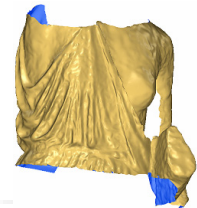
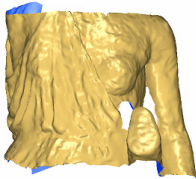


*École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy  
Université Henri Poincaré (Nancy1)  
Institut National Polytechnique de Lorraine  
École Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg  
Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg*

**Mémoire de Master Design Global, spécialité  
« Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis »**

***RELEVÉ LASERGRAMMETRIQUE ET TRAITEMENT  
DES NUAGES DE POINTS DE MOULAGES DE LA  
GYPSOTHEQUE DE L'UNIVERSITE MARC BLOCH  
DE STRASBOURG***



*Présenté par Cyril CALLEGARO*

**Laboratoire d'Accueil :**

*MAP-PAGE, UMR 694  
INSA de Strasbourg  
24, Boulevard de la Victoire  
67084 STRASBOURG Cedex*



**Directeur de stage :**

*M. Pierre GRUSSENMEYER  
Professeur des Universités*

*Septembre 2007*

En page de garde : en arrière plan, Amazone de type « Mattéi », copie figurant à la gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg (Gypsothèque@) ; à gauche, photo du scanner laser Trimble GX (Trimble@) ; à droite, photo du scanner laser Faro LS (Faro@).



## Remerciements

Je tiens à remercier Pierre GRUSSENMEYER pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire MAP-PAGE, pour son suivi dans mon travail de Projet de Fin d'Etudes, pour ses conseils et pour m'avoir offert la possibilité de participer à de nombreuses expériences au cours de ces sept mois. Je remercie Eddie SMIGIEL pour ses conseils avisés et son aide constante et minutieuse pendant toute la durée du projet.

Mes remerciements vont aussi à Elise MEYER, Fayez TARSHA KURDI, Majd AL SHAWA, Hakkim BOULAASSAL, Emmanuel ALBY pour les discussions fructueuses, l'aide qu'ils ont pu apporter dans ce projet et pour les moments passés ensemble.

J'exprime ma reconnaissance à Samuel GUILLEMIN pour avoir participé aux numérisations des statues au musée et pour m'avoir aidé à mener à bien certaines expériences au laboratoire, et à Bernard GRANDMOUGIN pour l'aide fournie dans la résolution de certains problèmes informatiques.

Je remercie Jasmin GONZALES, étudiante à l'Université de Brown aux Etats-Unis, pour la contribution qu'elle a apportée au déroulement de ce projet.

J'exprime ma sincère gratitude envers l'entreprise FARO de nous avoir prêté le scanner FARO LS, sans quoi une grande partie de ce projet n'aurait pu voir le jour.

J'adresse mes remerciements à Jean-Pierre PERRIN et à Vincent MARCHAL pour leur contribution au projet lors de la numérisation effectuée avec le Handyscan.

Je tiens aussi à remercier Jean-Yves MARC, professeur à l'Université Marc Bloch et conservateur des collections de la gypsothèque, pour nous avoir autorisé l'accès au musée et pour sa disponibilité.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble du corps enseignant du Master Design Global, spécialité « Modélisation et Simulation des Espaces Bâti », pour la transmission de leur savoir.

En arrière plan : dessin de l'Amazone de type « Mattéi » (Educnet@)

## Sommaire

<b>Remerciements</b>	<b>- 3 -</b>
<b>Sommaire</b>	<b>- 4 -</b>
<b>Introduction et problématique</b>	<b>- 7 -</b>
<b>1. Etat de l'Art</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1.1. Historique du relevé d'architecture</b>	<b>- 9 -</b>
<b>1.2. La représentation de statues</b>	<b>- 10 -</b>
<b>1.3. Exemples de modélisation de statues</b>	<b>- 12 -</b>
1.3.1. <i>Levier tachéométrique et photogrammétrie</i>	- 12 -
1.3.2. <i>Scanner laser et photogrammétrie rapprochée</i>	- 12 -
1.3.3. <i>Lumière structurée ou codée</i>	- 13 -
<b>1.4. La notion de modèle</b>	<b>- 14 -</b>
1.4.1. <i>La définition de « modèle »</i>	- 14 -
1.4.2. <i>La modélisation en architecture</i>	- 14 -
1.4.2.1. <i>Le modèle 3D issu d'une restitution</i>	- 14 -
1.4.2.2. <i>Le modèle 3D « tel que saisi »</i>	- 15 -
1.4.2.3. <i>Le modèle 3D tel « que construit »</i>	- 15 -
1.4.3. <i>Les différents types de modèles</i>	- 15 -
1.4.3.1. <i>Le modèle filaire</i>	- 15 -
1.4.3.2. <i>Le modèle surfacique</i>	- 15 -
1.4.3.3. <i>Le modèle volumétrique</i>	- 16 -
<b>1.5. Les différentes techniques de modélisation</b>	<b>- 16 -</b>
1.5.1. <i>Inventaire de différentes méthodes de modélisation</i>	- 16 -
1.5.1.1. <i>Les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points systématiques</i>	- 16 -
1.5.1.1.1. <i>Modélisation par un maillage polygonal</i>	- 16 -
1.5.1.1.2. <i>Modélisation à l'aide de primitives géométriques</i>	- 17 -
1.5.1.2. <i>Les techniques de reconstructions à partir d'un nuage de points pertinents</i>	- 17 -
1.5.1.2.1. <i>Modélisation filaire</i>	- 18 -
1.5.1.2.2. <i>Modélisation par balayage</i>	- 18 -
1.5.1.2.3. <i>Modélisation par interpolation</i>	- 18 -
1.5.2. <i>Inventaire des logiciels de modélisation</i>	- 18 -
<b>2. Le scanner laser</b>	<b>- 20 -</b>
<b>2.1. Définitions</b>	<b>- 20 -</b>
<b>2.2. Les différents types de scanners laser</b>	<b>- 21 -</b>
2.2.1. <i>Les scanners à mesure par triangulation</i>	- 21 -
2.2.2. <i>Les scanners à mesure de temps de vol</i>	- 21 -
2.2.3. <i>Les scanners à mesure de différence de phase</i>	- 22 -
2.2.4. <i>Les scanners à repérage de position</i>	- 22 -
2.2.5. <i>Le scanner à lumière structurée ou moirée</i>	- 23 -
<b>2.3. Les critères de précision retenus</b>	<b>- 24 -</b>
2.3.1. <i>Précision angulaire</i>	- 24 -
2.3.2. <i>Précision sur les mesures de distances</i>	- 24 -
2.3.3. <i>Résolution</i>	- 25 -
2.3.4. <i>Taille du spot laser</i>	- 25 -
2.3.5. <i>Intervalle minimum angulaire</i>	- 25 -
2.3.6. <i>Les effets de bord</i>	- 25 -
2.3.7. <i>Influence de la réflectivité des surfaces</i>	- 26 -
2.3.8. <i>Conditions environnementales</i>	- 26 -
2.3.8.1. <i>Température</i>	- 26 -
2.3.8.2. <i>Atmosphère</i>	- 26 -



2.3.8.3.	Radiations interférentes	- 26 -
<b>2.4.</b>	<b>Comparaison des différentes technologies</b>	<b>- 27 -</b>
<b>2.5.</b>	<b>Présentation des systèmes utilisés</b>	<b>- 27 -</b>
2.5.1.	<i>Le scanner laser Trimble GX</i>	- 27 -
2.5.1.1.	Principe de fonctionnement	- 28 -
2.5.1.2.	Etude de précision de la détermination de la distance	- 28 -
2.5.2.	<i>Le scanner laser Faro LS</i>	- 28 -
2.5.2.1.	Présentation des caractéristiques du scanner laser Faro LS	- 29 -
2.5.2.2.	Principe de fonctionnement	- 29 -
2.5.2.3.	Le principe de mesure de la différence de phase	- 30 -
<b>2.6.</b>	<b>Chaîne classique du traitement des nuages de points</b>	<b>- 32 -</b>
2.6.1.	<i>L'acquisition des données</i>	- 32 -
2.6.2.	<i>La consolidation</i>	- 32 -
2.6.3.	<i>La segmentation</i>	- 33 -
2.6.4.	<i>Le filtrage</i>	- 34 -
2.6.5.	<i>La modélisation</i>	- 34 -
<b>3.</b>	<b>Expérimentations sur l'Amazone de type « Mattéi »</b>	<b>- 35 -</b>
<b>3.1.</b>	<b>Rappels historiques</b>	<b>- 35 -</b>
3.1.1.	<i>Origine des Amazones</i>	- 35 -
3.1.2.	<i>L'amazone de type « Mattéi »</i>	- 35 -
<b>3.2.</b>	<b>Modification de la chaîne standard de modélisation</b>	<b>- 36 -</b>
<b>3.3.</b>	<b>Numérisation de l'Amazone de type « Mattéi » et maillage immédiat</b>	<b>- 37 -</b>
3.3.1.	<i>Déroulement du lever au scanner laser</i>	- 37 -
3.3.1.1.	Numérisation au scanner Trimble GX	- 37 -
3.3.1.2.	Numérisation au scanner Faro LS	- 38 -
3.3.2.	<i>Première modélisation et constat du bruit</i>	- 39 -
<b>3.4.</b>	<b>Segmentation des nuages de points</b>	<b>- 40 -</b>
<b>3.5.</b>	<b>Procédure de filtrage du bruit</b>	<b>- 40 -</b>
3.5.1.	<i>Etat de l'art des différentes méthodes de filtrage</i>	- 40 -
3.5.1.1.	Exemple de filtrage de nuage de points	- 40 -
3.5.1.2.	Exemple de filtrage de maillages	- 41 -
3.5.1.3.	Exemple de filtrage de transformée en distance	- 41 -
3.5.2.	<i>Approche retenue</i>	- 42 -
3.5.3.	<i>Mise en œuvre de la procédure de filtrage</i>	- 42 -
3.5.3.1.	Transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées sphériques	- 43 -
3.5.3.2.	Phase de seuillage	- 44 -
3.5.3.3.	Conversion du nuage de points 3D en image 2D	- 44 -
3.5.3.3.1.	Cas des données Faro	- 45 -
3.5.3.3.2.	Cas des données Trimble	- 46 -
3.5.3.4.	Détermination et remplissage des trous	- 47 -
3.5.3.5.	Phase de filtrage	- 48 -
3.5.3.5.1.	Expériences préalables	- 49 -
3.5.3.5.2.	Filtre « moyenne »	- 49 -
3.5.3.5.3.	Filtre « médian »	- 50 -
3.5.3.5.4.	Filtre « Wiener »	- 50 -
3.5.3.6.	Réduction des effets de bord d'image	- 51 -
3.5.3.7.	Transformation des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes	- 52 -
<b>3.6.</b>	<b>Consolidation des nuages de points</b>	<b>- 52 -</b>
<b>3.7.</b>	<b>Modélisation</b>	<b>- 55 -</b>
3.7.1.	<i>Maillage 3D</i>	- 55 -
3.7.2.	<i>Elimination des sommets pointus</i>	- 57 -
3.7.3.	<i>Remplissage des trous du maillage</i>	- 57 -
3.7.4.	<i>Lissage</i>	- 57 -

<b>4. Résultats</b>	<b>- 58 -</b>
<b>4.1. Cas des données FARO</b>	<b>- 58 -</b>
4.1.1. Réduction du bruit	- 58 -
4.1.2. Modèle Faro du buste de l'Amazone de type « Mattéi »	- 59 -
<b>4.2. Cas des données TRIMBLE</b>	<b>- 59 -</b>
4.2.1. Réduction du bruit	- 59 -
4.2.2. Modèle Trimble du buste de l'Amazone de type « Mattéi »	- 60 -
<b>4.3. Analyse des résultats</b>	<b>- 60 -</b>
4.3.1. Etude de précision de la détermination d'un point	- 60 -
4.3.2. Analyse des modèles du buste Faro et du buste Trimble	- 62 -
4.3.3. Cartographie des écarts	- 62 -
4.3.3.1. Cartographie des écarts du modèle Faro	- 63 -
4.3.3.2. Cartographie des écarts du modèle Trimble	- 63 -
4.3.3.3. Comparaison du modèle Faro et du modèle Trimble	- 64 -
<b>4.4. Test : Application d'un double filtrage « Wiener »</b>	<b>- 65 -</b>
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>- 68 -</b>
<b>Table des illustrations</b>	<b>- 70 -</b>
<b>Table des formules</b>	<b>- 72 -</b>
<b>Récapitulatif des tableaux</b>	<b>- 73 -</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>- 74 -</b>
<b>Sommaire des Annexes</b>	<b>- 81 -</b>

## *Introduction et problématique*

J'ai réalisé mon projet de recherche au sein du laboratoire MAP-PAGE, fondé en 1996 à l'Ecole Nationale des Arts et Industries de Strasbourg et devenu Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg en 2004. L'équipe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) est l'une des cinq équipes de l'UMR 694 MAP (Modélisation de l'Architecture et du Paysage). Les problématiques abordées par l'UMR 694 MAP reposent sur l'élaboration de modèles et d'outils de simulation en architecture. Dans ce but, quatre thèmes sont à l'étude : les outils numériques et le patrimoine architectural, le paysage comme totalité construite, les processus de production de bâtiments, le partage d'information sur Internet pour l'architecture.

L'équipe du MAP-PAGE est composée de Pierre Grussenmeyer, professeur des Universités et responsable de l'équipe, Tania Landes, Eddie Smigiel et Mathieu Koehl, Maîtres de Conférences, Samuel Guillemain, technicien de recherche, Bernard Grandmougin, adjoint technique, Elise Meyer, Emmanuel Alby, Fayez Tarsha-Kurdi, Majd Alshawa et Hakkim Boulaassal doctorants au sein du laboratoire.

Les axes de recherche actuels sont la photogrammétrie et la modélisation tridimensionnelle d'objets topographiques et architecturaux. C'est dans ce dernier axe que s'inscrit ce projet qui s'intitule : « Relevé lasergrammétrique et traitement des nuages de points de moulages de la gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg ».

Ce projet a été conduit avec la collaboration de l'Institut d'Archéologie Classique, UMR 7044 de l'Université Strasbourg 2 Marc Bloch.

La collection des moulages de l'Université Marc Bloch est contemporaine de la création de la Kaiser-Wilhelm-Universität fondée en 1872. Son créateur Adolf Michaelis, le premier titulaire de la chaire d'Archéologie classique, voulait réunir en un même ensemble une sorte de musée imaginaire, de collection idéale de sculptures grecques. Cette collection qui occupait une bonne partie du premier étage du Palais Universitaire est rapidement devenue un instrument pédagogique et scientifique.

A la fin du XIXe siècle, cette collection est une des plus brillantes d'Europe. Les moulages ont été réalisés dans les ateliers de Berlin, de Dresde, de Francfort, de Londres, de Munich, de Paris, de Rome, de Vienne. Les moulages proviennent de prestigieuses sculptures issues des grandes fouilles qui étaient alors menées en Grèce et en Orient : Olympie, Delphes, Samothrace, Délos, Pergame. Outre son aspect pédagogique certain, cette collection a également servi à expérimenter plusieurs restitutions de groupes ou de statues antiques : le groupe des Tyrannoctones, l'Aphrodite de Cnide, les Amazones d'Ephèse, la Victoire de Samothrace etc.

Entre 1940 et 1945, les collections furent entreposées dans les sous-sols du Palais Universitaire et furent dégradées par l'humidité qui règne dans les locaux et par les étudiants, qui, en 1968 et 1973, occupèrent le palais et utilisèrent les plâtres comme matériau de barricade occasionnant alors bien des dégâts. Ainsi la gypsothèque est, en elle-même, un témoin direct des événements de notre proche histoire. Néanmoins, la collection de Strasbourg reste en quantité la seconde collection de France, et même la première collection universitaire. Par ses spécificités, elle est l'une des plus remarquable d'Europe.

Dans l'attente d'une hypothétique valorisation physique par l'attribution de locaux décents, la numérisation en trois dimensions permettrait à certaines de pièces de ces collections de sortir de l'ombre et de réaliser un musée virtuel accessible par Internet.

La numérisation en trois dimensions permettrait de mettre ces modèles en ligne, ils seraient alors accessibles à tous et notamment aux étudiants de premier cycle en histoire, histoire de l'art et archéologie et de développer sur cette base des scénarios pédagogiques. La nature de la collection offre deux avantages décisifs. Du point de vue du modèle en trois dimensions, peu importe que nous ayons numérisé l'original ou un moulage de qualité. Par ailleurs, l'unité de lieu qu'offre la collection permet à moindre frais de numériser une sélection d'œuvres importantes en histoire de l'art dont les originaux sont disséminés un peu partout en Europe.

Cependant, les diverses variétés de statues présentes dans la gypsothèque font qu'il n'est pas possible d'utiliser différentes techniques de numérisation. L'utilisation de nombreux équipements indépendants les uns des autres pour chaque statue rendrait la numérisation réellement onéreuse. Il est donc nécessaire de

sélectionner un bon équipement et la méthodologie requise afin d'arriver à un bon compromis entre la qualité du résultat et le coût global de l'opération.

Pour réaliser ce projet nous cherchons avant tout à pouvoir numériser dans son ensemble une statue en utilisant qu'un seul type de technologie afin de la modéliser.

Bien que le laboratoire soit spécialisé dans la restitution d'ouvrage par photogrammétrie, nous avons décidé d'utiliser le scanner laser terrestre. En effet, c'est vers cette technologie permettant d'obtenir rapidement des modèles en trois dimensions, que le MAP-PAGE s'oriente depuis plus d'un an.

De plus ce projet va permettre de comparer deux types de scanner laser. Le premier est le scanner laser à mesure de temps de vol, le TRIMBLE GX dont dispose le laboratoire MAP-PAGE, le second est le scanner laser à mesure de différence de phase FARO LS qui nous a été prêté par l'entreprise FARO. Nous pourrons donc comparer les modèles obtenus grâce à ces deux appareils pour de l'acquisition à courte distance (entre 3 m et 6 m).

Jusqu'à présent, le laboratoire n'avait jamais réalisé de modélisation de statues. Par conséquent, une grande partie du temps consacré au projet a été utilisée pour effectuer des recherches sur les procédés d'acquisition mais aussi le traitement des données à partir de nuages de points provenant de la numérisation de petits objets. Ce projet soulève aussi de nombreuses questions et de nombreuses problématiques au niveau de la réduction du bruit sur la mesure.

Nous avons établi et mis en œuvre notre propre processus de modélisation en nous inspirant de diverses méthodes. L'un des objectifs de ce projet est de montrer que nous pouvons modéliser des statues à partir d'une méthode, d'un équipement et de logiciels standardisés. Nous nous attacherons à automatiser le procédé au maximum.

La première partie de ce mémoire sera consacrée à un Etat de l'Art pour la représentation de statues et des exemples de modélisations. Nous y introduirons le concept de « modèle » et les différentes techniques de modélisation pour y aboutir.

Nous aborderons plus particulièrement les techniques basées sur la lasergrammétrie dans la deuxième partie. Nous pourrons y voir un éventail des différentes sortes de scanners laser et nous analyserons en détails le fonctionnement des deux instruments utilisés.

La troisième partie explicitera le processus de modélisation mis en œuvre à travers une expérimentation sur une Amazone de type « Mattéi ».

Les résultats et les comparaisons des modèles obtenus avec les deux types de scanners laser seront analysés dans la quatrième partie.

Nous concluons ce mémoire en faisant une synthèse de la procédure expérimentée et nous discuterons des étapes éventuelles à améliorer. Nous aborderons pour finir les perspectives qu'ouvrent un tel projet et la pertinence de nouveaux types de matériels qui arrivent sur le marché.

# 1. Etat de l'Art

## 1.1. Historique du relevé d'architecture

Le relevé d'architecture a été théorisé dès le XV<sup>e</sup> siècle. Alberti en pose les grands principes vers 1435 lorsqu'il effectue le relevé de Rome. Il illustre la plupart des méthodes de relevé en utilisant le triangle qui est la figure plane par excellence. Ainsi le triangle permet de définir les intersections de droites et de cercles, les points rayonnés, mais aussi les méthodes de calculs les plus usitées telles que la résolution trigonométrique, les conversions de coordonnées polaires en coordonnées rectangulaires et vice-versa. Ces principes ne subiront pas de modifications majeures mais évolueront en fonction des réflexions sur les erreurs et serviront de base à la création d'instruments.

Ainsi Jean-Paul Saint Aubin propose « deux modalités de collecte des données » qui apparaissent dès le XV<sup>e</sup> siècle pour arriver jusqu'à nous. La première modalité part du miroir de Brunelleschi, du châssis à réseau de Dürer, de la vitre italienne, du Père Jean du Breuil et de la modeste planchette de l'arpenteur. Cette méthode utilise le plan de la perspective pour mesurer les points dans l'espace. La seconde modalité est issue d'Alberti lors de la confection de son plan de Rome, du portillon de Dürer, du carré géométrique. Cette méthode consiste en la mesure des distances et des orientations. Ces deux aspects sont loin d'être rivaux, et bien au contraire, ils sont complémentaires. Alberti l'avait bien compris puisqu'il établit des passerelles entre ces deux modalités. En effet, il fonda aussi bien la perspective avec *Della Pittura (Livre I, 1436)* que la topographie moderne avec *Ludi rerum mathematicarum (1445)* et *Descriptio urbis Romae (1450)*. Aussi, dès le début du XVI<sup>e</sup> siècle, Jean Pélerin dans son traité de perspective « *Le Viator* » relie les figures géométrales et les perspectives (cf. Figure 1-1).

Le postulat de la rectitude du rayon visuel est la base de ces deux méthodes. Dans la première méthode, le rayon visuel est utilisé en intersection avec le plan de la perspective et permet ainsi de définir la position des éléments composant la scène sur un support plan. Dans la deuxième méthode, il sert à viser les points caractéristiques de la scène : à partir d'une position connue les coordonnées sont définies en termes d'angles et de distances. La première modalité évoluera grâce à l'apparition de la photographie. Elle donnera naissance à la photogrammétrie et s'enrichira par l'intégration de la stéréoscopie. La seconde modalité aboutira, des siècles plus tard, à la création d'appareils de mesure tels que les théodolites, les distancemètres laser et les tachéomètres électroniques.

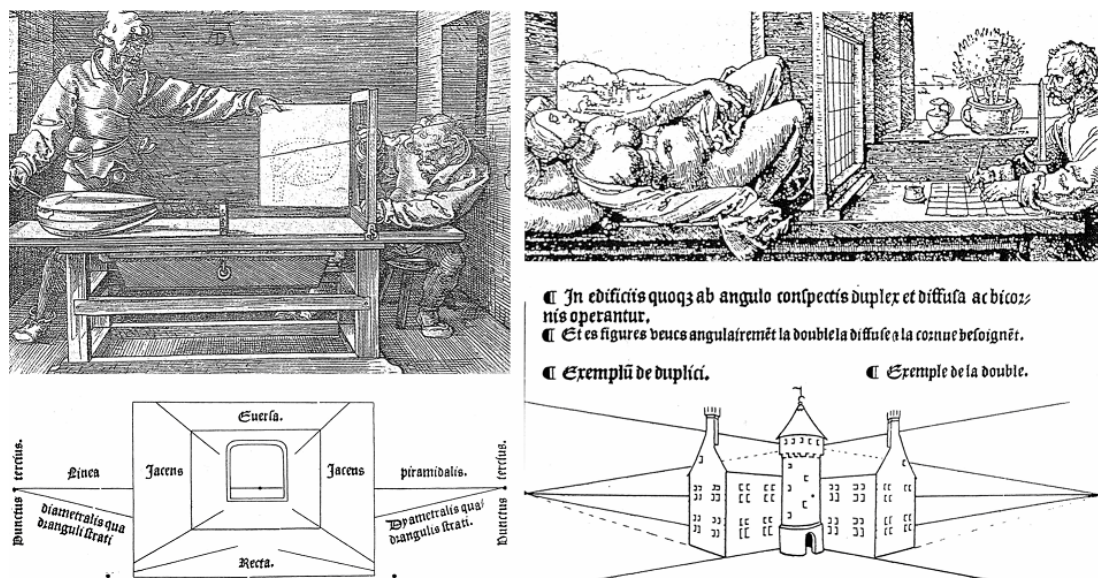


Figure 1-1 : Les théoriciens de la représentation

En haut à gauche, Dürer avec le dessinateur au luth en saisie continue ; en haut à droite, Dürer avec le dessinateur à la femme couchée en saisie ponctuelle. En bas, Jean Pélerin avec la perspective à deux points de fuite (Fuchs [FUC06] repris de Saint Aubin [SA192])

Nous remarquerons que les principes sur lesquels résident les instruments les plus sophistiqués comme les scanners laser 3D ou les techniques de modélisation basées sur l'image sont directement issus de ceux qu'Alberti et Brunelleschi ont respectivement initiés. Par exemple, la mesure des angles et des distances, est le principe de base des tachéomètres et du scanner laser 3D à mesure de temps de vol. D'autre part l'intersection entre les rayons visuels et les plans d'images est la méthode utilisée pour déterminer les paramètres des caméras lorsque nous utilisons la restitution photogrammétrique.

Ce paragraphe a été écrit avec l'aide des thèses de De Luca [LUC06] et de Fuchs [FUC06] qui s'inspiraient tous deux du livre de Jean-Paul Saint Aubin [SAI92] *Le relevé et la représentation de l'architecture* et de la page Internet « Mesure, relevé et représentation de l'objet culturel » rédigée par Jean Paul Saint Aubin disponible sur Culture@.

## 1.2. La représentation de statues

De tous temps, la conservation du patrimoine et en particulier des statues a utilisé comme première approche la représentation de l'objet par le dessin, notamment dans l'archéologie ou lorsque l'objet doit subir une restauration. La représentation de statues se fait par l'élaboration de dessins techniques, souvent à l'échelle 1:1, et grâce à la prise de photos complémentaires. La production de dessins en archéologie ou dans la conservation du patrimoine est motivée d'une part pour avoir une documentation graphique (plus synthétique et riche en informations qu'une simple photo), des formes et des conditions de préservation de l'objet ; d'autre part pour être utilisée lors de plans de restauration pour élaborer et renseigner les actions qui doivent être faites.

Le dessin est principalement encore un procédé manuel dans le domaine de la conservation du patrimoine. Ceci peut être considéré comme un point positif d'après Callieri *et al.* [CAL06]. En effet à partir de ses propres connaissances et de son expérience le dessinateur, en interprétant ou en reconstruisant, peut enrichir et étendre ses productions.

Les dessins techniques sont produits pour fournir des données sur la forme de l'objet, des mesures, des longueurs, des aspects morphologiques. Toutes ces informations sont souvent synthétisées dans le dessin et sont nécessaires pour établir des comparaisons de style, pour déterminer l'origine de l'objet découvert, ou pour étudier les procédés jadis utilisés pour sculpter, modeler ou fabriquer l'objet ([CAL06]).

Dans le cas d'un projet de restauration, les dessins font partie intégrante des documents basiques au même titre que les photographies, les recherches aux rayons X ou les analyses chimiques. Ils permettent de préserver l'aspect de l'objet avant qu'il soit restauré. En effet cette dernière opération peut considérablement changer l'aspect de l'objet.

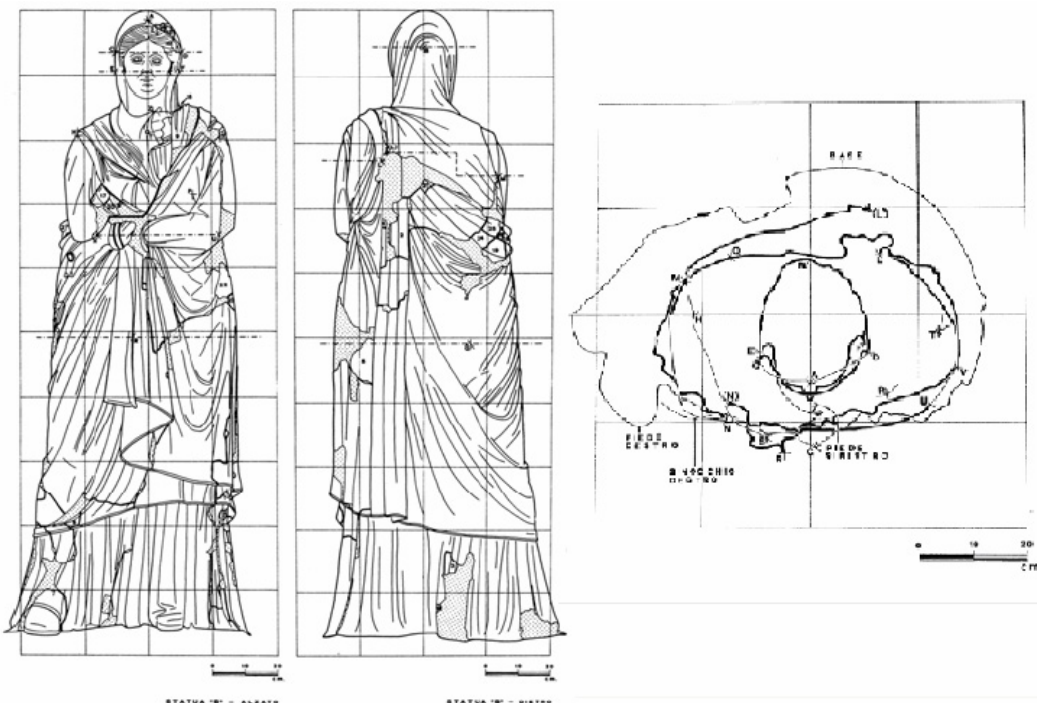
De plus, ces dessins permettent de donner la morphologie originale de l'objet à la personne en charge de la restauration.

Afin d'obtenir des dessins de qualité, la méthode employée est relativement lourde. Tout d'abord, les dessins obtenus, que ce soit dans un but de documentation ou pour servir de support à une restauration, doivent être réalisés selon une projection orthographique, c'est-à-dire une projection perspective dont le point de vue est rejeté à l'infini (Granddictionnaire@). Ce type de projection est employé car elle autorise l'utilisation de données et la prise de données métriques sur le dessin. Elle permet ainsi de comparer, soit de différentes sections d'un même objet, soit de dessins différents d'un même objet. Le dessinateur doit produire des représentations selon différents points de vues de la statue. Le nombre de vues peut varier en fonction de la complexité des formes de l'objet, de la taille de l'objet et surtout du temps alloué pour ces dessins. En général cinq ou six vues sont nécessaires pour établir une reconstruction graphique complète de l'objet. Communément, les vues de face, de dos, de gauche, de droite, de dessus et de dessous sont établies. Malheureusement, souvent pour des raisons budgétaires, seulement un ou deux dessins sont réalisés. Une façon basique de représenter une statue est d'en faire des coupes afin, généralement, de restituer la jonction entre les différents dessins ([CAL06]).

