



Alignment de nuages de points pour la comparaison des infrastructures en génie civil et pour le contrôle de la qualité en métrologie

Mémoire

Hadi Khaksari Haddad

Maîtrise en génie électrique et génie informatique
Maître ès sciences (M.Sc.)

Québec, Canada

Résumé

Pour la mise en registre de nuages de points 3D, il a été démontré que Go-ICP [Yan+16] obtenait la solution globale optimale pour une paire composée d'un nuage de points modèle et d'un nuage de points de données. Go-ICP a principalement été étudié uniquement sur des ensembles standards de nuages de points. Nous démontrons l'efficacité remarquable de Go-ICP pour l'alignement de nuages de points très complexes à grande échelle sur leurs modèles de CAO déformés correspondants. En particulier, si on considère deux ensembles distincts de nuages de points pris à l'extérieur et à l'intérieur d'un bâtiment, les expériences démontrent que Go-ICP est capable d'aligner avec succès ces deux ensembles sur le nuage de points du modèle de CAO de l'ensemble du bâtiment (informations extérieures et intérieures incluses). Avec l'expérimentation présentée dans cet article, nous démontrons que Go-ICP peut obtenir d'excellents résultats en matière d'alignement et que cette approche peut être déployée dans des applications visant à comparer les modèles CAO d'un bâtiment (modèle "tel que conçu") au nuage de points de la configuration réelle du bâtiment (modèle "tel que construit"). Les expériences démontrent également l'efficacité de Go-ICP pour aligner une copie déformée d'un objet fabriqué par l'homme sur l'objet d'origine dans les applications de contrôle de la qualité.

Cet travail a été présenté lors de la conférence internationale en Europe centrale sur l'infographie, la visualisation et la vision par ordinateur 2019 en version orale et a été publié dans le journal du WSCG 2019.

Table des matières

Résumé	iii
Table des matières	v
Liste des figures	vii
Remerciements	xi
Introduction	1
1 Travaux Connexes	11
2 Approche proposée pour l'alignement de nuages de points avec les modèles CAO et l'exploration de l'effet des hyper-paramètres de Go-ICP sur l'alignement	19
2.1 La solution au problème de l'alignement d'un grand nuage de points avec un modèle CAO	19
2.2 La mise en registre 3D d'objets déformés avec Go-ICP	21
2.3 Analyse des hyperparamètres de Go-ICP sur la mise en registre d'un nuage de points avec une copie déformée de lui-même	24
2.4 Alignement de nuages de points de grandes tailles avec Go-ICP	31
3 Expériences sur l'alignement du nuage de points d'objets déformés avec son modèle CAO d'origine	37
3.1 Modèle CAO	37
3.2 Alignement de nuages de points à grande échelle	40
Conclusion et travaux futurs	45
Bibliographie	47

Liste des figures

0.1	Alignement 3D d'un modèle CAO et d'un nuage de points de très grande taille. (a) est la mise en registre 3D du modèle CAO et du nuage de points du bâtiment et de son environnement et (b) est la mise en registre 3D du modèle CAO et du nuage de points du bâtiment. Les points jaunes correspondent au modèle CAO et les points rouges appartiennent au bâtiment et à ses abords.	4
0.2	L'objet et l'échantillon d'objets déformés. (a) est l'objet d'origine (modèle CAO) et (b) est un objet déformé obtenu en ajoutant un cylindre convexe dans l'hémisphère concave et en ajoutant un bloc à l'extérieur du grand cylindre convexe.	6
0.3	Un échantillon de l'alignement 3D des pièces mécaniques pour la détection de la déformation.	8
1.1	Les méthodes qui sont passées en revue dans l'étude de la littérature.	12
1.2	Les résultats de la mise en registre pour l'approche dans [PCS14] (Glob-GM). (a) montre les nuages de points pour l'évaluation de la rotation et (b) est la mise en registre des nuages de points. Les images sont tirées de [PCS14].	15
1.3	Les résultats de la mise en registre par l'algorithme super 4PCS. (a) est le résultat de Bubba et Buddha pour lesquels les modèles et leurs données correspondantes se chevauchent peu et (b) montrent un alignement global. Les images sont tirées de [MAM14].	16
1.4	Une image avec des ensembles de points 2D. (a) Une forme cachée. (b) Deux surfaces se chevauchant partiellement et un ensemble de correspondances point à point. Les correspondances bleues sont réelles, les correspondances rouges sont erronées. Les images sont tirées de [ZPK16].	17
2.1	(a) : La collaboration de BnB et ICP. (b) : L'espace de recherche comprend l'espace de rotation et l'espace de translation. Les cubes gris sont les sous-cubes de ces espaces (1) espace de rotation, qui peut être représenté par une sphère de rayon π . (2) l'espace de translation qui peut être représenté par un cube de longueur 2ξ . Repris de [Yan+16].	20
2.2	Les données et les objets. (a) est l'objet d'origine (impression 3D), (b) est le modèle CAO de l'objet d'origine (nuage de points de données), (c) est l'objet déformé 1 obtenu en ajoutant un cylindre convexe dans l'hémisphère concave, (d) est l'objet déformé 2 obtenu en ajoutant un bloc à l'extérieur du grand cylindre convexe et (e) est l'objet déformé 3 obtenu en ajoutant un bloc à l'intérieur du grand cylindre convexe.	22

2.3	Les résultats de Go-ICP pour la mise en registre 3D d'objets déformés. Les nuages de points bleus sont les données et les nuages de points rouges sont les modèles (objets déformés). (a) est la mise en registre 3D de l'objet déformé 1 (vue : axe de XYZ), (b) est la mise en registre 3D de l'objet déformé 1 (vue : axe de XZ), (c) est la mise en registre 3D de l'objet déformé 3 (vue : axe de XYZ), et (d) est la mise en registre 3D de l'objet déformé 3 (vue : axe de XZ). À gauche : pose initiale, au centre : la mise en registre avec Go-ICP, à droite : la mise en registre avec ICP uniquement.	23
2.4	L'effet de la découpe sur la mise en registre 3D des objets déformés 1 et 2. Les nuages de points bleus sont les données et les nuages de points rouges sont les modèles (objets déformés). (a) est le résultat de $\rho = 10\%, \varepsilon = 10$ sur l'objet déformé 1, (b) est le résultat de $\rho = 20\%, \varepsilon = 10$ sur l'objet déformé 1, (c) est le résultat de $\rho = 10\%, \varepsilon = 10$ sur l'objet déformé 2, et (d) est le résultat de $\rho = 20\%, \varepsilon = 10$ sur l'objet déformé 2. Gauche : pose initiale, centre : la mise en registre avec Go-ICP, droit : la mise en registre avec ICP seul.	25
2.5	La courbe de l'impact du facteur d'ajustement ρ sur l'erreur de mise en registre et le temps d'exécution. Les courbes bleues dans (a, b, c et d) sont les erreurs RMS des poses initiales, les courbes rouges sont les erreurs RMS de ICP et les courbes vertes sont les erreurs RMS de Go-ICP. (a) et (c) sont la courbe de l'effet du rognage sur l'erreur de mise en registre 3D de l'objet déformé 1, (b) et (d) sont le résultat pour l'objet déformé 2, (e) est la courbe de l'effet de rognage sur le temps d'exécution (secondes) de l'enregistrement 3D de l'objet déformé 1, et (f) est le temps d'exécution (secondes) pour l'objet déformé 2.	26
2.6	Modèles CAO avec 85% de rognage. (a) est le modèle CAO d'origine, (b) est le modèle CAO d'origine avec $\rho = 85\%$, (c) est le modèle CAO déformé et (d) est le modèle CAO déformé avec $\rho = 85\%$	27
2.7	Résultat de la mise en registre en 3D du modèle CAO d'origine et du modèle CAO déformé de lui-même avec $\rho = 85\%$. La figure de gauche montre leur pose initiale respective, la figure centrale montre le résultat de Go-ICP et la figure de droite montre le résultat de ICP. La conclusion est que pour un facteur de rognage important, toute mise en registre peut générer une erreur RMS faible. .	28
2.8	L'effet du seuil ε sur la mise en registre 3D pour les objets déformés 1 et 2. Les nuages de points bleus sont les données et les nuages de points rouges sont les modèles (objets déformés). (a) est le résultat de $\varepsilon = 5, \rho = 10\%$ sur l'objet déformé 1, (b) est le résultat de $\varepsilon = 15, \rho = 10\%$ sur l'objet déformé 1, (c) est le résultat de $\varepsilon = 5, \rho = 10\%$ sur l'objet déformé 2 et (d) est le résultat de $\varepsilon = 15, \rho = 10\%$ sur l'objet déformé 2. Gauche : pose initiale, centre : la mise en registre avec Go-ICP, droite : la mise en registre avec ICP seul.	29
2.9	La courbe de l'effet du seuil ε sur l'erreur de mise en registre et le temps d'exécution en secondes. Les courbes bleues dans (a, b, c et d) sont les erreurs RMS des poses initiales, les courbes rouges sont les erreurs RMS de ICP et les courbes vertes sont les erreurs RMS de Go-ICP. Effet de ε sur la mise en registre de l'objet déformé 1 ((a) et (c)) et de l'objet déformé 2 ((b) et (d)). Effet de ε sur le temps d'exécution pour l'objet déformé 1 (e) et l'objet déformé 2 (f).	30
2.10	Effet du facteur de sous-échantillonnage Nd sur le temps d'exécution de Go-ICP. (a) : objet déformé 1. (b) : objet déformé 2. (c) : objet déformé 3.	31

2.11	Les nuages de points d'un bâtiment et ses nuages de points à grande échelle. (a, b) sont le modèle CAO du bâtiment (modèle CAO d'origine) et son nuage de points, (c, d) un ré-échantillonnage des points de données du modèle CAO d'origine avec une répartition spatiale plus uniforme des points, (e , f) est le nuage de points de l'intérieur du bâtiment et son nuage de points rogné, (g, h) est le nuage de points de l'extérieur du bâtiment et son nuage de points recadré. Ces données sont fournies par Bentley Systems (https://www.bentley.com/en).	33
2.12	Résultat de l'alignement du modèle CAO ré-échantillonné et du nuage de points de l'intérieur du bâtiment : vue XYZ (a), vue XY (b). Les points rouges sont le modèle CAO du bâtiment et les points jaunes le nuage de points de l'intérieur du bâtiment. Les paramètres de la mise en registre servent à aligner le modèle CAO d'origine sur le nuage de points : vue XYZ (c), vue XY (d).	34
2.13	Résultat de l'alignement du modèle CAO ré-échantillonné et du nuage de points de l'extérieur du bâtiment : vue XYZ (a), vue XY (b). Les points rouges représentent le modèle CAO du bâtiment et les points jaunes le nuage de points situé à l'extérieur du bâtiment. Les paramètres de la mise en registre servent à aligner le modèle CAO d'origine sur le nuage de points : vue XYZ (c), vue XY (d).	35
3.1	Résultat de la mise en registre 3D du modèle CAO 2 déformé et du modèle CAO 3 déformé. (a) Axe XYZ, (b) Axe XZ.	38
3.2	Les résultats de la mise en registre 3D des modèles CAO. (a) est le modèle de CAO 1, (b) est la pose initiale et les nuages de points du modèle de CAO 1 et sa copie déformée, (c) est le résultat de l'alignement du modèle de CAO 1 et de sa copie déformée pour ICP uniquement, (d) est le résultat de l'alignement du modèle CAO 1 et de sa copie déformée, (e) du modèle CAO 2, (f) de la pose initiale et des nuages de points du modèle CAO 1 et du modèle CAO 2, (g) est le résultat de l'alignement du modèle CAO 1 et du modèle CAO 2.	39
3.3	Les résultats de la mise en registre 3D des pièces mécaniques. (a) le nuage de points de la pièce mécanique 1, (b) le nuage de points de la pièce mécanique 2, (c) est le résultat de l'alignement de la pièce mécanique 1 et de la pièce mécanique 2.	40
3.4	Les résultats de la mise en registre 3D des coupe-pommes. (a) le nuage de points du premier coupe-pomme, (b) le nuage de points du deuxième coupe-pommes et (c) est le résultat de l'alignement du coupe-pommes 1 et du coupe-pommes 2.	41
3.5	Le modèle CAO du bâtiment (a), la zone réelle du bâtiment (b), le nuage de points à grande échelle de la zone (c).	42
3.6	Les résultats de l'alignement entre le modèle CAO et un nuage de points à très grande échelle. Points rouges : modèle CAO; points jaunes : bâtiment et sa superficie. (a, b) sont l'alignement 3D du modèle CAO environnant et du nuage de points d'origine du bâtiment. (c) est le résultat de la mise en registre du modèle CAO et du nuage de points du bâtiment et de ses environs sans recadrage.	43

Remerciements

Je voudrais d'abord remercier mon directeur de mémoire *Prof. Denis Laurendeau* du Département de génie électrique et de génie informatique de l'Université Laval. La porte du bureau du professeur Laurendeau était toujours ouverte chaque fois que je rencontrais un problème ou que j'avais une question sur mes recherches ou mon écriture. Il a toujours permis que cette mémoire soit mon propre travail mais m'a guidé dans la bonne direction chaque fois qu'il pensait que j'en avais besoin.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et à mon épouse *Mahdieh Abbasi* pour m'avoir apporté un soutien indéfectible et des encouragements continus tout au long de mes années d'études et du processus de recherche de cette mémoire. Cet accomplissement n'aurait pas été possible sans eux. Merci.

Je dois remercier les membres de LVSN en particulier *Dr. Annette Schwerdtfeger* pour la relecture du manuscrit de ma mémoire.

Enfin, je remercie profondément mes parents pour leur amour, leurs encouragements, leur aide et leur soutien.

Auteur

Hadi Khaksari Haddad

Automne 2019

Introduction

Les capteurs 3D, les lidars et la structure à partir du mouvement peuvent être utilisés pour acquérir des nuages de points à partir de composants d'infrastructure à grande échelle que des bâtiments. L'algorithme ICP (Iterative Closest Point) [BM92] est un algorithme bien connu pour la mise en registre de nuages de points sous transformation euclidienne. ICP est également connu comme ayant des difficultés avec les minima locaux et nécessite également que la pose relative initiale entre les nuages de points soit semblable à la transformation rigide nécessaire pour les aligner afin que l'algorithme converge.

Le travail présenté dans cette mémoire, explore une solution globalement optimale au problème de mise en registre euclidienne défini par ICP en 3D. La méthode Go-ICP, qui exploite la théorie bien établie de Branch-And-Bound (BnB) pour l'optimisation globale [Yan+16], est adaptée au problème de l'alignement d'un nuage de points acquis sur une très grande structure avec une copie déformée du nuage de points de la même structure. Un autre sujet étudié dans la mémoire est l'adaptation de Go-ICP à l'alignement d'un grand nuage de points d'une structure (telle qu'un bâtiment) avec un modèle CAO de cette structure. Une troisième application à laquelle Go-ICP est étendu consiste à aligner le nuage de points d'objets créés par l'homme avec des copies déformées d'eux-mêmes dans le contexte du contrôle de la qualité en métrologie. La mémoire présente également une analyse approfondie des hyperparamètres Go-ICP sur la qualité de la mise en registre.

Les expériences présentées dans la mémoire démontrent que Go-ICP réussit à aligner un nuage de points d'une structure, telle qu'un bâtiment, avec une copie déformée de lui-même ou avec un modèle CAO de la structure. Cette fonctionnalité peut être utilisée par exemple dans les applications de réalité augmentée en génie civil.

I.1 Comparaison de modèles déformables

La comparaison est exécutée sur un grand ensemble de données contenant différents modèles, qu'ils appartiennent ou non au même type d'objet et ayant généralement des formes et des

poses similaires ou différentes. Les caractéristiques et la nature des objets sont des facteurs importants à prendre en compte avant d'effectuer le processus de comparaison.

La déformation ou le changement de forme a différents aspects en fonction du type d'objet. Il peut s'agir d'un changement d'état d'un modèle articulé ou pliable, ou bien d'un changement (perte ou gain) dans la répartition de la masse entraînant une modification du volume et donc de la forme de l'objet ; des situations encore plus complexes se produisent lorsque les deux cas sont combinés.

Le processus de comparaison repose généralement sur l'extraction de caractéristiques ou de descripteurs à partir d'un modèle et déformé de lui-même. En général, les entités extraites peuvent être basées sur la topologie ou la géométrie des modèles ou les deux. La comparaison basée sur la topologie fournit des informations sur la structure squelettique du modèle. Les caractéristiques topologiques peuvent être utilisées lors de la récupération d'objets présentant les mêmes modèles, mais dans des positions différentes. Les méthodes basées sur la géométrie reposent généralement sur des descripteurs et des caractéristiques permettant une grande discrimination entre les formes. La comparaison peut également être effectuée à l'aide de techniques d'alignement permettant de détecter les déformations de modèles 3D.

La plupart des méthodes de comparaison tentent de répondre à plusieurs critères tels que la variance à : (1) des transformations de similarité des balayages (2) des représentations de forme, (3) du bruit géométrique et topologique et (4) de l'articulation ou la déformation globale. Ces méthodes peuvent également utiliser des caractéristiques de forme invariantes aux transformations géométriques, une normalisation de la pose ou une combinaison des deux pour atteindre leurs objectifs.

Une comparaison des modèles déformables est pertinente dans l'industrie, par exemple dans le cas des pièces mécaniques et les objets fabriqués, pour détecter d'éventuels artefacts et défauts après la fabrication, ainsi qu'à des fins de contrôle qualité. Nous avons expérimenté différents cas de déformations d'objets fabriqués par l'homme et de pièces mécaniques afin de détecter ces déformations.

Comparer la structure "telle que conçue" (c'est-à-dire le CAO) à la structure "telle que construite" (c'est-à-dire le bâtiment lui-même) est un problème important en génie civil, car il arrive souvent que, pour diverses raisons, ce qui a été construit ne soit pas ce qui a été conçu à l'origine et il est souhaitable de trouver où se situe la différence. L'exploration de cette application conduit à une étude complémentaire qui consiste à aligner un nuage de points sur une copie déformée d'elle-même aux fins du contrôle qualité et de métrologie.

I.2 Vision 3D basée sur des méthodes de comparaison globale et de nuage de points de grandes tailles d'infrastructures

La mise en registre de nuages de points est un problème fondamental en vision par ordinateur. Si on considère deux nuages de points dans des systèmes de coordonnées différents avec des poses différentes, l'objectif de la mise en registre est de trouver la transformation qui aligne le mieux le premier nuage de points sur l'autre. La mise en registre de nuages de points joue un rôle important dans de nombreuses applications de vision. Une application abordée dans la mémoire est l'alignement d'un grand nuage de points, obtenu en numérisant une structure, telle qu'un bâtiment, avec un modèle CAO de cette structure à des fins de réalité augmentée.

