

Automatisation de l'Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D

Benjamin Loriot

▶ **To cite this version:**

Benjamin Loriot. Automatisation de l'Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D. Autre [cs.OH]. Université de Bourgogne, 2009. Français. NNT : . tel-00371269

HAL Id: tel-00371269

https://theses.hal.science/tel-00371269

Submitted on 27 Mar 2009

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

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

Université de Bourgogne
Ecole Doctorale Environnement - Santé / STIC (E2S)

Thèse

présentée par

Benjamin Loriot

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université

discipline Instrumentation et Informatique de l'Image

Automatisation de l'Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D

Soutenue le 25 mars 2009

Jury

Yvon VOISIN	Professeur à l'Université de Bourgogne	Président
Mohamed DAOUDI	Professeur à Telecom Lille 1	Rapporteur
Muriel LOMBARD	Université de Nancy 1	Rapporteur
Patrick GORRIA	Professeur à l'Université de Bourgogne	Examinateur
Ralph SEULIN	Ingénieur de Recherche	Examinateur
William IVALDI	Société Dynamic3D	Examinateur

Remerciements

Cette thèse est le résultat d'une collaboration entre le Laboratoire LE2I [1] et la société Dynamic 3D [2]. Elle a bénéficié d'un financement de l'ANRT à travers une bourse CIFRE n°880/2006.

Je tiens à remercier les Professeurs Jean-Marie BILBAULT et David FOFI, respectivement directeur du laboratoire et responsable de l'équipe creusotine, de m'avoir accueilli au Laboratoire LE2I, ainsi que Patrick BELLENGER, directeur de la société Dynamic 3D, pour m'avoir permis de travailler au sein de l'entreprise.

Je souhaite vivement remercier Madame Muriel LOMBARD, Maître de Conférence à l'Université de Nancy 1, et Messieurs Mohamed DAOUDI, Professeur à Télécom Lille 1, et Yvon VOISIN, Professeur de l'Université de Bourgogne, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être respectivement rapporteurs de ce mémoire et président du jury.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Messieurs Patrick GORRIA et Ralph SEULIN, respectivement directeur de thèse et encadrant, pour leurs précieux conseils et leur soutien tout au long de ma thèse. Je suis également reconnaissant à Ghislain MORET de ROCHEPRISE et William IVALDI, respectivement directeur des opérations et responsable R&D à Dynamic 3D, pour leurs remarques pertinentes sur mes travaux.

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants-chercheurs, doctorants et stagiaires du Creusot, sans oublier Nathalie, avec qui j'ai eu l'immense plaisir de travailler durant cette thèse, ainsi qu'à la première équipe de production de Dynamic 3D, qui m'a beaucoup apporté lors de mes recherches. Je remercie également les membres de la Plateform3D pour leur aide à chaque problème technique.

Je n'oublierais pas non plus ma famille, mes amies et amis, pour leur soutien et leur sympathie durant ces trois années de thèse.

1. Laboratoire LE2I UMR CNRS 5158, 12 rue de la fonderie, 71200 LE CREUSOT
2. Dynamic3D, Campus Industriel route de Demigny bât. 18, 71102 CHALON-SUR-SAONE Cedex

Résumé

L'automatisation de la numérisation est une étape indispensable au développement de la mesure tridimensionnelle, et ce, dans différents domaines :
– en milieu industriel, afin d'accélérer les procédures de contrôle de pièces,
– en archéologie et en biologie, pour l'étude de collections de plusieurs centaines voire milliers d'objets (dont l'acquisition est pour le moment impossible en raison du temps nécessaire, et donc du coût).

Dans ce mémoire, nous détaillons tout d'abord les différents systèmes d'acquisition et de positionnement existants, en détaillant les avantages et inconvénients de chaque système. Nous présentons ensuite la méthodologie mise en place pour guider l'opérateur dans ces choix ainsi que l'outil d'aide mis en place afin de formaliser cette méthodologie. Puis nous argumenterons de la nécessité de l'automatisation de la numérisation 3D en illustrant les limites et les contraintes des solutions actuellement en place. Des exemples d'application de la méthodologie sont décrits à travers différentes études de cas, mettant en évidence le temps d'intervention de l'opérateur. Ensuite, les méthodes d'automatisation de l'acquisition existantes sont décrites, en expliquant leurs limites face à notre problématique. Deux méthodes sont ensuite proposées : la première définit une planification de vues hors-ligne à partir d'un modèle de référence ("Model Based Method") tandis que la seconde calcule la meilleure position suivante ("Next-Best-View") sans aucune information a priori sur l'objet ("Non-Model BasedMethod"). Ces deux méthodes permettent une numérisation complète d'un objet sans intervention d'un opérateur. Afin de tester ces méthodes, un environnement de simulation a été implémenté, ainsi qu'un prototype. Enfin, les résultats obtenus sont présentés et comparés à une numérisation manuelle.

Mots-clefs : numérisation 3D, automatisation, planification de vues, Next-Best-View

---

Abstract

Automation of acquisition and post-processing for 3D digitalisation

The automation of digitalisation is an indispensable step in the development of 3D measuring, in various fields :
– in industry, to accelerate the procedures for control of parts,

– in archaeology and biology, for the study of collections of several hundreds even thousand objects (for which the acquisition is for the moment impossible because of necessary time, and thus of the cost)

In this thesis, we explain first the various existing systems of acquisition and positioning, by detailing the advantages and the inconveniences of every system. We present then the developed methodology to guide the operator in these choices as well as the tool set up to formalize this methodology. Then we will study the necessity of the automation of the 3D digitalization by illustrating the limits and the constraints of the solutions in place at present. Some examples of application of the methodology are described through various case studies, highlighting the time of intervention of the operator. Then, existing methods for automating the acquisition are described, explaining their limits. Two methods are proposed : the first defines a off-line viewplanning from a reference model (Model Based Method) while the second calculates the next best position (Next-Best-View) without any a priori information on the object (Non-Model Based Method). Both methods allow the complete digitalization of an object without intervention of an operator. To test these methods, a simulation environment and a prototype have been developed. Finally, the results are presented and compared to a manual digitalization.

Keywords : 3D scanning, automation, view planning, Next-Best-View

Table des matières

1 Introduction **1**

1.1 Motivations . . . 2
1.2 Contributions . . . 3
1.3 Organisation du document . . . 4

2 Etat de l'art des systèmes d'acquisition 3D **6**

2.1 Contact (Palpeur) . . . 7
2.2 Triangulation passive . . . 8
2.2.1 Vision stéréoscopique ou stéréovision . . . 8
2.2.2 Photogrammétrie . . . 9
2.2.3 Vision catadioptrique . . . 10
2.3 Triangulation active . . . 12
2.3.1 Lumière structurée : point . . . 13
2.3.2 Lumière structurée : ligne . . . 14
2.3.3 Lumière structurée : motif binaire ou couleur . . . 16
2.3.4 Triangulation laser dans l'infrarouge . . . 17
2.4 Temps de vol (Time Of Flight : TOF) . . . 17
2.4.1 Détection de pulse . . . 19
2.4.2 Modulation en amplitude . . . 20
2.4.3 Temps-de-vol TC/SPC ("Time-Correlated Single Photon Counting") 22
2.5 Techniques d'extraction d'informations de forme, "Shape from X" . . . 23
2.5.1 Reconstruction à partir des contours, "Shape from Silhouettes" . 23
2.5.2 Reconstruction à partir de la mesure du flou, "Shape from Focus" 25
2.5.3 Reconstruction à partir des informations de polarisation, "Shape from Polarization" . . . 25
2.6 Systèmes de positionnement . . . 26
2.6.1 Plateau rotatif . . . 26
2.6.2 Machine à Mesurer Tridimensionnelle - MMT . . . 27
2.6.3 Bras robotisé . . . 28
2.6.4 Bras polyarticulé . . . 29

2.6.5 Systèmes de suivi optique et laser . . . 30
2.7 Synthèse et conclusion . . . 31

3 Méthodologie pour la numérisation 3D **36**
3.1 Représentation des données 3D . . . 38
3.1.1 Nuage de points . . . 38
3.1.2 Maillage . . . 38
3.1.3 Surfaces . . . 40
3.2 Propriétés intrinsèques de l'objet . . . 41
3.3 Applications possibles et dimensions de l'objet . . . 44
3.3.1 Analyse . . . 45
3.3.2 Visualisation . . . 47
3.3.3 Duplication . . . 48
3.3.4 Synthèse . . . 49
3.4 Choix du scanner et protocoles d'acquisitions . . . 50
3.4.1 Capteurs point ou ligne sur MMT . . . 50
3.4.2 Scanners à acquisition par vue . . . 52
3.4.3 Scanners laser ligne sur bras polyarticulé ou tracker optique . . . 53
3.4.4 Synthèse . . . 54
3.5 Post-traitements . . . 55
3.5.1 Filtrage du bruit . . . 55
3.5.2 Triangulation . . . 58
3.5.3 Segmentation et nettoyage . . . 59
3.5.4 Recalage manuel / automatique et fusion des vues . . . 60
3.5.5 Bouchage des trous . . . 62
3.5.6 Gestion de la texture . . . 63
3.5.7 Synthèse . . . 64
3.6 Outil d'aide à la numérisation 3D . . . 65
3.7 Applications - Etudes de cas . . . 66
3.7.1 Pièces de monnaie . . . 66
3.7.2 Champs de fouilles . . . 68
3.7.3 Statue de la Seine . . . 69
3.7.4 Tête de la Vivre . . . 70
3.7.5 Reliures de livres anciens . . . 71
3.7.6 Tests d'oursins . . . 71
3.7.7 Synthèse . . . 72
3.8 Conclusion . . . 73

4 Méthodes d'automatisation de la numérisation 3D **75**
4.1 Méthodes de planification de vues . . . 76
4.1.1 Méthodes basées sur un modèle . . . 76
4.1.2 Méthodes non basées sur un modèle . . . 81
4.1.2.1 Méthodes volumiques . . . 82
4.1.2.2 Méthodes surfaciques . . . 84
4.1.3 Synthèse . . . 91
4.2 Méthodes proposées . . . 93
4.2.1 Méthode basée sur un modèle . . . 94
4.2.1.1 Génération des points de vues . . . 96
4.2.1.2 Génération de la planification . . . 97
4.2.2 Méthode non basée sur un modèle . . . 99
4.2.2.1 Première étape : "Mass Vector Chain" (ou MVC) . . . 99
4.2.2.2 Deuxième étape : acquisition des données manquantes 104
4.2.3 Conclusion . . . 110
4.3 Environnement de simulation . . . 111
4.3.1 Configuration du scanner virtuel . . . 112
4.3.2 Création d'une vue . . . 114
4.3.3 Traitements . . . 115
4.3.4 Intégration des méthodes développées . . . 118
4.3.5 Prototype de validation . . . 118
4.3.6 Système de numérisation 3D . . . 123
4.3.7 Synthèse . . . 126
4.4 Expérimentation et résultats . . . 128
4.4.1 Comparaison à la numérisation manuelle . . . 129
4.4.2 Position intiale . . . 132
4.5 Conclusion . . . 133

5 Conclusion générale et perspectives **135**

Bibliographie **139**

Table des figures **147**

Liste des tableaux **152**

Chapitre 1

Introduction

Durant ces vingts dernières années, la vision tridimensionnelle a pris une place de plus en plus importante dans différents domaines : l'industrie (contrôle dimensionnel), l'archéologie (analyse d'objets fragiles), la mode (cabine d'essayage virtuelle), la médecine (chirurgie esthétique et réparatrice), le sport (amélioration des équipements), ou encore les jeux vidéos (augmentation du réalisme). Les modèles 3D peuvent être conçus dans des modeleurs logiciels ou créés à partir d'objets réels dont la forme à été acquise grâce à des scanners tridimensionnels.

Ces systèmes permettent l'acquisition sans contact de la géométrie 3D d'un objet réel, ce qui permet de réaliser des mesures de caractéristiques de l'objet. De nos jours, de nombreux systèmes commerciaux sont disponibles, utilisant diverses technologies comme la triangulation active ou la photogrammétrie. Pour tous ces systèmes, au même titre qu'il est nécessaire de prendre plusieurs photographies pour visualiser complètement un objet, plusieurs prises de vue suivant des points de vue différents sont nécessaires, afin d'acquérir la forme complète d'un objet. Ces acquisitions doivent ensuite être segmentées (suppression des données aberrantes) et recalées entre elles dans le même référentiel, afin d'obtenir un modèle 3D complet.

La procédure de numérisation 3D se décompose en trois étapes :
- la préparation à la numérisation : analyse de l'objet (dimensions, matière), poudrage, choix du système
- l'acquisition 3D : chaque système de numérisation 3D possède son propre protocole d'acquisition
- les traitements des données acquises : les données brutes ne peuvent être utilisées directement (débruitage, recalage, triangulation . . .)

Pour chacune de ces étapes, l'expérience de l'opérateur joue un rôle primordial dans la qualité du modèle 3D final. C'est lui qui détermine les différents points de vue ainsi que les post-traitements à appliquer en fonction de l'application visée (analyse, duplication, visualisation).

1.1 Motivations

Ce travail de thèse a été effectué dans l'équipe Vision 3D du Laboratoire Le2i (Laboratoire Electronique et Informatique de l'Image, UMR-CNRS 5158), à l'IUT du Creusot, et au sein de la société Dynamic3D. Le laboratoire, initialement spécialisé dans le contrôle qualité par vision artificielle, s'est progressivement tourné vers la vision tridimensionnelle, dans les domaines de l'acquisition et du traitement de l'information. Afin de répondre aux demandes des industriels, le laboratoire a participé à l'incubation de la société Dynamic3D, en mettant en place une démarche partenariale en recherche et développement. La société Dynamic3D est prestataire de services en numérisation 3D et conçoit des systèmes de contrôle dédiés.

La première problématique rencontrée a été de rationaliser les procédures de numérisation. En effet, la réalisation des différentes étapes de la numérisation 3D dépend de l'opérateur et de son expérience : le temps de numérisation, le temps de post-traitements et la qualité du modèle 3D final sont différents en fonction de ces connaissances. Or, pour une société de services, ces paramètres sont essentiels pour la planification et le chiffrage des prestations.

Une autre problématique rencontrée par la société est la numérisation 3D de grandes séries d'objets, dans le domaine de l'habillement par exemple. Ces séries ne peuvent être numérisées manuellement en raison de la quantité, et donc du coût d'intervention qui serait répercuté sur le client. Confrontés à ce problème, notre travail a été motivé par la recherche et le développement de méthodologies pour la numérisation automatique d'objets de formes variées. L'objectif ici est donc la numérisation de masse, sans intervention de l'opérateur.

Deux cas peuvent se présenter : la planification de vues à partir d'un modèle de référence ou la numérisation d'objets de forme a priori inconnue (objets naturels, artistiques, anciens ...). Dans le premier cas, le modèle de référence est généralement un modèle CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Ces modèles sont créés par modélisation informatique et sont définis par des surfaces paramétriques. Ils sont utilisés en industrie

dans les phases précédant la fabrication de l'objet. Le modèle référence peut également être un modèle maillé, résultant d'une première numérisation (manuelle ou préprogrammée). Lorsqu'une référence est disponible, l'objectif est de définir hors-ligne les différentes positions nécessaires et optimales à la numérisation de l'objet. De nos jours, cette planification est réalisée manuellement par un opérateur pour chaque type de pièce à numériser, sans utilisation des informations du modèle CAO.

Pour la numérisation d'objets naturels (comme des fossiles par exemple), les modèles de référence sont inexistants. Or, pour réaliser des études à grande échelle, de nombreux laboratoires et musées ont besoin de numériser leurs collections. Une collection regroupe un type d'objet dont tous les spécimens sont légèrement différents, et ces collections peuvent compter plusieurs milliers voire centaines de milliers de pièces. Le coût de la numérisation de ces objets par un opérateur est actuellement prohibitif en raison du temps nécessaire : à titre d'exemple, le trésor de Liffré est composé d'environ 1100 pièces de monnaies gauloises. A raison de l'acquisition et du post-traitements de quatre pièces par jour, il faudrait environ 9 mois pour numériser la collection.

Dans les deux cas présentés ici, l'automatisation est une étape obligatoire pour le développement de la numérisation 3D. Les méthodes à mettre en place doivent être les plus rapides possibles et ainsi permettre de réduire le temps et le coût d'intervention d'un utilisateur, principalement dans le cas de la numérisation de grandes séries.

1.2 Contributions

Dans une premier temps, nous décrivons dans ce mémoire la méthodologie développée afin de formaliser les différentes procédures de numérisation 3D. Celle-ci suit les trois étapes de la numérisation :

- préparation : en fonction des dimensions de l'objet et de l'application visée, différents systèmes sont proposés à l'opérateur.
- acquisition : le protocole d'acquisition du système choisi est décrit, en précisant les avantages et inconvénients.
- post-traitements : les différents traitements à appliquer aux données acquises sont décrits, en attirant l'attention de l'utilisateur sur les effets non souhaités.

Nous présentons ensuite deux méthodes d'automatisation de la numérisation 3D, afin d'apporter une solution aux deux cas de figure précédemment décrits. L'objectif de ces

méthodes est d'obtenir un taux de complétude maximum de la surface de l'objet en un minimum de temps.

La première méthode est basée sur un modèle de référence (*"Model Based Method"*) et s'appuie sur la méthode développée par Tarbox [Tarbox and Gottschlich, 1995b] et reprise par Scott [Scott, 2005]. Elle permet de définir hors-ligne les différentes positions nécessaires à la numérisation complète d'un objet. La seconde méthode n'utilise aucune information a priori sur l'objet (*"Non-Model Based Method"*). Il s'agit d'une méthode itérative en deux phases. La première phase est basée sur les travaux de Yuan [Yuan, 1995]. La seconde phase s'appuie sur le manque de données parmi les vues acquises pour le calcul et l'orientation du scanner. La qualité du maillage et de la résolution du modèle 3D obtenu sont contrôlées après chaque acquisition.

Ces deux méthodes ont été implémentées dans un environnement de simulation, afin de les valider sans contraintes dues à un système de positionnement. Dans le même temps, un premier prototype à cinq degrés de liberté (trois translations et deux rotations) a été utilisé, afin de structurer les procédures et de valider les méthodes en conditions réelles. L'implémentation des méthodes sur un bras robotisé a également été préparée.

1.3 Organisation du document

Le chapitre 2 expose un état de l'art sur les différentes technologies permettant l'acquisition de données géométriques. Les systèmes de positionnement associés sont également passés en revue. Les avantages et les inconvénients de chaque système sont analysés.

Le chapitre 3 présente la méthodologie que doit suivre l'opérateur durant la numérisation 3D. Ce chapitre se base sur les systèmes d'acquisition présents au laboratoire et dans la société : capteurs à triangulation laser ligne sur MMT (Machine à Mesurer Tridimensionnelle) ou bras polyarticulé, scanners temps-de-vol, scanners à triangulation laser à acquisition par vue, système "Depth from Focus". A partir de cette méthodologie, nous avons mis en place un outil d'aide à la numérisation 3D afin d'aider l'opérateur dans ses choix. Nous présentons également à la fin de ce chapitre différentes études de cas pour lesquelles cette méthodologie a été appliquée, afin d'illustrer l'exploitation industrielle.

Le chapitre 4 présente les méthodes d'automatisation de l'acquisition 3D. Ces méthodes permettent de résoudre le problème de "Next-Best-View" (ou NBV) : définir la

meilleure position suivante pour l'acquisition, et ainsi définir la planification des vues. Ces méthodes sont classées en deux catégories, les méthodes basées et non basées sur un modèle. La suite du chapitre présente les méthodes développées et implémentées. Le simulateur de numérisation et les prototypes mis en place sont également décrits, ainsi que les résultats obtenus.

Nous présentons au cours du chapitre 5 nos conclusions et les pistes de recherches potentielles liées à l'automatisation de la numérisation 3D.

Chapitre 2

Etat de l'art des systèmes d'acquisition 3D et des méthodes de post-traitements

Au cours de ces 30 dernières années, le développement de systèmes d'acquisition de données 3D a fortement progressé. Ces systèmes de mesure sont apparus dans les laboratoires dans les années 80 et s'implantent de plus en plus rapidement de nos jours dans de nombreux secteurs (l'industrie, la conservation du patrimoine, la biologie...). En 1988, Besl [Besl, 1988] présente un état de l'art des méthodes d'acquisitions 3D actives et optiques et compare les différents systèmes existant à l'époque. En 2000, Beraldin [Beraldin et al., 2000] décrit les principes et les technologies des systèmes d'acquisition 3D actifs. Les figures 2.1 et 2.2 montre un classement possible de ces différentes méthodes d'acquisition.

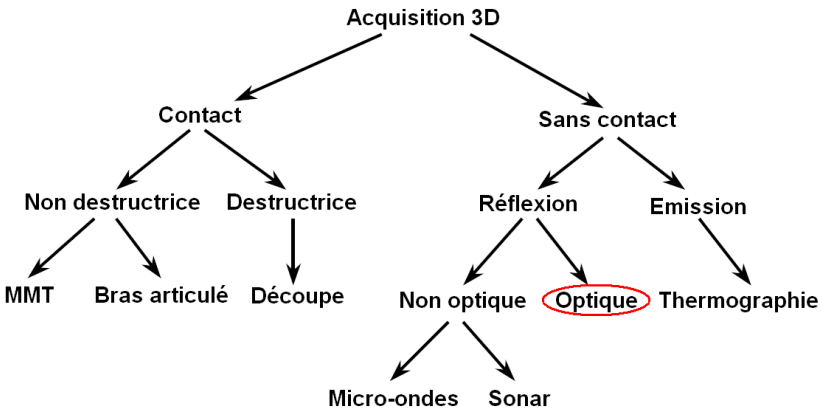


Figure 2.1 – Graphe non exhaustif des systèmes d'acquisition 3D (d'après [Curless, 2000])

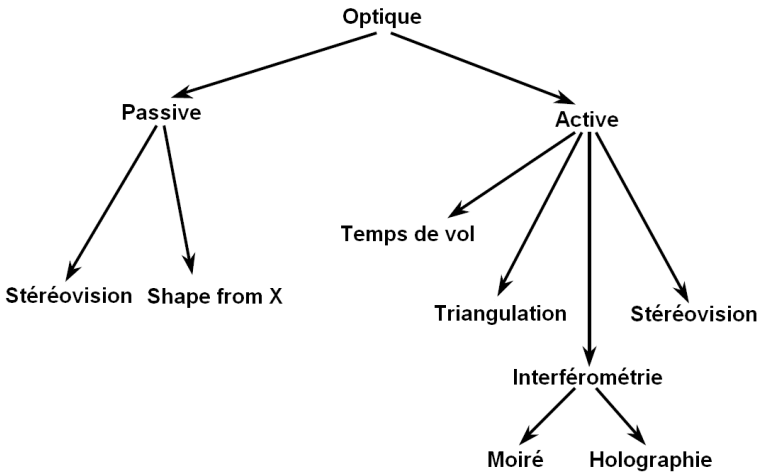


Figure 2.2 – Graphe non exhaustif des systèmes optiques (d'après [Curless, 2000])

Dans ce chapitre, nous présenterons les méthodes d'acquisition optiques, à savoir la triangulation passive et active, le temps de vol et certaines méthodes de "Shape from X". Nous nous intéresserons également à la mesure avec contact (palpage), très courante dans le milieu industriel. D'autres méthodes en émergence sont également décrites. Cette description n'est pas exhaustive, mais concerne les méthodes les plus couramment rencontrées actuellement. Nous décrirons par la suite les différents systèmes de positionnement nécessaires à la mise en œuvre de ces technologies de mesure, puis nous présenterons une synthèse des caractéristiques de ces systèmes.

2.1 Contact (Palpeur)

La technique de mesure 3D la plus précise est l'acquisition au moyen d'un palpeur (figure 2.3). Il existe plusieurs types de palpeurs (palpeur à déclenchement, palpeur résistif . . .- [Vavrille, 2003]) mais la procédure d'utilisation générale reste la même : un signal de déclenchement est généré lors du contact de la bille du palpeur avec l'objet et ce signal provoque la mémorisation de la position de la machine. Cette technique permet d'atteindre une précision de l'ordre du micron, mais celle-ci dépend fortement des performances du système de positionnement utilisé. L'inconvénient majeur est la vitesse d'acquisition, qui est de l'ordre de quelques points par seconde. La mesure par palpeur est utilisée dans l'industrie principalement, pour le contrôle et la rétroconception de pièces mécaniques.

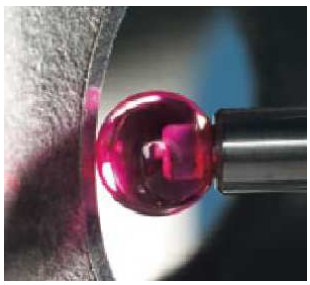


Figure 2.3 – Détail d'un palpeur

2.2 Triangulation passive

La triangulation passive ne nécessite aucune source de lumière additionnelle pour effectuer les mesures. Elle utilise uniquement un ou plusieurs systèmes d'acquisition d'images (caméra, appareil photographique). La méthode la plus utilisée est la stéréovision passive.

2.2.1 Vision stéréoscopique ou stéréovision

La stéréovision interprète les disparités entre deux ou plusieurs images d'une scène et calcule la profondeur de la scène par triangulation. Les caméras sont habituellement représentées par un modèle sténopé [Zeller, 1996]. Le processus de formation de l'image est alors une transformation homogène : il s'agit d'une projection à travers le centre optique. Les deux caméras doivent d'abord être calibrées, les paramètres intrinsèques (focale, ouverture, etc) et extrinsèques (pose) doivent être connus. La stéréovision atteint une précision suffisante pour être utilisée dans des applications comme la photogrammétrie ou la reconstruction du relief à partir d'images aériennes ou satellitaires. La précision de mesure augmente avec la distance de la base stéréoscopique (distance entre les deux caméras), mais dans le même temps, la surface visible commune aux deux caméras diminue, créant des trous dans la surface numérisée. Il faut donc choisir un compromis entre précision et visibilité.

La figure 2.4 illustre le principe de la stéréovision. Tout point P d'une surface visible depuis les deux caméras se projette en P_1 sur le plan image $\mathcal{P}_1$ et en P_2 sur le plan image $\mathcal{P}_2$. Inversement, connaissant deux points en correspondance, $P_1 \in \mathcal{P}_1$ et $P_2 \in \mathcal{P}_2$, ainsi que les centres optiques O_1 de la caméra 1 et O_2 de la caméra 2, les coordonnées du point P sont données par l'intersection de (O_1P_1) et (O_2P_2). La difficulté consiste à mettre en correspondance les points des deux images dans le cas d'occlusions (un point d'une

image peut ne pas avoir de correspondant sur la deuxième image). En fonction du type d'objet (uniforme/couleur, contours marqués ou non, ...), différentes techniques de reconstruction peuvent être employées (extraction de primitives, correspondance de blocs, minimisation de fonctions d'énergie, ...- [Chambon, 2005]).

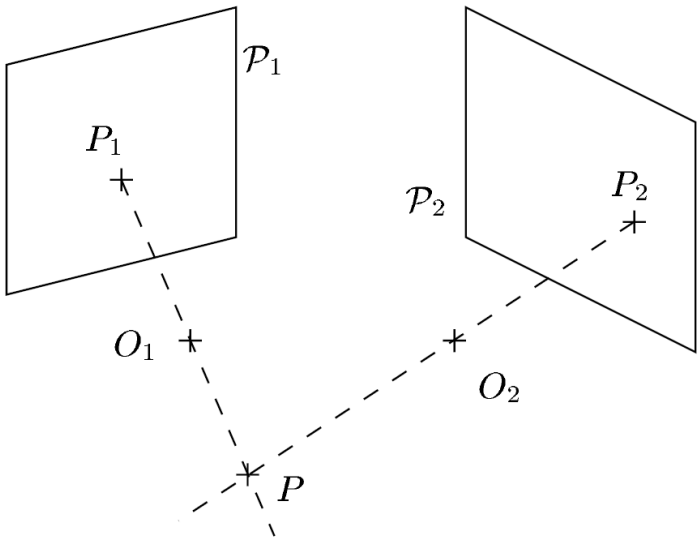


Figure 2.4 – Principe de la stéréovion

La projection d'éclairage texturé permet de faciliter la mise en correspondance des points [Salvi et al., 2004]. Il s'agit de projeter sur la scène un motif d'éclairage présentant des zones aléatoires d'intensités lumineuses différentes [Molinier et al., 2008]. Bien que l'éclairage structuré joue un rôle important dans la reconstruction (facilite la mise en correspondance), il ne participe pas directement à la mesure de l'information tridimensionnelle. C'est la raison pour laquelle cette technique reste classée parmi les méthodes de triangulation passive.

2.2.2 Photogrammétrie

La photogrammétrie est une application particulière de la stéréovision. L'utilisation de règles et de mires calibrées dans le champ de vue des caméras permet de reconstruire l'objet en relief tout en contrôlant ses dimensions. Cette technique est particulièrement utilisée dans le milieu de la muséologie et de la conservation du patrimoine ([Guidi et al., 2003] - figure 2.5), dans l'architecture [Pollefeys et al., 2001][Schouteden et al., 2001] ainsi qu'en cartographie. En plus de l'acquisition de données 3D, cette technique peut permettre d'acquérir les informations de texture de l'objet. En muséologie, la

photogrammétrie est souvent couplée à la triangulation laser [Boehler and Marbs, 2004]-[Tucci et al., 2001][Heinz, 2002][Ioannidis and Tsakiri, 2003] afin de tirer avantages des deux technologies (utilisation des informations de la photogrammétrie pour diminuer l'erreur de recalage des différentes vues acquises par triangulation laser).

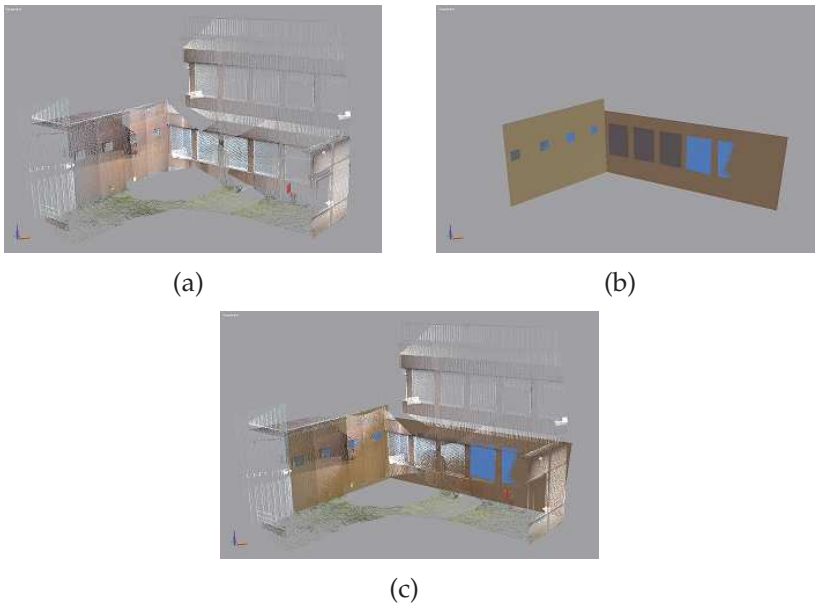


Figure 2.5 – Exemple de photogrammétrie [Tucci et al., 2001]

2.2.3 Vision catadioptrique

Depuis une vingtaine d'années sont apparus sur le marché des systèmes basés sur la combinaison d'une caméra classique et d'un miroir de forme particulière (conique, parabolique, hyperbolique . . .). Ces systèmes ont rendu possible l'acquisition, en une prise de vue, de scènes panoramiques complètes (360°) à la fréquence vidéo (25 images/sec), et sont appelés "caméras catadioptriques". L'utilisation de ces capteurs omnidirectionnels implique une modélisation puis un étalonnage précis. Cette étape est d'autant plus délicate qu'aux défauts classiques des caméras (aberrations des lentilles, diffractions, irrégularité de la rétine . . .) viennent s'ajouter la non régularité de la courbure de la plupart des miroirs et le défaut d'alignement miroir/caméra [Geyer and Daniilidis, 2001].

A partir d'au moins deux images panoramiques obtenues par un tel système, une reconstruction 3D est possible. La figure 2.6 montre une même scène acquise avec un système temps-de-vol et reconstruite à partir de deux photographies catadioptriques. Seuls les murs et les fenêtres sont reconstruits, mais avec un temps d'acquisition beaucoup plus faible (quelques secondes contre plusieurs minutes). Cette reconstruction peut être effectuée grâce à la mise en correspondance de points dans les différentes images. La difficulté provient de la déformation de l'image due à la forme du miroir



(a) (b)

(c)

Figure 2.6 – Reconstruction 3D à partir d'images catadioptriques : (a) scène numérisée par un scanner temps de vol ; (b) scène reconstruite par vision catadioptrique ; (c) comparaison des reconstructions 3D

[Mosaddegh, 2008] : une droite sur une image sera représentée par une courbe sur l'image suivante (figure 2.7).

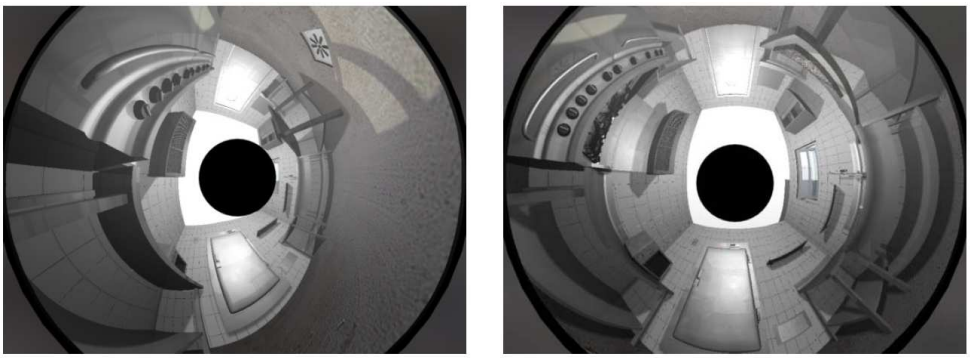


Figure 2.7 – Simulation d'une pièce vue par vision catadioptrique [Mosaddegh, 2008]

La vision catadioptrique est utilisée pour la vision robotique (auto-localisation - [Gaspar and Santos-Victor, 1999]) et la reconstruction 3D à partir d'images aériennes [Projet Caviar et al., 2005].

2.3 Triangulation active

La technique de triangulation active se distingue de la technique passive dans la mesure où un éclairage structuré participe à la reconstruction tridimensionnelle de l'objet. C'est la méthode la plus utilisée par les sociétés de prestation de services en numérisation 3D. Des motifs connus sont projetés sur l'objet et permettent de remonter à la profondeur par trigonométrie. Dans l'exemple donné à la figure 2.8, le centre optique du capteur est noté C, le centre de l'image O, et la focale f. Les orientations du projecteur θ et du capteur φ sont connues, ainsi que la distance D entre le projecteur et le capteur. Pour déterminer la profondeur Z en fonction de la déviation x lue sur l'image, la "loi des sinus" est appliquée :

$$\frac{D+x}{\sin\alpha} = \frac{D+x}{\sin(\theta+\varphi)} = \frac{Z}{\sin\theta}. \tag{2.1}$$

Il vient, avec $\varphi = \arctan\frac{f}{x}$:

$$Z = (D+x)\frac{\sin\theta}{\sin(\theta+\arctan\frac{f}{x})}. \tag{2.2}$$

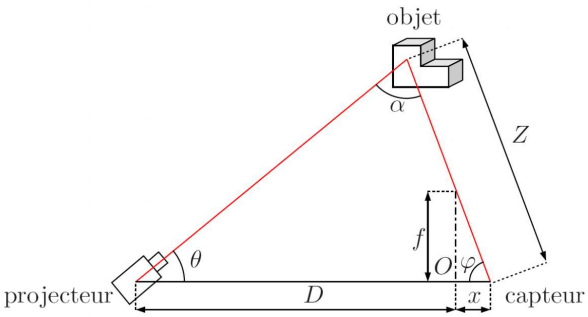
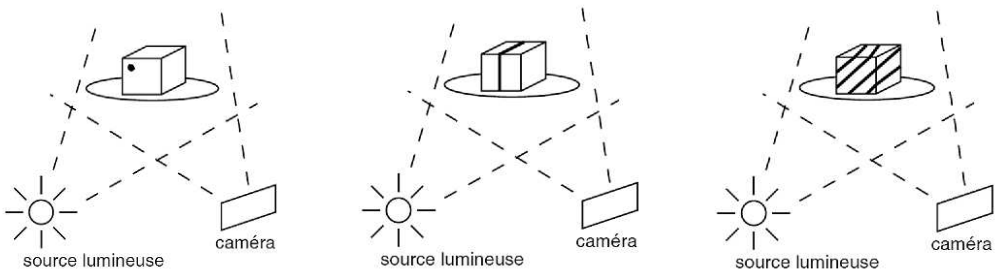


Figure 2.8 – Principe de la triangulation active

Les diverses méthodes de triangulation active (décrites dans [Forest, 2004]) peuvent être classées suivant le type du motif lumineux projeté : point, ligne ou motif (figure 2.9). Les capteurs à triangulation souffrent des mêmes problèmes de parties cachées que la stéréovision (un point éclairé peut ne pas être vu et vice-versa). Pour réduire les effets de ce phénomène, l'angle de triangulation peut être rendu aussi aigu que possible, ou des caméras supplémentaires peuvent également être ajoutées. Les systèmes utilisant ce principe permettent une acquisition rapide de plusieurs milliers de points par seconde avec une précision du dixième de millimètre à quelques microns.



(a) (b) (c)

Figure 2.9 – Différents motifs lumineux en triangulation active : (a) point, (b) ligne , (c) motif

2.3.1 Lumière structurée : point

Un scanner point nécessite une source laser et doit être mobile afin de couvrir entièrement l'objet. Les scanners laser point offrent de nombreux avantages techniques. La taille du capteur CCD peut être optimisée pour un volume de mesure donné, ce qui permet une meilleure résolution et précision que les scanners lignes. La puissance du laser peut être optimisée en fonction de la surface étudiée, afin d'augmenter le rapport signal sur bruit. Ces systèmes sont fixes (mesure de déplacement) ou montés sur des MMT et ne sont pas utilisés pour la numérisation complète d'un objet (en raison de la vitesse d'acquisition), mais pour des prises de cotes ponctuelles ou des mesures de déplacement. Deux exemples de têtes laser point sont donnés à la figure 2.10.



(a) (b)

Figure 2.10 – Têtes laser point de μEpsilon (a) et de Nextec (WizProbe) (b)

2.3.2 Lumière structurée : ligne

La projection d'une ligne laser est la technologie la plus répandue. Actuellement, la ligne laser est obtenue à partir d'une source laser orientée vers un système divergent (lentille cylindrique). Quelques systèmes utilisent un laser point et un miroir rotatif pour générer la ligne (LC15 et LC50 de Metris). Le système doit pouvoir se déplacer afin de couvrir l'ensemble de la géométrie de l'objet. La ligne étant acquise en une seule image, ces systèmes sont plus rapides que les scanners point. La longueur de la ligne et le nombre de points sur la ligne varient en fonction du modèle du capteur (entre 15mm et 150mm pour la longueur de ligne, et entre 500 et 1000 points par ligne).

On peut remarquer trois générations de scanners ligne. Ces trois évolutions se différencient par leur vitesse d'acquisition, mais surtout par leur capacité à s'adapter à des objets de plus en plus réfléchissants. En effet, un grand nombre des prestations effectuées en milieu industriel concernent des pièces usinées, fortement réfléchissantes. Les efforts des développeurs de systèmes d'acquisitions laser se sont donc concentrés sur ce verrou technologique.

La première génération utilise un laser dont la puissance n'est réglable qu'avant de débuter la numérisation (années 90, début 2000), soit manuellement (l'opérateur indique la valeur), soit automatiquement (le scanner est maintenu devant l'objet le temps de la procédure). Si l'objet présente des textures différentes (de forts contrastes), la numérisation doit être interrompue à chaque changement de partie pour réajuster la puissance laser (figure 2.11). Le laboratoire Le2i et la société Dynamic3D disposent de trois scanners utilisant cette technologie : le scanner Minolta Vi910 (Konica-Minolta - [Konica Minota Sensing, 2003]), le capteur GScan (Romer - [Romer, 2007]) et le scanner KScan-LC50 (Metris - [Metris, 1995]).

La seconde génération possède un laser de puissance auto-adaptative sur la ligne (année 2003). Le scanner interprète en temps réel le retour lumineux afin de réajuster au mieux et de façon automatique la puissance du laser. Cet automatisme apporte plus de souplesse à l'opérateur mais reste insuffisant dans certains cas. Pour un objet rayé noir et blanc par exemple, l'opérateur doit faire attention à ne pas positionner la ligne laser sur les deux teintes simultanément, pour que l'ajustement du laser se fasse convenablement. La société Dynamic3D possède un capteur laser utilisant ce principe, la tête laser MMZ (Metris - [Metris, 1995]), illustrée à la figure 2.12.



(a) (b)

Figure 2.11 – Scanner Vi910 de Konica Minolta (a) et tête laser GScan de Romer (b)



Figure 2.12 – Tête laser MMZ de Metris

Les capteurs à triangulation laser ligne de dernière génération (années 2007-2008) permettent une adaptation de la puissance laser pixel par pixel et en temps réel, en fonction du type de surface observée. Ces capteurs permettent de numériser un plus grand nombre de types de surfaces. La numérisation s'en trouve grandement simplifiée pour l'opérateur, qui n'a plus aucun réglage manuel à effectuer (figure 2.13). La société Dynamic3D possède également un capteur laser utilisant ce principe, la tête laser MMD (Metris - [Metris, 1995]).

Les scanners à triangulation laser ligne sont utilisés pour de multiples applications : dans l'industrie pour le contrôle de pièces [Metris and PSA, 2001], l'archéologie pour la conservation ou l'analyse d'objets anciens [Seulin et al., 2006][Loriot et al., 2007a], le design, l'anthropologie [Friess et al., 2002]. De nos jours, ces têtes laser sont utilisées sur des bras polyarticulés, sur MMT et depuis peu sur bras robot (KScan de Metris [Metris, 1995], TScan2 de Steinbichler [Steinbichler, 1987]).

Malgré les progrès réalisés durant ces dernières années, ces scanners ne peuvent acquérir des objets transparents ou totalement réfléchissants (section 3.2). Des travaux effectués au laboratoire Le2i ont en partie apportés une solution à ce problème (section 2.5.3). D'autres travaux actuels étudient de nouvelles possibilités (section 2.3.4).

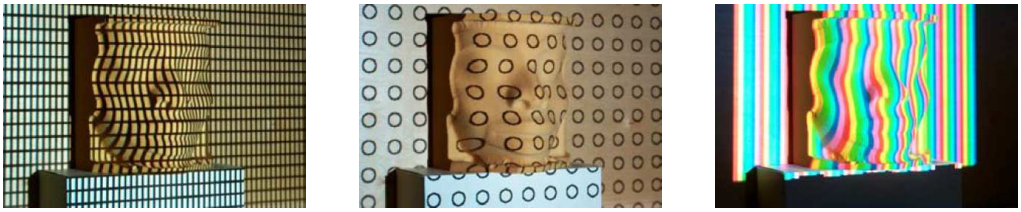


(a) (b) (c)

Figure 2.13 – Capteurs laser ligne TScan2 de Steinbichler (a), Aquilon de Kreon (b) et MMD de Metris (c)

2.3.3 Lumière structurée : motif binaire ou couleur

Cette technologie utilise la projection de points, de lignes parallèles, de grilles ou de motifs codés (figure 2.14). Ces différentes techniques sont décrites et comparées par Salvi [Salvi et al., 2004]. A la différence de la triangulation laser ligne, le motif projeté recouvre entièrement une face de l'objet, ce qui permet l'acquisition immédiate d'une surface. Il en résulte une plus grande rapidité d'acquisition. Afin d'appliquer la triangulation sur chacun des motifs, la première étape consiste en l'identification de chacune des raies projetées. Cette étape peut entraîner des difficultés lorsque les motifs projetés présentent des discontinuités [Robinson et al., 2004]. Dans le cas de la projection d'un motif couleur, la texture de l'objet peut être acquise en étudiant la différence de teintes entre la couleur émise et la couleur observée [Lathuiliere, 2007].



(a) (b) (c)

Figure 2.14 – Exemple de motifs : grille (a), cercles (b), couleur (c) (d'après [Beraldin et al., 2000])

Deux exemples de systèmes commerciaux sont donnés à la figure 2.15. Ces systèmes sont utilisés en industrie (fixés sur un bras robotisé), en archéologie [Boehler et al., 2003] ou encore en "body-scanning" [D'Apuzzo, 2007] (figure 2.16).



(a) (b)

Figure 2.15 – Scanners AtosIII de Gom (a) et Comet5 de Steinbichler (b)



Figure 2.16 – Système de "body scanning"

2.3.4 Triangulation laser dans l'infrarouge

Certaines études en cours utilisent la triangulation laser ligne dans l'infrarouge [Sanchez Secades, 2008]. Le système utilisé est illustré à la figure 2.17. La pièce est chauffée par une impulsion laser haute puissance et une caméra infrarouge observe la ligne de chaleur sur l'objet (figure 2.18). Cette méthode est particulièrement intéressante pour les objets transparents, où la triangulation laser classique est impossible (section 3.2). Toutefois, plusieurs problèmes sont encore à étudier (temps de refroidissement entre chaque impulsion, diffusion de la chaleur dans certains matériaux . . .).

