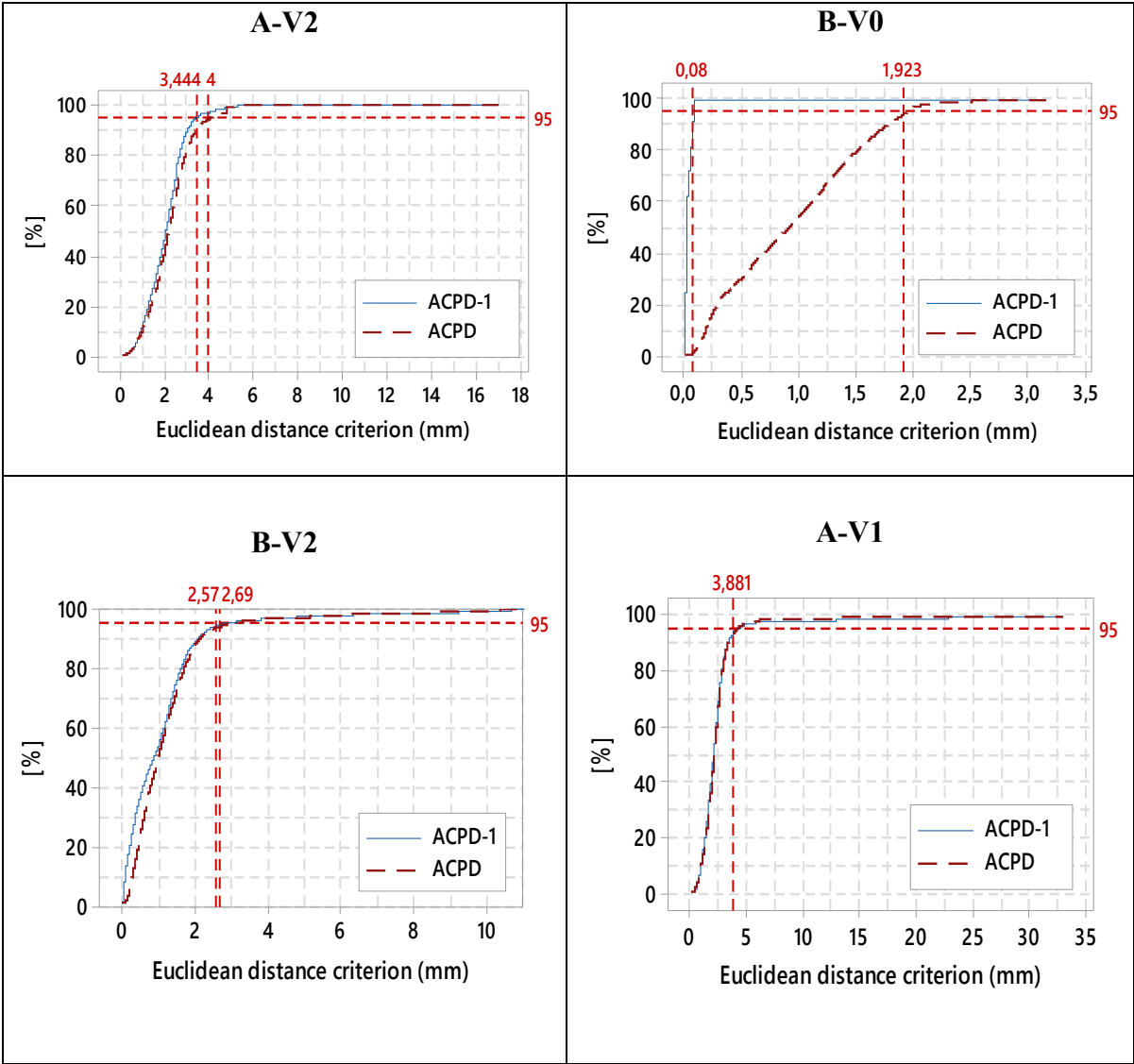


Figure 3.6 Fréquence relative cumulée pour le critère de distance euclidienne

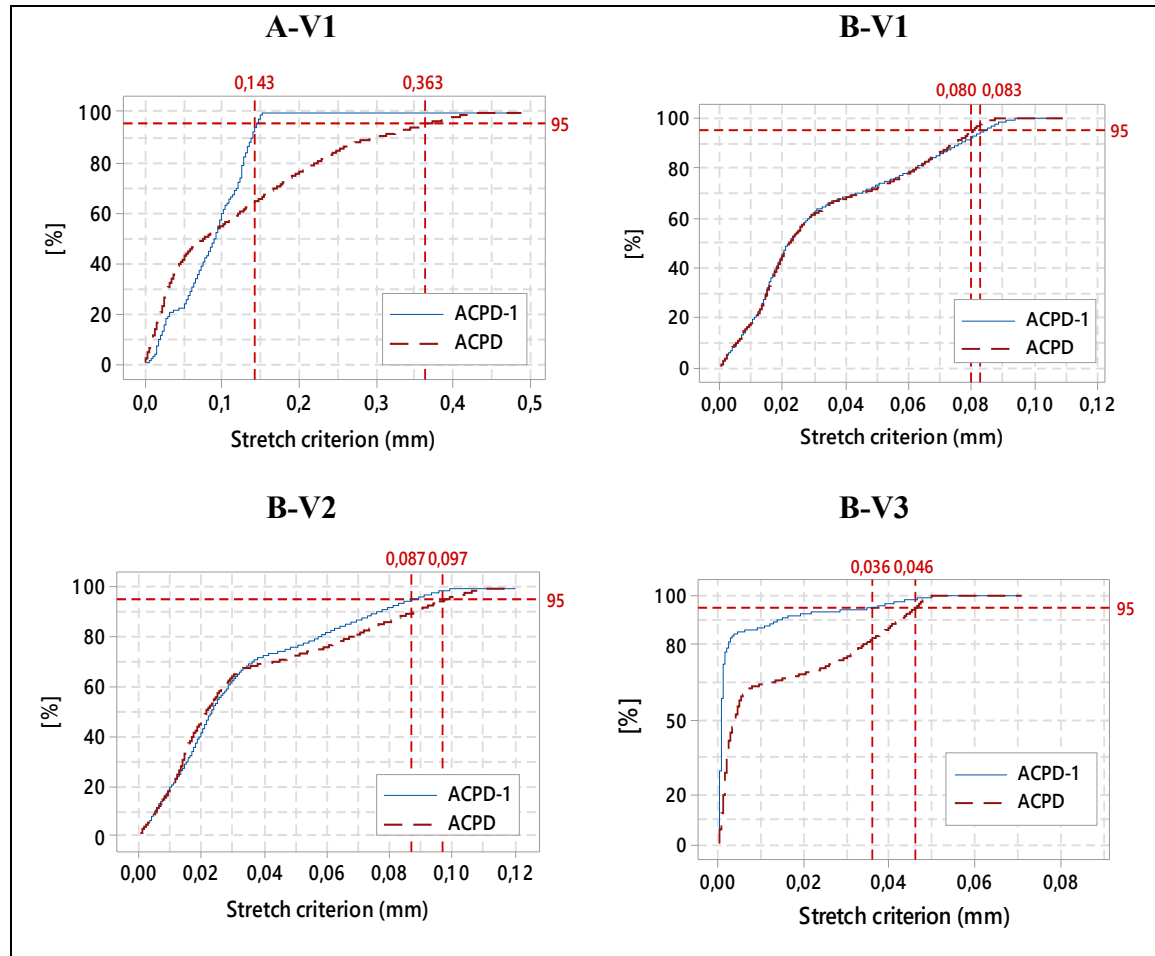


Figure 3.7 Fréquence relative cumulée pour le critère de *stretch*

Sur la base des résultats des analyses, il apparaît que:

- l'optimisation de l'hyper paramètre α influence significativement la qualité d'alignement et donc l'estimation des défauts de fabrication. La nouvelle métrique de qualité d'alignement proposée I_q présentée par l'équation (3.4) permet de limiter l'espace de recherche des meilleures valeurs α en fonction de chaque étude de cas. Par exemple, le tableau (3.1) montre que pour le cas A, les valeurs α qui permettent la meilleure qualité d'alignement sont [100, 150, 200, 250 et 400].
- la nouvelle méthode divise la pièce en zones de rigidité différente selon leur courbure gaussienne locale (Figure 3.4).

- la nouvelle implémentation (IDB-ACPD-1) fournit des résultats améliorés par rapport à la version originale (IDB-ACPD). Pour toutes les études de cas, les valeurs des critères d'étirement (*Voir* Figure 3.6) sont plus petites que celles obtenues par les méthodes précédentes, limitant donc la pièce à étirer lors de l'opération d'alignement (convient aux pièces situées dans la zone B). De plus, la Figure 3.7 montre que les valeurs estimées des défauts de fabrication sont plus proches des valeurs de référence.

3.3 Conclusion

Dans ce chapitre une nouvelle méthodologie pour l'inspection sans gabarit des pièces non rigides a été proposée pour éliminer le besoin de gabarits de conformation dédiés et coûteux. L'approche IDB-ACPD (Aidibe et Tahan, 2015) a été choisie, car elle présente une méthode prometteuse pour faire face à cette problématique. Une reformulation de la fonction objective de l'approche mentionnée ci-dessus est développée en tenant compte du fait que les pièces mécaniques présentent différentes zones de rigidité, et en alignant le modèle CAO vers le modèle numérisé. La courbure locale a été retenue comme descripteur pour classer les zones de rigidité quasi homogène, car elle est l'un des paramètres géométriques importants relatifs à la rigidité. Un poids associé à la rigidité locale de chaque point par rapport à son voisinage combiné à une méthode de classification basée sur une classification *Fuzzy C-mean* et l'estimation de la courbure gaussienne a été introduit et appliqué au modèle CAO aligné lors de la phase d'alignement.

La nouvelle reformulation (IDB-ACPD-1) fournit des résultats améliorés par rapport à la version originale (IDB-ACPD) en ce qui concerne la qualité d'alignement et la détection des valeurs de défaut de fabrication. Les résultats d'estimation des défauts de profil et de localisation dans les différentes études de cas industriels présentent des valeurs plus proches de celles de référence que la méthode précédente, reflétant ainsi l'efficacité de l'approche proposée. Des travaux futurs sont en cours pour intégrer et étudier les effets d'autres paramètres

géométriques susceptibles de provoquer des variations de la rigidité locale de la pièce (comme la variation d'épaisseurs, les renforts, les plis, etc.).

CHAPITRE 4

AMÉLIORATION DE L'ALIGNEMENT FLEXIBLE BASÉE SUR UNE ESTIMATION DE DISTANCE EUCLIDIENNE POUR UNE INSPECTION SANS GABARITS DES PIÈCES CONFORMES

4.1 Introduction

Les deux contributions proposées au cours de cette recherche sont autour d'une stratégie d'amélioration. En fait le premier travail (Ibrahim et al., 2019) consiste à optimiser la quantification de changement des propriétés intrinsèques dimensionnelles et de forme du nuage de points sources (CAO) selon la courbure locale de chaque zone. Les principales étapes de la première version (Ibrahim et al., 2019) sont présentées par la Figure 3.2. La deuxième contribution consiste à améliorer la performance métrologique de cette approche (Ibrahim et al., 2019) en proposons une reformulation de critère de distance euclidienne (présenté par l'équation (2.2)) de l'approche ACPD (Aidibe et Tahan, 2015). En d'autre terme, la méthode proposée c'est une version améliorée de l'algorithme IDB-ACPD-1 nommée IDB-ACPD-2 qui vise à minimiser le critère de distance euclidienne entre le modèle CAO et le SCAN. Une étude comparative est présentée pour identifier le meilleur indicateur pour identifier les défauts de fabrication. En effet, la qualité d'identification des défauts dépend de l'exactitude d'estimation de distance entre le modèle nominal (CAO) et le modèle scanné (SCAN). Dans ce contexte, ce travail propose et évalue un ensemble de métriques de qualité basé sur le calcul de distance de Hausdorff entre les deux nuages de point CAO et SCAN qui joue un rôle très important sur l'estimation de défaut.

4.2 Évaluation de qualité d'Alignement basée sur un métrique d'erreur de distance

La distance entre deux nuages de point est une indicatrice de similarité entre ces deux derniers. Dans la littérature, il existe différentes manières d'exprimer la distance entre deux nuages de

points. Ils visent à calculer la distance la plus courte entre différents types d'entités (point-courbe, point-ligne, point-triangle, etc.).