L'algorithme ICP (Iterative Closest Point) [BM92] est un algorithme bien connu pour la mise en registre des nuages de points sous transformation euclidienne. ICP est également connu comme ayant des difficultés avec les minima locaux et nécessite également que la pose relative initiale entre les nuages de points soit semblable à celle de la transformation rigide nécessaire pour les aligner afin que l'algorithme converge.

L'objectif est de trouver une transformation rigide qui positionne ou met en registre de manière optimale les données par rapport au modèle. Ce processus fait partie de la plupart des pipelines d'acquisition de formes 3D, où les autos-occlusions et les limitations du capteur nécessitent généralement l'acquisition de multiples balayages partiels qui se chevauchent. Afin de construire un modèle complet, les balayages partiels doivent être intégrés dans un système de coordonnées commun, généralement effectué par mise en registre par paires. Ce problème est particulièrement difficile lorsqu'aucune information n'est disponible sur la position initiale du modèle et des formes de données, les entrées contiennent du bruit et que les formes ne se chevauchent que sur des parties de leurs étendues (et que ces chevauchements peuvent ne pas être connus à l'avance).

La stratégie BnB est un algorithme déterministe pour l'optimisation globale des problèmes non-convexes, y compris les problèmes combinatoires, qui devrait garantir de manière fiable d'une solution globalement optimale. C'est une approche de type "diviser pour régner" pour trouver une solution globale et l'idée principale de cette approche est de diviser le problème initial en sous-problèmes plus petits en divisant les espaces de paramètres, puis en les optimisant individuellement pour chaque sous-problème, qui est plus facile à résoudre que le problème initial. De plus, l'algorithme BnB nécessite une fonction de limite supérieure et une fonction de limite inférieure pour le problème donné.

Les méthodes globales basées sur BnB garantissent une optimalité globale, mais les méthodes existantes comportent des temps d'exécution excessifs, ce qui compromet grandement leur réalisabilité. La faible efficacité temporelle de ces méthodes se produit principalement pour les deux raisons suivantes. Premièrement, la complexité temporelle des méthodes BnB est exponentielle dans la dimensionnalité de l'espace des paramètres et l'espace paramétrique. Les six degrés de liberté (Six Degrees Of Freedom, 6-DOF) de SE(3) en mise en registre de nuages de points 3D est trop élevé pour BnB. Go-ICP propose une structure de BnB appelée BnB

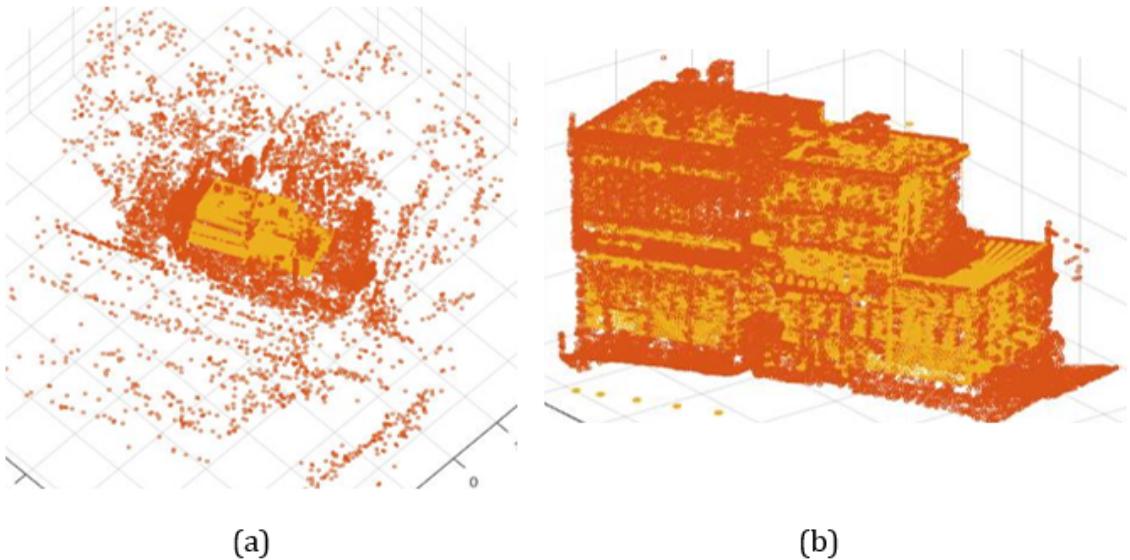


FIGURE 0.1 – Alignement 3D d'un modèle CAO et d'un nuage de points de très grande taille. (a) est la mise en registre 3D du modèle CAO et du nuage de points du bâtiment et de son environnement et (b) est la mise en registre 3D du modèle CAO et du nuage de points du bâtiment. Les points jaunes correspondent au modèle CAO et les points rouges appartiennent au bâtiment et à ses abords.

imbriquée, dans laquelle un BnB extérieur et un BnB intérieur sont utilisés pour rechercher la translation et la rotation, respectivement. Deuxièmement, la faible efficacité des limites utilisées dans les méthodes de mise en registre globales actuelles basées sur le BnB est un autre problème de l'algorithme global. L'efficacité des limites présente deux aspects ; sa rigidité, qui détermine le nombre d'itérations nécessaires à la convergence de l'algorithme et un autre aspect est le temps nécessaire pour mesurer la limite dans chaque branche (chaque division), ce qui détermine le temps de calcul de chaque itération. Go-ICP conduit à une nouvelle limite et se concentre beaucoup sur le resserrement de ces limites. L'efficacité avec laquelle la limite peut être mesurée joue également un rôle important dans les temps d'exécution globaux d'un algorithme BnB, parce que l'évaluation des limites implique généralement des calculs entre chaque paire de points dans les deux ensembles de nuages de points.

Un exemple d'alignement 3D du modèle de CAO d'un bâtiment et d'un nuage de points de très grande tailles est présenté à la figure 0.1.

I.3 Les motivations

La mise en registre globale, ou l'alignement optimal de deux formes tridimensionnelles dans

des positions initiales arbitraires, est un problème fondamental dans le domaine de la vision numérique. Les méthodes de comparaison des modèles déformables sont utilisés pour récupérer des modèles appartenant à la même catégorie d'un modèle de requête en fonction de la similarité des caractéristiques extraites de chaque modèle.

Une comparaison des modèles déformables est pertinente dans l'industrie, par exemple dans le cas des pièces mécaniques et les objets fabriqués, pour détecter d'éventuels artefacts et défauts après la fabrication, ainsi qu'à des fins de contrôle qualité. Nous avons expérimenté différents cas de déformations sur des objets synthétiques et des pièces mécaniques afin de détecter les déformations et pour des fin de contrôle de qualité en génie mécanique.

Le travail a présenté dans cette mémoire explore une solution globalement optimale au problème de mise en registre euclidienne défini par ICP en 3D. La méthode Go-ICP exploite la théorie bien établie de BnB pour une optimisation globale [Yan+16] et s'adapte au problème de l'alignement d'un nuage de points acquis sur une très grande structure avec une copie déformée du nuage de points de la même structure. Un autre sujet étudié dans la mémoire consiste à adapter Go-ICP à l'alignement d'un grand nuage de points d'une structure (telle qu'un bâtiment) avec un modèle CAO de cette structure.

Nous étions curieux de savoir comment les Hyperparamètres de Go-ICP pourraient affecter la mise en registre d'un nuage de points avec une copie déformée de lui-même. Par conséquent, nous avons effectué une analyse des Hyperparamètres de Go-ICP sur des modèles CAO déformés. Les résultats de cette analyse sont discutés au chapitre 3.

Nous avons également étudié les performances de Go-ICP pour l'alignement 3D de composants d'infrastructure à grande échelle telle que les nuages de points de bâtiments avec plus de 1 ou 10 millions de points. Par conséquent, nous avons effectué quelques expériences pour détecter la déformation et comparer les modèles CAO d'un bâtiment (modèle "tel que conçu") au nuage de points du bâtiment réel (modèle "tel que construite") à des fins de contrôle de la qualité dans le secteur du génie civil. Les résultats sont présentés au chapitre 3.

I.4 Les problèmes et la solution

Dans cette section, nous présentons les principaux défis de ce travail. Ensuite, nous décrivons les solutions proposées et donnons par la suite les résultats attendus.

I.4.1 Défis

I. Le principal défi de notre travail est la mise en registre globale de deux modèles CAO déformés de pièces mécaniques et l'alignement de nuages de points à grande échelle. L'analyse

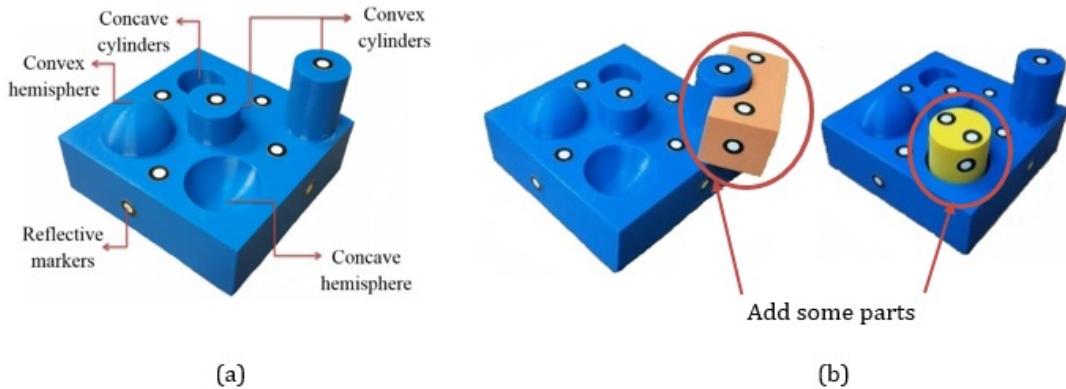


FIGURE 0.2 – L'objet et l'échantillon d'objets déformés. (a) est l'objet d'origine (modèle CAO) et (b) est un objet déformé obtenu en ajoutant un cylindre convexe dans l'hémisphère concave et en ajoutant un bloc à l'extérieur du grand cylindre convexe.

de l'effet des hypersparamètres de Go-ICP sur la mise en registre d'un nuage de points avec une copie déformée de lui-même est également ajoutée dans ce contexte.

II. Un autre défi lié à l'alignement des objets déformés consiste à obtenir les points de données et les points de modèle d'un objet afin de démontrer comment Go-ICP peut être exploité pour trouver l'alignement optimal entre le nuage de points d'un objet fabriqué et une copie modifiée de cet objet. Cet objet, construite par une imprimante 3D, consiste en un cube, deux cylindres convexes de hauteurs différentes, un hémisphère convexe, un hémisphère concave et un demi-cylindre concave (voir la figure 0.2 (a)). Nous avons ajouté certaines parties à l'objet d'origine pour créer de nouveaux objets (c'est-à-dire des objets "déformés") permettant d'aligner l'objet d'origine sur ces objets déformés à l'aide de Go-ICP. L'échantillon d'objets déformés est présenté à la figure 0.2 (b).

III. Le défi de l'alignement d'infrastructures à grande échelle telles que les nuages de points de bâtiments est le nombre de points de cet ensemble de données composé de plus de 1 ou 10 millions de points. L'alignement de cet ensemble de données est très difficile car nous devrions trouver la meilleure correspondance entre ces points.

IV. Un autre défi de l’alignement des nuages de points à grande échelle sur un modèle de CAO est que les points de données du modèle de CAO ne sont pas adéquats pour l’alignement, car ils ne sont pas répartis uniformément dans l’espace, ce qui empêche Go-ICP de trouver un bon alignement. Par conséquent, le modèle de CAO est ré-échantillonné à l’aide de Blender¹ pour

1. <https://www.blender.org/>

obtenir des points de données répartis uniformément à l'intérieur et à l'extérieur du modèle de CAO.

V. Enfin, le dernier défi posé par l'alignement des nuages de points à grande échelle dans notre travail est que l'échelle de l'ensemble de données du nuage de points de données et du nuage de points du modèle n'est pas toujours la même. Par conséquent, nous devrions trouver l'échelle de ces points de données avant d'effectuer l'alignement.

I.4.2 Description de la solution du problème

Pour la mise en registre 3D de nuages de points, il a été démontré que Go-ICP [Yan+16] obtenait la solution globale optimale pour une paire composée d'un nuage de points modèle et d'un nuage de points de données. Go-ICP a principalement été étudié uniquement sur des ensembles de nuages de points standards. Pour étudier l'efficacité de Go-ICP, nous avons analysé **l'effet de rognage** et **l'effet du seuil d'erreur de la mise en registre ϵ** sur l'alignement des modèles de CAO 3D.

Dans ce travail, nous démontrons l'efficacité remarquable de Go-ICP pour l'alignement des nuages de points **très complexes à grande échelle** sur leurs modèles de CAO **déformés** correspondants. En particulier, étant donné deux ensembles distincts de nuage de points pris de l'extérieur et de l'intérieur d'un bâtiment, les expériences démontrent que Go-ICP est capable d'aligner ces deux ensembles sur le nuage de points du modèle de CAO de l'ensemble du bâtiment (informations extérieures et intérieures incluses).

Dans le cas de la déformation, nous considérons des modèles 3D originaux et déformés d'objets synthétiques, des modèles mécaniques et certains modèles de CAO. Sur la base de ces modèles, un ensemble d'étapes de pré-traitement, telles que le lissage et des techniques de simplification, est utilisé pour préparer les modèles 3D finaux à des fins de comparaison. L'étape de pré-traitement utilise *VXelements de Creaform*. Pour le pré-traitement des nuages de points à grande échelle, nous avons normalisé les nuages de points 3D, puis trouvé l'échelle. Nous avons utilisé l'échelle pour l'alignement.

Pour un alignement 3D de plus d'un ou 10 millions de points, par exemple un bâtiment, sa surface et ses environs, nous allons dans un premier temps rogner les points des alentours du bâtiment avant tout traitement et obtenir un bon alignement. De plus, nous démontrons également que Go-ICP peut réaliser l'alignement de ces nuages de points sans aucun recadrage.

Enfin, pour détecter la déformation des objets et comparer les modèles CAO d'un bâtiment (modèle "tel que conçu") au nuage de points du bâtiment réel (modèle "tel que construite") à des fins de contrôle qualité, nous montrons que Go-ICP réussit en effectuant cette tâche.

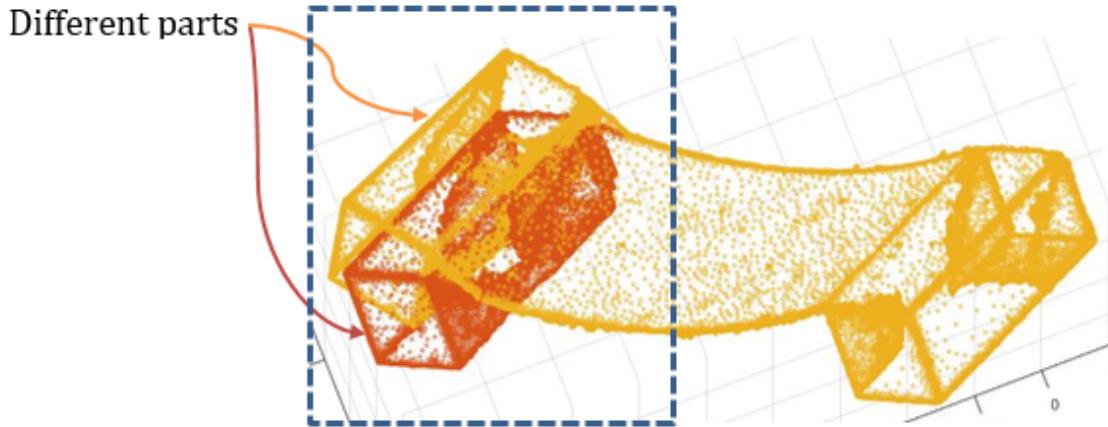


FIGURE 0.3 – Un échantillon de l’alignement 3D des pièces mécaniques pour la détection de la déformation.

I.4.3 Résultat attendu

L’objectif de ce projet est de détecter la déformation d’objets et de comparer les modèles CAO d’un bâtiment (modèle “tel que conçu”) au nuage de points du bâtiment réel (modèle “tel que construite”) à des fins de contrôle de la qualité en génie civil.

Nous construisons également les modèles CAO des objets avant et après la déformation. Ensuite, on compare l’objet d’origine (modèle CAO) et la copie déformée avec alignement. La comparaison de modèles déformables est pertinente dans l’industrie pour les pièces mécaniques et les objets fabriqués afin de détecter d’éventuels artefacts et défauts après la fabrication, ainsi qu’à des fins de contrôle qualité. Nous avons expérimenté différents cas de déformations d’objets et de pièces mécaniques fabriquées par l’homme afin de détecter ces déformations. Un exemple de ces objets après alignement 3D est illustré à la figure 0.3, où les parties déformées sont indiquées sur les objets.

I.4.4 Résumé de mémoire

Cette mémoire explore une solution globalement optimale au problème de mise en registre euclidienne défini par ICP en 3D. La méthode Go-ICP, qui exploite la théorie bien établie de l’optimisation globale (Branch-and-Bound, BnB) pour l’optimisation globale [Yan+16], est adaptée au problème de l’alignement d’un nuage de points acquis sur une très grande structure avec une copie déformée du point nuage de la même structure. Un autre sujet étudié dans le document consiste à adapter Go-ICP à l’alignement d’un grand nuage de points d’une structure (telle qu’un bâtiment) avec un *modèle CAO* de cette structure. Une troisième application à laquelle Go-ICP est étendu consiste à aligner le nuage de points d’objets créés par l’homme avec des copies déformées d’eux-mêmes dans le contexte du contrôle de la qualité en métrologie.

La mémoire présente également une analyse approfondie des hyperparamètres Go-ICP sur la qualité de la mise en registre utilisée pour l'analyse du temps de calcul requis pour effectuer l'alignement.

Dans le premier chapitre, nous présentons les travaux connexes sur les méthodes de mise en registre globale, telles que les méthodes globales et les méthodes optimales globales.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons l'approche de la mise en registre optimale globale et de l'analyse des hyperparamètres de Go-ICP sur la mise en registre d'un nuage de points avec une copie déformée de lui-même et l'alignement 3D de nuages de points à grande échelle.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux de la mise en registre 3D de modèles CAO, de pièces mécaniques et de nuages de points à grande échelle d'un modèle CAO d'un bâtiment et de ses abords et de son environnement.

Chapitre 1

Travaux Connexes

Des recherches importantes ont été menées sur les méthodes d’alignement global et les méthodes d’alignement optimal pour les nuages de points, comme illustré à la figure 1.1. Une catégorie de méthodes globales est basée sur des descripteurs de forme. L’appariement de surfaces est une technique de vision par ordinateur 3D qui trouve de nombreuses applications dans les domaines de la robotique et de l’automatisation. Les auteurs de [JH99] présentent un algorithme du type Greedy pour la représentation de forme générale associée, basé sur des images de type spin dans des scènes encombrées, permettant une comparaison efficace des surfaces, en utilisant PCA pour la compression des images spin. L’utilisation de contextes de forme pour l’appariement de formes déformées est présentée dans [BMP02]. Cette approche est un processus en trois étapes pour l’appariement de formes : 1) résoudre le problème de correspondance entre les deux formes, 2) utiliser les correspondances pour trouver une approximation d’une transformation d’alignement et 3) calculer la distance entre les deux formes comme une somme des erreurs d’appariement entre les points correspondants, ainsi qu’un terme mesurant l’ampleur de la transformation d’alignement.