Les instruments utilisés pour les dessins ci-dessus sont les outils classiques : un fil à plomb, un niveau de maçon, un compas, un pied à coulisse pour mesurer les distances et les épaisseurs, un calibre de forme et un peigne à dents ajustables (c'est un peigne en fer dont la position des dents s'ajuste en fonction de

la courbe de l'objet) pour reproduire les courbes. Ces outils étaient déjà utilisés par le passé. Toutes les mesures prises à la main en utilisant ces instruments sont reportées sur le papier à l'échelle 1:1. Une des principales informations contenues dans ces dessins est la localisation des points appelés *points principaux* qui ont été mesurés sur la statue et dessinés sur le papier (la plupart de ces points sont indiqués par une croix et un nom comme l'illustre la Figure 1-2). A partir de ces points le dessinateur commence la représentation d'après son point de vue et ses compétences. Il est par conséquent très difficile d'évaluer la précision de tels dessins, car beaucoup de paramètres difficilement maîtrisables interviennent tels que la complexité des formes, le choix des points principaux et les capacités du dessinateur ([CAL06]).

Bien que cette approche soit considérée comme suffisante pour restaurer une statue, elle reste clairement inadaptée lorsqu'il est nécessaire d'avoir des longueurs, des formes de haute précision ou lorsque nous avons besoin de petits détails décoratifs. En effet la subjectivité du dessinateur est trop présente, il ne prend en compte que les lignes principales de l'objet qu'il sélectionne en fonction de son expérience. Deux autres points négatifs sont que le temps nécessaire à établir un dessin suffisamment précis d'objets complexes est très long, et que cette méthode requiert des compétences à la fois techniques et artistiques. Par exemple il faut des semaines de travail pour arriver à un résultat tel que le montre la Figure 1-2. De plus, il devient difficile de trouver des personnes suffisamment compétentes pour réaliser ces travaux.



**Figure 1-2 : Résultat d'un dessin complexe entièrement effectué à la main (Produit pour la restauration de la statue en bronze de Livie par Marida Risaliti, [CAL06])**

Les mesures prises sur les statues peuvent aussi servir à en faire des reproductions conformes aux originales. Souvent cette technique fut utilisée pour que des jeunes sculpteurs puissent se perfectionner à la copie d'œuvres.

La numérisation en trois dimensions de statues peut donc s'avérer très utile. Elle permettrait de réaliser des modèles volumiques globaux très rapidement. Ainsi le temps d'acquisition des données et de création du modèle seraient considérablement réduits. D'autre part il sera désormais possible d'effectuer des mesures sur le modèle. Du point de vue de la restauration, avoir un modèle 3D d'une statue endommagée permettrait de faire des simulations de reconstruction. Nous éviterions alors l'écueil de la subjectivité et de l'interprétation du dessinateur. De plus la numérisation en trois dimensions autorise, sous certaines conditions, d'obtenir les plus petits détails.

Le paragraphe suivant exposera de manière succincte différentes approches pour la numérisation de statues.



### 1.3. Exemples de modélisation de statues

Lorsque nous examinons le cas particulier de la modélisation de statues, nous pouvons constater qu'il n'y a pas de méthodes figées mais que souvent les équipes de recherche combinent plusieurs méthodes (lasergrammétrie, photogrammétrie...) afin de modéliser les plus petits détails.

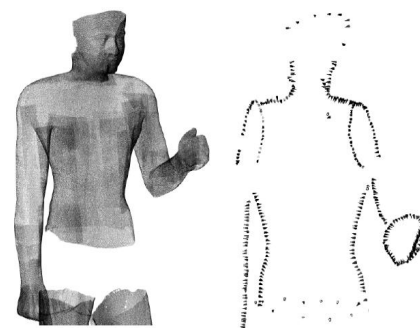
#### 1.3.1. Lever tachéométrique et photogrammétrie

Pour modéliser le cénotaphe de la Hofkirche à Innsbruck, Hanke & Boehler [HAN04] ont tout d'abord procédé à un lever topographique du tombeau afin d'en acquérir les formes générales puis ont densifié les points par photogrammétrie. Cette deuxième étape consistait en la réalisation de couples stéréoscopiques pour modéliser le relief en haute résolution et pour créer les textures. Ce procédé permet d'avoir un très bon niveau de détail lors de la stéréorestitution, mais les lignes restituées ont été saisies par un opérateur qui joue le rôle d'interprète et dont la subjectivité peut nuire à la modélisation. Par contre la qualité métrique est indiscutable. Dans un deuxième temps, ils ont effectué deux levés lasergrammétiques en utilisant deux scanners différents : le MENSIS S 25 a scanné les formes générales du cénotaphe tandis que le capteur optique GOM ATOS II a numérisé les plaques de marbre autour du cénotaphe avec un haut niveau de détail et qui a la particularité de projeter une grille sur l'objet en utilisant deux caméras pour analyser l'image résultante. Le logiciel Raindrop Geomagic Studio a été utilisé pour traiter les données acquises avec les scanners laser. Pour de très petits détails il était nécessaire d'utiliser les photos pour obtenir une restitution qui compléta la numérisation par scanner, car ces détails n'y apparaissaient pas (cf. Figure 1-3).



**Figure 1-3 : Modélisation du cénotaphe de la Hofkirche**  
A gauche, résultat de la stéréorestitution d'une plaque de marbre du cénotaphe ; à droite, modèle 3D issue des données numérisées par scanner laser ([HAN04])

#### 1.3.2. Scanner laser et photogrammétrie rapprochée



**Figure 1-4 : Modélisation des statues du Pharaon Pepi I**  
A gauche, photo des deux statues du Pharaon Pepi I ; à droite, nuage de points résultant du scanner et points digitalisés par photogrammétrie ([HEI05])

Nous pouvons citer aussi Heinz & Müller [HEI05] qui ont modélisé les deux statues de taille humaine du Pharaon Pepi I au musée égyptien du Caire en couplant la lasergrammétrie et la



photogrammétrie rapprochée. Ils ont acquis les formes générales des statues par un scanner laser à triangulation MENSİ et ont utilisé le logiciel 3Dİpsos pour le traitement des données. Au total 39 stations ont été nécessaires pour numériser près de 2.3 millions de points répartis en 80 séquences. Le logiciel Raindrop Geomagic Studio a été utilisé pour manipuler le nuage de points créé et obtenir la modélisation. En complément de la numérisation au scanner laser, les lignes de jointures et les rivets ont été acquis par photogrammétrie rapprochée. Pour cette étape une caméra Rollei 6008 metric a été utilisée. Des points de repère ont été collés sur la statue. Les distances entre les points de repère ont été directement mesurées pour introduire le facteur d'échelle dans le modèle. Les coordonnées 3D des points marqués sur la statue ont été déterminées par la méthode des faisceaux (cf. Figure 1-4).

Dans un souci de précision, certaines équipes ont comparé la photogrammétrie et la lasergrammétrie. Par exemple Bitteli *et al.* [BIT02] ont comparé ces deux techniques pour la modélisation des nymphéas existants sur le site archéologique de Pompéi (Naples, Italie). Dans un premier temps, une campagne de photos a été entreprise à l'aide d'un appareil semi-métrique Leica R5 et d'une caméra numérique Nikon D1. Pour obtenir une bonne couverture stéréoscopique ils ont utilisé le système Cyclope, qui grâce à un système de caméra simple simulant l'utilisation d'une deuxième caméra, parvient à générer des mono ou des stéréorestitutions à l'aide d'un logiciel sans avoir besoin de déterminer de points de contrôle acquis, par des méthodes topographiques classiques. Cependant pour pallier les divers problèmes d'orientation externe, trois approches sont appliquées : la détermination des points de contrôle par des méthodes de topographie, la mise à l'échelle du modèle 3D après l'orientation relative, et finalement l'emploi du système Cyclop. Dans un deuxième temps, ils ont testé un lever au scanner laser en utilisant le scanner LMS-Z210. Ce scanner permet une acquisition des images en RVB. Le critère de précision entre les deux modèles est déterminé à partir d'un lever topographique des cibles servant de référence. La consolidation et le traitement du nuage de points ont pu se faire grâce au logiciel 3d RiVIEW Riegl.

Les distances absolues des modèles obtenues avec ces différentes techniques ont été comparées aux distances obtenues avec un lever réalisé avec une station totale (cf. Tableau 1-1). Bitteli *et al.* [BIT02] ont obtenu le tableau suivant (unité métrique) :

	Moyenne (m)	Ecart mini négatif (m)	Ecart maxi positif (m)	Ecart type (m)
Photogrammétrie (Orientations relative et absolue)	0,002	-0,012	0,012	0,008
Photogrammétrie (modèle mis à l'échelle par les coordonnées)	-0,002	-0,021	0,011	0,010
Scanner laser (système de coordonnées instrumental)	0,004	-0,020	0,022	0,010

**Tableau 1-1 : Test de précision : différences de distances absolues par rapport aux valeurs obtenues par une station totale ( [BIT02] )**

Le scanner se distingue par des avantages certains tels qu'un temps d'acquisition des données court, des modèles 3D très précis obtenus à partir de nuages de points très denses, un relevé sans contact avec l'objet, des résultats quasi immédiats et des mesures sur le modèle aisées.

### 1.3.3. Lumière structurée ou codée

D'autres méthodes peuvent être appliquées telles que l'utilisation de la lumière structurée ou codée. Akca *et al.* [AKC06] l'ont utilisé pour modéliser la statue de *Herakles (Hercule) fatigué s'appuyant sur la peau du lion qu'il vient de tuer*. Le principe de fonctionnement est le suivant : une des caméras du système a été remplacée par une source active de lumière pour illuminer l'objet en projetant sur celui-ci une figure géométrique connue. Le capteur utilisé est le Breuckmann opto TOP-HE qui fonctionne grâce à la technique dite du « *time-multiplexing* ». Nous verrons plus en détails le procédé mis en œuvre au paragraphe 2.2.5. Plusieurs logiciels ont été utilisés pour le traitement des données : LS3D pour l'enregistrement des données, Geomagic Studio pour le traitement du nuage de points et pour le maillage, Weaver pour la texture, Polyworks IM View pour la visualisation (cf. Figure 1-5).



Figure 1-5 : Projection des 4 premières séquences géométriques du scanner ( [AKC06])

Dans les exemples précédents, plusieurs techniques ont été utilisées pour numériser un même objet. Pour réaliser notre projet, nous ne voulons utiliser qu'une seule et même technologie à savoir le scanner laser.

## 1.4. La notion de modèle

### 1.4.1. La définition de « modèle »

Selon le domaine d'activité considéré il peut exister diverses définitions du mot « modèle ». Pour le travail que nous allons effectuer, nous pourrions prendre en considération les définitions suivantes :

- « Ce qui sert d'exemple, ce qui doit être imité. [...]Reproduction à petite échelle. » (Hachette [HAC94]).
- « Le modèle est d'abord la « maquette », l'objet réduit et manipulable qui produit en lui sous une forme simplifiée, « miniaturisée », les proportions d'un objet de grandes dimensions, qu'il s'agisse d'une architecture ou d'un dispositif mécanique. L'objet réduit peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne sont pas appliqués commodément à la chose produite. [...] La notion de modèle est associée à une idée de simplification systématique. » (Encyclopédia Universalis, [ENC95]).
- « Objet abstrait, construit selon des procédures dont on estime qu'il constitue une représentation suffisamment fidèle bien que simplifiée de la réalité. » (Ladriere [LAD91]).

Dans le travail que nous cherchons à produire, nous nuancerons la deuxième définition ([HAC95]) et celle donnée par Ladriere [LAD91]. En effet, nous nous attacherons à rester le plus fidèle possible aux statues que nous cherchons à numériser, tout en limitant au maximum les simplifications.

### 1.4.2. La modélisation en architecture

L'obtention d'un modèle suit un processus défini en trois étapes : l'acquisition des données, le traitement des données et la modélisation, c'est-à-dire la création du modèle. Bien que cette méthodologie reste constante son formalisme peut varier. Nous distinguerons trois types de modèles : le modèle issu d'une restitution, le modèle « tel que saisi », le modèle « tel que construit » comme le précise Fuchs *et al.* [FUC04].

#### 1.4.2.1. Le modèle 3D issu d'une restitution

Le modèle 3D issu d'une restitution est une représentation de reconstitutions de vestiges en états fragmentaires. Dans ce cas il est nécessaire de compléter le relevé par une expertise des archéologues ou des architectes qui valideront n dernier toutes les hypothèses émises.

1.4.2.2. Le modèle 3D « tel que saisi »

Le modèle 3D « tel que saisi » est le simple relevé de l'objet. Ainsi la modélisation restera la plus fidèle à l'objet tel qu'il existe. La pertinence du modèle dépend de la qualité de la nature du relevé effectué (cf. Figure 1-6).

1.4.2.3. Le modèle 3D tel « que construit »

Ce type de modèle, surtout utilisé dans l'industrie, se construit sur la base de mesures effectuées sur l'objet contrairement à une reconstitution. Aucune extrapolation n'est donc établie. Ce modèle est très utilisé en archéologie pour masquer notamment l'effet de l'érosion de la pierre. La modélisation construite sur la base des mesures jugées nécessaires représente un état géométriquement idéal (cf. Figure 1-6).



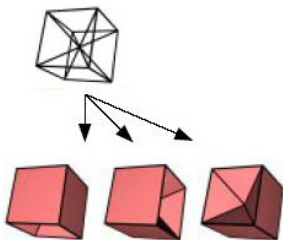
Figure 1-6 : Modèles architecturaux (Queste [QUE06], modifié de Kadi [KAD04])

Dans les travaux que nous aurons à effectuer, nous essaierons de réaliser au mieux des modèles « tels que saisis ».

1.4.3. Les différents types de modèles

D'après le chapitre de Grussenmeyer *et al.* [GRU01], il existe trois principaux types de modèles : le modèle filaire, le modèle surfacique, le modèle volumétrique.

1.4.3.1. Le modèle filaire



D'après Granddictionnaire@, le modèle filaire ou modèle 3D « fil de fer » est un « modèle 3D qui est décrit par tous les points et toutes les lignes qui le composent ». Il s'agit du premier modèle vecteur en trois dimensions. Il s'avère être relativement simple et même peut être trop simple, car il peut présenter des ambiguïtés quant à la représentation de n'importe quel type d'objet comme l'illustre la Figure 1-7.

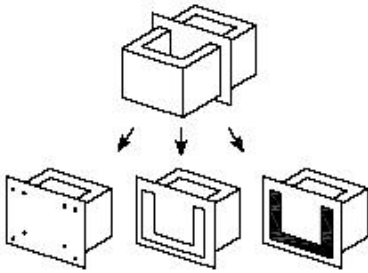
Figure 1- 7 : Représentation ambiguë d'un même objet (De La Losa [LOS00])

1.4.3.2. Le modèle surfacique

D'après Granddictionnaire@, le modèle surfacique ou modèle à facettes est un « modèle 3D qui est décrit par un ensemble de surfaces, dans lequel l'objet ouvert ou fermé est vide et à partir duquel il est possible de générer une représentation ligne cachée ou avec traitement des surfaces ».

Ces facettes analytiques qui possèdent des courbures différentes dans des directions diverses, peuvent s'avérer être difficiles à décrire. En effet, chaque facette est décrite indépendamment l'une de l'autre et malheureusement rien ne garantit la bonne description des contours. Bien qu'elle permette d'enlever les ambiguïtés du modèle filaire, cette représentation n'est pas suffisante.

### 1.4.3.3. Le modèle volumétrique



Ce type de modèle a pour objectif de combler les lacunes des modèles filaires et surfaciques. Il est donc complet et ne présente pas d'ambiguïtés. Les objets en 3D sont représentés par des volumes. On peut alors opérer sur les données des opérations booléennes et calculer des volumes (cf. Figure 1-8).

*Figure 1-8 : Représentations conformes à la réalité d'une boîte à l'aide de modèles filaire, surfacique et volumétrique (IGRU01)*

## 1.5. Les différentes techniques de modélisation

Pour arriver à un modèle cohérent plusieurs techniques de modélisation existent. Leur pertinence dépend du type d'objet à modéliser.

### 1.5.1. Inventaire de différentes méthodes de modélisation

De Luca [LUC06] distingue deux catégories de techniques de modélisation : les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points systématiques et les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points pertinents.

#### 1.5.1.1. Les techniques de reconstruction à partir d'un nuage de points systématiques

« Il s'agit de procédures d'interpolation ou d'instanciation automatique ou semi-automatique qui utilise comme données d'entrée un nuage de points issu d'un balayage laser » ([LUC06]). Nous pouvons citer la modélisation par un maillage polygonal et la modélisation à l'aide de primitives géométriques.

##### 1.5.1.1.1. Modélisation par un maillage polygonal

Le maillage, appelé aussi facettisation ou polygonisation, est certainement l'étape la plus adaptée pour obtenir un modèle polygonal cohérent. Cette méthode est en particulier très efficace pour modéliser des objets complexes tels que des statues, lorsque aucune autre solution ne convient. De nombreux logiciels de traitement de nuages de points s'appuient sur des méthodes voisines voire similaires. Pour réaliser un maillage complet nous distinguons quatre étapes principales : le prétraitement des nuages de points, la détermination de la topologie globale de la surface de l'objet, le maillage, l'optimisation du maillage.

#### ➤ Le prétraitement des nuages de points

Cette opération consiste à nettoyer le nuage de points afin de supprimer les données parasites constituées par les points de bruit des mesures et/ou d'échantillonner le nuage de points afin de diminuer la quantité de données à traiter et leur temps de calcul.

#### ➤ La détermination de la topologie globale de la surface de l'objet

Cette opération prend en compte les relations de voisinage entre les parties adjacentes de la surface. Le logiciel a besoin de connaître les contraintes de discontinuités pour préserver la définition des bords ([LUC06]). De ce fait, pour que le maillage soit cohérent, la normale aux points doit être calculée. La normale à un point d'une surface est le vecteur unitaire et orthogonal à tout autre vecteur tangent, en ce

point, à cette surface. Dans le cas d'un nuage de points, la surface maillée est inexistante puisqu'on cherche à la créer. De ce fait, pour chaque point, le logiciel considère l'ensemble des points voisins et calcule le meilleur plan. Pour finir le logiciel détermine la perpendiculaire à ce plan en un point et on obtient la normale en ce point à plus ou moins 200 gon près. En effet, cette normale peut être orientée vers l'intérieur ou vers l'extérieur de l'objet.

➤ Le maillage

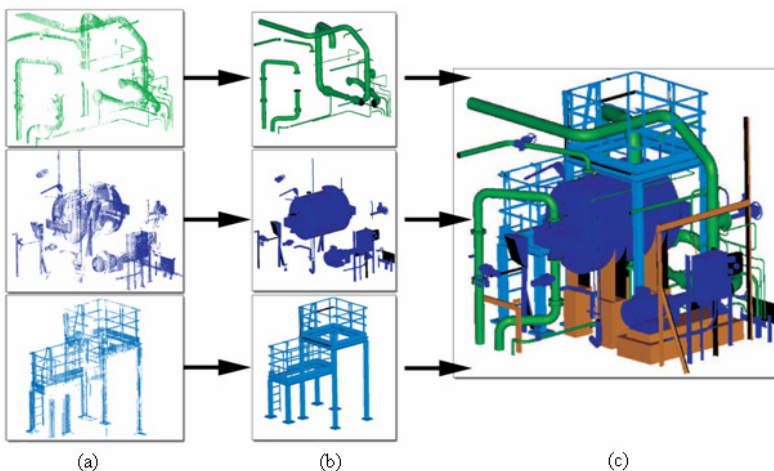
La définition de la topologie de l'objet et la définition des normales, permettent au logiciel de relier les sommets de points par des polygones, le plus souvent des triangles. On parle alors de triangulation. Des algorithmes permettent de construire les facettes entre les différents points du nuage. Un calcul par les moindres carrés permet de relier ensemble les facettes pour générer une surface. L'opérateur est souvent amené à préciser certains paramètres géométriques tels que la dimension des triangles (longueur des arêtes, angle entre les sommets). Si le nuage de points présente des trous dus à la présence de masques lors de l'acquisition des mesures, ils ne seront pas bouchés. Notons que ces imperfections peuvent être la source d'erreurs lors de la modélisation de l'objet en entraînant une triangulation fautive.

La triangulation peut présenter des degrés de complexité différents. Ainsi nous pouvons citer la triangulation en 2D où l'ensemble des points est projeté sur un plan, la triangulation en 2D 1/2 où l'ensemble des points est projeté sur un plan avec une valeur d'élévation pour chaque point, et la triangulation en 3D qui partitionne les données en un ensemble de « tétraèdres qui se rencontrent seulement aux faces partagées » ([LUC06]) c'est-à-dire aux sommets, arêtes ou triangles. Cette triangulation 3D est la plus compliquée et intervient réellement dans les trois dimensions.

➤ L'optimisation du maillage

Cette étape correspond au post-traitement de l'opération de maillage. Elle consiste en l'amélioration des imperfections générées lors du maillage. Elle peut être de nature diverse : le lissage du maillage et/ou le bouchage des trous. Il s'agit d'une opération principalement manuelle.

1.5.1.1.2. Modélisation à l'aide de primitives géométriques



Lorsque l'objet numérisé est composé de primitives géométriques simples (plans, cylindres, sphères...) des algorithmes basés sur les moindres carrés en permettent la reconnaissance automatique à partir des nuages de points. Cette modélisation est très rapide et est particulièrement adaptée à l'industrie (cf. Figure 1-9). Certains logiciels tels que 3DIpsos proposent des bibliothèques métiers pour permettre la meilleure modélisation possible.

Figure 1-9 : Modélisation par primitives géométriques ([FUC06] modifié)

(a) : Nuage de points organisé ; (b) : Reconnaissance des primitives et modélisation ; (c) : Assemblage

1.5.1.2. Les techniques de reconstructions à partir d'un nuage de points pertinents

« Il s'agit de techniques d'approximation manuelles qui décrivent les surfaces au travers de la manipulation d'un certain nombre de primitives géométriques et de fonction de modélisation » ([LUC06]).

Trois sortes de modélisations sont envisagées : la modélisation filaire, la modélisation par balayage, la modélisation par interpolation.

1.5.1.2.1. Modélisation filaire

A l’instar du modèle filaire, cette modélisation permet de construire le « squelette » de l’objet. Basée sur des courbes de différents de degrés, elle permet de décrire les contours de l’objet déterminés par des sommets et des arêtes connectés. Ces arêtes peuvent éventuellement servir à la génération de nouvelles surfaces. Les outils les plus fréquents sont les courbes de Bézier et les B-splines. Une courbe de Bézier est un segment de courbe cubique déterminé par quatre contraintes qui sont les deux points d’extrémité et deux points qui ne sont pas sur la courbe et qui définissent indirectement les tangentes vectorielles (Belbidia [BEL06]). Une courbe B-spline (*B : base, spline : bande métallique en anglais*) est une suite continue de segments de courbes cubiques, décrite de manière compacte. Chaque segment est défini par quatre points de contrôle, et deux segments successifs partagent trois points de contrôle ([BEL06]).

1.5.1.2.2. Modélisation par balayage

Cette technique correspond au déplacement d’une génératrice le long d’une directrice ([LUC06]). Quatre types de balayages sont proposés (cf. Figure 1-10). Le balayage translationnel est une extrusion. Le balayage rotationnel est la génération d’une surface de révolution autour d’un axe. Le balayage conique est une extrusion accompagnée d’un changement d’échelle. Le balayage composé est une extrusion accompagnée d’un changement d’échelle et d’une rotation ([LUC06]).

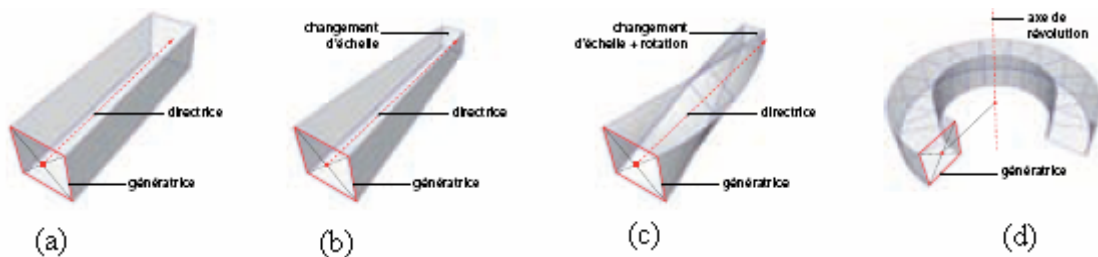
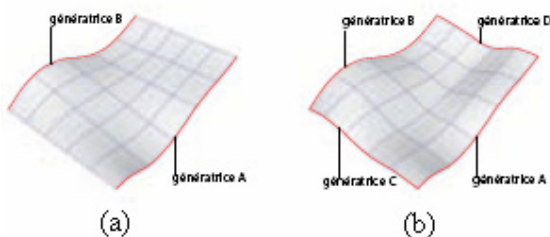


Figure 1-10 : Modélisation par balayage ([LUC06])

(a) : Balayage translationnel ; (b) : Balayage conique ; (c) : Balayage composé ; (d) : Balayage rotationnel

1.5.1.2.3. Modélisation par interpolation



La modélisation par interpolation permet de générer la surface la plus cohérente entre deux ou plusieurs génératrices. A partir des génératrices telles que les courbes B-splines, les courbes de Béziérs ou les NURBS (*Non Uniforme Rational B-Splines*), on essaie de créer des courbes lisses joignant des points (cf. Figure 1-11).

Figure 1-11 : Modélisation par interpolation

(a) : Tracé à deux génératrices ; (b) : Tracé à quatre génératrices ([LUC06])

1.5.2. Inventaire des logiciels de modélisation

Lorsqu’on traite des données issues de scanners laser, nous sommes souvent obligés d’utiliser plusieurs types de logiciels différents : des logiciels pour l’acquisition des données, des logiciels pour le traitement des nuages de points, des logiciels qui permettent de créer automatiquement des primitives



géométriques, des logiciels pour la création de modèles complexes, des logiciels pour l'application de textures (Boehler *et al.* [BOE02b]). La qualité de ces logiciels aura une influence non négligeable sur la qualité du modèle obtenu et sur le temps nécessaire à son exécution. L'i3mainz (i3mainz@) propose un inventaire non exhaustif des logiciels de modélisation présents sur le marché. Nous trouverons en Annexe 1 un tableau comparatif de ces logiciels. Nous pouvons compléter cette liste par les logiciels 3DIpsos développé par Trimble et 3DReshaper développé par la société française Technodigit.

Producer	Type
Inn.Tec s.r.l.	Reconstructor
InnovMetric Software	Polyworks
INUS Technology	RapidForm
Metris	Focus Inspection, Focus Reverse Engineering
kubit GmbH	PointCloud
metrologic group	Metrolog
Phocad GmbH	Phidias
UGS	Imageware
Raindrop Geomagic	Geomagic Studio
Pointtools	Pointtools View

**Tableau 1-2 : Inventaire des différents logiciels de traitement de nuage de points (i3mainz@).**

Suite à nos recherches, nous avons décidé d'évaluer et d'utiliser le logiciel 3DReshaper. En effet, les résultats fournis par Ravier [RAV06] et Fabry [FAB05] suite à l'utilisation de ce logiciel lors de leurs Projets de Fin d'Etude nous ont paru particulièrement probants. 3DReshaper est un logiciel de maillage 3D, particulièrement adapté pour la modélisation de formes complexes. Les outils intéressants qu'il présente sont : la réduction automatique du bruit, les diverses options disponibles pour construire les maillages 3D, le lissage des surfaces, la décimation « intelligente » des maillages, l'élimination des sommets pointus, le bouchage des trous. L'intérêt de ce logiciel est aussi de pouvoir contrôler notre travail avec le nuage de points bruts à tout moment du processus de modélisation en établissant une cartographie des écarts. Nous verrons plus en détail l'utilisation du logiciel au paragraphe 3.7.

Nous avons vu qu'il existe plusieurs technologies et techniques pour aboutir à un modèle de statue. Nous allons nous consacrer dans la partie suivante au cas particulier du scanner laser et du traitement des données qui en résulte.

## 2. Le scanner laser

### 2.1. Définitions

Le terme laser est l'acronyme de l'anglais *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* qui signifie amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement. Il s'agit d'une source de lumière artificielle permettant de produire des faisceaux très intenses de lumière cohérente (Landes [LAN06a]).

Les applications du laser sont nombreuses dans les domaines industriel, militaire, médical, les télécommunications mais aussi dans le domaine de la mesure.

Le principe de la mesure de distance avec un laser consiste à envoyer une brève impulsion lumineuse vers un objet. L'objet diffuse une partie de la lumière et une partie de cette dernière revient vers le point d'émission. Ainsi la distance séparant le laser de l'objet peut être déterminée. La plupart des instruments standard de topographie sont équipés de laser pour mesurer les distances. Depuis une dizaine d'années, des appareils permettant d'acquérir des milliers de points en quelques minutes se sont développés grâce aux mesures laser : ce sont les scanners laser.

Les scanners laser fonctionnent par balayage laser terrestre qui n'est autre que « l'utilisation d'un dispositif basé au sol, qui utilise un laser pour mesurer les coordonnées tridimensionnelles d'une région donnée de la surface d'un objet de façon automatique, dans un ordre systématique et à un taux élevé de vitesse » (Boehler & Marbs [BOE02a]).

En d'autres termes, un scanner laser mesure automatiquement un ensemble de points formant ce que l'on appelle un nuage de points connus dans un repère (X, Y, Z).

Le scanner laser est un instrument de mesure actif, car il émet son propre rayon laser et il n'a pas besoin d'éclairage extérieur.

Les coordonnées (X, Y, Z) de chaque point sont déterminées par la mesure de distance mais aussi par la position des miroirs oscillants qui composent le scanner.

Outre les coordonnées spatiales, certains scanners laser peuvent acquérir les valeurs d'intensité, c'est-à-dire la valeur exprimant la réponse du matériau au faisceau laser dans une nuance de 256 niveaux de gris ([LUC06]), ainsi que les valeurs colorimétriques, c'est-à-dire les valeurs RVB extraites à partir d'une caméra calibrée embarquée dans un module de balayage.

Si l'on peut faire une distinction entre les différentes technologies employées pour numériser des statues, nous devons nous attacher aussi à distinguer diverses méthodes d'acquisition. Il existe trois approches distinctes illustrées par la Figure 2-1 ([FUC06]) :

- dans le premier cas, l'objet est fixe et plusieurs capteurs sont disposés tout autour pour numériser la scène ;
- dans le deuxième cas, l'objet mesuré est fixe et le capteur est mobile. Ainsi il peut prendre plusieurs séries de mesures de l'objet étudié. Cette situation, typique des relevés architecturaux, suppose des possibilités ultérieures de référencement géométrique des différentes positions du capteur par rapport à l'objet mesuré ;
- dans le troisième cas, l'objet mesuré est disposé sur un plateau mobile et le capteur est fixe. Cette approche est envisageable dans le cas de la numérisation d'objets de petite taille.



Figure 2-1 : Variantes de numérisation d'un objet en 3D (Specht [SPE05])



Etant donné que les statues que nous devons numériser ne peuvent être déplacées, et que les scanners laser terrestres sont des appareils mobiles, nous serons dans le deuxième cas tout au cours de cette étude.

## 2.2. Les différents types de scanners laser

Il existe aujourd’hui quatre technologies de scanners laser que nous allons brièvement décrire ici.