En général, il existe de nombreuses façons différentes de définir la distance entre deux ensembles de points $A = \{a_1, \dots, a_{Na}\}$ et $B = \{b_1, \dots, b_{Nb}\}$. La distance de Hausdorff (DH) est la distance la plus utilisée pour comparer deux ensembles (Huttenlocher, Klanderman et Rucklidge, 1993). Il s'agit de la distance maximale entre A et B . De point de vue mathématique, (Huttenlocher, Klanderman et Rucklidge, 1993) ont proposé la formulation suivante ;

$$d\widetilde{H}_d(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} d(a, b) \quad (4.1)$$

Il est important de noter que cette distance (équation (4.1)) n'est pas symétrique. Alors, pour déterminer une mesure plus précise de l'erreur entre deux surfaces, une distance non dirigée (distance de Hausdorff cumulative) est définie comme suit (Huttenlocher, Klanderman et Rucklidge, 1993);

$$H_d(A, B) = \max \{ \widetilde{H}_d(A, B), \widetilde{H}_d(B, A) \} \quad (4.2)$$

Avec d est la distance euclidienne. Comme mentionné, dans ce travail, la métrique DH est sélectionnée pour déterminer dans quelle mesure le CAD est similaire au SCAN. La méthode consiste à calculer la distance des deux nuages de points en fonction de différents types de DH; soit les distances entre les deux nuages de points (distance point à point) soit les distances entre un nuage de points et un maillage triangulaire (distance point à courbe et distance point à triangle). Cette section présente plus de détails sur ces types de DH.

L'algorithme IDB-ACPD propose une implémentation de critère de distance euclidienne (équation (2.2)) en utilisant la fonction *dsearchn* MATLAB®. La méthode se base sur une recherche de plus proche voisin point à point. Trois autres méthodes sont proposées pour évaluer la qualité de mesures de distance de Hausdorff entre les deux nuages de point

(CAO et SCAN) afin de trouver la meilleure méthode d'estimation de distance et par suite une meilleure qualité d'alignement. En d'autres termes, la qualité d'alignement entre les deux modèles CAO et SCAN est évaluée entre différentes méthodes de correspondances des entités (Point-Point, Point-Courbe et Point-Triangle).

4.2.1 Distance Point-Point

La distance de Hausdorff entre deux ensembles A et B en se basant sur une correspondance point à point consiste à assigner à chaque point de l'ensemble A la distance euclidienne à son point le plus proche dans l'autre ensemble B . Le maximum sur toutes ces valeurs est retourné. Formellement, la distance de Hausdorff de A à B est définie comme suit :

$$H_d(A, B) = \max \left\{ \max_{a \in A} \min_{b \in B} d(a, b), \max_{b \in B} \min_{a \in A} d(b, a) \right\} \quad (4.3)$$

L'algorithme ACPD utilise cette métrique pour évaluer la qualité d'alignement CPD entre le modèle CAO et le modèle numérisé SCAN. La fonction *Dsearchn* dans Matlab® basée sur *Quickhull* (Barber et al., 1996) est utilisée pour calculer le critère de distance euclidienne (équation (2.2)). En fait, la version 1 (IDB-ACPD-1) présente encore des limites; la qualité d'alignement n'est pas encore optimale. En d'autre terme, la distribution de distance euclidienne présente encore des points aberrants qui affecte l'estimation de défaut. (Voir Figure 4.2).

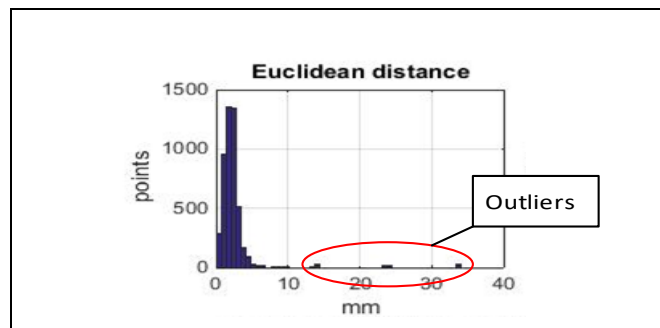


Figure 4.1 Histogramme de distribution de distance euclidienne (exécuté par IDB-ACPD-1)

Algorithme 4.1 Distance point à point basée sur une recherche de plus proche voisin

```

Entrée:  $A$ : Source,  $B$ : Cible
Sortie:  $Distance$ 
Début
Pour  $j = 1$  jusqu'à  $taille(A)$ 
    Pour  $i = 1$  jusqu'à  $K$ 
        Mettre le point  $B[i]$  dans  $proches\_voisins$ 
    Fin pour
    Pour  $i$  allant de  $k + 1$  à  $taille(B)$ 
        Si la distance entre  $B[i]$  et  $A[j]$  est inférieure à la distance d'un des
        points de  $proches\_voisins$  à  $B$ 
            Supprimer de  $proches\_voisins$  le point le plus éloigné de  $B$ 
            Mettre dans  $proches\_voisins$  le point  $B[i]$ 
        Fin si
    Fin pour
    Fin pour
     $proches\_voisins$  contient les  $k$  plus proches voisins de  $A[j]$ 
     $Distance = \max(proches\_voisins)$ 
Retour  $Distance$ 
Fin

```

4.2.2 Distance Point-Courbe

La DH entre les deux modèles SCAN et CAO basée sur une correspondance point à courbe consiste à définir le point le plus proche du nuage de points SCAN au modèle CAO aligné ($C = \{c_1, \dots, c_n \mid c_j \in \mathbb{R}^3\}$) comme une courbe spatiale connexe. Une spline est ensuite ajustée en termes de longueur d'arc le long de la courbe A , et le point le plus proche identifié en calculant ($H_d(A, S')$) entre chaque point de A et chaque point de S' en utilisant l'équation (4.3) (D'Errico, 2021).

4.2.3 Distance Point-Triangle

La DH entre deux ensembles A et B basée sur une correspondance Point à Triangle consiste à déterminer la distance entre chaque point en A et un plan tangent en son point correspondant en B . En d'autres termes, elle consiste à déterminer la distance entre chaque point de l'ensemble

A et le plan correspondant d'un côté de triangle le plus proche de B . La figure 4 présente la différence entre la distance point à point (Δ_D) et la distance point à triangle (ou point à plan) (Δ_P). La méthode d'estimation de la distance de Hausdorff entre le modèle nominal CAO le modèle numérisé SCAN en se basant sur une correspondance point à triangle (ou point à surface) est présentée par l'algorithme 4.2.

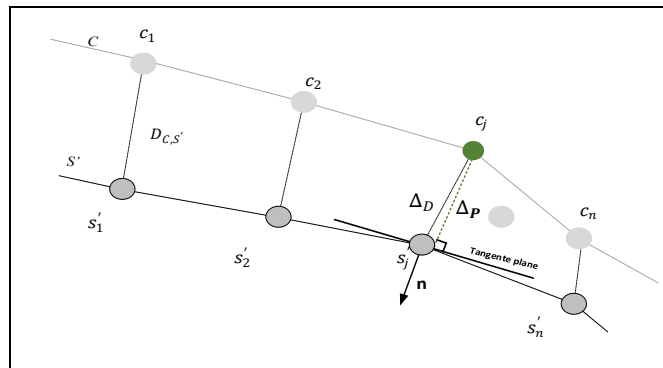


Figure 4.2 La Distance Point-à-Triangle (Δ_P) comparé à la distance Point-à-Point (Δ_D)

Algorithme 4.2 Méthode de calcul de distance point à triangle

Entrée: CAO' : CAO modifié (algorithme CPD), T : Surfaces de CAO' , tri_n : CAO' triangulé, $SCAN$: nuage de point scanné
 Sortie: D , taille de $CAO \times 1$: Vector with the point-surface distances .
 Début
 Pour chaque T
 Pour chaque point de $SCAN$; s
 Calculer le vecteur normal du point le plus proche de la surface T_i de CAO'
 La distance est signée selon la surface normale à identifier de quel côté
 $H_d(SCAN, CAO') = \max \left\{ \max_{s \in SCAN} \min_{T \in CAO'} d(s, T), \max_{T \in CAO'} \min_{s \in SCAN} d(T, s) \right\}$
 Fin pour
 Fin pour
 Fin

4.3 Résultats expérimentaux

Les résultats des différentes implémentations d'estimation de distance de Hausdorff sont comparés; la distance point à point (fonction *nearestneighbor* MATLAB®) est comparée avec une méthode d'estimation de distance entre le point le plus proche sur une courbe du modèle nominal et l'ensemble de points scanné et avec une troisième estimation de distance entre chaque point de modèle nominal et la surface scannée triangulée en 3D.

Afin comparer les résultats des quatre méthodes proposées, deux études de cas représentant des pièces typiques non rigides de l'industrie des transports sont étudiées (*Voir* Figure 4.3). Les pièces sont en aluminium 14 (1,63mm) Un bruit de mesure gaussien $N(0, 0.02 \text{ mm})$ a été ajouté à chaque étude de cas. Une déformation de l'ordre de 18 mm avec l'effet de la gravité est appliqué au cas A. Plus de caractéristiques sont présentés par la Figure 4.3. Le cas B est le même cas utilisé dans l'article (Ibrahim et al., 2019). Des défauts typiques sont appliqués sur ces pièces, principalement en termes de localisation et de défauts de profil. La Figure 4.4 présente les différentes vues de la pièce A. Les différentes positions et valeurs des défauts de fabrication imposés sont décrits sur la même Figure 4.3 Les expériences ont été réalisées en utilisant MATLAB® R2017 sur un PC avec un processeur Intel Core i5 à 4,2 GHz et une mémoire physique de 4,0 Go.

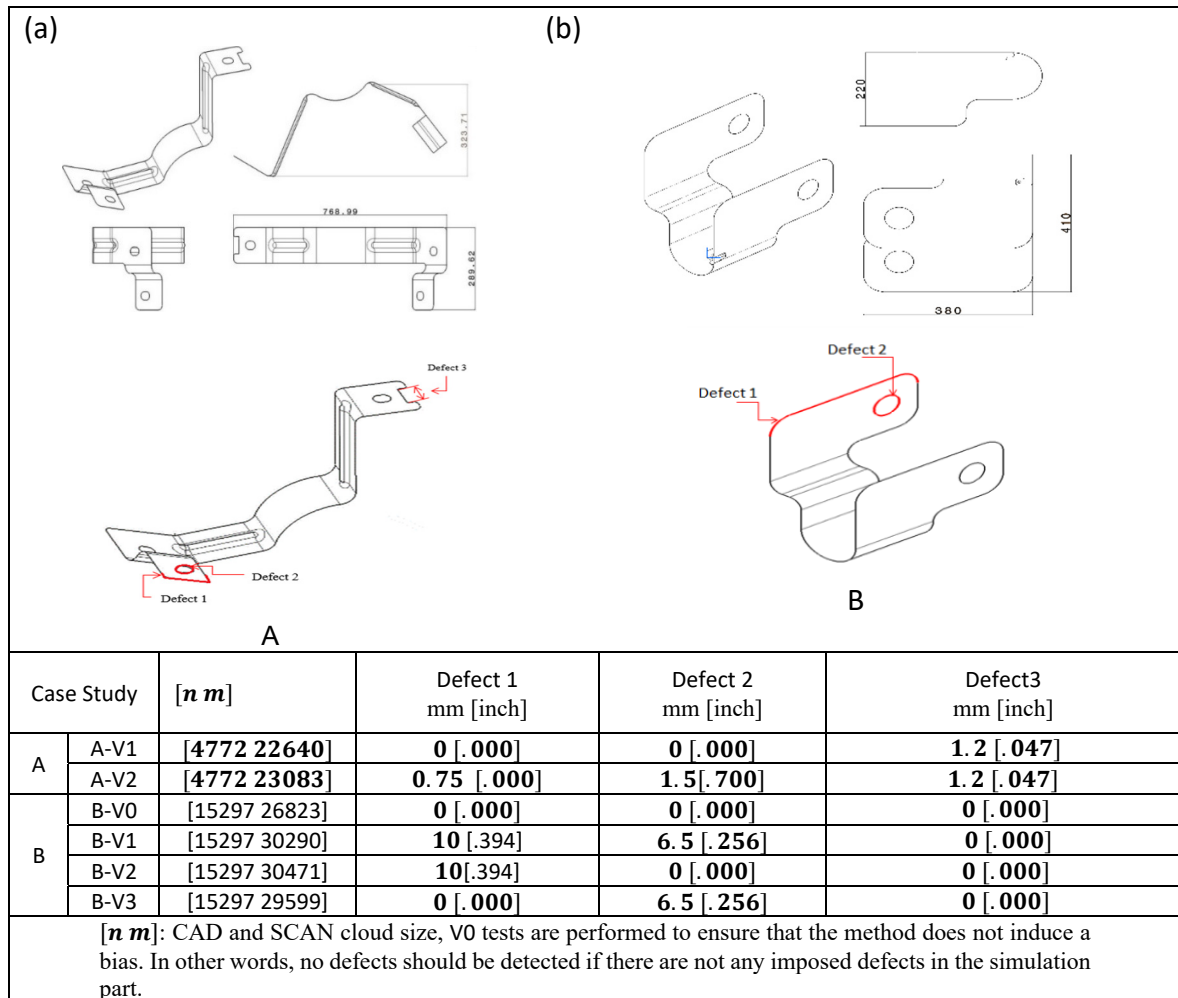


Figure 4.3 Les cas d'études utilisés pour validation de cas (a) Cas A (b) Cas B (c) Les valeurs des défauts imposés

Une étude de comparaison des résultats obtenus des quatre méthodes est effectuée en se basant sur trois métriques prédéfinis (Voir Tableau 4.1);

- l'erreur quadratique moyenne de critère de distance euclidienne (RMS_D) présenté par l'équation (2.4)
- l'erreur relative $\delta\alpha_r$, indicateur à quel point la valeur de défaut est relativement proche de la valeur de défaut nominale (Voir l'équation (3.8))
- l'indicateur de qualité d'alignement I_q présenté par l'équation (3.4)

Tableau 4.1 Comparaison entre les différentes méthodes d'estimation de distance entre CAD et SCAN-Cas A

Cas A	Métriques	Méthodes			
		Point-Point (<i>Dsearchn</i>)	Point-Point (<i>Nearestneighbor</i>)	Point-Triangle	Point-Courbe
V1	RMS_D	5.442	2.175	0.213	1.075
	$\delta\alpha_r$	66%	41%	8%	25%
	I_q	0.175	0.169	0.123	0.155
V2	RMS_D	1.585	2.181	0.500	1.094
	$\delta\alpha_r$	33%	13%	6%	24%
	I_q	0.166	0.157	0.121	0.130

Une analyse présentée par la Figure 4.4 consiste à comparer les fréquences relatives cumulées des résultats des distances euclidiennes obtenus par les quatre méthodes (Point-Point (*Nearestneighbor*), Point-Point (*Dsearchn*), Point-Courbe et Point-Triangle).