Les auteurs de [Gel+05] proposent une approche de mise en registre globale robuste en utilisant un volume intégral basé sur la géométrie locale et le BnB. Dans cet article, un petit nombre de points caractéristiques de la forme de données utilisent les valeurs de descripteur du modèle pour rechercher les points correspondants potentiels.

Les auteurs de [RBB09] présentent l’Histogramme de Caractéristique de Point Rapide (Fast Point Feature Histogram, FPFH) qui trouve la mise en registre en utilisant l’alignement initial de consensus d’échantillon (Sample Consensus Initial Alignment, SAC-IA). Cet article modifie les histogrammes de caractéristiques ponctuelles (Point Feature Histograms, PFH) et effectue une analyse rigoureuse de la robustesse et de la complexité du problème de la mise en registre 3D pour les vues de nuages de points qui se chevauchent.

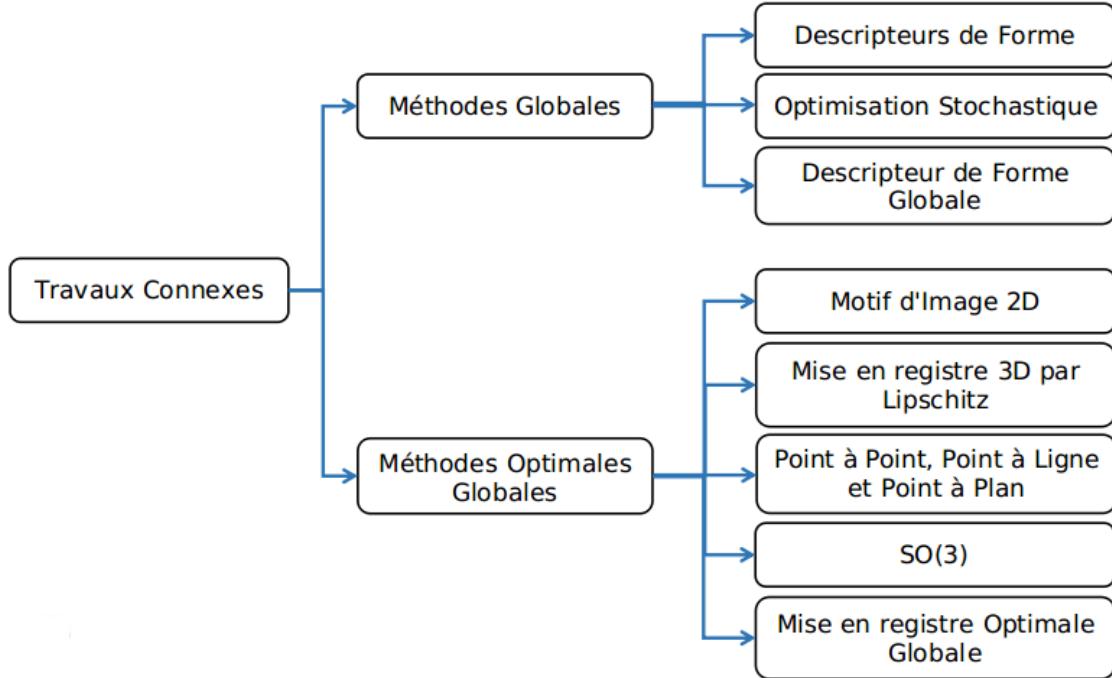


FIGURE 1.1 – Les méthodes qui sont passées en revue dans l'étude de la littérature.

Random Sample Consensus (RANSAC) est utilisé pour effectuer l'appariement d'un modèle à des données dans une application du problème de détermination locale (Local Determination Problem, LPD) [Gel+05]. RANSAC a la capacité d'interpréter/lisser les données contenant un pourcentage significatif d'erreurs grossières et convient donc parfaitement aux applications d'analyse d'image automatisée où l'interprétation est basée sur les données fournies par les détecteurs de caractéristiques sujettes aux erreurs. Si on considère une image représentant un ensemble de repères avec des emplacements connus, l'approche présentée dans cet article détermine l'emplacement dans lequel l'image a été obtenue.

Les auteurs de [IR99] proposent une stratégie d'échantillonnage aléatoire similaire à RANSAC pour l'estimation de l'alignement en utilisant des points 2D. Cet article exploite la randomisation avec deux techniques d'appariement de base utilisées dans la reconnaissance basée sur un modèle : l'alignement et l'hachage géométrique. Comme démontré dans l'article, la randomisation est une technique très efficace pour réduire la durée d'exécution de ces deux méthodes. Les auteurs de [AMC08] présentent une méthode d'échantillonnage aléatoire utilisant des ensembles congruents à quatre points sans pré-filtrage ni suppression de données bruitées. Pour un appariement partiel, les valeurs aberrantes et les parties ne se chevauchant pas ont des effets similaires. Bien que les valeurs aberrantes nuisent à l'efficacité des descripteurs locaux, elles n'affectent pas la performance des bases larges. L'algorithme 4PCS atteint la résilience au bruit et aux valeurs aberrantes en utilisant des bases larges et la mesure du plus grand

ensemble de points communs (Largest Common Point set, LCP).

Les auteurs de [MPD06] trouvent la rotation 3D de deux images gaussiennes étendues (Extended Gaussian Images, EGI) à partir de descripteurs de forme globaux. Cet alignement fonctionne aussi bien sans modification sur des modèles numérisés à petite échelle que sur les nuages de points à grande échelle obtenues grâce à la numérisation de salles pour lesquels les valeurs aberrantes peuvent être supprimées comme cela est fait dans RANSAC. Les propriétés et les raffinements de cet algorithme de mise en registre sont qu'il est entièrement automatique sans repères artificiels, qu'un chevauchement partiel des ensembles des points est nécessaire, qu'il est indépendant du capteur et de la densité d'échantillonnage ainsi que de la taille de l'environnement et qu'il n'y a aucune dépendance sur la vitesse de convergence.

Une autre catégorie de méthodes globales est basée sur l'optimisation stochastique. Les auteurs de [SDT09] ont résolu la mise en registre de nuage de points en utilisant le filtrage particules et la dynamique stochastique. Cela fonctionne en provoquant une variation locale des paramètres de pose obtenues en exécutant quelques itérations d'un optimiseur local. Cet algorithme peut être considéré comme une approche ICP stochastique à commutation dans laquelle un nuage de points n'interagit qu'avec une poignée de correspondances. Les contributions présentées dans cet article sont les suivantes : utiliser une approche de filtrage de particules avec un modèle de prédiction non paramétrique pour piloter le processus de mise en registre de nuages de points et dériver une approximation de la mesure de corrélation pour deux ensembles de points formés d'un mélange de Gaussiennes.

La mise en registre des images de profondeur peut également être réalisé en utilisant l'algorithme génétique (Genetic Algorithm, GA) proposé dans [SBB05]. Les méthodes de mise en registre d'images de profondeur peuvent être classées, selon les techniques utilisées pour identifier les caractéristiques correspondantes et, selon la méthode d'estimation de la transformation entre les vues. Les méthodes de mise en registre de [SBB05] peuvent être classées en gros en deux catégories : grossière et fine. La mise en registre grossière a pour objectif de trouver un ensemble de transformations de mise en registre approximative sans connaissance préalable des positions spatiales relatives des vues. Les techniques de mise en registre fine reposent sur l'hypothèse qu'une bonne transformation initiale est disponible. L'avantage principal de l'approche GA pour la mise en registre des images de profondeur est qu'un pré-alignement entre les vues n'est pas nécessaire pour garantir un bon résultat. Cependant, l'algorithme GA est une méthode stochastique et prend généralement beaucoup de temps.

Le travail présenté dans [BL95] présente la mise en registre 3D pour les images de profondeur exploitant une fonction de coût optimisant la qualité de la mise en registre en tant que technique d'optimisation stochastique, un recuit simulé très rapide (very fast simulated annealing, VFSR) est utilisé pour minimiser la fonction de coût. Cette fonction calcule la somme des distances euclidiennes entre un ensemble de points de contrôle d'une surface et les

points correspondants de l'autre. Cette méthode est divisée en deux phases principales : (i) le problème de mise en registre basé sur un équipement mécanique calibré avec précision pour déterminer la transformation de mouvement entre les vues et (ii) dériver la transformation de mise en registre entre les images de profondeur à partir des informations contenues dans les images de profondeur et d'autres informations fournies par le système d'acquisition. Dans [PB11], l'optimisation globale stochastique est utilisée pour une mise en registre par paires de nuages de points rigides basée sur une fonction de coût robuste aux valeurs aberrantes.

De nombreuses approches pour une mise en registre optimale globale sont basées sur BnB. Les auteurs de [Bre03] présentent un algorithme d'appariement géométrique basé sur BnB pour la correspondance de motifs d'image. Cette méthode est destinée à l'appariement de segments de lignes partielles optimales globales dans le cadre des modèles bornés ou d'erreurs gaussienne permettant des appariements partiels et ne nécessitant aucun calcul séparé de distance séparée. Cette approche est une comparaison expérimentale des stratégies de recherche de profondeur d'abord et de priorité optimale utilisées par ces algorithmes d'appariement géométrique.

Les auteurs dans [PSK12] proposent un appariement géométrique basé sur BnB pour le traitement d'images médicales. La méthode se concentre sur un modèle de programmation à nombres entiers mélangés pour le problème de la mise en registre de points, qui combine des techniques de traitement des valeurs aberrantes avec des objectifs et des contraintes de mise en registre adéquats. Ce document utilise une stratégie hiérarchique à plusieurs niveaux pour obtenir une pré-mise en registre optimisée globale, qui peut ensuite être affinée sur des niveaux des résolutions supérieures en utilisant des méthodes locale rapide.

Un cadriciel basé sur la théorie d'optimisation globale de Lipschitz pour la mise en registre 3D en utilisant BnB est présenté dans [LH07] en tant qu'algorithme Box-and-Ball. Cette approche utilise une structure de données octree pour implémenter la recherche. Chaque noeud de l'arbre est une boîte 3D (voxel) et chaque boîte a un membre de données constitué d'une boule de rayon 2. Les inconvénients de cette approche sont qu'elle est très lente pour les grands nuages de points et pas robuste pour les valeurs éloignées.

Les auteurs de [OKO08] trouvent la mise en registre optimale globale via un cadriciel associant point à point, point à ligne et point à plan en utilisant BnB. Cette approche se concentre sur le problème de la pose de la caméra qui consiste à trouver de perspective entre un objet et son image. Le problème d'optimisation et la fonction de coût de ce problème est une fonction polynomiale de degré quatre dans les inconnues et il peut y avoir plusieurs minima locaux, mais cette méthode les améliore.

Les auteurs de [PCS14] présentent une approche de recherche rapide utilisant BnB pour l'alignement géométrique. Cette méthode propose les espaces $SO(3)$ qui sont ensuite recherchés par les algorithmes BnB. Cet article se concentre sur la rotation, calcule la rotation de deux nuages de points puis trouve la mise en registre des points. Cette approche extrait la géométrie

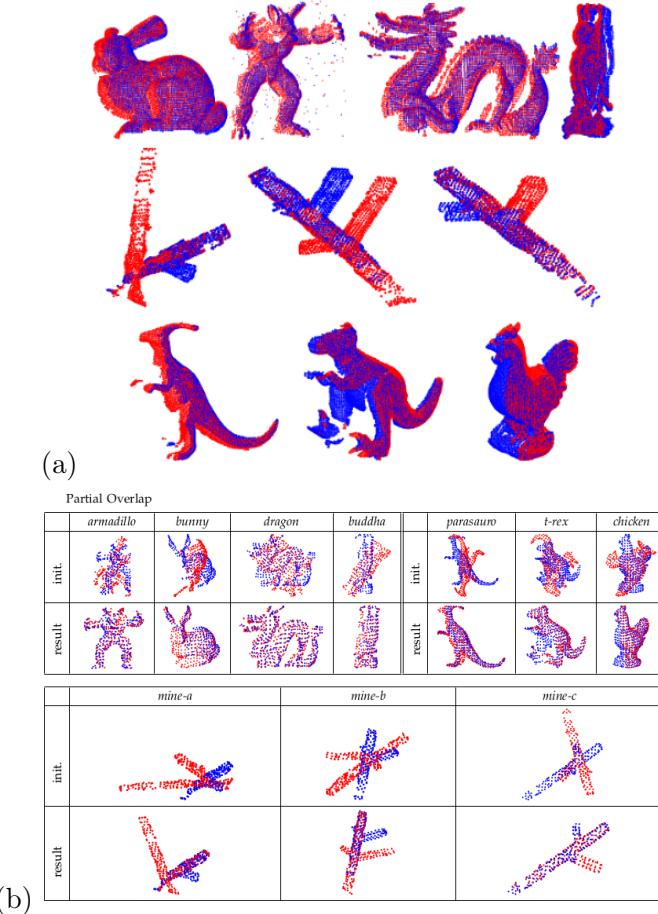


FIGURE 1.2 – Les résultats de la mise en registre pour l’approche dans [PCS14] (Glob-GM). (a) montre les nuages de points pour l’évaluation de la rotation et (b) est la mise en registre des nuages de points. Les images sont tirées de [PCS14].

des transformations rotationnelles pour dériver une fonction de limite de manière à accélérer la convergence. Les résultats de cette approche sont illustrés à la figure 1.2.

D’autres méthodes globales ont été proposées par Nicolas Mellado [MAM14] et Qian-Yi Zhou [ZPK16]. Les auteurs dans [AMC08] présentent l’algorithme d’ensembles congruents à 4 points (4 PCS) pour une mise en registre de surfaces robustes s’exécutant avec une complexité $O(n^2)$ et basé sur RANSAC, tandis que les auteurs dans [MAM14] proposent une mise en registre super-4 PCS rapide globale de nuages de points via une indexation intelligente s’exécutant en temps linéaire (nombre de points de données). Le résultat de cette méthode est sensible à la complexité du problème d’alignement lié au chevauchement inconnu entre les paires numérisées. Cet algorithme s’exécute avec une complexité $O(n + k_1 + k_2)$ où k_1 est le nombre de paires de Q à une distance donnée r et k_2 est le nombre d’ensembles congruents. La clé de cette méthode de mise en registre est de supprimer la complexité quadratique de l’algorithme 4 PCS original en utilisant une structure des données efficaces et pratiques pour résoudre le problème de

l’instance principale, c’est-à-dire en recherchant toutes les paires de points se trouvant dans un intervalle de distance $(r - \epsilon, r + \epsilon)$. Les résultats de cet algorithme sont présentés à la figure 1.3.

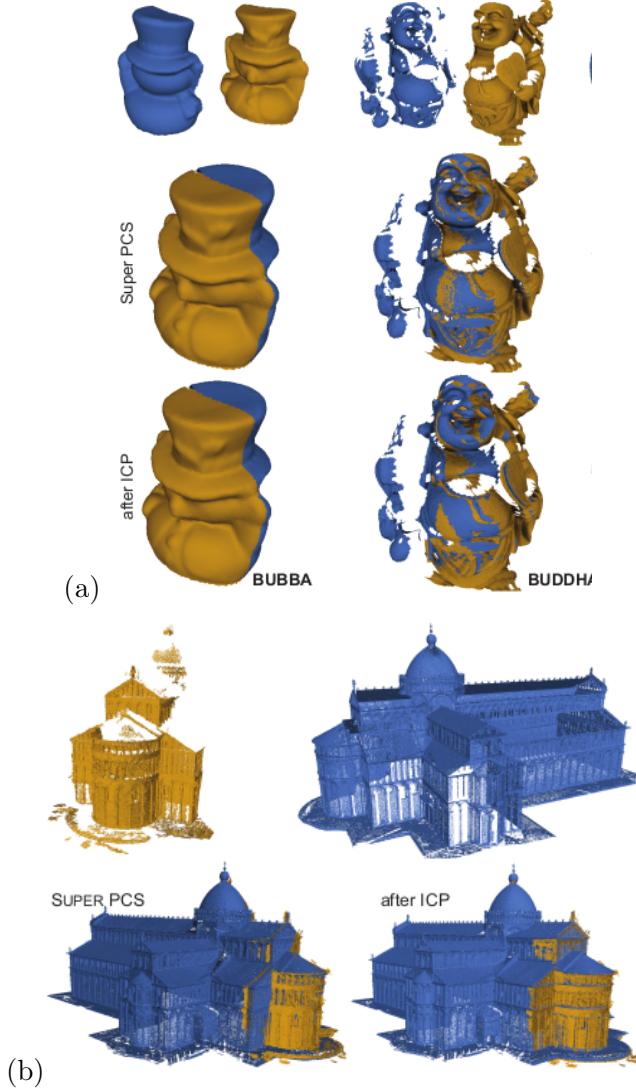


FIGURE 1.3 – Les résultats de la mise en registre par l’algorithme super 4PCS. (a) est le résultat de Bubba et Buddha pour lesquels les modèles et leurs données correspondantes se chevauchent peu et (b) montrent un alignement global. Les images sont tirées de [MAM14].

Les auteurs dans [ZPK16] présentent un algorithme permettant une mise en registre globale rapide de surfaces 3D se chevauchant partiellement. Cette approche est axée sur l’alignement des joints, telle que la reconstruction de scènes, en utilisant des alignements candidats entre des paires de surfaces, puis en calculant un ensemble de poses globalement cohérent en fonction de ces alignements par paires intermédiaires.

Cette approche considère deux ensembles de points P et Q, puis optimise une fonction objective

robuste sur les correspondances entre P et Q . Les correspondances ne sont pas recalculées lors de l'optimisation, ce qui permet de traiter des ensembles de correspondance très bruyants. Ceci est montré à la figure 1.4.

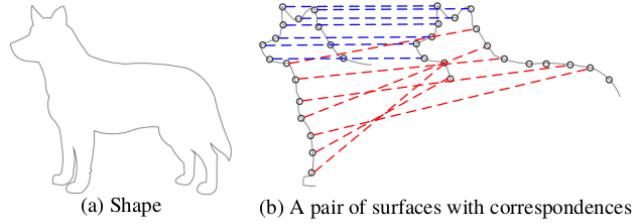


FIGURE 1.4 – Une image avec des ensembles de points 2D. (a) Une forme cachée. (b) Deux surfaces se chevauchant partiellement et un ensemble de correspondances point à point. Les correspondances bleues sont réelles, les correspondances rouges sont erronées. Les images sont tirées de [ZPK16].