### 2.2.1. Les scanners à mesure par triangulation

Le premier groupe de scanners est basé sur le principe de la triangulation. Les organes principaux de ce type de scanners sont : un laser, un miroir oscillant et un capteur CDD (*Coupled Charged Device*). La diode laser émet un faisceau lumineux qui est dévié par un miroir oscillant vers l’objet à numériser. La caméra CDD, qui est décalée du miroir selon une longueur de base connue, enregistre l’image du rayon laser réfléchi par l’objet (cf. Figure 2-2). L’angle du faisceau laser quittant le scanner est enregistré internement par un encodeur et la longueur de base a été déterminée par calibration. Par conséquent, les caractéristiques géométriques du faisceau émis et les positions respectives de l’émetteur et du récepteur sont connues. Nous ajoutons alors la position du point sur l’objet mesuré. Ainsi nous pouvons déterminer très précisément la position de ce point par trigonométrie dans le référentiel lié à la mesure. En effet, la distance de l’objet à l’instrument est calculée géométriquement à partir des valeurs des angles enregistrés et de la longueur de la base (Marbs *et al.* [MAR01], Fuchs [FUC06], Viguier [VIG06]).

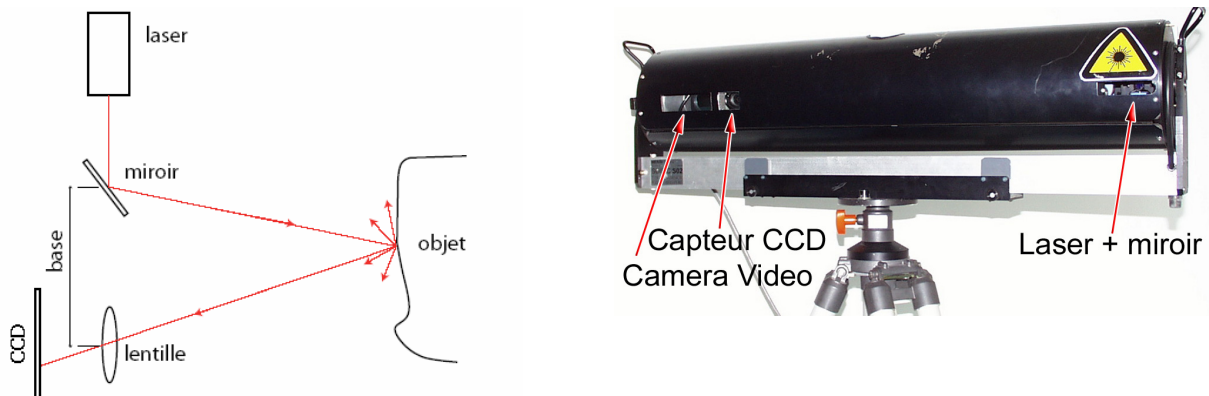


Figure 2-2 : A gauche, principe de la mesure par triangulation ([MAR01])

Figure 2-3 : A droite, le capteur SOISIC de Mensi ([FUC06])

Une utilisation optimale de ce type de scanner se fera avec une lumière ambiante relativement faible. De ce fait en extérieur les mesures s’effectueront de préférence la nuit.

Il est à noter que le problème de ce genre de scanner est que la précision de la mesure des points se dégrade proportionnellement au carré de la distance. De ce fait les scanners à mesure par triangulation sont utilisés pour de l’acquisition à courtes et moyennes distances ([FUC06]).

Une variante de ces scanners existe avec l’utilisation de deux caméras CCD positionnées alors sur chaque extrémité de la base du module. Le principe géométrique reste identique à celui utilisant une caméra. Les résultats présentent les mêmes caractéristiques d’exactitude, cependant la cadence de mesure est ralentie ([LUC06]). Un exemple de ce type de scanner est le SOISIC de Mensi (cf. Figure 2-3).

### 2.2.2. Les scanners à mesure de temps de vol

Les scanners laser à mesure de temps de vol déterminent la distance entre l’émetteur et l’objet en mesurant le temps que l’onde met pour parcourir le trajet aller-retour comme l’illustre la Figure 2-4. Ainsi la Formule 2-1 permet de connaître la distance :

$$D = \frac{1}{2} c \Delta t$$

**Formule 2-1 : Formule de détermination de la distance pour les scanners à mesure de temps de vol**

Nous rappelons que  $D$  est la distance en mètres,  $c$  la vitesse de la lumière en mètres par seconde, et  $\Delta t$  l'intervalle de temps en secondes mis par l'onde pour parcourir le trajet aller-retour entre le scanner et la cible.



**Figure 2-4 : A gauche, principe de la mesure du temps de vol ([MAR01])**

**Figure 2-5 : Au centre, le Leica HDS 3000 (Leica-geosystems@)**

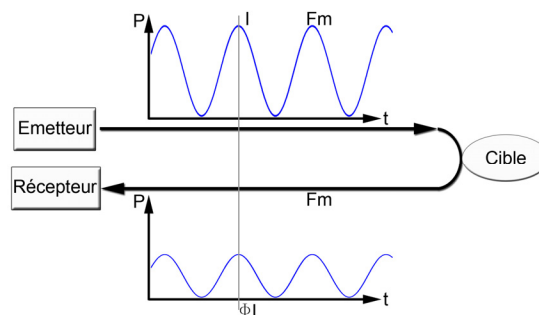
**Figure 2-6 : A droite, le Trimble GX (Trimble@)**

Il est à noter la présence d'au moins un miroir oscillant pour le déplacement angulaire du rayon laser. Comme exemple de scanner à mesure de temps de vol, nous pouvons citer le Leica HDS 3000 (cf. Figure 2-5) et le Trimble GX (cf. Figure 2-6).

### 2.2.3. Les scanners à mesure de différence de phase

Ce type de scanner laser mesure la différence de phase entre le signal émis et le signal reçu pour déterminer la distance scanner-objet. Ce procédé est utilisé dans la plupart des tachéomètres électroniques.

Le signal émis par le scanner est modulé en amplitude, c'est-à-dire que le signal provenant de la diode laser subit une modulation d'amplitude (cf. Figure 2-7).



**Figure 2-7 : Mesure de différence de phase et modulation d'amplitude ([FUC06])**

Parmi les scanners à mesure de différence de phase par modulation d'amplitude nous pouvons citer le capteur de Zoehler&Froehlich et le Faro LS.

### 2.2.4. Les scanners à repérage de position

Ces capteurs fonctionnent sur un principe très proche des scanners à triangulation. Cependant, ce sont des scanners beaucoup plus mobiles qui se repèrent dans l'espace selon deux méthodes principales : soit

un bras mécanique, soit un système électromagnétique tel que le système FastSCAN utilise (cf. Figure 2-8). De plus, ce capteur fonctionne avec deux caméras pour la mesure de retour.



Figure 2-8 : Le scanner FastSCAN de Polhemus (Polhemus@)

D'autres capteurs arrivant sur le marché sont capables de se repositionner seuls dans l'espace en utilisant une série de pastilles réfléchissantes collées sur ou autour de l'objet à numériser. C'est le cas du Handyscan créé par une équipe de recherche canadienne et commercialisé par l'entreprise Créaforme, (cf. Figure 2-9). La particularité de ce système est qu'il maille directement le modèle numérisé, et donc nous ne parlons plus de nuage de points dans le sens strict du terme.



Figure 2-9 : Fonctionnement du Handyscan (Handyscan@)

### 2.2.5. Le scanner à lumière structurée ou moirée

Ce type de scanner utilise le procédé de triangulation mais ne comporte pas de laser. Le principe de fonctionnement est le suivant : une des caméras du système a été remplacée par une source active de lumière pour illuminer l'objet en projetant sur ce dernier une figure géométrique connue (cf. Figure 2-10, Figure 2-11).

Ce procédé permet d'éliminer les problèmes de correspondance de façon directe. Plusieurs options sont possibles pour le choix de la source active de lumière.

Cette technique se base sur le fait d'une unique codification de chaque spot lumineux projeté sur l'objet. Quand un « spot » est détecté dans l'image, la correspondance est directement résolue par une « décodification » du signal. Ceci requiert un système complexe de projection lumineuse. Il existe plusieurs codifications possibles.

Un des systèmes les plus utilisés est le « time-multiplexing » ou codification temporelle grâce à un système combiné de traits et d'un déphaseur. Le multiplexage est en fait une opération qui consiste à combiner en un seul signal composite plusieurs signaux provenant de sources différentes, afin de pouvoir les transmettre simultanément sur une seule voie de communication.

Le capteur optique TOP-HE utilise cette technique. Une séquence de franges géométriques codées de façon binaire est projetée sur l'objet. Ceci divise l'objet en un nombre de  $2^n$  parties, où  $n$  est le nombre de séquences géométriques. Par conséquent, chaque pixel est associé à un code constitué d'une série de 0 et de 1 obtenu lors de la  $n$ -ième géométrie. Ce code détermine la correspondance entre les pixels image et le numéro des bandes du projecteur. Les coordonnées spatiales du point sur l'objet sont déterminées par les intersections spatiales fournies grâce au fait que la calibration du système est connue. Tous les pixels

appartenant à la même bande dans les plus hautes fréquences « du modèle » ont le même code. Ceci limite la résolution à la moitié de la taille de la plus petite des géométries. Une géométrie périodique additionnelle est projetée à plusieurs reprises en la changeant pour augmenter la résolution du système. Au final nous récupérons un nuage de points.

Pour obtenir plus d'informations sur cette technique d'acquisition, nous pouvons nous reporter aux travaux de Guhring [GUH01] et de Salvi *et al.* [SAL04].

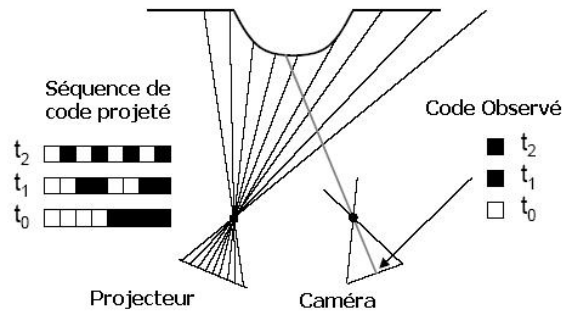
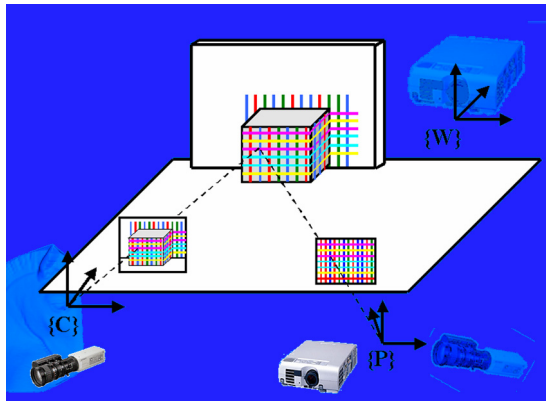


Figure 2-10 : A gauche, principe de la lumière structurée codée (Pagès [PAG04])

Figure 2-11 : A droite, projection de lumière structurée (Guhring, [GUH01])

### 2.3. Les critères de précision retenus

Les spécifications des précisions données par les constructeurs de scanners laser sont très difficilement comparables. Les expériences peuvent parfois montrer que nous ne devrions pas leur faire entièrement confiance et la précision de ces instruments, qui ne sont produits qu'en petites séries, varient d'un instrument à un autre et dépend de la calibration individuelle et du soin avec lequel les instruments sont manipulés.

Chaque nuage de points produit par un scanner laser contient un nombre considérable de points qui peuvent présenter de grossières erreurs. En effet, il est difficile voire impossible de contrôler la précision de chaque point d'un lever par lasergrammétrie. Nous devons donc considérer l'ensemble des paramètres qui peuvent influencer la précision des appareils utilisés. L'ensemble de cette partie a été rédigé grâce aux travaux de Boehler *et al.* [BOE03].

#### 2.3.1. Précision angulaire

L'impulsion laser est déviée par un petit système rotatif (miroir, prisme) et est envoyée vers l'objet. L'angle horizontal, perpendiculaire au premier angle, est changé en utilisant un axe mécanique ou un autre système optique de rotation.

Les mesures de ces angles sont utilisées pour le calcul des coordonnées des points 3D. Cependant les erreurs causées par les axes porteurs ou par le système de mesure d'angles provoqueront des erreurs perpendiculaires à la propagation du faisceau laser. Les positions des points seuls sont difficiles à vérifier. Par conséquent, seules quelques expériences sur ces problèmes sont connues. Les erreurs peuvent être détectées en mesurant de courtes distances verticales et horizontales entre les objets, par exemple des sphères, qui sont situées à distances égales du scanner et comparées à celles dérivées de mesures issues d'appareils topographiques beaucoup plus précis. La précision de ces mesures angulaires pourrait être améliorée en utilisant des dispositifs analogues à ceux utilisés dans les tachéomètres électroniques à savoir des cercles électroniques. Cependant la cadence d'acquisition des points serait réduite.

#### 2.3.2. Précision sur les mesures de distances

Lorsque nous mesurons une distance avec un scanner laser, elle est déterminée en utilisant le temps de vol de l'onde ou la différence de phase entre le signal émis et le signal reçu. Il est à noter que les scanners

ayant une portée supérieure à 100 mètres ont à peu près la même précision en distance, quelle que soit la distance. Les scanners à triangulation résolvent la détermination de distance grâce à un triangle formé par le système de déflexion du faisceau laser, le point réfléchi à la surface de l'objet et le centre de projection de la caméra décalée d'une certaine distance du déflexeur. Contrairement aux scanners à longues portées, la précision des distances acquises avec un scanner par mesure de triangulation diminue avec le carré de la distance scanner-objet.

L'erreur de distance peut être évaluée en observant des distances connues avec le scanner. Si le scanner n'est pas équipé d'un système de centrage tel que le centrage forcé, il est seulement possible de mesurer des différences de distance avec les cibles. En effet, des cibles planes, cylindriques ou sphériques peuvent être utilisées si leurs positions précises ont été relevées avec des instruments et des méthodes plus précises que le scanner laser. Une erreur d'échelle systématique sera présente dans n'importe quelle distance spatiale. Une erreur constante systématique telle que l'erreur de zéro sera éliminée en déterminant des différences de distances dans des directions différentes. L'erreur constante influencera les distances entre deux points qui sont situés dans des directions différentes du point de vue du scanner. Si les deux points sont situés à la même distance du scanner, la déviation de leurs distances sera proche de l'erreur de zéro quand les directions diffèrent de  $60^\circ$  ; elle sera de deux fois l'erreur de zéro quand les directions diffèrent de  $180^\circ$ . Cependant, comme les erreurs systématiques sur les distances varient en fonction du matériel de l'objet sur lequel le faisceau est réfléchi, une correction universelle pour une erreur de zéro ne peut être déterminée.

Un contrôle très rapide et très facile pour le bruit sur la mesure de distance (erreurs accidentelles, précision) peut être porté en positionnant une cible plane perpendiculaire à la direction d'observation du scanner que l'on numérise. Ainsi l'erreur moyenne quadratique des différences de distances des points par rapport à un plan intermédiaire à travers le nuage de points peut être déterminée.

### 2.3.3. Résolution

D'un point de vue utilisateur, la résolution d'un scanner laser décrit sa capacité à détecter de petits objets ou les détails de l'objet. D'un point de vue technique, la résolution du scanner laser est liée à deux paramètres à savoir le plus petit intervalle de mesure angulaire et la taille du spot sur l'objet.

### 2.3.4. Taille du spot laser

La taille du spot laser dépend de la taille du faisceau à la sortie du scanner mais aussi de la divergence du faisceau laser. Ce dernier paramètre, qui permet de définir la résolution, est l'empreinte du faisceau laser sur l'objet que nous cherchons à numériser.

Lorsque la taille du faisceau laser est importante, c'est-à-dire au-delà de 1 cm, moins de détails sont observés.

### 2.3.5. Intervalle minimum angulaire

L'intervalle minimum de mesure angulaire est le plus petit intervalle de mesure d'angle entre deux points successifs. Il est à noter que si la taille du spot laser est supérieure à l'intervalle minimum angulaire, le nuage de points résultant sera alors fortement bruité.

### 2.3.6. Les effets de bord

Comme nous venons de le voir le spot laser a une certaine taille. Quand le spot laser touche le bord d'un objet, seule une partie du rayon est réfléchi. Le reste peut être réfléchi par des surfaces adjacentes, une surface différente derrière le bord, ou ne pas du tout être réfléchi si l'objet en arrière-plan est plus éloigné que la portée maximale du laser. Quel que soit le type de scanner utilisé, cela produit un ensemble de points faux à proximité des bords.

Les points faux se situent d'habitude selon la direction du rayon laser à la sortie du système de déflexion jusqu'au point du bord, derrière le bord selon le point de vue du scanner. L'erreur sur la distance

peut varier de quelques fractions de millimètres jusqu'à plusieurs décimètres. De plus, la représentation des objets dans le nuage de points est plus grande que la réalité puisque le point sera enregistré à une position angulaire correspondant au centre du rayon laser même si seul le bord du faisceau touche l'objet. Les points faux sont inévitables. En effet, il est impossible de réduire la taille du spot laser à celle d'un point. Pour essayer de diminuer cet effet, il est conseillé d'utiliser un scanner qui permet de faire un autofocus pour chaque point enregistré.

### 2.3.7. Influence de la réflectivité des surfaces

L'intensité du signal réfléchi vers le scanner laser est influencée (hormis les autres effets tels que la distance, les conditions atmosphériques, et l'angle d'incidence) par les capacités réfléchives de la surface de l'objet. La réflectivité d'une surface correspond à la fraction de l'énergie rayonnée incidente réfléchie par une surface exposée à un rayonnement uniforme produit par une source et occupant tout le champ de visée. Les surfaces blanches présentent une forte réflectivité alors que les surfaces noires auront une très mauvaise réflectivité. Les effets des surfaces colorées dépendent des caractéristiques spectrales du laser (vert, rouge, proche infrarouge). Les surfaces brillantes demeurent très difficiles à enregistrer.

Il a été observé que sur des surfaces avec des réflectivités différentes des erreurs systématiques sur la détermination de distances peuvent survenir. Pour certains matériaux, ces erreurs peuvent s'élever à plusieurs fois l'erreur moyenne quadratique d'une simple mesure de distance.

### 2.3.8. Conditions environnementales

#### 2.3.8.1. Température

Les scanners fonctionnent correctement pour une plage de température donnée. Même à l'intérieur de cette plage de température, des déviations peuvent être observées et notamment dans la détermination des distances. Il faut noter que la température à l'intérieur du scanner peut être beaucoup plus élevée que la température ambiante à laquelle sont faites les mesures. Ceci est dû à la chaleur interne de l'appareil mais aussi aux conditions d'exposition de l'appareil au soleil.

#### 2.3.8.2. Atmosphère

Comme dans tout système de mesure optique de distance, les changements de la vitesse de propagation de la lumière dus à la température et les variations de la pression affectent le résultat. Pour de petites distances cet effet est souvent négligé. En outre la prise de mesures dans un environnement poussiéreux ou en présence de fumée présentera les mêmes effets que ceux décrits pour les effets de bord.

#### 2.3.8.3. Radiations interférentes

Les lasers fonctionnent dans des bandes de fréquences très limitées. Néanmoins, des filtres peuvent être appliqués sur l'unité de réception du signal autorisant seulement ces fréquences à être enregistrées. Si la radiation de la source de lumière (soleil ou lampe) est plus forte que celle du signal, une quantité non négligeable de ces radiations ambiantes passera le filtre et influencera la précision des mesures ou empêchera la prise de mesures.

Pour essayer de contrer les effets de l'atmosphère et de la température, la plupart des scanners sont équipés de thermomètres et de baromètres internes.



## 2.4. Comparaison des différentes technologies

Le Tableau 2-1 présente les caractéristiques « moyennes » des différentes sortes de scanners. Notons qu’il est tout à fait possible de trouver des scanners appartenant à l’une de ces catégories et dont les caractéristiques peuvent être différentes. Ce tableau a été réalisé grâce à Viguier [VIG06], Gim@ et i3mainz@. Un tableau comparatif de différents scanners est disponible en Annexe 2. Notons que les scanners à lumière structurée ou codée ne figurent pas dans le Tableau 2-1 à cause de leurs spécificités. En moyenne la surface de mesure qu’ils prennent en compte varie de 125 x 125 mm<sup>2</sup> à 2000 x 2000 mm<sup>2</sup>, ils sont capables d’acquérir entre 1 et 4 millions de points en une seconde avec une résolution spatiale allant de 0.07 mm à 1.4 mm.

	Précision sur les distances	Variation de la précision	Portée	Vitesse d’acquisition	Utilisation
<b>Scanners à triangulation</b>	< 1 mm à 1 m	Dégradation de la précision proportionnelle au carré de la distance	De 1 à 50 m	100 à 500 points/s	Majoritairement utilisés pour des pièces de petite taille
<b>Scanners à mesure de temps de vol</b>	< 7 mm à 50 m < 1 cm à 100 m	Précision constante quelle que soit la distance	De 1 à 1200 m	De 100 à 7000 points/s	Utilisés pour la majorité des travaux topographiques
<b>Scanners à mesure de différence de phase</b>	< 6 mm à 50 m < 1 cm à 100 m	Précision constante quelle que soit la distance	De 1 à 80 m	De 100000 à 500000 points/s	Utilisés pour des chantiers à « disponibilité réduite »
<b>Scanners à repérage de position</b>	Environ 1 mm à 20 cm	Dégradation de la précision proportionnelle au carré de la distance	De 5 à 60 cm	De 10000 à 20000 points/s	Utilisés pour de petites pièces

Tableau 2-1 : Comparaison des différents types de scanners

## 2.5. Présentation des systèmes utilisés

Pour la numérisation en trois dimensions, le laboratoire MAP-PAGE possède un scanner laser Trimble GX. Le but du laboratoire était de voir les possibilités de ce scanner quant à l’acquisition à courte distance pour la modélisation des statues. Au cours du projet, l’entreprise FARO a prêté un scanner laser Faro LS 820 qui a également permis d’obtenir des acquisitions sur des statues de la gypsothèque. Les fiches techniques de ces deux scanners sont disponibles respectivement en Annexe 3.1 et en Annexe 3.2.

### 2.5.1. Le scanner laser Trimble GX

Le scanner laser Trimble GX est un scanner qui détermine les distances en mesurant le temps de vol de l’onde pour faire le trajet aller-retour entre le scanner et l’objet (cf. Figure 2-6). Le scanner est capable d’acquérir des données selon un champ de vue de 360° en horizontal et de 60° en vertical (40° au-dessus de la ligne d’horizon, et 20° en dessous). Il permet d’acquérir jusqu’à 5000 points/s. Ce scanner mesure des distances comprises entre 2 m et 200 m et jusqu’à 350 m en mode *overscan*. La précision de mesure de distance sur un point est de ± 7 mm à 100 m. Les angles horizontaux sont déterminés avec une précision de ± 60 µrad (3.8 mgon) et les angles verticaux avec une précision de ± 70 µrad (4.5 mgon). Le laser utilisé est de type pulsé et a une longueur d’onde de 532 nm, qui correspond à la couleur verte. C’est un laser de classe 3R (cf. Annexe 4). Le diamètre du spot laser est de 3 mm à 50 m.

### 2.5.1.1. Principe de fonctionnement

Le scanner laser Trimble GX fonctionne grâce à un laser à impulsion. Il est équipé d'un distancemètre dont le rayon est dévié par deux miroirs rotatifs. Le premier miroir tourne selon l'axe vertical, le second selon l'axe horizontal. Des encodeurs permettent de mesurer les angles de rotation des miroirs afin de déterminer les coordonnées 3D des points numérisés.

Le scanner utilise un autofocus pour le laser ce qui est très utile pour des mesures à courtes distances. En effet cette caractéristique garantit un spot laser de petite taille même lors de mesures de différentes distances au sein d'une même numérisation. Il est à noter que la taille du spot laser varie de 0.3 mm à 5 m jusqu'à 1.5 mm à 25 m. Ces données sont cohérentes avec une résolution spatiale de 3.2 mm à 100 m.

Une des caractéristiques importantes du scanner laser Trimble GX est qu'il peut fonctionner en mode polygonalement, c'est-à-dire qu'il est possible d'orienter une station à l'aide de points connus dans un système de coordonnées. Dans ce cas, le scanner fournit des nuages de points déjà orientés les uns par rapport aux autres ce qui évite les procédures de consolidation comme nous le verrons au paragraphe 2.6.2.

En plus de la mesure laser, une caméra vidéo permet l'enregistrement de différentes vues de la scène. Il est d'ailleurs possible d'acquérir un nuage de points colorés à l'aide de la couleur des pixels de ces images.

De plus, ce scanner corrige de lui-même les coordonnées des points en fonction de l'inclinaison de l'appareil grâce à un compensateur actif.

### 2.5.1.2. Etude de précision de la détermination de la distance

Nous pouvons donc mesurer la distance par la méthode de calcul du temps de vol grâce à la Formule 2-1.

Nous rappelons que  $D$  est la distance en mètre,  $\Delta t$  le temps de parcours aller-retour de l'onde en seconde, et  $c$  la vitesse de la lumière en mètres par seconde.

Le constructeur Trimble annonce que la précision sur une mesure de distance est de  $\pm 7$  mm à 100 m. Par conséquent il est nécessaire de connaître le temps de vol de l'onde à :

$$\Delta t = \frac{2D}{c} \quad \text{d'où} \quad \Delta t = \frac{2 \times 7 \times 10^{-3}}{300000000} = 4.7 \times 10^{-11} \text{ s} \text{ près.}$$

De telles précisions pour la mesure du temps sont inatteignables avec les procédés utilisés par Trimble. En effet, le scanner laser GX devrait être équipé d'une horloge atomique permettant de mesurer de si petites variations de temps, ce qui n'est actuellement pas le cas. Ce handicap inhérent à ce type de mesure est contré par l'utilisation d'une diode laser pulsée. L'envoi d'un grand nombre d'impulsions permet de faire varier l'écart-type de la moyenne de toutes ces mesures comme la racine carrée de leur nombre. Nous avons donc une interprétation statistique des résultats obtenus. De ce fait, pour satisfaire aux exigences des précisions requises, le scanner GX effectue plusieurs tirs par point mesuré. Cette donnée est un paramètre qui est réglable dans le logiciel PointScape lors de l'acquisition des données (de 1 à 99 tirs par points). Pour numériser l'Amazone de type « Mattéi », nous avons utilisé quatre tirs par points. Il est à noter que plus on augmente le nombre de tirs par point plus le temps d'acquisition est long.

Une telle performance n'est possible que parce que c'est le même système de détection qui voit une partie de l'impulsion de départ et l'écho retour. En effet, il existe une séparation temporelle nette entre ces deux signaux. Par conséquent, tout dérèglement du parallélisme entre les faisceaux aller-retour est éliminé.

### 2.5.2. Le scanner laser Faro LS

Le scanner laser FARO LS est un scanner qui mesure les distances en évaluant la différence de phase entre le signal émis et le signal reçu (cf. Figure 2-12).



### 2.5.2.1. Présentation des caractéristiques du scanner laser Faro LS

Ce scanner laser se caractérise par un champ de mesure important pivotant sur 360° selon une enveloppe horizontale et 320° selon une enveloppe verticale. Il permet d’acquérir jusqu’à 120000 points/s et a donc un rendement élevé. Le LS 840, que nous avons utilisé, mesure des distances comprises entre 0.60 m et 40 m tandis que le LS 880 mesure des distances comprises entre 0.60 m et 80 m. Cependant, il faut préciser pour ces dernières valeurs qu’elles dépendent de la lumière ambiante. En effet, pour le constructeur les tests sont effectués en laboratoire dans des conditions parfaites difficilement réalisables sur le terrain. La distance de mesure entière est atteinte sur des surfaces blanches mates à 90% avec un éclairage ambiant modéré. Il est à noter qu’une lumière plus vive réduit la portée effective du scanner. L’incertitude sur la mesure de distance est de  $\pm 3$  mm à 25 m. Sa résolution angulaire maximale est de 0.009°.

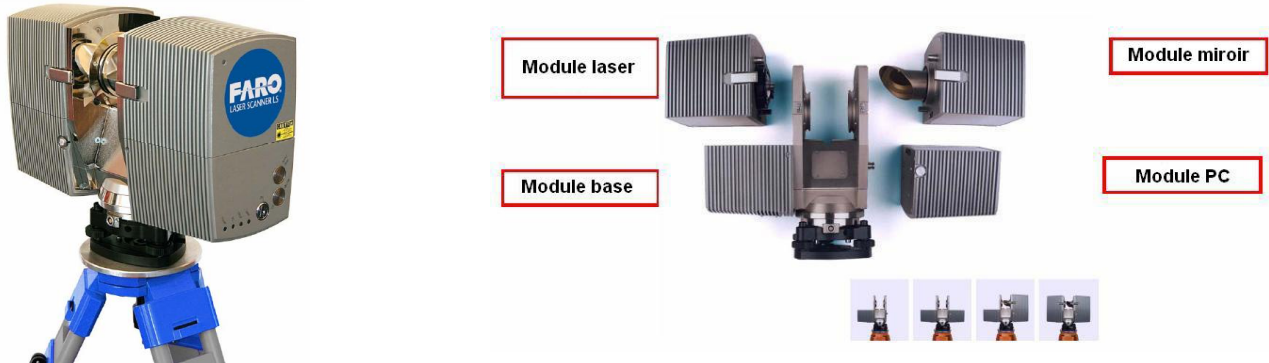


Figure 2-12 : A gauche, le scanner laser FARO LS (Faro@)

Figure 2-13 : A droite, interchangeabilité des modules du laser

Le laser utilisé a une longueur d’onde de 785 nm, qui correspond à l’infrarouge. C’est un laser de classe 3R (10 mW pour le LS 840, 20 mW pour le LS 880). Le diamètre du spot à la sortie du scanner est de 3 mm, la divergence du faisceau laser est de 0.25 mrad (0.016 gon). Ce scanner est composé de quatre modules interchangeables comme l’illustre la Figure 2-13.

### 2.5.2.2. Principe de fonctionnement

Le scanner laser FARO LS fonctionne en envoyant un faisceau infrarouge au centre d’un miroir rotatif (cf. Figure 2-14). Ce dernier, grâce à sa face biseautée à 45°, dirige le laser vers l’environnement à numériser. Le faisceau est en suite réfléchi vers le scanner et la différence de phase est mesurée pour déterminer la distance séparant le scanner de l’objet. En utilisant des encodeurs pour mesurer la rotation du miroir et la rotation horizontale du scanner laser, les coordonnées (X, Y, Z) de chaque point peuvent être calculées.



Figure 2-14 : Détail du miroir rotatif

Afin de déterminer les distances le scanner laser FARO mesure la différence de phase entre un signal émis et le signal reçu contrairement aux technologies basées sur la mesure du temps de vol de l’onde. Ceci signifie qu’au lieu qu’une simple impulsion soit émise et réfléchi et que le temps de vol soit mesuré, c’est un signal constant modulé en amplitude qui est envoyé. Lorsque l’onde rencontre un obstacle elle est réfléchi vers le scanner. Le scanner laser FARO LS utilise trois longueurs d’onde de modulation à savoir 76 m, 9.6 m et 1.2 m.