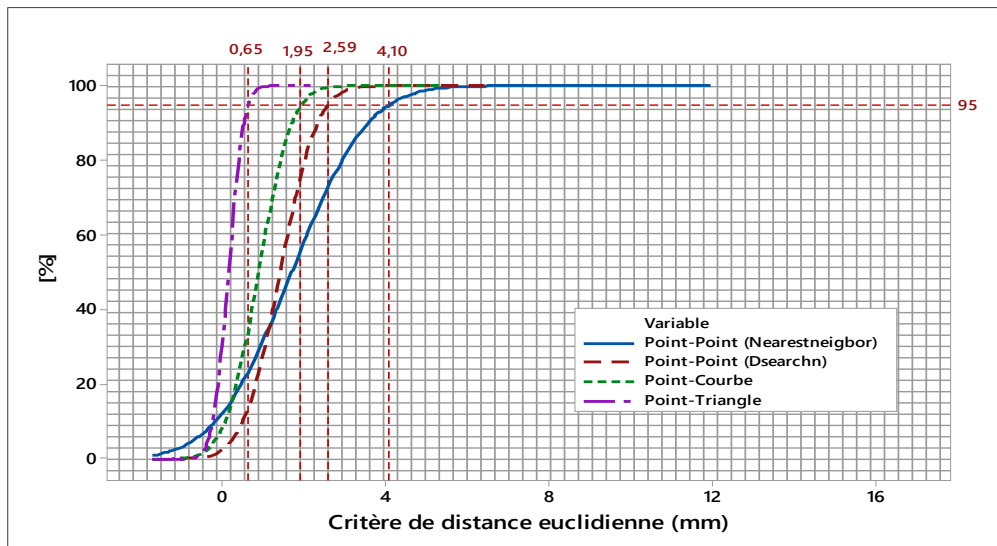
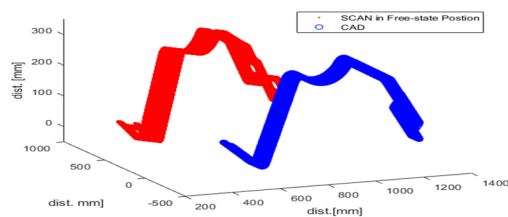


Figure 4.4 Fréquence relative cumulée pour le critère de distance euclidienne.

La Figure 4.5 illustre l'effet de chaque méthode sur l'estimation de critère euclidien présenté par un 'colormap' de modèle CAO après alignement pour le cas d'étude A. Une meilleure estimation par la méthode 'Point-Triangle' par rapport des résultats des autres méthodes (Point-Point et Point-Courbe). Le même résultat pour le cas B, la distance point triangle montre une meilleure performance en qualité d'alignement.

(1) SCAN and CAD in Free-state Position



(2) Views of Euclidean distance on CAD model after optimal registration with different methods implemented in IDB-ACPD-1

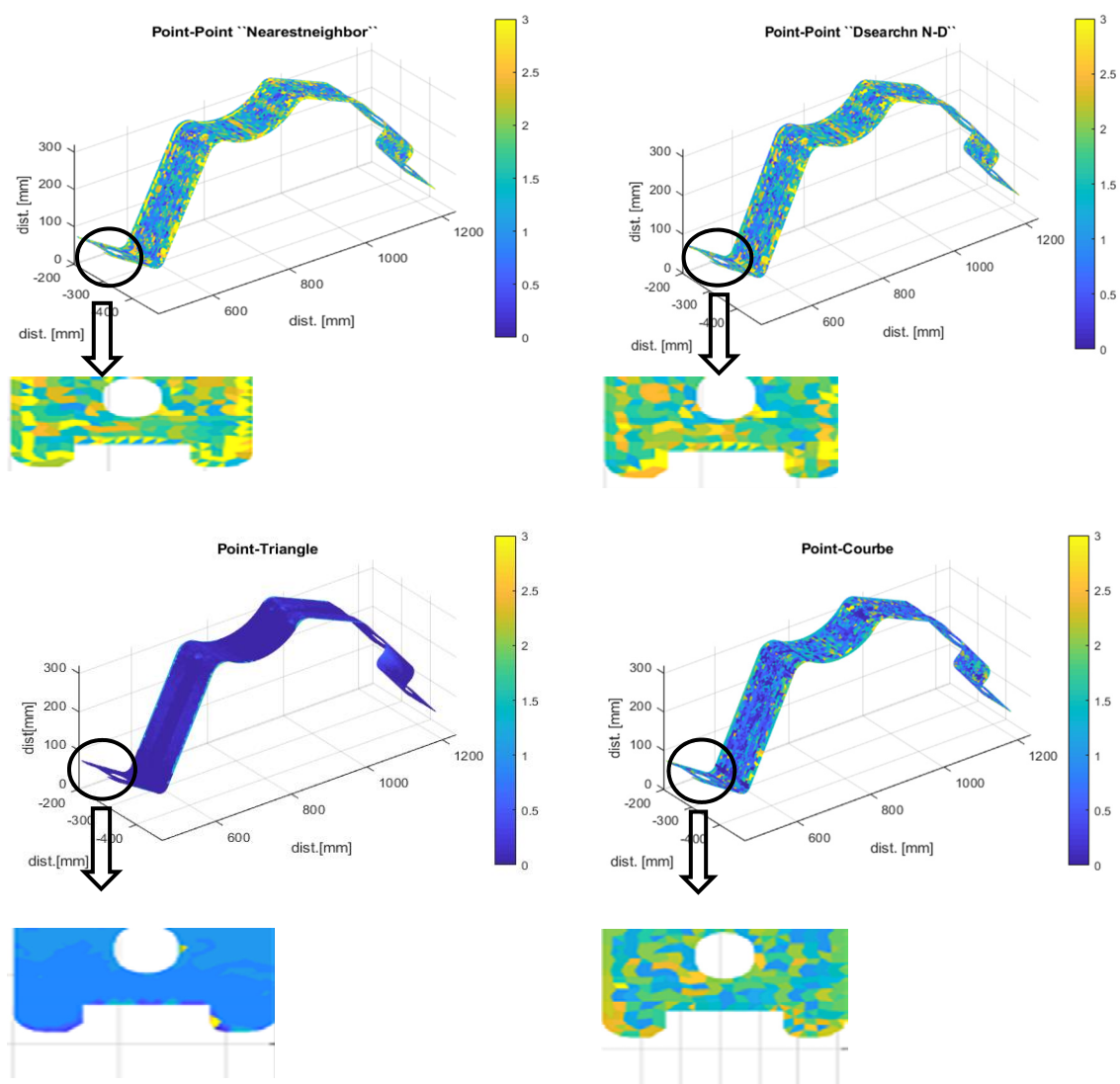


Figure 4.5 Comparaison des effets des méthodes d'estimation de critère de distance euclidienne sur la qualité d'alignement - Cas A-V1

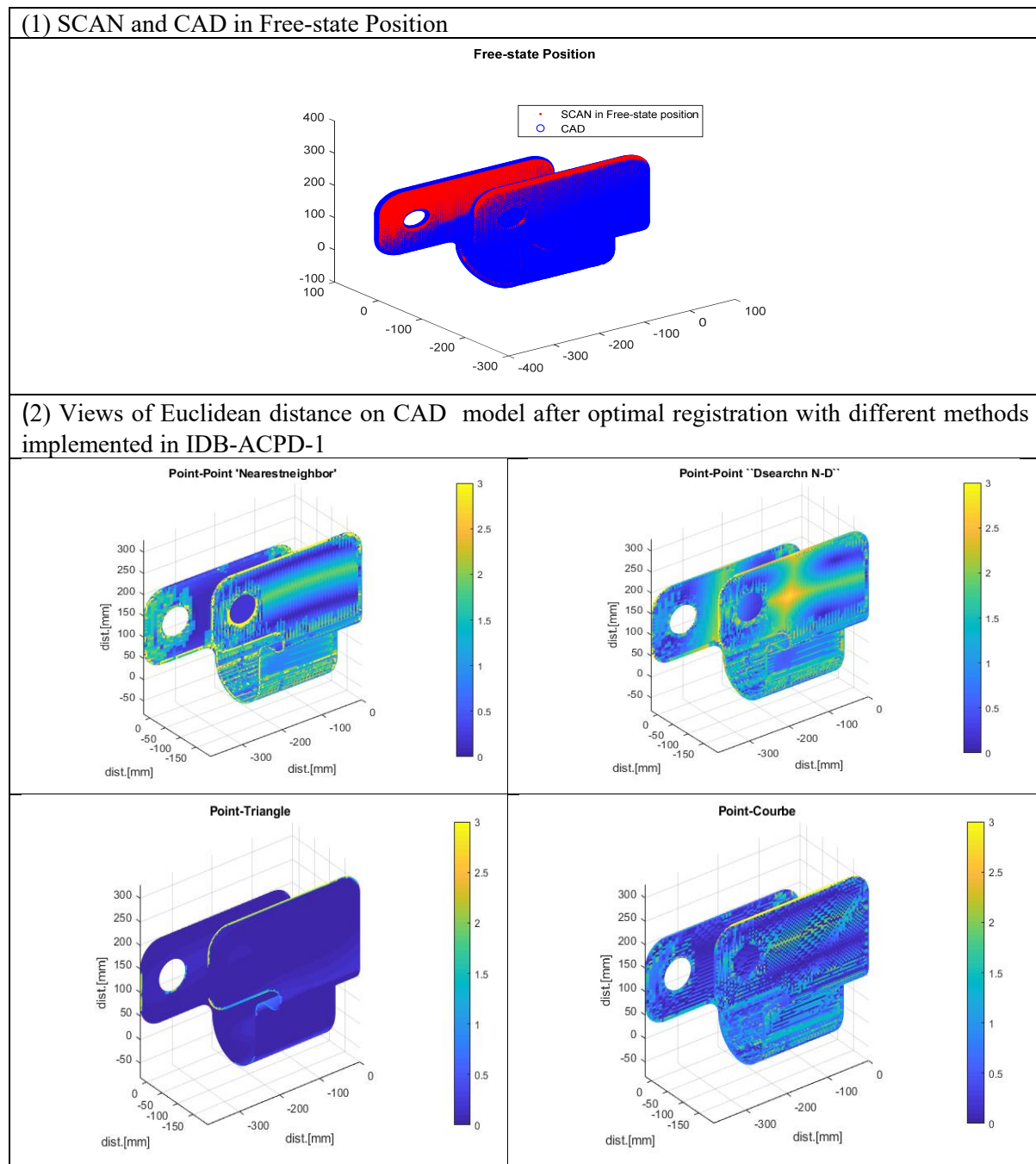


Figure 4.6 Comparaison des effets des méthodes d'estimation de critère de distance euclidienne sur la qualité d'alignement - Cas B-V1

Les analyses montrent que l'estimation de la distance Point-Triangle fournit des résultats améliorés par rapport à la version originale (IDB-ACPD) utilisant une estimation Point-Point. Pour les deux cas A et B, les valeurs de critère de la distance euclidienne (équation (2.2)) sont plus petites que celles obtenues par les méthodes précédentes ACPD-1 (*Point-Point* (*Dsearchn*, une fonction de MATLAB®)).