Les auteurs de [Yan+16] présentent l'algorithme Go-ICP comme une méthode de mise en registre optimale globale basée sur BnB via des espaces $SO(3)$. Cette approche prend en charge la mise en registre 3D euclidienne avec translation et rotation (c'est-à-dire transformation rigide). Elle peut fonctionner directement sur des nuages de points denses sans nécessiter une bonne pose initiale ou des correspondances supposées.

Le Go-ICP présenté dans [Yan+16] utilise une structure de recherche BnB imbriquée. Un BnB externe cherche dans l'espace de rotation de $SO(3)$ et résout les limites et les translations optimales correspondantes en appelant une translation interne BnB. L'algorithme Go-ICP propose une relation de collaboration entre ICP et BnB. Sous la direction du BnB global, ICP converge progressivement vers les minima locaux pour atteindre finalement le minimum global. Plus de détails sur l'approche proposée par Go-ICP sur la manière de trouver la mise en registre optimale globale sont données dans le chapitre 3.

Chapitre 2

Approche proposée pour l’alignement de nuages de points avec les modèles CAO et l’exploration de l’effet des hyper-paramètres de Go-ICP sur l’alignement

2.1 La solution au problème de l’alignement d’un grand nuage de points avec un modèle CAO

La mise en registre est le processus d’alignement des ensembles de points de données 3D acquis à partir de points de vue différent. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l’alignement de deux ensembles de données, à savoir un modèle (points de référence) et des points de données acquis avec une pose différente. Formellement, $X = \{x_i\}, i = 1, \dots, N$ et $Y = \{y_j\}, j = 1, \dots, M$ représentent des points de données et des points de modèle, respectivement. Notez qu’il est généralement supposé que le nombre des points des données (N) est inférieur au nombre de points de modèle (M). En règle générale, la fonction objective pour la mise en registre 3D est définie sur l’erreur carrée L_2 comme suit :

$$E(R, t) = e_i(R, t)^2 = \sum_{i=1}^N \|Rx_i + t - y_{j^*}\| \quad (2.1)$$

Où $R \in [\pi, \pi]^3$ est l’espace de rotation et $t \in [-\varepsilon, \varepsilon]^3$ est l’espace de translation et $e_i(R, t)$ indique la distance euclidienne entre x_i transformée par (R, t) et y_{j^*} comme correspondance

optimale entre x_i et y_i .

I- La mise en registre 3D globale

Go-ICP [Yan+16] propose de combiner l'algorithme d'optimisation Branch-and-Bound (BnB) avec ICP afin de trouver la transformation optimale globale en Eq. 2.1. Contrairement à ICP, cet algorithme n'est pas sensible à la transformation initiale. Par conséquent, il peut commencer à partir de n'importe quelle pose initiale et finir par aboutir à la solution optimale globale. La contribution clé de Go-ICP est la dérivation des limites d'erreur de mise en registre. En fait, l'identification efficace des limites supérieures et inférieures des régions de l'espace de recherche permet de trouver plus rapidement l'optimum global (figure 2.1 (a)).

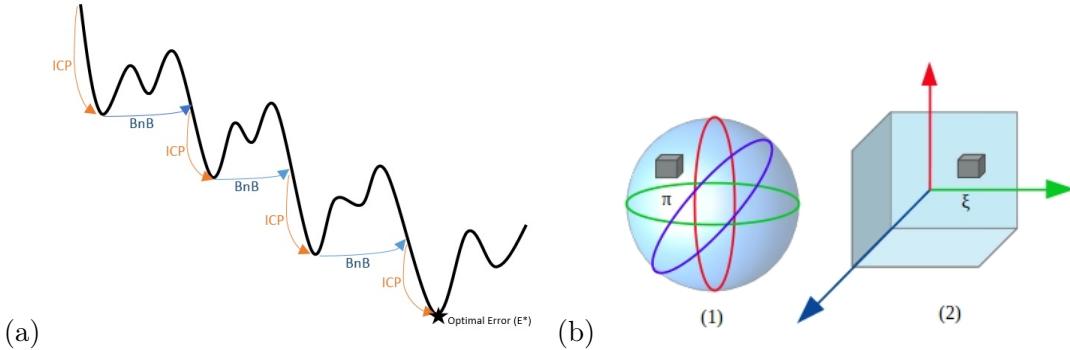


FIGURE 2.1 – (a) : La collaboration de BnB et ICP. (b) : L'espace de recherche comprend l'espace de rotation et l'espace de translation. Les cubes gris sont les sous-cubes de ces espaces (1) espace de rotation, qui peut être représenté par une sphère de rayon π . (2) l'espace de translation qui peut être représenté par un cube de longueur 2ξ . Repris de [Yan+16].

II- Domaines pour les paramètres de rotation et de translation

Généralement, l'espace de recherche de mise en registre non rigide comprend l'espace de rotation et l'espace de translation. La totalité de l'espace de rotation 3D peut être modélisée par une sphère de rayon π . Pour l'espace de translation, on peut considérer un cube borné $[-\xi, \xi]^3$. L'espace de recherche est représenté à la figure 2.1 (b). Notez que ce cube englobe la sphère avec le rayon π dans R^3 où π est le rayon de l'espace de rotation (C_r) et de l'espace de translation (C_t). L'algorithme BnB est exploité pour diviser l'espace de recherche, c'est-à-dire l'espace de rotation et l'espace de translation, en sous-cubes. Pour effectuer une recherche efficace et intelligente dans l'espace de rotation et dans l'espace de translation, BnB doit avoir accès aux limites supérieures et inférieures des sous-cubes. Comme le soulignent les auteurs [Yan+16], leur principale contribution est de trouver efficacement les limites supérieures et inférieures de l'espace de recherche. Dans ce travail, nous n'avons pas indus la théorie proposée pour trouver les bornes d'erreur et nous renvoyons le lecteur à [Yan+16] pour plus de détails.

III- Algorithme Go-ICP

Go-ICP utilise une structure de recherche imbriquée BnB. Un BnB extérieur recherche dans l'espace de rotation $SO(3)$ et un BnB intérieur recherche dans l'espace de translation. Dans les deux BnB, Go-ICP utilise une stratégie ***best-first search***. Chacun des BnB conserve une file de priorité, afin que la priorité d'un cube soit opposée à sa limite inférieure lorsque la différence entre *so-far-the-best* erreur E^* et la limite inférieure \underline{E} du cube actuel est inférieure à un seuil ε , alors BnB s'arrête. Une autre stratégie consiste à définir $\varepsilon = 0$ et à terminer les BnB lorsque les cubes restants sont suffisamment petits.

Lorsque le BnB extérieur trouve un cube de l'espace de rotation (C_r) dont la limite supérieure est inférieure à la meilleure valeur actuelle de la fonction, il appelle un ICP classique, initialisé avec la rotation centrale de C_r et la meilleure translation correspondante. Dans Go-ICP, ICP converge vers les minima locaux un par un, chaque minimum local ayant une erreur inférieure au précédent, et atteint finalement le minimum global. ICP explore uniquement les cubes prometteurs non rejetés avec de petites limites inférieures marquées par BnB.

2.2 La mise en registre 3D d'objets déformés avec Go-ICP

2.2.1 L'acquisition des données

Dans cette section, nous présentons la procédure permettant d'obtenir les points de données et les points de modèle d'un objet afin de démontrer comment Go-ICP peut être exploité pour trouver la mise en registre optimale entre le nuage de points d'un objet créé par l'homme et une copie modifiée de lui-même. Cet objet, construit par une imprimante 3D, consiste en un cube, deux cylindres convexes de hauteurs différentes, un hémisphère convexe, un hémisphère concave et un demi-cylindre concave (figure 2.2 (a)). Nous avons ajouté certaines parties à l'objet d'origine pour créer de nouveaux objets (c'est-à-dire des objets "déformés") permettant d'aligner l'objet d'origine sur ces objets déformés (figure 2.2 (b)) à l'aide de Go-ICP.

Nous avons acquis des points de données d'objets déformés et des points d'origine à l'aide d'un numériseur météorologique 3D portatif Creaform Go! Scan50. Les marqueurs réfléchissants installés sur l'objet (figure 2.2 (c)) sont utilisés par le numériseur pour s'auto-positionner. Ils ne sont pas utilisés pour l'estimation de la mise en registre par Go-ICP. Un total de 3345 points de données ont été numérisés sur l'objet d'origine et 6879 points de modèle ont été numérisés sur l'objet déformé. Pour appliquer Go-ICP, nous devons normaliser les ensembles de données dans l'intervalle $[-1, 1]$. L'espace de recherche pour la rotation est $[-\pi, \pi]^3$ et celui pour la translation est $[-0.5, 0.5]^3$. Pour obtenir le meilleur résultat de BnB, ses hyperparamètres doivent être sélectionnés avec soin. Dans les expériences, nous avons considéré tous les points de données de l'objet d'origine, c'est-à-dire = 3345. Go-ICP utilise deux hyper-paramètres. Le paramètre ρ , appelé facteur "trimming", contrôle la robustesse face aux valeurs aberrantes,

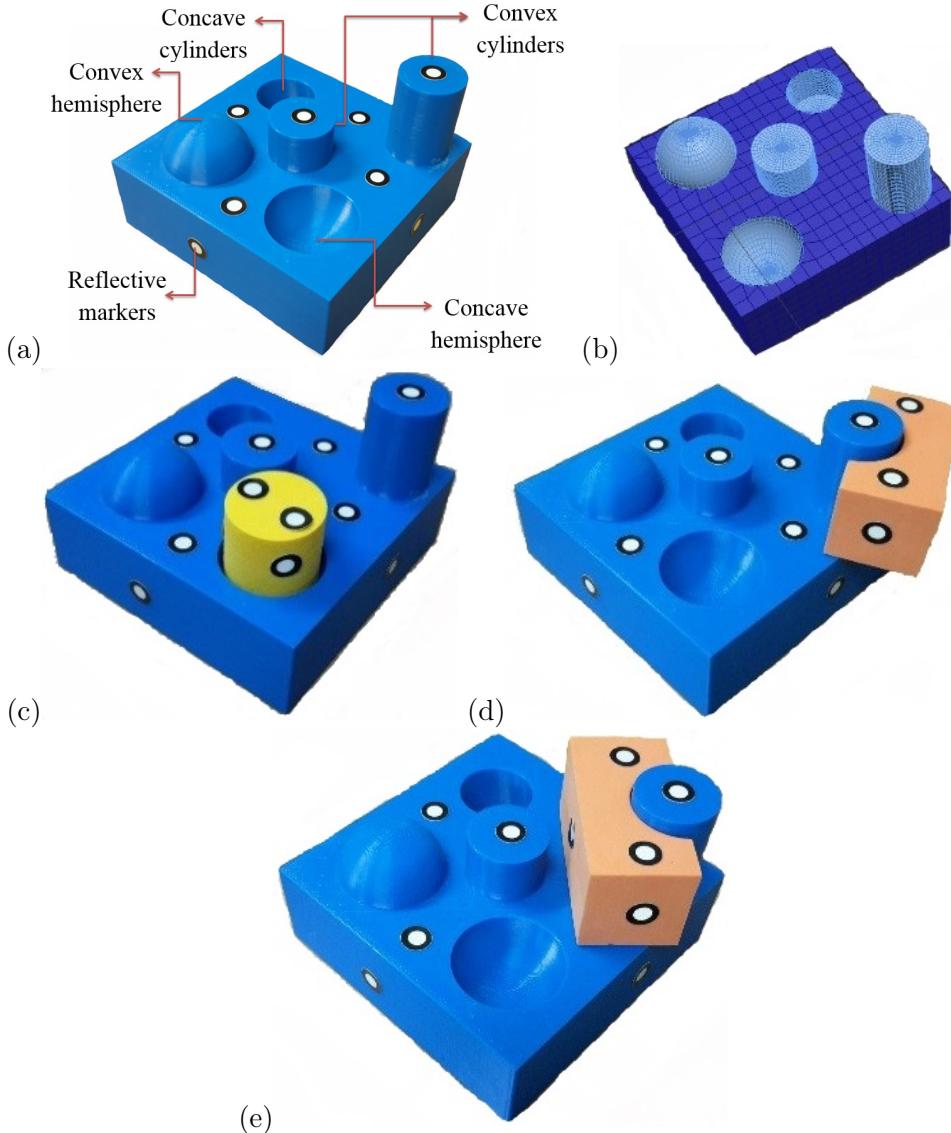


FIGURE 2.2 – Les données et les objets. (a) est l'objet d'origine (impression 3D), (b) est le modèle CAO de l'objet d'origine (nuage de points de données), (c) est l'objet déformé 1 obtenu en ajoutant un cylindre convexe dans l'hémisphère concave, (d) est l'objet déformé 2 obtenu en ajoutant un bloc à l'extérieur du grand cylindre convexe et (e) est l'objet déformé 3 obtenu en ajoutant un bloc à l'intérieur du grand cylindre convexe.

tandis que le paramètre ε , appelé seuil d'erreur de mise en registre, contrôle la convergence du processus de mise en registre. Le paramètre ρ a été défini à 20% (voir section 3.3.1 pour une définition formelle du rognage, "trimming") et ε a été défini à 5. La mise en registre de l'objet d'origine et de l'objet déformé 1 à l'aide de Go-ICP est exécuté en 6472,8 secondes avec une erreur quadratique moyenne (Root Mean Square, RMS) de 7,48679, tandis que l'erreur RMS liée à l'utilisation de ICP seul est de 14,383 (figure 2.3). Notez qu'avec des valeurs inférieures ρ , la mise en registre n'est pas aussi bonne que pour $\rho = 20\%$ en utilisant l'erreur RMS

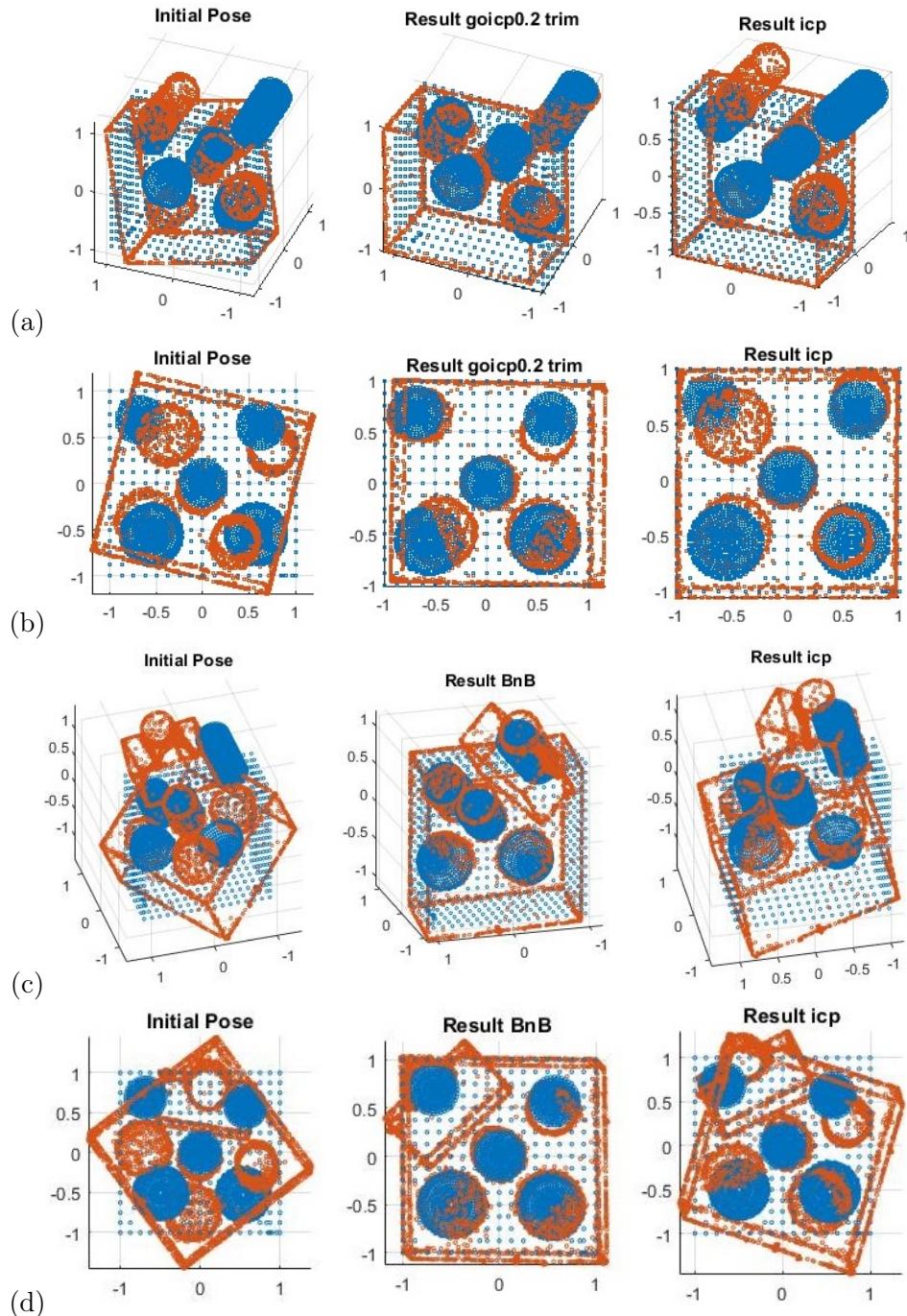


FIGURE 2.3 – Les résultats de Go-ICP pour la mise en registre 3D d’objets déformés. Les nuages de points bleus sont les données et les nuages de points rouges sont les modèles (objets déformés). (a) est la mise en registre 3D de l’objet déformé 1 (vue : axe de XYZ), (b) est la mise en registre 3D de l’objet déformé 1 (vue : axe de XZ), (c) est la mise en registre 3D de l’objet déformé 3 (vue : axe de XYZ), et (d) est la mise en registre 3D de l’objet déformé 3 (vue : axe de XZ). À gauche : pose initiale, au centre : la mise en registre avec Go-ICP, à droite : la mise en registre avec ICP uniquement.

comme critère. De plus, la durée d'exécution de l'algorithme pour des valeurs plus petites de ε est considérablement plus longue car il faut traiter plus de points. Enfin, les résultats de l'alignement de Go-ICP sont bons comparés à ceux d'ICP seul, comme on peut le constater qualitativement à la figure 2.3. La méthode Go-ICP a été mise en œuvre en C ++ sur un PC doté d'un processeur Intel Core i7 2 * 4.00 GHz et de 32 Go de RAM.