2.5.2.3. Le principe de mesure de la différence de phase

Le faisceau laser émet le signal avec une longueur d'onde  $\lambda$  qui se propage dans l'air à la vitesse de la lumière  $c \approx 300000 \text{ km/s}$ . Le signal a une période  $T$  pour une fréquence  $f$ . Nous savons que :

$$\boxed{\lambda = c \times T} \quad \text{or} \quad \boxed{f = \frac{1}{T}} \quad \text{donc} \quad \boxed{\lambda = \frac{c}{f}} \quad \text{et} \quad \boxed{f = \frac{c}{\lambda}}$$

**Formule 2-2 : Formule de la longueur d'onde en fonction de la période**

**Formule 2-3 : Formule de la fréquence en fonction de la période**

**Formule 2-4 : Formule de la longueur d'onde en fonction de la fréquence**

**Formule 2-5 : Formule de la fréquence en fonction de la longueur d'onde**

L'onde est émise par le scanner puis est réfléchiée par la cible. L'onde va donc parcourir deux fois la distance  $D$  séparant le scanner de l'objet dans un intervalle de temps  $\Delta t$  à la vitesse  $c$ . Par conséquent nous pouvons écrire que :

$$\boxed{2D = c \times \Delta t} \quad \text{et} \quad \boxed{\Delta t = \frac{2D}{c}}$$

**Formule 2-6 : Formule de calcul du trajet aller-retour de l'onde, et temps associé**

Le signal  $Y_{\text{scanner}_1}$  émis par le scanner est sinusoïdal, où  $a$  est l'amplitude du signal,  $\omega$  la pulsation et  $\varphi$  la phase :

$$\boxed{Y_{\text{scanner}_1} = a \times \sin(\omega t) = a \times \sin(\varphi)}$$

**Formule 2-7 : Signal sinusoïdal émis**

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T}}$$

**Formule 2-8 : Pulsation du signal sinusoïdal**

$$\boxed{\varphi = \omega t}$$

**Formule 2-9 : Phase du signal émis**

Lorsque le signal réfléchi par la cible atteint le scanner, la vibration aura la même élongation que la vibration de l'onde à l'émission au temps  $(t - \Delta t)$ .

De ce fait nous aurons :

$$\boxed{Y_{\text{scanner}_2} = a \times \sin(\omega(t - \Delta t)) = a \times \sin(\varphi - \Delta\varphi)}$$

**Formule 2-10 : Signal sinusoïdal reçu**

Par conséquent :

$$\boxed{\omega \Delta t = \Delta\varphi} \quad \text{donc} \quad \boxed{\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\omega} = \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) \times T}$$

**Formule 2-11 : Formule de la différence de phase**

**Formule 2-12 : Calcul de la variation du temps**

Nous pouvons donc déduire la différence de phase entre le signal émis et le signal reçu par :

$$\boxed{\Delta\varphi = 2\pi \times \Delta t \times \frac{1}{T}}$$

**Formule 2-13 : Calcul de la différence de phase**

En utilisant la Formule 2-6 nous obtenons :

$$\Delta\varphi = 2\pi \times \frac{2D}{c} \times \frac{1}{T} = 2\pi \times 2D \times \frac{1}{\lambda}$$

**Formule 2-14 : Expression de la différence de phase en fonction de la distance**

Nous pouvons en déduire la distance par :

$$2D = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times \lambda$$

**Formule 2-15 : Expression de la distance en fonction de la différence de phase**

Or d’après la formule 2-4 :

$$2D = \left(\frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) \times \frac{c}{f}$$

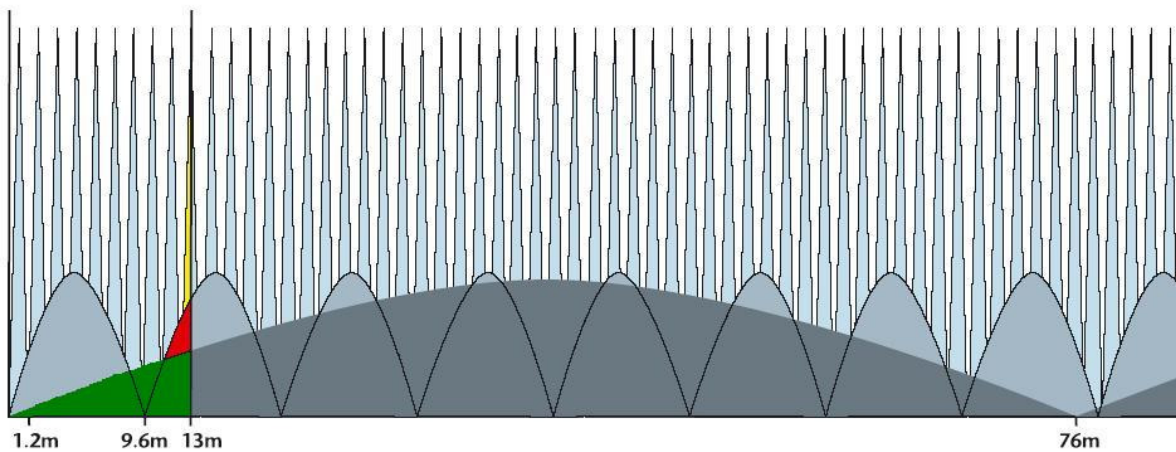
**Formule 2-16 : Expression de la distance en fonction de la fréquence**

Cependant  $\Delta\varphi$  ne permet pas de déterminer D directement, car nous faisons face au phénomène de l’ambiguïté entière.

$$2D = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times \frac{c}{f} + k \times \frac{c}{f} \quad \text{où} \quad k = \text{inconnu} \quad \text{et} \quad \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \times \frac{c}{f} = \text{appoint}$$

**Formule 2-17 : Introduction de l’ambiguïté entière**

Donc on utilise différentes fréquences spatiales f1, f2, f3 qui permettent de mesurer des  $\Delta\varphi$  différents et de calculer D.



**Figure 2-15 : Utilisation de trois longueurs d’onde de modulation [Faro@]**

Le scanner laser FARO possède trois longueurs d’onde de modulation à savoir 76 m, 9.6 m et 1.2 m. La distance scanner objet est déterminée en identifiant la localisation de la réflexion sur le cycle de 1.2 m. Dans un premier temps le cycle où la réflexion a lieu doit être identifié. Puis on cherchera pour chaque cycle le moment où la lecture de distance commencera (cf. Figure 2-15).

Une distance de 2 m mesurée seulement sur la modulation de 1.2 m serait seulement déterminée comme une distance de 0.8 m, car la mesure se ferait sur le second cycle sans qu’il y ait une longueur d’onde de modulation pour l’indiquer. Nous avons donc une ambiguïté. Par exemple une réflexion de 13 m serait enregistrée à l’intérieur du cycle de 76 m de longueur (en vert sur la Figure 2-15). Cette mesure se situe dans le deuxième cycle de 9.6 m de longueur (en rouge sur la Figure 2-15). La précision de la détermination de la distance est complétée en mesurant dans le second cycle de longueur d’onde 1.2 m situé après le

commencement du deuxième cycle de 9.6 m de longueur d'onde (en jaune sur la Figure 2-15). Grâce à sa longueur d'onde de modulation de 76 m le scanner laser FARO est capable de mesurer des distances de 76 m sans ambiguïté.

Pour mesurer la phase le scanner utilise un phasemètre numérique. Les signaux de modulation sinusoïdaux sont transformés en signaux rectangulaires, c'est-à-dire en impulsions. Les flancs montants et descendants ouvrent une « porte de mesure ». Lorsque cette porte s'ouvre, un compteur électronique enregistre les impulsions de comptage produites par l'oscillateur et détermine ainsi le déphasage entre l'émission et la réception.

Un seul comptage ne serait pas suffisant en terme de précision à cause de la fluctuation du déphasage due aux bruits électroniques et aux turbulences de l'air. Afin d'augmenter la précision du résultat, un grand nombre de ces comptages digitaux sont effectués pour calculer une moyenne.

La différence de phase peut être facilement mesurée avec une erreur relative de  $10^{-4}$  ou  $10^{-5}$ . On considère que l'unité de mesure couramment utilisée est la demi-longueur d'onde de modulation de la mesure fine ( $=\frac{\lambda}{2}$ ). Si la différence de phase est mesurée avec une erreur relative de  $10^{-4}$ , alors la distance est mesurée avec une précision sub-millimétrique :

$$\Delta D = \frac{10^{-4}}{4\pi} \times \frac{76}{2} = 3.02 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Toute la partie calculatoire de ce paragraphe a été rédigée avec l'aide de Ledig [LED06].

## 2.6. Chaîne classique du traitement des nuages de points

La chaîne classique du traitement des nuages de points se décompose en cinq étapes : l'acquisition, la consolidation, la segmentation, le filtrage et la modélisation.

### 2.6.1. L'acquisition des données

L'acquisition est un processus semi-automatique et totalement transparent pour l'opérateur. Concrètement l'opérateur met en station le scanner laser sur un point connu ou non. Il détermine le nombre de vues nécessaires à la numérisation globale de l'objet afin d'obtenir toutes les faces cachées. Bien souvent le scanner est piloté par un ordinateur. L'opérateur règle alors les paramètres d'acquisition tels que la fenêtre d'acquisition, la distance maximale de tirs, les pas angulaires de numérisation, le nombre de mesures par point. Il peut alors lancer la numérisation. Nous obtenons alors en fin d'acquisition un fichier de points sous forme de fichier texte et/ou sous forme de nuage de points.

Après avoir effectué toutes les stations essentielles au levé, nous devons consolider les nuages de points.

### 2.6.2. La consolidation

La consolidation est le rassemblement des différents nuages de points en un seul. Au sens où nous l'entendons elle correspond à deux étapes distinctes :

- la première est le recalage des nuages de points et consiste à regrouper tous les points de vues repérés les uns par rapport aux autres dans un référentiel unique. Nous pouvons donc obtenir une vision complète de l'objet, les trous générés par les angles morts d'une prise de vue sont souvent complétés par une autre prise de vue ;

- la deuxième étape est la fusion des données.

Que ce soit avec le logiciel RealWorks de Trimble ou Faro Scene de Faro, le recalage des nuages de points peut se faire selon trois méthodes :

- la première méthode consiste à mesurer très précisément les coordonnées de cibles positionnées autour de l'objet numérisé en utilisant un tachéomètre et un cheminement polygonal. Pour une cible donnée, nous affectons alors les mêmes coordonnées dans l'ensemble des nuages de points ;
- la deuxième méthode consiste en un regroupement « nuage par nuage » : elle nécessite que les différents nuages de points présentent des recouvrements. L'opérateur doit sélectionner trois points communs sur chaque nuage. Le logiciel recherche alors le point homologue dans chaque nuage de points. Il utilise alors l'algorithme *Iterative Closest Point* (ICP) ou méthode du plus proche voisin qui se base sur les moindres carrés, et permet d'aligner les nuages en tenant compte de la totalité des points du nuage ;
- la troisième méthode consiste à faire coïncider des éléments communs dans les différents nuages de points. Ces éléments peuvent être soit des cibles, soit des sphères d'un rayon connu par le logiciel. Dans notre cas, nous avons utilisé des sphères que nous avons placées judicieusement tout autour de la statue mais aussi en hauteur afin de minimiser les erreurs de recalage dans la troisième dimension. Lors de la numérisation on veillera à ce qu'il y ait au moins trois sphères visibles. En effet, seules trois sphères sont nécessaires pour pratiquer cette méthode. Un nombre plus élevé de sphères est cependant souhaitable pour contrer les erreurs de mesure.

Nous verrons plus en détail ce dernier point au paragraphe 3.6.

Suite au recalage des différents nuages de points, le logiciel procède à la fusion des données en un fichier unique.

L'étape suivante est la segmentation des données.

### 2.6.3. La segmentation

La modélisation peut être plus aisée lorsque l'on segmente le nuage de points. C'est le procédé qui permet qu'un groupe de points appartenant à un même objet ou à une même surface puisse être référencé de la même manière. C'est une organisation logique du nuage de points. La segmentation des nuages de points sert aussi à les nettoyer pour ne conserver que la partie utile de la scène 3D d'acquisition. Cette étape peut être manuelle bien qu'il existe plusieurs approches de segmentations automatiques. Celles-ci diffèrent principalement dans la méthode ou le critère utilisé pour mesurer les similitudes entre un jeu de points donné, et l'établissement de la frontière pour regrouper dans un même ensemble les points. Nous trouvons dans la littérature beaucoup d'approches permettant de rendre cette étape la plus automatisée possible.

Parmi les algorithmes existants nous pouvons citer la segmentation basée sur les bords et leur reconnaissance, la segmentation basée sur les surfaces, la segmentation basée sur les lignes de scan. Cependant dans ces différentes méthodes certains problèmes demeurent comme, d'une part, le fait que ces approches se limitent à la reconnaissance de surfaces planes et d'autre part beaucoup de méthodes de segmentations ont un grand nombre de paramètres dont les significations et les effets sur la segmentation finale ne sont pas toujours clairs.

Rabbani *et al.* [RAB06] procèdent à la segmentation en utilisant les contraintes de lissage. Cette segmentation se fait en deux temps : l'estimation des normales par la méthode des K plus proches voisins ou des voisins à distance fixée, et l'accroissement des régions.

Belton & Lichti [BEL06] proposent une méthode de classification des points pour aider à la segmentation. Cette méthode utilise la variance de la courbure dans un voisinage local. Le principe de ce procédé est qu'il se sert de la matrice de covariance du voisinage du point considéré dont on extrait les valeurs propres et les vecteurs propres afin de classer l'ensemble des points. Un algorithme de croissance des régions est appliqué en sélectionnant un point arbitraire qui a été classifié comme un point de surface.

Les travaux de Bucksch & Appel Van Wageningen [BUC06] montrent qu’une segmentation à partir d’une squelettisation du nuage de points en utilisant les *octrees* est possible.

En principe un *octree* est une division récursive d’une cellule cubique en huit cellules carrées de même taille et plus petites. Cette opération continue jusqu’à atteindre la taille minimale désirée (cf. Figure 2-16). L’espace est alors découpé en cubes de tailles différentes et ce découpage peut être représenté par un arbre. La racine de l’arbre est l’espace global, les nœuds sont les cubes découpés en huit, et les feuilles stockent l’information « espace occupé » ou bien « espace inoccupé » (De La Rosa [LOS00]).

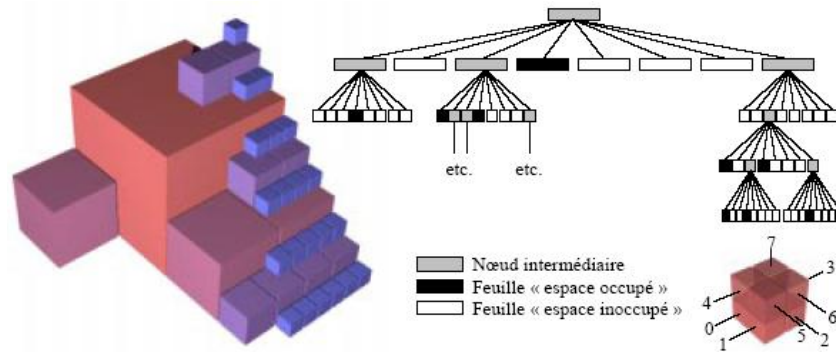


Figure 2-16 : Objet décomposé en octrees et une partie de son arbre ([LOS00])

#### 2.6.4. Le filtrage

La phase de filtrage est souvent une étape nécessaire à l’obtention d’un modèle cohérent. Son objectif est de réduire le bruit sur la mesure en appliquant un processus de correction et/ou de suppression des points faux dans le nuage. Les raisons qui peuvent provoquer du bruit sur la mesure ont été énumérées au paragraphe 2.3.

Des exemples de procédures de filtrage seront plus détaillés au paragraphe 3.5.1.

#### 2.6.5. La modélisation

A partir d’un nuage de points la modélisation la plus adaptée est le maillage pour l’obtention d’un modèle cohérent. Nous avons déjà détaillé cette procédure dans le paragraphe 1.5.1.1.1.

Nous avons utilisé les scanners Faro LS et Trimble GX afin de numériser une statue à la gypsothèque. Ces données nous ont permis de mettre en place notre propre procédure de traitement des nuages de points. La partie suivante explicite le processus mis en place.



### 3. Expérimentations sur l'Amazone de type « Mattéi »

#### 3.1. Rappels historiques

##### 3.1.1. Origine des Amazones

Les Amazones sont un peuple légendaire de femmes guerrières descendant d'Arès, dieu de la guerre, et de la nymphe Harmonie. On trouve la légende des Amazones dans toute la littérature antique depuis Homère, jusqu'à la fin de l'Empire Romain, soit pendant près de treize siècles. Leur présence ne s'affirme pas que dans la littérature, puisque l'image de ces femmes est présente tant dans l'art monumental que dans la céramique la plus ordinaire et forme un thème majeur de l'art antique. Il s'avère qu'aujourd'hui plus de 5000 représentations sont conservées.

Violentées et abandonnées par leurs maris, les Amazones fondent un royaume et décident de se défendre elles-mêmes. Se gouvernant seules, elles se passent en toute chose des hommes qu'elles n'admettent qu'à des travaux serviles et dégradants. Elles savent faire la guerre et passent leur temps à s'entraîner. Les Amazones sont représentées avec plusieurs armes : la lance quand elles sont à cheval, l'arc, la hache. La légende cependant se développe pour en faire un peuple belliqueux qui ne vit que pour le plaisir de la guerre et de la conquête. Comme elles font la guerre, elles refusent de s'occuper des enfants à la manière des femmes grecques : elles n'allaitent pas, elles rejettent ou mettent en esclavage les enfants mâles. Chez plusieurs auteurs, elles valorisent la virginité. De leur union avec des étrangers « au hasard », elles ne gardent que les enfants de sexe féminin ; et elles brûlent le sein droit de leurs filles pour leur faciliter l'exercice de l'arc : c'est pourquoi leur nom qui vient du grec *a mazos* signifie « celles qui n'ont pas de sein » (Educnet@, Universalis@ et Frémy & Frémy [FRE96]).

##### 3.1.2. L'amazone de type « Mattéi »

Pline l'Ancien a conservé la mémoire d'un concours qui aurait opposé les plus célèbres sculpteurs de la Grèce à savoir Phidias, Polyclète, Crésilas, Phradmon et Cydon. Les sculpteurs devaient exécuter une Amazone blessée devant orner le sanctuaire d'Artémis à Ephèse. Les éphésiens acquièrent les cinq statues. Les artistes étaient eux-mêmes les juges du concours. Tous se déclarèrent vainqueur, mais tous classèrent Polyclète en seconde position. Ce dernier remporta donc l'épreuve. Les originaux datant de 430 av. J.-C. ont disparu. Cependant un certain nombre de copies en marbre d'Amazones blessées ont été conservées (Gypsothèque@ et Educnet@).



(a)



(b)



(c)

Figure 3-1 : Les différents types d'Amazone, (Educnet@)

(a) : Amazone de type « Sciarra » ; (b) : Amazone de type « Sôsiclès » ; (c) : Amazone de type « Mattéi »

Trois types principaux sont identifiables, sans qu'il soit possible d'attribuer avec assurance chacun à l'un des concurrents (cf. Figure 3-1). Le premier type est vraisemblablement l'Amazone de Crésilas dite de type «Sciarra» (hauteur : 183 cm) qui se caractérise par un bras replié derrière la tête. Le deuxième est l'Amazone blessée de Polyclète dite de type « Sôsiclès » (hauteur : 202 cm) et qui est reconnaissable au fait qu'elle ait un bras vers la poitrine et un bras dressé vers l'avant. Le troisième type est l'Amazone de Phidias dite de type « Mattéi » (hauteur : 197 cm).

C'est sur la copie en plâtre de l'Amazone de type « Mattéi », présente à la gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg, que nous avons effectué nos tests pour mettre toute notre procédure en place.

### 3.2. Modification de la chaîne standard de modélisation

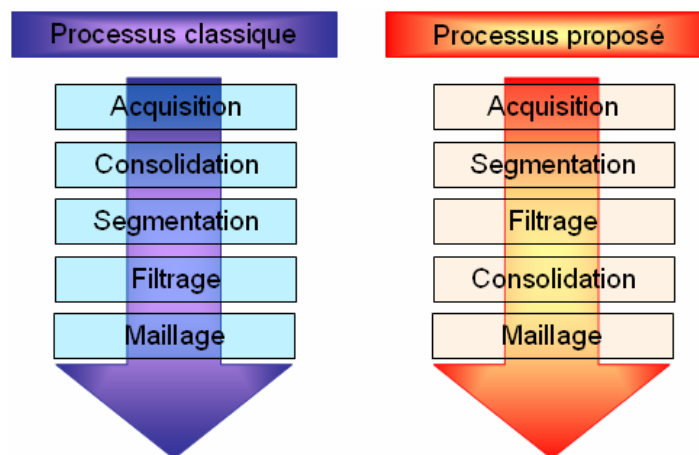


Figure 3-2 : Processus classique et processus proposé

L'originalité de notre projet réside dans le fait que nous modifions quelque peu la chaîne classique de modélisation décrite au paragraphe 2.6. Nous n'effectuons la consolidation des nuages de points qu'une fois le filtrage réalisé comme l'illustre la Figure 3-2. Par conséquent nous traitons les nuages de points indépendamment les uns des autres. Cette solution s'est imposée d'elle-même lors de la mise place du processus de filtrage. En effet, lorsque nous procéderons à la conversion des nuages de points en 3D en une fonction bidimensionnelle, nous exploiterons le fait que les nuages de points sont d'abord acquis par le scanner laser en coordonnées sphériques ( $\theta$ ,  $\varphi$ , R). Il en résulte que si l'on considère un nuage de points consolidé, nous pourrions nous trouver dans la situation où pour une même valeur angulaire  $\theta$  et une même valeur angulaire  $\varphi$ , il y aurait deux distances radiales R1 et R2 distinctes comme l'illustre la Figure 3-3. C'est pour contourner cette ambiguïté que nous avons décidé de modifier la chaîne standard de modélisation.

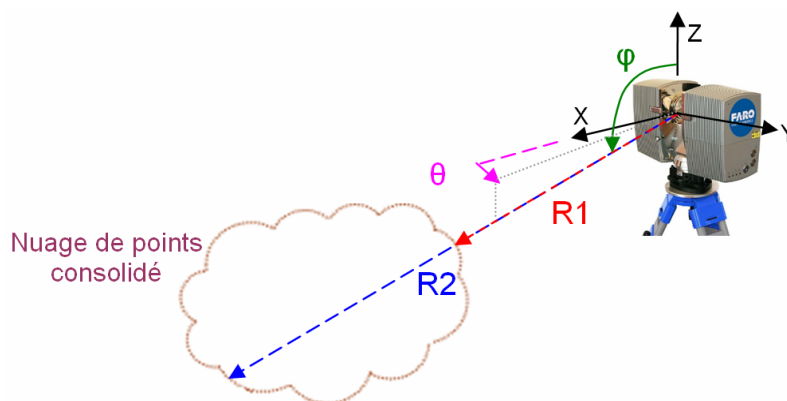


Figure 3-3 : Risque d'ambiguïté pour la détermination des points

### 3.3. Numérisation de l'Amazone de type « Mattéi » et maillage immédiat

L'Amazone de type « Mattéi » (cf. Figure 3-4) a été numérisée à l'aide des scanners laser Trimble GX et Faro LS afin de déterminer quelle technologie, à savoir la mesure de temps de vol ou la différence de phase, est la plus adaptée à la numérisation de statues.

#### 3.3.1. Déroulement du lever au scanner laser

##### 3.3.1.1. Numérisation au scanner Trimble GX

Afin de numériser l'Amazone avec l'un des deux scanners il est d'abord nécessaire de mettre en place des points de repère autour de la statue. En effet, celle-ci se trouvant au sous-sol du Palais Universitaire de Strasbourg, il aurait été impossible de produire un cheminement polygonal pour géoréférencer les divers scans avec le scanner Trimble GX. De plus, le scanner Faro est, quant à lui, dépourvu de système de centrage pour obtenir une polygonation. Nous avons donc disposé 13 sphères de rayons connus tout autour de la statue. Les sphères Trimble ont un rayon de 38.1 mm et les sphères Faro ont un rayon de 72.5 mm. Ces sphères vont servir à la consolidation des nuages de points comme nous le verrons au paragraphe 3.6.

Lorsque l'on utilise le scanner laser Trimble GX, nous faisons l'acquisition des points grâce aux logiciels PointScape ou PocketScape développés par Trimble selon que l'on dispose d'un ordinateur portable ou du boîtier de contrôle Recon.



Figure 3-4 : A gauche, Amazone de type « Mattéi », copie figurant à la gypsothèque de l'UMB Strasbourg 2 (Gypsothèque@)



Figure 3-5 : A droite, numérisation de l'Amazone avec le scanner Trimble GX

Quel que soit l'outil utilisé, ce dernier pilote directement le scanner. Etant donné que nous faisons des stations libres nous ne procédons pas à une mise en station à proprement parler, nous créons juste de nouveaux objets dans le projet. Grâce à la caméra placée dans le scanner, nous pouvons positionner le dispositif d'émission du laser en face de l'objet à numériser et définir une fenêtre d'acquisition soit rectangulaire, soit polygonale. On peut donc régler les paramètres de la numérisation. Afin de limiter la dispersion des points, nous avons effectué quatre tirs par points. Nous avons procédé à une numérisation avec une résolution de 2 mm à 10 m. L'Amazone n'étant pas déplaçable, il a été malheureusement impossible d'en numériser l'arrière. Par conséquent trois stations ont été nécessaires pour scanner le devant de la statue (une station de face et une station à la droite et une à la gauche de la statue). L'ensemble de la numérisation (environ 16 000 000 de points) s'est effectuée en un peu plus de huit heures. Le nuage de points de la statue seule compte environ 2 800 000 de points.

3.3.1.2. Numérisation au scanner Faro LS

Dans un deuxième temps nous avons numérisé l’Amazone avec le scanner Faro. Ce dernier peut être piloté soit par un ordinateur portable grâce au logiciel Faro Scene, soit directement depuis le scanner, et dans ce cas les données sont enregistrées directement dans le module PC du scanner. La méthodologie employée est quelque peu différente.

Nous pouvons paramétrer la résolution : par exemple, nous pouvons numériser en résolution 1/5, c’est-à-dire que le scanner n’enregistrera qu’un point sur cinq par rapport à une résolution de 1/1. Ce paramètre influence le temps d’acquisition. De plus, le scanner Faro permet d’acquérir des points en quatre modes de compressions de bruit différents. Ce mode de compression de bruit influe sur le pas d’acquisition. Plus le mode de compression est fort, plus le pas d’acquisition est important. Nous avons scanné exactement la même fenêtre d’acquisition avec les quatre modes de compression, en utilisant une résolution de 1/1. Le temps d’acquisition était alors de 23 minutes. Nous obtenons le Tableau 3-1 :

Compression du bruit	Pas d'acquisition à 10m
0	1,571 mm
2	3,142 mm
3	4,716 mm
4	6,283 mm

Tableau 3-1 : Influence de la compression du bruit sur le pas d’acquisition

Nous avons prélevé un échantillon de points au même endroit sur la statue et nous avons comparé l’influence de ce paramètre sur l’épaisseur du nuage de points.

En observant la Figure 3-6, nous nous rendons bien compte que l’épaisseur du nuage de points est bien moindre en compression 4 qu’en compression 0. Cependant nous perdons beaucoup de points puisque l’écartement du pas d’acquisition est quadruplé. Or en utilisant un tel niveau de compression, nous pourrions perdre des informations préjudiciables à la fiabilité et à la cohérence du modèle que nous devons construire. Par conséquent, en accord avec toute l’équipe, nous avons décidé de scanner la statue en utilisant une compression de bruit de niveau 2 et une résolution de 1/1.

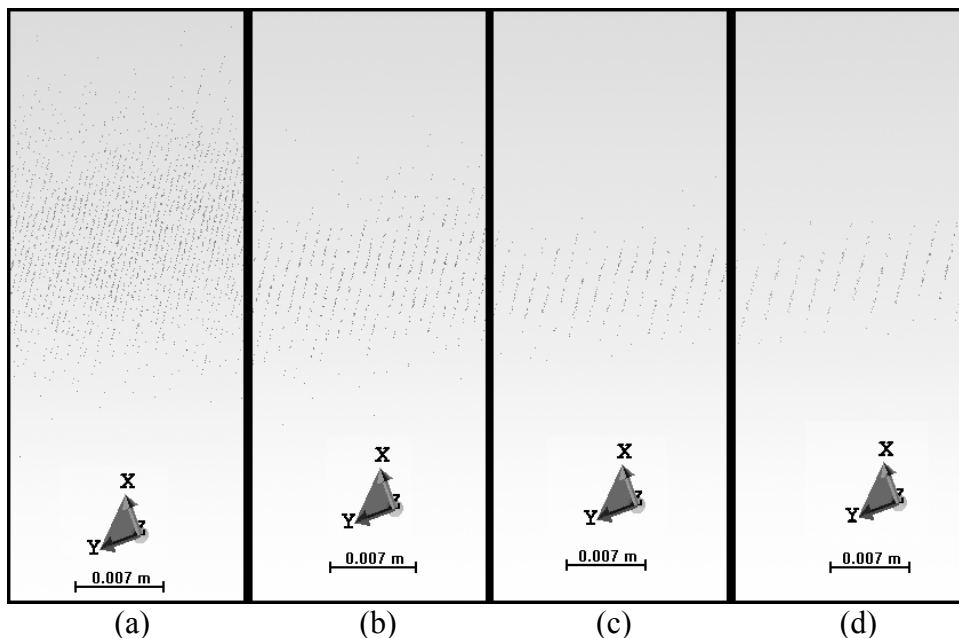


Figure 3-6 : Influence de la compression de bruit sur le nuage de points  
 (a) : Compression 0 ; (b) : Compression 2 ; (c) : Compression 3 ; (d) : Compression 4

Pour numériser un objet, à chaque début de station, nous devons d’abord établir un scan général de la scène sur la globalité du champ de prise de vue du scanner c’est-à-dire 360° x 320°. Comme nous ne voulons

pas une grande précision sur le scan général et afin de limiter le temps d'acquisition, nous avons décidé d'utiliser une résolution de 1/5 avec une compression de 0. Ainsi le temps d'acquisition de ce premier scan est de 4 minutes.

Nous pouvons alors visualiser le nuage de points en vue 3D dans le logiciel Faro Scene. Ce logiciel génère une deuxième vue pour un même nuage de points. Il génère aussi une vue planaire qui consiste en une projection cylindrique plane du nuage de points (cf. Annexe 5). C'est sur cette vue que l'on peut traiter le nuage de points. Nous sélectionnons dans cette vue planaire la nouvelle fenêtre d'acquisition (rectangulaire ou polygonale). Nous réglons alors les nouveaux paramètres et nous lançons l'acquisition. Trois stations furent également nécessaires pour numériser l'ensemble de l'avant de la statue. La numérisation de près de 20 000 000 de points prit un peu plus de trois heures. Le nuage de points de la statue seule compte environ 3 000 000 de points.



(a)



(b)

**Figure 3-7 : Numérisation avec le scanner Faro**

**(a) : Numérisation de l'Amazone de type « Mattéi » ; (b) Numérisation de l'Ephèbe Idolinos**

L'acquisition au scanner Faro est sensiblement plus rapide qu'avec le scanner Trimble. De ce fait, nous avons décidé de numériser l'ensemble des galeries du musée avec une résolution de 1/5 et une compression nulle afin de réaliser un premier modèle 3D global de la gypsothèque. De plus nous avons numérisé une deuxième statue : l'Ephèbe Idolinos (cf. Figure 3-7).