2.4 Temps de vol (Time Of Flight : TOF)

Pour les grandes structures, comme les bâtiments, les scanners temps de vol sont les systèmes d'acquisition les plus adaptés [Haala and Brenner, 1997][Vosselman, 1999]-[Maas, 2001]. Ces scanners ont une portée pouvant aller jusqu'à 300 mètres et ont une précision de l'ordre du millimètre, suivant la distance de travail et la technologie utilisée (les plus courantes sont la détection de pulse et la modulation en amplitude). Les coordonnées d'un point 3D (X, Y, Z) dépendent de trois données : l'angle horizontal,

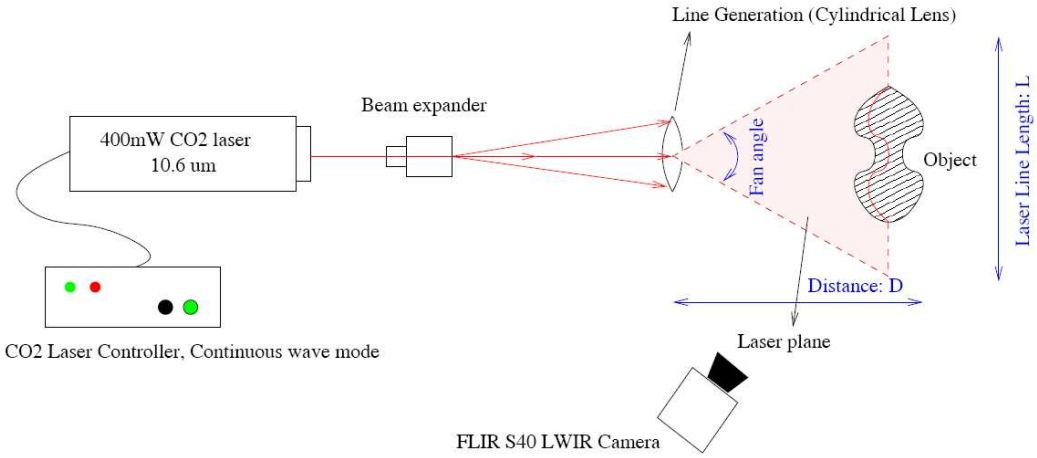
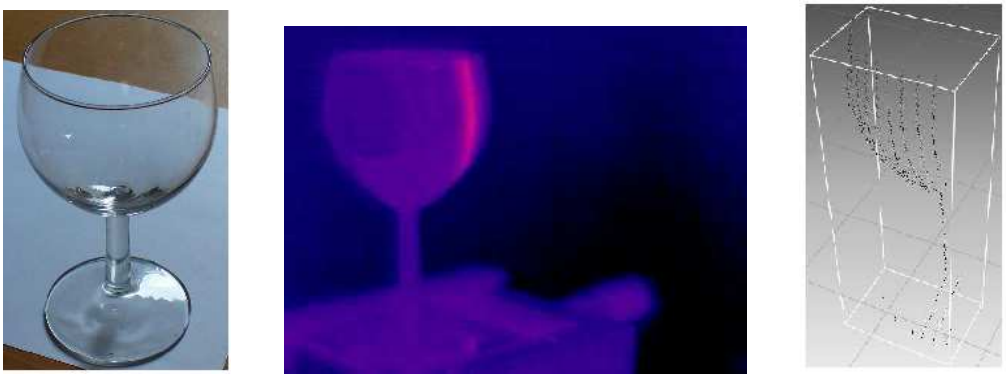


Figure 2.17 – Système mis en place pour l'acquisition 3D dans l'infrarouge



(a) (b) (c)

Figure 2.18 – Exemple de numérisation laser dans l'infrarouge [Sanchez Secades, 2008] :(a) verre à pied, (b) ligne de chaleur, (c) reconstruction 3D

l'angle vertical et la distance entre le scanner et l'objet. Les valeurs des angles sont données par l'orientation de la source laser (pilotage motorisé). La distance d entre le capteur et un point est calculée par la relation suivante :

$$d = v \cdot \frac{\Delta t}{2}, \tag{2.3}$$

où v est la vitesse du signal, et Δt est le temps mis par le signal pour effectuer l'aller-retour, et donc $\frac{\Delta t}{2}$ est le temps mis par l'impulsion laser pour atteindre l'objet.

Ces systèmes peuvent également être utilisés dans l'industrie, pour le contrôle de pièces de grandes dimensions. Une thèse est en cours au laboratoire Le2i en collaboration avec la société Areva-Creusot Forge pour la mesure de pièces de grandes dimensions, en cours de forgeage [Bokhabrine et al., 2009] (figure 2.19). Ces pièces mesurent environ 300 mètres cube et sont portées à plusieurs centaines de degrés (entre 700 et 1200°). Le système permet une caractérisation géométrique des pièces avec une précision infé-



Figure 2.19 – Numérisation d'une pièce de forge à haute température [Bokhabrine et al., 2009]

rieure à vingt millimètres.

Le calcul de la distance "d" peut être effectuée à l'aide de deux technologies différentes : la détection de pulse et le décalage de phase.

2.4.1 Détection de pulse

Cette technologie consiste à envoyer une impulsion laser sur l'objet. La distance se déduit directement du temps d'aller-retour (figure 2.20).

La portée maximale est de l'ordre de 300 mètres pour une vitesse d'acquisition maximale d'environ 50 000 points par seconde. Les principaux domaines d'application sont

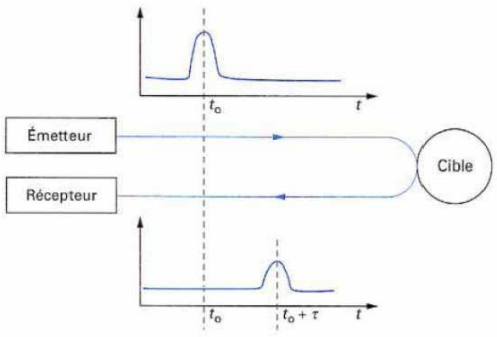


Figure 2.20 – Temps de vol à détection de pulse

l'architecture et l'archéologie (statues ou champ de fouille (figure 2.21) par exemple). Les systèmes commerciaux de la figure 2.22 utilisent cette technologie.

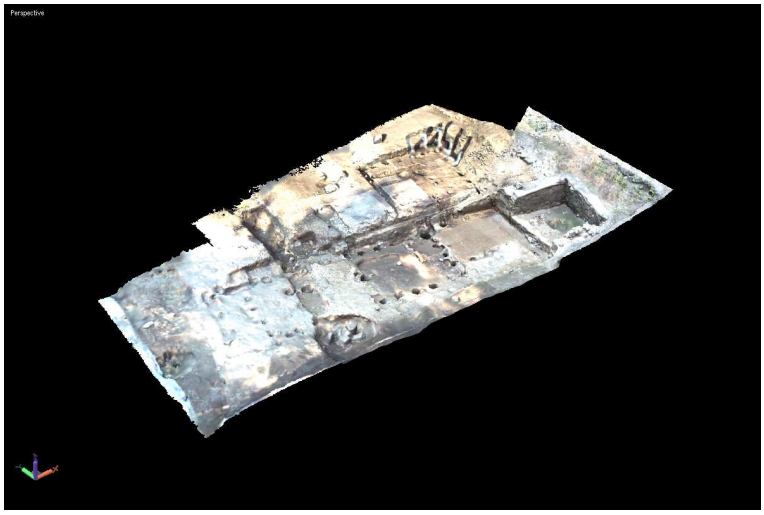


Figure 2.21 – Modèle 3D texturé d'un champ de fouille de Bibracte, numérisé par un scanner GS101

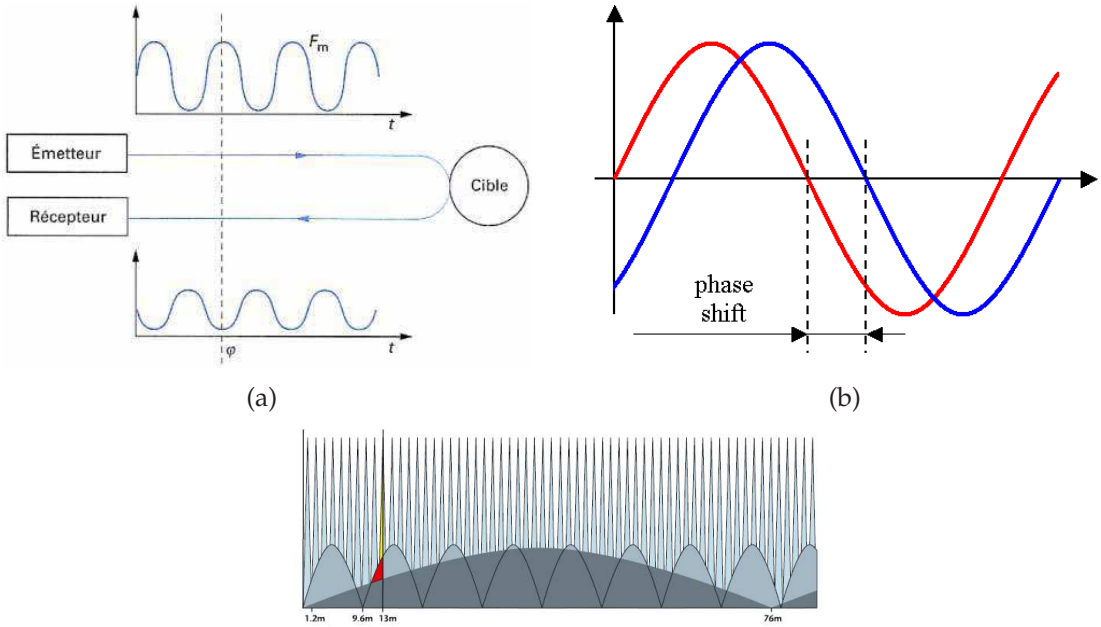
2.4.2 Modulation en amplitude

Au lieu d'envoyer une impulsion brève, l'onde est modulée en amplitude. La différence de phase $\Delta\Phi$ entre le signal transmis et le signal reçu est alors mesurée (figure 2.23). Cette différence de phase n'est déterminée que modulo 2π. La distance (fonction de $\Delta\Phi$) ne peut donc être calculée que modulo un intervalle d'ambiguïté correspondant à la longueur d'onde du signal émis. Pour s'affranchir de cette restriction, plusieurs méthodes ont été développées, comme par exemple la combinaison de plusieurs fréquences de modulation. La distance maximale des systèmes actuels est inférieure à 100



(a) (b) (c)

Figure 2.22 – Scanners ScanStation2 de Leica (a), GS et GX de Trimble (b et c)



(a) (b)

(c)

Figure 2.23 – Temps de vol à décalage de phase : (a-b) mesure du décalage ; (c) combinaison de plusieurs fréquences pour lever l'ambiguïté [Faro, 1983]

mètres pour une vitesse d'acquisition maximale d'environ 500000 points par seconde (figure 2.24).



(a) (b)

Figure 2.24 – Scanners LS de Faro (a) et HDS de Leica (b)

2.4.3 Temps-de-vol TC/SPC ("Time-Correlated Single Photon Counting")

Dans [Wallace et al., 2001], Wallace décrit un système temps-de-vol utilisant cette technologie. Le TCSPC est une méthode d'échantillonnage statistique capable de détecter un photon, avec une résolution en temps inférieure à une picoseconde. Cette technique offre plusieurs avantages en comparaison au temps-de-vol classique :

– très grande précision temporelle (et donc en distance)
– très grande sensibilité de détection
– possibilité de travailler sur des objets d'échelles très différentes (de quelques centimètres à plusieurs mètres)

Cette technologie est pour le moment très peu développée (prototypes de laboratoire, Université d'Heriot-Watt, en Ecosse).

2.5 Techniques d'extraction d'informations de forme, "Shape from X"

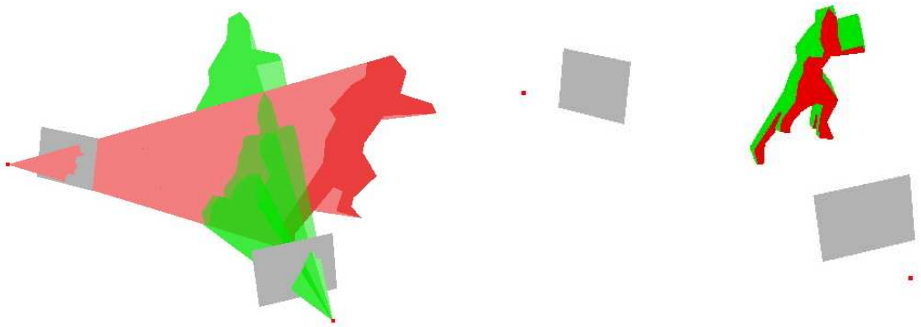
Ces techniques de reconstruction se partitionnent en un éventail de sous domaines en fonction du type de surface traitée et du type de primitive dans l'image qui est utilisée :
- la stéréovision (décrite au paragraphe 2.2.1), qui traite de la reconstruction à partir de positions de points caractéristiques dans plusieurs images (shape from stereo),
- la reconstruction à partir de la fonction d'intensité dans une image (shape from shading),
- la reconstruction à partir des contours dans une image (shape from silhouettes),
- la reconstruction à partir du mouvement (shape from motion),
- la reconstruction par la texture (shape from texture),
- la reconstruction à partir de la mesure du flou (shape from focus),
- la reconstruction à partir des informations de polarisation des réflexions lumineuses (shape from polarization).

Nous allons décrire ici deux méthodes, fréquemment utilisées, à savoir le Shape from Silhouettes et le Shape from Focus, puis nous présenterons la reconstruction 3D par Shape from Polarization.

2.5.1 Reconstruction à partir des contours, "Shape from Silhouettes"

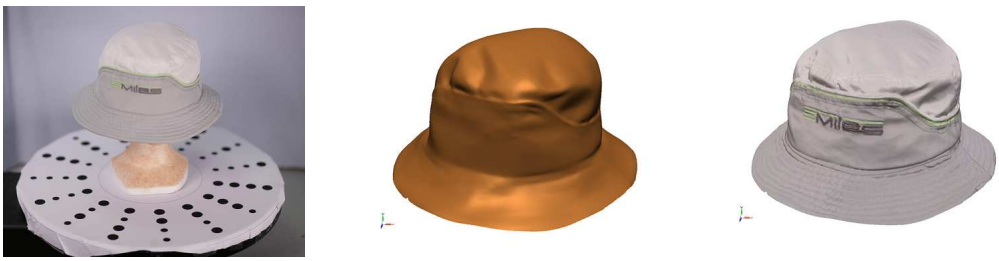
Cette technologie permet de reconstruire un modèle 3D à partir de plusieurs images d'un objet, prises depuis différents points de vue. Une mire est utilisée afin de calculer la pose de l'appareil photographique pour chaque position. Chaque image est ensuite segmentée afin de séparer l'objet du fond. La silhouette de l'objet sur chaque image est ainsi obtenue. La combinaison de ces différentes silhouettes permet de générer un modèle 3D texturé (figure 2.25). Afin de faciliter les acquisitions, un plateau rotatif peut être utilisé.

Cette technique a plusieurs limites. Afin d'obtenir un modèle 3D de bonne qualité, un grand nombre de photographies doit être effectué. Si l'objet présente des surfaces concaves, elles n'apparaîtront pas sur les silhouettes et ne seront donc pas reconstruites. Par contre, elle ne nécessite qu'un appareil photographique (le plateau rotatif évite le déplacement du capteur). Elle donne des résultats satisfaisants pour les applications de visualisation (figure 2.26).



(a) (b)

Figure 2.25 – Shape from Silhouettes : prise de vues d'un objet suivant 2 angles (a) et résultat (b)



(a) (b) (c)

Figure 2.26 – Exemple de reconstruction 3D en Shape from Silhouettes (logiciel 3DSom) : (a) photographie ; (b) modèle 3D ; (c) modèle 3D texturé

2.5.2 Reconstruction à partir de la mesure du flou, "Shape from Focus"

Cette technique d'acquisition regroupe différentes méthodes basées sur la détection du flou dans une image [Tyan, 1997]. Une caméra (ou un appareil photographique) munie d'un objectif à très faible profondeur de champ (quelques microns) est utilisée (figure 2.27). Plusieurs images sont acquises à différentes altitudes, et, pour chaque image, la zone de netteté est segmentée. L'ensemble de ces données permet de reconstruire avec une très grande précision le relief de l'objet. Cette méthode est utilisée sur de très petits objets (quelques millimètres), principalement pour la numérisation en $2D^+$ (ou 2.5D : représentation 3D d'une surface qui contient au plus une valeur de profondeur Z pour chaque point du plan XY). La numérisation 3D est possible mais le recalage des vues est très complexe du fait de la petite surface de chaque vue. Cependant, l'ajout d'axes de

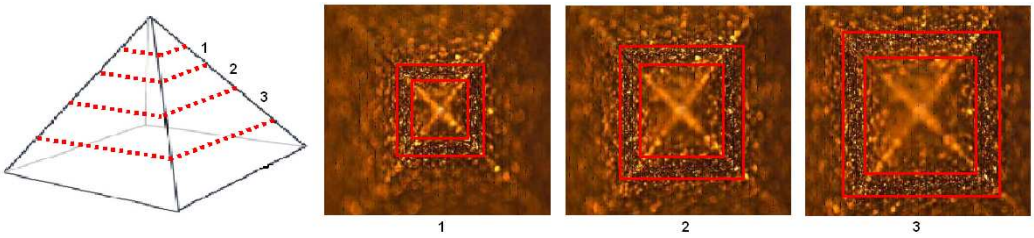


Figure 2.27 – Shape from Focus : objet à numériser et acquisitions à différentes altitudes, avec le système InifiniteFocus de Alicona

rotation (système Real3D d'Alicona) permet la numérisation 3D complète de certains objets (typiquement des outils de coupe pour l'usinage).

2.5.3 Reconstruction à partir des informations de polarisation, "Shape from Polarization"

Morel *et al.* présente une extension de la technique de "Shape from Polarization" aux surfaces métalliques [Morel, 2005]. Après réflexion sur la surface, la lumière incidente non polarisée devient partiellement linéairement polarisée, en fonction de l'angle d'incidence et de l'indice de réfraction du matériau. Ainsi, les normales de la surface sont calculées à partir des paramètres de polarisation de la lumière réfléchie. L'ambiguïté concernant l'orientation des normales est levée grâce à un éclairage actif. L'auteur décrit et compare ensuite différentes méthodes de reconstruction tridimensionnelle de surfaces à partir d'un champ de normales. Le prototype développé est illustré à la figure 2.28 et fait l'objet d'un brevet [Morel et al., 2005]. Dans [Ferraton, 2007], l'auteur adapte ce procédé à la reconstruction 3D d'objets transparents.

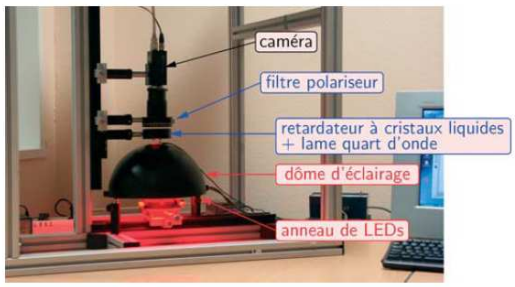


Figure 2.28 – Shape from Polarization : prototype développé par Morel *et al.*

Cette technique permet donc de reconstruire en trois dimensions des objets parfaitement réfléchissants, ce qui est impossible pour le moment pour les systèmes d'acquisition actuels. Il n'existe pour le moment aucun système commercial utilisant cette technologie.

2.6 Systèmes de positionnement

Les systèmes d'acquisition décrits précédemment ne peuvent à eux seuls numériser entièrement un objet. Ils doivent pouvoir être placés à différentes positions autour de celui-ci. Les systèmes à acquisition par vue (systèmes permettant l'acquisition d'une vue sans déplacement du scanner ou de l'objet : Vi910, Comet, Atos . . .) peuvent être mis en œuvre à l'aide d'un trépied et manipulés manuellement (déplacement du scanner ou de l'objet). Le recalage peut se faire automatiquement si le système d'acquisition le permet (mires réfléchissantes . . .), sinon l'opérateur doit recaler chaque vue une à une. D'autres systèmes comme les capteurs à triangulation laser point ou ligne nécessitent obligatoirement un système de positionnement permettant de référencer chacune de leur position. Dans ce cas-là, les données sont acquises dans un référentiel unique et n'ont donc pas besoin d'être recalées (tant que l'objet n'est pas déplacé).

2.6.1 Plateau rotatif

Il s'agit du système de positionnement le plus simple. Grâce à l'axe de rotation vertical, il permet de numériser un objet sous plusieurs angles sans déplacer le capteur (fixé sur un trépied par exemple, figure 2.29). Les plateaux rotatifs sont également couplés aux bras robotisé, afin de permettre d'agrandir le volume de travail sans augmenter

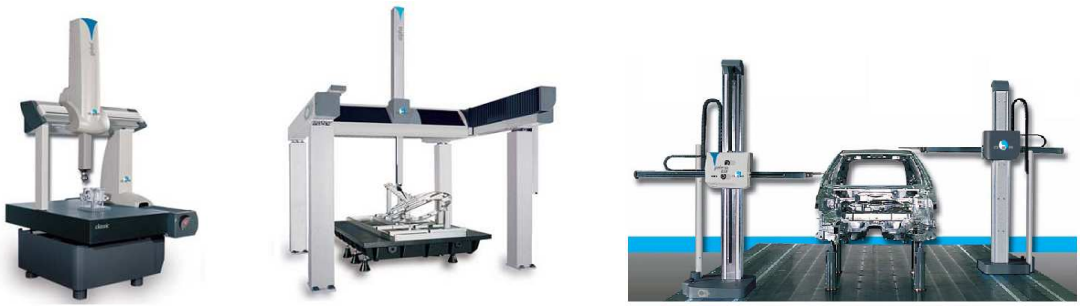


Figure 2.29 – Vi910 sur trépied et plateau rotatif

les dimensions du bras. Ces plateaux peuvent également avoir un deuxième axe de rotation horizontal.

2.6.2 Machine à Mesurer Tridimensionnelle - MMT

Les systèmes de positionnement les plus utilisés ces dernières années sont les MMT (figure 2.30). Ces systèmes possèdent trois axes de translations ainsi qu'un poignet pour orienter le capteur. Ils permettent un positionnement très précis avec une excellente répétabilité (de quelques dixièmes de micron). Les capteurs utilisés sur ces systèmes sont soit des palpeurs, soit des têtes d'acquisition laser point ou ligne. Le volume de travail peut varier de 0,5 à 120 mètres cube environ. Afin de garantir la précision de ces systèmes, ils doivent être utilisé en environnement contrôlé (variation de température, humidité . . .).



(a) (b) (c)

Figure 2.30 – MMT de différentes dimensions

Certaines MMT sont également capable de faire du "scanning" (mesure continue) : le palpeur reste en contact avec l'objet et se déplace le long de la surface. Dans ce cas, la

précision du système est moindre mais la vitesse d'acquisition est plus élevée. Malgré tout, les palpeurs sur MMT sont utilisés pour du contrôle dimensionnel local (prise de cotes) ou la rétroconception, et non pour une numérisation complète de la pièce.

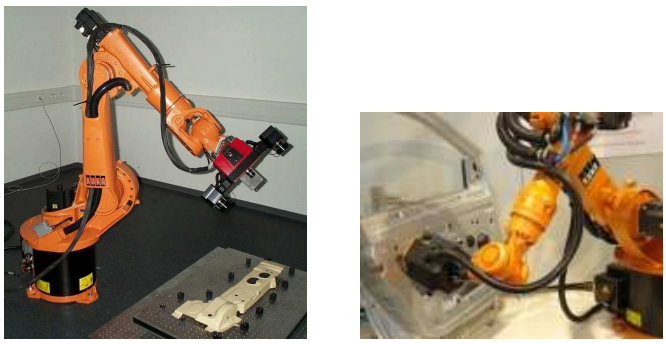
2.6.3 Bras robotisé

En milieu industriel, ce sont des bras robotisés (figure 2.31) qui permettent le positionnement de systèmes d'acquisition par vue (projection de franges ou laser ligne à balayage). Leur portée varie de quelques centimètres à quelques mètres. La répétabilité



Figure 2.31 – Bras robotisé KR30 de Kuka [Kuka, 1996]

de ces systèmes est de l'ordre d'une centaine de microns. Depuis quelques années, ces bras peuvent porter des capteurs à triangulation laser ligne (figure 2.32). Les données



(a) (b)

Figure 2.32 – Système d'acquisition sur bras robotisé : (a) projections de franges (Atos II de Gom) ; (b) laser ligne (KRobot de Metris)

acquises sont tout d'abord recalées grâce aux informations de position du robot, puis un second recalage est effectué en fonction du type de scanner : les systèmes à projection de franges utilisent des mires réfléchissantes pour repositionner les acquisitions entre

elles, et les capteurs à triangulation laser ligne sont référencés par un tracker optique (section 2.6.5).

2.6.4 Bras polyarticulé

Les bras polyarticulés sont utilisés pour des applications très variées : contrôle de pièces industrielles, numérisation d'objets archéologiques . . .. Il s'agit de bras mécaniques à six ou sept axes équipés de codeurs permettant de remonter à la position du capteur dans l'espace. Ces bras ont une grande ergonomie, sont assez simple d'utilisation et sont transportables (à la différence des MMT). Leur portée varie de un à cinq mètres. La précision est de l'ordre de quelques centaines voire dizaines de microns. Ils sont utilisés avec un palpeur ou une tête laser ligne (figure 2.33), ce qui permet de réaliser simultanément l'acquisition complète de la forme et la prise de référence (plans, cylindres . . .). Lors du palpage, l'opérateur vient positionner la bille du palpeur sur la surface de l'objet et déclenche manuellement la prise de mesure. Ces systèmes sont de plus en plus couramment utilisés de nos jours. La précision reste toutefois inférieure à celle d'une MMT.



Figure 2.33 – Exemple d'un système combinant un palpeur et une tête laser ligne sur bras polyarticulé

La société Metris a mis au point un nouveau type de bras robotisé (RCA) en 2008. Il s'agit d'un bras polyarticulé classique placé à l'intérieur d'un exosquelette robotisé, manipulant une tête laser ligne (figure 2.34).



Figure 2.34 – RCA de Metris [Metris, 1995]

2.6.5 Systèmes de suivi optique et laser

Afin d'augmenter encore la liberté de mouvement des opérateurs, des trackers optiques sont utilisés pour calculer la position du capteur (figure 2.35). Ces systèmes sont composés de deux ou trois caméras et permettent de repérer dans l'espace par triangulation un palpeur ou un capteur ligne muni de LED infrarouges. La précision est de l'ordre de quelques centaines voire dizaines de microns. Le volume de travail est d'environ 15 mètres cube. Le principal inconvénient est que le capteur doit toujours être visible par le tracker. Il est donc indispensable de déplacer l'objet ou le tracker pour numériser entièrement un objet.



(a) (b)

Figure 2.35 – (a) Tracker optique de Metris [Metris, 1995] et (b) Steinbichler [Steinbichler, 1987]

D'autres systèmes de tracking utilisent un laser pour suivre dans l'espace un palpeur ou un capteur équipé de miroirs (rétroréflecteurs). Le point 3D mesuré correspond au point d'intersection de ces miroirs, positionnés en pyramide. L'asservissement est effectué en calculant l'écart entre la direction du laser émis et celle du laser réfléchi. Lorsque les deux sont confondues, cela signifie que le laser atteint le point d'intersection des miroirs. La position est déduite en fonction des angles d'orientations du laser (horizontal et

vertical) et la distance est calculée par temps-de-vol (section 2.4). Le suivi du capteur est assuré en calculant l'écart entre le laser émis et reçu. Ces systèmes ont une grande précision (de l'ordre de quelques microns) et permettent de couvrir une large surface (portée de 80 mètres, 360° horizontal et 45° vertical). Des systèmes commerciaux sont illustrés à la figure 2.36.



(a) (b)

Figure 2.36 – Absolute Tracker de Leica (a) et Laser Tracker Xi V2 de Faro (b)

Ces capteurs sont utilisés dans le nautisme (figure 2.37), l'aéronautique et le nucléaire, pour la mesure d'objets de grandes dimensions.

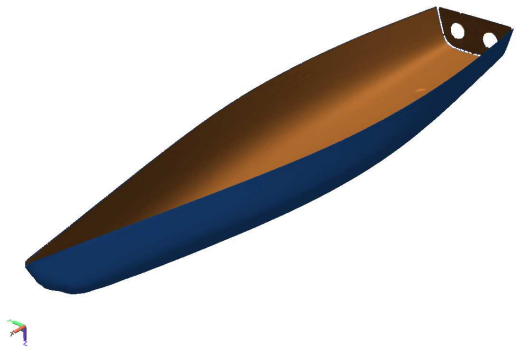


Figure 2.37 – Modèle 3D d'une coque de bateau

2.7 Synthèse et conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les technologies les plus couramment rencontrées, permettant l'acquisition de la forme de l'objet. Les tableaux 2.1 et 2.2 rappellent les principales caractéristiques de ces capteurs.

L'utilisation de ces différentes technologies doit être en accord avec les caractéristiques de l'objet (dimensions, complexité géométrique ...). Afin de balayer toute la surface de l'objet, certains des systèmes présentés doivent être fixé sur un système de positionnement (capteur laser point ou ligne par exemple). D'autres scanners (acquisitions par vue par exemple) peuvent être couplés à un système de positionnement pour faciliter et accélérer la procédure d'acquisition (table rotative, bras robotisé). Le tableau 2.3 illustre les principales caractéristiques de ces systèmes de positionnement.

Chaque système d'acquisition possède ses avantages et inconvénients, en fonction du type de pièce à numériser et de l'application visée (analyse, visualisation ou duplication). Ces systèmes peuvent être complémentaires pour certains objets [Beraldin, 2004], par exemple temps-de-vol et triangulation laser lorsqu'un objet de grandes dimensions possède des détails fins.

	Contact	Photogrammétrie	Triangulation active	Temps-de-vol
Mode d'acquisition	Point par point / Scanning	Vue	Point / Ligne / Vue	Point par point $\Rightarrow$ Vue
Vitesse d'acquisition (maximale)	Quelques pts.s^{-1} / Quelques centaines de pts.s^{-1}	-	50 pts.s^{-1} / 80000 pts.s^{-1} / 500000 pts.s^{-1}.m^{-2}	500000 pts.s^{-1}
Champ de vue	-	Dépend du capteur utilisé	- / Jusqu'à 150mm / Jusqu'à 2m $\times$ 2m	320° vertical / 360° horizontal
Profondeur de champ	-	Dépend du capteur utilisé	Jusqu'à 75cm / Jusqu'à 10cm / Jusqu'à 2m	Jusqu'à 700m
Précision	Quelques μm	Dépend du capteur utilisé	Quelques μm / Quelques dizaines de μm / Quelques dizaines de μm	De l'ordre du millimètre
Résolution	-	Dépend du capteur utilisé	Quelques dizaines de μm	-
Avantage	Mesure très précise	Peu de matériel nécessaire	Polyvalence	Très grands objets
Inconvénient	Manipulation indirecte	Mise en correspondance	Impossible sur les matériaux réfléchissants ou absorbants	Faible précision

TABLE 2.1 – Synthèse des systèmes d'acquisition (première partie)

	Shape from Silhouettes	Shape from Focus	Shape from Polarization
Mode d'acquisition	Vue	Vue	Vue
Vitesse d'acquisition (maximale)	Dépend du capteur utilisé	400μm par seconde	environ 7 secondes
Champ de vue	Dépend du capteur utilisé	Jusqu'à 25mm^2	Dépend du capteur utilisé
Profondeur de champ	Dépend du capteur utilisé	Jusqu'à 22mm	Limitée, de l'odre de 1,5cm
Précision	Dépend du nombre d'acquisition	Quelques dizaines de nanomètres	Dépend de la complexité de la surface
Résolution	Dépend du capteur utilisé	Quelques dizaines de nanomètres	Dépend du capteur
Avantage	Peu de matériel nécessaire	Résolution très fine	Matériau parfaitement réfléchissant
Inconvénient	Surfaces concaves non numérisables	Dimensions de la surface d'acquisition	Acquisition de surfaces parfaitement réfléchissantes uniquement

TABLE 2.2 – Synthèse des systèmes d'acquisition (seconde partie)

	Table rotative	MMT	Bras robotisé
Volume de travail	-	0,5 à 120 mètres cube environ	Portée : quelques centimètres à quelques mètres sur 360°
Portabilité	oui	non	non
Répétabilité	-	quelques dixièmes de microns	une centaine de microns
Manipulation	indirecte (programmation)	indirecte (programmation)	indirecte (programmation)

	Bras polyarticulé	Tracker optique	Tracker laser
Volume de travail	Portée : de un à cinq mètres sur 360°	15 mètres cube environ	Portée : jusqu'à 80m sur 360°
Portabilité	oui	oui	oui
Répétabilité	quelques dizaines de microns	quelques dizaines de microns	quelques dizaines de microns
Manipulation	directe (manuelle)	directe (manuelle)	directe (manuelle)

TABLE 2.3 – Synthèse des systèmes de positionnement

Chapitre 3

Méthodologie pour la numérisation 3D

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit le fonctionnement de différents systèmes d'acquisition. Mais l'acquisition des données 3D n'est qu'une étape de la numérisation 3D. En effet, celle-ci se décompose en trois étapes : la préparation à la numérisation, l'acquisition et les post-traitements. Ces étapes sont illustrées à la figure 3.1.

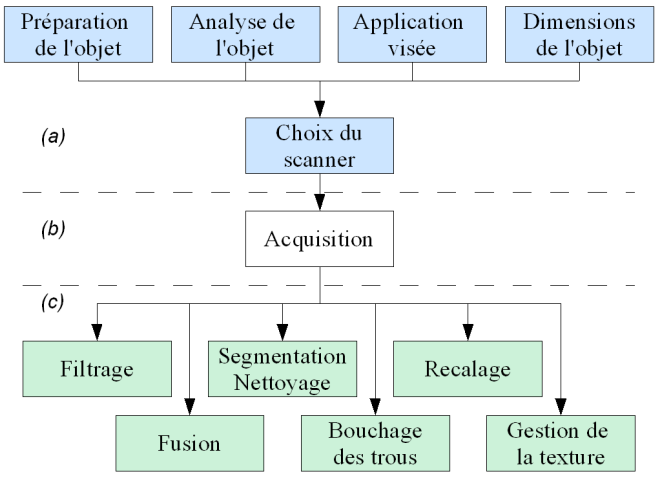


Figure 3.1 – Procédure générale de la numérisation 3D : (a) la préparation à la numérisation (en bleu), (b) l'acquistion et (c) les post-traitements (en vert)

Chacune de ces étapes nécessite l'intervention d'un opérateur. Sa mise en œuvre et le résultat vont donc dépendre de l'expérience de ce dernier. Ainsi, le temps de numérisation, le temps de post-traitements et la qualité du modèle 3D final seront différents en fonction des connaissances de l'opérateur. Or, pour une société de prestations de services, ces paramètres sont essentiels pour la bonne préparation des interventions : planification et chiffrage de la prestation.

Nous avons donc mis en place une méthodologie permettant de guider les opérateurs dans leur choix durant les différentes étapes, leur évitant ainsi certaines erreurs, qui pourraient entrainer une perte de temps, ou une dégradation de la qualité du modèle final. Pour cela, nous nous appuyons sur les systèmes d'acquisition génériques disponibles :

- au Laboratoire Le2i :
  - Replica de 3DScanners (triangulation laser ligne sur MMT)
  - Vi910 de Konica-Minolta (triangulation laser à balayage)
  - GScan sur bras polyarticulé de Romer (triangulation laser)
  - GS101 de Trimble (temps de vol)
  - Infinite Focus d'Alicona (Depth from Focus)
- dans la Société Dynamic3D :
  - KScan LC50 de Metris (triangulation laser)
  - MMZ sur bras polyarticulé de Metris / Cimcore (triangulation laser)
  - MMD sur bras polyarticulé de Metris (triangulation laser)

Afin de formaliser cette méthodologie, un outil d'aide à la numérisation 3D a été développé. Celui-ci reprend les différents points évoqués dans ce chapitre et propose à l'utilisateur différents choix en fonction des données entrées.

Dans une première partie, nous décrirons les trois types de représentations des données utilisés en numérisation 3D. Puis nous nous intéresserons dans les deux parties suivantes aux paramètres à prendre en compte avant de débuter l'acquisition d'un objet, à savoir :

- les propriétés intrinsèques de l'objet,
- les différentes applications possibles de la numérisation en fonction des dimensions de l'objet.

Par la suite, nous verrons les différents protocoles d'acquisitions en fonction du système choisi, ainsi que les avantages et inconvénients des différents systèmes, puis les post-traitements à appliquer aux données acquises et leurs influences sur la qualité du modèle 3D. Enfin, l'outil d'aide mis en place sera présenté, et plusieurs études de cas réalisées seront illustrées, afin de montrer les différents cas de figure rencontrés, dans lesquels la méthodologie a été appliquée.

3.1 Représentation des données 3D

Dans cette première section, nous détaillons les différentes représentations tridimensionnelles utilisées en numérisation 3D [Lavoué, 2005][Cayre, 2003]. Nous distinguons trois familles principales de représentation : les nuages de points, les modèles maillés et les modèles surfaciques.

3.1.1 Nuage de points

Tous les scanners 3D effectuent l'acquisition d'un nuage de points (figure 3.2). Chaque point est représenté au minimum par ses coordonnées X, Y et Z. Les composantes couleur (R, G, B, A) peuvent être ajoutées. Certains systèmes d'acquisition triangulent

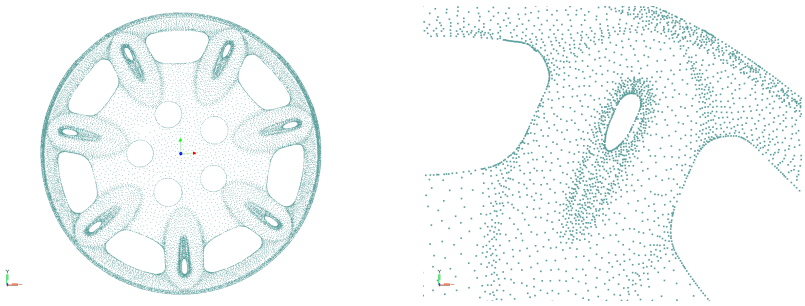


Figure 3.2 – Nuage de points

automatiquement les données afin de fournir une vue maillée à l'opérateur. Cette représentation offre une meilleure visualisation des données acquises, permettant à l'opérateur de définir les données manquantes plus rapidement.

3.1.2 Maillage

Un maillage est généré par triangulation 2D ou 3D d'un nuage de points (section 3.5). Les maillages utilisés en numérisation 3D sont des maillages triangulaires (où chaque facette est représentée par un triangle, figure 3.3). Cette représentation est la plus courante en numérisation 3D.

Un modèle maillé est constitué de sommets (points), d'arêtes et de facettes. Les caractéristiques topologiques importantes sont les trous, le genre et le nombre de composantes

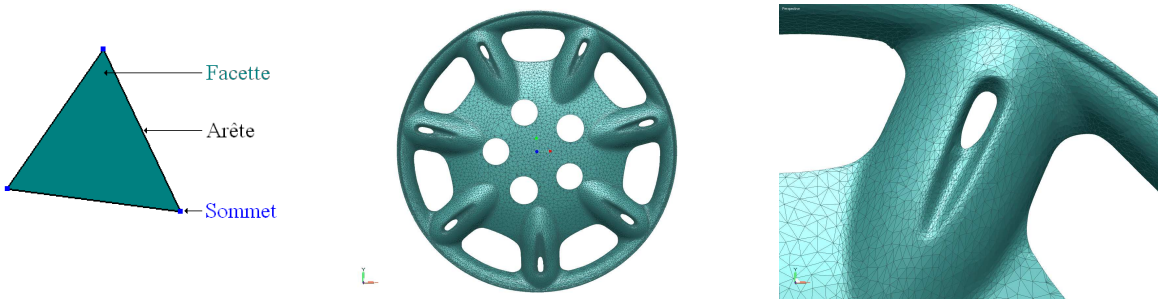
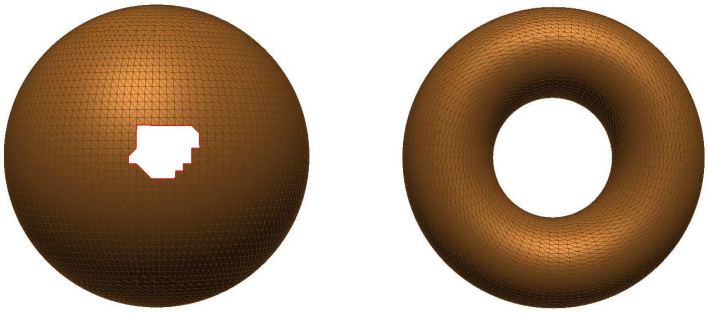


Figure 3.3 – Modèle maillé

connexes. Une arête n'appartenant qu'à une seule facette est appelée "bord" (ou "frontière"). Un polygone créée par des bords forme un trou de maillage (un objet réel ne peut avoir un trou de maillage, figure 3.4). Le genre d'un objet correspond au nombre



(a) (b)

Figure 3.4 – Définition d'un trou : (a) trou de maillage ; (b) trou topologique

de trou(s) topologique(s) qu'il possède : le genre d'une sphère est 0, celui d'un tore est 1 . . . La relation entre ces caractéristiques est donnée par l'équation d'Euler-Poincaré :

$$V - E + F - H = 2(C - G) \tag{3.1}$$

où V est le nombre de sommets, E le nombre d'arêtes, F le nombre de faces, H le nombre de trou, C le nombre de composantes connexes (figure 3.5) et G la somme des genres des composantes.

Chaque facette d'un maillage possède une normale, correspondant au vecteur normal au plan supportant la facette. Ces normales permettent de définir l'intérieur et l'extérieur d'un objet et de réaliser un rendu.

Cette représentation facilite les algorithmes d'intersection, de collision, de rendu et permet une visualisation rapide. Elle permet également de représenter des objets aux formes complexes. Enfin, de nombreuses techniques permettent de générer des

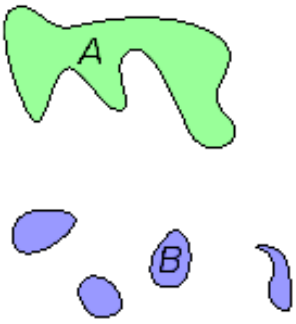


Figure 3.5 – Composantes connexes : A est composé d'une composante connexe et B de 4 composantes connexes

maillages à partir d'autres modèles géométriques (surfaces paramétriques, implicites . . .) [Tristano et al., 1998][Cuilliere, 1998][Owen et al., 2002].

3.1.3 Surfaces

Un modèle surfacique est représenté par un ensemble de surfaces paramétriques (figure 3.6). Ces modèles sont créés :

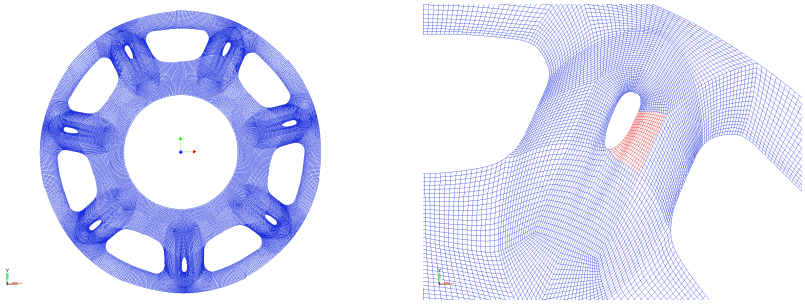


Figure 3.6 – Modèle surfacique

- en conception (CAO - Conception Assistée par Ordinateur), afin de définir un nouveau produit,
- en rétroconception, à partir de points de référence ou de courbes génératrices obtenues par un palpeur (ou un laser point). Ils peuvent également être générés à partir d'un modèle maillé. Cette étape est cependant complexe et nécessite l'intervention d'un opérateur expérimenté.

Ces modèles sont utilisés dans le milieu industriel, pour la duplication d'un objet (usinage . . .) ou pour le contrôle dimensionnel.

3.2 Propriétés intrinsèques de l'objet

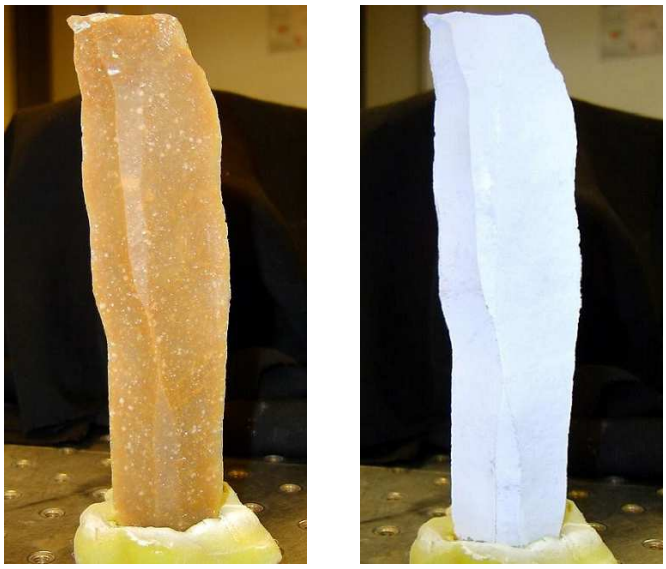
L'objet doit parfois être préparé en vue de l'acquisition, en fonction du matériau dont il est constitué. En effet, la propriété de transparence reste un problème lors de l'acquisition 3D [Beraldin, 2004][Loriot et al., 2007a] (figure 3.7). Ce problème est dû à



Figure 3.7 – Problème de matériau : bords translucides

la technologie employée, la projection d'un laser ou d'une onde lumineuse. En effet, l'information de profondeur permettant de reconstituer la $3^{ème}$ dimension de l'objet est déterminée par le traitement des informations récupérées par la caméra. Si le taux d'absorption de la lumière du laser est trop grand, les informations relevées seront forcément altérées. Afin de résoudre ce problème, une fine couche de poudre peut être appliquée sur l'objet (révélateur de ressuage). Cette poudre permet d'opacifier la surface de façon à limiter l'absorption du laser (figure 3.8) mais nécessite un lavage à l'eau. Si l'objet à numériser se trouve être trop brillant, le résultat obtenu lors de la numérisation est détérioré pour les mêmes raisons techniques que dans le cas de surfaces transparentes. Le laser est fortement réfléchi et le capteur est saturé par la trop grande intensité de lumière. Là encore, il est difficile de trouver une solution mis à part l'application d'une couche de poudre.