2.3 Analyse des hyperparamètres de Go-ICP sur la mise en registre d'un nuage de points avec une copie déformée de lui-même

2.3.1 L'effet du rognage

Pour supprimer les valeurs aberrantes possibles, une procédure de rognage peut être appliquée sur les points de données afin de supprimer ρ pourcent des points de données qui sont éloignés des points du modèle. Sur la base de nos observations, nous avons constaté que le paramètre ρ (le facteur de rognage) avait une influence majeure sur l'erreur RMS et la durée d'exécution des algorithmes (BnB et ICP). Plus précisément, une valeur élevée pour ρ peut entraîner des points de données mises en registre erronés, car certains *inliers* essentiels pour une mise en registre précis sont supprimés par la procédure de rognage. Par ailleurs, un très petit ρ (ou $\rho = 0$) peut conduire à une durée d'exécution très longue, car les valeurs aberrantes empêchent BnB de converger vers une erreur RMS raisonnable. Un très petit ρ (ou ρ proche de 0) ne supprime pas les valeurs aberrantes qui peuvent être très éloignées du modèle et tous les points doivent être pris en compte dans l'optimisation. En d'autres termes, l'erreur RMS ne peut pas converger vers le seuil sélectionné (ε) en raison de la présence de valeurs aberrantes. Par exemple, à la figure 2.4, en considérant $\rho = 10\%$, $\rho = 20\%$ et $\varepsilon = 10$ pour l'objet déformé 1 et 2 entraîne une mise en registre inexacte, tandis que en utilisant $\rho = 10\%$ et $\varepsilon = 10$, mise en registre les objets déformés 1, 2 plus précis. Par conséquent, pour obtenir les meilleurs résultats de BnB et d'ICP, il faut régler ρ pour l'ensemble des points de données spécifiques afin d'éliminer correctement les valeurs aberrantes. Dans toutes les expériences, nous trouvons le meilleur facteur ρ qui produit la meilleure mise en registre à une durée de fonctionnement raisonnable (par exemple, moins de 10 minutes pour la plupart des expériences sauf celles avec de très grands nuages de points (avec des millions de points)). Les courbes de l'effet du facteur de rognage sur l'erreur RMS et le temps de calcul sont illustrées à la figure 2.5.

Dans les figures 2.5 (a), (b), l'erreur quadratique moyenne (RMS) de la pose initiale entre le modèle CAO et le modèle CAO déformé en fonction du facteur de rognage ρ , diminue puis se rapproche de l'erreur RMS de Go-ICP et de l'erreur RMS d'ICP, puis devient zéro. L'explication de ceci est facile à comprendre pour les petites valeurs de ρ , le modèle et les

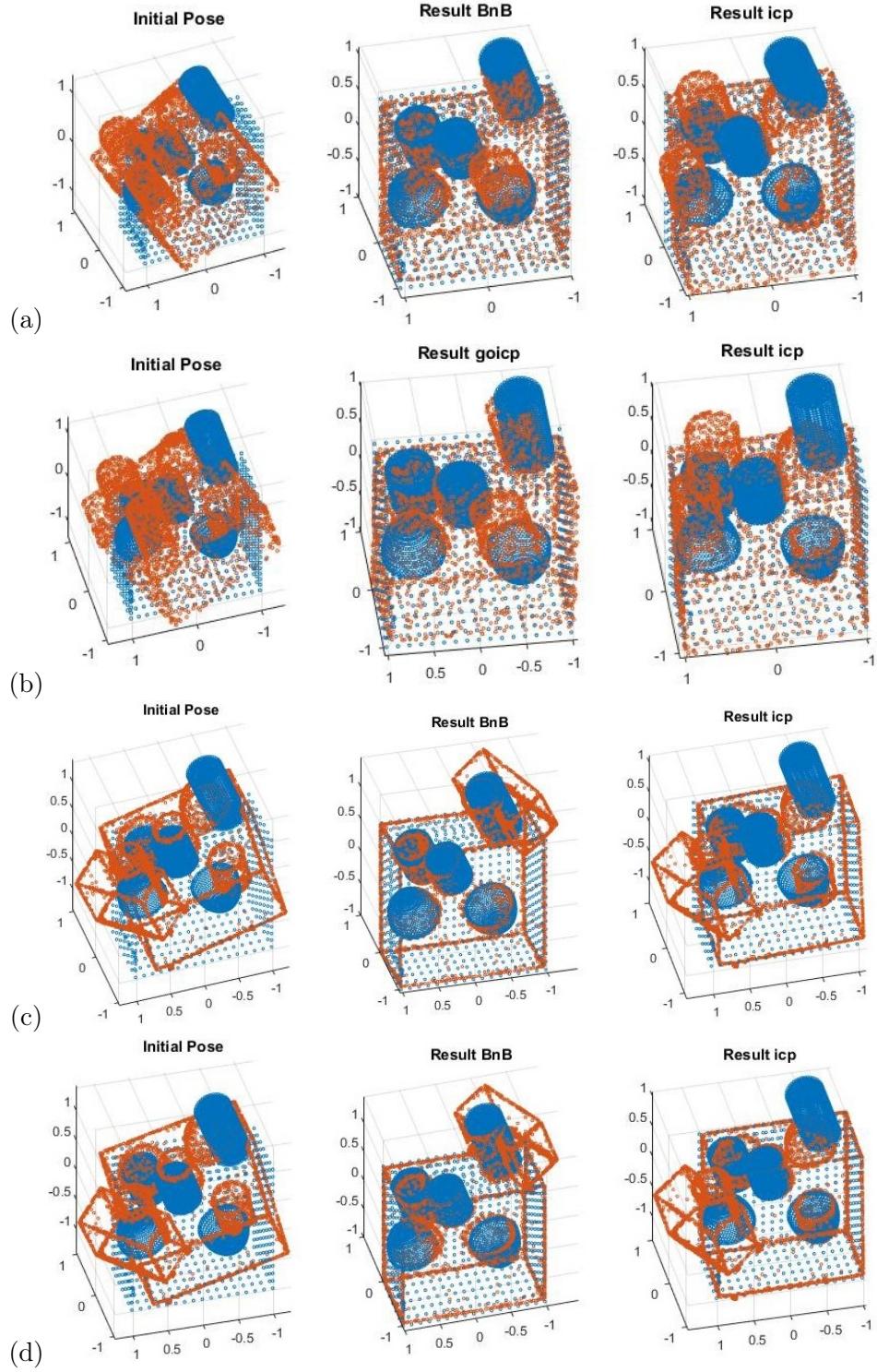


FIGURE 2.4 – L’effet de la découpe sur la mise en registre 3D des objets déformés 1 et 2. Les nuages de points bleus sont les données et les nuages de points rouges sont les modèles (objets déformés). (a) est le résultat de $\rho = 10\%, \varepsilon = 10$ sur l’objet déformé 1, (b) est le résultat de $\rho = 20\%, \varepsilon = 10$ sur l’objet déformé 1, (c) est le résultat de $\rho = 10\%, \varepsilon = 10$ sur l’objet déformé 2, et (d) est le résultat de $\rho = 20\%, \varepsilon = 10$ sur l’objet déformé 2. Gauche : pose initiale, centre : la mise en registre avec Go-ICP, droit : la mise en registre avec ICP seul.

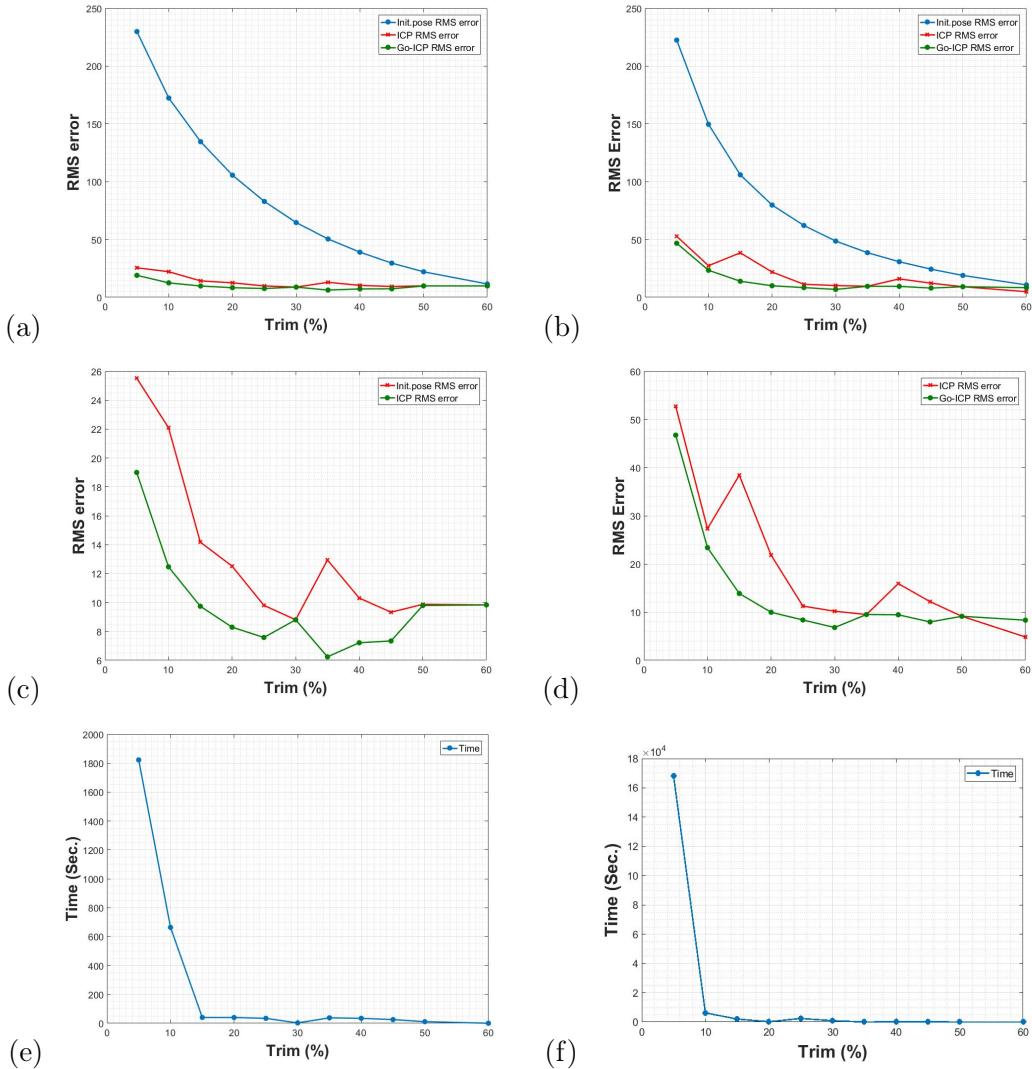


FIGURE 2.5 – La courbe de l’impact du facteur d’ajustement ρ sur l’erreur de mise en registre et le temps d’exécution. Les courbes bleues dans (a, b, c et d) sont les erreurs RMS des poses initiales, les courbes rouges sont les erreurs RMS de ICP et les courbes vertes sont les erreurs RMS de Go-ICP. (a) et (c) sont la courbe de l’effet du rognage sur l’erreur de mise en registre 3D de l’objet déformé 1, (b) et (d) sont le résultat pour l’objet déformé 2, (e) est la courbe de l’effet de rognage sur le temps d’exécution (secondes) de l’enregistrement 3D de l’objet déformé 1, et (f) est le temps d’exécution (secondes) pour l’objet déformé 2.

données sont très éloignées puisqu’ils ne sont pas alignés, d’où la grande erreur RMS. Lorsque ρ est grand ($> 60\%$), l’erreur RMS diminue car il n’y a pas assez de points sur le modèle et les données pour réaliser l’alignement, mais, puisque dans cette situation, tout point peut être associé à un autre point, l’erreur RMS est faible même si le modèle et les données ne sont pas alignées.

A la figure 2.6, (a) est le modèle CAO d’origine et pour illustrer ce fait plus clairement, nous

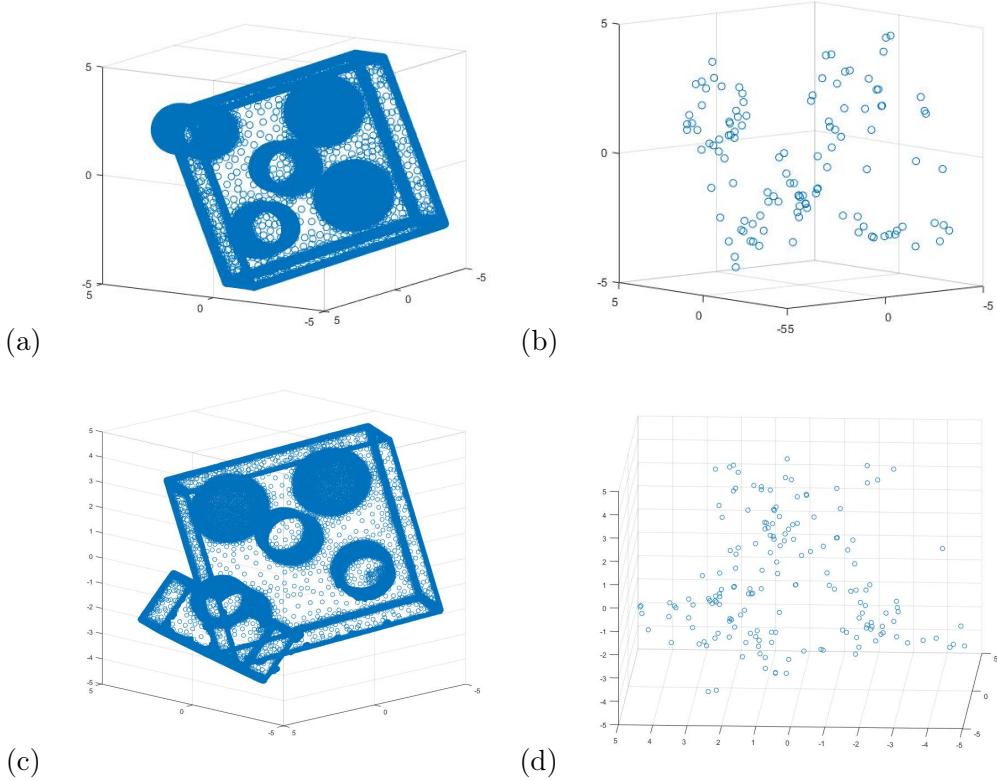


FIGURE 2.6 – Modèles CAO avec 85% de rognage. (a) est le modèle CAO d'origine, (b) est le modèle CAO d'origine avec $\rho = 85\%$, (c) est le modèle CAO déformé et (d) est le modèle CAO déformé avec $\rho = 85\%$.

référons à la figure 2.6 (b) qui est le modèle CAO d'origine avec une réduction de 85%. Cette figure montre que le modèle CAO d'origine après rognage à 85% ne décrit plus la forme du modèle CAO d'origine. Il en est de même pour le modèle de CAO déformé illustré à la figure 2.6 (c, d). Le résultat de la mise en registre 3D du modèle CAO d'origine et de sa déformation avec $\rho = 85\%$ est présenté à la figure 2.7. Sur cette figure, l'alignement par Go-ICP, ICP et la pose initiale (c'est-à-dire aucun alignement) est identique car trop de points ont été supprimés et il n'y a pas assez d'informations pour obtenir la mise en registre. Par conséquent, un groupe de points ressemble à un autre groupe de points clairsemés.

2.3.2 L'effet du seuil d'erreur de la mise en registre ε

La précision (erreur RMS) et la durée d'exécution de BnB dépendent fortement du seuil (ε) car il définit le critère d'arrêt. En d'autres termes, BnB termine son processus de mise en registre lorsque l'erreur RMS optimale est suffisamment proche de la limite inférieure de l'erreur RMS, c'est-à-dire que $E^* - E_r < \varepsilon$ (E^* est la valeur RMS optimale erreur et E_r est la limite inférieure de l'erreur RMS du domaine de l'espace de rotation). Si le seuil comme étant une valeur faible,

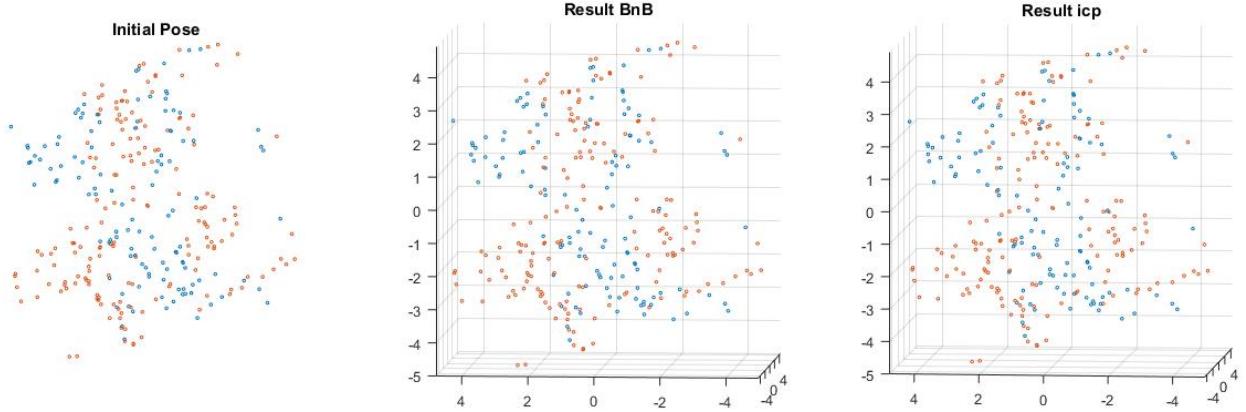


FIGURE 2.7 – Résultat de la mise en registre en 3D du modèle CAO d'origine et du modèle CAO déformé de lui-même avec $\rho = 85\%$. La figure de gauche montre leur pose initiale respective, la figure centrale montre le résultat de Go-ICP et la figure de droite montre le résultat de ICP. La conclusion est que pour un facteur de rognage important, toute mise en registre peut générer une erreur RMS faible.

mettre en registre les points de données sur des points de modèle plus précisément, mais le temps d'exécution est très long. Par ailleurs, un seuil plus élevé peut entraîner une durée d'exécution rapide, mais la précision de la mise en registre diminue. Il est intéressant de noter que l'erreur RMS optimale initiale de Go-ICP est calculée par ICP. Ainsi, pour les valeurs de seuil élevées, Go-ICP peut se terminer très rapidement, car son erreur RMS optimale initiale peut rapidement devenir inférieure au seuil spécifié. Par exemple, le temps d'exécution des objets déformés 1 et 2 avec $\varepsilon = 7$ n'est que de 1839,64 secondes pour l'objet déformé 1 et de 4258,06 secondes pour l'objet déformé 2, car ICP en tant que première étape de BnB atteint une erreur RMS de 0,685, ce qui est beaucoup plus petit que $\varepsilon = 5$ (notez que dans ce cas, la limite inférieure de l'erreur RMS était zéro) (figure 2.9). Cependant, cette erreur RMS obtenue par ICP n'est pas le minimum global. Par conséquent, nous soulignons que pour atteindre le minimum global de la fonction objective, il convient de définir le seuil de manière appropriée. La courbe de l'effet du seuil ε sur l'erreur RMS et sur le temps d'exécution est indiquée à la figure 2.9.