### 3.3.2. Première modélisation et constat du bruit

A partir du nuage de points que nous avons acquis nous cherchons à réaliser un modèle. Dans un premier temps nous avons essayé de traiter les données acquises avec le scanner Faro lors d'une démonstration de l'utilisation du scanner. Le logiciel Faro Scene ne présente pas de module de maillage. Nous avons exporté les données au format ASCII et nous les avons importées dans le logiciel RealWorks pour procéder à la consolidation des différents nuages de points, puis pour exploiter les possibilités de maillage de ce logiciel. RealWorks ne propose que des méthodes de triangulations 2D où les points peuvent être projetés sur un plan ou un cylindre. Il ne fournit donc pas de résultat convenable pour la modélisation d'une statue. C'est aussi pour cette raison que nous avons recherché les différents types de logiciels de modélisation disponibles sur le marché et que nous avons testé le logiciel 3DReshaper.

Nous avons donc importé le nuage de points consolidé de la statue dans 3DReshaper grâce au fichier ASCII. Puis nous avons procédé à un maillage 3D sur l'ensemble de la statue. Le résultat obtenu était décevant car le maillage était grossier et restituait mal les bords, il présentait de nombreux trous et parfois des erreurs (cf. Figure 3-8). Même les parties les plus lisses de la statue paraissaient déformées.

Nous avons cherché des causes à ce piètre résultat. Nous avons alors comparé notre nuage de points à celui de la Victoire de Samothrace proposé dans le tutorial du logiciel.

Nous nous sommes rendu compte que notre nuage de points présentait une épaisseur de couche de points pouvant aller au-delà du centimètre selon l'axe de visée scanner-objet.





Nous avons constaté par conséquent que notre nuage de points était fortement bruité. Nous avons dû faire le même constat avec les données issues du scanner Trimble. Comme nous l’avons vu au paragraphe 2.3., le bruit sur la mesure a des origines diverses : la réflectivité des surfaces, l’angle d’incidence du faisceau laser, les effets de bords, les radiations interférentes sont autant de paramètres qui peuvent influencer la qualité de la mesure. Par conséquent nous avons décidé de créer notre propre procédure de filtrage des données et de réduction de bruit.

Figure 3-8 : Maillage du nuage de points brut de l’Amazone

### 3.4. Segmentation des nuages de points

Malheureusement les formes des statues à modéliser n’étant pas standard, il est difficile de trouver une méthode automatique pour procéder à l’organisation des différentes parties. Cette étape est donc réalisée manuellement par l’opérateur qui doit délimiter par une fenêtre polygonale ou rectangulaire la zone du nuage de points à traiter. Toutefois cette étape peut être réalisée au choix soit dans le logiciel RealWorks avec l’outil « segmentation », soit dans le logiciel 3DReshaper avec l’outil « nettoyage de nuage par boîte dynamique ». Cette étape sert à nettoyer le nuage de points c’est-à-dire de conserver uniquement l’objet numérisé dans le nuage de points, mais aussi à sélectionner la partie de la statue que nous allons filtrer.

### 3.5. Procédure de filtrage du bruit

#### 3.5.1. Etat de l’art des différentes méthodes de filtrage

Comme nous venons de le voir, les données acquises avec un scanner laser sont toujours entachées d’un bruit sur la mesure qui est plus petit que la tolérance de l’instrument utilisé. Le bruit est dû à la divergence du faisceau laser qui cause une évaluation incorrecte de la distance entre l’objet et l’origine du faisceau. Dans le but d’obtenir des modèles 3D sans bruit, il est nécessaire d’utiliser des algorithmes spécifiques qui sont capables de réduire autant que possible les erreurs d’acquisition au sein du nuage de points.

##### 3.5.1.1. Exemple de filtrage de nuage de points

Le logiciel Laser Scanner Registration 2004 (LSR 2004) propose une méthode de filtrage basée sur une approche statistique. Le nuage de points est divisé en un maillage régulier en fonction du pas angulaire horizontal et vertical d’acquisition. Chaque maille contient des points mesurés. La médiane de la distance est estimée et les écarts des valeurs isolées sont calculés par rapport à la médiane. Les distances qui ont une différence avec la médiane plus petite que la précision du scanner sont utilisées pour l’estimation de la distance réelle. Cette dernière est calculée en utilisant la moyenne des distances respectant le critère de sélection. Les autres points sont rejetés comme le montre la Figure 3-9 (Bonaz & Rinaudo [BON04]).

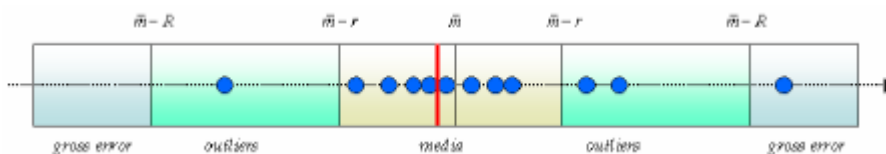


Figure 3-9 : Evaluation des valeurs aberrantes par la détermination de la valeur médiane ([BON04])

3.5.1.2. Exemple de filtrage de maillages

D'autres techniques peuvent aussi être utilisées s'inspirant des traitements des signaux ou des traitements d'image. Par exemple Yagou *et al.* [YAG02] proposent d'étendre aux maillages à base de triangles l'utilisation des filtres « moyenne » et « médian » habituellement utilisés dans le traitement d'image. Pour ce faire, ils réalisent une analogie entre les valeurs d'intensité des pixels d'une image et les normales aux triangles composant le maillage ainsi que leurs directions. Par conséquent, les directions des normales sont modifiées lors du filtrage. La région locale que le filtre va prendre en considération est constituée des triangles avoisinants partageant un bord ou un sommet avec le triangle auquel on applique le filtre (cf. Figure 3-11).

Yagou *et al.* [YAG02] ont montré qu'en comparant ce procédé à des filtres connus tels que le filtre « Laplacien » ou le filtre « Flot à Courbure Moyenne » (*Mean Curvature flows*), ils obtiennent de bonnes performances en respectant les seuils des estimations d'erreurs pour le repositionnement des sommets. Ils ont conclu aussi que le filtre « moyenne » ne produit pas de rétrécissement du maillage et que le filtre « médian » permet de conserver les arêtes vives (cf. Figure 3-11).

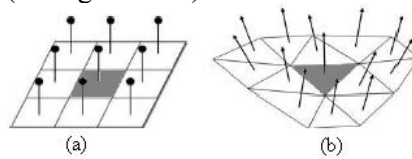


Figure 3-10 : Analogie entre une région locale en traitement d'images et le maillage d'une surface (MAS04)

- (a) : En traitement d'images le pixel gris est le pixel central, les 3x3 pixels l'entourant constituent la région locale ;
- (b) : Dans un maillage le triangle gris est le triangle central, les triangles ayant un bord commun ou un sommet commun constituent le voisinage du triangle gris

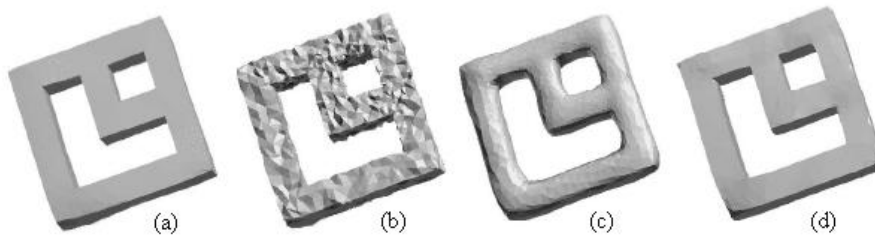


Figure 3-11 : Application du filtre « moyenne » et du filtre « médian » (YAG02) modifié

- (a) : Maillage original ; (b) : Ajout de bruit ; (c) : Maillage lissé après application du filtre « moyenne » ;
- (d) : Maillage lissé après application du filtre « médian »

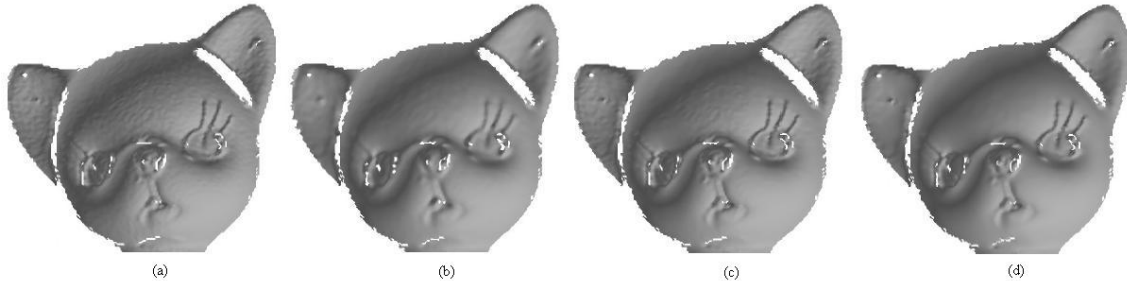
En utilisant la même analogie entre les valeurs d'intensité des pixels d'une image en niveau de gris et les normales aux triangles composant le maillage et leurs directions, Mashiko *et al.* [MAS04] ont appliqué le filtrage adaptatif MMSE (*Minimum Mean Squared Error*) aux normales des triangles composant le maillage. Les positions des sommets du maillage sont réévaluées pour raccorder les nouvelles faces normales et le lissage du maillage est généré. Le filtre change intelligemment de caractéristiques grâce à une analyse statistique en temps réel. Ce filtre est aussi efficace pour réduire le bruit en basse fréquence.

3.5.1.3. Exemple de filtrage de transformée en distance

Cependant la majorité des scanners produisent des « Range Images » qui sont composées d'une grille spatiale 2D où chaque élément contient la distance dans la troisième dimension entre le scanner et un point à la surface de l'objet. La méthode de filtrage proposée par Fournier *et al.* [FOU06] est une généralisation d'un filtre de lissage adaptatif utilisé dans le traitement d'images 2D. Ce procédé utilise la transformée en distance des « Range Images ». La transformée en distance d'un maillage 3D est composée d'une grille 3D cubique définie à l'intérieur de la boîte de contour de la « Range Images » ou du maillage 3D. L'élément de la grille est un cube appelé voxel (pixel volumique). Chaque voxel contient la distance minimale à la surface de l'objet. La transformée en distance est une représentation volumétrique implicite. Lorsque la taille du voxel tend vers zéro, nous obtenons une représentation implicite continue de la surface de l'objet. Les transformées



en distance et les « *Range Images* » sont calculées puis fusionnées en une seule transformée en distance globale qui représente l'ensemble des objets numérisés. Un filtrage adaptatif de la transformée en distance peut être alors appliqué : ce procédé filtre le bruit de numérisation tout en préservant les caractéristiques géométriques du modèle. Le filtre utilisé est une généralisation du filtre adaptatif « moyenne ». Cette méthode a l'avantage de filtrer le bruit de numérisation plus tôt dans le processus afin d'éviter la propagation des erreurs à l'étape de triangulation du modèle. L'algorithme du « *Marching Cube* » (cf. Annexe 6) est alors utilisé pour trianguler la transformée en distance globale afin d'obtenir le maillage (cf. Figure 3-12).



**Figure 3-12 : Résultats et comparaison des filtres « moyenne », « médian » et de la transformée en distance (a) : Modèle initial ; (b) : Filtre « moyenne » ; (c) : Filtre « médian » ; (d) : Filtre de la transformée en distance (FOU06) modifié**

### 3.5.2. Approche retenue

Ces différents exemples nous ont permis de voir dans quelles directions nous pouvions nous orienter pour créer notre propre procédure de filtrage. Aussi, ils nous ont inspiré pour mettre en place notre méthodologie.

Au vu des résultats que donnait le maillage nous avons résolu de traiter le problème à la source et donc d'intervenir en amont du maillage, c'est-à-dire sur le nuage de points. L'idée de Fournier *et al.* [FOU06] nous a paru vraiment très intéressante mais relativement complexe à mettre en place dans un environnement comme celui de Matlab que nous utiliserons pour effectuer la programmation. Nous avons finalement décidé de réaliser une transformée en distance de nos données puis de les filtrer.

De la méthode de Yagou *et al.* [YAG02] et de Mashiko *et al.* [MAS04] nous avons repris l'idée de faire une analogie avec le traitement d'images et d'utiliser les filtres passe-bas habituellement usités dans ce domaine.

En traitement du signal, nous filtrons  $z=f(x, y)$  quelle que soit la nature physique de  $z$ ,  $x$  et  $y$ . En particulier, en traitement d'images classique, nous avons  $I=f(x, y)$  où  $I$  est l'intensité du pixel (codée en niveau de gris),  $x$  et  $y$  sont des variables spatiales. Dans notre cas, nous créons une analogie avec le traitement d'images en filtrant  $R=f(\theta, \varphi)$  où  $R$  (*Range en anglais*) est la distance entre le scanner et l'objet,  $\theta$  et  $\varphi$  sont les valeurs de l'angle horizontal et vertical dans le système de mesure lié au scanner lors de l'acquisition d'un point 3D.

Dans un premier temps, nous créons une transformée en distance  $R=f(\theta, \varphi)$  en deux dimensions pour assimiler notre nuage de points à une image. Nous créons une grille dans laquelle chaque maille contient la distance scanner-objet d'un seul point. Par conséquent contrairement à ce que proposent Yagou *et al.* [YAG02] ou Mashiko *et al.* [MAS04], nous réalisons une analogie entre la valeur d'intensité de niveau de gris d'un pixel et la distance scanner-objet de chaque point. Puis nous appliquerons des filtres utilisés dans le traitement d'images.

### 3.5.3. Mise en œuvre de la procédure de filtrage

L'ensemble des étapes de la procédure de filtrage que nous avons mise en place a été programmé dans l'environnement Matlab. Ce langage de programmation est relativement simple à aborder et très intuitif. Il permet de dégrossir les phases de programmation avant de les compiler dans d'autres langages comme le langage C. De plus le logiciel Matlab possède de nombreuses bibliothèques comportant des fonctions préprogrammées pour un certain domaine. Par exemple, Matlab contient une bibliothèque intitulée « Image

Processing Toolbox » qui contient de nombreuses applications et notamment des filtres pour le traitement d'image. Nous rappelons ici que notre objectif est de modéliser une statue en utilisant des logiciels et des méthodes standard, par conséquent nous utiliserons au mieux les outils proposés.

La procédure de filtrage que nous nous proposons de mettre en place s'appuie sur des techniques de traitement d'images. Elle permettra d'éliminer deux types de bruit. Le premier est dû à la haute variation de la distance scanner-objet sur un élément de surface de l'objet. Ce phénomène provoque les épaisseurs de couche de points. Le deuxième type de bruit est dû à la double réflectivité que certains points peuvent présenter. Nous les appellerons les « points-mixels ». Ces points seront éliminés par la création d'un seuil.

La procédure de filtrage contient sept étapes principales : la transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées sphériques, la phase de seuillage, la conversion du nuage de points 3D en image 2D, la phase de filtrage, la détermination et le remplissage des trous, la réduction des effets de bord, la transformation des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes (cf. Figure 3-13).

Le filtrage a pour but d'éliminer l'information inutile ou de mettre en valeur l'information utile par transformation des valeurs de distances scanner-objet (d'après Landes [LAN06b]).

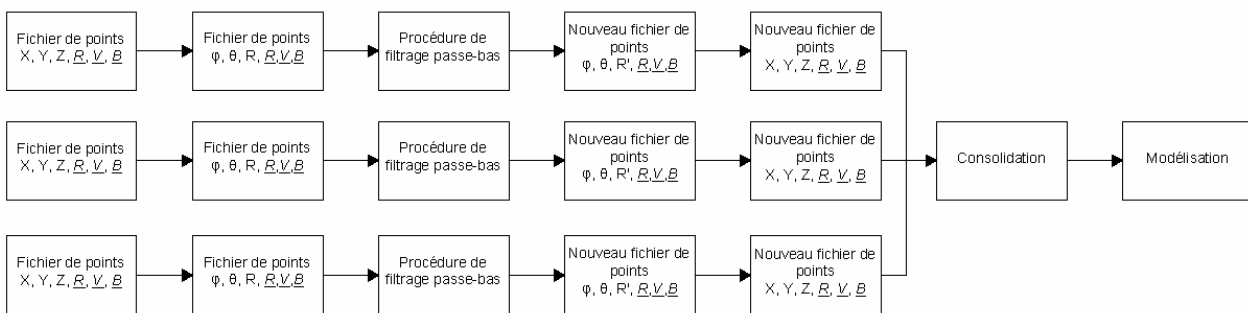
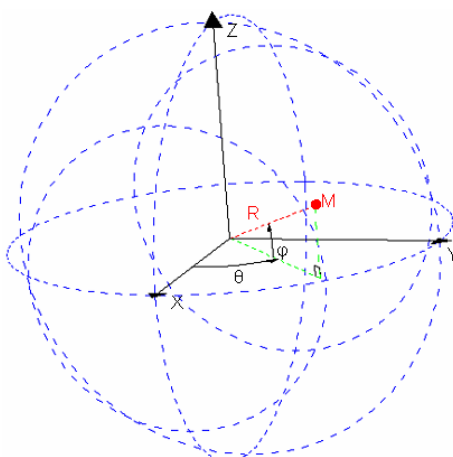


Figure 3-13 : Schéma général de la chaîne de traitement des données

Avant tout traitement avec le logiciel Matlab, nous exportons les nuages de points dans des fichiers textuels aux formats .xyz ou ASCII (.asc). Les fichiers textuels ainsi générés sont organisés en colonnes. Ils comportent les coordonnées des points mais aussi l'information sur les valeurs d'intensité des pixels, c'est-à-dire l'information  $R, V, B$  ( $RVB$ ). Les fichiers exportés sont structurés de la manière suivante :  $X, Y, Z, R, V, B$ .

### 3.5.3.1. Transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées sphériques

Nous cherchons à transformer notre nuage de points en 3D en une « Range Image » en 2D. Nous savons que le scanner numérise les points à partir des mouvements angulaires de deux miroirs pour le scanner Trimble, et à partir de la rotation du miroir selon l'axe horizontal couplée à une rotation mécanique selon l'axe vertical pour le scanner Faro. En d'autres termes, quel que soit le système utilisé, les coordonnées



sont acquises dans un premier temps en coordonnées sphériques. Par conséquent, en coordonnées sphériques, pour une valeur donnée d'angle horizontal et pour une valeur donnée d'angle vertical, il n'y aura qu'un et un seul point. Nous allons donc exploiter cette propriété pour créer notre image. Or le scanner, via le logiciel d'acquisition adéquat, fournit à l'utilisateur les coordonnées cartésiennes des points. Nous devons donc opérer une transformation des coordonnées cartésiennes vers des coordonnées sphériques. A partir de la Figure 3-14 où X est l'abscisse cartésienne, Y l'ordonnée cartésienne, Z l'élévation, R la distance radiale,  $\theta$  l'angle horizontal, et  $\varphi$  l'azimut, nous obtenons la Formule 3-1.

Figure 3-14 : Système de coordonnées sphériques

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{Z}{R}\right)$$

**Formule 3-1 : Transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées sphériques**

Dans le logiciel Matlab, la fonction « cart2sph » permet d'établir une telle transformation.

### 3.5.3.2. Phase de seuillage

La phase de seuillage que nous allons évoquer est uniquement applicable aux données Faro. Cette étape permet d'éliminer un premier type de bruit qui nuit à la modélisation.

Nous observons une certaine quantité de points noirs (si le fond d'écran est blanc) plus ou moins en décalage et positionnés de façon aléatoire sur les bords de la statue par rapport à l'angle de prise de vue du scanner. Ce sont des points qui possèdent une double réponse par rapport au signal émis : celle qui est propre à la statue et celle qui est propre au mur qui se situe derrière. Nous appellerons ces points les « points-mixels ». Ces points sont facilement identifiables visuellement.

Pour déterminer d'éventuelles caractéristiques communes aux « points-mixels » nous en avons prélevé un échantillon d'un nuage de points de la statue qui en contient. Nous avons exporté l'échantillon dans des fichiers ASCII avec les valeurs de RVB. Nous avons alors constaté qu'un certain nombre de points avait pour valeur de RVB  $R=0$ ,  $V=0$ ,  $B=0$ . Nous avons prélevé un nouvel échantillon ne comportant pas de « points-mixels », ce qui s'est traduit par l'absence de valeurs nulles pour les valeurs RVB. Nous avons pu alors établir un histogramme du nombre de points par échantillon en fonction des valeurs de RVB (0 à 255) grâce au logiciel Matlab. Nous avons pu confirmer ce que nous pensions. En effet, sur les échantillons présentant beaucoup de « points-mixels », l'histogramme montrait une large domination des points ayant des valeurs de RVB nulles.

Ces points furent éliminés en programmant un seuillage des valeurs de RVB. Tous les points comportant les trois valeurs RVB nulles ont été effacés du fichier de points.

La statue seule comportait près de 3 000 000 points. Afin d'éviter des temps de calculs relativement longs, la statue a été partitionnée en 20 morceaux d'égales épaisseurs (sous RealWorks). Cependant même en ayant réalisé cette opération, les temps de calculs se sont échelonnés de quelques minutes à plus de 5h30 (pour la partie 2 comportant plus de 500000 points). Au final, ce sont plus de 6% des points qui ont été éliminés. Le résultat de la phase de seuillage figure en Annexe 7.

L'élimination de ces points ne fut cependant pas suffisante pour espérer avoir un fichier de points suffisamment nettoyé pour exécuter un maillage et une modélisation corrects.

### 3.5.3.3. Conversion du nuage de points 3D en image 2D

La création de l'image a pour but de procéder au filtrage des distances scanner-objet. Nous allons donc construire une image du nuage de points en fonction des données des scanners. Notre objectif est de construire un signal 2D pour en permettre le filtrage. Ainsi, nous allons concevoir une « Range Image » qui met en relation les distances radiales et les angles horizontaux et verticaux que nous pourrions écrire  $R=f(\theta, \varphi)$ . De ce fait, il était nécessaire comme nous l'avons précisé au paragraphe 3.2., de modifier la chaîne standard de modélisation pour ne pas avoir d'ambiguïtés sur le point défini par les coordonnées sphériques

( $\theta$ ,  $\varphi$ , R). Cependant, cette conception d'image diffère selon que nous utilisons des données issues du scanner laser Faro ou du scanner laser Trimble.

3.5.3.3.1. Cas des données Faro

Dans un premier temps, nous avons exploité les propriétés d'acquisition angulaire du scanner, à savoir le pas horizontal et vertical. Cette idée sera celle développée pour le scanner Trimble. Dans un deuxième temps, nous avons remarqué que le logiciel Faro Scene proposait une option d'export tout à fait adaptée à la création des « Range Images ». Nous avons vu au paragraphe 3.3.1.2., que ce logiciel propose une vue planaire du nuage de points qui à l'originalité d'en être une projection cylindrique plane. Il s'avère que cette vue planaire n'est autre qu'une grille de points. En effet, cette grille est divisée en lignes et en colonnes dont chaque point du nuage correspond à une maille de la grille. Ainsi tous les points du nuage sont référencés par leur numéro de ligne et de colonne dans la vue planaire. Lors de l'export des données dans un fichier textuel avec l'extension .xyz, une option permet d'exporter ces numéros de ligne et de colonne pour chaque point en même temps que ses coordonnées et les valeurs d'intensités de pixels. La structure des fichiers textuels exportés est donc : numéro de ligne du point, numéro de colonne du point, X, Y, Z, R, V, B.

N° ligne	N° colonne	X	Y	Z	<u>R</u>	<u>V</u>	<u>B</u>
0	0	X00	Y00	Z00	R00	V00	B00
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
240	2048	-1.39940000	1.37030000	0.41580000	225	225	225
240	2049	-1.39820000	1.37010000	0.41560000	225	225	225
240	2050	-1.39940000	1.37300000	0.41620000	221	221	221
240	2051	-1.39680000	1.37140000	0.41560000	229	229	229
240	2052	-1.39570000	1.37110000	0.41540000	221	221	221
240	2053	-1.39490000	1.37130000	0.41530000	216	216	216
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
n	m	Xnm	Ynm	Znm	Rnm	Vnm	Bnm

Figure 3-15 : Structure des fichiers Faro exportés en fichier textuel

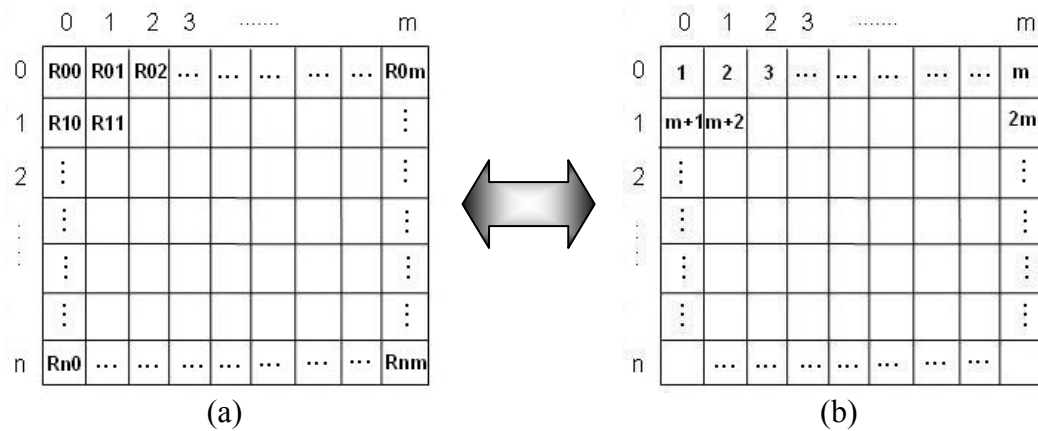
Par conséquent, il nous suffit de récupérer les numéros de ligne et de colonne des points, de renuméroter à partir de 1 ces valeurs pour permettre la construction de l'image. Pour que le programme fonctionne correctement, nous sommes tenus de procéder à l'export depuis la vue planaire du logiciel Faro Scene selon une sélection du nuage de points avec une fenêtre rectangulaire.

Ainsi, lors de la programmation, nous reconstituons d'abord un fichier avec les numéros de ligne et de colonne initiaux ainsi que les coordonnées sphériques des points. La structure du fichier devient : numéro de ligne du point, numéro de colonne du point,  $\theta$ ,  $\varphi$ , R, R, V, B (cf. Figure 3-15).

Un seuil de 1 est créé pour les lignes et pour les colonnes. A partir de ces informations nous pouvons créer l'image, qui n'est rien d'autre qu'une matrice, en récupérant les valeurs de distance radiale de chaque point. Lorsque le fichier de points est parcouru, le programme commence par placer la distance radiale du premier point du fichier dans la première ligne et la première colonne de l'image. Puis le programme passe à la ligne suivante du fichier. Il compare les numéros de lignes du point précédent et du point courant. Si la différence est nulle, donc inférieure au seuil 1, cela signifie que le point courant est sur la même ligne de l'image que le point précédent. Dans ce cas, la distance radiale du point courant est positionnée dans la colonne suivante, qui est alors créée. Dans ce cas contraire, une nouvelle ligne de l'image est construite, et le point est alors affecté à la première colonne de l'image. Le programme se déroule en suivant ce procédé.

Toutefois, nous nous sommes aperçus que étions amenés à perdre des données sur les points, en particulier l'information sur les valeurs d'intensité des pixels associées aux points du nuage. De plus, une fois le filtrage des distances radiales effectué, nous nous sommes demandés comment nous pouvions réaffecter les nouvelles distances radiales aux anciennes valeurs angulaires. Nous avons dû générer un identifiant pour chaque point. Pour retrouver exactement quelles informations devaient être associées, nous créons une deuxième image, que nous appelons « image jumelle », dont la construction est homologue à celle qui va servir à filtrer les distances. La différence réside dans le fait que les valeurs qui sont introduites

dans l'image sont des numéros de point. Le point numéro 1 correspond au premier point du fichier textuel d'entrée. La numérotation des points est effectuée automatiquement en s'incrémentant de 1 à chaque nouveau point. Ainsi les deux images ont la même taille. La position d'un point dans la première image est identique à la position de son identifiant dans « l'image jumelle » (cf. Figure 3-16).



**Figure 3-16 : Relation entre l'image à filtrer Faro et son « image jumelle »**  
**(a) : Image contenant les distance radiales ; (b) : « Image jumelle » contenant l'identifiant de chaque point**

Le code écrit pour programmer cette étape se situe en Annexe 8

3.5.3.3.2. Cas des données Trimble

Contrairement aux données Faro, les données Trimble ne possèdent pas de moyen d'identification autre que leurs coordonnées. Elles sont structurées de la manière suivante lorsque l'on exporte le nuage de points en fichier ASCII : X, Y, Z, R, V, B. Une fois les coordonnées cartésiennes transformées en coordonnées sphériques les données d'entrées sont :  $\theta$ ,  $\varphi$ , R, R, V, B.

Par conséquent, nous sommes obligés d'utiliser les données angulaires d'acquisition pour créer notre image.

Connaissant le pas d'acquisition angulaire horizontal  $\Delta\theta$  et le pas d'acquisition angulaire vertical  $\Delta\varphi$ , nous sommes en mesure de déterminer la taille de l'image que nous avons à créer. En effet, notre programme recherche dans le fichier de points les valeurs angulaires maximales ( $\theta_{max}$  et  $\varphi_{max}$ ) et minimales ( $\theta_{min}$  et  $\varphi_{min}$ ) afin de calculer le nombre de colonnes  $Nb\_col$  et de lignes  $Nb\_lig$  de l'image. Nous arrondissons à l'entier supérieur les valeurs déterminées grâce aux Formules 3-2 et 3-3. En effet, nous préférons avoir une ligne et une colonne en plus dans l'image plutôt que de perdre des données.

$$Nb\_col = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{\Delta\theta}$$

$$Nb\_lig = \frac{\varphi_{max} - \varphi_{min}}{\Delta\varphi}$$

**Formule 3-2 : Calcul du nombre de colonnes de l'image**

**Formule 3-3 : Calcul du nombre de lignes de l'image**

Nous fabriquons alors une matrice de la taille que nous venons de calculer, qui dans un premier temps, est complétée uniquement de 0. Pour chaque point du fichier, nous calculons sa position dans la matrice en fonction de la valeur des angles horizontaux et verticaux. Une fois la position déterminée, nous remplaçons le 0 initial par la valeur de la distance radiale R du point. Ainsi toutes les valeurs de distances scanner-objet trouvent une place dans la « Range Image ». A l'instar de la création de l'image avec les données Faro, nous générons une « image jumelle » qui contient un numéro d'identifiant pour chaque point. Cet identifiant dans « l'image jumelle » possèdera la même position que la distance à laquelle il se rapporte dans la matrice à filtrer. Ces numéros d'identifiant, préalablement affectés à chaque point du fichier texte, permettront, à l'issue de la procédure de filtrage, de mettre en correspondance pour chaque point les valeurs R filtrées, c'est-à-dire  $R'$ , les anciennes valeurs angulaires  $\theta$  et  $\varphi$  ainsi que les valeurs R, V, B associées.