Il n'est cependant pas toujours possible d'appliquer ce genre de produit. Pour les objets comme les pièces de musées ou les objets patrimoniaux et archéologiques, l'ajout d'une couche de quelque nature que ce soit est interdite du fait de leur fragilité et de leur valeur patrimoniale. Les dimensions de l'objet sont également une contrainte forte. La figure 3.9 montre un exemple de prestation qui n'a pu être réalisée en raison du caractère réfléchissant de la carrosserie. Cette voiture étant une pièce de musée de grandes dimensions, il était impossible de la poudrer.



(a) (b)

Figure 3.8 – Poudrage d'un objet : (a) silex brut ; (b) silex poudré



Figure 3.9 – Objet impossible à poudrer en raison de ses dimensions et de sa valeur

Dans le milieu industriel, les mesures doivent être les plus précises possibles, or l'épaisseur de la couche déposée introduit une erreur dans les informations 3D relevées, de l'ordre de 15μm environ, en fonction de la quantité de poudre appliquée (figure 3.10). De plus, la poudre est appliquée manuellement, entrainant ainsi un problème d'homogénéité de l'épaisseur.

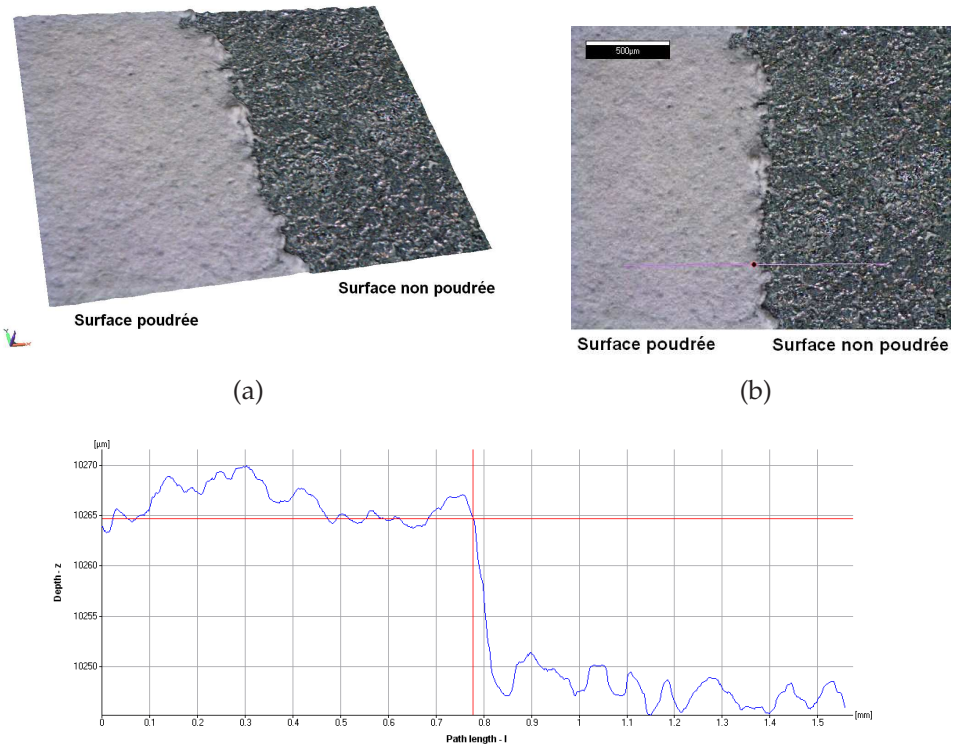
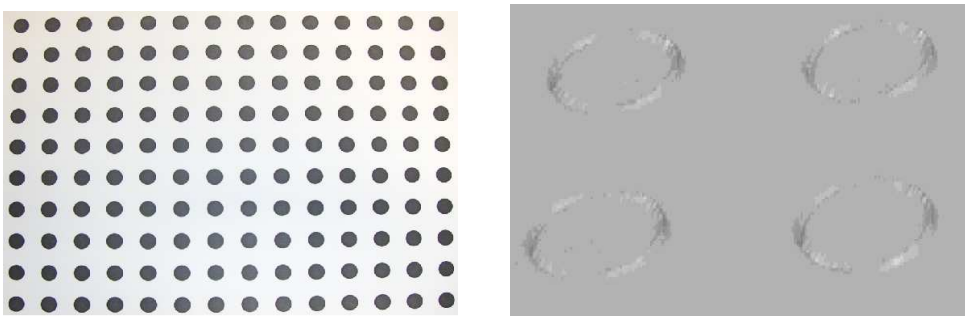


Figure 3.10 – Erreur due à l'application d'une poudre : (a) Données 3D acquises ; (b) Image 2D et définition du profil de mesure ; (c) Profil mesuré

L'application d'une couche supplémentaire implique également la perte du microrelief et de la teinte de l'objet. A noter tout de même les avancées technologiques évoquées au paragraphe 2.3.2. De même, la dernière version du système InfiniteFocus d'Alicona ("Depth from Focus") permet l'acquisition de vues sous éclairage polarisé pour les matériaux réfléchissants comme les pièces usinées. Mais ces nouveaux produits ne permettent pas encore la numérisation d'objet parfaitement réfléchissant ou transparent. Pour ces matériaux, plusieurs études sont en cours [Morel, 2005][Ferraton, 2007] (section 2.5.3).

La teinte de l'objet est également un facteur déterminant dans la phase de numérisation. En effet, dans le cas de l'acquisition avec un système laser, une variation importante de la teinte (passage du noir au blanc par exemple) va influer directement sur la précision

du scanner. Une "discontinuité de couleur" implique une variation de la quantité de lumière absorbée par l'objet (grande pour les couleurs foncées, faible pour les couleurs claires). Cette variation se traduit par une erreur de mesure du capteur, et donc une erreur sur le calcul de la profondeur du point numérisé. Ainsi, lors de la numérisation d'un plan dont la texture est donnée par une image bi-modale (noire et blanche), on peut constater une différence de hauteur à l'endroit du changement de teinte (figure 3.11). Ce phénomène se produit principalement avec les scanners laser d'ancienne



(a) (b)

Figure 3.11 – Erreur due au contraste : (a) mire test ; (b) détail de la numérisation obtenu avec le scanner Vi910 de Konica-Minolta et présence de creux dans les zones de fort contraste

génération (avant 2000). Les nouvelles technologies permettent d'éliminer ce défaut dans la majorité des cas (adaptation automatique point par point de la puissance du laser, section 2.3.2).

3.3 Applications possibles et dimensions de l'objet

Avant de numériser un objet, l'application visée doit être prise en compte. On distingue généralement trois types d'applications [Seulin et al., 2006] (figure 3.12) :
– l'analyse : mesure dimensionnelle, reconnaissance de caractéristiques ...
– la visualisation : rendu local ou web, réalité augmentée ...
– la duplication : usinage, prototypage rapide, fonderie ...
Les dimensions de l'objet vont également jouer un rôle important dans le choix du système d'acquisition. La classification générale est la suivante :
– volume inférieur à $1cm^3$: dentaire, biologie, archéologie ...
– volume compris entre $1cm^3$ et $1m^3$: archéologie, automobile ...
– volume supérieur à $1m^3$: architecture, automobile, nautisme, aéronautique ...
En fonction de l'application visée et des dimensions de l'objet, le choix du scanner sera différent, de même que les post-traitements à appliquer aux données acquises.

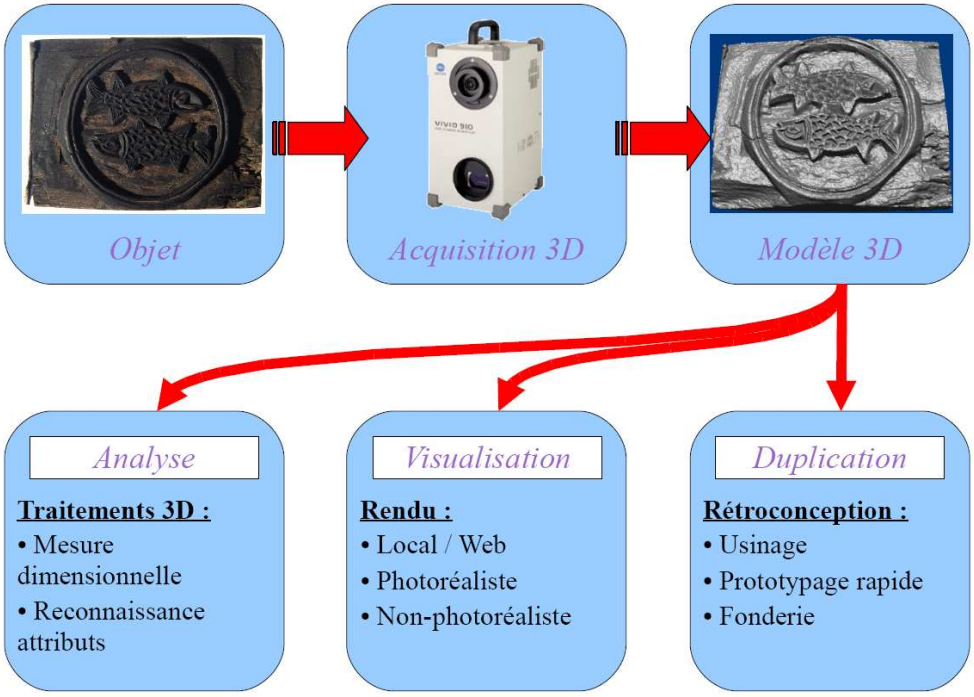


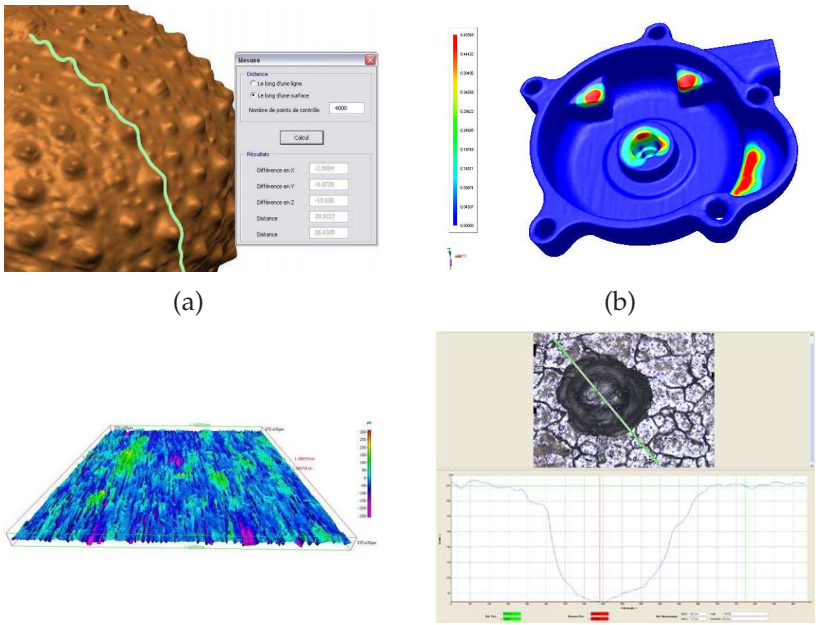
Figure 3.12 – Applications de la numérisation 3D

3.3.1 Analyse

L'analyse d'objets regroupe toutes les opérations de prises de mesures sur un modèle 3D (figure 3.13), telles que des mesures dimensionnelles (prise de cotes), des calculs de déviation (modèle CAO - modèle numérisé). Ces calculs représentent actuellement la principale application des scanners 3D. Ces mesures requièrent un système de numérisation de grande précision, ainsi qu'un maillage dense, afin d'avoir des mesures représentatives de la forme de l'objet. La mesure peut se porter uniquement sur une partie de l'objet et donc ne nécessite pas une numérisation exhaustive dans tous les cas. Les opérations d'analyse peuvent s'effectuer sur un nuage de points ou sur un modèle maillé. Cette application est utilisée en industrie (contrôle de pièces usinées ...), en biologie [Loriot, 2005] (étude des caractéristiques de croissance).

Les systèmes d'acquisition palpeur ou laser point sur MMT sont utilisés pour les prises de cotes (distance entre deux caractéristiques de la forme), du fait de la mesure ponctuelle qu'ils effectuent.

Pour l'analyse de surfaces ou d'objets de petites dimensions (volume inférieur au centimètre cube), les systèmes de "Depth from Focus" sont les plus adaptés. Ces scanners permettent l'acquisition d'une surface très petite (entre $15\mu m^2$ et $25mm^2$) avec une forte



(a) (b)

(c) (d)

Figure 3.13 – Applications liées à l'analyse : (a) mesure dimensionnelle ; (b) carte de déviation ; (c) rugosité ; (d) mesure de profil

résolution (entre 0.3μm et 6μm). Si une analyse complète de la pièce doit être réalisée, le système doit être équipé d'axes de rotation supplémentaires pour un recalage automatique des vues. Les systèmes d'acquisition à triangulation laser ligne sur MMT ou bras polyarticulé peuvent également être utilisés, mais la résolution sera plus faible (de l'ordre de 10μm sur la ligne).

Lorsque le volume de l'objet est inférieur au mètre cube, les systèmes d'acquisition à triangulation laser ligne (MMT ou bras polyarticulé) ainsi que les systèmes à acquisition par vue sont les plus appropriés. La principale source d'erreur provient alors du recalage entre chaque acquisition.

Pour les objets encore plus volumineux, les scanners à temps de vol peuvent également être employés. Le principal inconvénient de ces systèmes est leur faible précision (de l'ordre du millimètre). Les systèmes MMT de grandes dimensions peuvent également être utilisés, mais uniquement pour des prises de cotes ou de références, et non pour une numérisation complète. Les systèmes sur bras polyarticulés ou à projection de franges sont également utilisables, mais avec un important risque de propagation d'erreur de recalage à chaque acquisition (de quelques millimètres à quelques centimètres en fonction du nombre de positions et des dimensions de l'objet).

3.3.2 Visualisation

La visualisation (locale ou par internet) est une application en forte croissance. De nombreuses entreprises mettent de plus en plus souvent en ligne des modèles 3D. Cette application est très utilisée dans le domaine archéologique car elle permet de manipuler et de diffuser les modèles 3D d'objets fragiles sans risque de détérioration [Seulin et al., 2006] (figure 3.14). Elle est également mise en place dans le milieu industriel, où certaines sociétés mettent en ligne les modèles CAO de leurs produits. Depuis quelques années, le milieu de la mode utilise la visualisation web en mettant en ligne des cabines d'essayage virtuelles [D'Apuzzo, 2007]. Ces modèles 3D doivent être texturés afin d'augmenter le réalisme. De plus, l'ajout de la texture permet de diminuer la densité du modèle, et donc de réduire la taille du fichier, favorisant ainsi la diffusion par internet. La précision des données n'est pas prioritaire pour ce type d'application, mais la numérisation doit être complète.



Figure 3.14 – Visualisation d'un tampon ancien par internet

Pour les applications se rapportant à la visualisation, le choix des scanners est plus simple, la précision n'étant pas critique. Les scanners à triangulation laser ou à acquisition par vue peuvent être utilisés pour des objets de volume inférieur au mètre cube. D'un point de vue pratique, les scanners à privilégier sont les scanners à triangulation laser sur bras polyarticulé, du fait de leur simplicité d'utilisation et de la rapidité d'acquisition. Il faut toutefois utiliser un appareil photographique pour associer l'information de texture. Les scanners temps-de-vol (détection de pulse ou modulation en amplitude) sont utilisés pour les objets plus volumineux. Certains systèmes texturent automatiquement les données 3D (GS de Trimble, Vi de Konica-Minolta . . .).

Les têtes d'acquisition sur MMT sont ici peu pratiques, du fait de la faible vitesse d'acquisition et de la plus grande difficulté de mise en œuvre. Pour les mêmes raisons,

les systèmes de "Depth from Focus" ne doivent être utilisés que pour les objets de très petites dimensions.

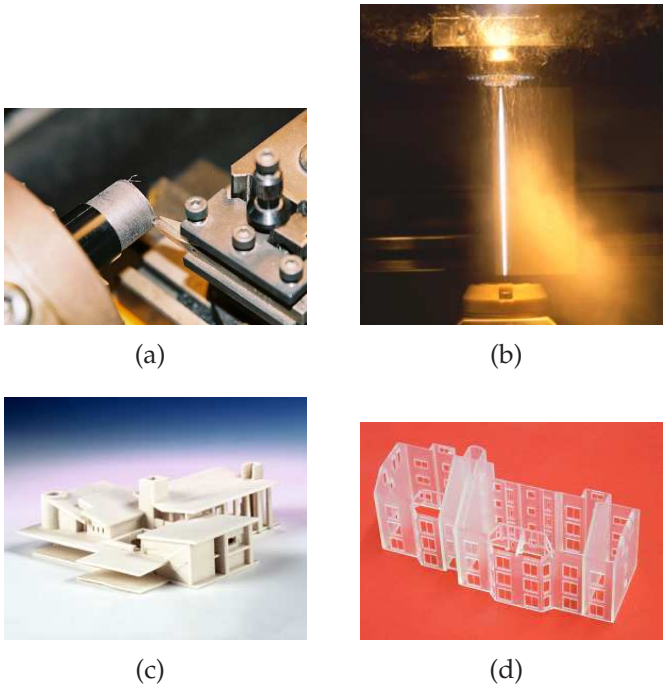
La principale difficulté est l'acquisition et l'intégration de la texture. Cette étape est décrite à la section 3.5.6.

3.3.3 Duplication

Il existe plusieurs méthodes pour fabriquer un objet [Lauvaux, 2005] (figure 3.15). Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories :

– les méthodes par ajout de matière : l'impression 3D, la stéréolithographie, le frittage de poudre . . .
– les méthodes par enlèvement de matière : l'usinage grande vitesse (UGV), l'électroérosion . . .

La première catégorie nécessite un modèle maillé comme modèle de référence. Celui-ci doit être fermé, c'est-à-dire sans trou dans le maillage. Il faut donc une numérisation complète de l'objet. La deuxième catégorie utilise un modèle surfacique, obtenue après conception ou rétro-conception.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 3.15 – Procédés de duplication 3D : (a) usinage ; (b) électroérosion à fil ; (c) impression ; (e) stéréolithographie

La duplication d'objet peut avoir plusieurs objectifs : la création d'un prototype ou de petites séries, l'étude ou l'exposition d'un objet fragile (figure 3.16), . . .



Figure 3.16 – Modèle 3D en résine, duplication par impression 3D

Pour les méthodes par ajout de matière, les systèmes d'acquisitions les plus adaptés sont les systèmes laser ligne sur bras polyarticulés ou les systèmes à projection de franges. Le modèle 3D devant être un maillage fermé, les systèmes laser point ou palpeur sont ici à éviter. Dans le cas des méthodes par enlèvement de matière, le modèle 3D devant être surfacique, la situation est inversée : ce sont les systèmes laser point et palpeur les plus appropriés. Dans le cas de la duplication à échelle réduite d'un objet de grandes dimensions (comme ça peut être le cas dans l'architecture), les systèmes temps-de-vol peuvent être utilisés (en gardant à l'esprit la faible précision de ces systèmes).

3.3.4 Synthèse

Avant de débuter l'acquisition 3D, l'opérateur doit sélectionner le système adéquat en fonction de l'objet à numériser et de l'objectif visé. Un récapitulatif des pré-requis en fonction de l'application choisie est présenté au tableau 3.1.

	Analyse	Visualisation	Duplication
Précision	++	-	++
Densité du maillage	++	-	+
Complétude	-	+	++ (enlèvement) / - (ajout)
Texture	-	++	-
Type de données	Points / Maillage	Maillage	Maillage / Surface

TABLE 3.1 – Récapitulatif des applications (++ très important : ; + : important ; - : peu ou pas nécessaire

3.4 Choix du scanner et protocoles d'acquisitions

Une fois les pré-requis définis, l'utilisateur doit choisir le système adapté à ses besoins. Les procédures d'acquisition diffèrent en fonction du type de scanner utilisé. Dans cette section, nous décrirons les protocoles d'acquisitions pour les systèmes rencontrés, à savoir :

– les systèmes laser point ou ligne sur MMT (ou bâti 3 axes) : Réplica de 3DScanners,
– les scanners à acquisition par vue : triangulation laser (Vi910 de Konica-Minolta), temps-de-vol (GS101 et GS200 de Trimble, HDS et ScanStation2 de Leica, LS de Faro), projection de franges (ATOS de Gom, COMET5 de Steinbichler)
– les capteurs laser ligne : sur bras polyarticulé (MMZ de Metris sur bras Cimcore, MMD de Metris sur bras Faro, GScan de Romer) ou sur tracker optique (KScan LC50 et KScan MMD)

3.4.1 Capteurs point ou ligne sur MMT

Les capteurs ligne ou point sur MMT ne sont pas utilisés pour numériser entièrement un objet. Le principal avantage d'un capteur sur MMT est sa grande précision de positionnement. Tant que l'objet n'est pas déplacé ou retourné, toutes les données acquises sont automatiquement recalées entre elles. Ces systèmes servent à contrôler certaines dimensions de l'objet, en vue d'une comparaison avec le modèle CAO par exemple. Dans le cas d'un laser point, le temps de numérisation d'un objet complet serait inacceptable. Pour un laser ligne, c'est le mode de fonctionnement du système qui restreint son utilisation. En effet, la manipulation d'un capteur sur MMT n'est pas directe : chaque trajectoire est programmée en fonction de différents paramètres (position de départ, position d'arrivée, orientation du capteur, pas d'échantillonnage . . .) et génère une bande de points 3D dont la largeur dépend du capteur utilisé [Mahmud et al.,

2007][Mehdi-Souzani, 2006][Prieto, 2000]. Le balayage s'effectue perpendiculairement à la ligne laser (figure 3.17). Ce mode opératoire empêche une manipulation "intuitive" du capteur par l'opérateur et est assez complexe à mettre en œuvre. Aussi, dans le cas de l'utilisation d'un capteur laser ligne, les bras polyarticulés sont beaucoup plus adaptés à la numérisation complète d'un objet (lorsque la précision requise n'est pas critique).

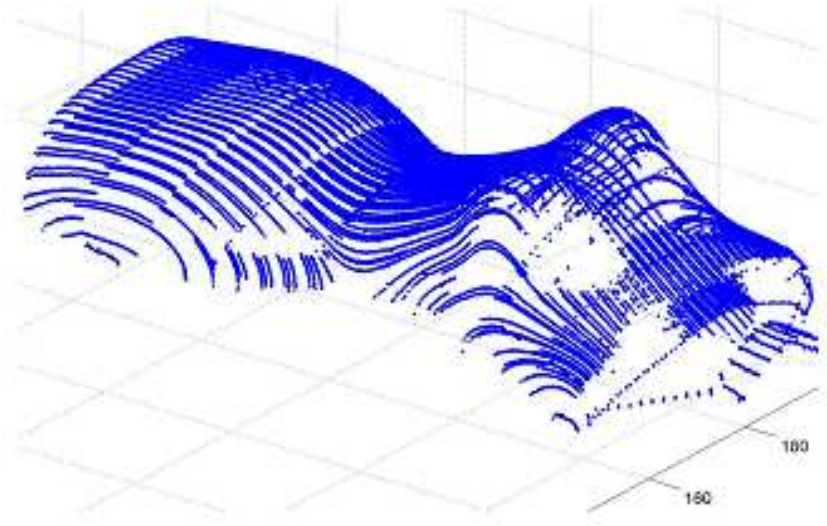


Figure 3.17 – Acquisition avec un capteur laser ligne sur MMT (d'après [Mehdi-Souzani, 2006])

Le tableau 3.2 donne un récapitulatif des avantages et inconvénients des capteurs laser sur MMT.

Avantages	Inconvénients
Très grande précision de positionnement Très grande précision des données obtenues *(en fonction du capteur)* Recalage automatique des différentes bandes acquises *(toutes les données sont acquises dans le même référentiel machine)*	Manque de maniabilité Vitesse d'acquisition faible

TABLE 3.2 – Avantages et inconvénients des capteurs sur MMT

3.4.2 Scanners à acquisition par vue

Dans cette catégorie, trois types de scanners peuvent être identifiés : les scanners à triangulation laser ligne à balayage (avec miroir rotatif), les scanners temps de vol et les systèmes à projection de franges lumineuses. L'utilisation de ces systèmes est assez intuitive : le scanner est positionné devant l'objet ou la scène à numériser et une première vue est acquise. En fonction des données présentes sur cette vue, l'opérateur définit la position suivante (en déplaçant l'objet ou le scanner) et effectue une nouvelle acquisition. Le nombre de prises de vue va dépendre de la complexité géométrique de l'objet, ainsi que de l'expérience de l'opérateur dans le choix de la vue suivante.

Lors d'une acquisition, la vue numérisée est positionnée dans le référentiel du scanner. En déplaçant le scanner, le référentiel est également modifié, et l'acquisition suivante n'est donc pas recalée par rapport à la première. En fonction du système utilisé, les différentes acquisitions peuvent être recalées au fur et à mesure (manuellement ou automatiquement), permettant à l'opérateur de mieux apprécier les données manquantes. Lorsque cette étape n'est pas possible, les post-traitements sont appliqués à un premier ensemble de vues, puis l'opérateur juge si des acquisitions supplémentaires sont nécessaires ou non. La figure 3.18 montre un exemple d'une prise de vue. Ce type de système

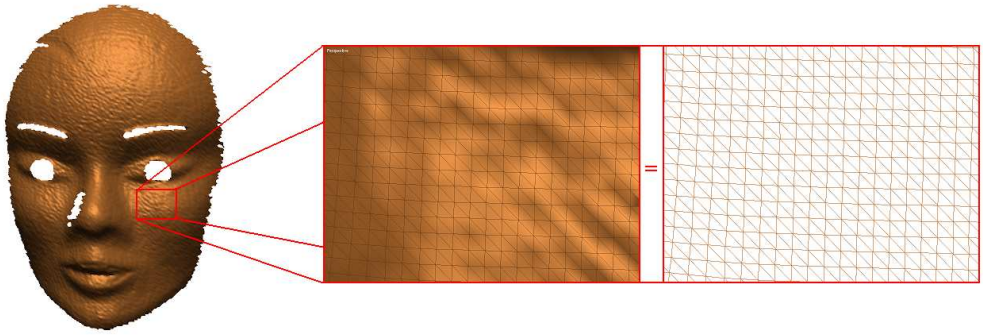


Figure 3.18 – Vue acquise en une acquisition et détails du maillage (Scanner Vi910)

génère un nuage de point régulier en X et Y. De nombreux systèmes fournissent directement un modèle triangulé (Vi910, Atos, Comet . . .). Dans le cas de l'acquisition avec un système temps de vol, les données 3D sont sous forme d'un nuage de points. Afin de mailler ce nuage, une triangulation 3D est nécessaire (section 3.5.2).

Le tableau 3.3 illustre les avantages et inconvénients des systèmes à acquisition par vue.

Avantages	Inconvénients
Vitesse d'acquisition élevée Portabilité des systèmes *(sauf systèmes sur bras robot)* Prise de texture *(suivant les systèmes)*	Peu maniable

TABLE 3.3 – Avantages et inconvénients des systèmes à acquisition par vue

3.4.3 Scanners laser ligne sur bras polyarticulé ou tracker optique

L'acquisition d'un objet avec ce type de système est analogue à l'application d'une couche de peinture sur l'objet à l'aide d'un pistolet. La figure 2.33 de la section 2.1 montre un tel système. L'opérateur balaye manuellement la surface de l'objet avec le capteur. L'acquisition des données 3D est donc entièrement manuelle. Les lignes acquises sont automatiquement recalées dans un référentiel unique grâce :
– aux différents codeurs placés dans les articulations dans le cas d'un bras,
– à la triangulation effectuée par les caméras dans le cas d'un tracker optique.
Ce recalage est toutefois moins précis que dans le cas d'une MMT. Au cours de l'acquisition, l'opérateur voit en temps réel les données acquises à l'écran, ce qui lui permet de savoir quelles zones de l'objet restent à acquérir. Le résultat d'une numérisation est visible à la figure 3.19. Les bandes d'acquisition sont très nettement visibles. La résolution dépend :
– de l'espacement des points sur la ligne, qui est lié au modèle de capteur utilisé,
– de l'espacement entre les lignes, qui dépend de la vitesse à laquelle l'opérateur balaye l'objet.
La densité de point est donc plus forte dans l'axe de la ligne que dans l'axe de balayage. Par conséquent, pour avoir une répartition des points la plus homogène possible et densifier la mesure, l'opérateur doit faire l'acquisition d'une même surface plusieurs fois suivant des orientations différentes.

Du fait de leur facilité d'utilisation, ces systèmes d'acquisition sont de plus en plus utilisés de nos jours, et connaissent une évolution rapide en terme de vitesse d'acquisition et de précision de positionnement.

Le tableau 3.4 donne un récapitulatif des avantages et inconvénients de ces systèmes.

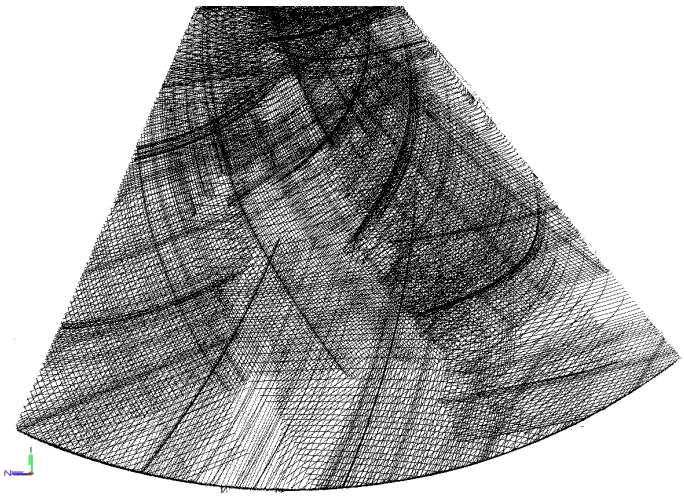


Figure 3.19 – Nuage de points brut acquis par un système laser ligne avec tracker optique (Scanner KScan)

Avantages	Inconvénients
Vitesse d'acquisition élevée Portabilité des systèmes Grande maniabilité	Acquisition manuelle Résolution hétérogène Redondance nécessaire

TABLE 3.4 – Avantages et inconvénients des systèmes sur bras polyarticulées

3.4.4 Synthèse

Les systèmes laser point (ou palpeur) sur MMT sont les systèmes les plus adaptés pour le contrôle dimensionnel et la prise de cotes, du fait de leur grande précision. Ils sont inefficaces en visualisation car ils ne sont pas conçus pour une numérisation complète. Ils peuvent être utilisés pour la duplication lorsque l'objet doit être finalisé en rétro-conception.

Les systèmes laser ligne sur MMT ou bras polyarticulé sont des systèmes polyvalents qui peuvent être utilisés dans toutes les applications. Les capteurs sur MMT sont toutefois moins adaptés pour la visualisation, où la précision et la densité du maillage ne sont pas des pré-requis importants. Il vaut mieux les privilégier pour l'analyse.

Les systèmes à acquisition par vue sont également des systèmes polyvalents. Ils permettent une acquisition rapide avec une bonne résolution. Ils sont toutefois moins maniables que les systèmes sur bras polyarticulés.

Quelque soit le système utilisé, l'acquisition 3D est complètement manuelle : l'opérateur doit définir les différents points de la trajectoire dans le cas d'une MMT, choisir les

positions optimales pour les systèmes à acquisition par vue ou parcourir la surface de l'objet avec un capteur laser ligne sur bras polyarticulé.

Le tableau 3.5 résume les avantages et inconvénients des différents systèmes décrits dans ce chapitre.

3.5 Post-traitements

Les données acquises ne peuvent être utilisées directement : elles présentent du bruit de mesure, des données inutiles (environnement) . . . Elles doivent donc être traitées afin d'être utilisables. Curless [Curless, 1999], Girod [Girod et al., 2000] et Boehler [Boehler et al., 2002] donnent un aperçu des différents traitements à appliquer aux données 3D brutes.

3.5.1 Filtrage du bruit

En fonction de la matière de l'objet, les bruits de mesure sont plus ou moins importants. Cela se traduit par des points qui n'ont aucune signification réelle (effets de bords, points aberrants . . .), et qui doivent donc être supprimés (figure 3.20). Au même titre que pour les images, il existe des algorithmes de débruitage pour les maillages. Un simple filtre moyenneur, par exemple, peut atténuer l'influence du bruit par moyennage local en chaque sommet. Malheureusement, ce type de filtre ne fait aucune distinction entre ce qui est réellement du bruit et ce qui correspond aux fins détails du relief de la surface. Cela entraîne bien souvent une perte des détails géométriques, qui se traduit par un aplatissement des creux et des bosses ou un arrondissement des arêtes saillantes. Des algorithmes de débruitage plus évolués, dit adaptatifs, ont donc été développés avec pour objectif de tenir compte du comportement local de la surface. Si celle-ci varie fortement dans un voisinage donné, ces variations sont dues au relief en lui même et non au bruit. Inversement, si la surface semble relativement plane dans ce voisinage, les variations observées sont plutôt imputables à l'influence du bruit. Ainsi, les pondérations du filtre sont ajustées en fonction d'une analyse locale de la surface de manière à en préserver les caractéristiques géométriques.

Dans [Fournier et al., 2006], l'auteur a developpé une méthode en trois phases. À partir d'un maillage bruité, la première étape de la procédure est de calculer la transformée

	Capteur laser ligne ou point sur MMT	Scanner à acquisition par vues	Capteur laser ligne sur bras polyarticulé
Vitesse d'acquisition	Faible vitesse d'acquisition *(≈ 80000pts / s balayage motorisé, dépend de la MMT* -	Vitesse d'acquisition très élevée *(≈ 500000pts / s / m^2)* ++	Vitesse d'acquisition élevée *(≈ 80000pts / s balayage manuel)* +
Précision	Excellente précision de positionnement Bonne précision de mesure *(dépend du capteur utilisé)* ++	Bonne précision de positionnement *(bras robot)* ou pas de système de positionnement *(trépied)* Bonne précision de mesure +	Bonne précision de positionnement Bonne précision de mesure +
Texture	Pas de prise de texture -	Possible sur certains systèmes +	Pas de prise de texture -
Maniabilité Ergonomie Facilité d'utilisation	Peu maniable *(positionnement à travers un joystick)* -	Peu maniable *(certaines parties d'un objet complexe sont difficilement accessibles)* -	Excellente maniabilité ++
	Non portable -	Portable +	Portable +
	Référentiel unique *(machine)* Recalage immédiat et précis entre les bandes d'acquisition +	Référentiel différent pour chaque vue -	Référentiel unique *(bras)* ++
	Nécessite un grand nombre de points de vue pour la numérisation d'un objet complexe -	Nécessite un grand nombre de points de vue pour la numérisation d'un objet complexe -	Nécessite peu de points de vue pour la numérisation d'un objet complexe ++
Application prioritaire	Analyse (Duplication)	Visualisation (Duplication)	Duplication (Visualisation)

TABLE 3.5 – Récapitulatifs des caractéristiques des systèmes d'acquisition

en distance (TD) du maillage. Ensuite le filtrage de la TD est réalisé et une troisième étape de triangulation de la TD permet d'obtenir un nouveau maillage filtré. La TD d'une vue est une voxelisation de la vue où chaque voxel contient la distance minimale à la surface de l'objet. Le filtrage de la TD est une généralisation de l'opération de convolution 2D utilisée en traitement d'images. Les filtres de convolution 3D sont appliqués sur la TD pour filtrer les valeurs de distance contenues dans les voxels. Les noyaux de convolution 3D sont de tailles variables, comme par exemple des noyaux de 3×3×3 ou encore 5×5×5 voxels.Le filtre 3D adaptatif utilisé est une généralisation d'un filtre moyenneur adaptatif 2D et utilise la variance du bruit du scanner utilisé.

Le filtrage du bruit peut être appliqué directement sur le nuage de points ou sur une surface déjà maillée.

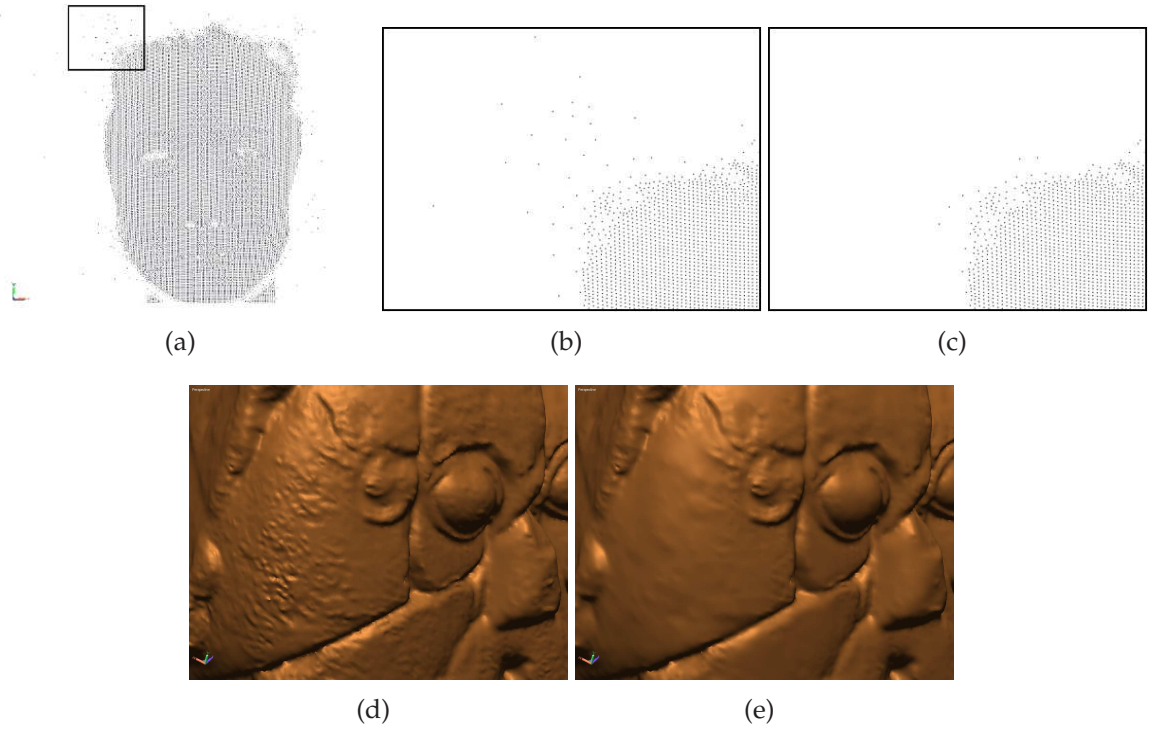
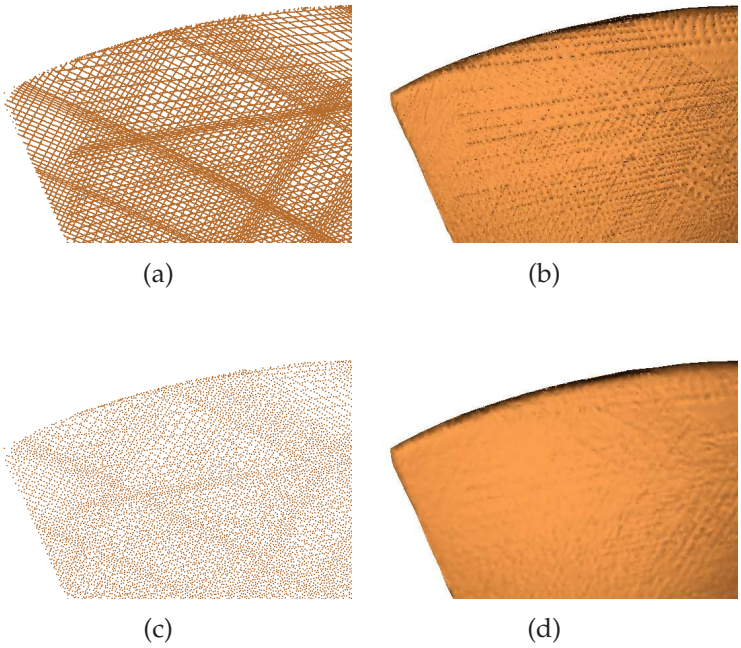


Figure 3.20 – Filtrage du bruit de mesure : (a) données brutes ; (b) détail ; (c) données filtrées ; (d) Modèle maillé bruité ; (e) Modèle maillé débruité ;

Un nuage de points trop dense et hétérogène doit également être filtré afin d'éviter une trop grande redondance des données. C'est le cas lors de la numérisation d'un objet avec un capteur laser ligne sur un bras polyarticulé, car les acquisitions doivent être croisées. Cette redondance s'accompagne d'un bruit de mesure et entraîne d'importantes erreurs lors de la triangulation des données (figure 3.21) et de la fusion des vues.



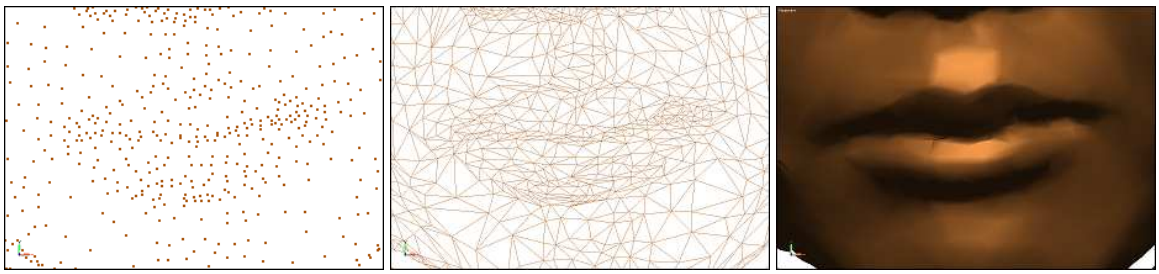
(a) (b)

(c) (d)

Figure 3.21 – Filtrage de redondance : nuage brut (a) et maillé (b) ; nuage filtré (c) et maillé (d)

3.5.2 Triangulation

Une fois les données filtrées, elles peuvent être triangulées, en fonction de l'application visée [Hoppe, 1995]. Cette opération permet de passer d'un nuage de points à un modèle maillé (figure 3.22). Deux types de triangulation peuvent être différenciés : la triangulation 2D et la triangulation 3D.



(a) (b) (c)

Figure 3.22 – Triangulation d'un nuage de point : (a) nuage de point ; (b)maillage obtenu par triangulation ; (c) rendu

Le principe général de la triangulation 2D est la projection du nuage de points 3D sur un plan 2D, suivant la direction de la prise de vue. La triangulation 2D de Delaunay est ensuite appliquée [Boissonnat and Geiger, 1993]. Cette triangulation ne fonctionne que sur une prise de vue unique et non sur un nuage de points complet.

En triangulation 3D, plusieurs méthodes existent [Frey et al., 1996] (comme la tétraédrisation de Delaunay), basées sur une approche volumique ou surfacique [Cayre, 2003]. Ces triangulations permettent de mailler un nuage de points complet. Elles nécessitent généralement un nuage dense et homogène.

Pour l'analyse d'objets, cette étape n'est pas obligatoire. Certaines mesures peuvent se faire directement sur le nuage de points acquis (carte de déviation, . . .).

3.5.3 Segmentation et nettoyage

Lors de la numérisation d'un objet, il n'est pas rare qu'une partie de l'environnement soit numérisée en même temps, et ce quelque soit le système d'acquisition utilisé. Les données acquises doivent donc être segmentées afin de ne conserver que l'objet. Cette étape est manuelle mais elle peut être automatisée en partie (suppression du plan support) lorsqu'il s'agit d'une MMT (segmentation en fonction de la hauteur).

Les données acquises doivent également être nettoyées [Boehler et al., 2002][RapidForm, 1998] : en effet, lors de la triangulation, des facettes anormales sont très fréquemment créées (figure 3.23) :

- facettes "non-manifold" : si une arête appartient à trois (ou plus) facettes (figure 3.23.a)
- facettes croisées : si les arêtes d'une facette traversent une autre facette (figure 3.23.b)
- facettes redondantes : le nombre d'arêtes et de faces qui appartiennent à un même sommet doit être identique. Les facettes dérogeant à cette règle sont considérées comme redondantes (figure 3.23.c).
- facettes allongées ("pics") : une facette allongée peut être identifiée en fonction de plusieurs critères : longueur d'arête, rapport base / hauteur, rapport arête maximale / arête minimale . . . Ces seuils sont calculés en fonction des paramètres du scanner (figure 3.23.d).
- facettes instables : une facette est instable lorsque sa normale présente une incohérence par rapport aux autres facettes (figure 3.23.e-f).

Ces erreurs peuvent être dues à un filtrage du bruit insuffisant, à des paramètres de triangulation incorrects (création d'arêtes entre des sommets ne devant pas être reliés . . .), ou à des formes d'objets particulières (objets très fins par exemple).