4.4 Conclusion

Ce chapitre présente une amélioration des performances métrologiques de la méthode ACPD-1 (Ibrahim et al., 2019), en proposant des nouvelles métriques de qualité basées sur le calcul de distance entre les deux nuages de points CAO et SCAN. Trois cas de calcul de distance d'Hausdorff sont proposés et incorporés dans la méthode ACPD-1 pour améliorer sa performance (une méthode basée sur une correspondance point à point, une basée sur la correspondance point à courbe et une troisième basée sur la correspondance point à surface). Ce travail est un projet d'article de revue. Les algorithmes développés sont validés sur des études de cas industriels virtuels (simulés) du secteur aérospatial. Ces mêmes études de cas ont déjà été utilisées comme référence par d'autres chercheurs. Nos résultats comparés aux leurs nous ont permis de quantifier la performance de nos approches. Les résultats reflètent le potentiel d'amélioration des méthodes proposées.

CONCLUSION

La présente thèse a pour objectif de développer une approche d'optimisation pour l'inspection des pièces mécaniques souples sans le recours à des gabarits de fixation. Nous avons développé plusieurs approches pour répondre à la question fondamentale de cette recherche; *Qu'est-elle est l'opération de recalage/ registration optimale dans le cas des composants mécaniques flexibles?*

Pour résumer, il s'agit de développer un outil numérique qui assure la cohérence géométrique des pièces flexibles (conservation des distances géodésiques). En effet, les travaux présentés dans cette thèse visent à optimiser la phase d'alignement entre les deux modèles candidats, le numérisé (SCAN) et le nominal (CAO) dans le but d'obtenir une meilleure identification de défauts de fabrication. En d'autres termes, nous avons proposé une phase d'optimisation basée sur les algorithmes génétiques pour améliorer une approche existante (Aidibe et Tahan, 2015). Cette proposition a été publiée dans *11th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation – MOSIM 2016*. Comparée aux autres méthodes d'optimisation existantes, l'AG pourrait rendre l'algorithme IDB-ACPD plus efficace en automatisant le choix des paramètres de régularisation, améliorant ainsi le temps de calcul, s'échappant du piège du minimum local tout en produisant de "meilleures" solutions.

Une contribution corolaire à la première a été d'améliorer l'alignement CPD pour mieux quantifier et localiser les erreurs de forme, d'orientation et de localisation entre deux nuages de points. Nous avons développé une nouvelle approche en tenant compte de la rigidité locale de la pièce inspectée; tous les travaux antérieurs considèrent que la rigidité est la même partout. Or, la majorité des cas, les composants mécaniques peuvent être représentés avec des variations significatives en rigidité par la présence d'épaisseurs différentes, renforts, raidisseurs, plis, etc. Ce travail a fait l'objet d'un article de journal publié dans '*The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*' (2019).

Nous avons poursuivi les travaux d'amélioration des performances métrologiques de notre méthode en proposant de nouvelles métriques de qualité basées sur le calcul de distance entre les deux nuages de point CAO et SCAN. Ce travail fait l'objet d'un projet d'article de revue (prévu pour être soumis en Juin 2021). Les algorithmes développés sont validés sur des études de cas industrielles virtuelles (simulées) du secteur aérospatial. Ces mêmes études de cas ont déjà été employées comme banc de test (*benchmark*) par d'autres chercheurs. Nos résultats comparés avec les leurs nous ont permis de quantifier les performances de nos approches. Les résultats reflètent le potentiel d'amélioration des méthodes proposées. L'estimation des amplitudes des défauts a démontré la précision de l'approche et sa maturité à être déployé à des fins de contrôle de la qualité dans l'industrie.

La nouveauté et les principales contributions de cette thèse sont résumées comme suit :

- une nouvelle méthodologie pour l'inspection sans recours à des gabarits de fixation des pièces non rigides est proposée.
- des nouvelles métriques sont proposées pour évaluer la qualité d'alignement et une reformulation de la fonction objective de l'algorithme IDB-ACPD est proposée.
- les paramètres de régularisation de l'algorithme CPD sont optimisés.
- la flexibilité (ou la rigidité) locale de la pièce mécanique est prise en compte lors de la phase de recalage (alignement entre la CAO nominale et la pièce scannée) ce qui améliore les performances métrologiques de cette opération.
- la courbure locale a été retenue comme descripteur pour classer les zones de rigidité quasi homogène (elle est l'un des paramètres géométriques importants qui influencent la rigidité). La classification a servi à 'optimiser' le choix des hyper paramètres de l'algorithme de recalage.
- un poids associé à la rigidité locale de chaque point par rapport à son voisinage combiné à une méthode de classification et à l'estimation de la courbure gaussienne a été introduite et appliquée pour améliorer la qualité de recalage et obtenir ainsi une meilleure estimation des amplitudes des défauts de fabrication.
- une estimation efficace de la distance entre les modèles SCAN et CAO.

- des nouvelles métriques basées sur une approximation de la distance de Hausdorff qui ont été mises en œuvre afin de réduire les erreurs de calcul.

D'autres travaux sont recommandés pour approfondir ces recherches et améliorer les résultats obtenus.

Ces travaux et ceux à venir se traduiront par des gains futurs pour l'industrie en anticipant les économies et l'amélioration de la productivité grâce à l'élimination des montages spécialisés et à la réduction du temps de cycle d'inspection, offrant ainsi un avantage concurrentiel de fabrication à l'économie mondiale.

RECOMMANDATIONS

Dans le cadre de notre projet de recherche, on a proposé des algorithmes d'optimisation de la phase d'alignement non rigide. Cette opération est incontournable pour ce type de pièces et c'est l'étape la plus importante pour garantir une identification précise des défauts de fabrication présents sur la pièce numérisée (SCAN). La stratégie proposée s'appuie sur une optimisation des paramètres de régularisation de l'algorithme CPD en utilisant une approche heuristique basée sur les algorithmes génétiques. Par la suite, deux métriques basées sur les distances curviligne et euclidienne ont été améliorées pour une meilleure évaluation de qualité d'alignement.

Les contraintes logistiques et temporelles nous obligent à mettre à terme notre projet. Néanmoins, plusieurs pistes et opportunités de développement demeurent à notre sens largement ouvertes, et méritent d'autres investigations ou développements. Nous nous permettons de proposer quelques recommandations pour de futurs travaux de recherche:

Dans l'article IJAMT (2019), la rigidité locale de la pièce a été prise en compte en étudiant l'effet de la courbure gaussienne locale de la pièce. La méthode proposée a montré des résultats prometteurs. Il serait judicieux de tester les performances de l'algorithme en variation la rigidité (par la variation du rayon de courbure dans les plis) et d'étendre la méthode en intégrant les effets d'autres paramètres géométriques susceptibles de provoquer des variations de la rigidité locale de la pièce (comme la variation d'épaisseurs, la présence d'armatures, de raidisseurs, les plis, etc.). De plus, la capacité prédictive du modèle doit être évaluée sur d'autres types de composants (études de cas virtuelles (simulées) et expérimentales (réelles) de l'industrie). En tant qu'approche de validation, les études de cas virtuelles permettent d'évaluer numériquement les performances globales de tout outil/algorithme sur des multitudes de cas de Figure (différentes configurations de défauts). L'alternative sur des pièces réelles est onéreuse et sera fortement limitée à des cas spécifiques.

Dans le projet d'article 2, le critère de distance euclidienne a été évalué et reformulé. Par contre, le sens d'alignement CAO => SCAN n'a pas été changé. Nous pensons qu'il sera judicieux d'investiguer les résultats et les performances dans le sens inverse SCAN => CAO avec la nouvelle formulation.

Aussi l'algorithme FCM (un algorithme d'auto-apprentissage automatique non supervisé) utilisé pour la classification des 'zones' selon la courbure locale nécessite une initialisation de deux paramètres qui doivent être affectés de manière appropriée avant de procéder à l'analyse de '*cluster*', à savoir l'indice pondéré flou m et le nombre de classe c , sinon, l'analyse de l'algorithme FCM sera affectée. Alors il est recommandé d'optimiser cet algorithme pour garantir une explication raisonnable de l'analyse de segmentation et par suite augmenter le niveau d'automatisation de l'algorithme ACPD-1.

De même, pour l'article 1 IJAMT (2019), la réalité physique de la déformation (élongation) du matériau n'est pas prise en compte ce qui peut introduire dans certains cas des aberrations numériques (ex. déformation localisée qui dépasse la limite élastique). Nous pensons qu'une nouvelle définition du critère de *stretch* et qui se base sur conservation de l'énergie de déformation serait à développer. En effet, l'énergie de déformation d'un solide est l'énergie stockée en cours de déformation élastique (énergie potentielle). Pour les matériaux linéairement élastiques, l'énergie de déformation peut être définie (formulation simplifiée) par l'équation suivante :

$$U = \frac{1}{2} V \sigma \varepsilon = \frac{1}{2} V E \varepsilon^2 \quad (\text{R.1})$$

Avec σ est la contrainte induite (N.m^{-2}), ε est l'élongation, V est le volume [m^3] et E [N.m^{-2}] est le module d'Young.

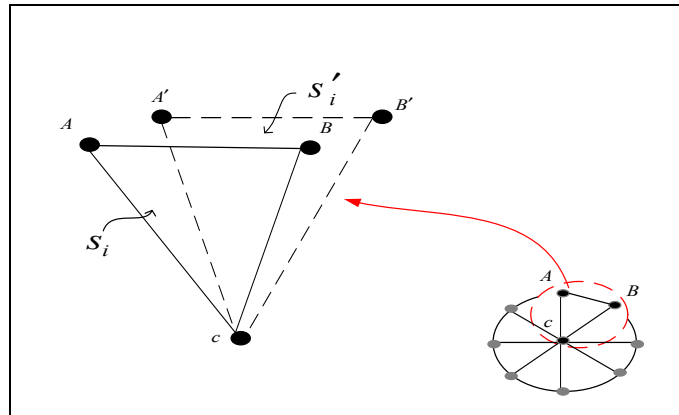


Figure R 1 Déformation d'une maille

Le travail externe effectué sur un élément élastique en le faisant déformer de son état non contraint est transformé en énergie de déformation qui est une forme d'énergie potentielle (comme un ressort). L'énergie de déformation est principalement récupérable sous forme de travail mécanique. Notre but est de conserver ce travail durant une opération de recalage/registration entre les deux modèles SCAN et CAO.

Dans l'article IJAMT (2019), le travail n'était pas focalisé sur l'optimisation du temps de calcul. En effet le calcul sous forme vectoriel affecte le temps de réponse de l'algorithme génétique, c'est pourquoi l'utilisation d'un modèle de parallélisme est fondamentale. Il s'agit de distribuer une seule population dans un ensemble de processeurs et des opérations de sélection et de croisement sont effectuées entre les individus du réseau de processeurs.

Nous avons commencé le développement de cette approche en utilisant deux outils (*Toolboxes*) qui permettent une programmation parallèle explicite:

- **Parallel Computing Toolbox:** Conçue pour programmer des architectures multicœurs
- **Distributed Computing Server:** Permet d'étendre les fonctionnalités de Matlab à de grandes ressources, telles que les clusters.

Les paramètres de ce modèle de parallélisme sont indiqués dans le tableau R.1.

Tableau R 1 Paramètres de modèle de parallélisme proposés

Composant	Nombre de PC
Client	1
Job Scheduler	1
Cluster	3

Dans le même objectif, une autre recommandation consiste à combiner une approche topologique avec une méthode qui se base sur le calcul des éléments finis; L'idée est de chercher un alignement optimal à l'aide de l'algorithme CPD sur des zones identifiées comme des conditions aux limites tout en respectant les exigences sur l'amplitude des forces permises lors de la conformation. Une fois une transformation optimale est obtenue en respectant ces contraintes, elle sera utilisée dans un code de calcul EF pour optimiser les opérations de conformation virtuelle dans les régions sans contraintes.

La méthode se base sur l'optimisation des paramètres de régularisation de l'algorithme CPD à fin d'obtenir une matrice de transformation optimale. Deux critères de similarités sont introduits: critère de distance euclidienne et critère de distance curviligne. Alors il s'agit d'optimiser cette fonction objective

$$Argmin F_{\beta,\lambda} = D_{géodésique} + D_{Euclidienne} \quad (R.2)$$

Et,

$$|D_{Euclidienne(i)}| \leq \tau_{(i)}, i = 1, \dots, N_B \quad (R.3)$$

Avec N_B : Le nombre de points dans les conditions aux limites, τ : l'ensemble des valeurs de distance de contact,

$$-f_{l(i)}^{Max} \leq f_{l(i)} \leq f_{l(i)}^{Max} \quad i = 1, \dots, N_l \quad (R.4)$$

Avec N_l : Le nombre des zones identifiées comme des conditions aux limites, $f_{l(i)}^{Max}$ Représente la grandeur de la force dans les zones $l(i)$ qui guide le déplacement des points de la partie scannée vers le modèle nominal.

Une matrice de transformation optimale sera utilisée dans un calcul EF pour aligner les régions sans contraintes (La Figure suivante illustre les deux étapes ; alignement CPD dans les régions limitées et calcul EF dans les régions sans contraintes).