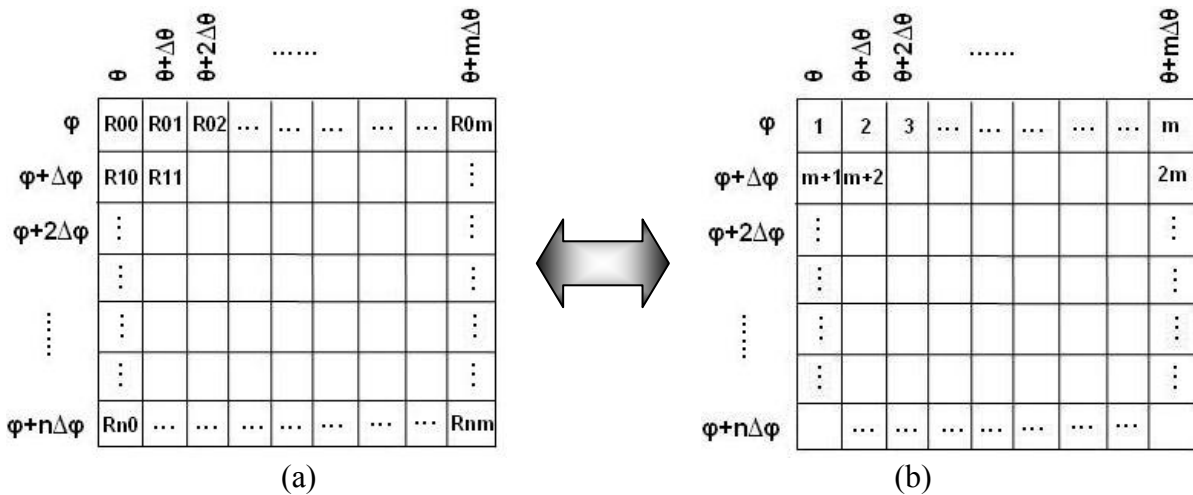


Figure 3-17 : Relation entre l'image à filtrer Trimble et son « image jumelle »  
 (a) : Image contenant les distances radiales ; (b) : « Image jumelle »

Le code écrit pour programmer cette étape se situe en Annexe 9.

Nous prêterons une attention particulière lorsque dans le fichier de points nous obtenons que la valeur de  $\varphi$  soit égale à la valeur de  $\varphi_{\text{mini}}$  - l'indice des lignes passe donc à 0 - ou lorsque la valeur  $\theta$  soit égale à la valeur de  $\theta_{\text{mini}}$  - l'indice des colonnes passe donc à 0. Dans ce cas, pour une matrice A définie par i lignes et j colonnes, le logiciel Matlab n'est pas capable de comprendre la position A (0 , j) ou A (i , 0). En effet ses indices commencent à 1. De ce fait, pour créer l'image nous imposons la condition que i et j soient différents de 0.

Nous nous sommes rendu compte que cette méthode posait un problème lorsque nous créons la « Range Image ». La variation angulaire verticale ou l'horizontale entre deux points est extrêmement faible à cause du paramètre de résolution retenu lors de l'acquisition. Nous nous trouvons dans la situation où l'écart angulaire à mesurer est du même ordre de grandeur que la précision de l'instrument. Par conséquent, lorsque nous calculons les indices i et j des positions des distances radiales dans la matrice, certains points sont affectés à la même position. Ce phénomène entraîne d'une part une perte d'information, puisque le logiciel ne conserve que la distance du dernier point calculé, d'autre part, il génère des trous dans la « Range Image ». Ces trous conservent la valeur 0. Pour essayer de résoudre ce problème, nous avons tenté d'introduire un seuil basé sur une constante de variation angulaire. Par exemple, nous disons que l'écart angulaire entre deux points consécutifs est de 0.0002 rad. Or au cours de nos essais, nous nous sommes rendu compte que la variation angulaire, que ce soit horizontale ou verticale, n'est pas constante. Par exemple, dans les fichiers de points de l'Amazone, l'écart angulaire entre deux points consécutifs varie entre 0 et 0.0008 rad. De ce fait, l'image générée est d'une taille plus grande que ce que nous avons calculé avec les Formules 3-2 et 3-3. Par conséquent, la matrice obtenue comporte beaucoup de 0 ce qui affecte grandement la qualité du filtrage. A l'heure actuelle, nous sommes toujours en train de chercher un procédé basé sur le seuillage des valeurs angulaires afin d'obtenir la « Range Image » correcte.

### 3.5.3.4. Détermination et remplissage des trous

La phase de seuillage pour les données Faro et la méthode de construction de l'image pour les données Trimble peuvent générer des trous lors de la création des matrices à filtrer. Par conséquent, il convient de les localiser et de les compléter. Ces points manquants ont par défaut la valeur 0 au sein des matrices comportant l'information sur les distances radiales.

Ce phénomène a été identifié lors des premiers tests de filtrage avec le filtre « moyenne » comme nous le verrons au paragraphe suivant. Il s'avère qu'une fois le filtrage effectué, les nuages de points résultants présentaient un certain nombre de points formant des paquets distincts qui étaient décalés du nuage de points initial. Ainsi plusieurs « paquets » apparaissaient. Nous avons utilisé un filtre de convolution « moyenne » 3 x 3 sur une surface plane. Nous avons recherché des points manquants dans l'image brute.

Nous avons remarqué que la matrice de convolution pouvait passer sur aucun, un ou plusieurs zéros en même temps. Nous trouverons en Annexe 10 un tableau qui montre les résultats d'une étude menée sur l'influence de ces zéros (unité des distances en mètre) :

Nous nous rendons compte que le nombre de trous présents dans les images brutes a un impact non négligeable sur le filtrage des données. Finalement, le nombre de plans décalés dans le fichier filtré est fonction du nombre de zéros présent dans l'échantillon lors du passage de la matrice de convolution. Nous allons donc essayer de contrer cet effet.

Dans un premier temps l'image contenant les distances radiales est convertie en une image binaire, c'est-à-dire que toutes les valeurs de distances sont mises à 1, et les valeurs nulles restent à 0, et nous inversons les valeurs. De ce fait, les trous sont identifiés avec une valeur à 1. Les valeurs que nous cherchons sont plus ou moins isolées dans l'image. Une deuxième image binaire, dans laquelle nous enlevons tous les composants connectés ensemble qui ont moins de 10 pixels, est créée à partir de la première. Le but est qu'il n'y ait plus de trous dans cette image. Ensuite une troisième image binaire est calculée en faisant la différence entre la deuxième image binaire et la première. Le résultat est que nous avons créé une image binaire dont les valeurs sont -1 ou 0. Les positions que nous voulons identifier apparaissent donc avec une valeur -1. De ce fait, nous cherchons les indices des lignes et des colonnes des valeurs -1. Nous identifions dans cette dernière image la position des points entourant une valeur -1.

Nous reprenons alors l'image contenant les distance radiales et nous récupérons les valeurs de distances correspondant aux positions déterminées à l'étape précédente. Nous calculons alors la moyenne de ces valeurs de distances radiales que nous affectons à la position où il y avait initialement un trou. Afin de faire prendre en compte ce « nouveau point », nous créons un identifiant pour ce point à la même position dans « l'image jumelle ».

### 3.5.3.5. Phase de filtrage

Le filtrage que nous allons réaliser s'inspire des techniques plébiscitées dans le traitement d'images. Ces filtres permettent idéalement de réduire le bruit sur les images, d'en améliorer les contrastes ou de mettre en valeur les contours. En général un filtre est caractérisé par sa capacité à atténuer ou à amplifier les fréquences spatiales. Les filtres les plus utilisés en traitement d'images sont des filtres passe-haut et des filtres passe-bas. Les filtres passe-haut mettent en valeur les changements bruts d'intensité lumineuse dans une image. Ils permettent aussi de rehausser les détails. Par contre, le grand inconvénient de ces filtres est qu'ils augmentent aussi l'effet du bruit dans l'image. Nous nous contenterons d'utiliser des filtres passe-bas qui ont pour principal effet d'amoindrir les détails. Les filtres considérés sont des filtres linéaires, des filtres non linéaires, et des filtres adaptatifs.

- Un filtre linéaire est un filtre pour lequel la valeur du pixel de sortie est une combinaison linéaire des valeurs de pixels d'entrée du voisinage du pixel considéré. L'inconvénient d'un filtre linéaire est qu'il aurait tendance à propager le bruit en l'atténuant plutôt qu'en l'enlevant.
- Un filtre non-linéaire est un filtre qui n'est pas linéaire. Le filtre « médian » est un filtre non-linéaire dont nous expliquerons le fonctionnement au paragraphe 3.5.3.5.3.
- Un filtre adaptatif est basé sur la recherche de paramètres optimaux par minimisation d'un critère de performance. Fréquemment cette minimisation se fait en utilisant le principe des moindres carrés.

Le filtrage auquel nous allons procéder a pour but d'éliminer la haute variation de la distance scanner-objet sur un élément de surface de la statue, autrement dit d'éliminer l'information issue de hautes fréquences spatiales. Nous allons éliminer l'information haute fréquence en utilisant des filtres passe-bas, qui va donc limiter les variations brusques de distances. Ce filtre aura un effet de lissage des distances radiales.



3.5.3.5.1. Expériences préalables

Dans un premier temps, nous avons testé certains filtres et essayé d'évaluer graphiquement les résultats. Nous nous sommes aidés de données acquises sur un pinacle des Œuvres Notre-Dame de Strasbourg. Nous pouvons voir le résultat d'une modélisation du pinacle en Annexe 11.

Le logiciel Matlab propose plusieurs filtres passe-bas. Nous avons essayé leurs performances à partir de la simulation d'un plan. Nous avons défini un plan mathématique parfait auquel nous avons rajouté un bruit gaussien simple. Nous avons essayé les filtres suivants : filtre « moyenne », filtre « convolution 2D », filtre « disque », filtre « gaussien », filtre « Laplacien », filtre « Motion », filtre « Unsharp », filtre « Median », filtre « Wiener ». Nous avons créé une fonction « Gain » qui calcule le rapport signal sur bruit entre l'image filtrée et l'image bruitée. Nous avons répété cette opération sur un plan bruité ayant subi une déformation sinusoïdale de période et d'amplitude constantes, et sur un plan ayant subi une déformation sinusoïdale de période et d'amplitude variables. Les résultats obtenus (cf. Annexe 12) nous ont permis de poursuivre nos tests sur les filtres « moyenne », « median » et « motion ». Nous avons aussi conservé le filtre « Wiener » car il s'agit du seul filtre adaptatif que propose Matlab. Cependant ces résultats sont à nuancer, car nous avons commencé ces tests à partir d'un plan parfait ou ayant subi des déformations connues.

Nous avons alors effectué quelques tests sur des fichiers de points provenant de la numérisation d'un plan. Cependant dans ce cas, ne connaissant pas le signal du bruit appliqué sur la mesure, nous ne pouvons pas évaluer un gain après filtrage. Nous avons dû nous contenter de résultats qualitatifs après des essais de modélisation. Dans ce cas nous nous sommes aperçus que les filtres « moyenne », « médian » et « Wiener » et « motion » donnaient des résultats intéressants. Nous avons alors appliqué ces filtres à des échantillons de points issus de la statue. Les filtres « moyenne », « médian » et « Wiener » se sont avérés relativement performants. Par contre le filtre « motion » n'a pas donné de résultats convaincants.

Comme les filtres « moyenne », « médian » et « Wiener » ont été les plus probants, nous détaillons leurs fonctionnements dans les paragraphes suivants.

3.5.3.5.2. Filtre « moyenne »

Le filtre « moyenne » est un opérateur de convolution. Un opérateur de convolution fonctionne sur la base d'une fenêtre ou d'une matrice mobile composée de coefficients, appelée noyau de convolution, qui se déplace sur l'ensemble de l'image, ligne par ligne et pixel par pixel. Le pixel central prend la valeur issue du calcul. Ce calcul est une combinaison linéaire qui s'applique sur les pixels voisins et s'appelle un produit de convolution. Ainsi, chaque pixel de l'image filtrée aura une valeur caractéristique de son environnement spatial (Landes [LAN06b]). Le noyau de convolution utilisé est une matrice 3 x 3.

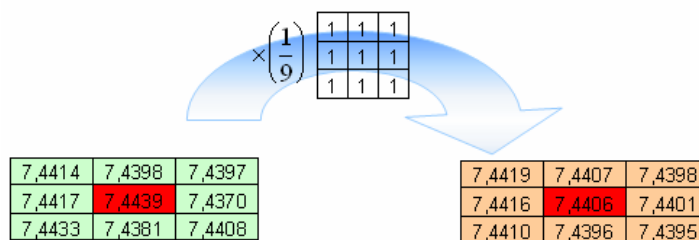


Figure 3-18 : Illustration du filtre « moyenne »

La Figure 3-18 illustre l'application du filtre « moyenne ». La matrice de gauche correspond à l'image brute, la matrice de droite correspond à l'image filtrée. La combinaison linéaire appliquée pour trouver la valeur du pixel central est :

$$\left(\frac{1}{9}\right) \times (1 \times 7.4414 + 1 \times 7.4398 + 1 \times 7.4397 + 1 \times 7.4417 + 1 \times 7.4439 + 1 \times 7.4370 + 1 \times 7.4433 + 1 \times 7.4381 + 1 \times 7.4408) = 7.4406$$

Ainsi ce filtre peut être appliqué sur les images créées (cf. Figure 3-19).

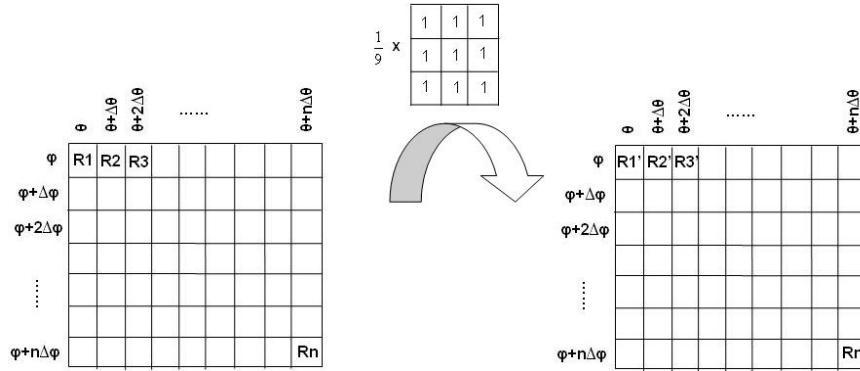


Figure 3-19 : Application du filtre « moyenne » à l'image contenant les distances radiales

3.5.3.5.3. Filtre « médian »

Le filtre « médian » est un filtre non linéaire. Ses performances peuvent être meilleures que celles d'un filtre linéaire sur ce type d'image, car il peut potentiellement éliminer le bruit sur la mesure sans affecter les valeurs « correctes » de distance radiale. Le filtre « médian » considère chaque pixel dans une image selon une fenêtre 3 x 3 dans notre cas, et cherche la valeur de distance médiane, c'est-à-dire la valeur de distance qui possède quatre valeurs supérieures et quatre valeurs inférieures dans la fenêtre considérée. Une fois cette valeur déterminée, elle est affectée au pixel central.

3.5.3.5.4. Filtre « Wiener »

Le filtre « Wiener » est un filtre adaptatif, c'est-à-dire que ses coefficients sont modifiés selon un critère donné dès qu'une nouvelle valeur du signal devient disponible. Nous sommes dans une situation où les spectres du signal désiré et du signal perturbateur se superposent. Par conséquent le filtre « Wiener » peut apporter une solution. Le filtre « Wiener » fourni par Matlab dans le traitement d'images estime la moyenne  $\mu$  et la variance locale  $\sigma^2$  autour de chaque pixel en utilisant les équations de la Formule 3-4 :

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \mathbb{N}} a(n_1, n_2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \mathbb{N}} a^2(n_1, n_2) - \mu^2$$

Formule 3-4: Calcul de la moyenne et de la variance locale autour de chaque pixel

Où : N x M est la taille de la fenêtre se déplaçant sur l'image (en général nous avons utilisé une fenêtre 3 x 3) dont les indices des lignes et des colonnes sont  $n_1$  et  $n_2$  ;  $a(n_1, n_2)$  est le pixel à la ligne  $n_1$  et à la colonne  $n_2$  dans la fenêtre du filtre.

Puis le filtre « Wiener » calcule la valeur du pixel filtré  $b$  à la position  $(n_1, n_2)$  en utilisant ces estimateurs statistiques par la Formule 3-5 :

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(n_1, n_2) - \mu)$$

Formule 3-5 : Calcul de la nouvelle valeur de pixel selon le filtrage « Wiener »

Où :  $v^2$  est la variance du bruit. Comme ce paramètre n'est pas connu, le filtre « Wiener » de Matlab utilise la moyenne de toutes les variances locales estimées. Dans le logiciel Matlab ce filtre s'appelle « wiener2 » (The MathWorks [MAT01]).

	Nom fichier	nombre points	moyenne (m)	écart type (m)	écart type relatif
Amazonie1	bras_gauche_lisse	1089	2,6827	0,0093	0,00347
	cuisse_lisse	2401	2,6596	0,0035	0,00132
	flanc_gauche_lisse	2145	2,7049	0,0057	0,00209
	mollet_lisse	2565	2,7619	0,0077	0,00278
	poitrine_gauche_lisse	1353	2,7033	0,0077	0,00285
	drapé 1_1	1353	2,7354	0,0165	0,00602
	drapé 1_2	2173	2,7985	0,0346	0,01235
	drapé 1_3	2205	2,7907	0,0173	0,00618
	drapé 1_4	1749	2,7699	0,0597	0,02155
Amazonie2	aisselle_lisse_droite_2	3572	1,6065	0,0108	0,00672
	aisselle_lisse_droite	3657	1,6061	0,0067	0,00417
	jambe_droite_lisse	5326	1,8871	0,0141	0,00747
	jambe_gauche_lisse	4761	1,6681	0,0049	0,00294
	drapé 2_1	4706	1,5977	0,0228	0,01427
	drapé 2_2	6549	1,5455	0,0133	0,00861
	drapé 2_3	8503	1,6224	0,0148	0,00912
	drapé 2_4	5608	1,5951	0,0100	0,00627
Amazonie 3	cuisse_lisse	988	3,5863	0,0057	0,00148
	genou1_lisse	1225	3,7083	0,0052	0,00139
	mollet_lisse	780	3,7547	0,0042	0,00113
	mollet_gauche_lisse	676	3,9376	0,0039	0,00099
	drapé 3_1	858	3,5726	0,0074	0,00207
	drapé 3_2	1312	3,5506	0,0070	0,00198
	drapé 3_3	910	3,5897	0,0116	0,00323
	drapé 3_4	1326	3,6416	0,0127	0,00349

Tableau 3-2 : Ecart-types relatifs de différents échantillons sur les trois stations de l'Amazonie

Nous avons décidé d'utiliser ce filtrage car la statue que nous cherchons à modéliser présente de grandes variations de fréquences. En effet, elle présente des parties totalement lisses et d'autres parties très ondulées en particulier dans le drapé de la statue. Nous pouvons voir dans le Tableau 3-2 que l'écart-type relatif de la dispersion des distances radiales peut varier du double à un facteur 10 entre des surfaces lisses et des surfaces ondulées sur la statue. Par conséquent, nous devons utiliser un filtrage qui puisse prendre en considération ce type de changements.

### 3.5.3.6. Réduction des effets de bord d'image

Lorsque nous parlons des effets de bord dans ce paragraphe, nous traiterons des effets du filtrage sur les bords de l'image. Nous avons essayé de réduire l'incidence de ce phénomène sur la statue en sélectionnant des zones à filtrer plus grandes que nécessaire. Toutefois il peut arriver que le bord de la sélection coïncide avec le bord de la statue. Afin d'atténuer le phénomène de décalage similaire à la présence de zéros dans l'image brute, une procédure a été mise en place.

Cette technique se base sur la comparaison des valeurs de l'image brute et de l'image filtrée. Un seuil de comparaison est fixé. Pour une position donnée dans l'image filtrée, si la différence entre la valeur de distance brute et la distance filtrée est supérieure au seuil donné, alors nous réaffectons la distance brute à la valeur filtrée. La valeur du seuil est de 5 cm.

3.5.3.7. Transformation des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes

Pour chaque point, nous associons les anciennes valeurs angulaires  $\theta$  et  $\varphi$  avec les nouvelles valeurs de distances radiales  $R'$  et les valeurs RVB correspondantes à l'aide de l'image-jumelle.

Nous procédons ensuite à la transformation inverse des coordonnées, c'est-à-dire que nous transformons les coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes. Nous appliquons les Formules 3-6 d'après la Figure 3-14 :

$$\begin{aligned} X &= R \cos \theta \cos \varphi \\ Y &= R \sin \theta \cos \varphi \\ Z &= R \sin \varphi \end{aligned}$$

Formule 3-6 : Transformation des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes

Dans Matlab, la fonction « sph2cart » effectue cette opération.

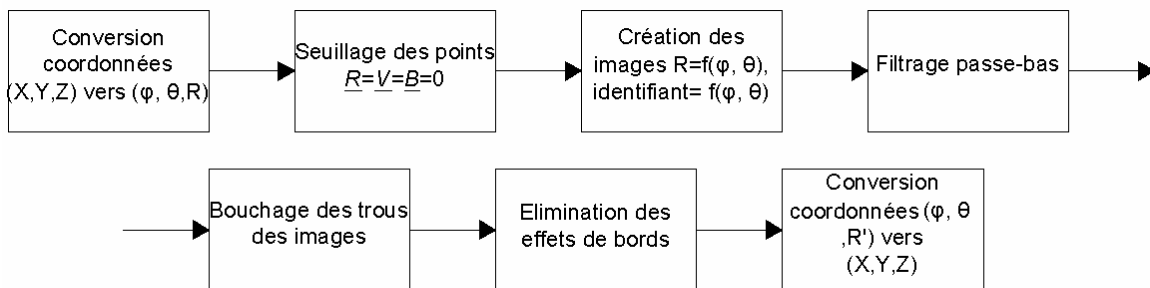


Figure 3-20 : Schéma synoptique de la procédure de filtrage

La Figure 3-20 rappelle les principales étapes de la procédure de filtrage.

3.6. Consolidation des nuages de points

Comme nous l'avons vu précédemment la statue a été numérisée selon trois points de vue différents. Les nuages de points résultants de ces trois numérisations sont orientés selon un repère relatif au scanner laser et à sa position lors de la prise de mesure. Il faut donc regrouper dans un même système de coordonnées l'ensemble des nuages de points. Cette opération s'appelle la consolidation comme nous l'avons vu au paragraphe 2.6.2. La troisième méthode exposée (cf. paragraphe 2.6.2) a été utilisée ici pour recalibrer les nuages de points à partir des sphères de recalage positionnées autour de la statue.

Une fois que les fichiers de points ont été filtrés, ils sont importés dans le logiciel RealWorks. La procédure à suivre pour procéder au recalage est expliquée dans l'Annexe 13.

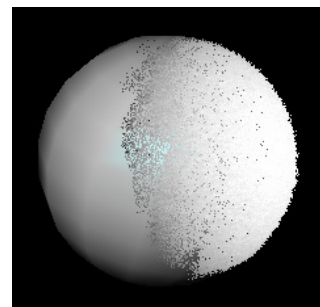


Figure 3-21 : Sphère Faro, rayon 72.5 mm (à gauche)

Figure 3-22 : Sphère Trimble, rayon 38.1 mm (au centre)

Figure 3-23 : Génération d'une sphère au plus proche du nuage de points (à droite)

Nous nous attacherons seulement à donner ici les algorithmes explicatifs des diverses étapes.

Dans un premier temps, nous sélectionnons le nuage de points « maître » et les nuages de points « esclaves ». Pour chaque nuage de points nous découpons la partie des nuages contenant une sphère. Nous pouvons alors spécifier le rayon de la sphère sélectionnée, à savoir 38.1 mm pour les sphères Trimble (cf. Figure 3-22) et 72.5 mm pour les sphères Faro (cf. Figure 3-21). Le logiciel cherche à faire coller au plus près la sphère de rayon donné et le nuage de points de la sphère (cf. Figure 3-23). Il calcule alors les coordonnées du centre de la sphère. Pour ce faire il utilise les moindres carrés. Un algorithme pour l'extraction de sphères dans un nuage de points, basé sur les moindres carrés est exposé en Annexe 15.

Après avoir associé toutes les sphères homologues dans chaque nuage de points, nous pouvons regrouper tous les nuages de points en un seul dont le référentiel est celui du nuage de points « maître ». Le but du calcul est de déterminer, pour chaque nuage, les trois rotations et les trois translations à effectuer pour que tous les nuages soient dans le même système de coordonnées. Un rappel du calcul de compensation par la méthode des intermédiaires figure en Annexe 14.

Etant donné que nous avons réalisé trois stations et que nous avons six inconnues par stations, nous avons donc à déterminer  $6 \times 3 = 18$  inconnues. Cette transformation est une similitude spatiale. Nous prendrons un facteur d'échelle égal à 1.

Nous appelons  $(x_i, y_i, z_i)$ , les coordonnées des centres des sphères dans le système local du nuage de points  $n^o_i$  ayant pour origine la position du scanner.

Nous appelons  $(X, Y, Z)$ , les coordonnées des sphères dans le système du nuage de points « maître » ayant pour origine la position du scanner dans le nuage de points « maître ».

Nous allons exprimer les coordonnées des sphères en fonction des inconnues. Nous écrivons sous forme matricielle le passage des coordonnées du système du nuage de points « esclave » dans le système du nuage de points « maître ». L'expression matricielle de la similitude spatiale est donnée par les Formules 3-7 à 3-10 :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = R_i \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + T_i \quad \text{avec} \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & -r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$

**Formule 3-7 : Expression de la similitude spatiale**  
**Formule 3-8 : Coefficients réduits de la matrice rotation R**  
**Formule 3-9 : Coefficient du vecteur translation T**

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \times \cos \kappa & -\cos \varphi \times \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \times \sin \kappa + \sin \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa & \cos \omega \times \cos \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa & -\sin \omega \times \cos \varphi \\ \sin \omega \times \sin \kappa - \cos \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa & \sin \omega \times \cos \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa & \cos \omega \times \cos \varphi \end{pmatrix}$$

**Formule 3-10: Expression développée de la matrice rotation R**

Où  $R_i$  et  $T_i$  sont les matrices de rotation et de translation permettant de réaliser la similitude spatiale. Nous appelons  $\omega, \varphi, \kappa$  les angles de rotation autour des axes X, Y, Z et  $T_x, T_y, T_z$  les translations suivant les axes X, Y, Z.

A partir des équations précédentes, nous pouvons écrire le système d'équations d'observation. Une fois que nous avons déterminé les valeurs approchées des paramètres de la transformation. Nous pouvons procéder alors au calcul des dérivées partielles pour déterminer les coefficients des termes des équations d'erreurs transformées. Le détail de ces calculs figurent en Annexe 16.

Nous nous sommes posés la question de savoir si la précision avec laquelle les sphères sont générées devait rentrer en compte, sous forme de pondération, dans le calcul final de la consolidation. En analysant le rapport d'erreur fourni par le logiciel RealWorks lors de la consolidation, nous nous rendons compte que l'erreur d'ajustement des sphères (*Fitting error*) est sensiblement la même pour le cas des données Faro. Lorsque nous avons numérisé avec le scanner Trimble, nous avons utilisé des sphères de deux tailles différentes contrairement à la numérisation avec le scanner Faro. Nous avons remarqué que quatre sphères

présentaient des erreurs d’ajustement doubles par rapport aux autres, et nous pensions que cela était lié aux différentes tailles de sphères utilisées. Or il s’avère que les deux premières sphères concernées sont des sphères Trimble, et que les deux dernières sont des sphères Faro.

Pour ce calcul, nous considérons, n’ayant eu aucune information de la part de Trimble à ce sujet, que la précision d’ajustement des sphères n’est pas prise en compte. Nous décidons d’attribuer le même poids aux observations.

Nous pouvons appliquer le principe des moindres carrés qui consiste à minimiser la somme des écarts apparents au carré. Nous déterminons alors les appoints  $d\omega$ ,  $d\phi$ ,  $d\kappa$ ,  $dT_X$ ,  $dT_Y$ ,  $dT_Z$ . Nous sommes donc en mesure de déterminer les valeurs les plus probables des paramètres de la similitude spatiale réalisée pour passer d’un système de coordonnées à un autre. Nous réitérons le calcul jusqu’à que la valeur des appoints converge vers zéro. La transformation est alors appliquée à chaque système de coordonnées.

A l’issue de cette étape, et après avoir effectué les contrôles de recalage, le logiciel procède à la fusion des nuages de points en un fichier unique (cf. Figure 3-24).

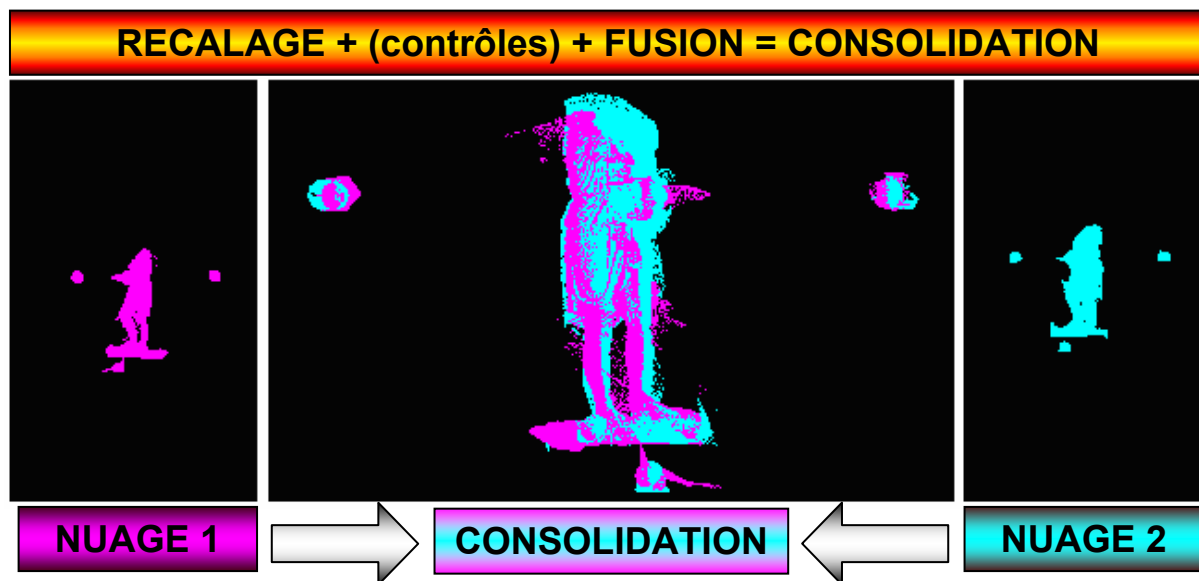


Figure 3-24 : Consolidation des nuages de points (Amazone de type « Mattéi »)

Nous voulions savoir également si le filtrage des données avait une influence sur la précision de la consolidation. Nous avons numérisé un tableau en liège depuis quatre stations différentes et nous avons procédé à la consolidation des nuages de points grâce à cinq sphères placées tout autour. Nous avons procédé, dans le cas 1, à la consolidation des fichiers bruts sans aucun traitement préalable. Dans le cas 2, nous avons effectué un filtrage « moyenne » uniquement sur le tableau sans les sphères. Dans ce cas, les sphères du nuage de points brut ont été rajoutées dans le fichier filtré du tableau. Dans le cas 3 le tableau et les sphères ont été filtrés. Après avoir effectué la consolidation suivant la procédure qui figure en Annexe 13 nous avons comparé les précisions selon les stations et selon les sphères de la consolidation. Nous pouvons voir le résultat de cette étude dans le Tableau 3-3 :

	Cas 1 (m)	Cas 2 (m)	Cas 3 (m)
Station 1	0,00117	0,00113	0,00123
Station 2	0,00248	0,00240	0,00248
Station 3	0,00386	0,00391	0,00403
Station 4	0,00130	0,00128	0,00117
<b>moyenne</b>	0,00220	0,00218	0,00223
<b>Ecart-type</b>	± 0,00125	± 0,00129	± 0,00134
<b>Sphère 1</b>			
Sphère 1	0,00207	0,00211	0,00208
Sphère 2	0,00108	0,00091	0,00101
Sphère 3	0,00085	0,00082	0,00092
Sphère 4	0,00302	0,00304	0,00293
Sphère 5	0,00399	0,00403	0,00419
<b>moyenne</b>	0,00220	0,00218	0,00223
<b>Ecart-type</b>	± 0,00132	± 0,00138	± 0,00137

Tableau 3-3 : Influence du filtrage sur la consolidation des nuages de points

Comme nous pouvons le constater l'influence du filtrage sur la consolidation est nulle. Nous avons choisi de filtrer uniquement les points correspondants à la statue pour gagner du temps lors du filtrage des données. Les nuages de points bruts des sphères sont alors incorporés dans le fichier filtré.