Il existe différents algorithmes permettant de supprimer automatiquement ces différentes facettes. Ces algorithmes s'appuient sur les caractéristiques des facettes et des

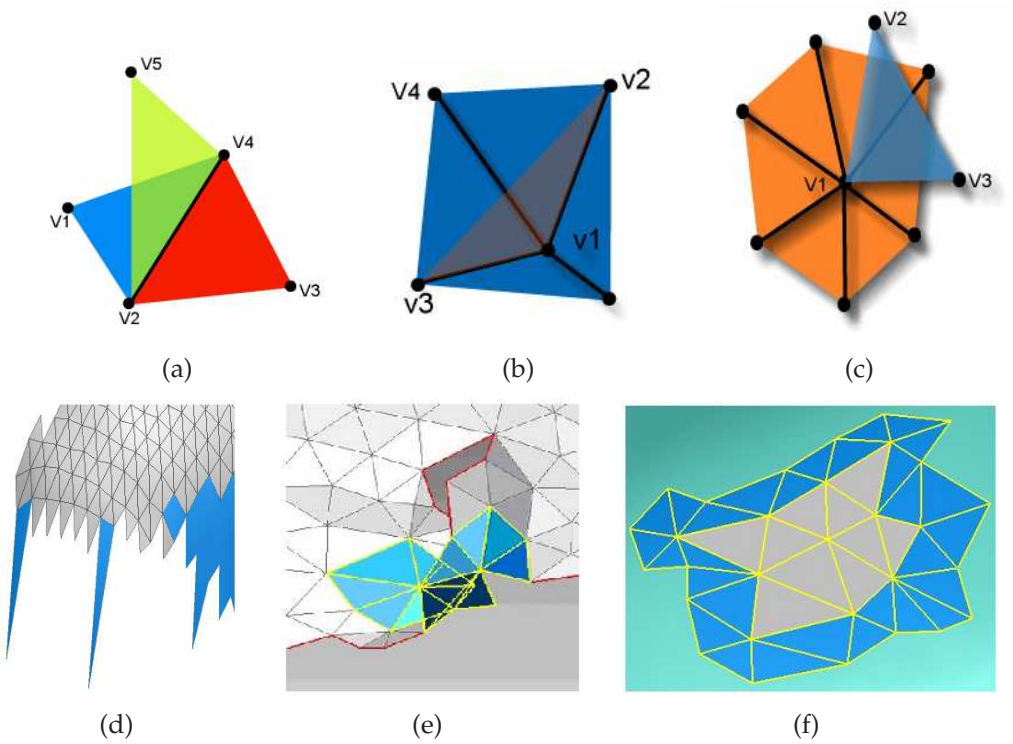


Figure 3.23 – Facettes anormales : (a) non-manifold ; (b) croisées ; (c) redondantes ; (d) pics ; (e-f) instables (images RapidForm)

arêtes : aire de la facette, longueur des arêtes, normale de la facette, nombre de facettes par arête, ...

3.5.4 Recalage manuel / automatique et fusion des vues

Dans [Huber and Hebert, 2003] et [Salvi et al., 2007], les auteurs décrivent plusieurs algorithmes de recalage. Généralement, des points de contrôle reconnaissables dans le nuage de points (ou le modèle maillé) sont nécessaires pour cette étape. Ces points peuvent être des caractéristiques de forme de l'objet (angles, arêtes vives . . .) ou des repères extérieurs (sphères, cibles réfléchissantes . . .) placés à des positions adéquates. Pour effectuer ce recalage, au moins trois points sont nécessaires. Ce recalage peut être automatique si le logiciel de numérisation identifie chaque cible individuellement.

Dans le cas de scanners à acquisition par vue en triangulation laser, les vues doivent être recalées entre elles afin d'obtenir le modèle complet. Ce recalage est également nécessaire lorsque l'objet est numérisé par un système sur bras polyarticulé (ou tracker optique) et que le bras doit être déplacé en raison de la taille de l'objet, ou que celui-ci doit être retourné pour une numérisation complète.

Lors d'un recalage manuel, l'opérateur doit généralement effectuer deux étapes :
- le recalage initial, qui permet de repositionner grossièrement deux vues entre elles. L'opérateur doit sélectionner manuellement les points de correspondance entre les différentes vues (figure 3.24)
- le recalage fin, qui affine le repositionnement des vues. Cette deuxième étape est automatique.

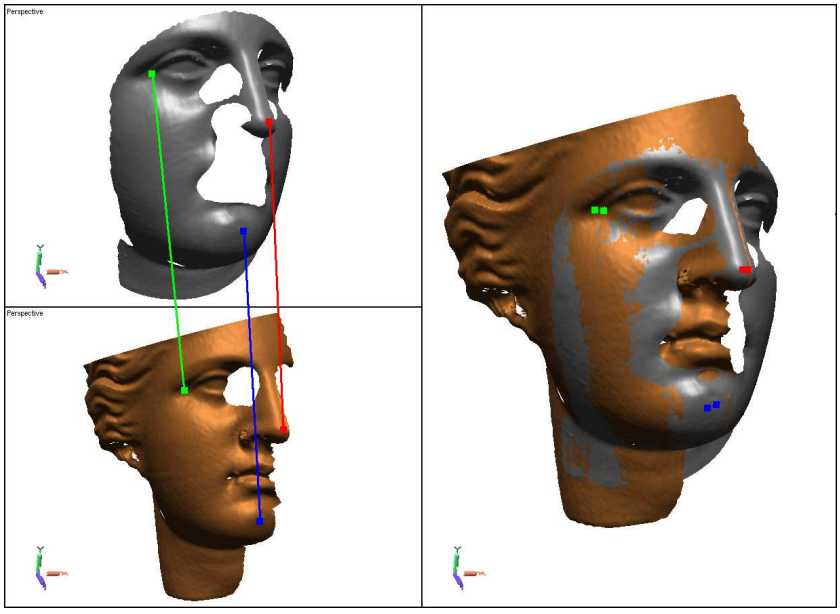


Figure 3.24 – Recalage initial de deux vues : à gauche, la sélection manuelle des points de correspondance ; à droite, le résultat (RapidForm)

Si le système utilisé est un scanner temps de vol, des sphères indexées peuvent être numérisées par l'opérateur, puis le recalage est réalisé automatiquement par le logiciel d'acquisition. Les systèmes à projection de franges utilisent des mires réfléchissantes que l'opérateur positionne dans l'environnement numérisé. Ces mires sont acquises en même temps que l'objet et le recalage est automatique. Pour les capteurs lignes sur bras polyarticulés, certains logiciels permettent l'acquisition de points de référence, afin de créer un référentiel. Celui-ci est acquis pour chaque position du bras, permettant le recalage automatique des vues.

Une fois toutes les vues recalées les unes par rapport aux autres, elles sont fusionnées afin de ne donner qu'un seul modèle 3D. Des algorithmes de fusion sont définis dans [Häusler and Karbacher, 1997], [Rutishauser et al., 1994], [Turk and Levoy, 1994] et [Rocchini et al., 2000]. La méthode développé par Turk *et al.* utilise le principe du "mesh zippering". Cette méthode peut être décomposée en trois phases. Lors de la première phase, les facettes redondantes d'une des deux vues sont supprimées. Une facette est dites redondante si la distance entre ces sommets et la deuxième vue est inférieure à un

seuil. Durant la seconde phase, des sommets sont ajoutées aux intersections des deux vues et les données à l'intérieur des nouveaux bords sont supprimés (figure 3.25) afin que les trous soient triangulés. Le maillage est ensuite réarrangé afin de supprimer les facettes de petites dimensions.

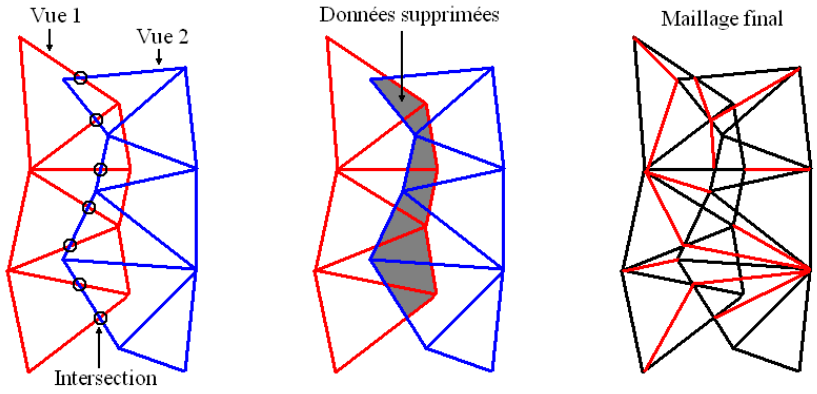


Figure 3.25 – Mesh zippering : la vue 1 est jointe à la vue 2. Les cercles désignent les intersections entre les arêtes de la vue 1 et les bords de la vue 2. Les données entre les deux vues sont supprimées et les facettes nécessaires sont créées

Lors de la fusion des vues, une redondance trop importante des données peut entrainer la création de facettes anormales ou de trous dans le maillage. Les différentes acquisitions doivent donc être segmentées par l'opérateur afin de limiter cette redondance. A l'inverse, un recouvrement insuffisant entre les différentes vues entrainent également la création de trous.

3.5.5 Bouchage des trous

En numérisation 3D, un trou désigne une absence de facettes dans le maillage et non un trou topologique (section 3.1). Les trous dans un modèle 3D peuvent avoir plusieurs origines :

– l'absence de données : la zone n'a pas été numérisée correctement .
– la triangulation : les trous apparaissent lorsque la densité d'une zone est plus faible que sur le reste de la vue.
– le nettoyage : les facettes anormales sont supprimées.
– la fusion : il arrive couramment que la fusion des vues entraîne la création de trous.

Si ces trous sont de petites dimensions, ils ne nécessitent pas l'acquisition de vues supplémentaires. Si l'application visée est la visualisation ou la duplication, ils doivent

malgré tout être bouchés afin que le modèle 3D soit fermé. S'il s'agit d'analyse, il peut être préférable d'effectuer une nouvelle acquisition. En effet, les algorithmes de bouchage de trous créent des points non mesurés (interpolation), et introduisent donc des erreurs. Plusieurs méthodes permettant de boucher les trous ont été développées [Feng and Soon, 1998][Davis et al., 2002][Tekumalla and Cohen, 2004][Jun, 2005]. Jun a développé un algorithme en quatre phases. Dans un premier temps, les facettes du bord du trou traité sont projetées sur un plan normal, calculé à partir des normales de ces facettes. Les intersections formées à partir de cette projection sont calculées afin de générer des "sous-trous". Chacun de ces trous élémentaires est ensuite triangulé (figure 3.26). La méthode la plus rapide consiste a créer des facettes permettant de

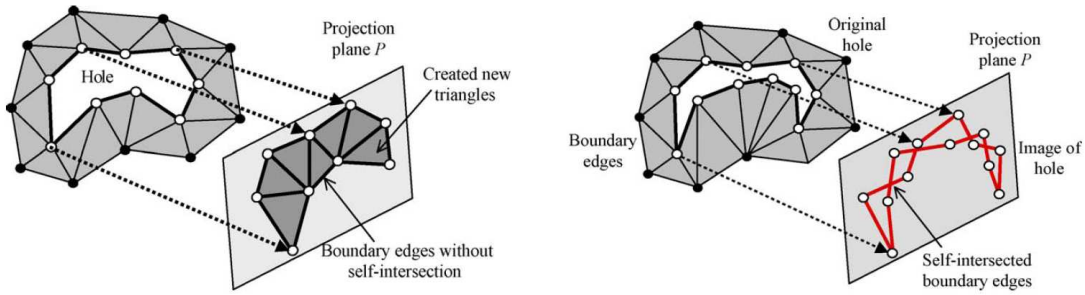
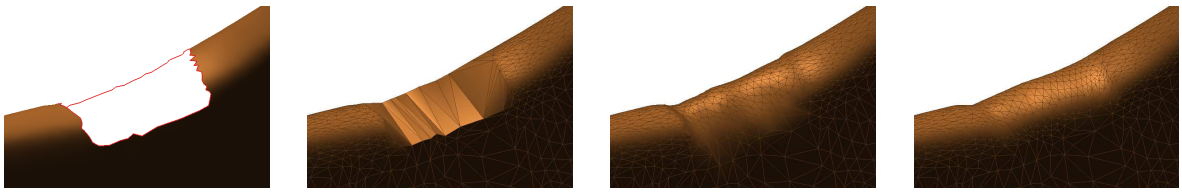


Figure 3.26 – Projection des trous sur un plan normal et triangulation en fonction des intersections [Jun, 2005]

relier les arêtes du trous, avec ou sans lissage. D'autres méthodes prennent en compte la courbure locale afin d'améliorer le résultat (figure 3.27).



(a) (b) (c) (d)

Figure 3.27 – Bouchage de trous : (a) trou ; (b) bouchage sans lissage et sans prise en compte de la courbure ; (c) bouchage avec lissage et sans prise en compte de la courbure ; (d) bouchage avec prise en compte de la courbure

3.5.6 Gestion de la texture

La gestion de la texture pose encore de réels problèmes actuellement. En effet, un grand nombre de systèmes d'acquisition ne fait pas l'acquisition de la couleur, mis à part les

scanners Vi de Konica-Minolta (mais avec une résolution très faible), certains temps-de-vol et les systèmes composés d'appareils photographiques (stéréovion, Shape from Silhouettes). Pour les autres systèmes, il faut donc :

– soit coupler un appareil photographique au système d'acquisition, et calibrer l'ensemble pour que la texture soit correctement placée,
– soit prendre les photographies séparément et les repositionner manuellement.

Dans les deux cas, l'ajustement des photographies sur les données 3D est une étape délicate. Quelque soit le système utilisé, le contrôle de la lumière reste également une grande difficulté, principalement en extérieur (et plus généralement à partir du moment où la numérisation ne se fait pas dans une salle équipée). Un mauvais contrôle de l'éclairage entraîne des zones d'ombre sur les bords de l'objet, ce qui rend la fusion des vues très difficile, et engendre même parfois des teintes différentes sur chaque photographie (figure 3.28). Plusieurs méthodes ont été développées afin de franchir ces difficultés [Callieri et al., 2002][Kraevoy et al., 2003].



Figure 3.28 – Acquisition sans et avec contrôle de l'éclairage

A noter le scanner 3D Arius [Arius, 1998] qui permet la numérisation couleur sans gestion de l'éclairage. Pour cela, ce système utilise trois lasers de couleur différentes (rouge, vert et bleu). Chaque point 3D est représenté par ces coordonnées (X, Y, Z) et par trois valeurs correspondant à la couleur réfléchi par chacun des trois lasers.

3.5.7 Synthèse

Les différents post-traitements décrits dans cette section permettent de traiter les données brutes (nuage de points ou maillage) afin d'éliminer toutes les données non exploitables. Toutes ces opérations nécessitent une intervention de l'opérateur dans le

choix des paramètres à utiliser : la pondération des filtres, la distance de triangulation, les paramètres de nettoyage . . .

Durant la procédure de numérisation 3D, l'étape de post-traitement est la plus coûteuse en temps. En effet, la répartition du temps est généralement de 20% pour l'acquisition et 80% pour le post-traitements. De plus, un mauvais choix pour les différents paramètres peut entraîner des effets non désirables sur les données : un filtrage trop important supprime les détails, une distance de triangulation (distance maximale entre deux points pouvant être reliés) trop grande créée des facettes indésirables . . .

3.6 Outil d'aide à la numérisation 3D

Afin d'assister l'opérateur et d'anticiper certaines erreurs, nous avons développé un outil d'aide à la numérisation 3D. L'objectif de cet outil est d'amener l'opérateur à se poser les bonnes questions et ainsi à accélérer le déroulement des différentes étapes de la numérisation, et ainsi d'améliorer et de normaliser les prestations fournies par la société. Son interface est présentée à la figure 3.29.

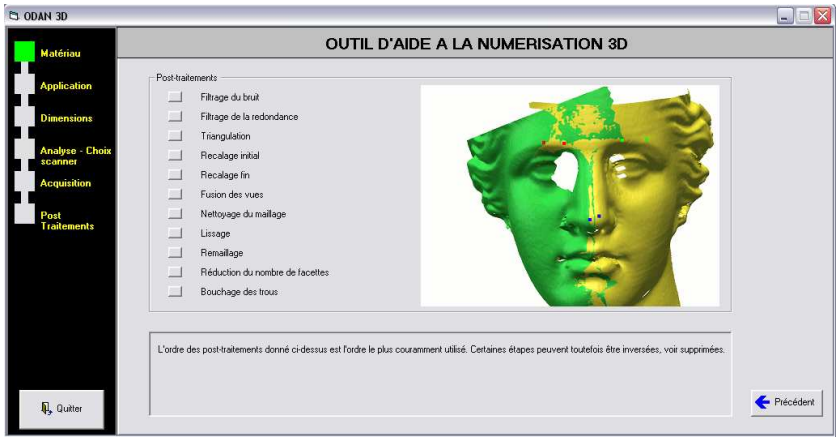


Figure 3.29 – Interface de l'outil d'aide à la numérisation 3D

Cet outil reprend la méthodologie décrite dans ce chapitre et permet à un opérateur d'effectuer les trois étapes de la numérisation :

– l'outil commence par informer l'opérateur de la nécessité de poudrer l'objet en fonction de la matière (section 3.2) et des limitations de cette ajout de matière (perte de précision, perte de l'information de texture . . .). Puis, en fonction des dimensions de

l'objet et de l'application visée, l'outil propose différents scanners en appuyant sur les avantages et inconvénients de chaque système (section 3.4.4).
– le protocole d'acquisition du scanner choisi par l'opérateur (section 3.4) est ensuite présenté,
– les principaux post-traitements à appliquer (section 3.5) sont décrits, en les illustrant par des fichiers exemples (figure 3.30). Les effets souhaités et non désirables de chaque post-traitement sont également détaillés.

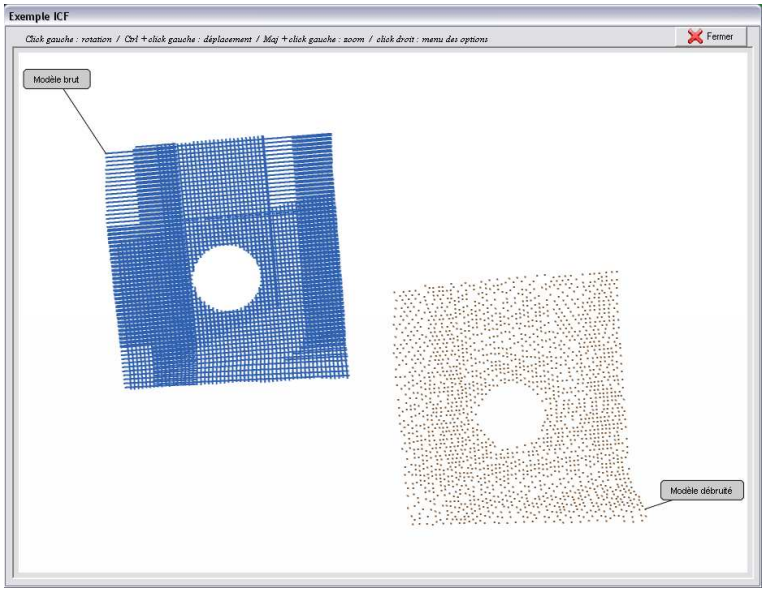


Figure 3.30 – Fichier exemple de l'outil

Cet outil est utilisé dans la société Dynamic3D et au laboratoire Le2i pour les formations sur les différents procédés de numérisation et afin de standardiser les procédures.

3.7 Applications - Etudes de cas

Plusieurs études de cas réalisées par notre équipe sont présentées dans cette section. Ces interventions illustrent certains cas de figure que nous avons rencontrés et montrent l'application des quatre étapes de la méthodologie.

3.7.1 Pièces de monnaie

Le Musée archéologique de Bibracte étudie les échanges commerciaux et le déplacement des populations celtiques à travers l'échange de monnaie. A cette époque, les

matrices de fabrication des pièces (appelées “coins”) étaient sculptés manuellement, et ne servaient que pour une petite quantité de pièces. Chaque série de monnaies est donc légèrement différente. En connaissant l’origine de chaque coin, les archéologues peuvent étudier le parcours et donc les échanges commerciaux entre différentes régions. L’objectif est donc la numérisation de grandes collections de pièces afin d’effectuer une comparaison tridimensionnelle et ainsi faciliter l’identification des séries [Bibracte, 2006] (figure 3.31). De plus, les modèles 3D permettent la reconstitution complète des coins originaux. En effet, ceux-ci étant toujours plus grands que les monnaies, les archéologues ne disposent jamais de l’image complète de la matrice originale.



(a) (b) (c)

Figure 3.31 – Reconstitution de la matrice d’origine : (a-b) : pièces numérisées ; (c) reconstitution

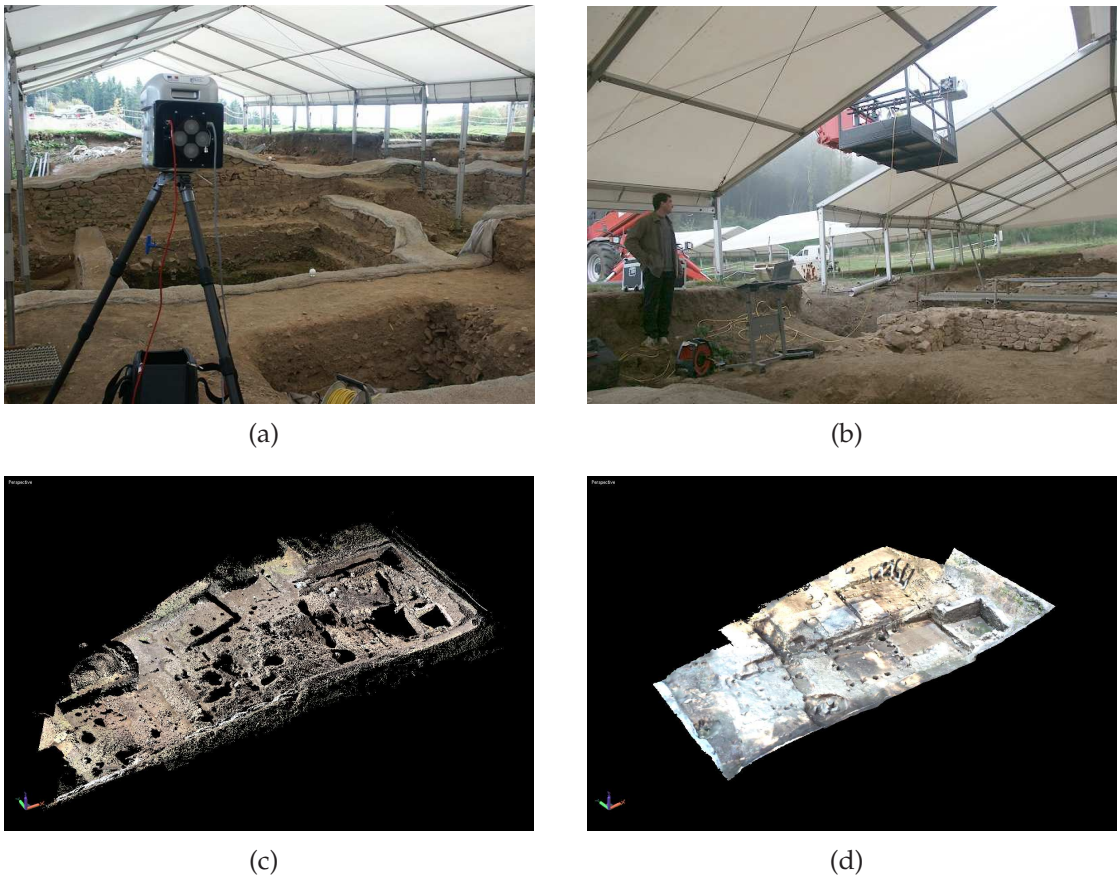
Malgré leur aspect brillant, les pièces de monnaies ne peuvent être poudrées en raison de leur fragilité (corrosion). Les systèmes laser sont donc inefficaces sur ces surfaces. Les pièce étudiées mesurent environ un centimètre carré. La comparaison 3D devant se faire séparément sur chaque face des pièces, la reconstruction complète est inutile. L’application visée est donc l’analyse d’objets réfléchissants de petites dimensions. Nous avons donc choisi pour cette application le scanner InfiniteFocus (technologie “Depth from Focus”).

La numérisation d’un pièce nécessite une vingtaine de prises de vue. Ces acquisitions sont recalées et triangulées automatiquement, et peuvent prendre une journée. Du fait de leur surface brillante, les données acquises sont bruitées. Les points aberrants doivent donc être supprimés puis les trous sont bouchés par l’utilisateur. Ces post-traitements doivent être appliqués avec soin par l’opérateur afin que les pièces puissent être comparées et identifiées par la suite.

3.7.2 Champs de fouilles

Le site de Bibracte abrite une ancienne capitale d'un peuple gaulois, les Eduens. D'importantes fouilles sont donc réalisées tous les ans (de mai à octobre). A la fin de chaque année, les archéologues réalisent des plans des différents sites pour garder un historique des champs de fouilles. Ceux-ci sont en effet "détruits" chaque année afin de pouvoir fouiller plus profondément, pour découvrir des traces d'habitations plus anciennes.

L'objectif est de numériser chaque site à la fin des périodes de fouilles afin de créer un historique 3D des terrains [Bibracte, 2006] afin de repérer les différents éléments qui le composent (murs, emplacements de poutres verticales . . ., figure 3.32).



(a) (b)

(c) (d)

Figure 3.32 – Champ de fouille de Bibracte, numérisé par un scanner GS101 : (a-b) scanner sur site ; (c) nuage de points ; (d) modèle 3D texturé

Ces terrains peuvent mesurer jusqu'à 1400 mètres carrés. La texture n'est pas indispensable mais permet une meilleure identification des différents éléments de la scène lors de la visualisation. En fonction de ces données, nous avons utilisé le scanner temps-de-vol GS101 de Trimble.

Avant de débuter l'acquisition, des sphères de recalage sont positionnées dans la scène. Pour les plus grands champs de fouille, quarante sphères sont utilisées. Les cavités des terrains peuvent mesurer plus d'un mètre de profondeur et le scanner utilisé possède un angle de vue vertical de 60°. Chaque fosse doit donc être acquise sous deux ou trois angles différents, soit entre quarante et soixante positions de numérisation différentes pour un champ de fouille entier. Afin de réduire ce nombre, le scanner a été fixé horizontalement sous une plateforme élévatrice, réduisant ainsi la numérisation à une vingtaine de positions. Les différentes vues sont recalées automatiquement grâce aux sphères. Les données doivent être filtrées, triangulées puis fusionnées par l'opérateur. Les trous restants sont ensuite bouchés.

3.7.3 Statue de la Seine

Le musée archéologique de Bibracte a en sa possession de nombreuses pièces très fragiles. Afin de pouvoir les exposer au public, elles doivent être numérisées puis dupliquées (figure 3.33).



(a) (b) (c) (d) (e)

Figure 3.33 – Duplication d'une statue en bois par impression 3D : (a) statue originale ; (b) modèle 3D ; (c) impression ; (d) assemblage ; (e) copie texturée

La statue de la Seine est une sculpture en bois de forme simple, globalement cylindrique (environ un mètre de haut pour un diamètre de quinze centimètres). Elle est conservée au musée d'archéologie de Dijon, en environnement contrôlé et ne peut être manipulée du fait de sa fragilité [Bibracte, 2006].

En fonction de ces caractéristiques, nous avons utilisé le scanner Vi910 (acquisition par vue par balayage laser) pour l'acquisition. Les vues ont été segmentées puis recalées en deux temps (recalage grossier puis fin, section 3.5.4). Le modèle 3D a ensuite été découpé en plusieurs tronçons de dimensions adaptées aux capacités de l'imprimante 3D. Chaque morceau a été modifiés afin qu'il puisse s'assembler correctement par la suite (création d'une épaisseur, de repères d'emboitement ...). Les différentes parties imprimées ont été recolées puis la copie a été peinte afin d'améliorer le réalisme.

3.7.4 Tête de la Vivre

La Vivre (ou Vouivre) est une créature mythique dont on retrouve plusieurs représentations en Bourgogne et Franche-Comté. A l'occasion d'une fête organisée tous les vingt ans, une sculpture de la tête de l'animal a été numérisée, agrandie puis dupliquée(figure 3.34).



Figure 3.34 – Tête d'une sculpture de la Vouivre

L'objet mesure environ 20cm×20cm×20cm et présente une forme complexe au niveau de la bouche (cavités ...). Il s'agit d'une sculpture en terre, dont la manipulation est possible mais délicate.

Nous avons donc utilisé le système GScan (capteur laser ligne sur bras polyarticulé) de Romer, plus maniable que les systèmes à acquisition par vue. Les données acquises ont ensuite été filtrées et triangulées. Le modèle 3D a été agrandi par homothétie, puis des sections ont été réalisées afin de reproduire la tête par empilement de plaques de polystyrène (stratoconception).

3.7.5 Reliures de livres anciens

Les bibliothèques de Troyes et de Dijon étudient les reliures des ouvrages de leurs collections. Ces livres étant anciens (plusieurs centaines d'années) leur manipulation est très délicate et leur diffusion est impossible. Afin de permettre aux chercheurs de les étudier sans risque, ils ont été numérisés puis diffusés par internet (figure 3.35).



(a) (b) (c)

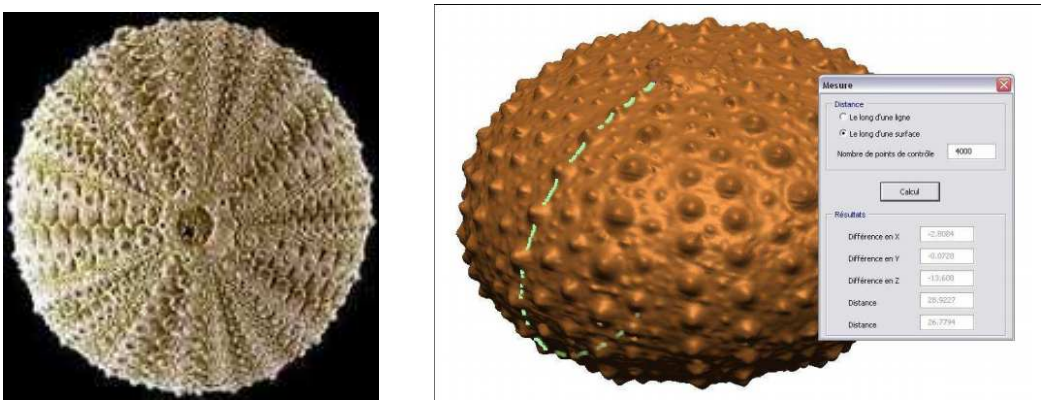
Figure 3.35 – Reliures de livres anciens

L'objectif étant la visualisation des reliures, la texture est indispensable. Un livre mesure environ 20cm×25cm×5cm, avec une géométrie très simple (globallement parallélépipède rectangle).

Nous avons choisi un scanner à acquisition par vue (Vi910 de Konica-Minolta). Ce système fait l'acquisition de la texture de l'objet, mais avec une résolution de 640×480 pixels. Cette résolution n'étant pas suffisante, nous avons utilisé un appareil photographique. Chaque image a été repositionnée manuellement sur le modèle 3D décimé (afin de faciliter la diffusion par internet). Ces acquisitions ont été réalisées sous éclairage contrôlé, afin d'éviter les effets d'ombres.

3.7.6 Tests d'oursins

Les oursins ont un squelette composé de plaques calcaires, appelé test. Ces plaques sont disposées en colonnes et présentent une symétrie pentaradiée (d'ordre cinq) ou bilatérale (d'ordre deux). Cette symétrie est conservée lors de la croissance de l'oursin si son habitat n'est pas pollué. Dans le cas contraire, cette pollution peut être évaluée et datée en étudiant le test de l'oursin (figure 3.36).



(a) (b)

Figure 3.36 – Analyse de tests d'oursins : (a) test d'oursin ; (b) mesure

L'objectif est donc de mesurer séparément les cinq parties du squelette de l'oursin afin d'identifier les anomalies de croissance. La numérisation doit permettre de repérer chaque aspérité de la surface. Celles-ci ne mesurent que quelques centaines de microns.

Les tests d'oursins ont été numérisés avec un capteur laser ligne sur MMT, avec huit orientations différentes [Loriot, 2005]. Le squelette doit être retourné afin de le numériser entièrement puis les deux parties sont recalées.

3.7.7 Synthèse

Le tableau 3.6 présente les principales caractéristiques pour les différentes études : application visée, dimensions de l'objet, système choisi, temps d'acquisition et de post-traitements, nombre de points de vues nécessaires.

Ces exemples illustrent bien que malgré la simplicité apparente des procédés d'acquisition, la création d'un modèle 3D est une tâche longue et complexe, même pour un opérateur expérimenté. Elles montrent également que l'étape la plus coûteuse en temps est l'application des post-traitements. Cependant, cette étape est dépendante de la quantité de données acquises et de leur qualité, et donc de la phase d'acquisition. Or le choix de la position d'acquisition est une étape délicate. L'expérience de l'opérateur va déterminer le nombre de positions nécessaires, et donc le temps d'acquisition.

	Monnaie	Champ de fouilles	Statue de la Seine	Tête de la Vivre	Reliure	Oursin
Applications	Analyse	Visualisation	Duplication	Duplication	Visualisation	Analyse
Dimensions	1cm^2	1400m^2	1m × 15cm × 15cm	20cm × 20cm × 20cm	20cm × 25cm × 5cm	Quelques centimètres cubes
Résolution moyenne	10μm	2cm	0.5mm	0.3mm	0.5mm	0.1mm
Système choisi	"Depth from Focus"	Temps de vol	Acquisition par vue	Capteur laser ligne sur bras polyarticulé	Acquisition par vue	Capteur laser ligne sur MMT
Acquisition (% temps total)	8 heures *(65%)*	16 heures *(30%)*	1 heure *(10%)*	1 heure 30 *(20%)*	1 heure *(10%)*	1 heure 30 *(30%)*
Post-traitements (% temps total)	4 heures *(35%)*	40 heures *(70%)*	8 heures *(90%)*	5 heures *(80%)*	8 heures *(90%)*	4 heures *(70%)*
Nombre d'acquisitions	25	20	15	2	6	16

TABLE 3.6 – Récapitulatifs des différentes études de cas

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit la méthodologie complète, de la préparation de l'objet aux post-traitements, que doit suivre l'opérateur afin de numériser un objet. Nous avons également présenté un outil d'aide à la numérisation 3D qui reprend ces différentes étapes et permet ainsi de guider l'opérateur. La dernière partie de ce chapitre présente différents exemples pour lesquelles cette méthodologie a été appliquée.

Ces études de cas montrent la responsabilité et l'omniprésence de l'opérateur durant la numérisation 3D. C'est à lui de déterminer les positions d'acquisition, les post-traitements à appliquer et leurs paramètres. Cette contrainte ralentit considérablement le développement de la numérisation 3D lorsque de grandes séries d'objets doivent être numérisées : le temps d'intervention de l'opérateur, et donc le coût humain, devient trop important.

Les industriels ont en partie solutionné ce problème : pour chaque type de pièces, l'opérateur définit manuellement une série de positions pour numériser l'objet, et enregistre cet enchaînement. Le programme est ensuite rappelé chaque fois qu'une pièce correspondante doit être numérisée. Cependant, la mise en place de cette procédure reste manuelle (choix des positions, et donc leur nombre), et comme pour les autres prestations, elle dépend du savoir faire de l'opérateur.

Chapitre 4

Méthodes d'automatisation de la numérisation 3D

Nous avons vu dans le chapitre précédent la méthodologie à mettre en œuvre pour la numérisation d'un objet. Afin de diminuer le temps d'intervention de l'opérateur, cette méthodologie doit être automatisée.

L'automatisation de la numérisation est un grand défi dans le milieu industriel. Plusieurs méthodes ont été développées en laboratoire, mais elles n'ont pas été transférées en industrie. Les opérateurs se voient donc obligés de générer une planification de vues pour chaque nouvelle série de pièces à contrôler. De plus, la définition de ces positions dépend de la compétence de l'utilisateur. Et lorsque le modèle CAO de l'objet n'est pas disponible, l'objet doit être numérisé manuellement. Or, de nombreux centres de recherche en archéologie et en biologie possèdent des collections importantes d'objets de formes différentes (plusieurs centaines voire milliers de pièces). La numérisation de tous ces objets sans automatisation est pour le moment impossible, de part le temps nécessaire à l'acquisition et aux traitements des données, et donc du coût de la prestation.

Les algorithmes de planification de vues ou de "Next-Best-View" ont pour objectif de calculer cet ensemble de positions nécessaires à la numérisation [Cowan and Kovesi, 1988][Tarabanis et al., 1995][Tarbox and Gottschlich, 1995a][Prieto, 2000][Mahmud et al., 2007][Connolly, 1985][Banta et al., 2000][Massios and Fisher, 1998][Papadopoulos Orfanos, 1997][Reed, 1998][Maver and Bajcsy, 1993][Pito, 1999][Whaite and Ferrie, 1997][Scott et al., 2001b][Scott et al., 2001a][Scott, 2005][Yuan, 1995][Li et al., 2005]-[Mehdi-Souzani, 2006]. Ces méthodes doivent se terminer d'elles-même : pour certains objets, l'acquisition complète de la forme est impossible (trop d'occlusions, forme trop

complexe, . . .). Il faut donc que la méthode possède des critères d'arrêt (pourcentage de reconstruction suffisant, . . .).

La planification de vues regroupe deux types de méthodes : les méthodes basées sur un modèle ("Model Based Methods") et les méthodes sans connaissance a priori ("Non-Model Based Methods"). Les applications de ces deux types de méthodes sont différentes : les méthodes basées sur le modèle sont propres aux applications de contrôles dans le milieu industriel. L'objectif est alors de comparer la pièce créée (par usinage par exemple) et le modèle CAO. Ces méthodes utilisent le modèle de référence pour effectuer la planification de vue, qui se fait hors-ligne. Les méthodes non basées sur un modèle sont utilisées lorsqu'aucune information sur l'objet n'est disponible a priori, comme c'est le cas des objets naturels et patrimoniaux par exemple.

Notre objectif est la mise en place d'une méthode de numérisation automatique (sans intervention de l'utilisateur) rapide et permettant un taux de complétude maximum (supérieur à 90%) de la surface de l'objet. Cette méthode doit être fonctionnelle sur des objets de dimensions inférieures à un mètre cube, sans gestion de la texture. Elle doit également être simple et rapide à l'exécution afin de permettre la numérisation d'un grand nombre de pièces. La numérisation doit comprendre la phase d'acquisition mais également les post-traitements nécessaires. Afin de répondre aux deux cas de figure, deux méthodes doivent être mises en place.

Dans une première partie, nous verrons les différentes méthodes existantes de planification de vues. Puis nous proposerons deux méthodes : une méthode basée sur un modèle et une méthode non basée sur un modèle. Nous présenterons ensuite leur principe de fonctionnement et les prototypes développés. Nous montrerons ensuite les résultats obtenus puis nous conclurons sur ces méthodes.

4.1 Méthodes de planification de vues

4.1.1 Méthodes basées sur un modèle

Cowan *et al.* [Cowan and Kovesi, 1988] décrivent une méthode de planification de vues destinée à des applications de contrôle 2D par vision artificielle sur robot. L'objectif de cette méthode n'est pas de numériser entièrement un objet, mais de positionner une caméra à une position optimale, en fonction de différentes contraintes. Celles-ci leur

permettent d'obtenir différents volumes de positionnement. Les contraintes utilisées sont :

- une contrainte de résolution : la résolution de la caméra est suffisante pour observer le plus petit détail voulu,
- une contrainte de mise au point (focus) : la position de la caméra et l'objectif choisi sont adaptées à la distance de travail souhaitée,
- une contrainte de champ de vue : les caractéristiques à observer doivent être entièrement visibles,
- une contrainte de visibilité : les caractéristiques sont visibles par le capteur (pas d'occlusions),
- une contrainte d'angle de vue : les caractéristiques sont observables avec un angle d'incidence suffisamment important,
- une contrainte de zones interdites : en milieu industriel, les capteurs ne peuvent être positionnés dans certains espaces, comme dans l'espace de travail d'un bras manipulateur.

L'intersection de ces volumes ne définit pas une position, mais un espace de positions potentielles.

Tarabanis *et al.* [Tarabanis et al., 1995] reprennent le même principe de définition de contraintes. Ils utilisent une caméra CCD fixée sur un bras robot pour observer certaines caractéristiques d'un objet. Une fois ces caractéristiques repérées, différentes contraintes sont appliquées sur le volume de travail :

- une contrainte de visibilité : les caractéristiques sont visibles par le capteur (pas d'occlusions),
- une contrainte de résolution : la résolution de la caméra est suffisante pour observer le plus petit détail voulu,
- une contrainte de mise au point : la position de la caméra et la lentille choisie sont adaptées à la distance de travail souhaitée,
- une contrainte de champ de vue : les caractéristiques à observer doivent être entièrement visibles.

A la différence de Cowan *et al.*, les contraintes sont définies sous forme d'inégalités : chaque position des volumes satisfait la contrainte correspondante et possède un degré de "satisfaction" associé. Une fois les volumes contraints fusionnés, la position optimale est celle qui répond au mieux à ces contraintes. Là encore, l'objectif est de visualiser certaines caractéristiques de l'objet (2D), et non de réaliser une acquisition 3D complète.

Tarbox *et al.* [Tarbox and Gottschlich, 1995a] ont pour objectif l'inspection tridimensionnelle d'objets à partir de leur modèle CAO. Leur système est composé d'une caméra

et d'un laser ligne fixé sur un moteur pas à pas rotatif. Pour réaliser l'inspection, une structure octree est utilisée pour représenter l'espace de travail. Un octree est une structure de données de type arbre dans laquelle chaque nœud peut compter jusqu'à huit enfants. Cet octree est initialisé grâce au modèle de référence, hors-ligne. Chaque voxel peut prendre trois valeurs : "*plein*" (lorsqu'il est contenu dans l'objet), "*vide*" (lorsqu'il n'est pas dans l'objet) et "*partiel*" (lorsqu'il est situé à la surface de l'objet). Cette représentation prend en compte les tolérances acceptables de surplus et de manque de matière sur l'objet. Cet octree est comparé par la suite à un deuxième octree (par soustraction), généré lors de l'acquisition de l'objet. La planification des vues est effectuée également hors-ligne, à partir d'une sphère échantillonnée représentant les positions potentielles du capteur. La meilleure position suivante est celle d'où le maximum de données nouvelles est visible. Une fois la numérisation 3D effectuée en fonction de la planification hors-ligne, le résultat est contrôlé et une planification en ligne est calculée si nécessaire pour compléter le modèle.

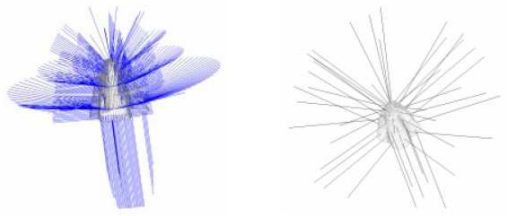
Tarbox *et al.* [Tarbox and Gottschlich, 1995b] ont également développé une deuxième approche, basée sur une matrice de visibilité. Tout d'abord, deux tableaux 2D (un pour la caméra, $c_c(i, j)$, et un pour la source lumineuse, $c_l(i, j)$) sont créés :
- $c_c(i, j) = 1$ si la surface s_i est visible depuis la position v_j,
- $c_l(i, j) = 1$ si la surface s_i est éclairée depuis la position v_j, suivant un angle supérieur à un seuil (afin d'éviter les vues rasantes).

La matrice de mesurabilité $C(i, k)$ est alors générée de telle sorte que $C(i, k) = 1$ lorsque le point i est visible depuis deux points de vue valides. Deux points de vue sont déclarés valides lorsque la distance qui les sépare est égale à la distance entre la caméra et la source lumineuse. Cette vérification permet de s'assurer que la surface s_i est visible par le capteur et est éclairée par la source lumineuse. La somme des valeurs contenues dans la $j^{ème}$ ligne de la matrice de mesurabilité correspond au nombre de positions valides pour le $i^{ème}$ point. Les auteurs décrivent ensuite trois algorithmes de planification de vues (A, B et C). Le premier algorithme choisit comme meilleure position celle qui permet d'observer à la fois le point le moins visible et la plus grande surface. Le second algorithme fonctionne selon le même principe, mais ajoute l'angle de prise de vue à la fonction de choix. En plus des deux critères de l'algorithme A, le point de vue optimal doit minimiser l'angle entre la direction prise de vue et la normale de la surface. L'inconvénient de ces deux méthodes est la génération de "trous" entre les différentes prises de vues, qui entraînent des prises de vues supplémentaires. L'auteur propose donc un troisième algorithme, qui débute avec plusieurs positions définies aléatoirement. Le principal inconvénient de cette méthode est le calcul de la matrice

de mesurabilité, qui peut être prohibitif si le nombre de points numérisés est trop important.

Prieto [Prieto, 2000] s'intéresse également à l'inspection automatisée de pièces industrielles. Cette inspection est effectuée en comparant le modèle numérisé au modèle CAO. Il définit un point de vue comme la combinaison de sept paramètres ($x^i = \{x, y, z, \phi, \theta, \psi, \gamma\}$) dont trois paramètres de position, trois paramètres d'orientation et un paramètre de balayage (champ de vue). Les paramètres en entrée du système sont la taille, la position et l'orientation de la pièce, le modèle CAO et la qualité de la numérisation souhaitée. Les critères pris en compte pour la planification de vues sont :
- la pose (position et orientation) du capteur : ces paramètres influent sur la qualité de la numérisation,
- la visibilité des surfaces à numériser : la zone à mesurer doit être visible,
- la précision des données : en fonction de la position du capteur, la précision ne sera pas toujours optimale,
- l'homogénéité des données : les points acquis doivent être répartis uniformément,
- les points de vue : leur nombre doit être optimal et ils doivent éviter les collisions.