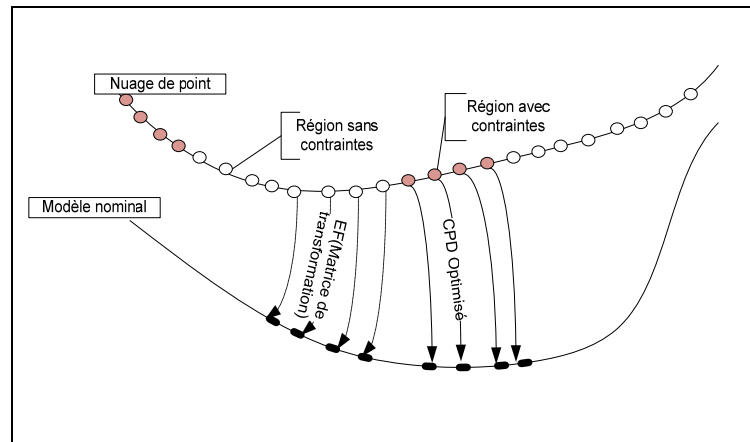


Figure R 2 Illustration de méthode recommandée

Cette proposition permet de **diminuer le temps de calcul** puisque l'estimation de la matrice de transformation se fait seulement avec les points des régions qui représentent des conditions aux limites.

ANNEXE I

GENETIC ALGORITHM FOR THE INSPECTION OF DEFORMABLE BODIES BY ADAPTING THE COHERENT POINT DRIFT ALGORITHM

Marwa Haj Ibrahim^a, Ibtissem Jbira^a, Antoine Tahan^b, Borhen Louhichi^a, Ali aidibe^b

^aISSAT Sousse, Cité Taffala (Ibn Khaldoun)
4003 Sousse, Tunisie

^bÉcole de Technologie Supérieure
1100 Notre-Dame West Street, Montréal, Québec, H3C 1K3, Canada

Article publié dans
« Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et SIMulation (MOSIM 2016) »
Août 2016

Abstract

The dimensional inspection of non-rigid parts remains a challenging task in industry, because of geometric and dimensional characteristics that can occur in Free State. Much research has been devoted to automating the inspection of these parts in order to eliminate the cost of compliance templates that cause productivity problems for manufacturers. A registration step is required for the automatic inspection of mechanical parts and one of the most famous existing registration algorithms is the Coherent Point Drift (CPD) algorithm which is widely used in imaging applications. The CPD has been adapted to the mechanical field specifically for fixtureless dimensional inspection problems of deformable bodies (the IDB-ACPD algorithm). However, the optimization phase of the IDB-ACPD approach needs improvement. This paper proposes an optimization method based on the genetic algorithm (GA) in order to find the optimal smoothness regularization parameters that control the alignment phase of the algorithm. Compared to other existing optimization methods, the GA could make the IDB-ACPD algorithm more efficient by automating the aforementioned

parameter choice, thus improving computation time and escape from the local minimum ensuring the 'best' solutions.

Keywords: Inspection, registration, non-rigid parts, dimensional metrology, optimization, genetic algorithm.

1. Introduction

Inspection is a fundamental step in the development process and the manufacturing of mechanical parts. The industry needs to ensure that the manufactured part satisfies the nominal model (CAD / CAO) by locating and quantifying dimensional and geometric errors such as form, profile, orientation and localization errors. In the case of rigid parts, the inspection process has been studied and solved by various researchers (Li et Gu, 2004).

However, there are still no reliable solutions in the case of non-rigid parts (compliant or flexible). A definition of non-rigid parts from an industrial point of view and a proposition to quantify the flexibility/rigidity of mechanical parts are presented in (Aidibe et Tahan, 2014). At the moment, industry circumvents flexible parts' fixtureless inspection problems by using expensive and specialized jigs to comply these parts during inspection, as seen in Figure A I-1. To reduce inspection costs nowadays, the intention is to replace conformation operations by digital ones. Several research projects have been developed to circumvent the problem of the fixtureless inspection of non-rigid parts by automating the inspection process to include the Free State condition. A review of specification methods and an inspection of non-rigid parts has been presented by (Abenhaim, Desrochers et Tahan, 2012). This review presented the concepts, challenges and recent advances made in this domain. In 2013, a methodology for the automated inspection of mechanical assemblies based on the use of a manipulator arm equipped with artificial vision sensor effectors on in its head has been presented by (Viana et al., 2013).

The inspection methodology proposed here is based on the coupling of two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) informations in order to take advantage of 2D analysis speed and the completeness of 3D data.



Figure-A I-1 Example of a specialized inspection fixture
Bombardier Aerospace Inc.

The non-rigid inspection process consists of three phases: the first phase is the acquisition of data, and, if necessary, a post-treatment of a point cloud (e.g.: the generation of a mesh, filter, etc.). In this phase, a point cloud is obtained from the 3D scanning services of various industrial parts' external profiles. The second phase focuses on the point cloud alignment. In this phase, the measured data will be aligned to the repository system model designed by identifying the matching areas. The third phase represents the identification module. The purpose of this phase is to determine the degree of conformity between the manufactured part and the nominal model (amplitude defects, location, etc.). This module's aim is to distinguish the defects due to deformations occurring during the manufacturing process because of a part's flexibility (gravity effects and effects of residual stresses). This process is detailed further in Figure A I-2. Several strategies for the mapping of results are considered: **(1)** Errors are detected which indicate a deterioration of the manufacturing process. As a result, the manufacturing process is corrected. **(2)** The part conforms; it is acceptable and operated subsequently. **(3)** Non-compliance of the part due to a failure to take into account

manufacturing requirements. As a result, the CAD model is modified to a future compliant part.

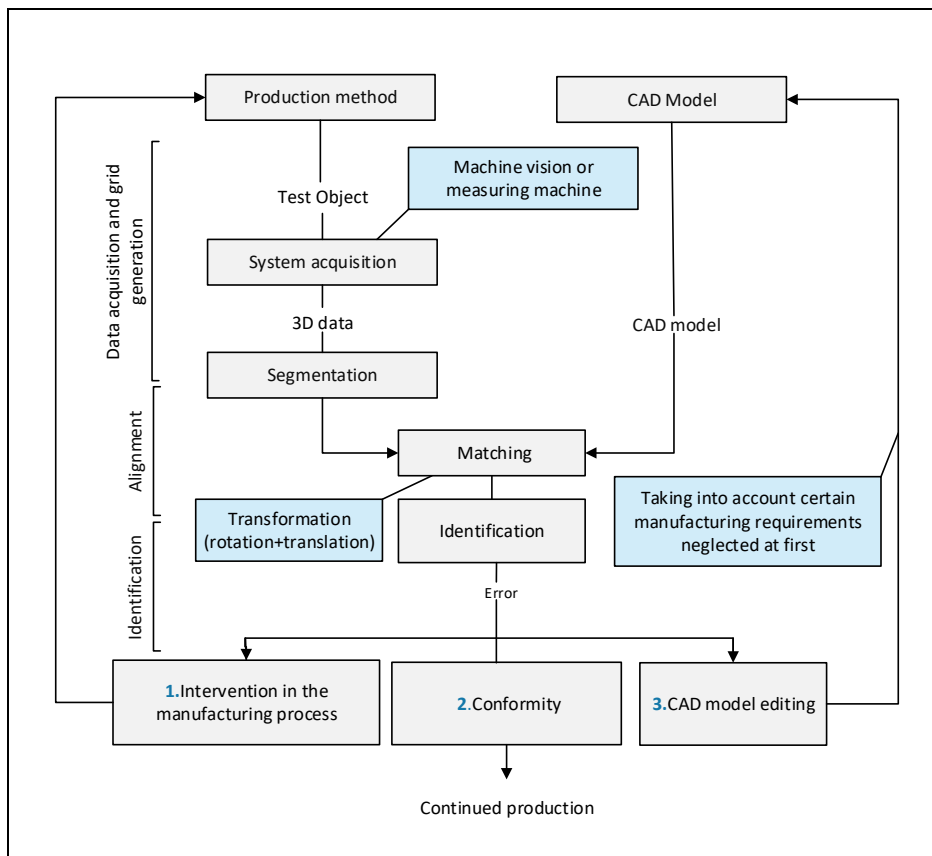


Figure-A I-2 Inspection process

In 2015, a design based on an integrated, CAD-features approach to effectively plan the inspection process using a Coordinate Measuring Machine (CMM) has been presented by (Kamrani et al., 2015). The work accurately described the steps required to generate an instruction file that can ultimately be executed on the CMM for effective action. In 2010, a method for measuring non-rigid freeform surfaces by a CMM to fill the free state stress variation which is mainly due to weight (gravity) and the release of internal stresses resulting from manufacturing has been presented by (Ascione et Polini, 2010). (Weckenmann et Weickmann, 2006) describe the optical inspection of metal parts formed by applying projection

systems and a virtual fixation. These systems use a projection edge technique which ensures the acquisition of a part surface's point cloud. The pattern edge is projected on the deformed part and one or more cameras acquire data. These systems are based on the principle of triangulation between the camera and the projector. In effect, the surface's triangular mesh is generated and a cloud point is measured. This triangular mesh is used in virtual mounting using the Finite Element Method (FEM) to numerically calculate the behavior of similar highly complex objects. As compared to the CAD model, it also allows for the comparison of a shape based on two types of analysis: qualitative and quantitative. This method's limitation is measurement uncertainty and accuracy. To improve research on inspection in a Free State condition and decrease levels of uncertainty, a new system was presented by (Jaramillo, Boulanger et Prieto, 2009) to perform a real-time inspection of deformable parts. In their work they described an accurate simulation of FEM, to calculate distortion where, instead of applying a real strain to an inspected part, a virtual deformation was applied to a CAD model at the model's aligning step to simulate an actual physical deformation. Point set registration phase is a key element in many computer vision tasks. The purpose of this phase is to retrieve the transformation that combines one point to another as well as to assign the correspondence between them. Multiple factors; including unknown non-rigid spatial transformations, the large dimension of sets, noise and outliers, make this phase difficult to solve. In this context, several techniques (algorithms) have been developed to overcome the problem. An overview of the main registration techniques are presented by (Aidibe et Tahan, 2015) and a summary is shown in Figure A I-3. These techniques are adapted to specific cases that do not match the alignment problems of relatively non-rigid parts.

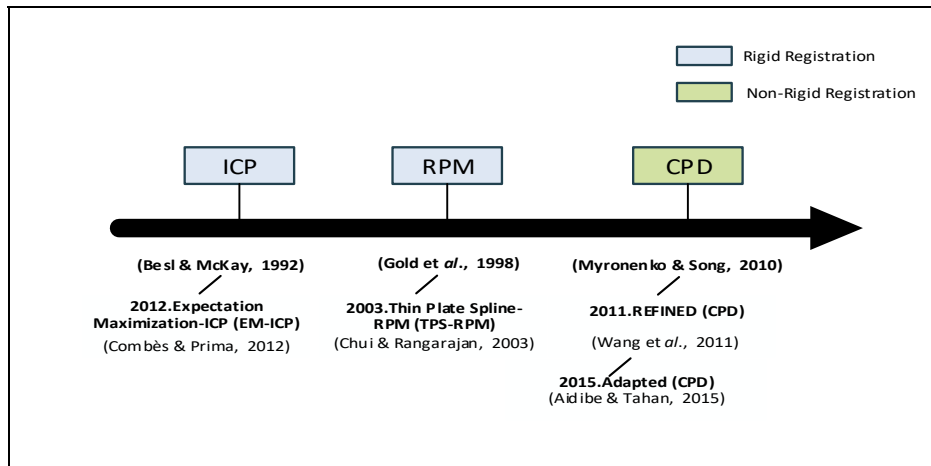


Figure-A I-3 Point set registration partial overview;
ICP (Iterative Closest Point) RPM (Robust Point Matching)
CPD (Coherent Point Drift).

One of the most famous existing registration algorithms is the Coherent Point Drift (CPD) that is widely used in imaging applications. CPD has been adapted in the mechanical field specifically for the fixtureless dimensional inspection problems of deformable bodies (Aidibe et Tahan, 2015) This approach is called IDB-ACPD. However, the optimization phase of the IDB-ACPD algorithm needs to be improved in order to reduce computation time all the while preserving good registration results. The aim is to find the optimal values of the smoothness regularization parameters that controls the alignment behavior of the CPD procedure's non rigid registration algorithm. The present paper proposes the use of a Genetic Algorithm (GA) as an optimization method and defends this choice by conducting a comparative study with several other optimization techniques. The paper is organized as follows: Section 2 presents the general methodology of the CPD algorithm and related works. Section 3 presents the optimization strategy to be integrated in the IDB-ACPD algorithm. Section 4 highlights experiment procedure and an analysis of results. A conclusion and suggestions for future research are presented in Section 5.

2. Coherent Point Drift algorithm and related works

As described in the CPD algorithm (Myronenko et Song, 2010), the alignment of two point sets is considered a robust probability density estimation problem where one set represents the centroids from the Gaussian Mixture Model (GMM) and the other represents data point clouds. According to different deformations and distortions between these two point sets, an appropriate rigid or non-rigid transformation can be selected.