### 3.7. Modélisation

Le fichier de points ainsi traité est importé dans le logiciel 3DReshaper pour commencer la modélisation. Cette partie a été rédigée avec les instructions d'aide du logiciel 3DReshaper (Technodigit [TEC07]), de Technodigit@ mais aussi grâce aux contacts avec le support technique de l'entreprise Technodigit qui a créé le logiciel et qui le commercialise.

#### 3.7.1. Maillage 3D

Dans un premier temps, il est possible de découper les différentes parties de la statue si cela n'a pas été fait auparavant. S'il reste quelques points de bruit dispersés dans la scène 3D, il est aussi possible de les éliminer en utilisant la réduction automatique du bruit que propose le logiciel. Ce procédé se base sur un calcul de densité moyenne puis élimine les points qui sont « isolés », c'est-à-dire où la densité locale est inférieure à un certain seuil (qui est réglable). Dans le cas d'un nuage où les points seraient par endroit très serrés (proches du capteur) et très espacés à d'autres endroits (éloignés du capteur), cette commande ne donnera pas de bon résultat comme nous avons pu le constater au début du projet avant de mettre en place notre procédure de filtrage. Nous pouvons alors lancer la phase de maillage. Le logiciel propose deux possibilités de maillages à savoir un maillage 2D et un maillage 3D.

Le maillage suivant une direction (maillage 2D) utilise l'algorithme de Delaunay-Voronoi que nous rappelons en Annexe 17. Malheureusement, si cette méthode était généralisée en 3D, nous obtiendrions un maillage volumique formé de tétraèdres et non pas un maillage surfacique formé de triangles. Ainsi le logiciel 3DReshaper utilise pour les maillages 3D une méthode comparable permettant d'obtenir très souvent les mêmes propriétés qu'un maillage suivant l'algorithme de Delaunay en 2D, à savoir qu'aucun point du maillage ne se trouve dans le cercle circonscrit d'un triangle de celui-ci. En revanche, lorsque le logiciel entreprend une réorganisation des triangles dans le cadre du lissage, la courbure locale intervient pour déterminer les relations entre sommets et les propriétés de Delaunay ne sont plus respectées. Certes, ceci permet une plus grande précision des lignes de rupture de pente mais est plus défavorable en cas de calculs aux éléments finis. Pour les maillages 3D, ce qui définit le facteur de forme idéale est le rapport entre le



cercle intérieur au triangle et le cercle extérieur (cf. Figure 3-25) : grâce au logiciel 3DReshaper®, il est possible de contrôler les angles des triangles formant le maillage 3D, de façon à limiter la création de triangles aberrants pour le calcul aux éléments finis, ce qui évite d'avoir un maillage irrégulier. Dans la Figure 3-25 il est évident que le rapport de forme idéal est beaucoup plus élevé dans la figure 2 à droite que dans la figure 1 à gauche :

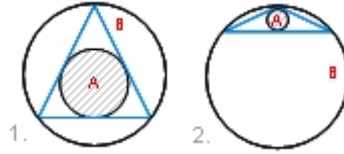


Figure 3-25 : Le facteur de forme idéale

Plusieurs options sont possibles pour réaliser un maillage 3D. Nous pouvons par exemple utiliser l'option « *Regular sampling* » c'est-à-dire spécifier un écart constant entre les points du maillage. La technique utilisée par 3DReshaper consiste à créer une grille sur le modèle à former. Il est possible d'ajuster le pas de cette grille. Dans chaque élément de la grille (des petits carrés) 3DReshaper calcule une petite partie de surface, il détermine le point qui est le plus proche de cette surface et déclare ce point représentatif de l'élément. Ce point est conservé dans le maillage et devient un sommet du maillage. De ce fait les triangles formés par cette technique ont généralement la même taille au sein d'un maillage. Pour cette option le logiciel propose une taille de triangle par défaut en fonction du nuage de points importé.

Le maillage peut être réalisé en deux étapes grâce à l'option « *Mesh in two steps* ». La procédure mise en place pour la première étape est la même que pour l'option précédente sauf que le maillage calculé a un pas deux fois plus important que celui qui aurait pu être utilisé pour un maillage « *Regular Sampling* ». La deuxième étape compare le nuage de points au maillage résultant et améliore la précision du maillage en construisant un nouveau maillage localement avec d'autres points si la précision n'est pas bonne.

D'autre part nous pouvons construire un maillage en gardant tous les points et en utilisant « *Keep all the points* » pour essayer d'atteindre le plus haut niveau de détail. Avec cette option il faut s'attendre à des temps de traitement relativement longs et qui peuvent même parfois saturer la mémoire de l'ordinateur si trop de points sont présents dans le nuage. De plus, le résultat peut parfois être décevant car en présence d'une épaisseur de couches de points trop importante, certains points peuvent faire dévier la triangulation de la surface théorique. De ce fait, la qualité de la surface est dégradée et elle apparaît ondulée. De plus, la taille des triangles formés peut varier grandement d'une maille à une autre. Cependant une telle option peut s'avérer efficace pour modéliser de petits détails.

Deux autres aspects peuvent être contrôlés par l'utilisateur. En effet, le logiciel permet de définir deux paramètres pour choisir le « bon » point à utiliser dans le maillage. Le premier est un critère géométrique appelé « erreur de déviation » qui est la distance entre la surface théorique et les triangles générés pour la modéliser. Le second est un critère de qualité appelé « réduction de bruit » qui consiste à éliminer les points qui sont au-dessus ou en dessous de la surface théorique et de garder seulement ceux qui sont sur la surface théorique.

De plus, dans les options de maillage, le logiciel pourra essayer de détecter les trous réels si l'opérateur lui indique la taille maximale des triangles servant à la modélisation, en respectant le fait que ces triangles doivent être plus petits que les trous à modéliser. Une option permet aussi au logiciel de chercher les bords libres, c'est-à-dire les contours de l'objet, qui contiennent le plus grand nombre de triangles. Dans ce cas, il considérera que le bord libre détecté selon le critère précédent sera le bord extérieur. Tous les autres contours qu'il détectera seront considérés comme des trous et seront complétés. La dernière option disponible est « *Create a watertight mesh* », c'est-à-dire créer un maillage étanche. Le logiciel complète alors tous les trous qu'il détecte.

Cependant même en utilisant toutes les options que propose le module de maillage il est nécessaire d'optimiser le maillage résultant en appliquant divers processus de traitement du maillage.

### 3.7.2. Elimination des sommets pointus

3DReshaper permet d'éliminer les sommets pointus. D'une part cette fonction allège le poids des fichiers de maillage 3D, d'autre part elle améliore la surface et l'aspect des maillages 3D. Ces sommets pointus sont dus à un nombre trop important de points générant du bruit dans le nuage, ce qui nuit à la qualité du maillage 3D. Nous avons déjà vu que ces points résultent de mauvaises conditions de luminosité, ou du fait que l'objet numérisé avait une surface fortement réfléchissante. Les visées rasantes sur des surfaces à multiples chevauchements peuvent elles aussi être source de bruit. Cette fonction propose trois degrés d'intensité d'élimination de ces pics.

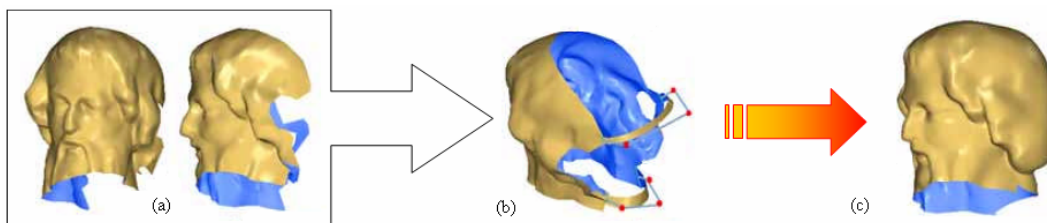
### 3.7.3. Remplissage des trous du maillage

Les premières techniques pour compléter les trous de maillage ont déjà été citées dans le paragraphe 4.5.1 concernant le maillage 3D. Le logiciel comporte également plusieurs façons de procéder.

La première façon est d'utiliser l'outil « *Filling hole* » (bouchage de trous). Nous pouvons soit sélectionner les trous un par un en les indiquant sur le maillage, soit les rechercher automatiquement en spécifiant le nombre maximal de côtés libres (ainsi le logiciel remplira tous les trous ayant au plus le nombre de côtés libres indiqué), ou choisir tous les bords libres.

Nous pouvons décider d'insérer de nouveaux points ou non dans les trous sélectionnés et nous pouvons régler la courbe que va prendre la partie reconstruite. Dans notre cas, nous utiliserons exclusivement la reconstruction par un maillage 3D. Cependant cette méthode a ses limites, si le trou est trop important, le calcul peut ne pas aboutir ou le logiciel peut reconstruire la forme manquante de façon aberrante.

Une deuxième méthode consiste à créer un pont entre deux bords définis (« *Bridge between free borders* »). Le but est de permettre la reconstruction de grandes surfaces manquantes du maillage tout en préservant la continuité de la surface en fonction de l'orientation que l'on donne au pont. En effet ce paramètre est réglable en fonction des boules rouges placées près du pont généré (cf. Figure 3-26). Une fois le ou les ponts créés, il ne reste plus qu'à appliquer la première méthode et à compléter les trous.



**Figure 3-26 : Bouchage de trous, en continuité de courbure, à l'aide d'un pont dont l'orientation est définie  
(a) : Modèle initial ; (b) : Création des ponts et orientation ; (c) : Modèle reconstruit  
(3DR07 modifié)**

### 3.7.4. Lissage

Le lissage est la dernière étape du traitement. Il permet d'atténuer les imperfections du maillage dues à un trop grand nombre de points dans le nuage, qui provoquent un aspect granuleux de la surface. De ce fait le logiciel applique une déformation globale du maillage. Il propose trois techniques pour la réaliser. La première méthode est la modification des coordonnées des sommets du maillage, la deuxième correspond à la réorganisation des triangles du maillage en autorisant ou non les elongations des triangles, la dernière méthode consiste à rajouter des sommets dans le maillage. Cette troisième méthode est surtout réservée aux objets présentant peu de facettes. De plus, l'intensité du lissage est réglable et possède dix niveaux.

Nous avons appliqué l'ensemble du procédé décrit sur l'Amazone de type « Mattéi ». La partie 4. présente l'ensemble des résultats relatifs au buste de la statue.

## 4. Résultats

Le processus mis en place génère des temps de calculs relativement longs avec le logiciel Matlab, même en utilisant les stations de travail les plus puissantes du laboratoire. Un premier résultat, issu des données Faro, réalisé sur la jambe de la statue avec un filtre de type « moyenne » est visible en Annexe 19. Dans les paragraphes qui vont suivre, nous nous contenterons de présenter et d'analyser les résultats uniquement des modèles issus d'un filtrage de type « Wiener ». Par manque de temps, nous n'avons pas pu modéliser pour le moment l'intégralité de l'Amazonne de type « Mattéi ». Nous avons uniquement pu traiter les nuages de points Faro et Trimble relatifs au buste de la statue. Nous avons choisi cette partie de la statue, car elle présente l'intérêt d'avoir à la fois des parties lisses et des parties où les hautes fréquences sont importantes, en particulier sur le drapé.

### 4.1. Cas des données FARO

#### 4.1.1. Réduction du bruit

A l'étape de la segmentation, en fonction des trois stations, nous avons sélectionné des parties du buste de façon à éviter les zones de recouvrement trop importantes sur les parties lisses. Nous avons par la suite filtré les données. A l'issue du seuillage, environ 6% des points ont été éliminés. Nous avons alors procédé à la consolidation des trois nuages de points. Le rapport d'erreur fourni par le logiciel RealWorks se situe en Annexe 18. Les erreurs moyennes sur la première, la deuxième et la troisième station pour la consolidation sont respectivement  $\pm 1$  mm,  $\pm 1.4$  mm et  $\pm 0.8$  mm. Au total, le nuage du buste que nous allons modéliser compte près de 1 133 000 points. La Figure 4-1 montre le nuage de points résultant. A gauche, le nuage de points est représenté en nuances de gris ; à droite, en couleur par station (station 1 en bleu, station 2 en orange, station 3 en rose).



Figure 4-1 : Nuage de points consolidé ; à gauche, en nuances de gris ; à droite, en couleur par station

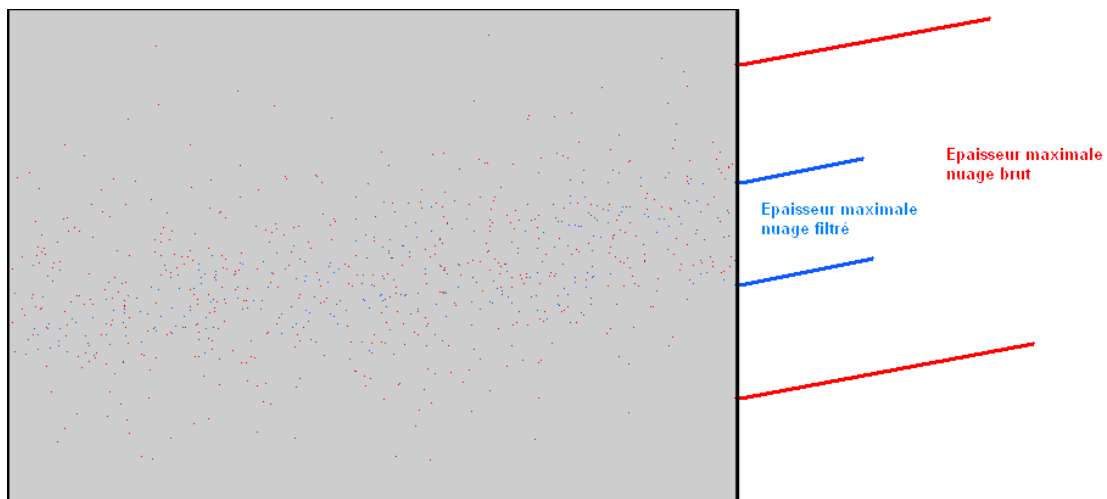


Figure 4-2 : Comparaison de l'épaisseur du nuage brut et du nuage filtré

Le filtrage de type « Wiener » a permis de réduire la dispersion des points à la surface de la statue. L'épaisseur de la couche de points a été diminuée comme nous pouvons le constater avec la Figure 4-2. Nous avons superposé le nuage brut, qui apparaît en rouge, et le nuage filtré, qui apparaît en bleu. L'épaisseur du nuage brut est d'environ 1.7 cm alors que l'épaisseur du nuage filtré est d'environ 0.6 cm.

#### 4.1.2. Modèle Faro du buste de l'Amazone de type « Mattéi »

Nous avons importé dans 3DReshaper le fichier de points filtrés et consolidés. Nous avons dans un premier temps établi un maillage 3D du nuage complet. Les paramètres du maillage n'étant pas adaptés aux différentes parties de la statue, nous avons préféré découper logiquement les éléments. Afin d'optimiser au maximum les propriétés du maillage nous avons modélisé séparément le bras, la poitrine, le carquois, l'aisselle et le drapé. Il s'avère que l'option de maillage « *Regular Sampling* » a fourni les meilleurs résultats. Malheureusement, en procédant ainsi nous perdons la cohérence du maillage sur l'ensemble du modèle, puisque les paramètres de maillage, et en particulier la taille des triangles du maillage de chaque partie, peuvent varier du simple au double. De plus, nous nous sommes rendu compte qu'à certains endroits un double maillage s'est construit, provoquant un phénomène de « double surface » qui peuvent parfois se chevaucher. Ce phénomène s'explique par le fait que l'épaisseur de la couche de points demeure encore trop importante. Nous avons dû faire face à des erreurs dans le maillage : nous avons détruit certains endroits, puis nous avons effectué une reconstruction. Nous avons établi des ponts, appelés « coutures » en modélisation, entre les bords libres pour assembler les différentes parties. Après avoir bouché les trous dans le maillage, nous avons effectué un lissage du modèle obtenu. La Figure 4-3 montre plusieurs vues du modèle :

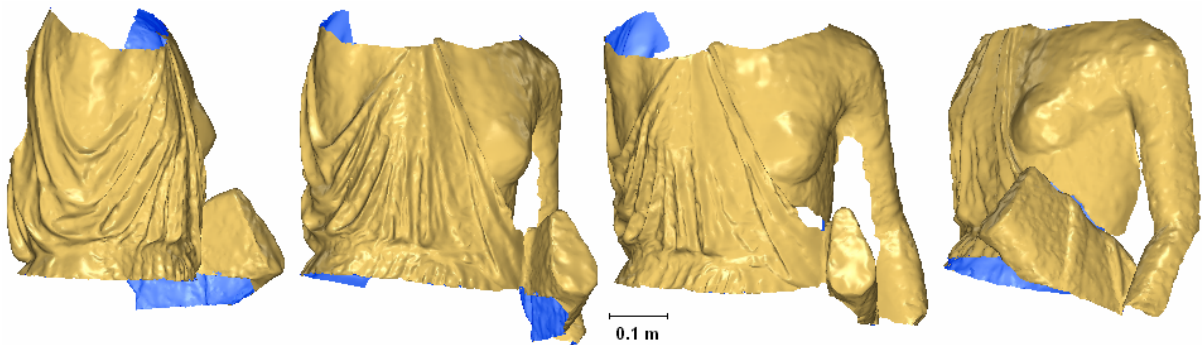


Figure 4-3 : Différentes vues du buste modélisé avec les données Faro

Une comparaison entre le maillage du nuage brut, le maillage brut du nuage filtré et le modèle obtenu figure en Annexe 20. Nous trouverons en Annexe 21 une meilleure visualisation du modèle réalisé.

## 4.2. Cas des données TRIMBLE

### 4.2.1. Réduction du bruit

A l'instar de l'obtention du modèle Faro, nous avons procédé de la même manière pour aboutir au modèle Trimble. A l'étape de la segmentation, en fonction du point de vue des stations, nous avons sélectionné les différentes parties du buste pour limiter au maximum les zones de recouvrement. Le nuage brut du buste compte plus de 1 054 000 points. A l'issue du filtrage, le nuage ne contient plus que près de 985 200 points, soit plus de 6.5% des points qui ont disparu lors de la création de la « *Range Image* ». Lors de la consolidation des différents nuages de points avec le logiciel RealWorks, dont le rapport d'erreur figure en Annexe 22, les erreurs moyennes sur la première, la deuxième et la troisième station sont respectivement  $\pm 1.7$  mm,  $\pm 2.2$  mm et  $\pm 1.6$  mm. L'épaisseur du nuage brut est au maximum de 2.5 cm alors que l'épaisseur du nuage filtré est d'environ 0.8 mm.



4.2.2. *Modèle Trimble du buste de l'Amazone de type « Mattéi »*

Pour réaliser le modèle du buste issu des données Trimble, nous avons procédé de la même façon que précédemment. Constatant qu'un maillage global du nuage filtré ne donnait pas de résultat satisfaisant, nous avons séparé les différents éléments de la manière suivante : le bras, le drapé, le carquois, l'aisselle et la poitrine. Pour réaliser la triangulation nous avons utilisé les options « *Regular Sampling* » pour le drapé, la poitrine et le carquois, et l'option « *Mesh in two steps* » pour l'aisselle et le bras. Il en résulte que dans ce cas, aussi, le maillage n'est plus cohérent. Nous avons observé, que par endroit, un double, voire un triple maillage s'est construit. Nous avons procédé à des destructions de certaines parties du maillage, à cause de la formation de triangles aberrants, que nous avons par la suite reconstruit. Nous avons aussi utilisé le bouchage des trous et le lissage. La Figure 4-4 montre le résultat de la modélisation du buste.

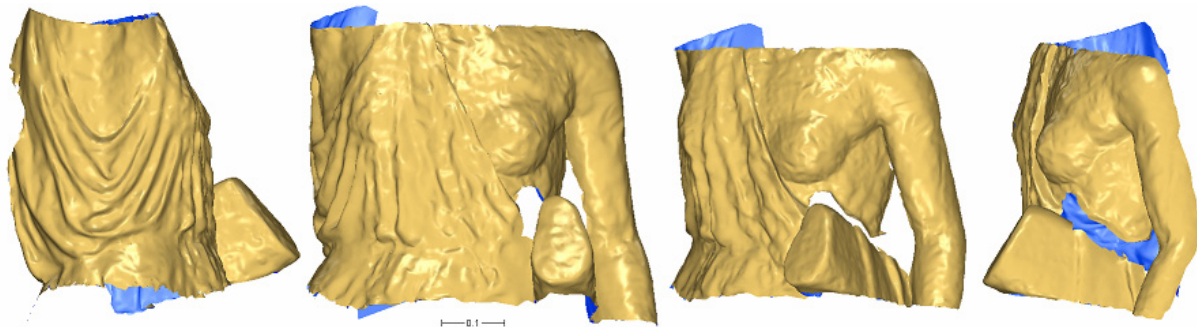


Figure 4-4 : Différentes vues du buste modélisé avec les données Trimble

Une comparaison entre le maillage du nuage brut, le maillage brut du nuage filtré et le modèle obtenu figure en Annexe 23. Nous trouverons en Annexe 24 une meilleure visualisation du modèle réalisé.

4.3. *Analyse des résultats*

4.3.1. *Etude de précision de la détermination d'un point*

Pour déterminer un point en trois dimensions nous appliquons les Formules 4-1, où D est la distance en mètres,  $\theta$  l'angle horizontal et  $\varphi$  l'angle vertical .

$$\begin{aligned} X &= D \cos \theta \cos \varphi \\ Y &= D \sin \theta \cos \varphi \\ Z &= D \sin \varphi \end{aligned}$$

Formule 4-1 : Détermination des coordonnées d'un point en trois dimensions

Nous appliquons à ces dernières formules le principe de transmission des erreurs moyennes quadratiques, nous obtenons les Formules 4-2.

$$\begin{aligned} mq_X^2 &= (\cos \theta \times \cos \varphi)^2 \times mq_D^2 + (-D \times \sin \theta \times \cos \varphi)^2 \times mq_\theta^2 + (-D \times \cos \theta \times \sin \varphi)^2 \times mq_\varphi^2 \\ mq_Y^2 &= (\sin \theta \times \cos \varphi)^2 \times mq_D^2 + (D \times \cos \theta \times \cos \varphi)^2 \times mq_\theta^2 + (-D \times \sin \theta \times \sin \varphi)^2 \times mq_\varphi^2 \\ mq_Z^2 &= (\sin \varphi)^2 \times mq_D^2 + (D \times \cos \varphi)^2 \times mq_\varphi^2 \end{aligned}$$

Formule 4-2 : Erreurs moyennes quadratiques théoriques des coordonnées

Nous pouvons alors réaliser une étude sur la précision planimétrique d'un point. Nous considérons la distance scanner-objet d'un point (cf. Formule 4-3) avec  $X_{scan}$ ,  $Y_{scan}$ , les coordonnées planimétriques du scanner et  $X_{point}$ ,  $Y_{point}$ , les coordonnées d'un point du nuage.

$$D_{scan-point} = \sqrt{(X_{scan} - X_{point})^2 + (Y_{scan} - Y_{point})^2}$$

**Formule 4-3 : Distance scanner-objet**

Si nous considérons que les coordonnées du scanner laser sont nulles, nous avons la Formule 4-4.

$$D_{scan-point} = \sqrt{X_{point}^2 + Y_{point}^2}$$

**Formule 4-4 : Distance scanner-objet avec les coordonnées du scanner nulles**

Nous appliquons à cette dernière formule le principe de transmission des emqs pour déterminer l’erreur planimétrique (cf. Formule 4-5).

$$mq_{plani}^2 = \left( \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)^2 mq_X^2 + \left( \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)^2 mq_Y^2$$

**Formule 4-5 : Erreur planimétrique**

**Application numérique :**

Pour les données Faro, nous connaissons la précision :

- d’une mesure de distance (à 25 m)  $mq_D = \pm 3 \text{ mm}$
- de la mesure de l’angle horizontal :  $mq_\theta = \pm 0.009^\circ$  soit  $\pm 157 \text{ } \mu\text{rad}$  soit  $0.01 \text{ gon}$
- de l’angle vertical :  $mq_\phi = \pm 157 \text{ } \mu\text{rad}$

Pour les données Trimble, nous connaissons la précision :

- d’une mesure de distance ( $\leq 50 \text{ m}$ ) pour 4 tirs par point  $mq_D = \pm 1.4 \text{ mm}$
- de la mesure de l’angle horizontal :  $mq_\theta = \pm 60 \text{ } \mu\text{rad}$  soit  $0.0038 \text{ gon}$
- de l’angle vertical :  $mq_\phi = \pm 70 \text{ } \mu\text{rad}$  soit  $0.0045 \text{ gon}$

Nous considérons les données d’acquisition suivantes :

- distance de mesure  $D = 6 \text{ m}$
- mesure de l’angle vertical :  $\pi / 4$  soit  $50 \text{ gon}$
- mesure de l’angle horizontal :  $\pi / 4$  soit  $50 \text{ gon}$

Nous prendrons  $X_{point} = 6 \text{ m}$  et  $Y_{point} = 0 \text{ m}$  pour le calcul de l’erreur moyenne quadratique planimétrique. Nous obtenons les résultats présents dans le Tableau 4-1.

Erreur Moyenne Quadratique	Faro	Trimble
$mq_x$	$\pm 1.6 \text{ mm}$	$\pm 0.7 \text{ mm}$
$mq_y$	$\pm 1.6 \text{ mm}$	$\pm 0.7 \text{ mm}$
$mq_z$	$\pm 2.2 \text{ mm}$	$\pm 1.0 \text{ mm}$
$mq_{plani}$	$\pm 1.6 \text{ mm}$	$\pm 0.7 \text{ mm}$

**Tableau 4-1 : Comparaison de la détermination d’un point**

Nous remarquons que la détermination de la planimétrie des points est plus précise que l’altimétrie ( $mq_z$ ). A partir de cette étude théorique, nous pouvons dire qu’un point numérisé avec le scanner Faro est inscrit à l’intérieur d’une sphère de 2.2 mm de rayon alors qu’un point numérisé avec le scanner Trimble s’inscrit dans une sphère de 1mm de rayon. Cependant, ces résultats doivent être nuancés. Bien que les données de départ sur les précisions des mesures soient issues des constructeurs Faro et Trimble, elles ne sont valables que pour des distances respectives de 25 m et inférieure à 50 m, alors que nous numérisons les

statues à une distance moyenne de 6 m. Les constructeurs ne fournissent pas de données concernant la précision de mesures à courte distance.

#### 4.3.2. Analyse des modèles du buste Faro et du buste Trimble

Que ce soit avec le modèle Faro ou le modèle Trimble, nous remarquons la présence de trous sur le flanc droit dus au carquois qui masquait cette partie lors de la numérisation depuis la première station. Les résultats obtenus après six jours entiers de traitement pour chacun des modèles sont relativement décevants. En effet, nous pouvons remarquer que même les parties sensées être lisses restent plus ou moins ondulées (exemple du sein et du bras), les petits plis du drapé ont disparu ou sont très infimes, et les détails du carquois ne sont plus distinguables, comme l'illustre la Figure 4-5 qui montre la comparaison entre des photos de la statue et des images des deux modèles. D'un point de vue qualitatif, nous devons noter que les détails du drapé apparaissent plus finement sur le modèle Faro. De plus, bien que les parties lisses soient déformées sur les deux bustes, elles se révèlent être beaucoup moins abîmées sur le modèle Faro. Le résultat confirme que les nuages de points sont encore trop bruités.