La recherche de l'ensemble des points de vue se fait indépendamment pour chaque surface du modèle CAO. Deux systèmes d'acquisition sont mis en place : une tête laser ligne sur MMT (système A) et un capteur à balayage laser ligne sur bras robot (système B). Pour le premier système, l'auteur applique un algorithme de squelettisation à chaque surface afin de définir les points centraux des prises de vue potentielles. Dans le second système, les directions paramétriques (directions permettant de définir une surface de type NURBS [Piegl and Tiller, 1996]) sont utilisées pour définir les points de vue possibles. Dans les deux cas, l'algorithme contrôle l'angle d'incidence lors du balayage, afin d'obtenir la meilleure précision possible. La distance de travail est calculée en fonction de la qualité souhaitée et l'orientation du système d'acquisition est perpendiculaire à la normale de la surface. La figure 4.1 présente la planification calculée pour les deux systèmes. Ces méthodes permettent de définir les positions



(a) (b)

Figure 4.1 – Stratégies de F. Prieto : (a) stratégie utilisant le système A ; (b) stratégie utilisant le système B

nécessaires pour la numérisation de chaque surface du modèle CAO.

Derigent *et al.* [Derigent et al., 2007] décrivent une méthode permettant de déterminer une stratégie de numérisation à partir d'un modèle CAO, en utilisant un capteur à triangulation laser ligne sur MMT. Leur approche est inspirée de travaux sur la mesure par contact (palpeur) et de l'usinage. La visibilité de chaque surface du modèle est calculée en déterminant

- un cône de visibilité locale qui représente l'ensemble des directions depuis lesquelles une facette est visible en considérant l'angle d'incidence,
- un cône d'occlusion qui représente l'ensemble des directions depuis lesquelles une facette ne peut être observée en raison d'une auto-occlusion,
- un cône de visibilité globale qui est calculé par la soustraction des deux précédents ensembles.

Ces ensembles sont représentés sous la forme d'une carte 2D circulaire, illustrée à la figure 4.2. Les angles α et β représentent les degrés de liberté de l'articulation de la MMT, et chaque intersection d'un cercle et d'un rayon représente un orientation potentielle pour le capteur. Cette carte permet d'établir les orientations du capteur communes aux faces observées. Les caractéristiques du capteur permettent de le représenter sous la

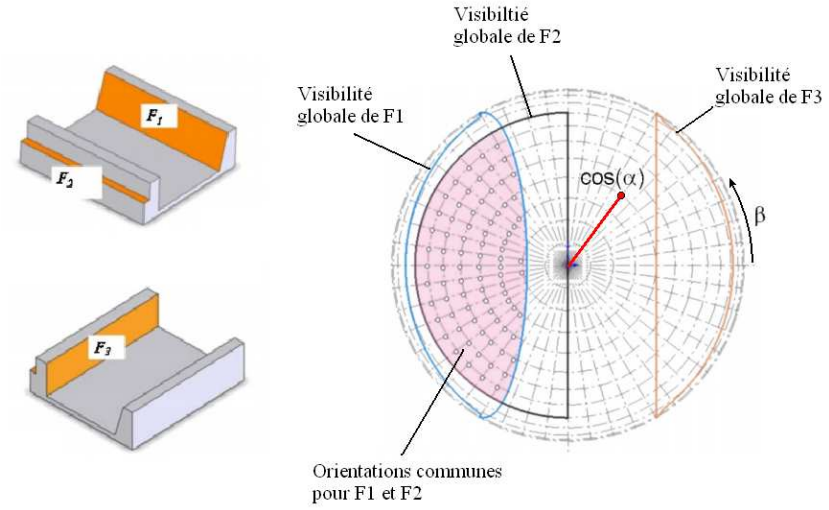
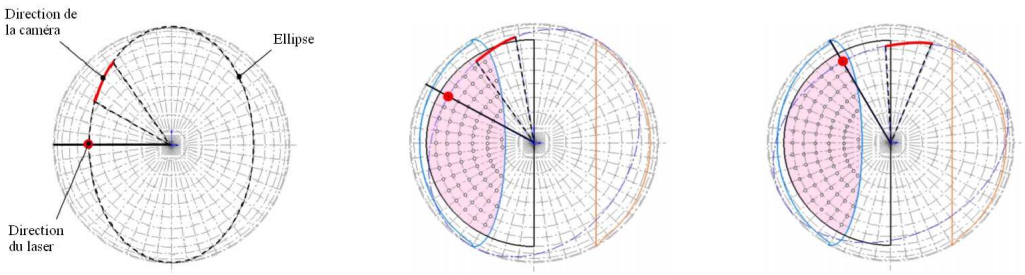


Figure 4.2 – Carte de visibilité 2D [Derigent et al., 2007]

forme d'une ellipse (figure 4.3). Cette représentation permet de déterminer les positions depuis lesquelles la surface peut être acquise (visible par la caméra et éclairée par le laser). Une matrice de visibilité est créée à partir de la carte 2D, permettant de définir un ensemble de positions optimales pour la numérisation de l'objet.



(a) (b) (c)

Figure 4.3 – Surfaces numérisables : (a) représentation du capteur ; (b) orientation valide pour F_1 ; (c) orientation rejetée pour F_1 (la zone de visibilité de la caméra n'est pas dans la zone de visibilité de F_1)

Mahmud *et al.* [Mahmud et al., 2007] ont développé une approche visant à aider à la planification de trajectoire, et non à l'automatisation complète de la procédure. Leur objectif est d'obtenir un ensemble de point de vue répondant à des critères de qualité et de visibilité. Pour cela, chaque facette du modèle de référence est traitée séparément. Pour chacune d'elles, une sphère échantillonnée est créée, centrée sur le centre de gravité de la facette. Suivant le modèle de capteur utilisé (leur système est composé d'une tête laser ligne à triangulation sur MMT), deux cartes de visibilité sont établies :

– une carte de visibilité du point de vue caméra : elle est composée des sommets de la sphère d'où la facette est visible par la caméra
– une carte de visibilité du point de vue laser : elle est composée des sommets de la sphère d'où la facette est accessible par le laser avec un angle d'incidence supérieur à un seuil défini

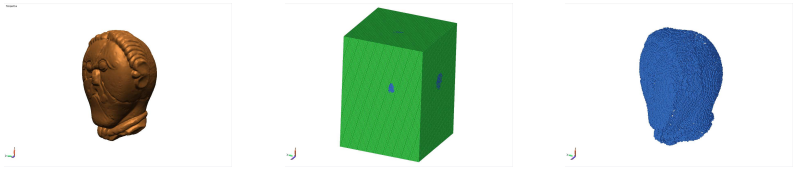
L'intersection de ces deux cartes de visibilité donne la visibilité réelle de la facette.

4.1.2 Méthodes non basées sur un modèle

Les méthodes non basées sur un modèle peuvent être classifiées en deux catégories : les méthodes volumiques et les méthodes surfaciques. Les méthodes volumiques utilisent les informations de l'espace de travail (occupation de voxels, . . .). Les méthodes surfaciques utilisent les informations données par le maillage des parties numérisées.

4.1.2.1 Méthodes volumiques

Un des plus anciens articles sur la planification de vues a été rédigé par Connolly [Connolly, 1985]. Il a été le premier à utiliser le terme "Next-Best-View". Il décrit deux algorithmes permettant de définir un ensemble de positions en utilisant une structure octree représentant l'espace de travail voxelisé (figure 4.4). Cette structure est mise à



(a) (b) (c)

Figure 4.4 – Voxelisation : (a) Modèle 3D ; (b) Volume de travail voxelisé ; (c) Modèle voxélisé

jour après chaque acquisition et permet de calculer le prochain point de vue. Cet octree contient quatre types de noeud :

– "*parent*" : ce sont les noeuds ayant un "enfant"
– "*vide*" : ces noeuds représentent l'espace vide (sans l'objet) qui a été observé depuis au moins une position
– "*occupé*" : ces noeuds représentent les voxels contenant au moins un point numérisé
– "*non vu*" : ces noeuds représentent l'espace non exploré

Le premier algorithme décrit ("Planetarium Algorithm") utilise une sphère échantillonnée. Pour chaque point de cette sphère, le nombre de voxels "*non vu*" visibles est calculé, en prenant en compte les voxels "*occupé*" afin de prendre en compte les auto-occlusions. La position d'où la valeur calculée est maximale est choisie comme prochaine position de numérisation. Le second algorithme ("Normal Algorithm") utilise les informations des faces des voxels. Les faces séparant des voxels "*non vu*" et "*vide*" sont comptabilisées suivant leur normale (six directions possibles : x, -x, y, -y, z et -z). Pour chaque axe, la valeur maximale est choisie. Trois valeurs sont ainsi obtenues, permettant de définir le vecteur de direction pour la prochaine position de numérisation.

Banta *et al.* [Banta et al., 2000] ont développé un algorithme similaire mais plus rapide. Ils représentent l'espace de travail et la surface de l'objet comme un espace de voxels, qui peut prendre les valeurs "*occupé*" ou "*non occupé*". La normale et la courbure sont calculées en chaque point du maillage. La normale est utilisée pour calculer les positions de vue pour les trois points ayant la plus forte courbure. Pour chacun de ces points, le nombre de voxels "*non occupé*" visibles est calculé. La position d'où la valeur calculée est maximale est choisie comme position de numérisation suivante.

Massios *et al.* [Massios and Fisher, 1998] reprennent le fonctionnement du "Normal Algorithm" et utilisent un critère de visibilité et un critère de qualité. Le critère de visibilité correspond au nombre de faces séparant les voxels "*non vu*" et les voxels "*vide*". Cette valeur est calculée pour chaque point d'une sphère échantillonnée, représentant les positions possibles pour le capteur. Le critère de qualité est le produit scalaire entre la normale d'un point du maillage et le vecteur représentant la direction de la prise de vue. Le point de vue qui maximise la somme pondérée 4.1 est sélectionné.

$$f_{total}(\hat{v}) = w_v f_{visibilité}(\hat{v}) + w_q f_{qualité}(\hat{v}) \tag{4.1}$$

où $f_{visibilité}(\hat{v})$ représente la visibilité des voxels suivant la direction $\hat{v}$ et $f_{qualité}(\hat{v})$ l'estimation de la "qualité" des voxels. w_v et w_q représentent les poids associés.

Papadopoulos-Orfanos [Papadopoulos Orfanos, 1997] présente une méthode en deux étapes et utilise un capteur à triangulation laser ligne à faible profondeur de champ. Dans la première étape, seuls trois degrés de liberté du capteur sont utilisés (trois translations). Le capteur garde une orientation constante et parcourt en lacet, couche par couche, le volume de travail voxelisé (figure 4.5), initialisé à "*inconnu*". Cette première phase permet de générer un premier modèle grossier, tout en gérant les problèmes de collisions. Lors de la seconde étape, l'auteur utilise la méthode développée par Banta pour le calcul de la "Next-Best-View".

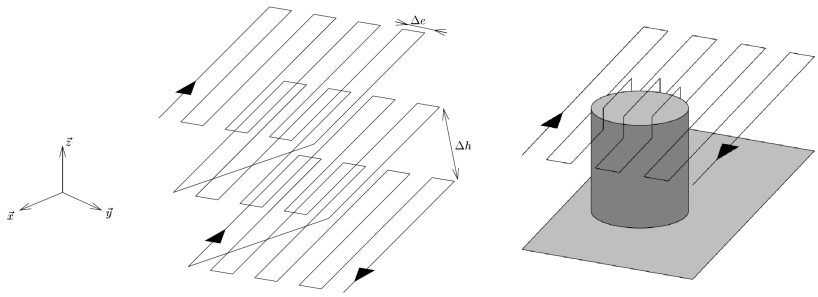


Figure 4.5 – Déplacement du capteur dans l'espace

Dans [Reed, 1998], l'auteur effectue dans un premier temps un certain nombre de prises de vue, depuis des positions fixes, afin d'obtenir un premier modèle grossier sur lequel va s'appuyer le calcul des NBV (le nombre de prises de vue initiales dépend de la complexité de l'objet). Il considère ensuite tout le volume de travail comme positions potentielles pour le capteur. Trois contraintes sont appliquées sur ce volume afin de définir la meilleure position :

– une contrainte de visibilité du capteur : cette contrainte définit les positions d'où le capteur peut acquérir la surface ciblée (sans tenir compte des auto-occlusions),
– une contrainte d'occlusions : cette contrainte permet de prendre en compte les auto-occlusions,
– une contrainte de positionnement du capteur : cette contrainte définit le volume dans lequel le capteur peut effectivement se déplacer.

Pour chaque surface cible sélectionnée (manuellement), ces trois contraintes sont calculées (figure 4.6).

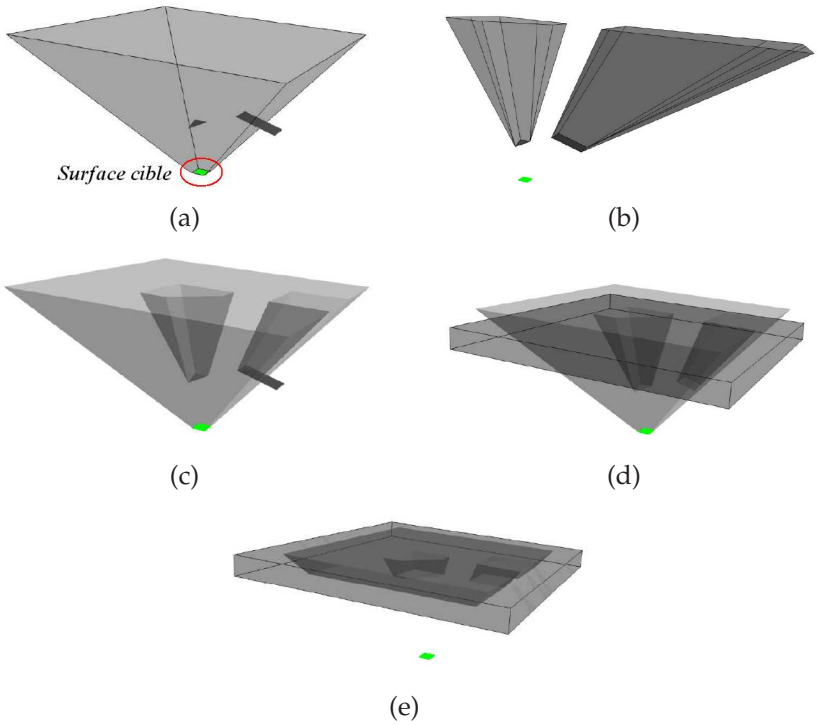


Figure 4.6 – Intégration des contraintes (surface cible en vert) : (a) volume de visibilité, (b) volumes définis par les occlusions, (c) intersection des 2 volumes, (d) volume de positionnement du capteur, (e) intersection du volume

De part la création semi-automatique d'un premier modèle grossier suivant des positions préprogrammées, et non calculées, cette méthode peut être classée dans les méthodes basées sur un modèle.

4.1.2.2 Méthodes surfaciques

Un des premiers articles décrivant une méthode surfacique a été rédigé par Maver *et al.* [Maver and Bajcsy, 1993]. Le système de numérisation 3D utilisé est composé d'un capteur laser ligne à triangulation fixé sur un système de positionnement deux axes

(une translation t et une rotation φ, figure 4.7). Leur approche est basée sur la détection

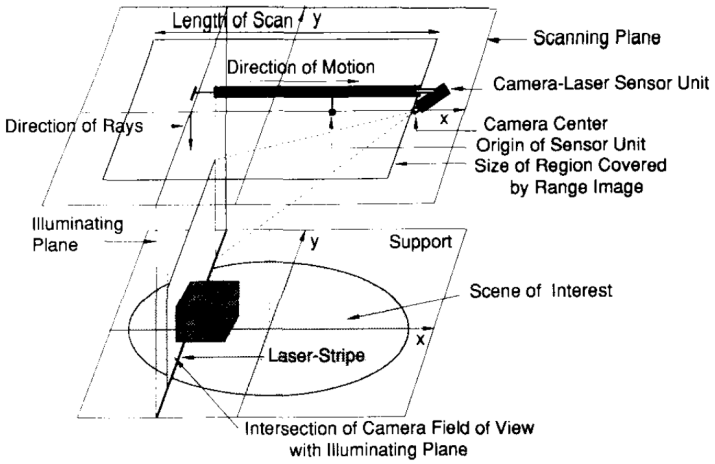


Figure 4.7 – Système utilisé par Maver *et al.* [Maver and Bajcsy, 1993]

des zones d'occlusions, en $2D^+$ (ou $2D^{1/2}$). Deux types d'occlusions sont différenciées : les occlusions de la caméra et les occlusions du laser (figure 4.8). Trois ensembles de

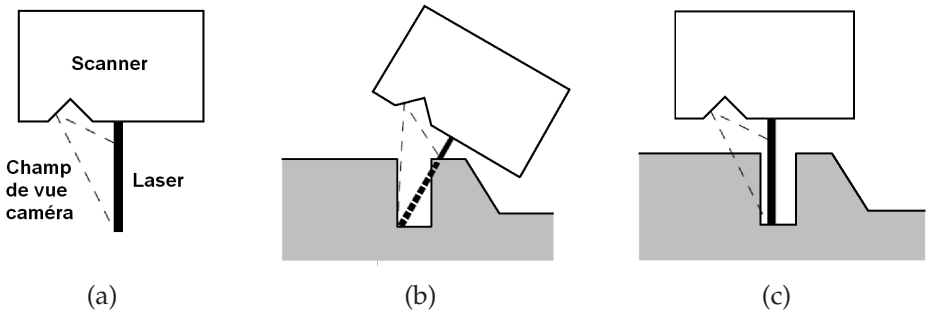


Figure 4.8 – Les deux types d'occlusions : (a) capteur ; (b) occlusion du laser ; (c) occlusion de la caméra

points sont également définis :
– l'ensemble Q : tous les points de la scène à numériser
– l'ensemble S : les points de la scène éclairés par le laser, $S \subseteq Q$
– l'ensemble R : les points de la scène éclairés et vus par la caméra, $R \subseteq S$

Un premier balayage est effectué afin d'acquérir un premier modèle, suivant une direction quelconque. L'acquisition des données 3D est décomposée en deux sous-tâches. L'objectif de la première étape est d'arriver à l'égalité suivante :

$$\cup R_i = S \tag{4.2}$$

où R_i correspond aux points de S vus par la caméra pour la $i^{ème}$ vue. Cette étape peut être effectuée en tournant manuellement la caméra d'un angle φ_i dans le plan de numérisation ("scanning plane"). Les parties éclairées par le laser sont toujours les mêmes, mais la caméra observe l'objet suivant un angle différent. L'objectif de la deuxième étape est d'obtenir l'égalité suivante :

$$\cup S_j = Q \tag{4.3}$$

ou S_j correspond aux points de Q éclairés par le laser pour le $j^{ème}$ plan de numérisation.

Après la première vue, l'auteur distingue deux possibilités : soit toute la scène est numérisée, soit il reste des zones inconnues. Dans le second cas, des vues supplémentaires sont nécessaires, en orientant la caméra suivant un angle φ différent. Les zones d'ombres sont alors approximées par des polygones. A chaque arête du polygone est attribuée une constante correspondant à son altitude moyenne. Chaque polygone est ensuite découpé en trapèze. La meilleure vue suivante sera celle d'où le maximum de trapèzes est visible, en fonction de φ. La méthode proposée ici est limitée à un système de numérisation $2D^+$ et ne peut donc pas numériser entièrement un objet de forme complexe.

Pito [Pito, 1999] utilise un scanner laser ligne à triangulation et une table rotative. Afin d'effectuer un balayage, le scanner effectue une rotation de 90° par rapport à un axe situé derrière la table (figure 4.9).

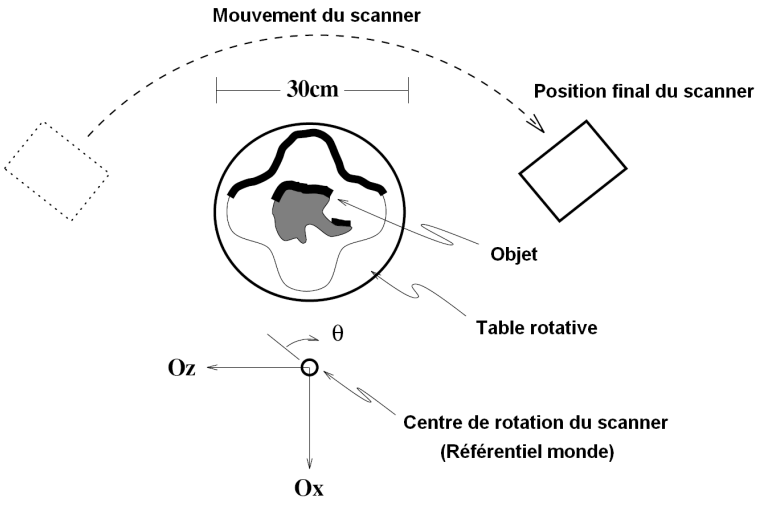


Figure 4.9 – Système d'acquisition de Pito

A chaque prise de vue, le volume de travail est partitionné en volume "*vu*" ("seen volume") et en volume "*non vu*" ("unseen volume"). De plus, la surface numérisée de

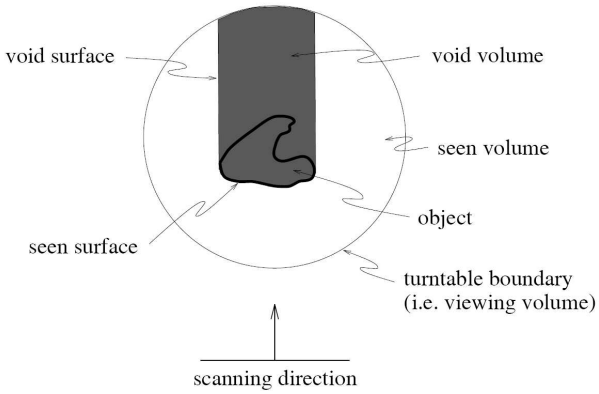


Figure 4.10 – Découpage de l'espace de travail

l'objet est nommée surface "*vue*" ("seen surface") et la "surface" délimitant l'espace "*non vu*" est appelée surface "*vide*" ("void surface"). La surface d'un objet étant continue, il considère que les meilleurs points de vue sont ceux permettant de découvrir les "void surface" (figure 4.10).

Pito nomme *RR* ("Ranging Ray") les trajectoires d'acquisition partant du scanner et allant à l'objet. Les *RR* sont des vecteurs dirigés vers le centre de rotation du scanner. Tous les *RR* qui rencontrent l'objet sont appelés *OR* ("Observation Ray"). Chaque *OR* a une valeur de fiabilité associée (c) qui correspond au produit scalaire entre le vecteur directeur de OR (le vecteur $\vec{o}$) et la normale de la surface rencontrée. Il utilise deux structures de données : le *PSS* ("positional space surface") qui mémorise un point le long d'un rayon et le *PSD* ("positional space directions") qui mémorise la direction des rayons sous forme de coordonnées polaires. Le *PSS* est représenté sous forme d'un cylindre et mémorise le point d'entrée d'une trajectoire dans le volume de travail. Ce cylindre est discrétisé en $n \times m$ cellules carrées. Chaque cellule peut être l'origine de *RR* ou de *OR* pénétrant dans l'espace de travail.

Pito reporte ensuite dans le *PSS* les informations de visibilité des "void surface" (figure 4.11). La cellule du *PSS* depuis laquelle le maximum de ces surfaces est visible, est choisie comme prochaine position du capteur.

Whaite *et al.* [Whaite and Ferrie, 1997] utilisent également la planification de vues, mais pour l'exploration autonome par robot. Après une première prise de vue, le modèle 3D obtenu est segmenté. L'objectif est ensuite de trouver la meilleure superellipsoïde possible pour chaque sous-objet obtenu (figure 4.12). La meilleure position suivante est choisie de manière à réduire l'incertitude sur les paramètres du modèle.

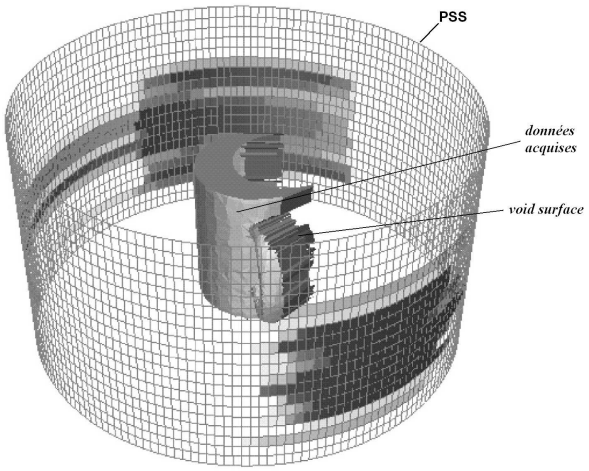
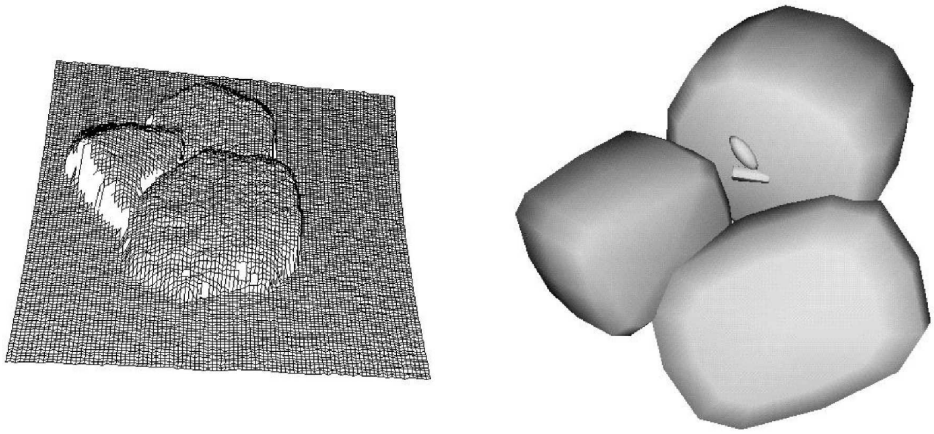


Figure 4.11 – Report des informations de visibilité sur le *PSS*, le niveau de gris indique la visibilité des "void surface" (blanc : aucune surface visible depuis la cellule)



(a) (b)

Figure 4.12 – (a) Prise de vue de la scène. (b) Modélisation mathématique de la prise de vue

Scott *et al.* [Scott et al., 2001b][Scott et al., 2001a] utilisent une méthode en deux phases. La première permet de créer un modèle grossier de l'objet en exécutant des prises de vue préprogrammées. Ce modèle est ensuite décimé pour permettre la planification de vues (le temps de calcul dépend du nombre de facettes). Le modèle simplifié est segmenté automatiquement ou manuellement en plusieurs patchs de surfaces (en fonction de la courbure locale). Pour chaque patch de surface, une matrice de mesurabilité modifiée M est calculée [Tarbox and Gottschlich, 1995b]. Par convention, les lignes de cette matrice correspondent aux points de la surface et les colonnes aux positions potentielles du capteur. Chaque élément m_{ij} de la matrice de mesurabilité est une valeur binaire correspondant à la mesurabilité d'un point de la surface s_i du modèle décimé, depuis un point de vue v_j. Pour être mesurable, les spécifications requises (visibilité, résolution, ...) doivent être validées au point s_i depuis le point de vue v_j. L'auteur utilise ensuite un algorithme "greedy" (ou glouton) pour déterminer les positions optimales nécessaires à la numérisation de l'objet. La première phase faisant l'acquisition d'un modèle grossier suivant des positions préprogrammées, cette méthode peut être classées parmi les méthodes basées sur un modèle.

Dans [Yuan, 1995], Yuan utilise une méthode permettant de contrôler si le modèle examiné est fermé ou non. Il segmente son modèle 3D en primitives, par extraction de surfaces, et utilise les "Mass Vector Chain" (MVC) pour le caractériser. Par définition, un MVC est une suite de vecteurs pondérés. Un "mass vector" $\vec{V_i}$ est attribué à chaque surface S_i et est défini par :

$$\vec{V_i} = \vec{n_i} \, . R_i \tag{4.4}$$

où $\vec{n_i}$ représente la normale moyenne de la surface S_i et R_i représente l'aire de la projection de la surface S_i sur le plan P_i, qui est le plan perpendiculaire à $\vec{n_i}$ (figure 4.13). Pour un objet fermé, la somme des MVC (appelée "Mass Vector Sum", ou MVS)

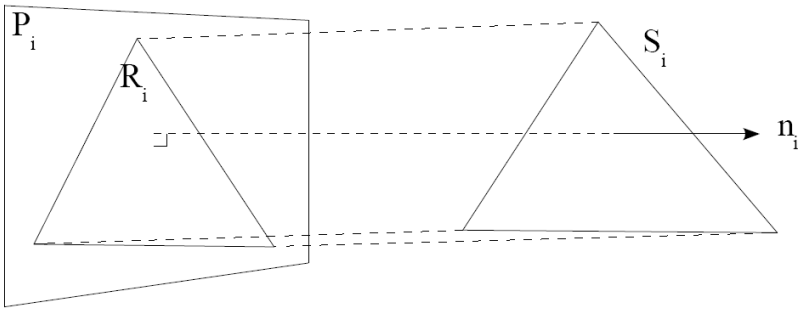


Figure 4.13 – Définition d'un MVC

est nulle. Si cette somme est égale à un vecteur non nul $\vec{V_{écart}}$, alors il reste des surfaces

non numérisées (objet ouvert) dont le MVS est égal à $\vec{V_{nbv}} = -\vec{V_{écart}}$. Afin d'acquérir de nouvelles données, le capteur doit être positionné le long du vecteur $\vec{V_{nbv}}$. Cette méthode donne une orientation pour le capteur mais pas la position le long de cette direction.

Plus récemment, Li *et al.* [Li et al., 2005] ont repris les travaux de Yuan en ajoutant un critère d'arrêt. En effet, la méthode développée par Yuan se termine lorsque que le MVS devient nul. Or, mis à part sur des pièces de forme très simple (pas d'auto-occlusions, de parties zones concaves ...), le vecteur $\vec{V_{écart}}$ n'est jamais égal au vecteur nul. Le critère d'arrêt défini par Li est basé sur la variation de l'aire de la surface du modèle numérisé. Si cette variation est inférieure à un seuil, cela signifie qu'il n'y a pas d'amélioration dans la couverture de la surface de l'objet, et l'algorithme se termine. L'auteur introduit également la définition d'une position le long de la direction donnée par le MVS, calculée en fonction de paramètres propres au capteur (résolution souhaitée et résolution du scanner, champ de vue, distance de travail).

Dans [Mehdi-Souzani, 2006], l'auteur présente un algorithme permettant de numériser un objet grâce à un capteur laser ligne sur MMT, en prenant en compte des critères de qualité (bruit, densité, ...). Son approche est composée deux étapes. La première étape est une numérisation manuelle suivant un axe de déplacement de la MMT afin de générer un premier modèle grossier de l'objet à numériser. Ce modèle est voxelisé (voxel vide ou non-vide) et pour chaque voxel non-vide, trois attributs sont calculés :
– la densité N_{voxj}
– le barycentre G_{voxj}
– la normale $\vec{n_{voxj}}$
Grâce à ces données, la qualité du nuage de points est évaluée (complétude, bruit, ...) et les zones nécessitant une nouvelle numérisation sont identifiées. Pour chaque voxel identifié, une orientation et une position du capteur doivent être définies en fonction de la distance de travail du capteur, de l'angle d'incidence du laser et du champ de vue. A partir de l'ensemble des positions calculées, une trajectoire de numérisation est définie, en minimisant le nombre de changements d'orientation du capteur laser. La planification de vues est ici utilisée pour améliorer la qualité du nuage de points, et non pour obtenir un modèle 3D complet.

4.1.3 Synthèse

Cette section regroupe les principales méthodes de planification de vues, avec ou sans connaissance a priori de la forme. Les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 donnent un récapitulatif de ces différentes méthodes.

	Stratégie	Numérisation complète	Critère d'arrêt
Cowan	Définition de volumes par contraintes	Non	-
Tarabanis	Définition de volumes par contraintes	Non	-
Tarbox	Matrice de mesurabilité	Oui	Toutes les surfaces sont traitées
Prieto	Voxelisation du modèle CAO et détermination des points par discrétisation 2D	Oui	Toutes les surfaces sont traitées
Derigent	Carte de visibilité 2D	Oui	Toutes les surfaces sont traitées
Mahmud	Création d'espaces de visibilité suivant des critères de qualité	Oui	Toutes les surfaces sont traitées

TABLE 4.1 – Récapitulatif des méthodes basées sur un modèle

	Stratégie	Numérisation complète	Critère d'arrêt
Connoly	Utilisation des normales des voxels	Oui	Oui
Banta	Analyse de courbure et visibilité des voxels	Oui	Oui
Massios	Méthode de Scott (tableau 4.3) mais ajout d'un critère de qualité	Oui	Non
Papadopoulos-Orfanos	Deux phases : numérisation préprogrammée pour connaître la boîte englobante puis méthode de Banta	Oui	Oui
Reed	Deux phases : création d'un modèle grossier puis définition de volumes par contraintes	Oui	Oui

TABLE 4.2 – Récapitulatif des méthodes volumiques non basées sur un modèle

Les méthodes basées sur un modèle (et permettant une numérisation complète d'un objet) calculent la meilleure position pour chaque surface du modèle de référence. Elles

	Stratégie	Numérisation complète	Critère d'arrêt
Maver	Utilisation des données manquantes	Non, $2D^+$	Oui
Pito	Utilisation de structures composées de cellules pour le calcul de visibilité	Oui	Non
Whaite	Utilisation de super-ellipsoides	Oui	Oui
Scott	Deux phases : acquisitions programmées puis utilisation d'une matrice de mesurabilité	Oui	Oui
Yuan	Utilisation de la masse gaussienne et extraction de surfaces	Oui	Non
Li	Méthode de Yuan	Oui	Oui
Mehdi-Souzani	Deux phases : création manuelle d'un modèle grossier puis amélioration de la qualité	Non	Oui

TABLE 4.3 – Récapitulatif des méthodes surfaciques non basées sur un modèle

peuvent être classée en deux catégories : les méthodes définissant des volumes par contraintes et les méthodes testant la visibilité depuis des positions prédéfinies. Les premières permettent d'obtenir un espace dans lequel le scanner doit être positionné tandis que les secondes définissent des positions d'acquisition. Ces méthodes restent toutefois incomplètes dans le sens où elles calculent des positions pour chaque surface sans optimiser le nombre de points de vue nécessaires.

Les méthodes volumiques non basées sur un modèle nécessitent la gestion d'un espace voxelisé. Cet espace doit être parcouru pour chaque calcul de nouvelle position puis mis à jour. Un compromis doit être trouvé entre la qualité du modèle et le degré d'échantillonnage : un sous-échantillonnage peut entraîner des trous dans le modèle complet et un sur-échantillonnage augmente le nombre de calculs nécessaires.

Les méthodes surfaciques non basées sur un modèle utilisent des caractéristiques des données précédemment acquises pour le calcul de la position suivante (normales, densité, aire ...). Certaines utilisent une surface échantillonnée (le plus souvent une sphère) représentant les positions possibles pour le scanner. La méthode développée

par Yuan et reprise par Li n'utilise aucune structure supplémentaire pour le calcul de point de vue.

Les méthodes présentées ne traîtent que de l'automatisation de l'acquisition et ne prennent pas en compte les post-traitements nécessaires à la création d'un modèle 3D. Or quel que soit le système d'acquisition utilisé, les données présentent toujours des points aberrants, des facettes anormales ... (section 3.5). De même, le recalage entre les différentes acquisitions n'est pas traîté. Cependant, si le système de positionnement n'est pas une MMT, les seules informations de position ne sont pas suffisantes pour un recalage précis. De plus, lorsque des objets sont présentés dans ces méthodes, il s'agit d'objets de tests, dont la forme générale est peu complexe (pas d'auto-occlusions, de parties zones concaves ...).

4.2 Méthodes proposées

Nous présentons dans cette section deux méthodes de numérisation automatique. Elles traîtent la procédure complète de numérisation 3D, de l'acquisition aux post-traitements. Il s'agit de méthodes génériques, adaptables à un grand nombre de scanners et de systèmes de positionnement. Elles ont été développées à partir d'un scanner à acquisition par vue (Minolta Vi910 - [Konica Minota Sensing, 2003]). Les différents calculs étant basés sur une vue, si le capteur utilisé est de type laser ligne sans balayage, le système de positionnement devra générer ce balayage afin d'obtenir une vue. De plus, le choix du capteur à acquisition par vue est basé sur plusieurs critères :

– la distance de travail : à la différence des capteurs laser ligne dont la distance de travail est de l'ordre de dix centimètres, celle des capteurs à acquisition par vue est d'environ un mètre. Les risques de collisions sont donc fortement réduits.
– la vitesse d'acquisition : du fait de leur mode de fonctionnement, les scanners à acquisition par vue ont une vitesse d'acquisition très supérieure aux capteurs laser ligne (section 3.4).
– le champ de vue : un scanner à acquisition par vue a un champ de vision pouvant aller jusqu'à quatre mètres carré. De plus, la vue acquise a une résolution en X et Y constante.

La première méthode développée est une méthode basée sur un modèle de référence. Elle utilise la matrice de mesurabilité introduite par Tarbox [Tarbox and Gottschlich, 1995b] et reprise par Scott [Scott, 2005]. La planification de vues se fait hors-ligne, dans

un environnement simulé, ce qui permet de ne pas interrompre la chaîne de contrôle. La matrice de mesurabilité générée permet de définir la visibilité de chaque surface en fonction d'un ensemble de points de vue. Un algorithme de résolution de problème de recouvrement d'ensemble ("Set Covering Problem") est appliqué afin de ne conserver qu'un minimum de positions optimales.

La seconde méthode est une méthode non basée sur un modèle. Elle comprend deux étapes. La première étape reprend les travaux de Yuan [Yuan, 1995] et de Li [Li et al., 2005] pour générer un modèle incomplet mais sans extraire de surfaces, permettant ainsi la numérisation d'objet de forme complexe. La seconde étape calcule des caractéristiques pour chaque trou de maillage restant. Ces caractéristiques permettent de repositionner le scanner afin de compléter le modèle 3D.

Les contraintes imposées par ces méthodes sont les suivantes :
- contrainte de champ de vue : l'objet doit être entièrement inclu dans le champ de vue du capteur,
- contrainte de matériau : l'objet doit être numérisable par le capteur (objet non réfléchissant, non transparent . . .),
- contrainte de positionnement : la taille de l'objet doit être compatible avec les possibilités de déplacement du système de positionnement.

4.2.1 Méthode basée sur un modèle

La première méthode mise en place permet la planification de vues hors-ligne. Son principe général est décrit à la figure 4.14. Cette méthode est basée sur les travaux de Scott [Scott, 2005] et utilise un modèle maillé comme modèle de référence.

La complexité de l'algorithme pour la création de la matrice de visibilité est en $O(n^2)$, avec n le nombre de facettes du modèle de référence. Afin de réduire le temps de calcul, le modèle de référence est donc décimé. L'étude de l'influence de ce paramètre est illustrée dans le tableau 4.4.

Une forte réduction du nombre de facettes entraîne la perte des détails de la forme de l'objet (figure 4.15). Le nombre d'occlusions est donc réduit, ce qui entraîne une diminution du nombre de points de vue nécessaires à la numérisation complète, et donc une accélération de la procédure. De plus, cette diminution ne s'accompagne pas d'une baisse significative du taux de complétude (quelques pourcents).

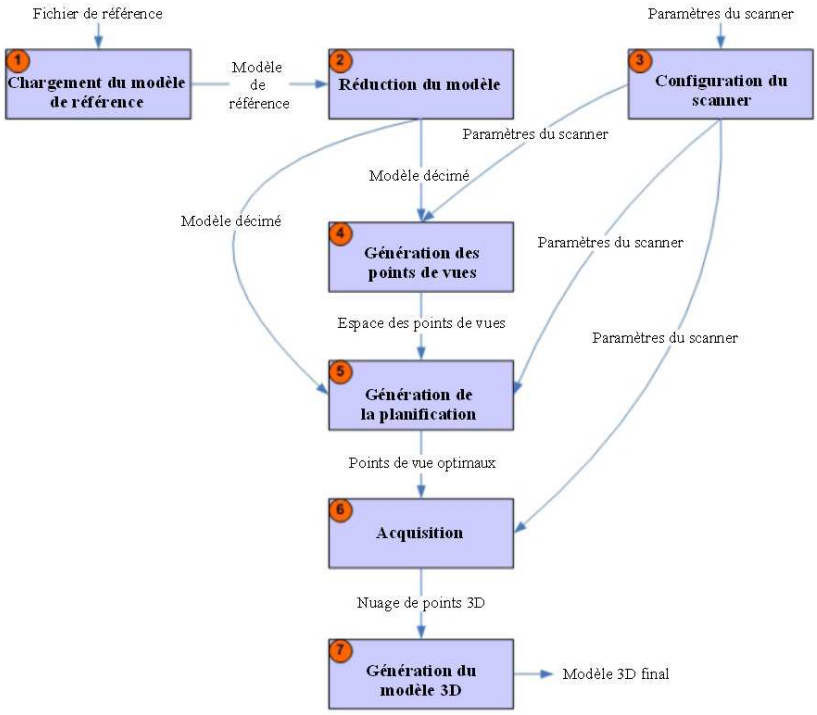


Figure 4.14 – Procédure de la méthode basée sur un modèle

Objet	Taux de réduction (% conservé)	Nombre de facettes	Nombre de points de vue retenus	Temps de calcul (s)	Complétude (%)
Mzeke	0.5	930	11	32	98
	1	1858	14	160	98
	2	3724	34	737	98
Humérus	0.1	276	6	5	94
	0.5	1386	16	134	95
	1	2776	38	504	95
Robinet	0.5	814	19	48	94
	1	1628	40	289	94
	2	3256	83	1783	95
Trophée	0.1	338	8	3	94
	0.5	1698	29	274	95
	1	3398	67	1434	95
St Jean	0.1	746	10	49	89
	0.2	1496	25	375	91
	0.5	3746	69	2065	93

TABLE 4.4 – Influence de la réduction du nombre de facettes



Figure 4.15 – Perte des détails de forme lors de la réduction

Par la suite, les points de vue potentiels sont générés à partir du modèle décimé (section 4.2.1.1), puis la planification est définie en utilisant un outil développé par Lan [Lan et al., 2007] (section 4.2.1.2).

4.2.1.1 Génération des points de vues

La méthode utilisée est basée sur la "zone de scanning optimale" présentée par Scott [Scott, 2005]. La normale de chaque facette du modèle décimé est calculée. Le scanner est alors positionné à une distance fixe du centre de la facette, et orienté en direction de celle-ci. Le nombre de positions potentielles pour le scanner est égal au nombre de facettes du modèle décimé. Un exemple de ces points de vue possibles est donné à la figure 4.16.

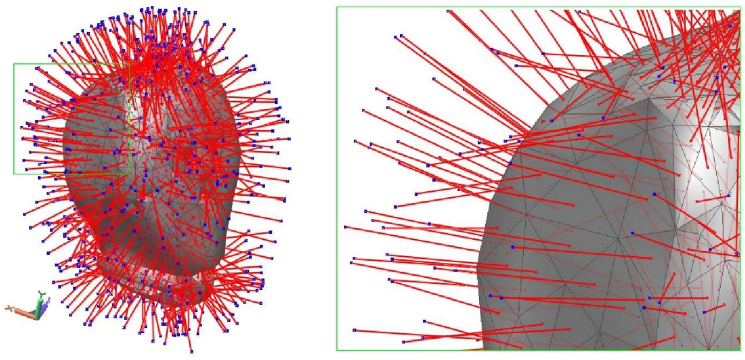


Figure 4.16 – Points de vue potentiels

4.2.1.2 Génération de la planification

L'algorithme de planification de vues permet d'obtenir le nombre de vues minimum pour numériser entièrement l'objet. Il est basé sur l'algorithme 3M présenté par Scott [Scott, 2005]. La structure de données utilisée est une matrice de mesurabilité $M = \left[m_{ij}\right]$. Les colonnes de M représentent les points de vue V, tandis que les lignes représentent les facettes S du modèle de référence. En utilisant la méthode de la "zone de scanning optimale", les dimensions de V et de S sont égales au nombre de facettes du modèle de référence décimé. La matrice de mesurabilité M est binaire. L'élément m_{ij} vaut :
– 1 si la facette s_i est visible depuis la position v_j,
– 0 sinon.
La visibilité d'une facette dépend des caractéristiques du scanner : résolution, champ de vue, distance de travail, distance caméra-source lumineuse. Le tableau 4.5 montre un exemple d'une matrice de mesurabilité pour un modèle à vingt facettes (figure 4.17). Dans cet exemple, la surface s_2 est visible depuis les positions v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_{10} et v_{14}, et les surfaces s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_{16} et s_{20} sont visibles depuis la position v_3.