2.3.3 Effet de la réduction du nombre de points (Nd) sur le temps d'exécution de Go-ICP.

Nous avons également étudié l'incidence du sous-échantillonnage (down-sampling) des nuages de points sur la mise en registre obtenue par Go-ICP. Nous avons sous-échantillonné les nuages de points originaux et les nuages de points modèles et nous avons répété les expériences de mise en registre pour les objets déformés 1, 2 et 3. Nd est le facteur de réduction du nombre

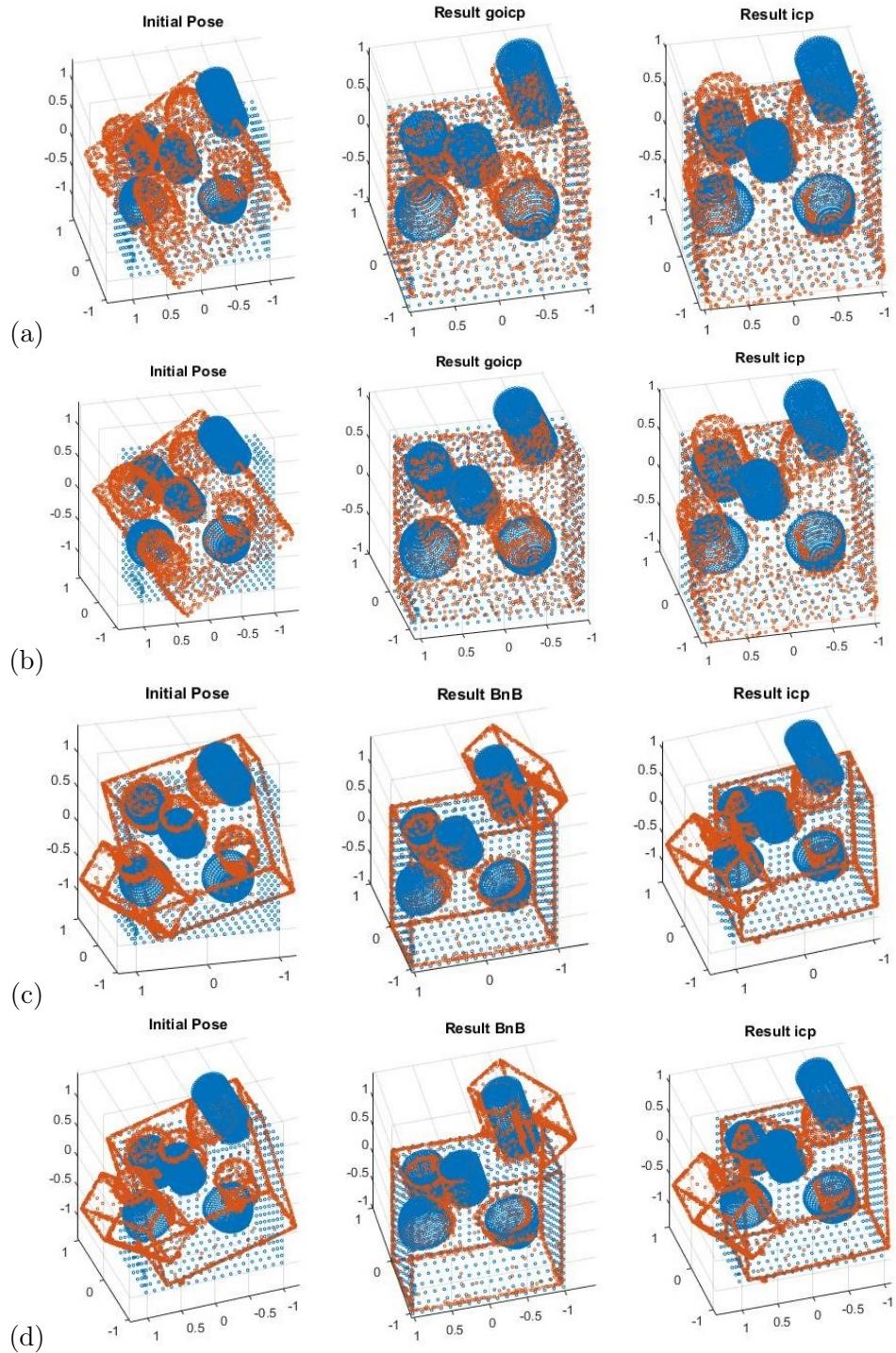


FIGURE 2.8 – L’effet du seuil ε sur la mise en registre 3D pour les objets déformés 1 et 2. Les nuages de points bleus sont les données et les nuages de points rouges sont les modèles (objets déformés). (a) est le résultat de $\varepsilon = 5, \rho = 10\%$ sur l’objet déformé 1, (b) est le résultat de $\varepsilon = 15, \rho = 10\%$ sur l’objet déformé 1, (c) est le résultat de $\varepsilon = 5, \rho = 10\%$ sur l’objet déformé 2 et (d) est le résultat de $\varepsilon = 15, \rho = 10\%$ sur l’objet déformé 2. Gauche : pose initiale, centre : la mise en registre avec Go-ICP, droite : la mise en registre avec ICP seul.

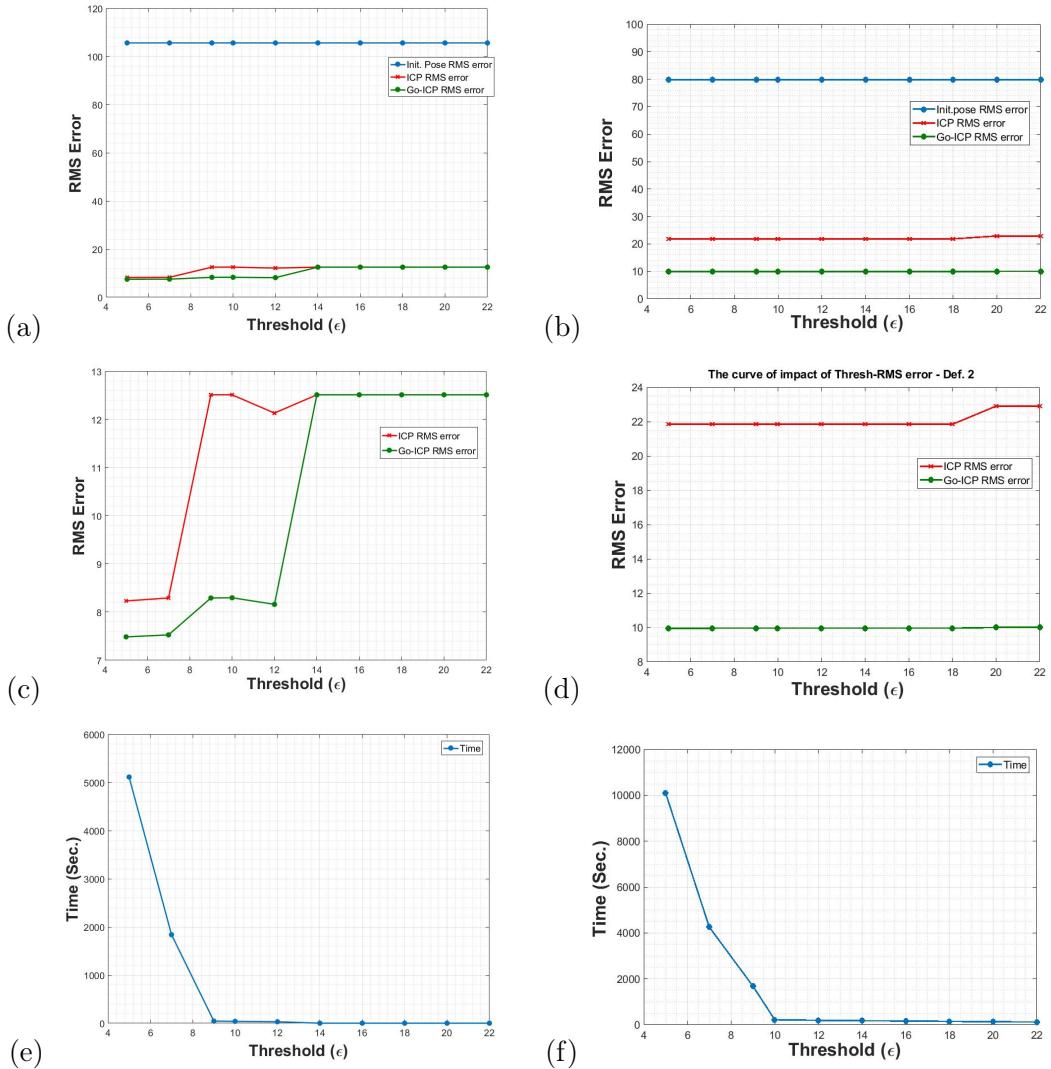


FIGURE 2.9 – La courbe de l'effet du seuil ϵ sur l'erreur de mise en registre et le temps d'exécution en secondes. Les courbes bleues dans (a, b, c et d) sont les erreurs RMS des poses initiales, les courbes rouges sont les erreurs RMS de ICP et les courbes vertes sont les erreurs RMS de Go-ICP. Effet de ϵ sur la mise en registre de l'objet déformé 1 ((a) et (c)) et de l'objet déformé 2 ((b) et (d)). Effet de ϵ sur le temps d'exécution pour l'objet déformés 1 (e) et l'objet déformé 2 (f).

de points (c.-à-d. $N_{down} = N_{total}/N_d$). La différence entre N_d et le facteur de rognage est que N_d ne sélectionne pas de points spécifiques telles que les valeurs aberrantes. En fait, N_d supprime les points de manière aléatoire tandis que le facteur de rognage supprime les valeurs aberrantes. Comme le montre la figure 2.10, les valeurs de mise en registre (R, T) sont les mêmes pour toutes les valeurs de N_d , mais le temps d'exécution varie. Il est surprenant de voir que la diminution du nombre de points ne réduit pas nécessairement le temps de calcul, en particulier pour l'objet déformé 3 de la figure 2.10 (c). Cela peut s'expliquer par le fait que

Nd ne sélectionne pas de points spécifiques tels que les points aberrants, mais considère tous les points comme étant égaux.

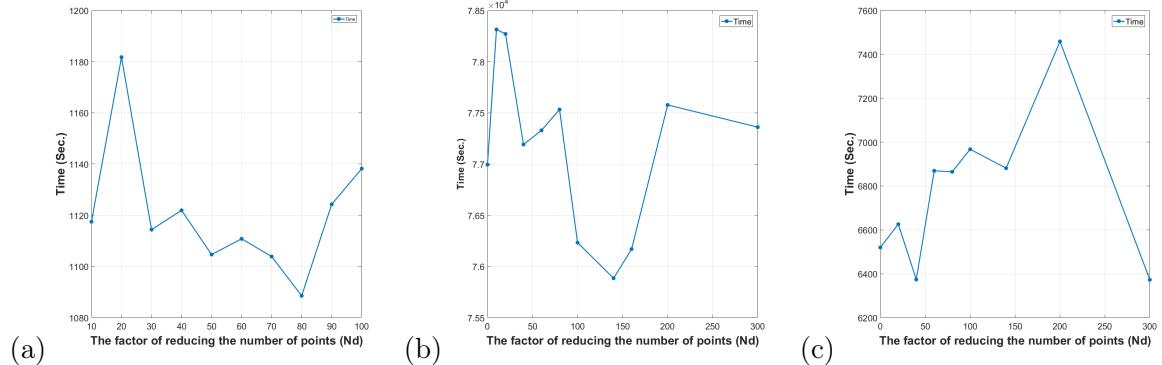


FIGURE 2.10 – Effet du facteur de sous-échantillonnage Nd sur le temps d'exécution de Go-ICP.
(a) : objet déformé 1. (b) : objet déformé 2. (c) : objet déformé 3.

2.4 Alignement de nuages de points de grandes tailles avec Go-ICP

Dans cette section, nous appliquons l'approche Go-ICP à l'alignement de nuages de points à grande échelle et montrons qu'elle peut obtenir un bon alignement.

Nous utilisons le modèle CAO d'un bâtiment avec 387 564 points de données (Fig. 9 (a)) et deux nuages de points réels à grande échelle (le nuage de points intérieur avec 8 497 325 points de données et le nuage de points extérieur avec 26 574 097 points de données), acquis par un Lidar (figure 2.11 (e, g)). Comme le montre la figure 2.11 (b), les points de données du modèle de CAO ne sont pas adéquats pour l'alignement, car ils ne sont pas répartis de manière, ce qui empêche Go-ICP de trouver l'alignement de ce modèle de CAO avec des nuages de points à grande échelle. Par conséquent, le modèle de CAO est ré-échantillonné à utilisant Blender pour donner 330 327 points de données répartis uniformément à l'intérieur et à l'extérieur (figure 2.11 (c) et (d)). Pour l'alignement, les nuages de points à grande échelle ont été rognés pour ne conserver que les points appartenant à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment (figure 2.11 (f, h)). Par conséquent, les points au sol ont été écartés pour cette expérience.

Go-ICP a pu trouver l'alignement entre le modèle de CAO ré-échantillonné et le nuage de points à grande échelle de l'intérieur et de l'extérieur du bâtiment. Pour ces expériences de mise en registre 3D, nous avons considéré que $\rho = 20\%$ pour le rognage et que $\varepsilon = 5$ pour l'erreur de la mise en registre. Le nombre de points du nuage de points recadré à l'intérieur du bâtiment est de 6 297 579. Le temps d'exécution de cette mise en registre est de 7742,02 secondes pour une erreur RMS de 6,7934. L'erreur RMS pour ICP seul était de 12,7098 (figure

2.12 (a)). Go-ICP estime les paramètres de rotation et de translation. Les paramètres sont ensuite utilisés pour aligner le modèle CAO d'origine du bâtiment sur le nuage de points recadré de l'intérieur du bâtiment. (figure 2.12 (c)).

Pour l'alignement du modèle CAO rééchantillonné et du nuage de points recadrés de l'extérieur du bâtiment, nous avons considéré qui $\rho = 20\%$ pour le rognage et que $\epsilon = 10$ pour l'erreur la mise en registre. Le nombre de points du nuage de points recadré à l'extérieur du bâtiment est de 12 841 366. Go-ICP a trouvé la mise en registre 3D illustrée aux figures 3.13 (a) et (b). Le temps d'exécution de cette mise en registre est de 3559,15 secondes pour une erreur RMS de 13,906. L'erreur RMS pour ICP seule était de 37,014. Les paramètres de mise en registre ont été utilisés pour aligner le modèle de CAO sur le nuage de points recadrés de l'extérieur du bâtiment (figure 2.13 (c) et (d)) avec Go-ICP. Il est donc possible de comparer le bâtiment réel ("tel que construit") avec le modèle CAO de la conception ("modèle tel que conçu").

Au chapitre 4, nous utilisons le Go-ICP pour aligner le modèle CAO ré-échantillonné d'un bâtiment avec un nuage de points à grande échelle sans aucune modification (aucun recadrage du nuage de points). Des expériences sur l'alignement d'objets fabriqués par l'homme et présentant de grandes déformations sont également présentées.

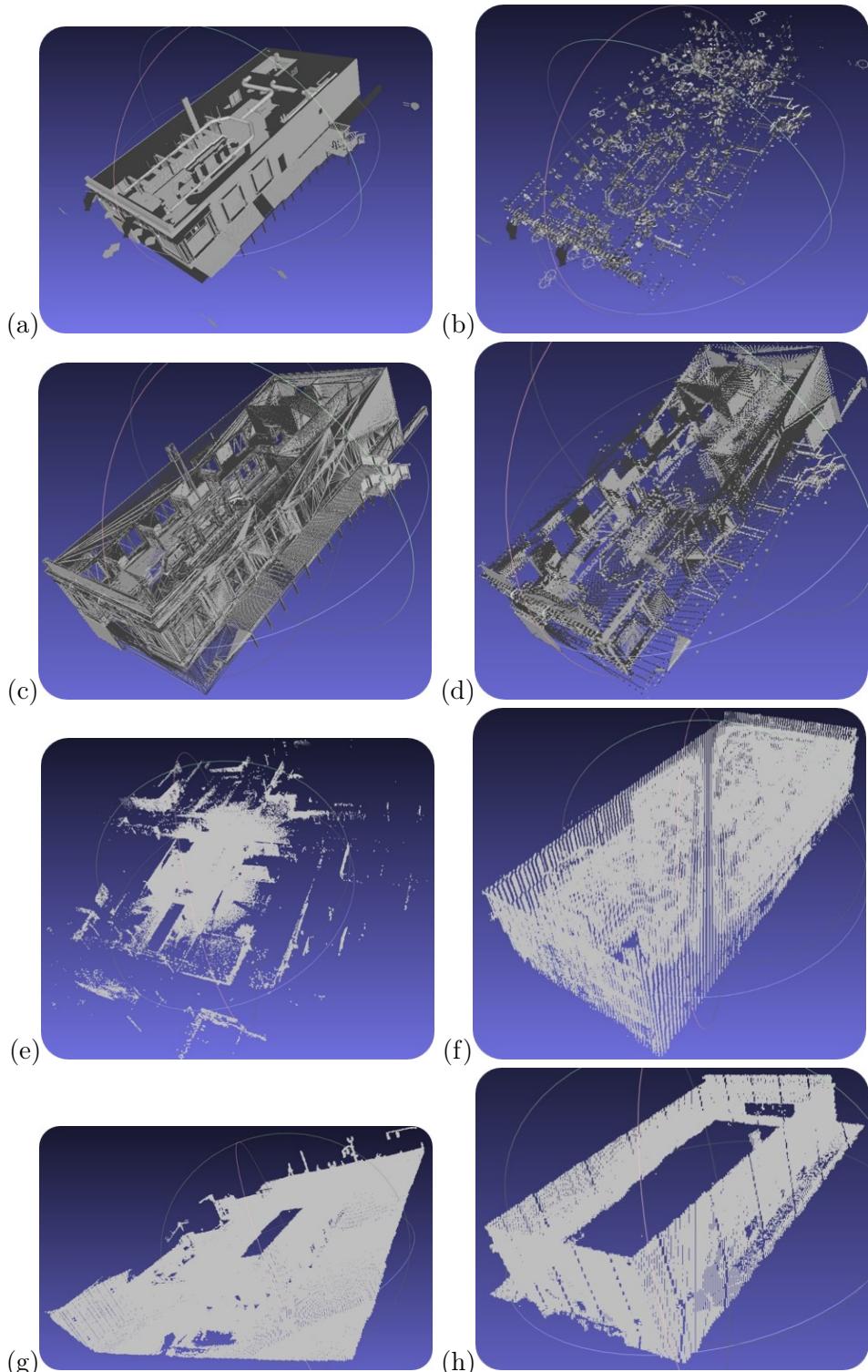
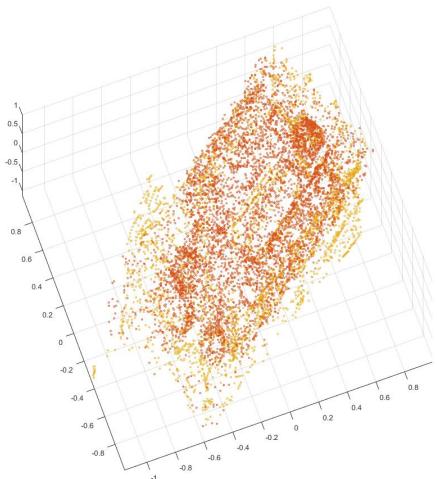
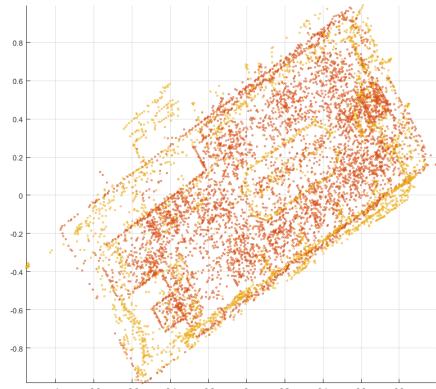


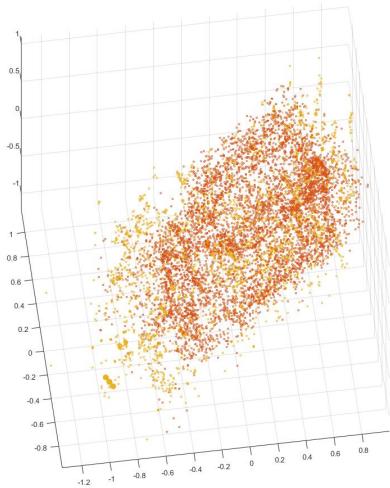
FIGURE 2.11 – Les nuages de points d'un bâtiment et ses nuages de points à grande échelle. (a, b) sont le modèle CAO du bâtiment (modèle CAO d'origine) et son nuage de points, (c, d) un ré-échantillonnage des points de données du modèle CAO d'origine avec une répartition spatiale plus uniforme des points, (e , f) est le nuage de points de l'intérieur du bâtiment et son nuage de points rogné, (g, h) est le nuage de points de l'extérieur du bâtiment et son nuage de points recadré. Ces données sont fournies par Bentley Systems (<https://www.bentley.com/en>).