At the optimum, two point sets become aligned and a correspondence is obtained using maximum GMM posterior probability for a given data point. The core of the CPD algorithm forces the centroids to move coherently as a group and therefore the displacement function between point sets should be smooth. This is mathematically formulated as regularization on the displacement (also referred to as velocity) function. Such an approach is also supported by the Motion Coherence Theory (Yuille et Grzywacz, 1988).

The transformation T for rigid, affine, non-rigid case is specified separately, and details of the implementations can be found in (Myronenko et Song, 2010). For rigid and affine registration, T is defined as:

$$T(y_m; R, t, s) = sRy_m + t \quad (\text{A I-1})$$

Where y_m is the GMM centroid locations, s is the scaling parameter, R is the rotation matrix and t is the translation vector.

In the case of non-rigid registration, T is defined as the initial position Y with a displacement function v .

$$T(Y, v) = Y + v(Y) \quad (\text{A I-2})$$

The norm of v is regularized to enforce equation smoothness (2). Such an approach is also supported by the MCT (Myronenko et Song, 2010), (Yuille et Grzywacz, 1989). Adding a regularization term to the negative, a log-likelihood function is obtained:

$$f(v, \sigma^2) = E(v, \sigma^2) + \frac{\lambda}{2} \varphi(v) \quad (\text{A I-3})$$

Where E is the negative log-likelihood function, σ^2 is the equal isotropic covariances, $\varphi(v)$ is the regularization term and λ is the trade-off parameter.

Originally, the CPD algorithm includes three free parameters w , λ and β which are set manually. Their choice is very sensitive and affects the performance of the CPD algorithm; especially parameters λ and β that control the influence of the smoothness constraint on the transformation (Myronenko et Song, 2010). A signification of those parameters is presented in Table A I-1.

Table-A I-1 Signification of the CPD' parameters

Parameter	Signification
ω	• Reflects the assumption about the amount of noise in the point sets and the number of outliers in GMM • $0 \leq w \leq 1$
λ	• Represents the trade-off between the advantages of maximum likelihood fit and regularization • Set the strength of the smoothing • If λ is small, the solution is noisy • If $\lambda > 0$, it controls the regularization strength
β	• Controls the rigidity of the transformation • Defines the regularization model. • Sets the smoothing regularization (smoothing width Gaussian filter)

Several research projects have been devoted to optimizing the automatic selection of these parameters. (Wang et al., 2011) presented a refined CPD algorithm. However, in the original CPD algorithm, the value of w is set by experience (e.g. $w = 0.3, 0.5, 0.7, 0.8$), and if improper

parameter values are chosen then poor results are derived. (Wang et al., 2011) proposed to automate the selection of the weight parameter w . They consider w as an unknown parameter and a search of the optimal value corresponding to the minimum criterion function. When the optimal value of w is found, the corresponding transformation parameters of T are computed by the Expectation Maximization (EM) algorithm (Myronenko et Song, 2010), (Combès et Prima, 2012) and improve the performance of the point set registration. Furthermore, a hybrid optimization procedure that combines the GA with the Nelder-Mead simplex method for automatically selecting the optimal weight parameter is employed. In this work, a criterion term to judge whether the chosen value of w is appropriate was added. The final criterion function is shown in equation (A I-4).

$$\frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} weight(i) \times d(x'_i, Tx_i)^2 \quad (\text{A I-4})$$

Where d is the Euclidean distance between a point x'_i in one point set and the corresponding point Tx_i mapped from the other point set and N_c is the number of points in the point sets; and $weight(i)$ is the weight assigned to the distances between corresponding point pairs (the greater distance is assigned by the lowest weight).

(Aidibe et Tahan, 2015) proposed in 2015 a solution to adapt the CPD algorithm to the problem of the fixtureless dimensional inspection of non-rigid parts. The main aim of their method is to distinguish between defects due to the manufacturing process and the deformation due to the flexibility of a given compliant mechanical part.

Their approach is called IDB-ACPD. This method is started by a pre-alignment using ICP algorithm in order to register the two given point sets in a common coordinate system. The smoothness regularization parameters to be optimized (λ and β) are then initialized. Typically $\lambda_0 \in [1, 100]$ and $\beta_0 \in [1, 20]$, where λ_0 and β_0 are the initial parameters of λ and β . With each combination of λ and β , the CAD model is aligned to the scanned part using the CPD

algorithm. The result of the alignment is a point sets $S' = \{s'_1, s'_2, s'_3 \dots s'_n\}$, and $C = \{c_1, c_2, c_3 \dots c_n\}$ that represents the closest point in the scanned part to S' .

Two criteria that belong to the problem of fixtureless inspection of mechanical compliant parts are introduced: the conservation of the curvilinear distance (stretching criterion or isometric transformation) and the minimization between two objects (Euclidean distance criterion).

The *stretch criterion* shown in equation (A I-5) is defined as the geodesic distance difference between the set of the initial CAD model points and those of S' . A schematization of the geodesic distance is presented in Figure-A I- 4.

$$\Delta_{Stretch} = |Stretch_{S'} - Stretch_S| = \left| \frac{\sum_{i=1}^{N_e} d'_i}{Ne'} - \frac{\sum_{i=1}^{N_e} d_i}{Ne} \right| \quad (\text{A I-5})$$

Where Ne represents the number of neighborhoods around point $s_i(s'_i)$; $d_i(d'_i)$ the distance between $s_i(s'_i)$ and its first level neighborhood; and $Stretch_S$ is the criterion value of the sum of d_i relative to Ne .

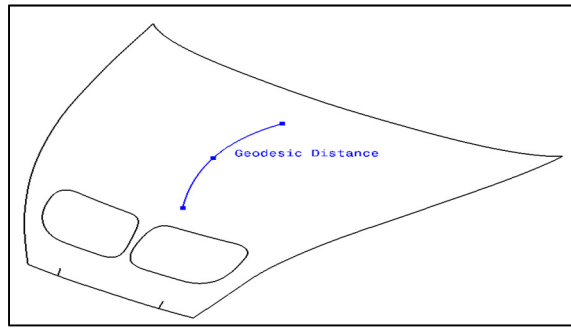


Figure-A I-5 Geodesic distance

The *Euclidean distance* criterion shown in equation (A I-6) is the distance between C and S' .

$$|D_{c,s'} - D_{reference}| \quad (\text{A I-6})$$

Where $D_{reference}$ represents the ideal value between c_i and s_i that must be equal to zero and $D_{c,s'}$ represents the Euclidean distance between s'_i and its corresponding point c_i .

For each criterion, the root mean square error is computed as shown in the following equations:

$$RMS_{stretch} = \sqrt{\frac{\sum \|\Delta_{stretch}\|^2}{n-1}} \quad (\text{A I-7})$$

$$RMS_D = \sqrt{\frac{\sum \|\Delta_D\|^2}{n-1}} \quad (\text{A I-8})$$

And the aim is to minimize the corresponding proposed objective function F presented in equations (A I-9) and (A I-10) respectively.

$$F(\beta, \lambda | C, S, S') = \alpha \times RMS_{stretch} + RMS_D \quad (\text{A I-9})$$

$$(\beta_{opt}, \lambda_{opt}) = \arg \min F(\beta, \lambda | C, S, S') \quad (\text{A I-10})$$

Where α was assigned to the root mean square of the *stretch criterion* in the formulation of the objective function in order to report the comparison with the root mean square of the *Euclidean distance* to the same scale. This parameter is determined by trial and error and is fixed to 20 after considering the magnitudes of both proposed criterion. The iteration (i) of the optimization phase of the IDB-ACPD algorithm ends when the last step is less than a termination tolerance function (ε), or when the maximum number of iterations is reached. This iteration is not necessarily the one that reaches a global optimum or at least a good solution.

The optimum parameters λ_{opt} and β_{opt} are used for outputting the corresponding final transformation parameters calculated by the CPD algorithm. The values of these optimized parameters depend on the initial value that is assigned by the user and require a certain expertise to approach the global minimum. The next section details the methodology of the proposed alternative optimization method to be incorporated in the optimization step of the IDB-ACPD algorithm.

Proposed optimization strategy

Genetic algorithm (GA) which is a stochastic optimization technique is chosen to automatically find the optimum parameters λ and β . GA is a random search method to explore large areas, while avoiding traps such as local minima in global optimization. This section describes the method used to minimize the objective function described in equation (A I-9) by using a GA optimization method. This approach maintains a population of individual solutions, and relies on the operator selection, mutation and crossover. It ensures that in step $(i + 1)$, the new parameters values will be more adapted in step (i) by the reproduction operations (mutation and crossover). This method also behaves effectively in the presence of outliers. The proposed optimization strategy has been incorporated in the optimization step of the original IDB-ACPD flowchart as shown in Figure A I-6.

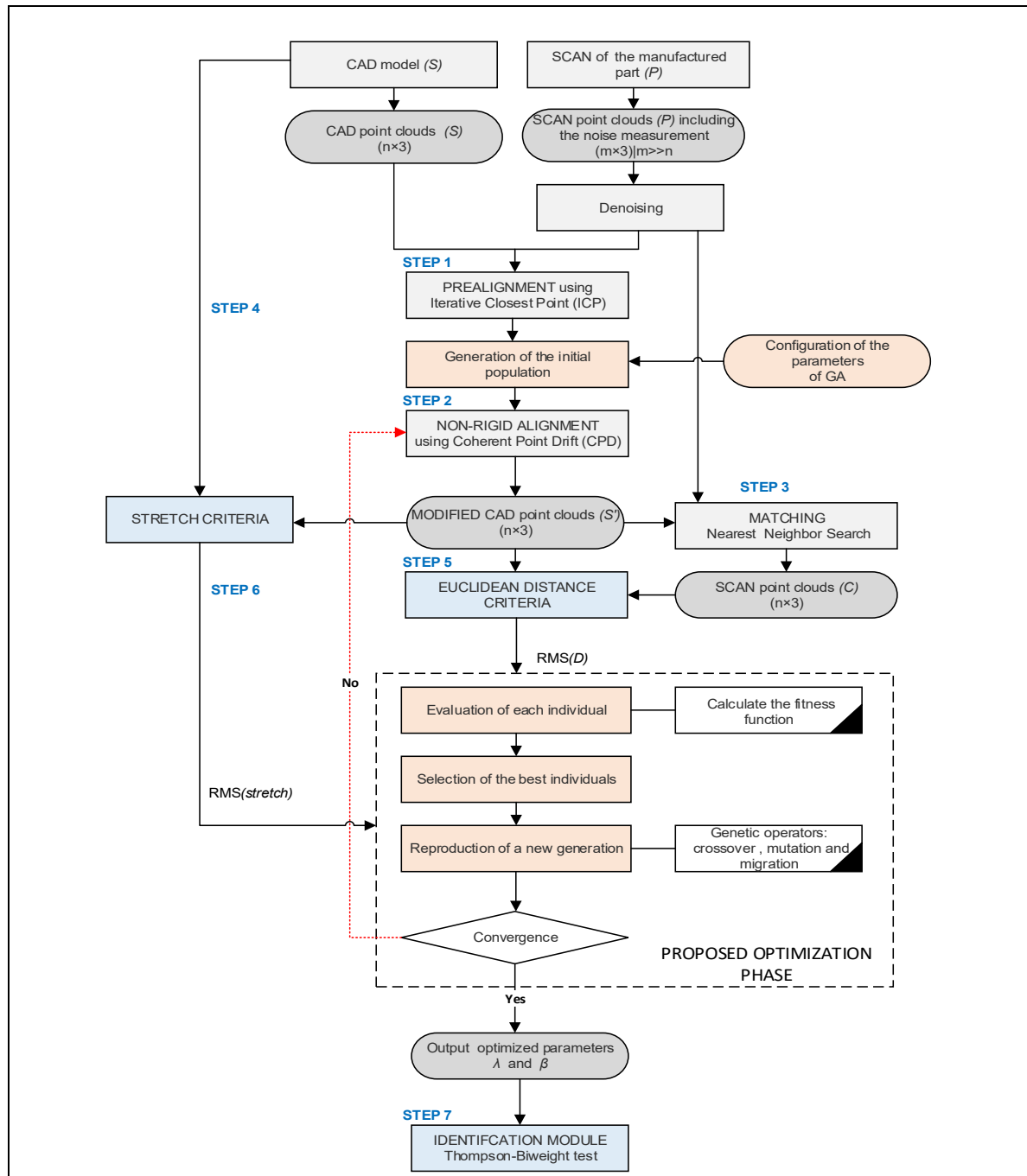


Figure-A I-6 GA incorporated in the optimization step of the original IDB-ACPD algorithm

Four stopping criteria are set to improve the performance of the GA optimization method:
 (1) **Max Generation:** With 100 generations, the algorithm is able to provide an efficient

minimum; (2) **Stall Time Limit**: The algorithm stops if there is no improvement in best value of the fitness function for a time interval of 300 seconds; (3) **Function Tolerance**: The default tolerance fixed at 10^{-6} is considered an acceptable value; (4) **Stall Generation**: The algorithm will stop if the weighted average variation *fitness* function value over 30 generations stall is less than the tolerance function. The settings for the GA' optimization procedures are shown in Table A I-2.