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}	v_{15}	v_{16}	v_{17}	v_{18}	v_{19}	v_{20}
s_1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
s_2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
s_3	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
s_4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
s_5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_6	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
s_7	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
s_8	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s_9	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
s_{10}	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
s_{11}	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1
s_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0
s_{13}	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
s_{14}	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0
s_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
s_{16}	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
s_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
s_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0
s_{19}	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
s_{20}	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1

TABLE 4.5 – Matrice de mesurabilité pour le modèle de la figure 4.17

La visibilité d'une facette depuis les différentes positions est testée grâce au simulateur de numérisation (présenté à la section 4.3). La procédure se déroule de la façon suivante :
– le scanner est positionné en v_j,
– les facettes visibles depuis cette position sont identifiées,
– les éléments correspondants sont mis à 1 dans la colonne v_j.
La procédure est répétée pour tous les points de vue v_j de V. La visibilité de la matrice M correspond au pourcentage de facettes visibles. La planification de vues peut alors

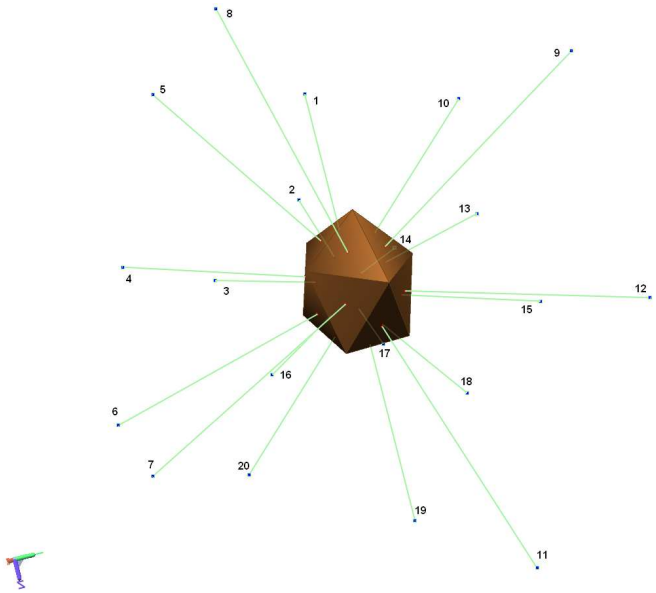


Figure 4.17 – Points de vue potentiels

être formulée comme un problème de recouvrement d'ensemble (ou "Set Covering Problem", SCP), considéré comme un problème NP-difficile. Il existe plusieurs méthodes pour résoudre ces problèmes [Caprara et al., 2000], comme les algorithmes gloutons ("greedy"), les algorithmes génétiques, ou encore la relaxation de Lagrange. L'objectif d'un SCP est de sélectionner dans plusieurs ensembles, le nombre minimum d'éléments qui couvre le nombre maximum d'éléments. Pour la planification de vues, il faut donc sélectionner le nombre minimum de points de vue permettant d'observer le maximum de facettes.

Afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé l'outil développé par Lan [Lan et al., 2007], dont l'interface est illustrée à la figure 4.18. Cet outil utilise l'heuristique MetaRaPS (Meta-heuristic for Randomized Priority Search) développé par l'auteur. Le programme prend en entrée la matrice de mesurabilité M. Les données en sortie utiles pour notre application sont :
– le nombre de points de vue nécessaires,
– la liste de ces points de vue.
Les points de vue ainsi obtenus correspondent aux positions optimales pour la numérisation complète de l'objet.

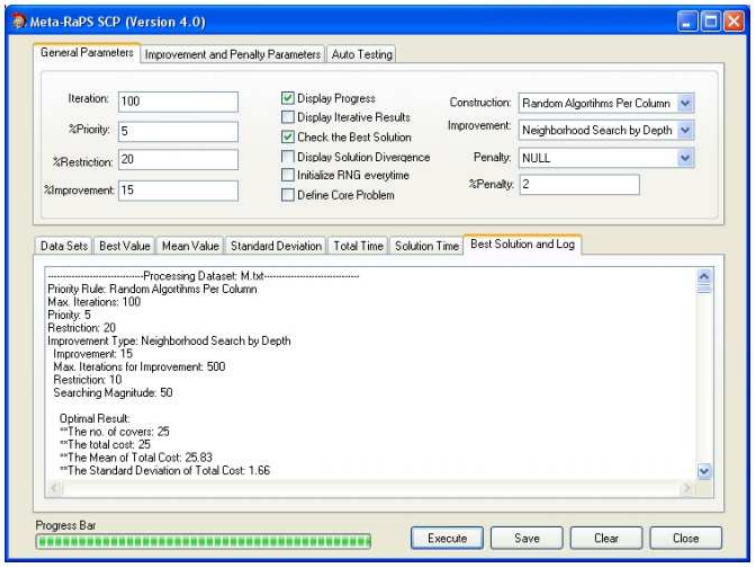


Figure 4.18 – Interface de l'outil de résolution du SCP

4.2.2 Méthode non basée sur un modèle

L'approche présentée permet la numérisation automatique d'un objet sans connaissance a priori (mise à part la boîte englobante pour respecter la contrainte de champ de vue), comme les objets naturels et patrimoniaux. Son principe de fonctionnement est décrit à la figure 4.19. Elle est composée de deux phases : l'acquisition d'un modèle incomplet par la méthode des "Mass Vector Chain" développée par Yuan [Yuan, 1995], puis l'analyse des trous restants dans le modèle 3D afin de le compléter.

4.2.2.1 Première étape : "Mass Vector Chain" (ou MVC)

A. Rappel dur les MVC

La première phase de la méthode développée doit permettre de créer un premier modèle, qui pourra être repris lors de la seconde phase s'il reste des trous dans le maillage. Cette étape est basée sur les MVC développé par Yuan [Yuan, 1995] et repris par Li [Li et al., 2005], qui apporte un critère d'arrêt à la méthode. Cette méthode a été décrite à la section 4.1.2.2. Pour rappel, les MVC sont définis par l'équation :

$$\vec{V_i} = \vec{n_i} \,.R_i \tag{4.5}$$

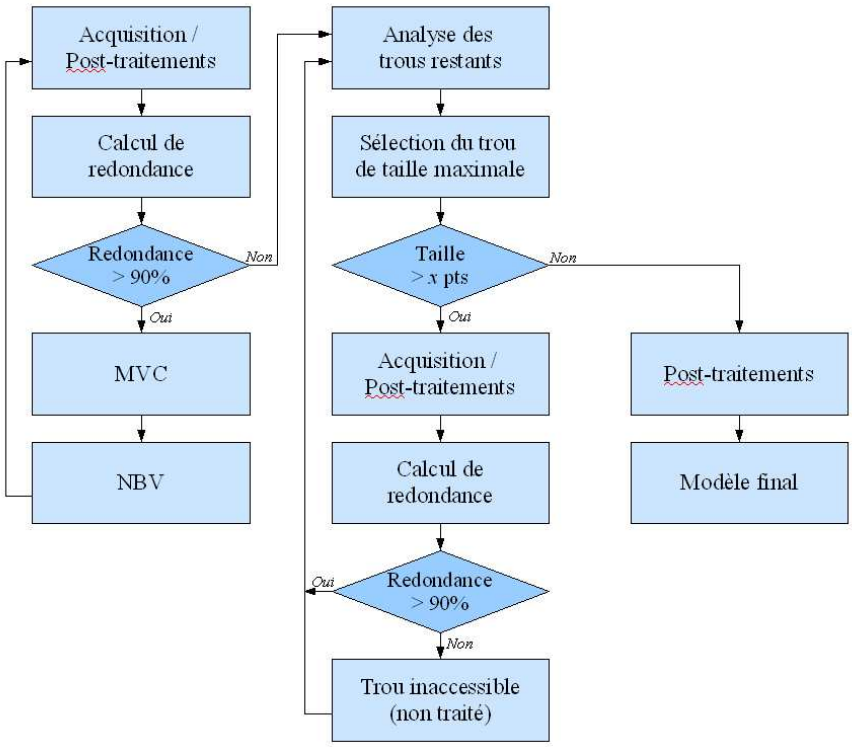


Figure 4.19 – Procédure de la méthode non basée sur un modèle, en deux phases : MVC (en bleu) et bouchage des trous (en mauve)

où $\vec{n_i}$ représente la normale moyenne de la surface S_i et R_i représente l'aire de la projection de la surface S_i sur le plan P_i, qui est le plan perpendiculaire à $\vec{n_i}$ (figure 4.20).

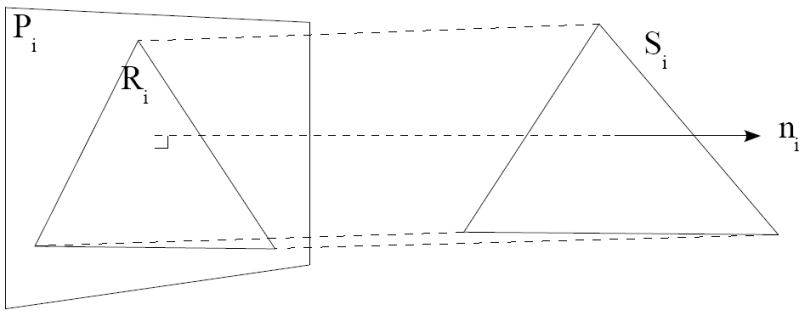


Figure 4.20 – Définition d'un MVC

Yuan utilise les MVC sur des patchs de surfaces. Les parties convexes et les parties concaves doivent être différenciées afin d'appliquer deux calculs différents. Pour cela, l'auteur extrait les différentes parties acquises du modèle 3D et les identifie par des

primitives (plan, cylindre, ...). Cependant, dans le cas d'objets naturels ou patrimoniaux, la forme ne peut être approximée par des primitives. Nous considérons donc tous les objets à numériser comme des objets convexes et chaque facette du modèle 3D représente un patch de surfaces.

La méthode des MVC s'appuie sur le fait que, pour un objet convexe, la "masse gaussienne totale" du modèle doit être égale à zéro [Horn, 1984][Kender, 1980] :

$$\iint_s G(n(s))n(s)ds = \oiint n(s)ds = 0 \tag{4.6}$$

Avec $n(s)$ la normale de la surface s et $G(n(s))$ la masse gaussienne pour la direction donnée par $n(s)$. Ainsi, la somme des MVC ("Mass Vector Sum", ou MVS) pour un modèle à m facettes est donnée par :

$$\sum_{i=0}^{m-1} \vec{V_i} = \sum_{i=0}^{m-1} \iint_{s_i} n(s)ds = 0 \tag{4.7}$$

La somme des MVC doit donc être nulle pour un modèle fermé. Si, durant la reconstruction, cette somme est différente de zéro, cela signifie qu'il reste des surfaces non acquises et que le modèle actuel est incomplet. Si le nombre de facettes non acquises est m', l'équation

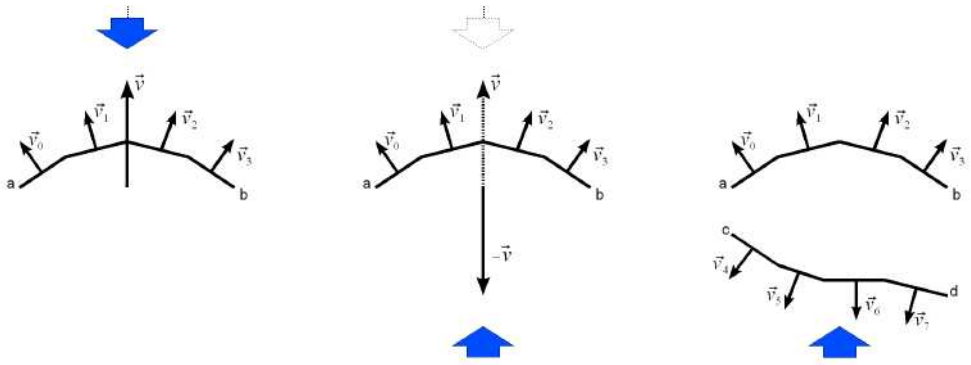
$$\sum_{i=0}^{m-1} \vec{V_i} = \sum_{i=0}^{m'-1} \vec{V_i} + \sum_{i=m'}^{m-1} \vec{V_i} = 0 \tag{4.8}$$

peut s'écrire

$$\sum_{i=m'}^{m-1} \vec{V_i} = -\sum_{i=0}^{m'-1} \vec{V_i} = -\vec{V_{dir}} \tag{4.9}$$

où $\vec{V_{dir}}$ fournit une estimation de la direction depuis laquelle les facettes non acquises peuvent être visibles.

Une illustration de ces équations est donnée à la figure 4.21 : quatre surfaces sont obtenues à la première acquisition. Une normale $\vec{v_i}$ est associée à chaque surface. La somme de ces normales donne le vecteur $\vec{v}$, qui correspond à la MVS de la première vue, et donne la direction depuis laquelle les surfaces non acquises sont visibles. Le capteur est donc positionné le long de cette direction afin d'acquérir une deuxième vue. Le procédé se répète jusqu'à atteindre le critère d'arrêt.



(a) (b) (c)

Figure 4.21 – Estimation par les MVC : (a) "direction de vue" des surfaces acquises ; (b) "direction de vue" des surfaces non acquises ; (c) nouvelle acquisition

Le modèle 3D obtenu à la fin de cette première phase est un modèle 3D incomplet. En exemple est présenté à la figure 4.22.

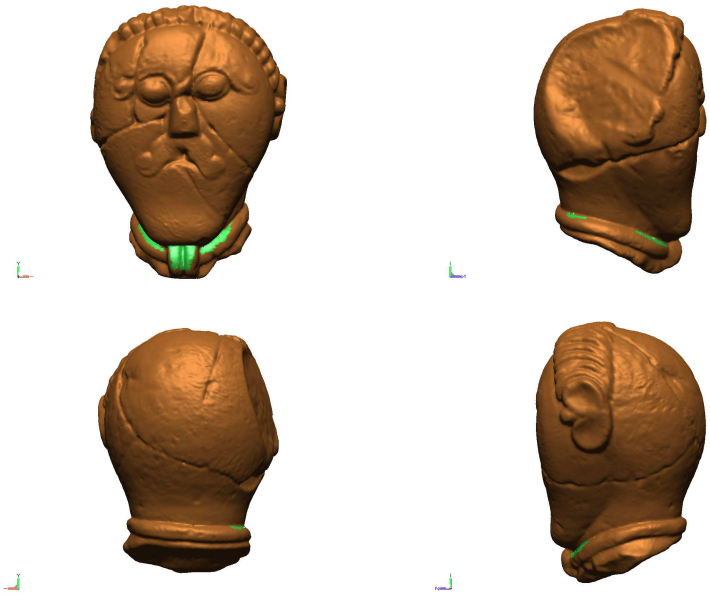


Figure 4.22 – Exemple d'un modèle 3D obtenu à la fin de la première phase : les parties vertes correspondent aux données manquantes

B. Critère d'arrêt

La méthode de Yuan se termine lorsque le modèle 3D est complet. Mais lorsqu'une acquisition n'apporte pas de nouvelles données, la MVS du modèle n'évolue plus, et indique donc toujours la même direction. Ainsi, l'algorithme ne se termine pas et les données manquantes ne peuvent être acquises.

Un critère d'arrêt a donc été défini. Il est calculé en fonction de l'évolution de l'aire de la surface numérisée du modèle 3D, qui tend vers 100% au cours des différentes acquisitions (figure 4.23), et de la redondance de données apportées par les nouvelles vues.

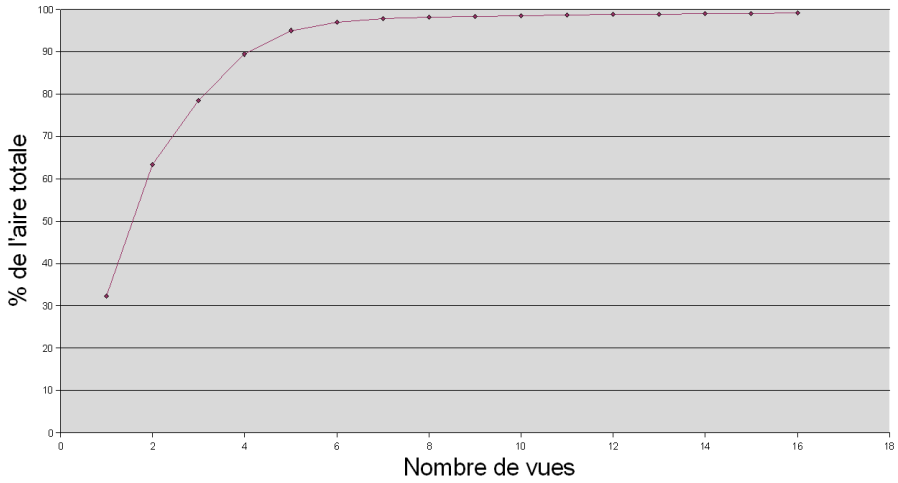


Figure 4.23 – Evolution de l'aire de la surface numérisée par rapport à l'aire complète en fonction du nombre de vues

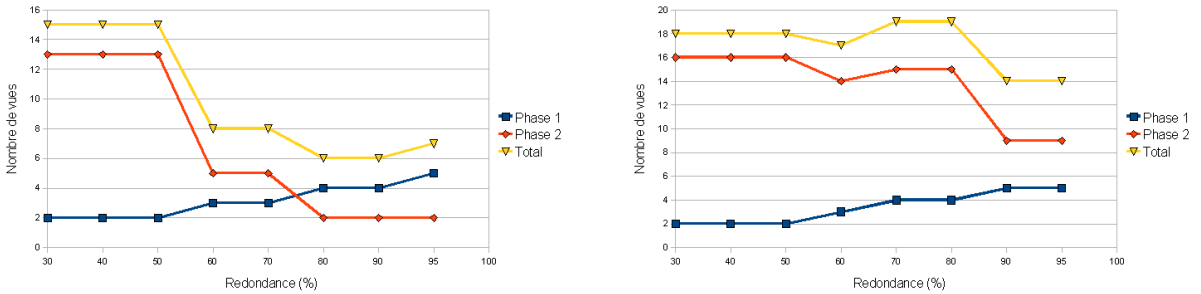
La redondance R est calculée par l'équation

$$R = \frac{((A_p + A_n) - A_f)}{A_n} \tag{4.10}$$

où A_n représente à l'aire de la nouvelle vue, A_p et A_f correspondent respectivement à l'aire du modèle 3D avant et après la fusion de la dernière vue. Ainsi, 0% de redondance indique que la nouvelle acquisition n'a aucune zone de recouvrement avec les acquisitions précédentes, et 100% de redondance signifie que la nouvelle acquisition correspond à une partie déjà numérisée de l'objet.

Lorsque qu'une nouvelle vue apporte plus de x% de redondance (en aire), la première étape se termine. La valeur de ce seuil influe sur le nombre de vues nécessaires à la numérisation complète, mais pas sur le taux de complétude de la numérisation finale (variation de 1 à 2% maximum). Si le seuil est trop faible, le nombre de vues de la première phase est plus faible, mais le nombre de zones d'occlusions (et donc de trous) est plus important, ce qui augmente le nombre de vues nécessaires à la seconde phase. Si le seuil est trop élevé, le nombre de vues lors de la première phase augmente sans apporter d'amélioration à la résolution.

La figure 4.24 illustre les essais effectués pour deux objets représentatifs (ces tests ont été effectués sur les seize objets présentés à la section 4.4). Ainsi, sur la figure (a), lorsque le seuil est à 30%, il faut quinze vues au total (deux vues lors de la première phase et treize lors de la seconde phase), alors qu'il ne faut que six vues lorsque le seuil est fixé à 80% (quatre vues en première phase et deux vues en seconde phase). Puis, le nombre de vues augmente de nouveau lorsque le seuil est supérieur à 90% (sept vues au total pour 95%). Pour la figure (b), le nombre de vues minimum est atteint lorsque le seuil est fixé à 90-95% (cinq vues en première phase, neuf vues en seconde phase, soit un total de quatorze vues). Suite à ces différents essais, ce critère d'arrêt a été fixé à 90% de redondance.



(a) (b)

Figure 4.24 – Evolution du nombre de vue total et pour les deux phases en fonction du critère d'arrêt pour deux objets

4.2.2.2 Deuxième étape : acquisition des données manquantes

Lors de la seconde phase, le modèle 3D obtenu est analysé afin de déterminer s'il reste des trous dans le maillage. L'objectif est de calculer les positions et orientations que le scanner devra prendre pour effectuer les acquisitions nécessaires pour compléter le modèle 3D. Pour cela, les trous doivent être repérés et identifiés afin d'être différenciés. Dans cette section, le terme "trou" désigne un trou dans le maillage et non un trou topologique (défini à la section 3.1).

A. Identification des trous

Ces trous sont détectés en identifiant les arêtes du modèle qui ne sont associées qu'à une seule facette (ces arêtes sont appelées "arêtes de bord"). Le regroupement de ces arêtes par connexité permet d'obtenir la liste des trous restants. Un trou est défini par l'ensemble des sommets S_n appartenant au bord de ce trou. A partir de cet ensemble

de sommets, quatre caractéristiques sont calculées pour chaque trou, permettant ainsi de générer une liste des trous (figure 4.25) :
– sa position P
– sa normale $\vec{N}$
– son rayon maximal R
– sa taille T

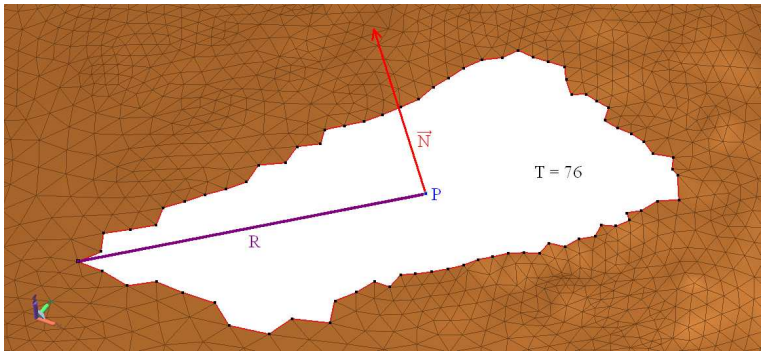


Figure 4.25 – Caractéristiques d'un trou

La position P

Elle correspond au centre de gravité du trou. Celui-ci est calculé à partir de la position des sommets S_n :

$$P(x, y, z) = \frac{\sum_{i=0}^{n} S_i}{n} \tag{4.11}$$

avec S_i les sommets composant le trou et n le nombre de points.

La normale $\vec{N}$

Elle permet de définir l'orientation du trou. Pour cela, deux méthodes ont été mises en place. La première méthode consiste à calculer la somme des normales des sommets S_n pour calculer cette orientation. Cependant, la direction indiquée ne permet pas toujours d'acquérir les données nécessaires comme le montre la figure 4.26 : l'angle d'acquisition calculé est incorrect par rapport à l'orientation des données manquantes.

Afin de résoudre ce problème, une seconde méthode a été développée. Pour cela, des facettes F permettant de boucher le trou sont simulées (figure 4.27). Ces facettes sont "créées" en sélectionnant un sommet S_i puis deux autres points consécutifs, jusqu'à utiliser tous les points du trou. La somme des normales de ces facettes permet de définir la normale du trou :

$$\vec{N} = \sum_{j=0}^{m} \vec{N}_j \tag{4.12}$$

avec $\vec{N}_j$ la normale de la facette F_j et m le nombre de facettes.

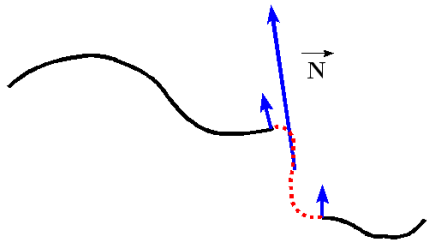
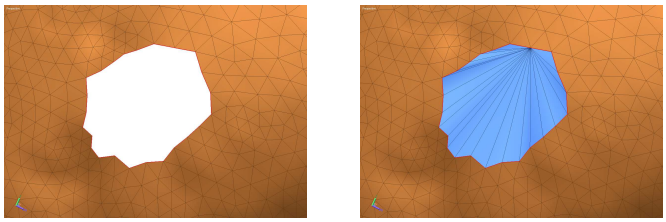


Figure 4.26 – Calcul de la normale du trou : la direction calculée ne permet pas l'acquisition des données manquantes (ligne en pointillée)



(a) (b)

Figure 4.27 – Création de facettes pour le calcul de la normale du trou : (a) trou ; (b) simulation de facettes

La normale calculée par cette seconde méthode est proche de la normale des facettes manquantes. Ainsi, dans l'exemple de la figure 4.28, la direction calculée par cette deuxième méthode permet d'acquérir les données manquantes.

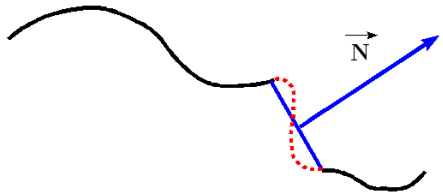


Figure 4.28 – Calcul de la normale du trou : la direction calculée permet l'acquisition des données manquantes (ligne en pointillée)

Le rayon R

Il correspond à la distance entre le centre de gravité du trou (sa position P) et le sommet S_i le plus éloigné de celui-ci.

La taille T

Elle correspond au nombre de sommets composant un trou (Cette caractéristique est

représentative des dimensions du trou car les données sont acquises par un scanner à acquisition par vues, dont la résolution est régulière en X et Y).

Ces quatre caractéristiques permettent d'identifier chaque trou afin de positionner le capteur pour les acquisitions supplémentaires.

B. Sélection du trou et positionnement du scanner

Une liste des trous L_{trous} du modèle 3D est générée, puis triée par taille. Afin de réduire le plus rapidement la surface non acquise, le trou possédant la taille T maximale est sélectionné. Le capteur est positionné le long de la normale de ce trou, et est orienté vers la position de ce dernier. Pour conserver une résolution homogène, la distance d'acquisition reste la même que pour les acquisitions précédentes. Afin de confirmer cette position, un test de visibilité est effectué : tous les sommets S_n doivent être visibles depuis la nouvelle position. Ce test permet ainsi de détecter les auto-occlusions (figure 4.29). Si l'un des points n'est pas visible depuis la position calculée, une nouvelle position doit être déterminée.

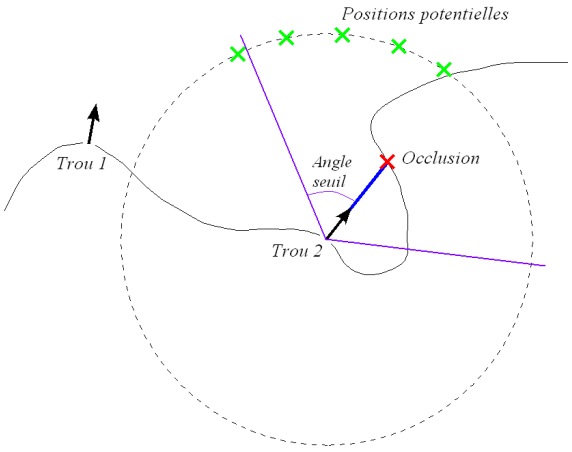
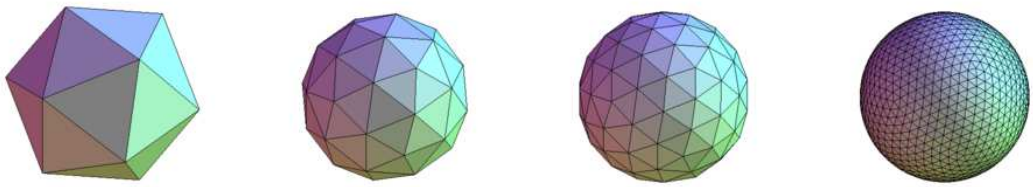


Figure 4.29 – Auto-occlusion : la normale du trou 2 intersecte le modèle 3D

Pour calculer cette nouvelle position, une "sphère de positions" (ou "viewsphere") est utilisée. Cette sphère est échantillonnée et centrée sur la position du trou en cours et chaque point représente une position potentielle pour le scanner. Afin d'obtenir une sphère avec des sommets uniformément distribués (figure 4.30), l'échantillonnage est effectué en subdivisant un icosaèdre (polyèdre à douze sommets). Chaque facette est subdivisé itérativement en quatre nouvelles facettes [Hoffmann, 2002]. Afin d'accélérer les tests de visibilité, seuls les points de la sphère inclus dans un cône de 60° autour de la normale du trou sont testés [Lartigue and Bourdet, 2004]. La position de la sphère



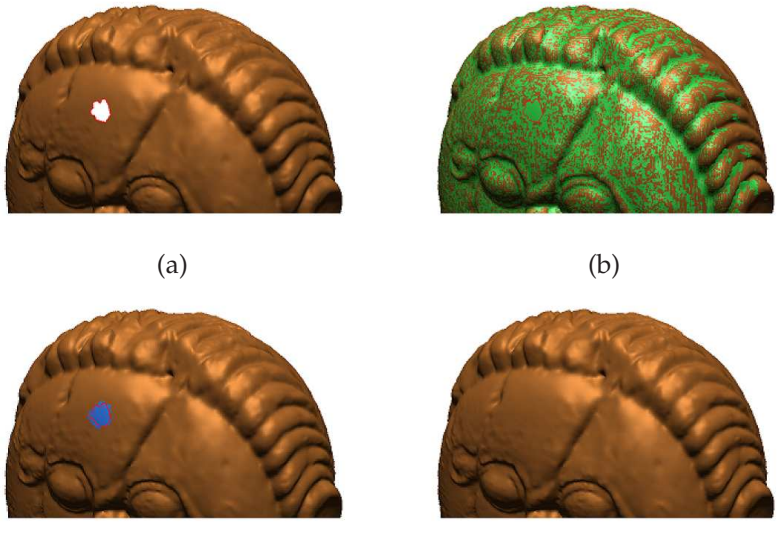
(a) (b) (c) (d)

Figure 4.30 – Subdivision de l'icosaèdre : (a) 20 facettes ; (b) 60 facettes ; (c) 180 facettes ; (d) 1620 facettes

depuis laquelle le maximum de points du trou est visible est choisie comme prochaine position. Si autant de points sont visibles depuis plusieurs positions, la direction la plus proche de la normale du trou est choisie. Le scanner doit donc être placé à cette position, orienté vers la position du trou. Si aucune position n'est définie, le trou est considéré comme inaccessible.

C. Segmentation de la nouvelle vue

Une fois la nouvelle acquisition effectuée, elle est nettoyée et segmentée afin de limiter la redondance de données lors de la fusion (section 3.5). Cette segmentation a pour objectif de ne conserver que les points permettant de boucher le trou et non la vue complète. Pour cela, seuls les points de la nouvelle vue situés dans une sphère centrée sur la position P du trou sont conservés (figure 4.31). Le rayon de cette sphère est fixé à 1,5 fois le rayon R du trou, afin de permettre la fusion des vues.



(a) (b)

(c) (d)

Figure 4.31 – Segmentation d'une nouvelle vue : (a) modèle 3D avant acquisition ; (b) nouvelle acquisition (en vert) ; (c) segmentation ; (d) fusion

La liste de trous L_{trous} est générée après chaque acquisition, car un deuxième trou proche du trou traîté peut être bouché complètement ou en partie par la même acquisition (figure 4.32). La position et la normale des trous peuvent donc varier au cours de la procédure.

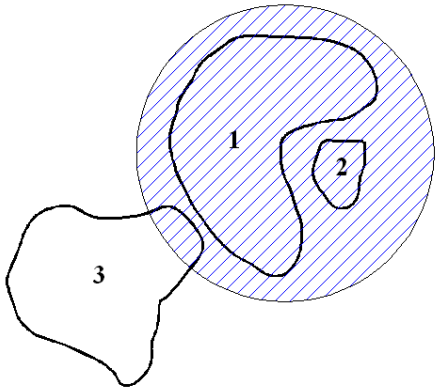


Figure 4.32 – Bouchage de plusieurs trous : la zone hachurée représente la nouvelle vue segmentée nécessaire pour boucher le trou 1. Le trou 2 est également bouché par cette vue et la surface du trou 3 est diminuée.

D. Trous inaccessibles

Tous les trous inaccessibles ne peuvent être détectés avant l'acquisition par des tests de visibilité. La figure 4.33 en donne un exemple : les sommets du bord du trou (en rouge) sont visibles, et une position va donc être calculée. Cependant, les facettes du fond de la cavité (en vert) ne sont pas accessibles en raison de la distance caméra-source lumineuse (phénomène d'auto-occlusion, section 2.3). Ces trous ne peuvent donc être bouchés par une nouvelle acquisition.

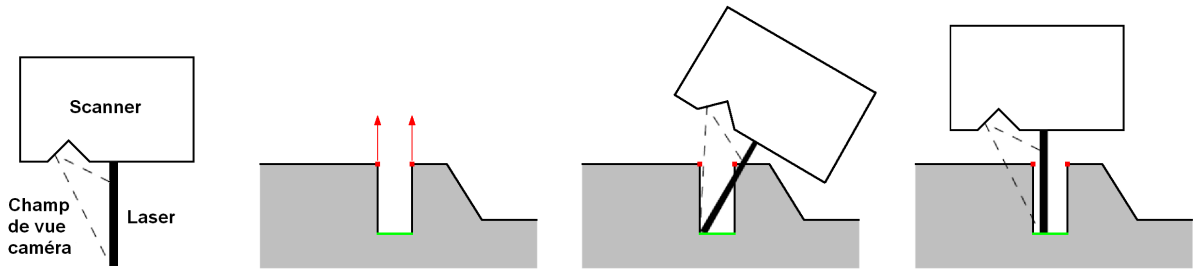


Figure 4.33 – Trou inaccessible : la normale du trou définit une position mais le trou est inaccessible en raison de la configuration du capteur

Ces trous inaccessibles sont identifiés en calculant la redondance de données entre le modèle 3D avant acquisition et après la fusion de la nouvelle vue segmentée (le

calcul est identique à celui effectué pour le critère d'arrêt de la première phase, section 4.2.2.1). Si la redondance est supérieure à 90% (valeur fixée expérimentalement), le trou est alors considéré comme inaccessible. Ces trous sont mémorisés dans une seconde liste de trous L_{imp}.

Afin de pouvoir identifier un trou précédemment classé inaccessible, la position du trou en cours doit être comparée avec celles des trous "inaccessibles". Si le trou en cours est identique à un trou de la liste L_{imp}, le trou suivant de taille maximale est sélectionné et testé.

Ainsi, cette deuxième phase permet de reprendre chaque trou du maillage un à un et d'effectuer de nouvelles acquisitions permettant de les boucher. Cette étape n'est appliquée que sur les trous dont la taille est supérieure à un seuil. En dessous de celui-ci, les trous sont bouchés par des algorithmes de bouchage de trous. Ce seuil influe bien entendu sur le nombre de vues nécessaires à la seconde phase, mais également sur la qualité du modèle résultant. En effet, comme indiqué à la section 3.5.5, les points et facettes créés par les algorithmes de bouchage de trous sont des données interpolées. La valeur de ce seuil doit donc dépendre de la résolution du capteur, des dimensions de l'objet, mais également de l'application visée.

4.2.3 Conclusion

La première méthode proposée utilise un modèle de référence et s'applique à l'inspection tridimensionnelle dans le milieu industriel, en effectuant une planification de vues hors-ligne automatique. Cette méthode reprend la procédure mise en place par Scott [Scott, 2005]. Des tests de visibilité pour chaque facette du modèle sont effectués afin de générer une matrice de mesurabilité. Les positions optimales sont déterminées en utilisant un algorithme de résolution de SCP. Toute la procédure est automatique (sans intervention d'un opérateur) et permet la numérisation complète d'un objet à partir d'un modèle de référence décimé.

La seconde méthode s'inscrit dans la problématique de numérisation de collections de pièces (archéologiques, biologiques ...). Elle permet la numérisation automatique d'objets sans connaissance a priori sur la forme. Il s'agit d'une méthode itérative en deux étapes. La première phase est basée sur la méthode de Yuan [Yuan, 1995] et permet de créer un premier modèle 3D incomplet en calculant la meilleure position suivante ("Next-Best-View"). A la différence de la méthode originale, aucune extraction

de primitives n'est nécessaire, ce qui permet de numériser des objets plus complexes (ou l'extraction de caractéristiques est impossible). La seconde étape utilise les trous restants dans le maillage pour calculer les différentes positions nécessaires pour compléter le modèle 3D. Pour cela, quatre caractéristiques sont calculées pour chaque trou (position, normale, taille et rayon).

4.3 Environnement de simulation

Les deux méthodes développées ont dans un premier temps été validées dans un environnement de simulation. Ce simulateur permet de tester les méthodes mises en place, sans contraintes physiques. Le principe de fonctionnement du simulateur est décrit à la figure 4.34.

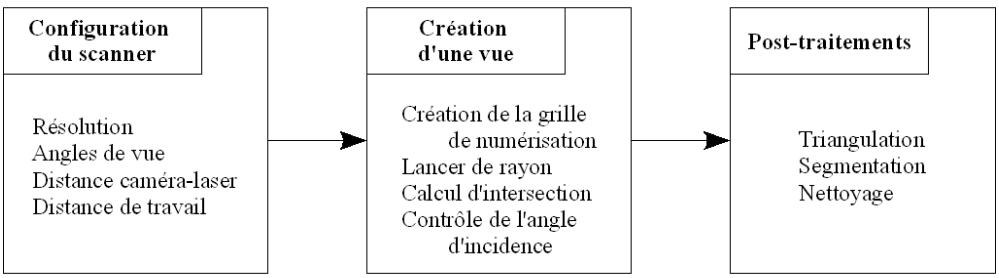


Figure 4.34 – Fonctionnement du simulateur de numérisation 3D

Cet environnement a été implémenté sous RapidForm2004 [RapidForm, 1998]. Ce logiciel de traitement de données 3D issues de scanners offre la possibilité de créer des programmes en utilisant les fonctions paramétrables du logiciel (gestion du maillage, filtrage, triangulation, nettoyage . . .). Le programme développé permet de simuler le fonctionnement d'un scanner à acquisition par vue et les différentes acquisitions sans contrainte physique de positionnement. Son interface est présentée à la figure 4.35. Dans un premier temps, l'utilisateur configure le scanner virtuel. La vue est ensuite générée en utilisant le principe du lancer de rayon [Glassner, 1989]. Pour cela, le modèle 3D complet de l'objet est nécessaire, et servira de modèle de référence. Celui-ci n'est utilisé que pour les calculs d'intersections. Finalement, les post-traitements sont appliqués aux données 3D.

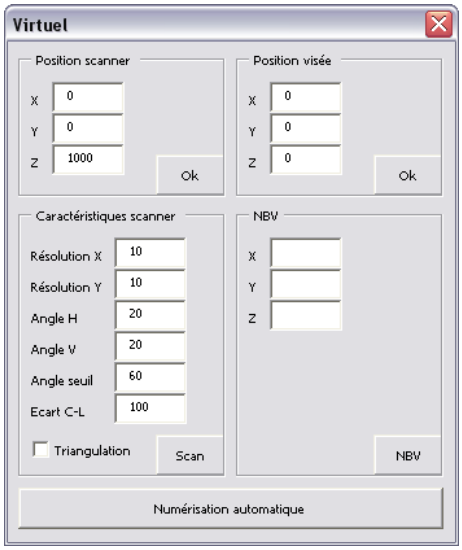


Figure 4.35 – Interface du simulateur de numérisation

4.3.1 Configuration du scanner virtuel

Afin de permettre de simuler un grand nombre de configuration de scanners à acquisition par vue, l'utilisateur doit régler les paramètres du scanner (figure 4.36) :
- la résolution en X et en Y en millimètre (R_X et R_Y)
- les angles de vue horizontal et vertical en degré (A_H et A_V)
- la distance entre la caméra et le laser en millimètre (D_{CL})

Les deux premiers paramètres permettent de simuler le champ de vue du scanner et de générer la grille de numérisation. Le troisième paramètre est indispensable pour prendre en compte les effets d'occlusion. D'autres paramètres doivent également être spécifiés avant de débuter l'acquisition :
- le paramètre "angle seuil" (A_S) : il correspond à l'angle d'incidence en degré du laser sur l'objet (angle entre la normale de la facette et la direction du laser).
- la distance de travail en millimètre (D_T)
- la position du scanner (P_S)
- la position visée (P_V) : par défaut, elle correspond au centre de gravité de l'objet référence

La figure 4.37 illustre deux prises de vue. Le modèle 3D de gauche correspond à une prise de vue effectué avec le scanner Vi910 (Konica-Minolta). Le modèle de droite est une acquisition simulée, en utilisant les paramètres du même scanner. Les données manquantes sur l'acquisition simulée sont dues au nettoyage appliqué aux données (section 4.3.3).

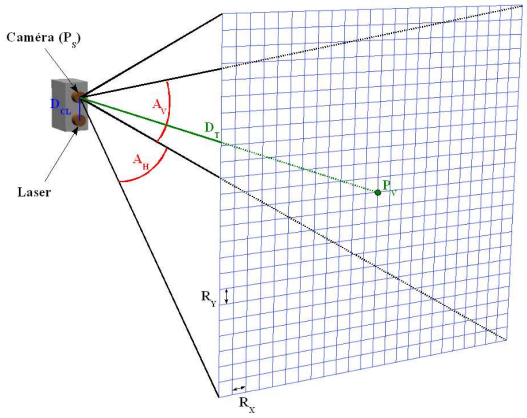


Figure 4.36 – Réglages initiaux : position scanner (P_S), position visée (P_V), résolution en X (R_X), résolution en Y (R_Y), angle horizontal (A_H), angle vertical (A_V), distance caméra-laser (D_{CL}), distance de travail (D_T)

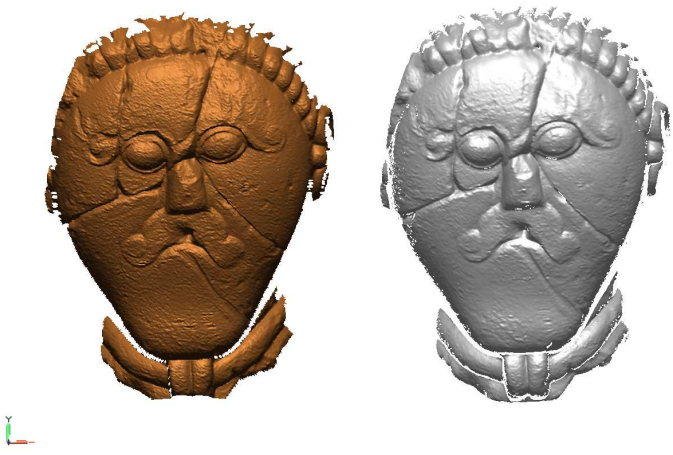


Figure 4.37 – Comparaison numérisation réelle (à gauche) et simulée (à droite)

4.3.2 Création d'une vue

Le programme génère la grille de numérisation en fonction de A_H, A_V, R_X et R_Y (figure 4.38) et l'oriente en fonction de P_S et P_V. Cette grille définie un ensemble de directions

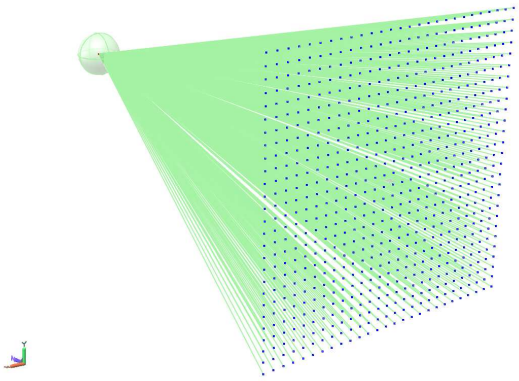
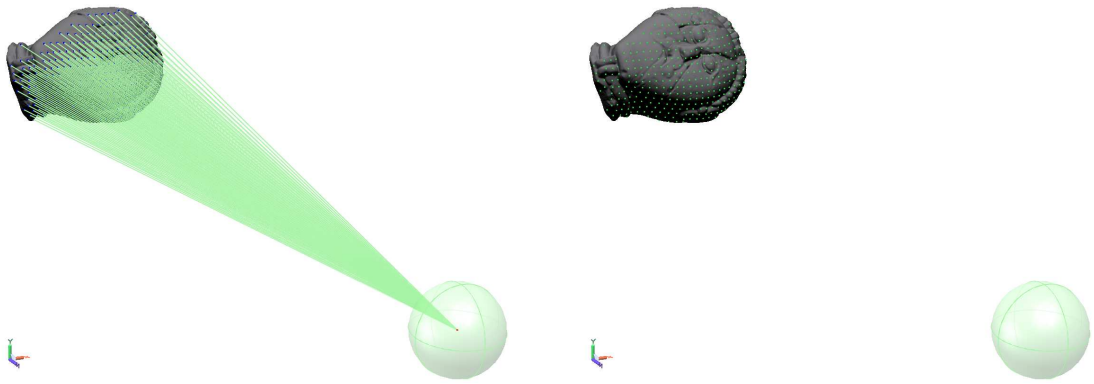


Figure 4.38 – Champ de vue et grille de numérisation ($A_H = A_V = 20°$, $R_X = R_Y = 20mm$)

suivant lesquelles un lancer de rayon va être effectué. Le nombre de rayons N_r dépend des angles de vue et de la résolution (section 4.3.1) :

$$N_r = \left(\frac{A_H}{R_X}\right) \times \left(\frac{A_V}{R_Y}\right) \tag{4.13}$$

Le lancer de rayon permet de calculer les intersections entre un ensemble de vecteurs et le modèle de référence. Ces vecteurs ont pour origine la position de la caméra du scanner et pour extrémité chaque point de la grille de numérisation (figure 4.39). La



(a) (b)

Figure 4.39 – Création d'une vue : (a) Lancer de rayon ; (b) Nouvelle vue

première intersection entre un vecteur et le modèle de référence entraîne la création potentielle d'un sommet de la nouvelle vue. Pour que ce sommet soit validé, l'angle

entre sa normale et le vecteur doit être inférieur à la valeur seuil fixée (A_S). Par défaut, ce seuil est fixée à 60° [Lartigue and Bourdet, 2004].

Afin de prendre en compte les effets d'occlusions, un second lancer de rayon est effectué à chaque intersection (figure 4.40). Ce nouveau vecteur a pour origine le point d'intersection et pour extrémité la position du laser du scanner. Si ce vecteur n'a pas d'intersection avec le modèle de référence, le point est créé, sinon, cela signifie que ce point ne peut être atteint par le laser depuis cette position. Le processus est répété pour chaque point de la grille de numérisation.