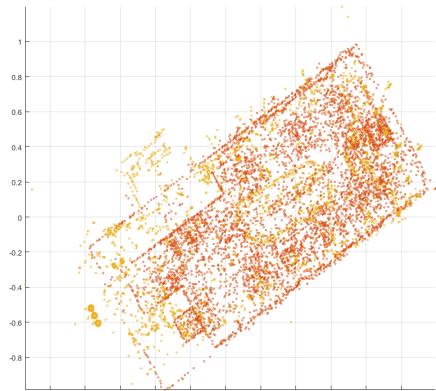
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 2.12 – Résultat de l’alignement du modèle CAO ré-échantillonné et du nuage de points de l’intérieur du bâtiment : vue XYZ (a), vue XY (b). Les points rouges sont le modèle CAO du bâtiment et les points jaunes le nuage de points de l’intérieur du bâtiment. Les paramètres de la mise en registre servent à aligner le modèle CAO d’origine sur le nuage de points : vue XYZ (c), vue XY (d).

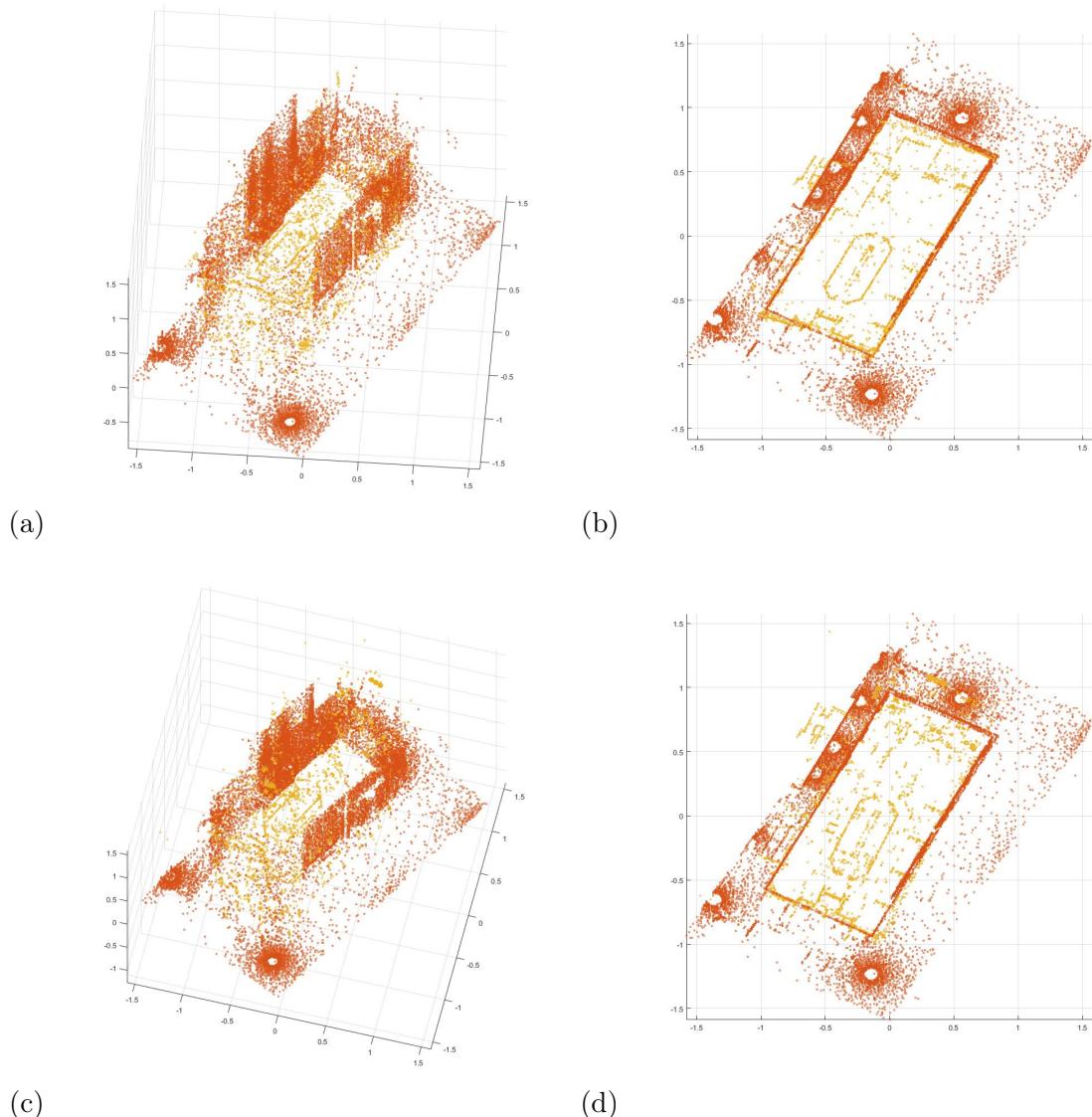


FIGURE 2.13 – Résultat de l’alignement du modèle CAO ré-échantillonné et du nuage de points de l’extérieur du bâtiment : vue XYZ (a), vue XY (b). Les points rouges représentent le modèle CAO du bâtiment et les points jaunes le nuage de points situé à l’extérieur du bâtiment. Les paramètres de la mise en registre servent à aligner le modèle CAO d’origine sur le nuage de points : vue XYZ (c), vue XY (d).

Chapitre 3

Expériences sur l’alignement du nuage de points d’objets déformés avec son modèle CAO d’origine

3.1 Modèle CAO

Dans cette section, notre objectif est d’aligner deux modèles CAO déformés en utilisant Go-ICP. Ceci est important en génie civil pour constater que ce qui a été construit ne correspond pas à ce qui avait été initialement prévu. Il est important de pouvoir comparer ce qui a été construit à ce qui avait été planifié. Pour explorer cette question, nous considérons le modèle CAO déformé 2 et le modèle CAO déformé décrit à la Section 2.2.1 (voir figure 2.2 (d, e)). La mise en registre 3D de ces modèles de CAO est difficile en raison de la déformation importante. Cependant, Go-ICP peut trouver une bonne mise en registre avec $\rho = 20\%$ et $\varepsilon = 10$. Les résultats de l’alignement sont présentés à la figure 3.1. Dans ce cas, l’erreur RMS était de 14,9752.

Comme test supplémentaire, nous avons utilisé d’autres modèles de CAO de formes différentes représentant des défis d’alignement (figure 3.2 (a, d)). Dans la première partie du test, nous avons déformé le modèle CAO illustré à la figure 3.2 (a) (et l’avons qualifié de modèle CAO 1) avec 3Ds Max et avons créé un nouveau modèle CAO (voir la figure 3.2 (b)). Le défi consiste à aligner le modèle CAO 1 et sa copie déformée pour le contrôle de la qualité, par exemple. Go-ICP a pu trouver la mise en registre 3D avec $\rho = 10\%$ et $\varepsilon = 5$ avec l’erreur RMS de 4501.87 en 965,276 secondes. Le résultat de la mise en registre est présenté à la figure 3.2 (d). Un tel alignement peut être utilisé en métrologie afin de comparer des objets avec une copie déformée d’eux-mêmes dans le but d’évaluer si la fabrication est fiable (la déformation étant reflétée par la grande valeur de l’erreur RMS).

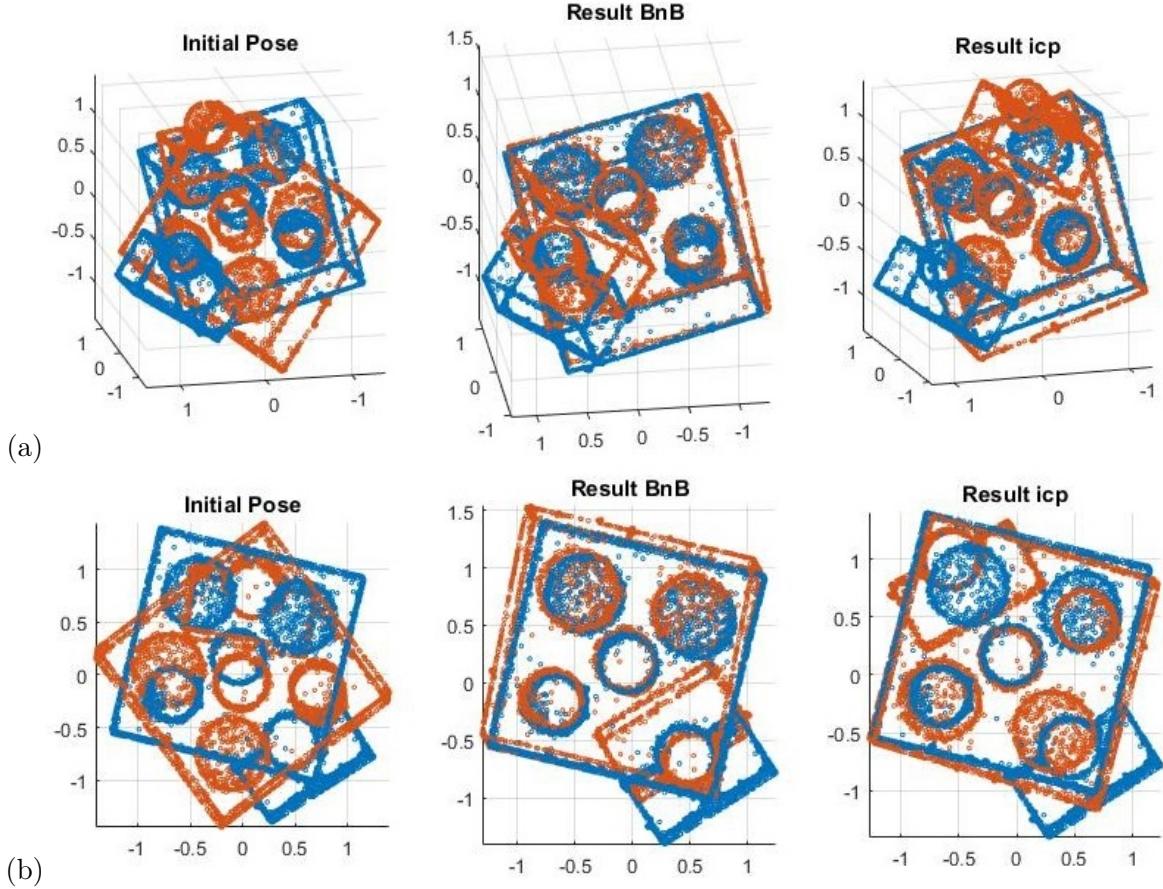


FIGURE 3.1 – Résultat de la mise en registre 3D du modèle CAO 2 déformé et du modèle CAO 3 déformé. (a) Axe XYZ, (b) Axe XZ.

Dans la deuxième partie de ce test, nous effectuons la mise en registre 3D entre le modèle CAO 1 avec le modèle CAO illustré à la figure 3.2 (e). Cette mise en registre est difficile car les deux objets sont différents, mais il peut être intéressant de les comparer dans une application de métrologie ou de visualiser les objets dans une application de réalité virtuelle. Go-ICP a réussi à aligner ces objets avec différents $\rho = 10\%$, $\varepsilon = 5$, une erreur RMS de 2051,108 et un temps d'exécution de 324,502 secondes. Le résultat est présenté à la figure 3.2 (g).

Un autre test utilisant Go-ICP pour l'alignement d'un objet et une copie déformée de lui-même est illustré à la figure 3.3. La figure 3.3 (a) montre une pièce mécanique et une copie déformée à la figure 3.3 (b). La figure 3.4 (c) montre l'alignement obtenu avec Go-ICP avec $\rho = 10\%$ et $\varepsilon = 5$ avec une erreur RMS de 227,987 en 32,119 secondes.

Un test final utilisant Go-ICP pour l'alignement de deux coupe-pommes avec des directions différentes des couteaux est illustré à la figure 3.4. La figure 3.4 (a) montre le premier coupe-pomme et l'autre coupe-pomme se trouve à la figure 3.4 (b). L'alignement de ces coupe-pommes pose quelques difficultés, car leur direction n'est pas la même. La figure 3.4 (c) montre

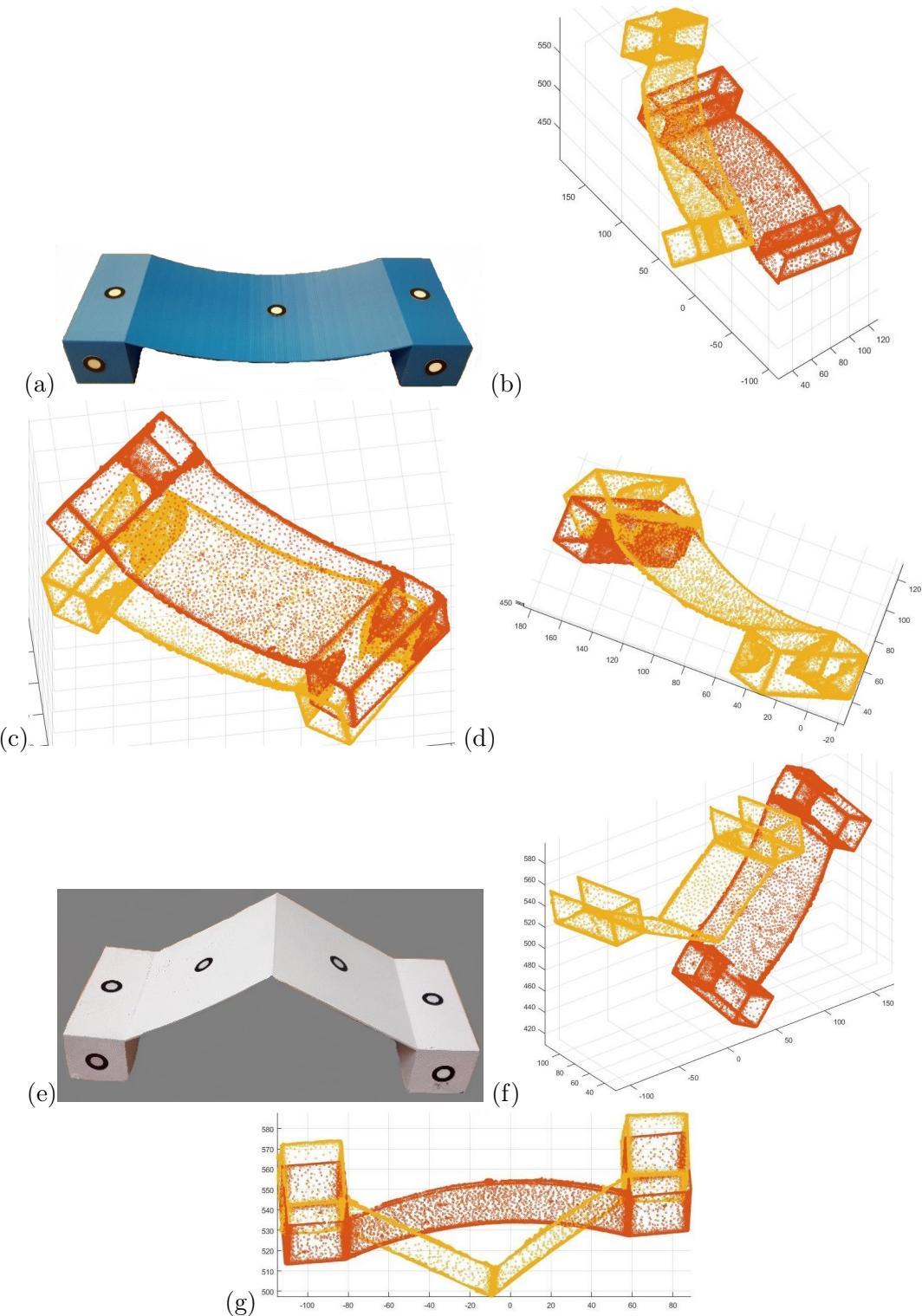


FIGURE 3.2 – Les résultats de la mise en registre 3D des modèles CAO. (a) est le modèle de CAO 1, (b) est la pose initiale et les nuages de points du modèle de CAO 1 et sa copie déformée, (c) est le résultat de l’alignement du modèle de CAO 1 et de sa copie déformée pour ICP uniquement, (d) est le résultat de l’alignement du modèle CAO 1 et de sa copie déformée, (e) du modèle CAO 2, (f) de la pose initiale et des nuages de points du modèle CAO 1 et du modèle CAO 2, (g) est le résultat de l’alignement du modèle CAO 1 et du modèle CAO 2.