Table-A I-2 Optimization procedure settings.

Parameters		Numerical values
General settings	Population size N	60
	Number of individuals	2
	Crossover Fraction	0.6
	Migration rate	0.2
	Migration interval	20
Stopping criteria	Max generation	100
	Stall time limit	300
	Function tolerance	10^{-6}
	Stall generation	30

The population size affect the convergence of the algorithm; the Figure A I-7 shows that the solution converges to the best solution for population size 60, 80 and 100. However, with more large population size, the algorithm converge more slowly. For this reason the population size is fixed at 60 for reducing the computation time.

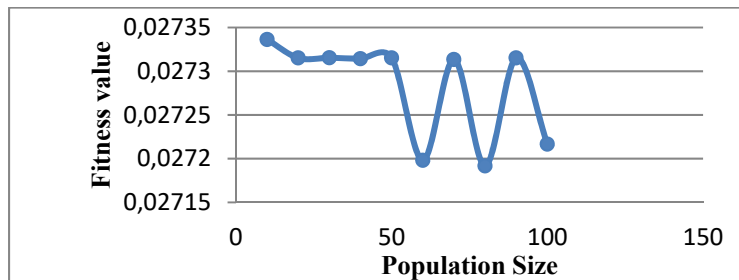


Figure-A I-7 Fitness value according to population size

To decrease the chance convergence to a local optimum solution, a good diversification of the population is guaranteed by a custom mutation. The mutation methods in the Optimization *Toolbox*TM of Matlab do not solve the proposed problem; the mutation operation must guarantee the diversity of the population while respecting bounds constraints. For parameters β and λ ; the *Gaussian* method provides good diversity of the population without satisfying the bound constraints. The second method *Adaptive Feasible*, respect linear and bounds constraints but introduces a small diversity because it remains tied to the previous generation. For this reason, a custom mutation method is developed in this work that combines the advantages of both *Gaussian* and *Adaptive Feasible* methods, that is to say good diversity of the population while respecting bounds constraints. Figure A I-8 summarizes the proposed mutation function. *Scale*, *shrink* and *InitialRange* parameters are configured in the proposed approach. The *Scale* parameter determines the standard deviation at the first generation. The *Shrink* parameter controls how the standard deviation shrinks in each generation. *InitialRange* specifies the range of the initial population by giving the lower and upper bounds (Mathworks, 2015).

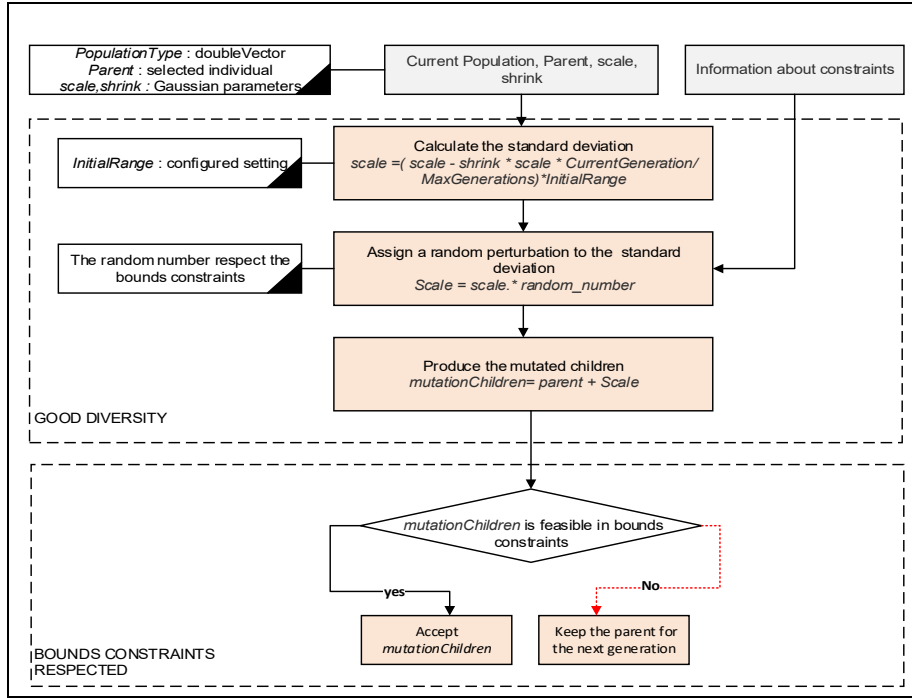


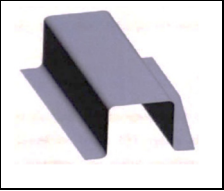
Figure-A I-8 The proposed mutation custom flowchart.

3. Experiment results

This section presents some experiments to evaluate the performance of the proposed optimization strategy. A non-rigid U-shaped extruded part inspired from the transport industry is used as case study. This part is made with aluminum gauge 14 (thickness of 1.63 mm) with a Young modulus of $7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ and a density of 2700 kg/m^3 . Details are shown in Table A I-3.

Deformations have been added to the part in order to simulate the Free State condition. Experiments were performed using **MATLAB** R2013 on a desktop with an Intel Core i3 2.4 GHz processor and a 4.0 GB physical memory.

Table -A I-3 Description of the case study.

	Overall dimensions : $300 \times 500 \times 150$ (mm) (CAD, SCAN) point cloud size : (3550, 22000) points Measurement noise : $\sigma_{noise} = 0.01$ mm
---	---

The results of four different generations (first, fifth, twentieth and last generation) are presented in Table-A I-4. For each generation. With $F_{approached}$ is the best value of current generation.

The first generation of individuals is randomly generated and without any experience of the user. Table A I-5 shows that the 2 selected individuals ($\lambda=1.8$ and $\beta=0.9$) in the first generation performs a poor registration and this is confirmed by the high error value. In the fifth and twentieth generation, the error value decreases, the registration improves and the objective function is not yet at its minimum. At the latest generation (31th), the objective function reached a good solution. The best and mean values obtained from the fitness function are shown in Figure A I-9.

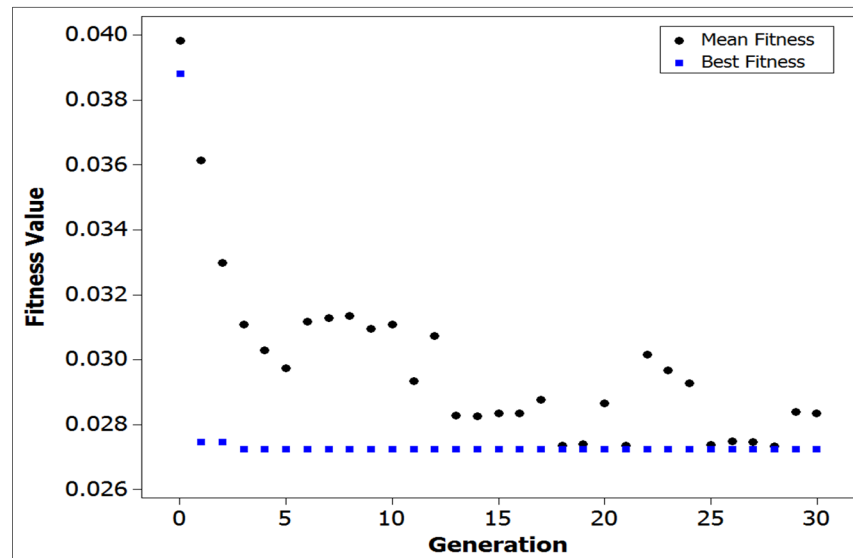
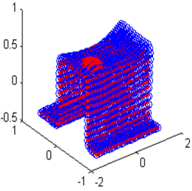
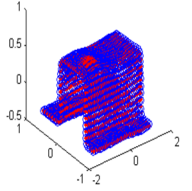
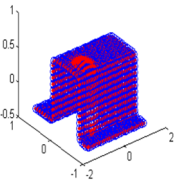
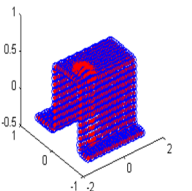


Figure-A I-9 Mean and best fitness values for each generation.

Table-A I-6 Results of the proposed optimization strategy

Results	Generation			
	1 th	5 th	20 th	31 th (Last)
Registration figure				
λ_{opt}	1.8	2.25	2.5	2
β_{opt}	0.9	1.3	0.5	0.9
$F_{approached}$	3.219×10^{-2}	2.737×10^{-2}	2.733×10^{-2}	2.719×10^{-2}

To better argue the choice of the GA, the corresponding experimental results are compared with those obtained by other well know optimization techniques such as *Fmincon* (*interior point*), *Fminimax* and *Fminsearch* (Mathworks, 2015). The results of different states of execution (V1, V2, and V3) are compared with the result obtained by the proposed approach. The parameters and the constraints of these states are presented in Table A I-5a; it is to note that *Fminsearch* is an unconstraint nonlinear minimization which gives outliers due to lack of constraints. Initial population and Max generation are specific terms employed for GA. The results of execution for the GA optimization and of execution for the other optimization methods with different state are presented in Table A I-5b.

Table-A I-7 Experimental results of the different optimization methods

Optimization Method	Case	Start point (λ_0, β_0)	Max _i (Max Generation)	Constraints for(λ, β)
GA	Proposed optimization approach – Initial population is not stated			
<i>Fmincon</i>	V1	[1 2]	100	$1 \leq \lambda \leq 100$
<i>Fminsearch</i>	V2	[8 20]		$1 \leq \beta \leq 100$

<i>Fminimax</i>	V3	[11 50]		(except for <i>Fminsearch</i>)			
(a)							
<i>Method</i>	<i>Case</i>	<i>Final Point (λ, β)</i>	<i>Final</i> _{iteration}	<i>F</i> _{approached}	<i>RMS</i> _{stretch} (Kamrani et al.)	<i>RMS</i> _D (Kamrani et al.)	<i>Execution Time</i> [sec]
GA	-	[1.97, 3.27]	31	0.0271	0.0012	0.0025	1270.95
	V1	[0.97, 1.99]	6	0.0337	0.0015	0.0036	1250.76
Fmincon	V2	[7.76, 19.90]	20	0.0278	0.0013	0.0028	1720.21
	V3	[10.90, 49.29]	46	0.0278	0.0013	0.0028	2206.72
Fminsearch	V1	[0.92, 2.34]	100	0.0331	0.0015	0.0035	3121.30
	V2	[-0.20, 7.12×10 ³]	100	0.0263	0.0012	0.0026	2441.92
	V3	[0.19, 60.8826]	100	0.0256	0.0012	0.0021	2134.92
	V1	[4.6288, 4.9297]	14	0.0277	0.0013	0.0027	2330.41
Fminimax	V2	[7.9996, 19.9972]	27	0.0278	0.0028	0.0013	1712.11
	V3	[10.9995, 49.9999]	2	0.0278	0.0013	0.0028	410.80
(b)							

According to the results of the case studies presented in Figure A I-10, Table A I-5 and Table A I-6, the choice of the GA to be integrated in the optimization phase of the IDB-ACPD algorithm could avoid being trapped in a local minimum, reduces the optimization time and eliminate the user intervention (trial and error essay).

Table-A I-8 Convergence of the different optimization methods

Optimization Method	<i>F_{approached}</i>
GA	2.719×10^{-2}
Fmincon	2.740×10^{-2}
Fminsearch	3.382×10^{-2}
Fminimax	2.737×10^{-2}

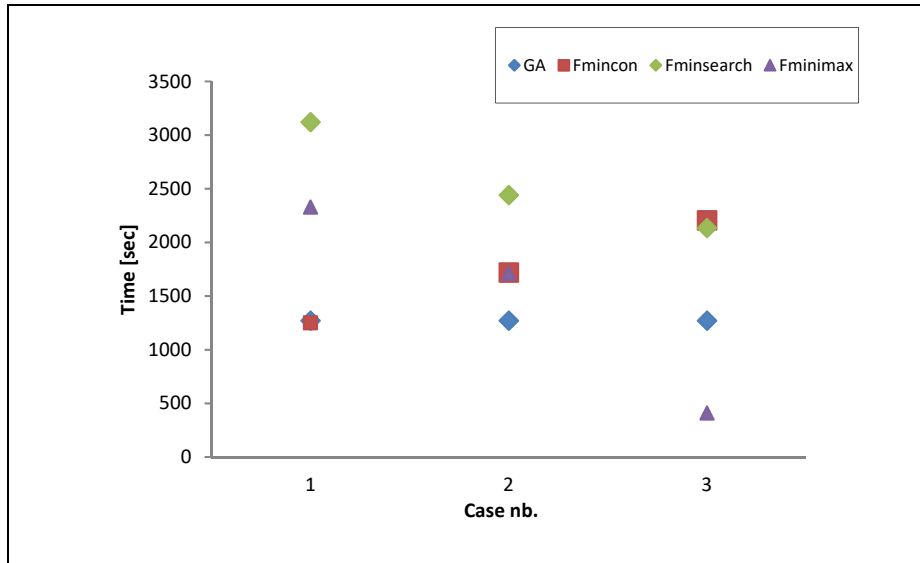


Figure-A I-10 Computation time of different optimization techniques

5. Conclusion

Handling non-rigid parts at a lower cost in order to provide a competitive advantage in the global economy is still a challenging task. The IDB-ACPD approach developed by (Aidibe et Tahan, 2015) has been selected as it presents a promising method for the fixtureless inspection of non-rigid parts. In this paper an approach for selecting the suitable optimization method to find the optimal smoothness regularization parameters of the IDB-ACPD method was proposed. The performance of the proposed methodology has been demonstrated on a simulated case study inspired from the transport industry. The results show that the GA optimization method automate the selection of both parameters λ and β with a computation time lower than the other optimization methods converging towards a best solution. Future projects are underway to perform the proposed optimization strategy on other real case studies.