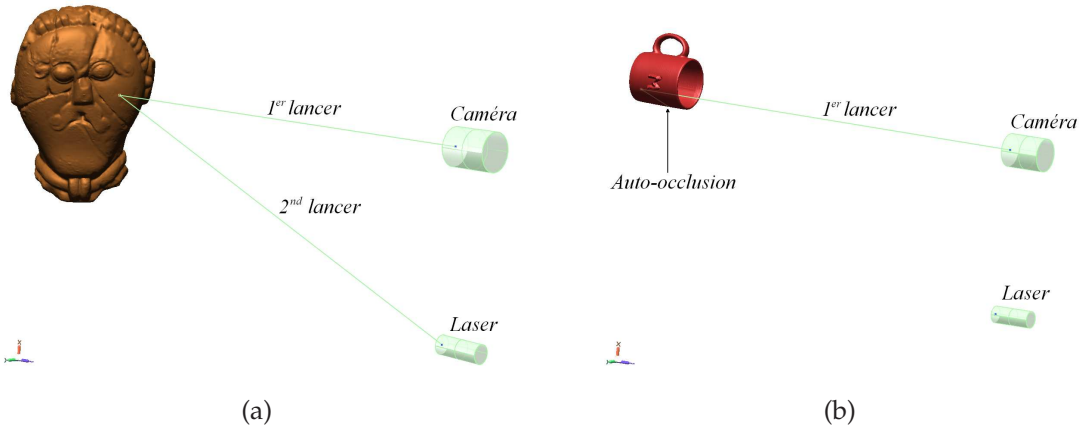
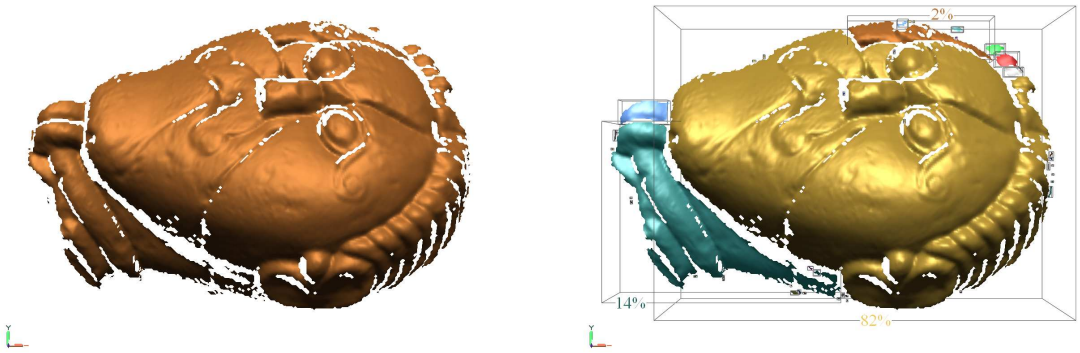


Figure 4.40 – Test d'auto-occlusion : premier lancer de la caméra à l'objet et deuxième lancer de l'intersection au laser ; (a) validation du point mesuré ; (b) auto-occlusion ;

4.3.3 Traitements

Les données sont acquises sous la forme d'un nuage de points. La première étape est donc la triangulation (les systèmes d'acquisitions par vue fournissent directement un modèle maillé, comme le Vi910, les systèmes Comet et Atos). Chaque vue est ensuite nettoyée et segmentée (section 3.5.3). Le premier nettoyage permet d'éliminer les facettes acquises avec un angle trop important. En effet, lorsque l'angle d'incidence du laser sur la surface dépasse un seuil, le bruit de mesure augmente [Lartigue and Bourdet, 2004]. Toutes les facettes dont la normale forme un angle supérieur à l'angle seuil (A_S) avec la direction d'acquisition sont donc supprimées.

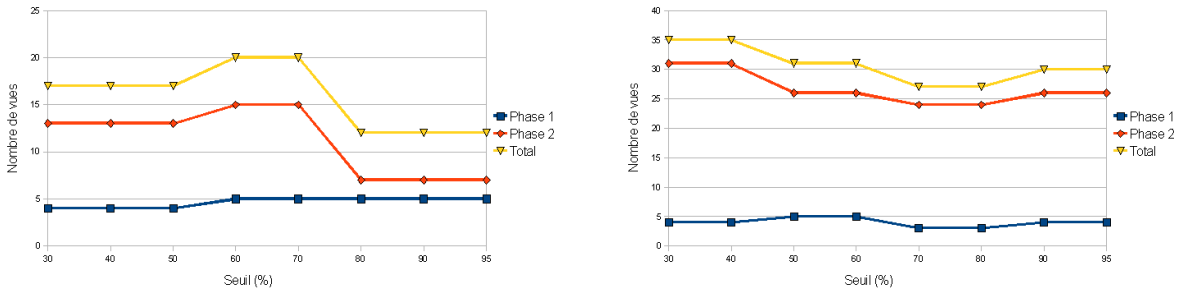
Chaque vue est ensuite décomposée en composantes connexes (figure 4.41) : chaque groupe de facettes interconnectées forme une composante. Les n composantes connexes dont les aires sont les plus importantes sont sélectionnées afin que la somme de leurs aires dépasse un seuil préalablement fixé. Les autres composantes connexes sont alors



(a) (b)

Figure 4.41 – Segmentation en composantes connexes : (a) vue acquise ; (b) vue découpée en composantes connexes et pourcentage de l'aire de chaque partie par rapport à l'aire de la vue (les pourcentages non indiqués sont inférieurs à 1%

supprimées. Ce seuil n'a pas d'influence sur le taux de couverture de l'objet mais fait varier le nombre de vues nécessaires à la numérisation complète. La figure 4.42 illustre l'influence de ce seuil sur deux objets (représentatifs des différents tests effectués). Ainsi, pour la figure (a), lorsque le seuil est fixé à 60%, il faut vingt vues (cinq en première phase et quinze en seconde) pour numériser l'objet, alors qu'il n'en faut que treize lorsque le seuil est à 80% (cinq vues en première phase et sept vues en seconde phase). Sur la figure (b), le nombre de vues minimum est atteint lorsque le seuil est fixé à 70-80% (trois vues en phase 1, vingt-quatre vues en phase 2 soit vingt-sept vues au total). Ce nombre augmente de nouveau lorsque le seuil dépasse 80%. Suite à ces différents essais, ce paramètre a été fixé à 80%.



(a) (b)

Figure 4.42 – Influence du seuil de segmentation sur deux objets

Cette étape a plusieurs objectifs :
- supprimer l'environnement si besoin,
- supprimer des facettes isolées d'une vue, qui pourraient entrainer des erreurs lors de la fusion des vues.

L'angle seuil de 60° est également utilisé pour supprimer les facettes allongées (ou spikes). Avec un système d'acquisition par vue, le nuage de points est organisé suivant une grille régulière en X et Y (section 3.4.2). Sur un plan perpendiculaire à la direction d'acquisition, la longueur l d'une arête doit être inférieure ou égale à

$$l = D_r \times \sqrt{2} \tag{4.14}$$

avec D_r correspondant à la distance entre deux points en X (ou en Y). Sur un plan à 60°, la longueur $l_{60°}$ doit être inférieure ou égale à

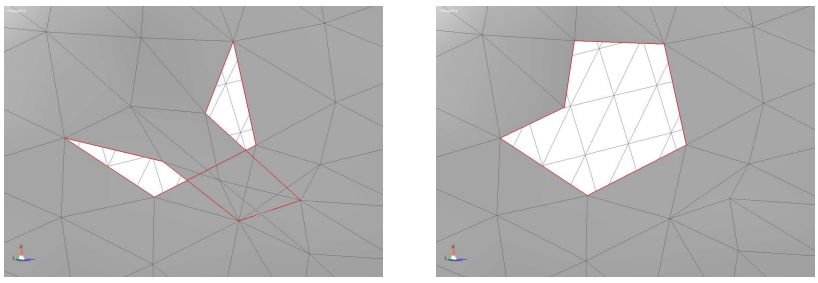
$$l_{60°} = \frac{l}{cos(60°)} = \frac{D_r \times \sqrt{2}}{cos(60°)} = \frac{D_r \times \sqrt{2}}{0.5} \tag{4.15}$$

soit

$$l_{60°} = 2 \times D_r \times \sqrt{2} \tag{4.16}$$

Connaissant la distance de travail et les caractéristiques du scanner (distance entre deux points en fonction de la distance), les dimensions des facettes peuvent être calculées. Les facettes dont la longueur d'une des arêtes est supérieure à $l_{60°}$ sont supprimées.

Le second nettoyage d'une vue consiste en la suppression de plusieurs types de facettes : les facettes croisées, les facettes non-manifold, les facettes redondantes . . . (section 3.5.3). En plus de supprimer des données bruitées, ce nettoyage permet de créer des trous sans auto-intersections ni erreurs de normales (figure 4.43), qui pourront être bouchés par la suite (en deuxième phase ou par post-traitements).



(a) (b)

Figure 4.43 – Bords d'un trou : (a) trou avec auto-intersection ; (b) trou nettoyé

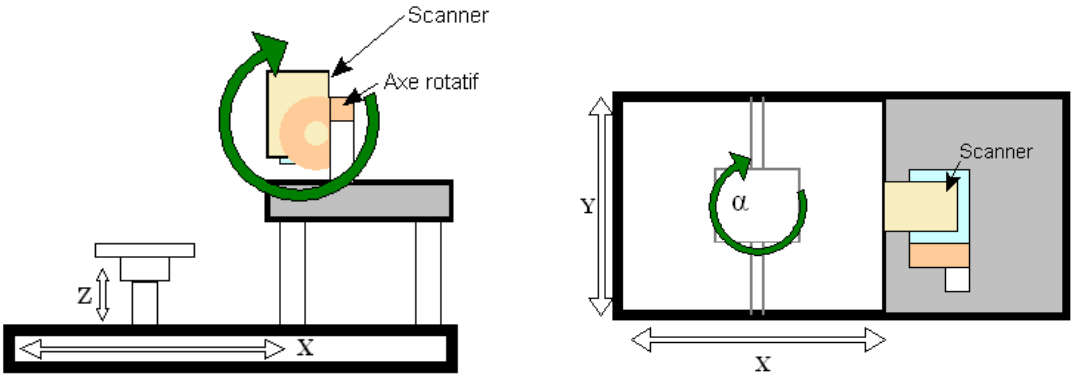
4.3.4 Intégration des méthodes développées

Les deux méthodes décrites dans la section 4.2 ont été intégrées à ce simulateur. La première méthode basée sur un modèle doit permettre de déterminer la planification de vues optimales hors-ligne à partir d'un modèle de référence. Le simulateur permet alors d'effectuer les tests de visibilité nécessaires à la création de la matrice de mesurabilité. Pour cela, le scanner virtuel est positionné aux différents points de vue potentiels, et une acquisition est simulée en chacun de ces points. Ainsi, pour un point de vue donné, les facettes "acquises" correspondent aux facettes visibles depuis cette position. Les tests de visibilité prennent en compte les effets d'occlusions et les prises de vue rasantes. Ces tests permettent de générer la matrice de visibilité. Le scanner virtuel est également utilisé pour valider les positions optimales déterminées par la méthode. Pour cela, une acquisition est effectuée depuis chacune de ces positions, puis les vues sont fusionnées.

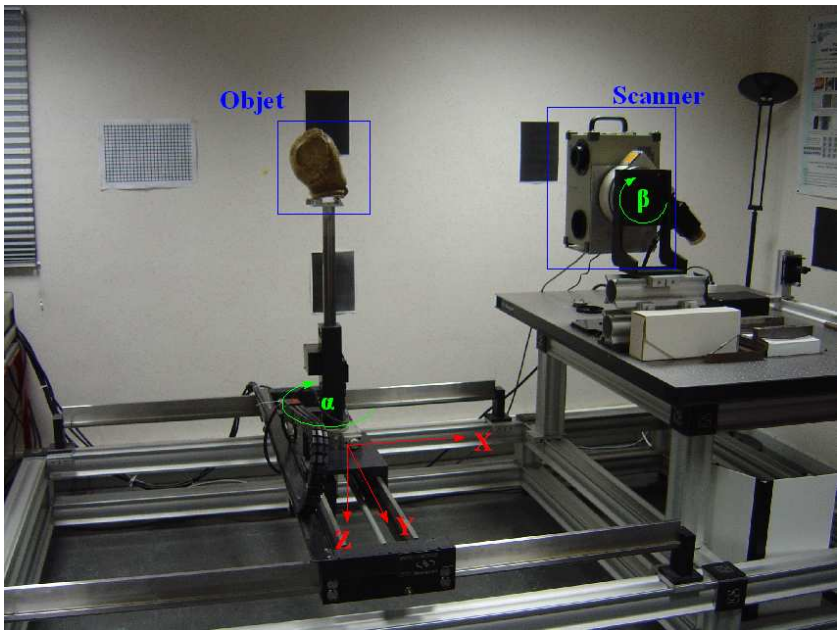
Dans le cas de la méthode sans connaissance a priori sur la forme de l'objet, la meilleure position suivante ("Next-Best-View") est calculée à partir des données précédemment acquises. Afin de générer ces acquisitions virtuelles, le modèle 3D de l'objet est tout de même nécessaire dans l'environnement de simulation. Cependant, il n'est utilisé que pour le calcul d'intersections effectué lors de la création de la vue (figure 4.3.2) et aucune information du modèle n'est utilisée. Les données ainsi "acquises" permettent de réaliser les différents calculs nécessaires au fonctionnement de la méthode.

4.3.5 Prototype de validation

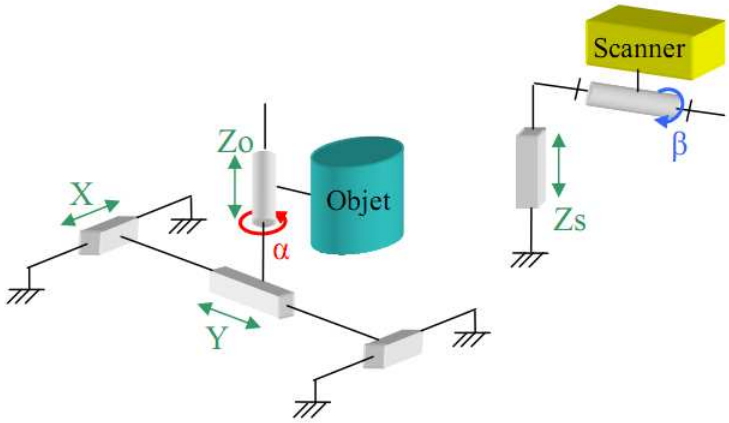
Suite au développement du simulateur, nous avons également mis en place un premier prototype (figure 4.44), avec pour objectif d'intégrer dans les algorithmes développés les contraintes physiques d'un système réel et de valider physiquement les méthodes. Pour cela, nous avons utilisé un banc de positionnement quatre axes (trois translations et une rotation) disponible au laboratoire Le2i, auquel nous avons ajouté un axe de rotation supplémentaire, sur lequel a été fixé le scanner Vi910 de Konica-Minolta (figure 4.45). Le Vi910 est un scanner à triangulation laser ligne à balayage : la ligne laser balaye la scène à numériser grâce à un miroir rotatif. Une roue de filtres permet l'acquisition par un capteur monochrome de la géométrie, à travers un filtre dont la bande passante correspond à la longueur d'onde du laser, puis de la texture, à travers trois filtres couleurs : rouge, vert et bleu. Les prises de vue sont acquises avec une résolution de 640×480 en 2,5 secondes. Le nuage de point acquis est directement triangulé par le scanner. Plusieurs objectifs sont disponibles en fonction des dimensions de l'objet. Avec



(a) (b)



(c)



(d)

Figure 4.44 – (a-b) : Schémas ; (c) photographie du système de numérisation 3D ; (d) schéma cinématique

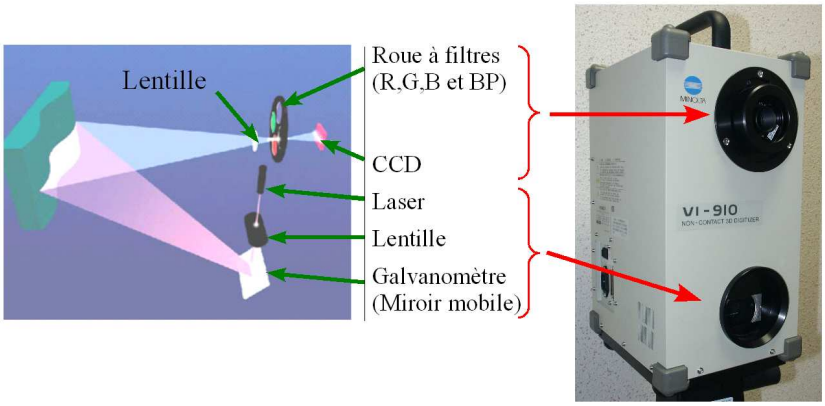


Figure 4.45 – Scanner Vi910 de Konica-Minolta

la configuration utilisée, la résolution est d'environ 0,5mm en X et Y pour une distance de travail de 700mm. La précision est de l'ordre de 100μm en Z.

Grâce à ce prototype, l'objet peut être positionné dans un volume de 1370mm × 990mm × 440mm (X, Y, Z) et peut effectuer une rotation de 320° autour de l'axe Z (angle α). Le scanner peut tourner de 360° autour de l'axe Y (angle β).

A. Contraintes de positionnement

Afin de modéliser l'espace de travail du système de positionnement, des contraintes ont été ajoutées à l'environnement de simulation, correspondant aux courses en translation et en rotation du système.Dans l'environnement de simulation, l'objet est fixe et les positions du scanner sont calculées dans le référentiel objet. Afin de simuler les contraintes, les translations et rotations doivent donc être reportées sur le scanner (figure 4.6). Ainsi, le scanner se déplace sur un cylindre centré sur l'objet.

Chaque capteur possède une distance de travail minimale (D_{min}) et une distance de travail maximale (D_{max}). De plus, en raison de la faible course en translation en Z, l'angle β est très peu utilisé. Le volume de positionnement en simulation se traduit donc par deux cylindres centrés sur l'objet (figure 4.46). Les points de vue accessibles sont situés dans l'espace compris entre ces deux surfaces.

Lorsqu'un point de vue n'est pas accessible par le scanner, il doit être déplacé à la position la plus proche. Pour cela, un nouveau point de vue est défini en déplaçant la position calculée le long du vecteur ayant pour origine la position inaccessible et pour extrémité le centre de l'objet (figure 4.47).

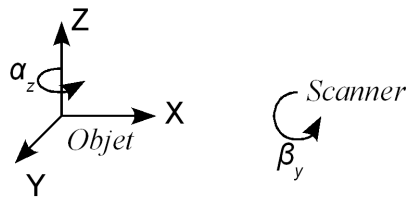
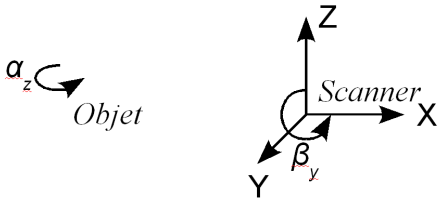
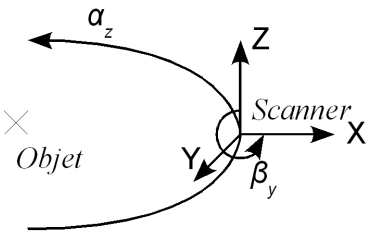
Système de positionnement	
Transfert des translations (X, Y, Z)	
Système de positionnement simulé	

TABLE 4.6 – Transfert des contraintes de positionnement

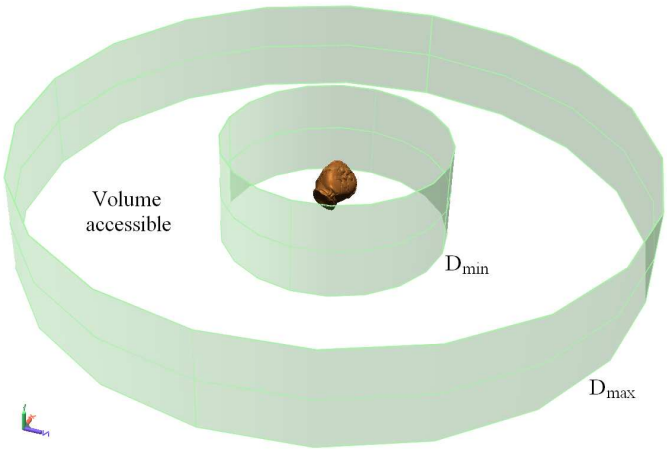


Figure 4.46 – Contraintes de positionnement (D_{min} : distance de travail minimale ; D_{max} : distance de travail maximale)

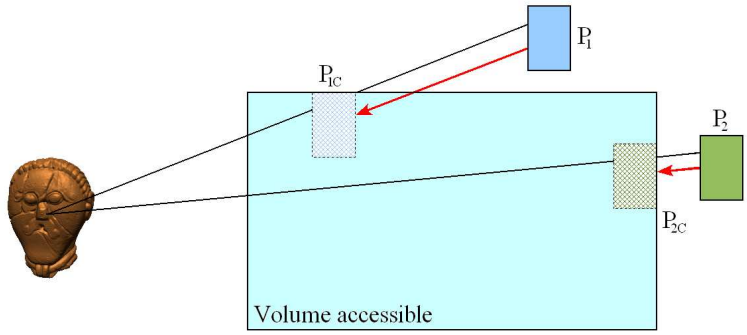


Figure 4.47 – Points de vue inaccessibles (volume de positionnement vue en coupe) et correction de la position (P_i : position demandée ; P_{iC} : position corrigée)

B. Recalage des vues

Le recalage des différentes vues "acquises" par le scanner virtuel est inutile : les points acquis appartiennent obligatoirement à la surface de l'objet de référence (de par leur mode de création) et sont donc directement dans le même repère (repère objet).

Dans le cas de l'utilisation d'un système réel, chaque vue est acquise dans le référentiel scanner. Toutes ces vues doivent donc être recalées entre elles. La procédure définie pour cela est la suivante :
- la première vue acquise définit le référentiel objet,
- chaque nouvelle vue acquise par la suite est dans un premier temps recalée grossièrement, grâce aux informations de positionnement du système,
- un recalage fin (ICP [Salvi et al., 2007]) est ensuite appliqué en utilisant les algorithmes fournis par RapidForm.

C. Résultats sur prototype

Afin de valider ce prototype, plusieurs essais ont été réalisés sur différents objets. Le tableau 4.7 montrent différentes étapes de la numérisation automatique de la "pierre savon" grâce à la deuxième méthode (sans connaissance a priori sur la forme). Nous avons choisi cet objet car sa forme présente de nombreuses contre-dépouilles dont les zones de visibilité sont réduites.

Six acquisitions ont été nécessaires pour la première phase. Le modèle ainsi obtenu présente deux trous, un sur la partie supérieure de l'objet, un sur le dessous de l'objet (zone d'appui). La position du support de l'objet est connu par le système, ce qui permet d'ignorer automatiquement le trou correspondant à la zone d'appui de l'objet. Ainsi,

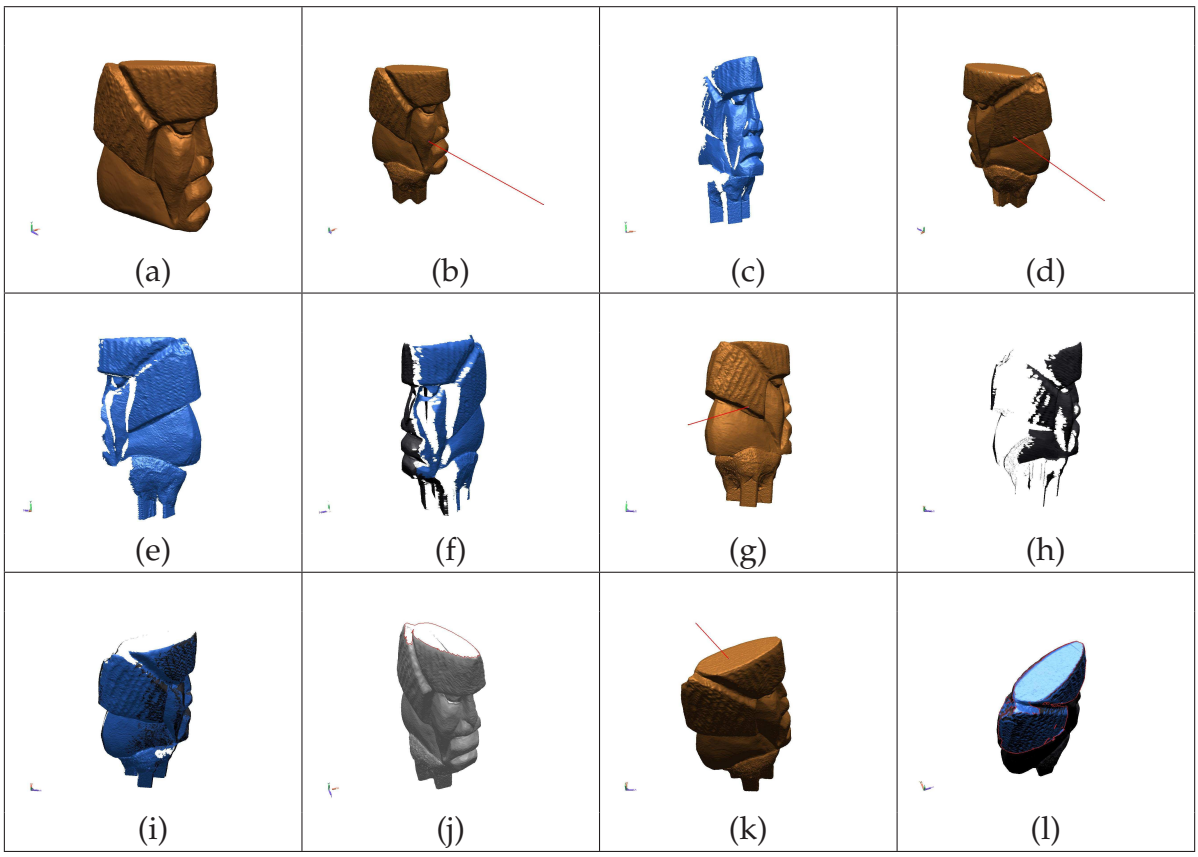


TABLE 4.7 – Numérisation de la pierre savon : (a) pierre savon ; (b) première direction et (c) première acquisition ; (d) deuxième direction et (e) deuxième acquisition ; (f) recalage et fusion des vues ; (g) troisième direction et (h) troisième acquisition ; (i) recalage et fusion des vues ; (j) résultat à la fin de la première phase ; (k) normale du trou et (l) acquisition

seul le trou sur la partie supérieure de l'objet est traîté dans la seconde phase, et ne nécessite qu'une seule acquisition.

4.3.6 Système de numérisation 3D

Ce premier prototype n'est cependant pas adapté à la numérisation 3D automatique. En effet, le système doit pouvoir numériser des objets de dimensions allant jusqu'au mètre cube. Or, l'espace de positionnement du prototype est un cylindre de 40 centimètres de hauteur (axe Z), ce qui limite les dimensions des objets à environ 10cm × 10cm × 10cm. Cette faible course de translation en Z limite également l'utilisation de l'angle de rotation β.

Afin d'améliorer le prototype, la longueur de l'axe de translation en Z doit être augmentée. Cependant, dans le cas de la numérisation d'objets lourds ou fragiles, il est préférable que l'objet effectue le moins de déplacement possible et que le scanner soit mobile. Le prototype doit donc être modifié afin de créer un système de type "portique" (figure 4.48).

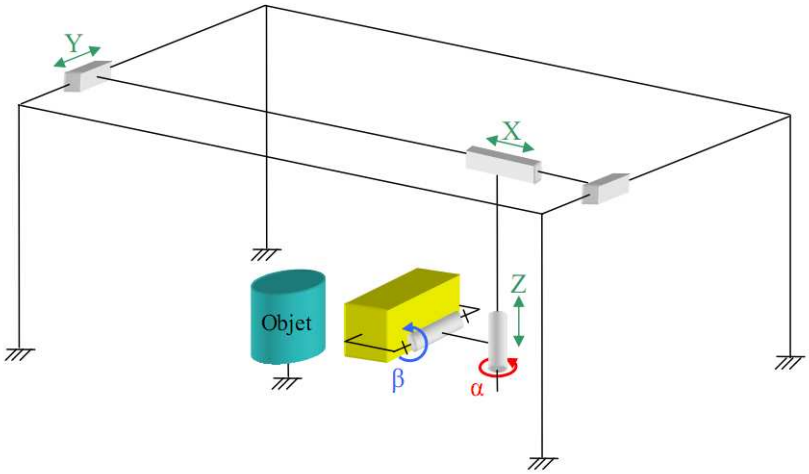


Figure 4.48 – Schéma cinématique d'une architecture de type "portique" [Veaux, 2007]

Or, la mise en place d'un tel système de positionnement est très complexe et onéreuse. En effet, pour la numérisation d'objet d'un mètre cube, il faudrait un portique d'environ 4m × 4m × 3m (X,Y,Z). Parmi les systèmes de positionnement existants (section 2.6), les bras robotisés offrent une solution équivalente et fonctionnelle. En effet, couplés à une table rotative (un ou deux axes), ces systèmes permettent de positionner un scanner à acquisition par vue tout autour de l'objet (à l'exception de la zone support).

Ainsi, afin de pouvoir mettre en place une solution complète d'automatisation de la numérisation 3D, l'achat d'un système sur bras robot a été planifié. Pour étudier les solutions existantes et pouvoir établir un cahier des charges cohérent, nous avons rencontré sur sites plusieurs sociétés qui commercialisent de tels systèmes, ou qui en sont équipées. Suite à un appel d'offre, le système CometV (Steinbichler) sur bras robotisé KR16 (Kuka) a été retenu.

A. Scanner à projection de franges sur bras robotisé

Le scanner CometV (figure 4.49) est un scanner à projection de franges lumineuses (section 2.3.3). Plusieurs configurations sont possibles permettant d'ajuster le volume de travail aux dimensions de l'objet. Une vue est composée de 1,4 millions de points

(au maximum) et est acquise en 3,5 secondes. Le nuage de points acquis est automatiquement triangulé par le scanner. La résolution et le champ de vue dépendent de la distance de travail.



Figure 4.49 – Scanner CometV sur bras robotisé

L'enveloppe de travail du bras robotisé KR16 est présentée à la figure 4.50. Sa portée maximale est de 1610mm pour une répétabilité de 0,1mm. Ce robot sera couplé à une table de rotation à un axe vertical.

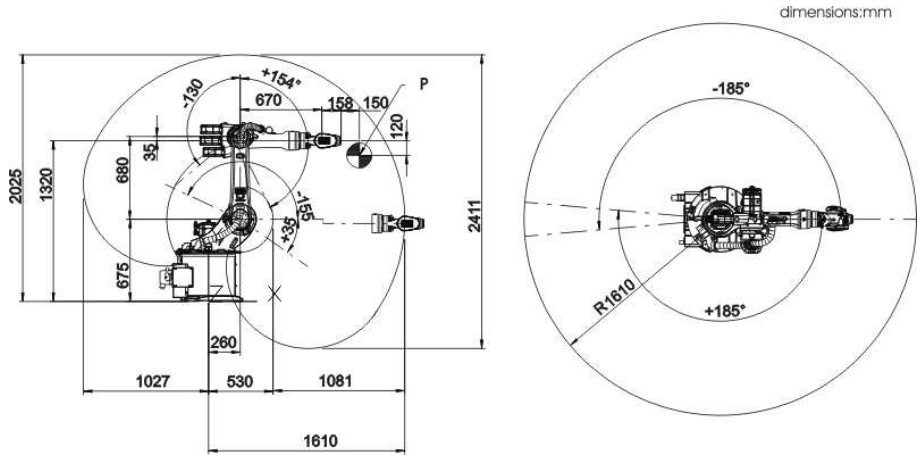


Figure 4.50 – Enveloppe du robot KR16 de Kuka

B. Simulation de positionnement

Afin de connaître les points de vue accessibles, nous avons modélisé le bras robotisé. Pour cela, la cinématique avant (ou directe) a été définie, en utilisant l'algorithme Denavit-Hartenberg (DH) [Denavit and Hartenberg, 1955]. Les paramètres DH obtenus sont donnés au tableau 4.8 [Abelbeck, 2008].

Jointure	α	a	θ	d
1	$-\frac{\pi}{2}$	260	0	675
2	0	680	$-\frac{\pi}{2}$	0
3	$\frac{\pi}{2}$	0	0	0
4	$-\frac{\pi}{2}$	0	0	-670
5	$\frac{\pi}{2}$	0	0	0
6	π	0	0	-158

TABLE 4.8 – Paramètres Denavit-Hartenberg pour le KR16

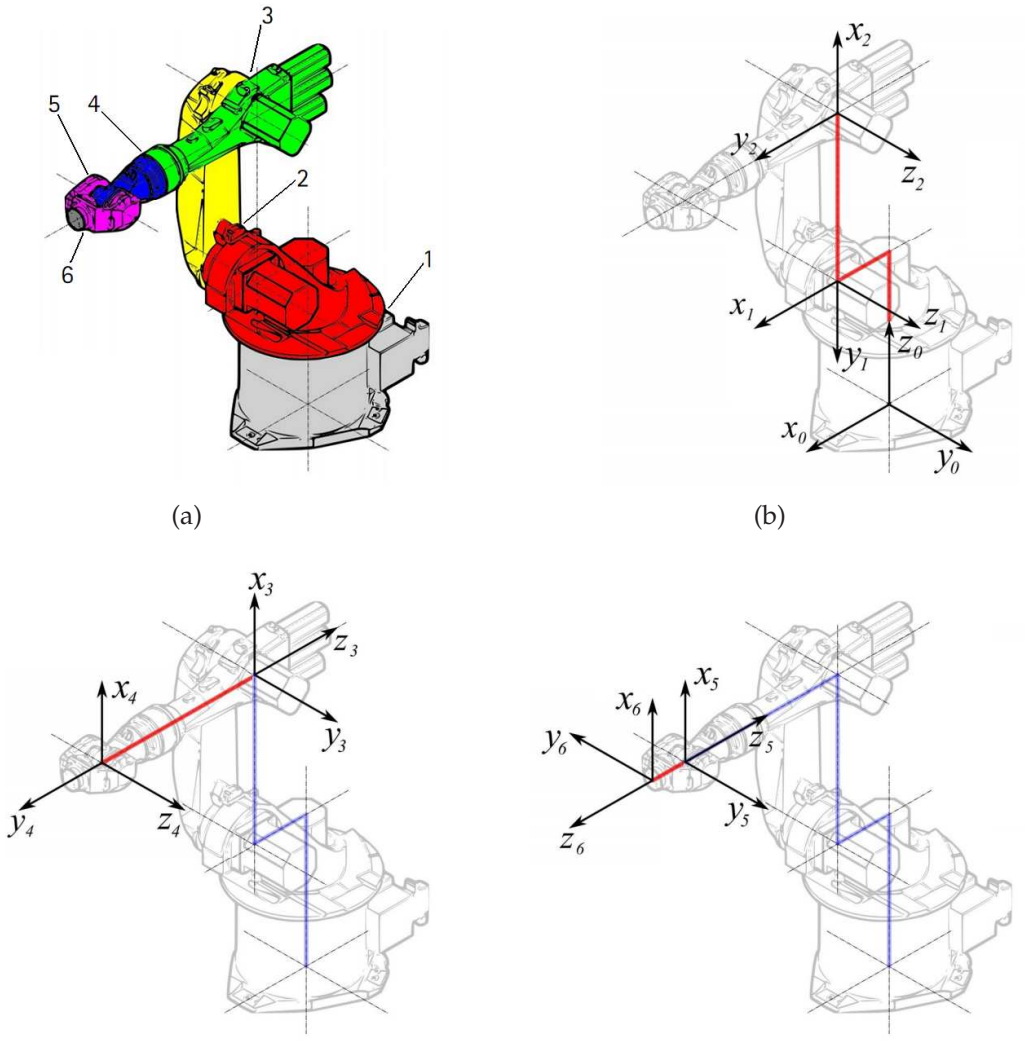
Chaque jointure possède sont propre repère (X, Y, Z). Les paramètres DH définissent les transformations nécessaires au passage d'un repère à l'autre (figure 4.51) :
– α représente l'angle de rotation en X
– a représente la distance X
– θ représente l'angle de rotation en Z
– d représente la distance en Z
Ces paramètres sont utilisés par la suite dans la "Robotics Toolbox" [Corke, 1996] (Matlab) pour résoudre les problèmes de cinématique inverse : en fonction d'une position à atteindre, quelles positions et orientations doit prendre chaque jointure ? Si aucune solution n'existe, le point de vue est considéré comme inaccessible.

C. Recalage automatique des vues

Le scanner CometV permet un recalage automatique des différentes vues acquises. Pour cela, des mires réfléchissantes doivent être positionnées dans l'environnement de l'objet à numériser (figure 4.52), puis le programme réalise automatiquement la mise en correspondance à chaque nouvelle acquisition (par mise en correspondance des mires de chaque vue).

4.3.7 Synthèse

L'environnement de simulation présenté dans cette section permet de simuler le fonctionnement de différents capteurs à acquisition par vue, grâce aux paramètres de configuration (résolution, distance caméra-source lumineuse . . .). Il prend en considération :
– l'angle d'acquisition, afin d'éviter les acquisitions "rasantes",
– les phénomènes d'auto-occlusions,
– les post-traitements nécessaires, afin de trianguler le nuage de points et de supprimer toutes les données aberrantes (bruit de mesure, triangulation incorrecte . . .).



(a) (b)

(c) (d)

Figure 4.51 – Changements de repères : (a) numéro des jointures ; (b-d) les six changements de repères

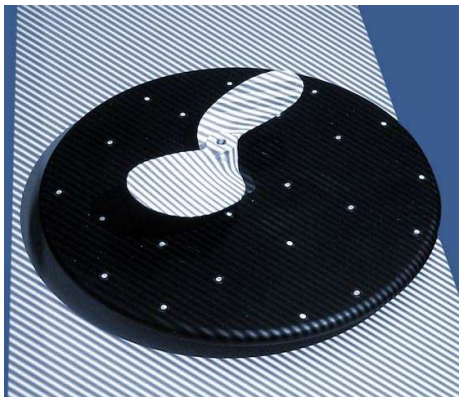


Figure 4.52 – Mires réfléchissantes pour le recalage automatique des vues

Cet environnement permet de tester les deux types de méthodes d'automatisation de la numérisation 3D :

– les méthodes basées sur un modèle : le modèle chargé est utilisé comme modèle de référence et le scanner virtuel est utilisé pour les tests de visibilité. La matrice de visibilité est créée à partir des résultats de ces tests et permet ainsi de déterminer une planification de vues.
– les méthodes non basées sur un modèle : afin de simuler les acquisitions, le modèle 3D complet est nécessaire (en simulation uniquement) et est considéré comme l'objet réel. Les acquisitions sont effectuées à sa "surface" et les données acquises permettent le calcul de la meilleure vue suivante. Lorsqu'un objet réel est utilisé (numérisation sur prototype), le modèle 3D complet est alors inutile.

Par la suite, le prototype développé a permis d'implémenter les différentes fonctions nécessaires à la mise en place de contraintes de positionnement et de valider les méthodes développées sur un système réel.

Cependant, afin de mettre en pratique les méthodes développées, un système de numérisation 3D adapté est indispensable. Parmi les différents systèmes existants, seuls les systèmes composés d'un scanner à acquisition par vues sur bras robotisé répondent à nos besoins (numérisation d'objets de dimensions inférieures au mètre cube). Suite à un appel d'offre, le scanner CometV de Steinbichler (projection de franges) sur bras robot KR16 (Kuka) a été choisi.

Afin d'implémenter les contraintes de positionnement de ce système et vérifier l'accessibilité des positions calculées par les méthodes, la cinématique avant du brat robotisé a été calculée, et les paramètres DH (Denavit-Hartenberg) ont été définis. Ces paramètres dépendent du nombre de degrés de liberté du bras et de ses dimensions. Ils sont par la suite utilisés pour résoudre les problèmes de cinématique inverse, qui consiste à calculer la position des différentes jointures pour atteindre une position définie. Si une solution est trouvée, la position peut être atteinte, dans le cas contraire, le point de vue est inaccessible.

4.4 Expérimentation et résultats

Nous avons présenté dans ce chapitre deux méthodes d'automatisation de la numérisation 3D. La première méthode utilise un modèle de référence pour générer une

planification de vues hors-ligne. Ce type de méthode s'applique en particulier au milieu industriel, pour vérifier la conformité d'une pièce par rapport à son modèle CAO. La seconde méthode permet de numériser un objet sans connaissance a priori sur sa forme, lorsqu'aucun modèle de référence n'est disponible, comme c'est le cas pour les objets naturels et patrimoniaux. Elle calcule les positions nécessaires à partir des acquisitions précédentes. Ces méthodes ont été testées sur plusieurs objets, illustrés à la figure 4.9.

4.4.1 Comparaison à la numérisation manuelle

L'objectif de ces méthodes est de diminuer le temps d'intervention de l'opérateur, afin de réduire les coûts d'intervention et d'accélérer les procédures de numérisation 3D. Le tableau 4.10 compare la numérisation manuelle (avec le scanner Vi910) et automatique en fonction :

– du nombre de vues nécessaires à l'acquisition complète,
– du temps de numérisation, comprenant les temps de planification, de positionnement, d'acquisition et de post-traitements,
– le taux de couverture du modèle 3D.

Les numérisations manuelles ont toutes été réalisées séparément par deux opérateurs. Les tests des méthodes ont été réalisés sur un ordinateur fonctionnant sous Windows XP et équipé d'un processeur double cœur à 2.13Ghz, avec 2Go de mémoire vive. Les programmes sont implémentés en Visual Basic sous RapidForm2004.

Le nombre de vues minimum est toujours obtenu par la méthode basée sur un modèle (méthode MB), excepté dans le dernier cas (mug), qui sera décrit séparément. En effet, la méthode MB utilise un outil de résolution de Set Covering Problem, permettant d'obtenir un ensemble minimal de positions. La méthode non basée sur un modèle (méthode NMB) créée dans un premier temps un modèle incomplet, puis des prises de vues supplémentaires permettent de compléter les trous restants. Plus la forme de l'objet sera complexe (cavités, effet de drapé ...), comme les statues de Saint Jean ou de la Vierge, plus le nombre d'auto-occlusions sera important, ce qui entraînera un plus grand nombre de prises de vue (lors de la seconde phase). Le nombre de vues effectuées lors de la numérisation manuelle est légèrement supérieur au nombre de vues nécessaires pour la méthode MB. L'opérateur créée donc plus de redondance lors de l'acquisition des données (afin d'obtenir des surfaces de recouvrement pour le recalage des vues).

 **Mug** Points : 71994 Facettes : 149988 Dimensions : 120 × 100 × 94mm	 **Trophée** Points : 169952 Facettes : 399900 Dimensions : 248 × 215 × 88mm	 **Robinet** Points : 81450 Facettes : 162916 Dimensions : 275 × 144 × 130mm	 **Grenouille** Points : 64002 Facettes : 128000 Dimensions : 234 × 172 × 270mm
 **Mzeke** Points : 93169 Facettes : 186334 Dimensions : 228 × 270 × 221mm	 **Humérus** Points : 138966 Facettes : 277928 Dimensions : 288 × 51 × 43mm	 **Saint Jean** Points : 374995 Facettes : 749994 Dimensions : 139 × 300 × 87mm	 **Ammonite** Points : 74997 Facettes : 149994 Dimensions : 270 × 228 × 69mm
 **Statue** Points : 149993 Facettes : 299986 Dimensions : 338 × 129 × 109mm	 **Beetle** Points : 149997 Facettes : 299990 Dimensions : 274 × 117 × 90mm	 **Pierre savon** Points : 169600 Facettes : 339178 Dimensions : 144 × 275 × 213mm	 **Buste** Points : 55233 Facettes : 110462 Dimensions : 270 × 176 × 152mm
 **Vierge** Points : 34995 Facettes : 69987 Dimensions : 300 × 122 × 96mm	 **Niepce** Points : 31884 Facettes : 63764 Dimensions : 273 × 209 × 142mm	 **Jante** Points : 57943 Facettes : 115930 Dimensions : 285 × 285 × 136mm	 **Shrek** Points : 102969 Facettes : 205934 Dimensions : 227 × 235 × 294mm

TABLE 4.9 – Objets d'études

	Nombre de vues (Man. / MB. / NMB.)	Temps de numérisation en min (Man. / MB. / NMB.)	Couverture en % (Man. / MB. / NMB.)
Mug	9 / 10 / 14	300 / 19 / 28	71 / 72 / 68
Trophée	10 / 9 / 21	390 / 16 / 42	99 / 95 / 98
Robinet	18 / 16 / 27	390 / 25 / 54	99 / 94 / 99
Grenouille	9 / 9 / 9	300 / 16 / 18	99 / 99 / 99
Mzeke	8 / 8 / 9	240 / 14 / 18	99 / 98 / 99
Humérus	7 / 7 / 7	200 / 12 / 14	99 / 95 / 97
Saint Jean	28 / 24 / 35	720 / 42 / 70	95 / 91 / 93
Ammonite	7 / 7 / 7	200 / 12 / 14	99 / 97 / 99
Statue	11 / 10 / 20	480 / 17.5 / 40	98 / 95 / 98
Beetle	12 / 9 / 18	300 / 16 / 36	99 / 97 / 99
Pierre savon	8 / 8 / 8	270 / 14 / 16	99 / 98 / 99
Buste	11 / 10 / 18	420 / 17.5 / 36	99 / 98 / 99
Vierge	30 / 26 / 45	720 / 45.5 / 90	97 / 92 / 97
Niepce	15 / 13 / 18	480 / 23 / 36	99 / 95 / 99
Jante	20 / 19 / 25	480 / 33 / 50	99 / 93 / 95
Shrek	10 / 10 / 12	420 / 17.5 / 24	99 / 99 / 99

TABLE 4.10 – Comparaison des méthodes de numérisation (Man. : manuelle ; MB. : méthode basée sur le modèle ; NMB. : méthode non basée sur le modèle)

Mais les écarts les plus importants concernent le temps nécessaire à la numérisation complète (acquisition et post-traitements). Les temps d'acquisition sont les mêmes quelle que soit la méthode utilisée (environ cinq secondes) et le temp de déplacement entre chaque position a été estimé à 10s pour les méthodes automatiques. Les post-traitements effectués par les méthodes sont quant à eux plus rapides que ceux effectués manuellement, tous les paramètres étant calculés automatiquement. En effet, l'opérateur doit estimer certains paramètres du maillage (longueur moyenne des arêtes en vue de la triangulation par exemple) et parfois appliquer les mêmes post-traitements plusieurs fois avec des paramètres différents afin d'obtenir le meilleur résultat. De plus, le recalage des vues est entièrement manuel avec le scanner Vi910 : l'opérateur choisit une première vue qui permet d'établir le référentiel objet, puis toutes les nouvelles vues sont recalées à celle-ci. L'opération s'effectue en deux temps (section 3.5.4) : un premier recalage des vues par points de correspondance (les vues sont recalées deux à deux), puis un recalage fin (toutes les vues en même temps).