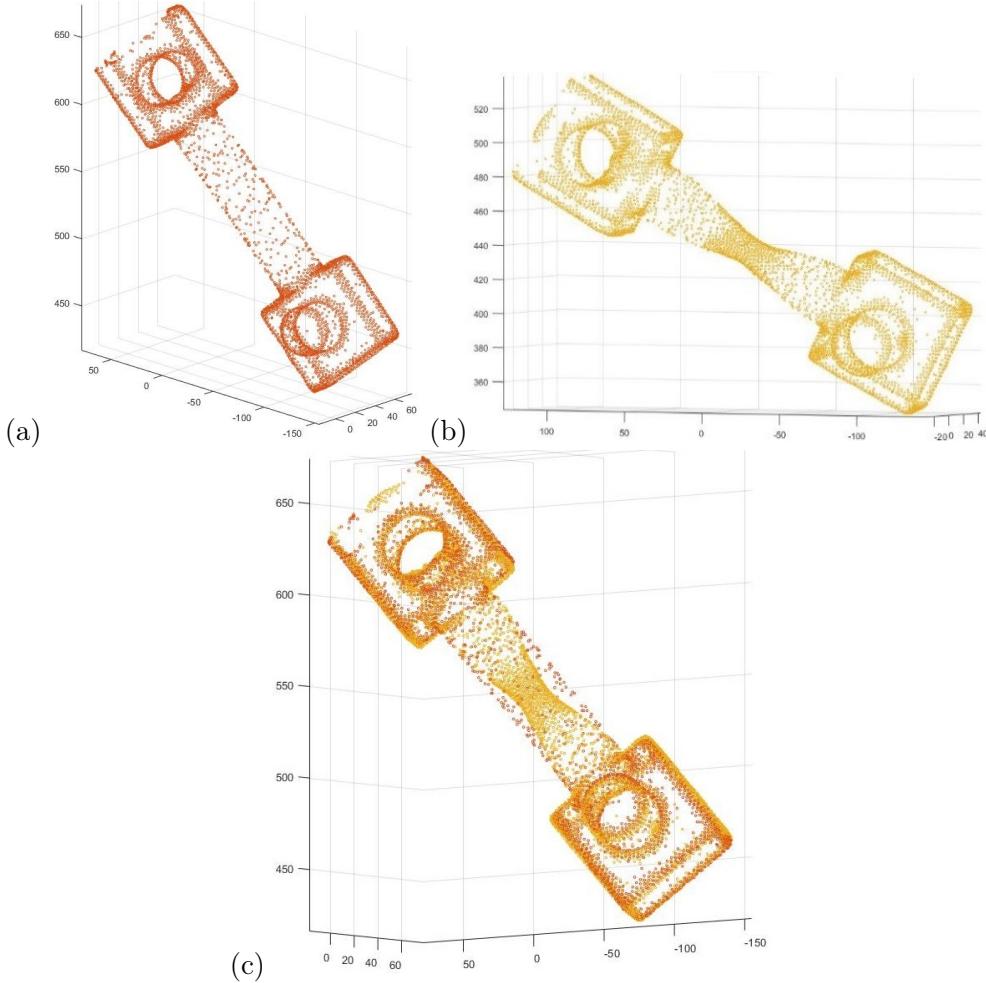


FIGURE 3.3 – Les résultats de la mise en registre 3D des pièces mécaniques. (a) le nuage de points de la pièce mécanique 1, (b) le nuage de points de la pièce mécanique 2, (c) est le résultat de l’alignement de la pièce mécanique 1 et de la pièce mécanique 2.

l’alignement obtenu avec Go-ICP avec $\rho = 10\%$ et $\varepsilon = 5$ avec une erreur RMS de 62,5959 en 8,353 secondes.

3.2 Alignement de nuages de points à grande échelle

L’expérience de mise en registre 3D la plus difficile sur laquelle Go-ICP a été testé est l’alignement de nuages de points à très grande échelle. Pour cette expérience, considérons le modèle CAO d’un bâtiment avec 42 609 points et un très grand nuage de points provenant de la zone du bâtiment d’origine avec 1 236 922 points acquis par un Lidar. La figure 3.5 (a) montre le modèle CAO du bâtiment et la figure 3.5 (b, c) montre la superficie du bâtiment et ses abords ainsi que le nuage de points correspondant.

L’objectif est d’aligner le modèle CAO du bâtiment sur le nuage de points à grande échelle

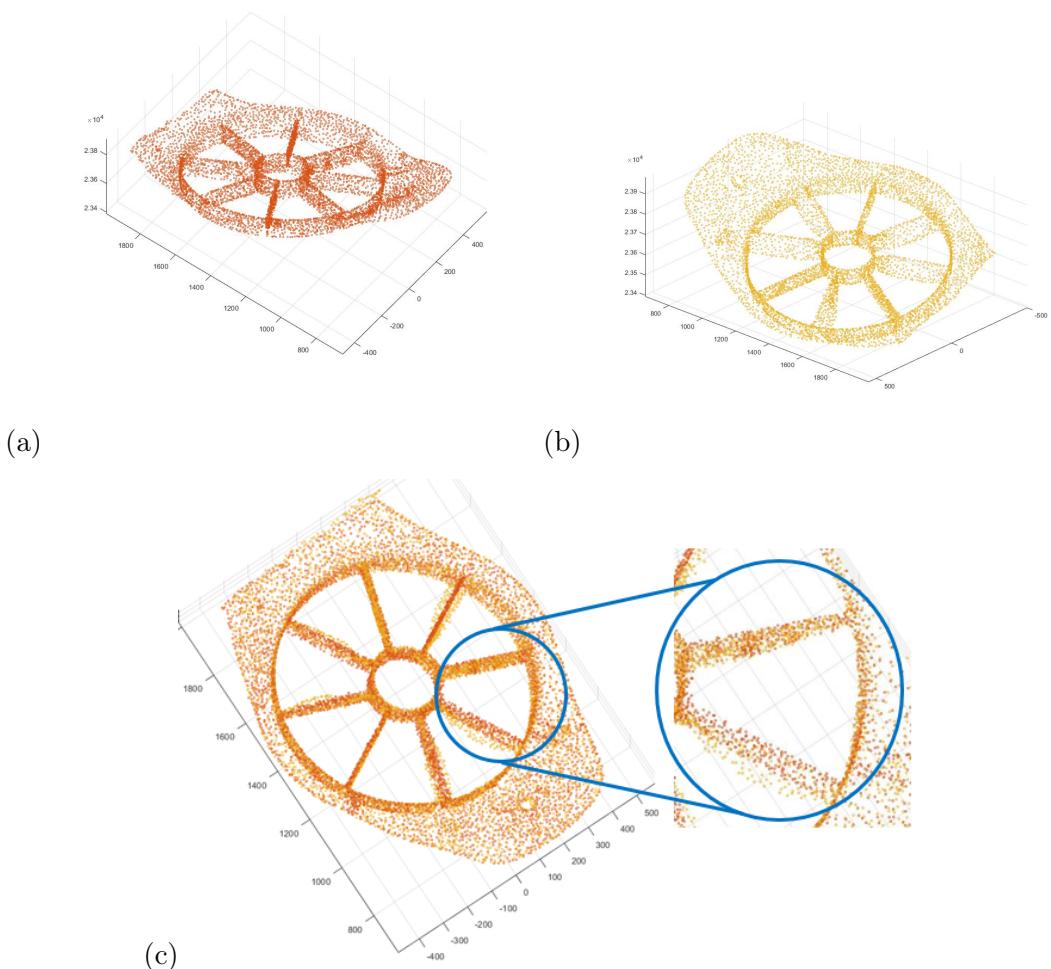


FIGURE 3.4 – Les résultats de la mise en registre 3D des coupe-pommes. (a) le nuage de points du premier coupe-pomme, (b) le nuage de points du deuxième coupe-pommes et (c) est le résultat de l’alignement du coupe-pommes 1 et du coupe-pommes 2.

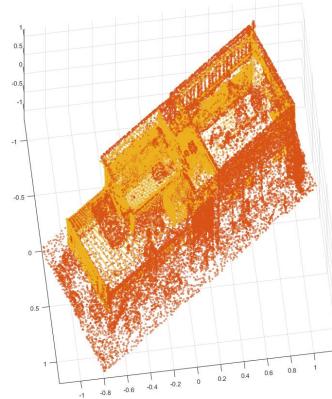
du bâtiment et de ses abords sans aucun recadrage. Cela rend le problème de mise en registre très difficile. Nous avons divisé cette expérience en deux étapes. Lors de la première étape, les points n’appartenant pas au bâtiment ont été rognés et le modèle CAO a été aligné sur les points restants (c'est-à-dire ceux qui appartenaient au bâtiment). Trouver un bon alignement demeure un défi. Néanmoins, Go-ICP a trouvé la mise en registre 3D avec $\rho = 20\%$, $\varepsilon = 20$ et une erreur RMS de 20,4129 en 48107 secondes, ce qui est une durée significative. Le résultat est illustré à la figure 3.6 (a) : vue XYZ et (b) : vue XZ.

Lors de la deuxième étape, nous avons cherché à aligner le modèle de CAO sur le nuage de points du bâtiment et de ses environs sans aucun recadrage. Ceci est un défi important en raison du nombre de points impliqués et de nombreux minima locaux de la fonction de coût.

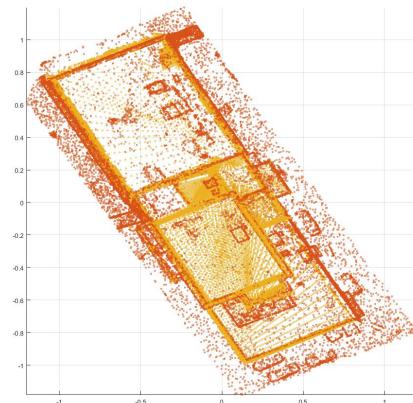


FIGURE 3.5 – Le modèle CAO du bâtiment (a), la zone réelle du bâtiment (b), le nuage de points à grande échelle de la zone (c).

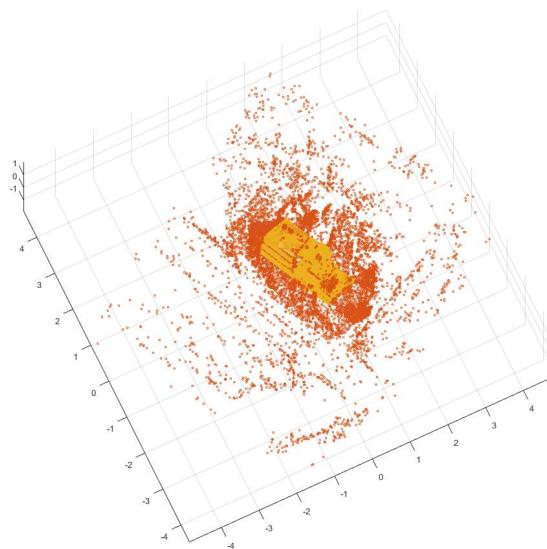
Néanmoins, Go-ICP est capable d'aligner les données avec $\rho = 20\%$ et $\varepsilon = 60$ en 186,359 secondes et avec une erreur RMS de 61,2573. La figure 3.6 (c) montre le résultat de cette mise en registre 3D. Encore une fois, cela prend beaucoup de temps, mais le résultat de la mise en registre est bon.



(a, view : xyz)



(b, view : xy)



(c)

FIGURE 3.6 – Les résultats de l’alignement entre le modèle CAO et un nuage de points à très grande échelle. Points rouges : modèle CAO ; points jaunes : bâtiment et sa superficie. (a, b) sont l’alignement 3D du modèle CAO environnant et du nuage de points d’origine du bâtiment. (c) est le résultat de la mise en registre du modèle CAO et du nuage de points du bâtiment et de ses environs sans recadrage. 43

Conclusion

L'algorithme Go-ICP a été exploité pour trouver la mise en registre entre un grand nuage de points et une copie déformée de lui-même ou avec un modèle CAD. Les expériences montrent qu'avec une sélection appropriée des hyperparamètres de l'algorithme, un bon alignement peut être obtenu. Pour les très grands nuages de points, le temps de calcul nécessaire pour obtenir un bon alignement est important. Nous utilisons actuellement Go-ICP pour trouver le premier alignement entre les modèles CAO des infrastructures de génie civil (bâtiment) et les nuages de points acquis lors de la construction. Cet alignement initial est utilisé dans une application de réalité augmentée offrant aux architectes des moyens d'évaluer si ce qui est construit ("tel que construit") correspond à ce qui a été conçu par les architectes (modèle "tel que conçu"). La mémoire démontre également que Go-ICP peut être exploité avec succès pour comparer des objets fabriqués avec des copies déformées d'eux-mêmes à des fins de contrôle de la qualité dans les applications de métrologie.

Travaux Futurs

Les travaux futurs concernent, nous proposons d'exploiter l'optimisation bayésienne (BO) ([BCD10], [SLA12]) comme une boîte à bloc permettant d'explorer de façon efficace l'espace de recherche de la mise en registre (rotation et translation) dans le but de trouver l'optimum global. D'après nos connaissances, BO et ICP n'ont pas été exploités pour le problème de mise en registre en 3D.

BO est un algorithme d'optimisation probabiliste bien connu, qui est capable de trouver l'optimum global de toute fonction objective inconnue et non convexe. En général, l'optimisation bayésienne considère une distribution antérieure sur la fonction objective, c'est-à-dire $f(x)$, puis une distribution a posteriori est calculée en recueillant de nouvelles observations à partir de la fonction objective sous-jacente. Ces nouvelles observations sont obtenues par l'évaluation de $f(x)$ à différents points nouveaux. La sélection de nouveaux échantillons à partir de la fonction objective joue un rôle essentiel dans l'optimisation bayésienne. La sélection de nouveaux échantillons peut être gérée par une fonction d'acquisition [**brochu2010tutoria**].

Bien que la fonction objective de la mise en registre 3D, cette fonction objective est hautement non convexe [Yan+16]. Par conséquent, nous proposons d'exploiter BO en tant que boîte à

bloc pour trouver l'optimum global d'un problème aussi hautement non convexe. L'espace de recherche pour le problème de mise en registre est, où et indiquer les espaces de rotation (R) et de translation (t), respectivement. Notez qu'il peut être facilement réglé. Comme mentionné précédemment, la fonction objective a la forme fermée suivante : BO a deux facteurs importants : I) la distribution préalable sur la fonction objective : nous considérerons le processus de Gauss (Gaussian Process, GP) en raison de sa flexibilité et de sa facilité de traitement [SLA12] et II) la fonction d'acquisition (utilité), qui est chargée d'indiquer où la prochaine observation devrait être choisie. Dans la littérature, il existe plusieurs fonctions d'acquisition, telles que l'amélioration de l'attente (Expectation Improvement, EI) et la probabilité d'amélioration (Probability of Improvement, PI). L'EI est capable de localiser la prochaine observation avec plus de précision. Comme BO a plusieurs hyper-paramètres, nous allons ajuster l'hyper-paramètre pour la mise en registre 3D.

Bibliographie

- [BM92] Paul J BESL et Neil D MCKAY. “Method for registration of 3-D shapes”. In : *Sensor fusion IV : control paradigms and data structures*. T. 1611. International Society for Optics et Photonics. 1992, p. 586-606.
- [BL95] Gérard BLAIS et Martin D. LEVINE. “Registering multiview range data to create 3D computer objects”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17.8 (1995), p. 820-824.
- [IR99] Sandy IRANI et Prabhakar RAGHAVAN. “Combinatorial and experimental results for randomized point matching algorithms”. In : *Computational Geometry* 12.1-2 (1999), p. 17-31.
- [JH99] Andrew E. JOHNSON et Martial HEBERT. “Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes”. In : *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence* 21.5 (1999), p. 433-449.
- [BMP02] Serge BELONGIE, Jitendra MALIK et Jan PUZICHA. “Shape matching and object recognition using shape contexts”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence* 4 (2002), p. 509-522.
- [Bre03] Thomas M BREUEL. “Implementation techniques for geometric branch-and-bound matching methods”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 90.3 (2003), p. 258-294.
- [Gel+05] Natasha GELFAND et al. “Robust global registration”. In : *Symposium on geometry processing*. T. 2. 3. Vienna, Austria. 2005, p. 5.
- [SBB05] Luciano SILVA, Olga Regina Pereira BELLON et Kim L BOYER. “Precision range image registration using a robust surface interpenetration measure and enhanced genetic algorithms”. In : *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 27.5 (2005), p. 762-776.
- [MPD06] Ameesh MAKADIA, Alexander PATTERSON et Kostas DANILIDIS. “Fully automatic registration of 3D point clouds”. In : *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*. T. 1. IEEE. 2006, p. 1297-1304.

-
- [LH07] Hongdong LI et Richard HARTLEY. “The 3D-3D registration problem revisited”. In : *2007 IEEE 11th international conference on computer vision*. IEEE. 2007, p. 1-8.
- [AMC08] Dror AIGER, Niloy J MITRA et Daniel COHEN-OR. “4-points congruent sets for robust pairwise surface registration”. In : *ACM transactions on graphics (TOG)*. T. 27. 3. ACM. 2008, p. 85.
- [OKO08] Carl OLSSON, Fredrik KAHL et Magnus OSKARSSON. “Branch-and-bound methods for euclidean registration problems”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 31.5 (2008), p. 783-794.
- [RBB09] Radu Bogdan RUSU, Nico BLODOW et Michael BEETZ. “Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration”. In : *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2009, p. 3212-3217.
- [SDT09] Romeil SANDHU, Samuel DAMBREVILLE et Allen TANNENBAUM. “Point set registration via particle filtering and stochastic dynamics”. In : *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 32.8 (2009), p. 1459-1473.
- [BCD10] Eric BROCHU, Vlad M CORA et Nando DE FREITAS. “A tutorial on Bayesian optimization of expensive cost functions, with application to active user modeling and hierarchical reinforcement learning”. In : *arXiv preprint arXiv :1012.2599* (2010).
- [PB11] Chavdar PAPAZOV et Darius BURSCHKA. “Stochastic global optimization for robust point set registration”. In : *Computer Vision and Image Understanding* 115.12 (2011), p. 1598-1609.
- [PSK12] Frank PFEUFFER, Michael STIGLMAYR et Kathrin KLAMROTH. “Discrete and geometric branch and bound algorithms for medical image registration”. In : *Annals of Operations Research* 196.1 (2012), p. 737-765.
- [SLA12] Jasper SNOEK, Hugo LAROCHELLE et Ryan P ADAMS. “Practical bayesian optimization of machine learning algorithms”. In : *Advances in neural information processing systems*. 2012, p. 2951-2959.
- [MAM14] Nicolas MELLADO, Dror AIGER et Niloy J MITRA. “Super 4pcs fast global point-cloud registration via smart indexing”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 33. 5. Wiley Online Library. 2014, p. 205-215.
- [PCS14] Alvaro PARRA BUSTOS, Tat-Jun CHIN et David SUTER. “Fast rotation search with stereographic projections for 3D registration”. In : *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2014, p. 3930-3937.
- [Yan+16] Jiaolong YANG et al. “Go-ICP : A globally optimal solution to 3D ICP point-set registration”. In : *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 38.11 (2016), p. 2241-2254.

[ZPK16] Qian-Yi ZHOU, Jaesik PARK et Vladlen KOLTUN. “Fast global registration”. In : *European Conference on Computer Vision*. Springer. 2016, p. 766-782.