Acknowledgments

The authors would like to thank the Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Sousse (Tunisia), and École de Technologie Supérieure (ÉTS, Montréal, Canada) for their support.

BIBLIOGRAPHIE

- Abenhaim, Gad N, Antoine S Tahan, Alain Desrochers et Roland Maranzana. 2011. « A novel approach for the inspection of flexible parts without the use of special fixtures ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 133, n° 1.
- Abenhaim, Gad Noriel. 2009. « Nouvelle méthode d'inspection des pièces flexibles sans gabarit de conformité ». École de technologie supérieure.
- Abenhaim, Gad Noriel, Alain Desrochers et Antoine Tahan. 2012. « Nonrigid parts' specification and inspection methods: notions, challenges, and recent advancements ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 63, n° 5-8, p. 741-752.
- Ahmadian, Ghazaleh, C Sean Bohun et Mehran Ebrahimi. 2016. « Evaluation of a Coherent Point Drift Algorithm for Breast Image Registration via Surface Markers ». *Journal of Computational Vision and Imaging Systems*, vol. 2, n° 1.
- Aidibe, Ali, et Antoine Tahan. 2014. « The inspection of deformable bodies using curvature estimation and Thompson-Biweight test ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, n° 9-12, p. 1733-1747.
- Aidibe, Ali, et Antoine Tahan. 2015. « Adapting the coherent point drift algorithm to the fixtureless dimensional inspection of compliant parts ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, n° 5-8, p. 831-841.
- Aidibe, Ali, Antoine S Tahan et Gad N Abenhaim. 2012. « Distinguishing profile deviations from a part's deformation using the maximum normed residual test ». *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, vol. 7, n° 1, p. 18-28.
- Ascione, Rocco, et Wilma Polini. 2010. « Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, n° 9-12, p. 1055-1067.
- Aspert, Nicolas, Diego Santa-Cruz et Touradj Ebrahimi. 2002. « Mesh: Measuring errors between surfaces using the hausdorff distance ». In *Proceedings. IEEE international conference on multimedia and expo*. Vol. 1, p. 705-708. IEEE.

- Babanezhad, Kaveh, Ali Aidibe, Gilles Foucault, Antoine Tahan et Jean Bignon. 2020. « Improved Bi-Criterion flexible registration for fixtureless inspection of compliant parts ». *Precision Engineering*.
- Babanezhad, Kaveh, Gilles Foucault, Antoine Tahan et Jean Bignon. 2016. « A bi-criterion flexible registration method for fixtureless inspection of compliant parts ».
- Barber, C Bradford, David P Dobkin et Hannu Huhdanpaa. 1996. « The quickhull algorithm for convex hulls ». *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 22, n° 4, p. 469-483.
- Besl, Paul J, et Neil D McKay. 1992. « Method for registration of 3-D shapes ». In *Sensor fusion IV: control paradigms and data structures*. Vol. 1611, p. 586-606. International Society for Optics and Photonics.
- Bezdek, James C, Robert Ehrlich et William Full. 1984. « FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm ». *Computers & Geosciences*, vol. 10, n° 2-3, p. 191-203.
- Borouchaki, H, PL George et SH Lo. 1996. « Optimal Delaunay point insertion ». *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 39, n° 20, p. 3407-3437.
- Bourdet, Pierre, et André Clément. 1976. « Controlling a complex surface with a 3 axis measuring machine ». *Annals of the CIRP*, vol. 25, n° 1, p. 359-361.
- Cai, Q, W Volk, A Düster et E Rank. 2011. « A new strategy for stiffness evaluation of sheet metal parts ». In *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1383, p. 525-532. American Institute of Physics.
- Claus, Felix, Hans Hagen et Bernd Hamann. 2021. « Calculating the gravity-free shape of sheet metal parts ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, n° 11, p. 3401-3417.
- Combès, Benoit, et Sylvain Prima. 2012. « A new efficient EM-ICP algorithm for non-linear registration of 3D point sets ».
- Dempster, Arthur P, Nan M Laird et Donald B Rubin. 1977. « Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm ». *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 39, n° 1, p. 1-22.
- Grubbs, Frank E. 1969. « Procedures for detecting outlying observations in samples ». *Technometrics*, vol. 11, n° 1, p. 1-21.

- Hajibrahim, M., I. Jbira, A. Tahan, B. Louhichi et A. Aidibe. 2016. « Genetic Algorithm For The Inspection Of Deformable Bodies By Adapting The Coherent Point Drift Algorithm ». *International Conference on Modeling, Optimization and SIMulation (MOSIM)*, p. 15.
- Huttenlocher, Daniel P, Gregory A. Klanderman et William J Rucklidge. 1993. « Comparing images using the Hausdorff distance ». *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 15, n° 9, p. 850-863.
- Ibrahim, Marwa Haj, Ali Aidibe, Mohamed Ali Mahjoub, Antoine Tahan et Borhen Louhichi. 2019. « A novel approach to the inspection of deformable bodies by adapting the coherent point drift algorithm and using a clustering methodology ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, n° 1-4, p. 409-422.
- Jaramillo, Andrés E, Pierre Boulanger et Flavio Prieto. 2009. « On-line 3-D inspection of deformable parts using FEM trained radial basis functions ». In *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops*. p. 1733-1739. IEEE.
- Jaramillo, Andrés, Flavio Prieto et Pierre Boulanger. 2013a. « Fast dimensional inspection of deformable parts from partial views ». *Computers in Industry*, vol. 64, n° 9, p. 1076-1081.
- Jaramillo, Andrés, Flavio Prieto et Pierre Boulanger. 2013b. « Fixtureless inspection of deformable parts using partial captures ». *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, n° 1, p. 77-83.
- Kamrani, Ali, Emad Abouel Nasr, Abdulrahman Al-Ahmari, Osama Abdulhameed et Syed Hammad Mian. 2015. « Feature-based design approach for integrated CAD and computer-aided inspection planning ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, n° 9-12, p. 2159-2183.
- Karganroudi, Sasan Sattarpanah, Jean-Christophe Cuillière, Vincent Francois et Souheil-Antoine Tahan. 2016. « Automatic fixtureless inspection of non-rigid parts based on filtering registration points ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, n° 1-4, p. 687-712.
- Karganroudi, Sasan Sattarpanah, Jean-Christophe Cuillière, Vincent François et Souheil-Antoine Tahan. 2017. « Assessment of the Robustness of a Fixtureless Inspection Method for Nonrigid Parts Based on a Verification and Validation Approach ». *Journal of Verification, Validation and Uncertainty Quantification*, vol. 2, n° 4.

- Karganroudi, Sasan Sattarpanah, Jean-Christophe Cuillière, Vincent François et Souheil-Antoine Tahan. 2018. « “What-if” scenarios towards virtual assembly-state mounting for non-rigid parts inspection using permissible loads ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, n° 1-4, p. 353-373.
- Lartigue, Claire, François Thiebaut, Pierre Bourdet et Nabil Anwer. 2006. « Dimensional metrology of flexible parts: identification of geometrical deviations from optical measurements ». In *Advanced mathematical and computational tools in metrology VII*. p. 196-203. World Scientific.
- Li, Hao, Robert W Sumner et Mark Pauly. 2008. « Global correspondence optimization for non-rigid registration of depth scans ». In *Computer graphics forum*. Vol. 27, p. 1421-1430. Wiley Online Library.
- Li, Yadong, et Peihua Gu. 2004. « Free-form surface inspection techniques state of the art review ». *Computer-Aided Design*, vol. 36, n° 13, p. 1395-1417.
- Liao, Hongen, PJ Eddie Edwards, Xiaochuan Pan, Yong Fan et Guang-Zhong Yang. 2010. *Medical Imaging and Augmented Reality: 5th International Workshop, MIAR 2010, Beijing, China, September 19-20, 2010, Proceedings*, 6326. Springer.
- Lindau, Björn, Kristina Wärmefjord, Lars Lindkvist et Rikard Söderberg. 2020. « Virtual Fixturing: Inspection of a Non-Rigid Detail Resting on 3-Points to Estimate Free State and Over-Constrained Shapes ». In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Vol. 84492, p. V02BT02A065. American Society of Mechanical Engineers.
- Mathworks. 2015. « Matlab Global Optimization Toolbox. ».
- Myronenko, Andriy, et Xubo Song. 2010. « Point set registration: Coherent point drift ». *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 32, n° 12, p. 2262-2275.
- Peng, Jingliang, Qing Li, C-C Jay Kuo et Manli Zhou. 2003. « Estimating Gaussian curvatures from 3D meshes ». In *Human Vision and Electronic Imaging VIII*. Vol. 5007, p. 270-280. International Society for Optics and Photonics.
- Radvar-Esfahlan, Hassan, et Souheil-Antoine Tahan. 2012. « Nonrigid geometric metrology using generalized numerical inspection fixtures ». *Precision Engineering*, vol. 36, n° 1, p. 1-9.

- Radvar-Esfahlan, Hassan, et Souheil-Antoine Tahan. 2014. « Robust generalized numerical inspection fixture for the metrology of compliant mechanical parts ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, n° 5-8, p. 1101-1112.
- Sabri, V, S Sattarpanah, SA Tahan, JC Cuillière, V François et XT Pham. 2017. « A robust and automated FE-based method for fixtureless dimensional metrology of non-rigid parts using an improved numerical inspection fixture ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, n° 5-8, p. 2411-2423.
- Sabri, Vahid, SA Tahan, XT Pham, D Moreau et S Galibois. 2016. « Fixtureless profile inspection of non-rigid parts using the numerical inspection fixture with improved definition of displacement boundary conditions ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, n° 5-8, p. 1343-1352.
- Sadeghi Tabar, Roham, Samuel Lorin, Christoffer Cromvik, Lars Lindkvist, Kristina Wärmefjord et Rikard Söderberg. 2021. « EFFICIENT SPOT WELDING SEQUENCE SIMULATION IN COMPLIANT VARIATION SIMULATION ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, p. 1-13.
- Saval-Calvo, Marcelo, Jorge Azorin-Lopez, Andres Fuster-Guillo, Victor Villena-Martinez et Robert B Fisher. 2018. « 3D non-rigid registration using color: Color Coherent Point Drift ». *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 169, p. 119-135.
- Thiébaud, François, Cyril Lacroix, Loïc Andolfatto et Claire Lartigue. 2017. « Evaluation of the shape deviation of non rigid parts from optical measurements ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, n° 5-8, p. 1937-1944.
- Thompson, Robin. 1985. « A note on restricted maximum likelihood estimation with an alternative outlier model ». *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 47, n° 1, p. 53-55.
- Viana, Ilisio, Rémi Parlouar, Florian Bugarin, Jean-José Orteu et Ludovic Brèthes. 2013. « Inspection automatisée d'assemblages mécaniques: vers une approche couplée vision 2D/vision 3D ».
- Wang, Peng, Ping Wang, ZhiGuo Qu, YingHui Gao et ZhenKang Shen. 2011. « A refined coherent point drift (CPD) algorithm for point set registration ». *Science China Information Sciences*, vol. 54, n° 12, p. 2639-2646.
- Weckenmann, A, J Weickmann et N Petrovic. 2007. « Shortening of inspection processes by virtual reverse deformation ». In *4th international conference and exhibition on design and production of machines and dies/molds, Cesme, Turkey*.

- Weckenmann, Albert, et Johannes Weickmann. 2006. « Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation ». *Metrology and Measurement Systems*, vol. 13, n° 4, p. 321-334.
- Yuille, Alan L, et Norberto M Grzywacz. 1988. « The motion coherence theory ». In *ICCV*.
- Yuille, Alan L, et Norberto M Grzywacz. 1989. « A mathematical analysis of the motion coherence theory ». *International Journal of Computer Vision*, vol. 3, n° 2, p. 155-175.