Le positionnement du scanner est également une étape coûteuse en temps : les méthodes déterminent des positions bien définies, où doit venir se placer le scanner. Lorsqu'un opérateur effectue une prise de vue, le résultat de l'acquisition n'est pas toujours celui

attendu. L'opérateur doit donc déplacer de nouveau le scanner pour adapter la position. Toutes ces interventions de l'utilisateur augmentent considérablement le temps de numérisation d'un objet.

Le taux de couverture de l'objet est toujours supérieur à 93% pour la numérisation manuelle et pour la méthode NMB. Cette dernière est une méthode itérative, la position suivante étant déterminée à partir des données précédemment acquises. Les données manquantes correspondent aux trous classés "inaccessibles" (section 4.2.2.2), considérés comme inaccessibles pour le scanner. Le positionnement manuel qu'effectue l'opérateur devient alors un avantage : la position peut être ajustée précisement. Ainsi, le taux de couverture de la numérisation manuelle est légèrement supérieur aux autres. La méthode MB souffre de l'obligation de réduire le modèle 3D de référence pour le temps de calcul. Cette réduction entraîne la perte de certains détails de la forme de l'objet, qui ne sont donc pas pris en compte dans les calculs de visibilité. De petites zones d'occlusions sont ainsi créées, réduisant de quelques pourcents le taux de complétude (qui reste malgré tout supérieur à 90%).

Le cas du mug est particulier. Son faible taux de reconstruction est dû à sa forme. En effet, en raison de l'angle d'acquisition limité par la forme de l'objet, les parois intérieures ne peuvent être acquises avec un angle suffisant. Dans le cas de la méthode MB, ces facettes sont considérées comme impossible à acquérir et ne sont donc pas traitées dans la matrice de mesurabilité. Pour la méthode NMB, ces facettes ne sont pas acquises, et le trou formé est donc considéré comme "inaccessible" lors de la seconde phase.

4.4.2 Position intiale

Dans le cas des méthodes basées sur un modèle, le choix de la première position d'acquisition n'a pas d'influence sur le choix des autres positions : la solution fournie par ces méthodes est un ensemble de points de vues non ordonnés. L'ordre de parcours des points de vue ne doit être choisi que pour optimiser le déplacement du système de positionnement.

Dans le cas des méthodes sans connaissance a priori sur l'objet, les calculs de "next-best-view" sont effectués à partir des données précédemment acquises. Le choix de la première vue conditionne donc le calcul des positions suivantes. Le tableau 4.11 montre les tests réalisés afin d'évaluer l'influence de la position initiale sur le reste

de la procédure. Ces tests montrent que le nombre de vues nécessaires varie pour la

Mzeke				
Nombre de vues phase 1	5	5	6	5
Nombre de vues phase 2	3	8	4	6
Résolution moyenne	1.24	1.27	1.18	1.25
Statue				
Nombre de vues phase 1	6	5	7	6
Nombre de vues phase 2	4	10	7	13
Résolution moyenne	1.30	1.32	1.33	1.29

TABLE 4.11 – Influence de la première position

seconde phase uniquement. En effet, la première phase permet d'obtenir un modèle incomplet de l'objet. Quelle que soit la position initiale choisie, le volume de l'objet reste le même, et donc le nombre de vues nécessaires à l'obtention d'un modèle grossier ne peut varier de plus de deux ou trois vues. Cependant, l'angle d'acquisition de ces vues va provoquer plus ou moins d'auto-occlusions, qui vont déterminer le nombre de vues de la seconde phase.

Afin de réduire le nombre de vues lors de la seconde phase, l'opérateur doit choisir la position initiale afin que la partie ayant le plus de zones d'occlusions potentielles soit visible (partie présentant un grand nombre de cavités, de contre-dépouilles . . .).

4.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes méthodes existantes d'automatisation de la numérisation. Ces méthodes se concentrent sur le calcul des positions

nécessaires mais ne prennent pas en considération les post-traitements à appliquer aux données acquises, afin d'obtenir un modèle 3D exploitable.

Deux méthodes sont donc proposées, la première basée sur un modèle de l'objet et la seconde sans connaissance a priori sur l'objet. La méthode basée sur un modèle reprend les travaux de Scott [Scott, 2005]. Le modèle de référence est décimé afin de calculer une matrice de mesurabilité, permettant de caractériser la visibilité de chaque facette. Les positions optimales sont déterminées en résolvant le problème de SCP ("Set Covering Problem") associé. Cette méthode fournit donc un ensemble de position, correspondant aux positions minimales pour la numérisation complète du modèle. Le seconde méthode est une méthode itérative en deux phases. La première génère un modèle incomplet à partir du calcul des MVC ("Mass Vector Chain"), développé par Yuan [Yuan, 1995]. La seconde phase définit les positions nécessaires pour compléter les données manquantes en calculant les caractéristiques des trous restants.

Afin de tester ces deux méthodes, un environnement de simulation a été développé. Cette application permet de simuler le fonctionnement de différents systèmes à acquisition par vues. Les "prises de vue" sont réalisées par des calculs d'intersections entre le modèle 3D de l'objet (modèle de référence) et un ensemble de lancers de rayon. Dans le même temps, un prototype a été mis en place afin de valider les différentes fonctions. Ce prototype a permis d'éprouver les méthodes mais n'a pas été conçu pour réaliser une numérisation automatique.

Suite aux résultats obtenus en simulation et sur ce premier prototype, l'achat d'un bras robotisé muni d'un scanner à projection de franges lumineuses a été planifié. L'implémentation des méthodes a donc été préparée. Pour cela, le bras robotisé a été modélisé et les paramètres de Denavit-Hartenberg permettant de résoudre les problèmes de cinématiques inverses ont été calculés.

Les résultats obtenus par les méthodes développées sont illustrés et comparés à une numérisation manuelle dans la dernière partie de ce chapitre. Ces méthodes permettent d'obtenir un taux de recouvrement supérieur à 90% avec tous les objets testés (excepté pour le mug, dont l'intérieur n'est pas accessible). De plus, le temps d'acquisition est fortement réduit par rapport à une numérisation manuelle (les ajustements de position et les post-traitements sont évités).

Chapitre 5

Conclusion générale et perspectives

La numérisation 3D regroupe des technologies encore très jeunes. Elle s'appuie sur des systèmes aux technologies très variées (stéréovision, triangulation laser, temps-de-vol, shape from X, ...) qui permettent d'acquérir en trois dimensions les caractéristiques d'objets de formes et de dimensions variées. Les données numérisées sont ensuite traitées (triangulation, filtrage, recalage, ...) afin d'obtenir un modèle 3D exploitable. Ces différentes étapes sont coûteuses en temps et nécessitent un opérateur expérimenté. Les modèles 3D ainsi générés sont utilisés dans différents domaines (industrie, archéologie, design, ...) et pour diverses applications (analyse, visualisation et duplication). Les travaux présentés dans ce mémoire portent sur la définition et la mise en place de méthodologies pour la numérisation automatique d'objets de formes variées, avec et sans connaissance a priori sur la forme de l'objet.

Dans un premier temps, un état de l'art des différents systèmes d'acquisitions nous a permis de mettre en évidence les spécificités des systèmes d'acquisition et de positionnement existant. Ces différents systèmes n'ayant pas les mêmes caractéristiques, leur utilisation doit être adaptée à l'objet à numériser.

Nous avons ensuite détaillé la méthodologie à appliquer afin de numériser un objet. Celle-ci reprend les différentes étapes que doit suivre l'opérateur au cours de la numérisation 3D : la préparation à la numérisation, l'acquisition des données et les post-traitements. Les protocoles d'acquisition décrits mettent en évidence les avantages et inconvénients de chaque système. Les effets voulus ou non des différents post-traitements sont détaillés. Cette méthodologie a par la suite été intégrée dans un outil d'aide à la numérisation 3D. Cette application interactive permet de guider un

utilisateur durant toute la procédure. Plusieurs études de cas montrant l'application de la méthodologie sont également détaillées.

La dernière partie de ce mémoire expose les méthodes existantes en automatisation de la numérisation 3D . Ces méthodes permettent de mettre en place une planification de vues nécessaires à l'acquisition d'un objet ("view planning") ou de calculer la meilleure vue suivante ("Next-Best-View"). Deux méthodes ont ensuite été développées. La première, basée sur un modèle maillé, utilise la matrice de mesurabilité introduite par Tarbox *et al.* et reprise par Scott [Scott, 2005]. La seconde méthode n'utilise aucune information a priori sur l'objet et calcule les positions nécessaires en deux étapes : un modèle incomplet est d'abord créé à partir de la méthode de Yuan [Yuan, 1995], puis les informations données par les trous restants sont analysées. Pour cela, des caractéristiques de ces trous sont extraites (position, normale, taille et rayon).

Ces méthodes permettent de réaliser sans intervention de l'opérateur :
– le calcul des différentes positions nécessaires,
– les acquisitions, en tenant compte des phénomènes d'auto-occlusion et de l'angle d'acquisition,
– les post-traitements (segmentation et nettoyages des données).
Afin de tester ces méthodes, un environnement de simulation a été développé. Cette application permet de reproduire le fonctionnement de divers scanners à acquisition par vues, grâce à différents paramètres (résolutions, angles de vue, distance caméra-source lumineuse, distance de travail). Par la suite, un premier système de numérisation a été mis en place. Composé d'un scanner à triangulation laser ligne à balayage (Vi910) fixé sur un bâti cinq axes, ce système à permis de valider les méthodes développées. Dans le même temps, un cahier des charges pour l'achat d'un scanner à projection de franges lumineuses sur bras robotisé a été défini. Suite à un appel d'offre, un système composé d'un scanner CometV sur un bras robotisé KR16 sera installé et fonctionnel au premier semestre 2009. Les algorithmes nécessaires à l'implémentation des méthodes sur un tel système ont donc été développés.

Les résultats illustrés dans le dernier chapitre montrent que les méthodes mises en place permettent une acquisition rapide de plus de 90% de l'objet (supérieur à 95% dans la majorité des cas étudiés). Pour autant, des améliorations sont envisageables afin d'augmenter les performances du système. Tout d'abord, la contrainte de champ de vue restreint les dimensions de l'objet numérisable : seuls les objets contenus dans le champ de vue peuvent être traîtés automatiquement. En résolvant ce problème,

les dimensions maximales seraient limitées uniquement par le système de positionnement. La résolution d'acquisition pourrait également être augmentée en diminuant la distance scanner-objet. De même, la texture n'est actuellement pas prise en considération. Il serait intéressant d'inclure des systèmes photographiques afin que le modèle 3D final soit automatiquement texturé. Cette amélioration nécessite la mise en place d'un éclairage spécifique, soit positionné autour du système de numérisation (avec un risque d'ombres) soit fixé sur le bras robotisé. La création de modèles 3D pour les applications de visualisation serait ainsi considérablement accélérée et simplifiée. Pour la méthode basée sur le modèle, une fois la liste des points de vue optimaux calculée, ils doivent être ordonnés afin d'optimiser les déplacements du système de positionnement. Plusieurs algorithmes ont été développés afin de résoudre ce problème [Lynch, 1996][Chettibi et al., 2004][LaValle, 2006] et doivent donc être implémentés. La gestion du $6^{ème}$ degré de liberté du bras robotisé n'a pas été étudiée (rotation du membre manipulateur). Celui-ci permet de tourner le scanner afin de modifier l'inclinaison de l'axe caméra-source lumineuse. Or, dans le cas d'occlusions dues à des cavités, cet axe doit être orienté suivant la même direction que cette cavité, afin d'améliorer l'accessibilité de ces zones. Ce calcul d'orientation implique la mise en place de procédures de reconnaissance de formes. Enfin, il peut être intéressant pour certaines applications de mettre en place un système multi-capteurs : certaines parties de l'objet peuvent alors être numérisées avec un second capteur de meilleure résolution ("Depth from focus" par exemple), afin d'acquérir des détails plus fins.

Ces travaux ont donné lieu à une publication dans une revue internationale [Loriot et al., 2008], à quatre communications dans des conférences internationales et nationales [Loriot et al., 2007a][Loriot et al., 2007b][Loriot et al., 2007c][Malik et al., 2009] et à une communication lors d'une journée thématique organisée par le GDR-ISIS [1] [Loriot et al., 2006].

[Loriot et al., 2006] Loriot, B., Seulin, R., Gorria, P., and Jobard, P. (2006). Application du 3d au patrimoine ecrit. In *Journée Signal Image et Arts, GDR Isis*, Paris, France.

[Loriot et al., 2007a] Loriot, B., Fougerolle, Y., Sestier, C., and Seulin, R. (2007a). 3D Acquisition and Modeling for Flint Artefacts Analysis. In Fotakis, C., Pezzati, L., and Salimbeni, R., editors, *O3A : Optics for Arts, Architecture, and Archaeology*, volume 6618(1), page 66180G. SPIE.

[Loriot et al., 2007b] Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2007b). Toward an Automation of 3D Acquisition and Post-Processing of Cultural Heritage Artefacts. In Meriaudeau, F.

1. Groupement De Recherche : Information, Signal, Images et viSion

and Niel, K., editors, *SPIE, Electronics Imaging Machine Vision Application*, volume 6503, page 65030B.

[Loriot et al., 2007c] Loriot, B., Seulin, R., Gorria, P., and Meriaudeau, F. (2007c). Simulation for an Automation of 3D Acquisition and Post-Processing. In Fofi, D. and Meriaudeau, F., editors, *8th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV'2007)*, volume 6356, page 635604. SPIE.

[Loriot et al., 2008] Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2008). Non-Model Based Method for an Automation of 3D Acquisition and Post-Processing. *Electronics Letters on Computer Vision and Analysis*, volume 7(3), pages 67-82.

[Malik et al., 2009] Malik, A., Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2009). A Simulation of Automatic 3D Acquisition and Post-Processing Pipeline. In SPIE, Electronics Imaging Machine Vision Application.

Bibliographie

[Abelbeck, 2008] Abelbeck, F. (2008). Koordinatentransformation nach denavit-hertenberg am beispiel eines kuka kr16. Master's thesis, Universitat Hannover, Leibniz, Germany.

[Arius, 1998] Arius (1998). http ://www.arius3d.com/index.html, Mississauga, Ontario Canada L4Y 4C5.

[Banta et al., 2000] Banta, J. E., Wong, L. R., D., C., and Abidi, M. A. (2000). A next-best-view system for autonomous 3-d object reconstruction. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A*, 30(5) :589–598.

[Beraldin, 2004] Beraldin, J.-A. (2004). Integration of laser scanning and close-range photogrammetry : the last decade and beyond. In *Proceedings of the XXth ISPRS congress, Commission VII*, pages 972–983, Istanbul, Turkey.

[Beraldin et al., 2000] Beraldin, J.-A., Blais, F., Cournoyer, L., Godin, G., and Rioux, M. (2000). Active 3d sensing. In *Modelli E Metodi Per Lo Studio E La Conservazione Dell'Architecttura Storica*, volume 10, pages 22–46, Pisa, Italie.

[Besl, 1988] Besl, P. J. (1988). Active, optical range imaging sensors. *MVA*, 1(2) :127–152.

[Bibracte, 2006] Bibracte (2006). Rapport annuel d'activité. Technical report, Centre de Recherche de Bibracte.

[Boehler et al., 2003] Boehler, W., Boehm, K., Heinz, G., Justus, A., Schwarz, C., and Siebold, M. (2003). Documentation of stone age artifacts. In *The ISPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, volume 34(5), pages 506–510.

[Boehler et al., 2002] Boehler, W., Heinz, G., Marbs, A., and Siebold, M. (2002). 3d scanning software : An introduction. In *Proc. of the CIPA WG6 Int. Workshop on scanning for cultural heritage recording*, pages 42–47.

[Boehler and Marbs, 2004] Boehler, W. and Marbs, A. (2004). 3d scanning and photogrammetry for heritage recording : A comparison. In *Geoinformatics, Proc. 12th*

Int. Conf. on Geoinformatics - Geospatial Information Research : Bridging the Pacific and Atlantic, University og Gävle, Sweden.

[Boissonnat and Geiger, 1993] Boissonnat, J.-D. and Geiger, B. (1993). Three-dimensional reconstruction of complex shapes based on the delaunay triangulation. In Acharya, R. S. and Goldgof, D. B., editors, *Biomedical Image Processing and Biomedical Visualization*, volume 1905 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, pages 964–975.

[Bokhabrine et al., 2009] Bokhabrine, Y., Lew Yan Voon, L., Seulin, R., Gorria, P., and Gomez, M. (2009). 3d reconstruction of hot metallic surfaces for industrial part characterization. In *Image Processing : Machine Vision Applications*, page EI116, San José, California, USA.

[Callieri et al., 2002] Callieri, M., Cignoni, P., and Scopigno, R. (2002). Reconstructing textured meshes from multiple range rgb maps. In *7th Int. Fall Workshop on Vision, Modeling, and Visualization (VMV)*, pages 419–426, Erlangen(D). IOS Press.

[Caprara et al., 2000] Caprara, A., Toth, P., and Fischetti, M. (2000). Algorithms for the set covering problem. *Annals of Operations Research*, 98(1-4) :353–371(19).

[Cayre, 2003] Cayre, F. (2003). *Contributions au Tatouage de Maillages Surfaciques 3D*. PhD thesis, TELECOM Paris, Université catholique de Louvain.

[Chambon, 2005] Chambon, S. (2005). *Mise en Correspondance Stéréoscopique d'Images Couleur en Présence d'Occultations*. PhD thesis, Université de Toulouse III.

[Chettibi et al., 2004] Chettibi, T., Lehtihet, H. E., Haddad, M., and Hanchi, S. (2004). Minimum cost trajectory planning for industrial robots. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 23(4) :703–715.

[Connolly, 1985] Connolly, C. I. (1985). The determination of next best views. In *Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 432–435, St. Louis, Mo., USA. IEEE Computer Society.

[Corke, 1996] Corke, P. I. (1996). A robotics toolbox for matlab. *Robotics and Automation Magazine*, 3(1) :24–32.

[Cowan and Kovesi, 1988] Cowan, C. K. and Kovesi, P. (1988). Automatic sensor placement from vision task requirements. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 10(3) :407–416.

[Cuilliere, 1998] Cuilliere, J. C. (1998). An adaptive method for the automatic triangulation of 3d parametric surfaces. *Computer-aided design*, 30(2) :139–149.

[Curless, 1999] Curless, B. (1999). From range scans to 3d models. *SIGGRAPH Computer Graphics*, 33(4) :38–41.

[Curless, 2000] Curless, B. (2000). Overview of active vision techniques. *SIGGRAPH Course on 3D Photography*.

[D'Apuzzo, 2007] D'Apuzzo, N. (2007). 3d body scanning technology for fashion and apparel industry. In *Proceedings of SPIE IS&T Electronic Imaging*, volume 6491, page 64910O, San José, CA, USA. SPIE.

[Davis et al., 2002] Davis, J., Marschner, S., Garr, M., and Levoy, M. (2002). Filling holes in complex surfaces using volumetric diffusion. *3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT)*, page 428.

[Denavit and Hartenberg, 1955] Denavit, J. and Hartenberg, R. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Trans ASME Journal of Applied Mechanics*, 23 :215–221.

[Derigent et al., 2007] Derigent, W., Rémy, S., Chapotot, E., Bernard, A., and Ris, G. (2007). 3d digitising strategy planning approach based on cad model. *Journal of Computing and Information Science In Engineering*, 7(10) :10–19.

[Faro, 1983] Faro (1983). http ://www.faro.com, Korntal-Münchingen, Germany.

[Feng and Soon, 1998] Feng, L. and Soon, S. (1998). An effective 3d seed fill algorithm. *Computers and Graphics*, 22(5) :641–644.

[Ferraton, 2007] Ferraton, M. (2007). Quality control of transparent objects with polarization imaging. In Fofi, D. and Meriaudeau, F., editors, *Eighth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, volume 6356(1), page 635606. SPIE.

[Forest, 2004] Forest, J. (2004). *New Methods For Triangulation-Based Shape Acquisition Using Laser Scanners*. PhD thesis, Universitat de Girona, Girona, Espagne.

[Fournier et al., 2006] Fournier, M., Dischler, J.-M., and Bechmann, D. (2006). Filtrage adaptatif des données acquises par un scanner 3d et représentées par une transformée en distance volumétrique. In Gonzato, J.-C. and Jessel, J.-P., editors, *Journées AFIG*, Bordeaux.

[Frey et al., 1996] Frey, P., Borouchaki, H., and George, P. (1996). Tétraédrisation de delaunay basée sur une approche frontale. Technical report, INRIA.

[Friess et al., 2002] Friess, M., Marcus, L. F., Reddy, D. P., and Delson, E. (2002). The use of 3d laser scanning techniques for the morphometric analysis of human facial shape variation. In Mafart, B. and Delingette, H., editors, *Three-Dimensional Imaging In Paleoanthropology And Prehistoric Archaeology*, pages 31–35, University of Liège, Belgium.

[Gaspar and Santos-Victor, 1999] Gaspar, J. and Santos-Victor, J. (1999). Visual path following with a catadioptric panoramic camera. In *7th Int. Symp. on Intelligent Robotic Systems (SIRS'99)*, pages 139–147, Coimbra, Portugal.

[Geyer and Daniilidis, 2001] Geyer, C. and Daniilidis, K. (2001). Catadioptric projective geometry. *Int. J. Comput. Vision*, 45(3) :223–243.

[Girod et al., 2000] Girod, B., Greiner, G., and Niemann, H. (2000). *Principles Of 3D Image Analysis And Synthesis*. Kluwer Academic Publisher, Boston - Dordrecht - London.

[Glassner, 1989] Glassner, A. S., editor (1989). *An Introduction to Ray Tracing*. Academic Press Ltd., London, UK, UK.

[Guidi et al., 2003] Guidi, G., Beraldin, J. A., S.Ciofi, Ciofi, A., and Atzeni, C. (2003). 3d acquisition of donatello's maddalena : Protocols, good practices and benchmarking. In *Electronic Imaging and the Visual Arts : EVA*, pages 174–478, Florence, Italy.

[Haala and Brenner, 1997] Haala, N. and Brenner, K. (1997). Generation of 3d city models from airborne laser scanning data. In *EARSEL Workshop on LIDAR remote sensing on land and sea*, Tallinn, Estonia.

[Heinz, 2002] Heinz, G. (2002). Pharaoh pepi i. : Documentation of the oldest known life-size metal sculpture using laser scanning and photogrammetry. In *CIPA Workshop Scanning for cultural heritage recording*, Corfu, Greece.

[Hoffmann, 2002] Hoffmann, G. (2002). Sphere tesselation by icosahedron subdivision. http ://www.fho-emden.de/ hoffmann/.

[Hoppe, 1995] Hoppe, H. (1995). *Surface Reconstruction from Unorganized Points*. PhD thesis, University of Washington.

[Horn, 1984] Horn, B. K. P. (1984). Extended gaussian images. In *IEEE*, volume 72(12).

[Huber and Hebert, 2003] Huber, D. F. and Hebert, M. (2003). Fully automatic registration of multiple 3d data sets. In *Image And Vision Computing*, volume 21(7), pages 637–650(14).

[Häusler and Karbacher, 1997] Häusler, G. and Karbacher, S. (1997). Reconstruction of smoothed polyhedral surfaces from multiple range images. In Girod, B., Niemann, H., and Seidel, H.-P., editors, *3D Image Analysis and Synthesis '97*, pages 191–198, Sankt Augustin, Germany.

[Ioannidis and Tsakiri, 2003] Ioannidis, C. and Tsakiri, M. (2003). Laser scanning and photogrammetry for the documentation of a large statue - experience in the combined use. In *Proceedings of CIPA XIX International Symposium*, pages 517–523, Antalya, Turkey.

[Jun, 2005] Jun, Y. (2005). A piecewise hole filling algorithm in reverse engineering. *Computer-Aided Design*, 37(2) :263–270.

[Kender, 1980] Kender, J. R. (1980). The gaussian sphere : A unifying representation of surface orientation. In *DARPA Image Understanding Workshop*, pages 157–160. Springer-Verlag.

[Konica Minota Sensing, 2003] Konica Minota Sensing (2003). http ://www.konicaminolta.com/instruments/products/3d/index.html, Osaka, Japan.

[Kraevoy et al., 2003] Kraevoy, V., Sheffer, A., and Gotsman, C. (2003). Matchmaker : Constructing constrained texture maps. In *SIGGRAPH '03 : ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pages 326–333, New York, NY, USA. ACM.

[Kuka, 1996] Kuka (1996). http ://www.kuka.com, Augsburg, Germany.

[Lan et al., 2007] Lan, G., DePuy, G., and Whitehouse, G. (2007). An effective and simple heuristic for the set covering problem. *European Journal of Operational Research*, 127(3) :1387–1403.

[Lartigue and Bourdet, 2004] Lartigue, C. and Bourdet, P. (2004). Qualité des données issues de numérisation 3d : Sources d'imprécision et qualification. *10èmes Assises Européennes de Prototypage Rapide*.

[Lathuiliere, 2007] Lathuiliere, A. (2007). *Génération de mires colorées pour la reconstruction 3D couleur par système stéréoscopique de vision active*. PhD thesis, Université de Bourgogne, Le Creusot, France.

[Lauvaux, 2005] Lauvaux, G. (2005). *La Réalisation d'Ouvres d'Art par Prototypage Rapide avec le Procédé Stratoconception*. PhD thesis, Université de Reims, Champagne-Ardenne.

[LaValle, 2006] LaValle, S. M. (2006). *Planning Algorithms*. Cambridge University Press.

[Lavoué, 2005] Lavoué, G. (2005). *Compression de Surfaces, Basée sur la Subdivision Inverse, pour la Transmission Bas Débit et la Visualisation Progressive*. PhD thesis, Université Claude Bernard, Lyon 1.

[Li et al., 2005] Li, Y. F., He, B., and Bao, P. (2005). Automatic view planning with self-termination in 3d object reconstructions. *Sensors and Actuators*, 122 :335–344.

[Loriot, 2005] Loriot, B. (2005). Etude de l'automatisation de la numérisation 3d : Application à l'analyse d'oursins. Master's thesis, Université de Bourgogne.

[Loriot et al., 2007a] Loriot, B., Fougerolle, Y., Sestier, C., and Seulin, R. (2007a). 3d acquisition and modeling for flint artefacts analysis. In Fotakis, C., Pezzati, L., and Salimbeni, R., editors, *O3A : Optics for Arts, Architecture, and Archaeology*, volume 6618(1), page 66180G. SPIE.

[Loriot et al., 2007b] Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2007b). Toward an automation of 3d acquisition and post-processing of cultural heritage artefacts. In Meriaudeau, F. and Niel, K., editors, *SPIE, Electronics Imaging Machine Vision Application*, volume 6503, page 65030B.

[Loriot et al., 2008] Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2008). Non-model based method for an automation of 3d acquisition and post-processing. *Electronics Letters on Computer Vision and Analysis*, 7(3) :67–82.

[Loriot et al., 2006] Loriot, B., Seulin, R., Gorria, P., and Jobard, P. (2006). Application du 3d au patrimoine ecrit. In *Journée Signal Image et Arts, GDR Isis*, Paris, France.

[Loriot et al., 2007c] Loriot, B., Seulin, R., Gorria, P., and Meriaudeau, F. (2007c). Simulation for an automation of 3d acquisition and post-processing. In Fofi, D. and Meriaudeau, F., editors, *8th International Conference on Quality Control by Artificial Vision (QCAV'2007)*, volume 6356, page 635604. SPIE.

[Lynch, 1996] Lynch, K. M. (1996). *Nonprehensile Robotic Manipulation : Controllability and Planning*. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 15213.

[Maas, 2001] Maas, H. (2001). The suitability for airborne laser scanner data for automatic 3d object reconstruction. In *Ascona01*, pages 291–296.

[Mahmud et al., 2007] Mahmud, M., Joannic, D., and Fontaine, J.-F. (2007). 3d digitizing path planning for part inspection with laser scanning. In Fofi, D. and Meriaudeau, F., editors, *Eighth International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, volume 6356(1), page 635603. SPIE.

[Malik et al., 2009] Malik, A., Loriot, B., Seulin, R., and Gorria, P. (2009). A simulation of automatic 3d acquisition and post-processing pipeline. In *SPIE, Electronics Imaging Machine Vision Application*.

[Massios and Fisher, 1998] Massios, N. A. and Fisher, R. B. (1998). A best next view selection algorithm incorporating a quality criterion. In *BMVC*.

[Maver and Bajcsy, 1993] Maver, J. and Bajcsy, R. K. (1993). Occlusions as a guide for planning the next view. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. (PAMI)*, 15(5) :417–433.

[Mehdi-Souzani, 2006] Mehdi-Souzani, C. (2006). *Numérisation 3D intelligente d'objets de formes inconnues basée sur des critères de qualité*. PhD thesis, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Lurpa.

[Metris, 1995] Metris (1995). http ://www.metris.com, Leuven.

[Metris and PSA, 2001] Metris and PSA (2001). Psa quadruples scanning productivity with metris mmd. Technical report, Metris.

[Molinier et al., 2008] Molinier, T., Fofi, D., Salvi, J., and Gorria, P. (2008). 2d virtual texture on 3d real object with coded structured light. In *Image Processing : Machine Vision Applications. Edited by Niel, Kurt S. ; Fofi, David. Proceedings of the SPIE, Volume 6813, pp. 68130Q-68130Q-9 (2008).*, volume 6813 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*.

[Morel, 2005] Morel, O. (2005). *Environnement Actif Pour La Reconstruction Tridimensionnelle De Surfaces Métalliques Spéculaires Par Imagerie Polarimétrique*. PhD thesis, Université de Bourgogne.

[Morel et al., 2005] Morel, O., Stolz, C., Gorria, P., and Seulin, R. (2005). Eclairage sectorisé pour la reconstruction tridimensionnelle par imagerie polarimétrique. 05.11674.

[Mosaddegh, 2008] Mosaddegh, S. (2008). Line matching across catadioptric images. Master's thesis, Université de Bourgogne.

[Owen et al., 2002] Owen, S. J., White, D. R., and Tautges, T. J. (2002). Facet-based surfaces for 3d mesh generation. In *Proceedings of 11th International Meshing Roundtable*.

[Papadopoulos Orfanos, 1997] Papadopoulos Orfanos, D. (1997). *Numérisation géométrique automatique à l'aide d'un capteur 3D de précision à profondeur de champ réduite*. PhD thesis, ENST.

[Piegl and Tiller, 1996] Piegl, L. and Tiller, W. (1996). *The NURBS Book*. Springer.

[Pito, 1999] Pito, R. (1999). A solution to the next best view problem for automated surface acquisition. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 21(10) :1016–1030.

[Pollefeys et al., 2001] Pollefeys, M., Vergauwen, M., Cornelis, K., Verbiest, F., Schouteden, J., Tops, J., and Gool, L. V. (2001). 3d acquisition of archaeological heritage from images. In *CIPA International Symposium*, Potsdam.

[Prieto, 2000] Prieto, F. (2000). *Métrologie Assistée Par Ordinateur : Apport Des Capteurs 3D Sans Contact*. PhD thesis, Université du Québec, Montréal, Québec.

[Projet Caviar et al., 2005] Projet Caviar, Le2i UMR CNRS 5158, CREA EA 3299, ICARE INRIA, LAAS CNRS, and PERCEPTION INRIA (2005). http ://www.anr-caviar.org/.

[RapidForm, 1998] RapidForm (1998). http ://www.rapidform.com, Inus Technology Inc. & Rapidform Inc., Seoul, Korea.

[Reed, 1998] Reed, M. K. (1998). *Solid model acquistion from range imagery*. PhD thesis, Columbia University, New York, NY, USA, New York, NY, USA. Adviser-Peter K. Allen.

[Robinson et al., 2004] Robinson, A., Alboul, L., and Rodrigues, M. (2004). Methods for indexing stripes in uncoded structured light scanning systems. *Journal of Winter School of Computer Graphics*, 12(1-3).

[Rocchini et al., 2000] Rocchini, C., Cignoni, P., Ganovelli, F., Montani, C., Pingi, P., and Scopigno, R. (2000). The marching intersections algorithm for merging range images. Technical report, The Visual Computer.

[Romer, 2007] Romer (2007). http ://www.romer.com, Montoire, France.

[Rutishauser et al., 1994] Rutishauser, M., Stricker, M., and Trobina, M. (1994). Merging range images of arbitrarily shaped objects. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 573–580.

[Salvi et al., 2004] Salvi, J., Pages, J., and Batlle, J. (2004). Pattern codification strategies in structured light systems. *PR*, 37(4) :827–849.

[Salvi et al., 2007] Salvi, J., Pages, J., and Batlle, J. (2007). A review of recent range image registration methods with accuracy evaluation. *Image and Vision Computing*, 25(5) :578–596.

[Sanchez Secades, 2008] Sanchez Secades, L. A. (2008). 3d scanning of non-opaque objects by means of infrared imaging. Master's thesis, Université de Bourgogne.

[Schouteden et al., 2001] Schouteden, J., Pollefeys, M., Vergauwen, M., and Gool, L. V. (2001). Image-based 3d acquisition tool for architectural conservation. In *Proc. of the XVIII. CIPA Int. Symposium, International Archives for Phtogrammetry and Remote Sensing (IAPRS)*, volume 34(5/C7), pages 300–305.

[Scott, 2005] Scott, W. (2005). Model-based view planning. Technical report, National Research Council of Canada.

[Scott et al., 2001a] Scott, W., Roth, G., and Rivest, J. F. (2001a). View planning for multi-stage object reconstruction. In *Vision Interface*, pages 64–71.

[Scott et al., 2001b] Scott, W. R., Roth, G., and Rivest, J.-F. (2001b). View planning with a registration constraint. In *3DIM*, pages 127–134.

[Seulin et al., 2006] Seulin, R., Stolz, C., Fofi, D., Millon, G., and Nicolier, F. (2006). 3d tools for ancient wooden stamps analysis and conservation. *The Imaging Science Journal*, 54(2) :111–121.

[Steinbichler, 1987] Steinbichler (1987). http ://www.steinbichler.com, Neubeuern, Germany.

[Tarabanis et al., 1995] Tarabanis, K. A., Tsai, R. Y., and Allen, P. K. (1995). The mvp sensor planning system for robotic vision tasks. *RA*, 11(1) :72–85.

[Tarbox and Gottschlich, 1995a] Tarbox, G. H. and Gottschlich, S. N. (1995a). Ivis : an integrated volumetric inspection system. *Comput. Vis. Image Underst.*, 61(3) :430–444.

[Tarbox and Gottschlich, 1995b] Tarbox, G. H. and Gottschlich, S. N. (1995b). Planning for complete sensor coverage in inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(1) :84–111.

[Tekumalla and Cohen, 2004] Tekumalla, L. and Cohen, E. (2004). A hole-filling algorithm for triangular meshes. Technical report, School of Computing, University of Utah.

[Tristano et al., 1998] Tristano, J. R., Owen, S. J., and Canann, S. A. (1998). Advancing front surface mesh generation in parametric space using a riemannian surface definition. In *Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable*, pages 429–445.

[Tucci et al., 2001] Tucci, G., Guidi, G., Ostuni, D., Costantino, F., Pieraccini, M., and Beraldin, J.-A. (2001). Photogrammetry and 3d scanning : Assessment of metric accuracy for the digital model of danatello's maddalena. In *Proceedings of the Italy - Canada 2001 Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling Applications of : heritage, industry, medicine & land.*

[Turk and Levoy, 1994] Turk, G. and Levoy, M. (1994). Zippered polygon meshes from range images. In Glassner, A., editor, *SIGGRAPH '94 (ACM), Annual Conference Series*, pages 311–318.

[Tyan, 1997] Tyan, J.-K. (1997). *Analysis And Application Of Autofocusing And Three-Dimensional Shape Recovery Techniques Based On Image Focus And Defocus*. PhD thesis, State University of New York at Stony Brook, New York, NY, USA.

[Vavrille, 2003] Vavrille, J.-L. (2003). 4ème rencontre nationale des mécaniciens du cnrs. http ://www.dr4.cnrs.fr/bfp/rdm_web/formation/pradet/renc_pradet.htm.

[Veaux, 2007] Veaux, L. (2007). Automatisation de la numérisation. Technical report, Société Dynamic3D, Laboratoire Le2i.

[Vosselman, 1999] Vosselman, G. (1999). Building reconstruction using planar faces in very high density height data. In *ISPRS Conference on Automatic Extraction of GIS Objects From Digital Imagery*, volume 32, München. IAPRS.

[Wallace et al., 2001] Wallace, A., Buller, G., and Walker, A. (2001). 3d imaging and ranging by time-correlated single photon counting. *Computing and Control Engineering Journal*, 12(4) :157–168.

[Whaite and Ferrie, 1997] Whaite, P. and Ferrie, F. P. (1997). Autonomous exploration : Driven by uncertainty. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 19(3) :193–205.

[Yuan, 1995] Yuan, X. (1995). A mechanism of automatic 3d object modeling. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 17(3) :307–311.

[Zeller, 1996] Zeller, C. (1996). *Calibration Projective, Affine et Euclidienne en Vision par Ordinateur et Application à la Perception Tridimensionnelle*. PhD thesis, Ecole Polytechnique de Palaiseau.

Table des figures

2.1 Graphe non exhaustif des systèmes d'acquisition 3D 6
2.2 Graphe non exhaustif des systèmes optiques 7
2.3 Détail d'un palpeur 8
2.4 Principe de la stéréovion 9
2.5 Exemple de photogrammétrie 10
2.6 Reconstruction 3D à partir d'images catadioptriques 11
2.7 Simulation d'une pièce vue par vision catadioptrique 11
2.8 Principe de la triangulation active 12
2.9 Différents motifs lumineux en triangulation active 13
2.10 Têtes laser point de μEpsilon (a) et de Nextec (WizProbe) (b) 13
2.11 Scanner Vi910 de Konica Minolta (a) et tête laser GScan de Romer (b) . . 15
2.12 Tête laser MMZ de Metris 15
2.13 Capteurs laser ligne 16
2.14 Exemple de motifs 16
2.15 Scanners AtosIII de Gom (a) et Comet5 de Steinbichler (b) 17
2.16 Système de "body scanning" 17
2.17 Système mis en place pour l'acquisition 3D dans l'infrarouge 18
2.18 Exemple de numérisation laser dans l'infrarouge 18
2.19 Numérisation d'une pièce de forge à haute température 19
2.20 Temps de vol à détection de pulse 20
2.21 Modèle 3D texturé d'un champ de fouille à Bibracte 20

2.22 Scanners ScanStation2 de Leica (a), GS et GX de Trimble (b et c) 21
2.23 Temps de vol à décalage de phase 21
2.24 Scanners LS de Faro (a) et HDS de Leica (b) 22
2.25 Shape from silhouette 24
2.26 Exemple de reconstruction 3D en Shape from Silhouettes 24
2.27 Shape from focus 25
2.28 Shape from Polarization : prototype développé par Morel *et al.* 26
2.29 Vi910 sur trépied et plateau rotatif 27
2.30 MMT de différentes dimensions 27
2.31 Bras robotisé 28
2.32 Système d'acquisition sur bras robotisé 28
2.33 Exemple d'un système d'acquisition sur bras polyarticulé 29
2.34 RCA de Metris 30
2.35 Trackers optique et laser 30
2.36 Absolute Tracker de Leica (a) et Laser Tracker Xi V2 de Faro (b) 31
2.37 Modèle 3D d'une coque de bateau 31

3.1 Procédure générale de la numérisation 3D 36
3.2 Nuage de points 38
3.3 Modèle maillé 39
3.4 Définition d'un trou 39
3.5 Composantes connexes 40
3.6 Modèle surfacique 40
3.7 Problème de matériau 41
3.8 Poudrage d'un objet : (a) silex brut ; (b) silex poudré 42
3.9 Objet impossible à poudrer en raison de ses dimensions et de sa valeur . 42
3.10 Erreur due à l'application d'une poudre 43
3.11 Erreur due au contraste 44
3.12 Applications de la numérisation 3D 45

3.13 Applications liées à l'analyse 46
3.14 Visualisation d'un tampon ancien par internet 47
3.15 Procédés de duplication 3D 48
3.16 Modèle 3D en résine, duplication par impression 3D 49
3.17 Acquisition avec un capteur laser ligne sur MMT 51
3.18 Vue acquise en une acquisition 52
3.19 Nuage de points brut 54
3.20 Filtrage du bruit de mesure 57
3.21 Filtrage de redondance 58
3.22 Triangulation d'un nuage de point 58
3.23 Facettes anormales 60
3.24 Recalage initial 61
3.25 Mesh zippering 62
3.26 Algorithme de Jun 63
3.27 Bouchage de trous 63
3.28 Acquisition sans et avec contrôle de l'éclairage 64
3.29 Interface de l'outil d'aide à la numérisation 3D 65
3.30 Fichier exemple de l'outil 66
3.31 Reconstitution de la matrice d'origine 67
3.32 Numérisation d'un champ de fouille à Bibracte 68
3.33 Duplication d'une statue en bois par impression 3D 69
3.34 Tête d'une sculpture de la Vouivre 70
3.35 Reliures de livres anciens 71
3.36 Analyse de tests d'oursins 72

4.1 Stratégies de F. Prieto 79
4.2 Carte de visibilité 2D [Derigent et al., 2007] 80
4.3 Surfaces numérisables 81

4.4 Voxelisation . . . 82
4.5 Déplacement du capteur dans l'espace . . . 83
4.6 Intégration des contraintes . . . 84
4.7 Système utilisé par Maver *et al.* . . . 85
4.8 Les deux types d'occlusions . . . 85
4.9 Système d'acquisition de Pito . . . 86
4.10 Découpage de l'espace de travail . . . 87
4.11 Report des informations de visibilité sur le *PSS* . . . 88
4.12 Modélisatisation mathématique . . . 88
4.13 Définition d'un MVC . . . 89
4.14 Procédure de la méthode basée sur un modèle . . . 95
4.15 Perte des détails de forme lors de la réduction . . . 96
4.16 Points de vue potentiels . . . 96
4.17 Points de vue potentiels . . . 98
4.18 Interface de l'outil de résolution du SCP . . . 99
4.19 Procédure de la méthode non basée sur un modèle . . . 100
4.20 Définition d'un MVC . . . 100
4.21 Estimation par les MVC de la "direction de vue" . . . 102
4.22 Exemple d'un modèle 3D obtenu à la fin de la première phase . . . 102
4.23 Evolution de l'aire de la surface numérisée . . . 103
4.24 Evolution du nombre de vue en fonction du critère d'arrêt . . . 104
4.25 Caractéristiques d'un trou . . . 105
4.26 Calcul de la normale du trou par la première méthode . . . 106
4.27 Création de facettes pour le calcul de la normale du trou . . . 106
4.28 Calcul de la normale du trou par la deuxième méthode . . . 106
4.29 Auto-occlusion . . . 107
4.30 Subdivision de l'icosaèdre . . . 108
4.31 Segmentation d'une nouvelle vue . . . 108

4.32 Bouchage de plusieurs trous 109
4.33 Trou inaccessible 109
4.34 Fonctionnement du simulateur de numérisation 3D 111
4.35 Interface du simulateur de numérisation 112
4.36 Réglages initiaux 113
4.37 Comparaison numérisation réelle et simulée 113
4.38 Champ de vue et grille de numérisation 114
4.39 Création d'une vue 114
4.40 Test d'auto-occlusion 115
4.41 Segmentation en composantes connexes 116
4.42 Influence du seuil de segmentation sur deux objets 116
4.43 Bords d'un trou 117
4.44 Système de numérisation 3D 119
4.45 Scanner Vi910 de Konica-Minolta 120
4.46 Contraintes de positionnement 121
4.47 Points de vue inaccessibles 122
4.48 Schéma cinématique d'une architecture de type "portique" 124
4.49 Scanner CometV sur bras robotisé 125
4.50 Enveloppe du robot KR16 de Kuka 125
4.51 Changements de repères 127
4.52 Mires réfléchissantes pour le recalage automatique des vues 127

Liste des tableaux

2.1 Synthèse des systèmes d'acquisition (première partie) 33
2.2 Synthèse des systèmes d'acquisition (seconde partie) 34
2.3 Synthèse des systèmes de positionnement 35

3.1 Récapitulatif des applications 50
3.2 Avantages et inconvénients des capteurs sur MMT 51
3.3 Avantages et inconvénients des systèmes à acquisition par vue 53
3.4 Avantages et inconvénients des systèmes sur bras polyarticulées 54
3.5 Récapitulatifs des caractéristiques des systèmes d'acquisition 56
3.6 Récapitulatifs des différentes études de cas 73

4.1 Récapitulatif des méthodes basées sur un modèle 91
4.2 Récapitulatif des méthodes volumiques non basées sur un modèle . . . 91
4.3 Récapitulatif des méthodes surfaciques non basées sur un modèle 92
4.4 Influence de la réduction du nombre de facettes 95
4.5 Matrice de mesurabilité 97
4.6 Transfert des contraintes de positionnement 121
4.7 Numérisation de la pierre savon 123
4.8 Paramètres Denavit-Hartenberg pour le KR16 126
4.9 Objets d'études 130
4.10 Comparaison des méthodes de numérisation 131
4.11 Influence de la première position 133