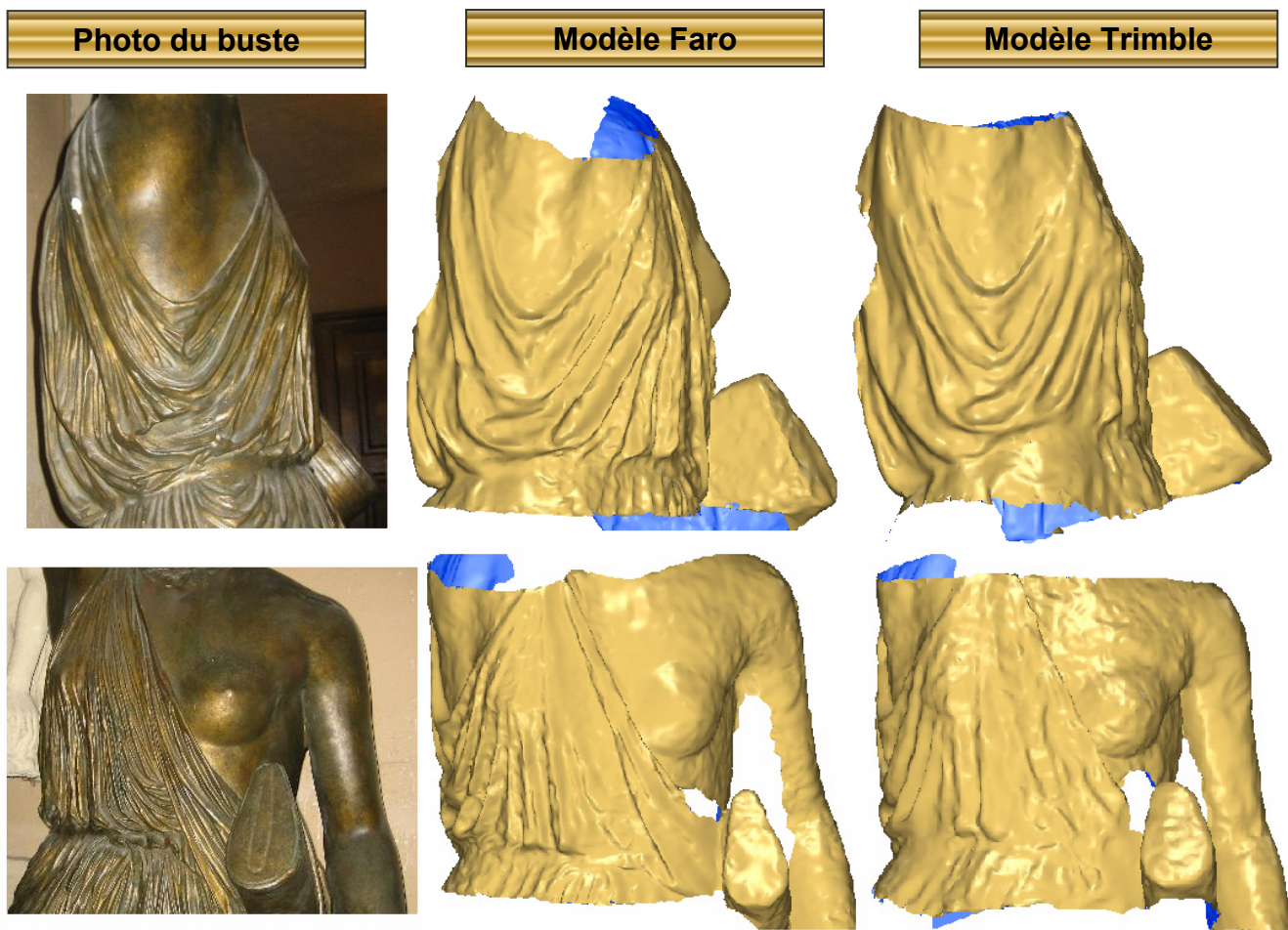


Figure 4-5 : Comparaison entre les photos de la statue et des images du modèle Faro

#### 4.3.3. Cartographie des écarts

3DReshaper est un logiciel qui est aussi adapté pour faire de la rétro-conception, il permet donc de faire des « inspections ». L'outil « Compare/Inspect » permet la création d'une cartographie des écarts 3D en couleur. Cet outil a permis de comparer les modèles 3D de la statue aux nuages de points bruts dont ils sont respectivement issus. La comparaison entre une surface maillée et un nuage de points se fait par mesure en chaque point de la distance entre le modèle et le nuage. Une échelle de couleur accompagnée de seuils



paramétrables permet de représenter les écarts en fonction de leur importance. Notons que cet outil ne donne pas d'écarts-types sur les observations. Nous pouvons juste avoir une idée de la précision approximative des différents modèles.

#### 4.3.3.1. Cartographie des écarts du modèle Faro

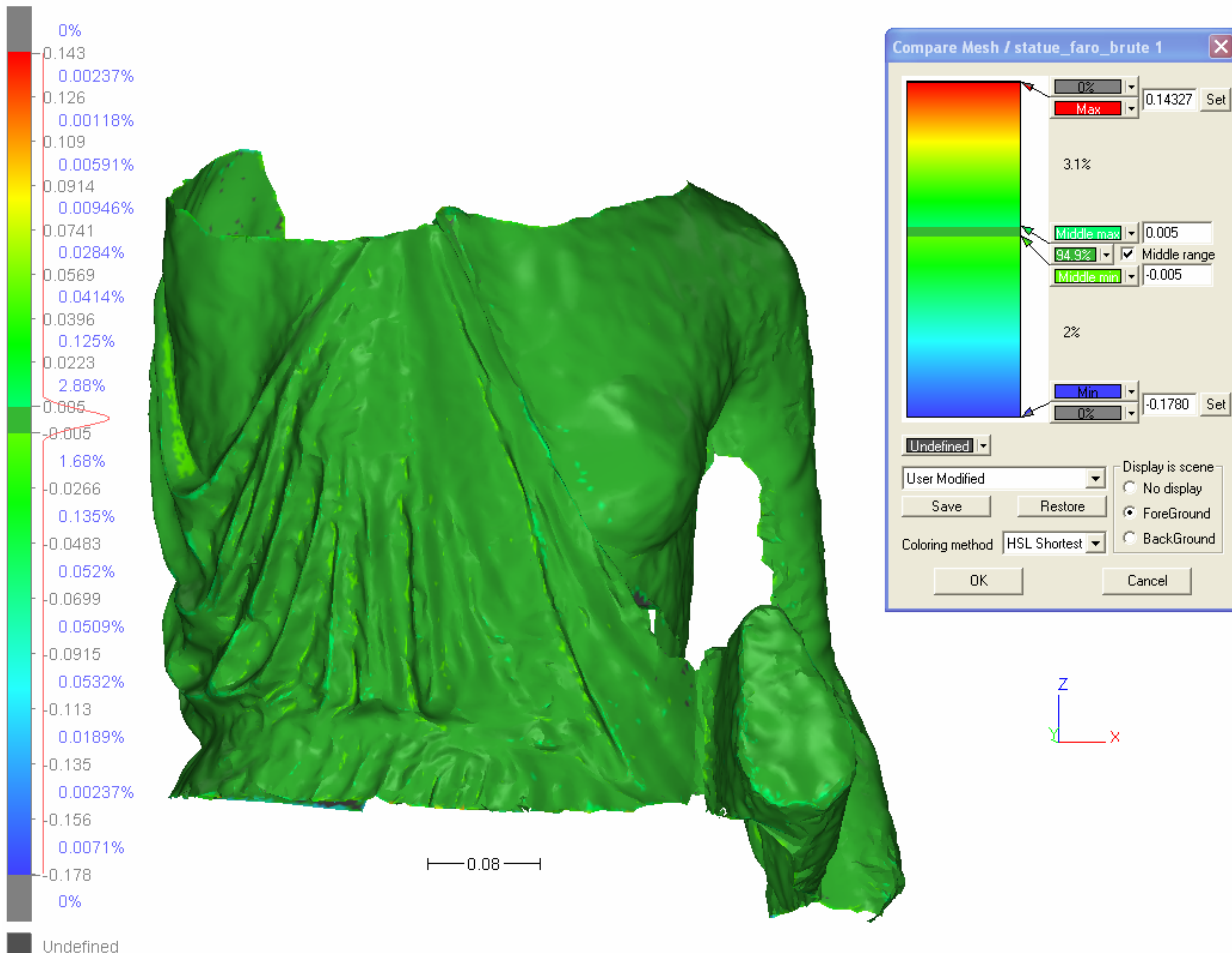


Figure 4-6 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Faro et le modèle associé

Nous avons projeté le nuage brut consolidé Faro sur le modèle Faro associé. La Figure 4-6 illustre le résultat. Notons que 99.4% des points sont à  $\pm 2$  cm du modèle, 94.9% des points sont à  $\pm 0.5$  cm du modèle, 63.7% des points sont situés à  $\pm 0.2$  cm, et 37.7% des points sont dans un intervalle de  $\pm 0.1$  cm par rapport au modèle. Différentes cartographies des écarts sont visualisables en Annexe 25 Les écarts maximaux entre le nuage de points brut et le modèle sont  $-17.8$  cm et  $+14.3$  cm, ce qui suggère la présence de points faux. L'écart moyen entre le nuage brut et le modèle est de  $-8$  mm et l'écart-type est de  $\pm 4.74$  cm. Ceci confirme la présence de points faux qui sont très éloignés du modèle. Cependant nous pouvons dire qu'il y a aussi de nombreux points qui sont très proches de la surface du modèle pour contrer ces points faux. En d'autres termes, le modèle qui est généré tend à exclure ces points faux pour être au plus près de la grande majorité des points. Il serait intéressant de pouvoir éliminer ces points dans la suite du projet afin de diminuer la dispersion des points et donc d'améliorer la qualité du modèle.

#### 4.3.3.2. Cartographie des écarts du modèle Trimble

Nous avons projeté le nuage brut consolidé Trimble sur le modèle Trimble associé. La Figure 4-7 illustre le résultat. Notons que 85.1% des points sont à  $\pm 1$  cm du modèle, 49.4% des points sont à  $\pm 0.5$  cm du modèle, 20.6% des points sont situés à  $\pm 0.2$  cm. Différentes cartographies des écarts sont disponibles en

Annexe 26. Les écarts maximaux entre le nuage de points brut et le modèle sont  $- 18.5$  cm et  $+ 13.5$  cm, ce qui suggère la présence de points faux. L'écart moyen entre le nuage brut et le modèle est de  $- 2.5$  mm et l'écart-type est de  $\pm 9.5$  mm. Ces valeurs confirment là aussi la présence de points faux qui sont très éloignés du modèle. Cependant nous pouvons dire qu'il y a aussi de nombreux points qui sont très proches de la surface du modèle pour contrer ces points faux. Bien que le résultat sur la moyenne et l'écart-type sur les écarts entre le nuage brut et le modèle soient meilleurs que ceux des données Faro, nous pouvons nous interroger sur la pertinence d'un tel résultat. En effet, le faible écart-type tend à faire penser que le modèle généré s'approche de tous les points du nuage même ceux les plus éloignés. De ce fait, même les points faux seraient pris en compte dans la construction du modèle. Si nous ne parvenons pas à éliminer ces points faux, nous pouvons être dans la situation où la moyenne des écarts et l'écart-types des écarts sont relativement faibles, ce qui ferait croire que le modèle obtenu serait de bonne qualité. Or la prise en compte de ces points faux pour la modélisation déformerait globalement le modèle obtenu.

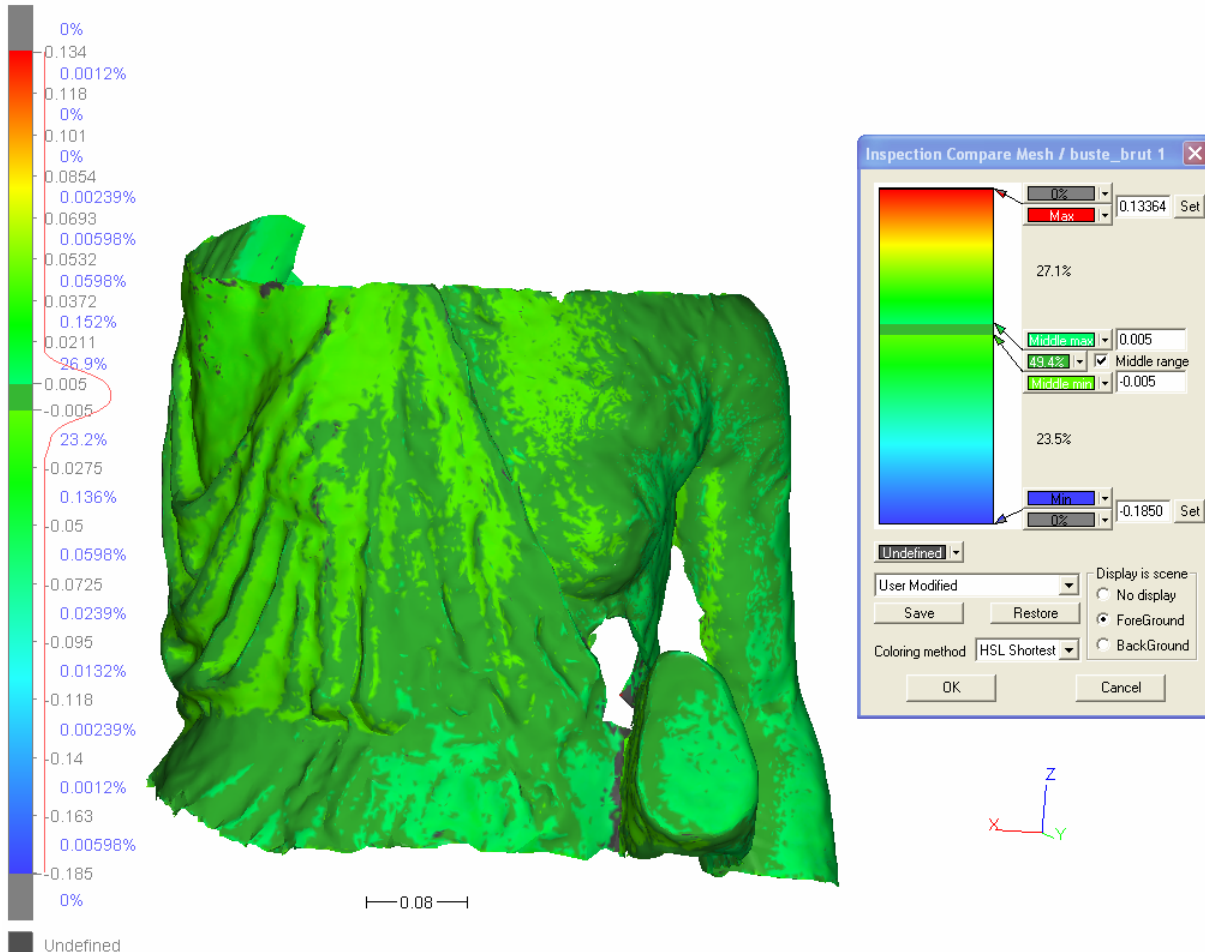


Figure 4-7 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Trimble et le modèle associé

#### 4.3.3.3. Comparaison du modèle Faro et du modèle Trimble

Nous avons établi une cartographie des écarts entre le modèle Faro et le modèle Trimble (cf. Figure 4-8). Les écarts s'échelonnent de  $- 2.9$  cm à  $+ 2.8$  cm. 33.2% des écarts entre les deux modèles sont compris entre  $\pm 2$  mm. Nous pouvons remarquer que les plus gros écarts correspondent à la partie drapée du buste. En effet, les zones grisées présentes au niveau des plis lors de la projection du modèle Trimble sur le modèle Faro, illustrent le fait que le drapé du modèle Trimble n'est peut être pas assez marqué en profondeur. Néanmoins, les surfaces lisses correspondent relativement bien entre les deux modèles.

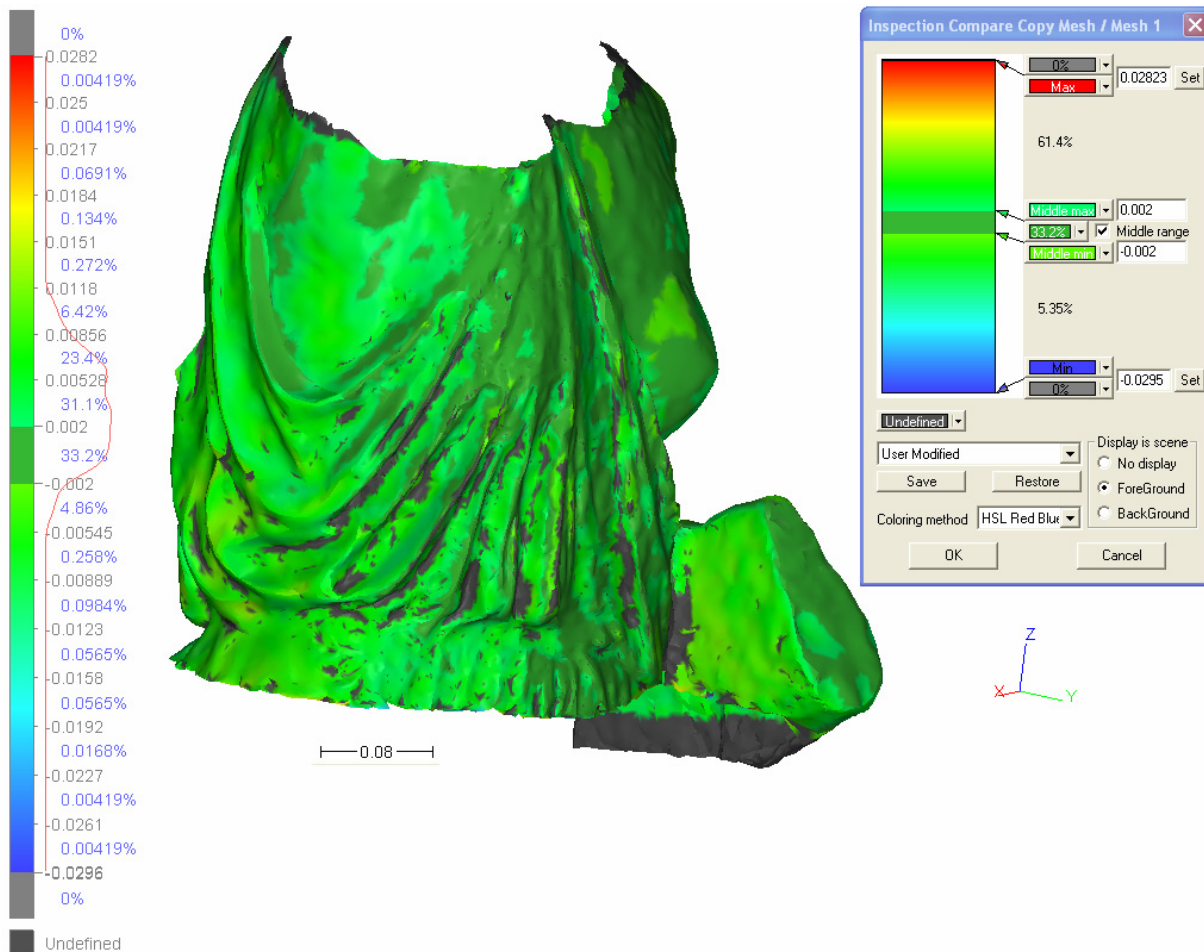


Figure 4-8 : Comparaison des écarts entre le modèle Faro et le modèle Trimble

#### 4.4. Test : Application d'un double filtrage « Wiener »

Nous avons appliqué notre processus de filtrage sur un échantillon de points issu des données Faro comportant une partie lisse et une partie drapée. Dans un premier temps, l'échantillon a subi l'intégralité du traitement que nous proposons. Dans un deuxième temps, nous avons créé une variante de notre programme initial en effectuant deux fois de suite un filtrage « Wiener » sur l'échantillon. Nous pouvons alors comparer les différents modèles obtenus (cf. Figure 4-9).

Visuellement, il semble que l'application de deux filtres « Wiener » permette d'accentuer les arêtes vives et d'amoinrir les effets d'ondulation sur les surfaces lisses. Nous avons projeté le nuage brut sur chacun des échantillons (cf. Figure 4-10). Il s'avère que les écarts entre le nuage de points brut et le modèle issu d'un filtrage sont plus importants (de -0.8 cm à + 1.1 cm) que lorsque nous effectuons deux filtres (écarts allant de -0.7 cm à + 0.6 cm). Cependant, nous remarquons que 68% des points dans le premier cas contre 68.5% des points dans le deuxième cas sont compris dans des écarts de  $\pm 1.5$  mm. L'écart maximal entre les deux modèles est de 4.6 mm (cf. Figure 4-11). Sur cet échantillon, le nuage de points brut a une épaisseur moyenne de 1.5 cm. Après le premier filtrage, l'épaisseur moyenne de l'échantillon est de 0.7 cm. Cette épaisseur de nuage de points est réduite à 0.3 cm après le deuxième filtrage. Notons que l'étape du post-traitement pour l'optimisation du maillage a été extrêmement limitée dans le cas de l'échantillon filtré deux fois. Par conséquent, les résultats de ce premier test nous ont paru relativement intéressants. D'autres échantillons, notamment au niveau des hautes fréquences du drapé, sont en cours d'étude afin de déterminer si la modélisation en serait réellement plus aisée et quelles serait les conséquences sur le modèle final que nous obtiendrions.

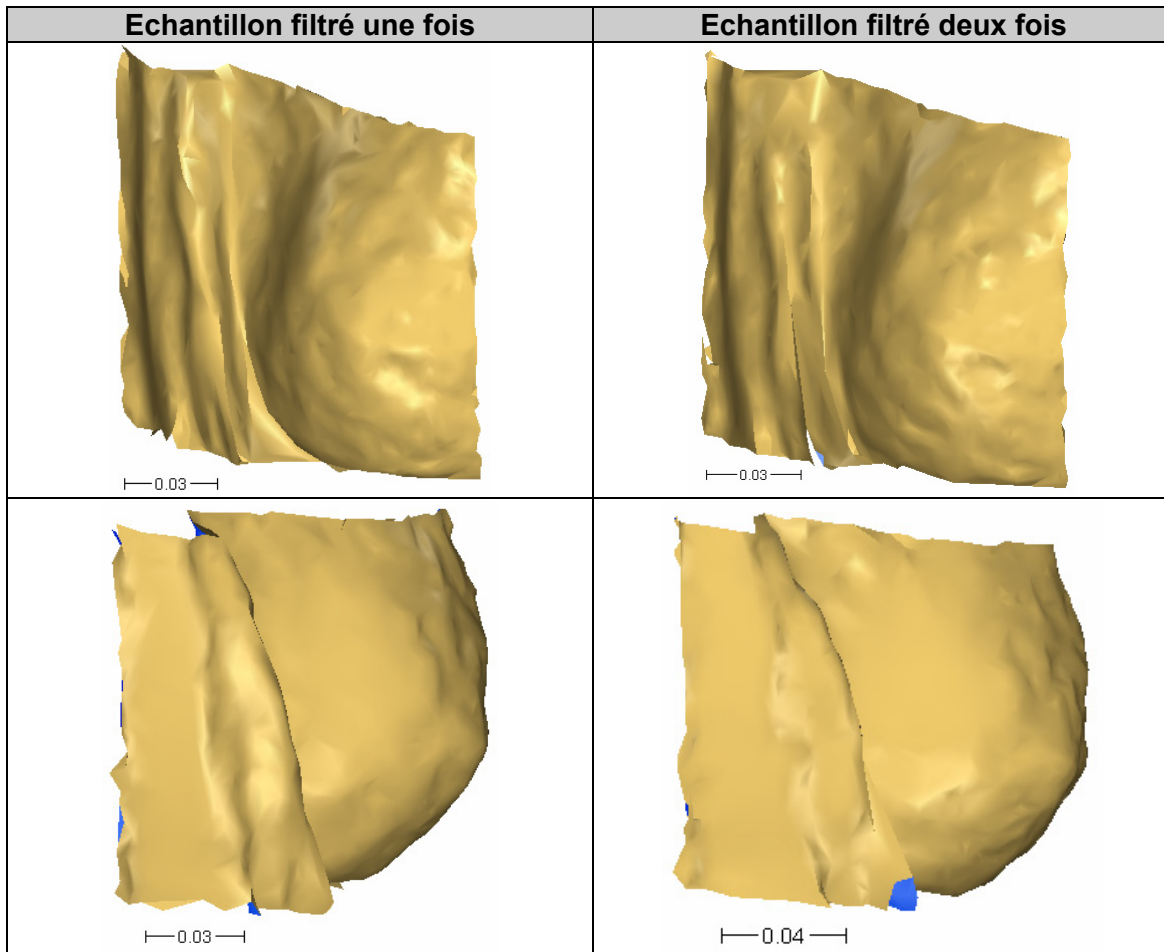


Figure 4-9 : Comparaison de l'échantillon filtré une fois et de l'échantillon filtré deux fois

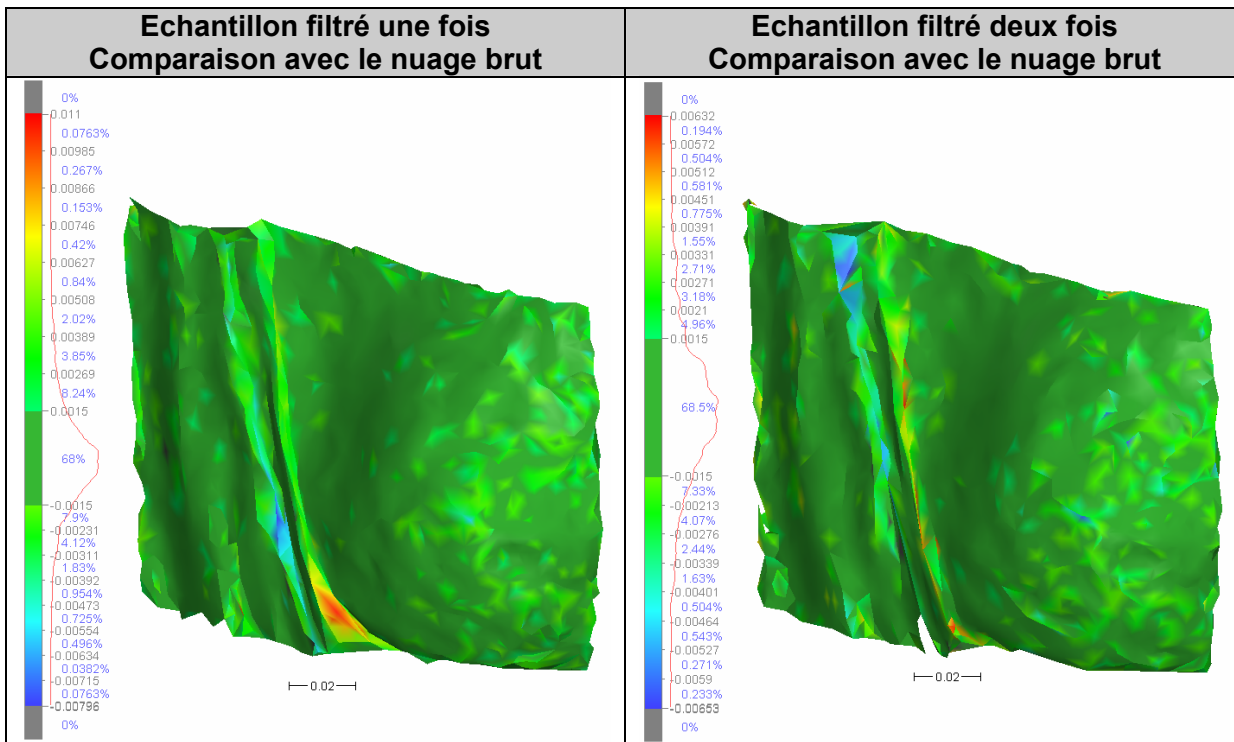


Figure 4-10 : Cartographies des écarts entre le nuage brut et les échantillons filtrés une et deux fois



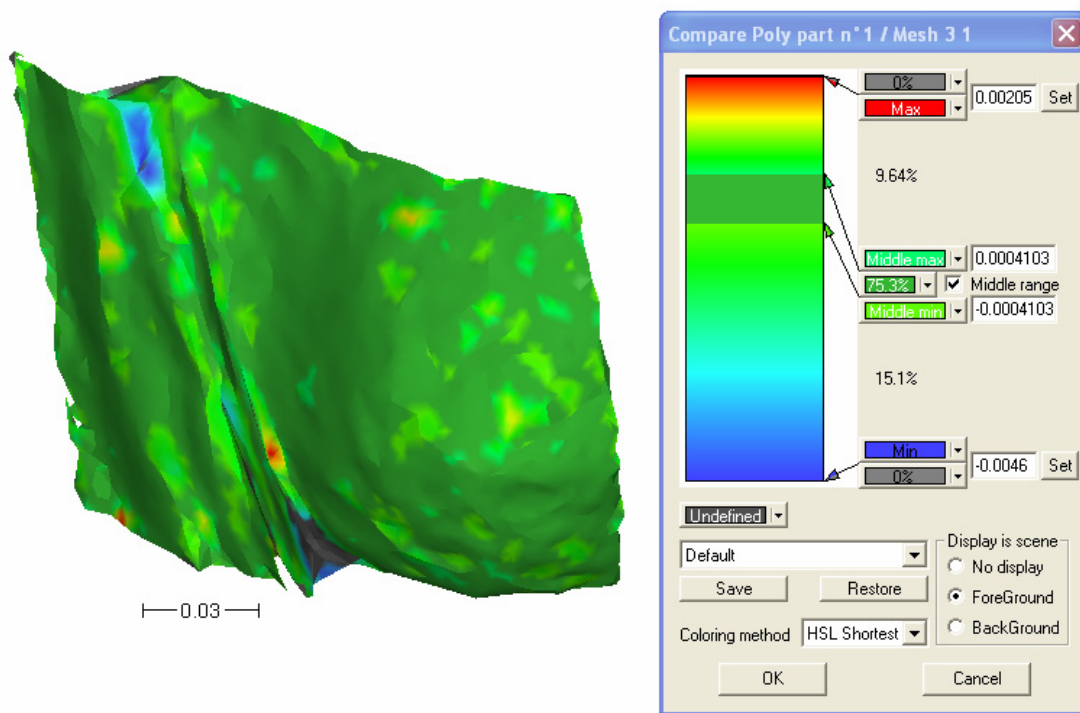


Figure 4-11 : Cartographie des écarts entre les deux modèles

## Conclusion et perspectives

La modélisation de statues est une avancée considérable dans la conservation du patrimoine. Ce thème est un important axe de recherche. Le traitement de nuages de points issus de scanners laser est, quant à lui, un des principaux sujets de recherche actuel. De nombreuses équipes recherchent et perfectionnent des méthodes de réduction de bruit sur la mesure pour optimiser la phase de filtrage.

Dans un premier temps, ce projet a suscité de nombreuses recherches sur les différentes techniques et méthodes proposées pour obtenir des modèles de statues à partir de nuages de points. A l'issue de cette étude, nous avons mis en place notre propre procédure de réduction du bruit sur la mesure accompagné de notre propre méthode de modélisation, qui présente l'originalité de filtrer les données avant de procéder à la consolidation des divers nuages de points. De plus, ce projet nous a permis de tester le scanner laser Faro LS à mesure de différence de phase en plus du scanner Trimble de l'INSA. Du point de vue qualitatif, le modèle Faro semble le plus représentatif de la statue originale. Les détails apparaissent plus distinctement, les arêtes semblent moins lissées, les parties lisses paraissent moins déformées. Du point de vue quantitatif, il est difficile de dire quel est le modèle le plus précis. En effet, nous n'avons pas de mesures de contrôle sur la statue, car la méthode de relevé classique d'une statue reste manuelle et fastidieuse. Nous pouvons ajouter que nous ne disposons pas non plus d'un modèle numérique de référence pour établir une comparaison. Cependant, si nous considérons chaque modèle indépendamment l'un de l'autre, nous observons qu'un plus grand nombre de points du nuage issu des données Faro est proche du modèle associé.

Parmi les objectifs que nous nous étions fixés, nous sommes parvenus à obtenir des modèles de buste de statues. Que ce soit avec le scanner laser Trimble GX ou le scanner laser Faro LS, les statues ont été entièrement numérisées à l'aide d'un seul type de matériel. De plus, nous avons utilisé des logiciels standardisés. En effet, notre processus de filtrage a été programmé grâce au logiciel Matlab et fonctionne grâce à des filtres proposés par le logiciel, la modélisation est réalisée grâce au logiciel 3DReshaper développé et commercialisé par l'entreprise Technodigit.

Bien que nous parvenions à obtenir des modèles en trois dimensions, le résultat reste décevant en l'état. Des déformations persistent dans les deux types de modèles que nous obtenons. Nous pouvons nous demander comment améliorer notre processus. L'amélioration doit pouvoir s'effectuer dès l'acquisition des données. En effet, que ce soit avec les données issues du scanner Faro ou du scanner Trimble, les nuages de points résultants sont très bruités, puisque leurs épaisseurs maximales dépassent 1.5 cm. Nous pouvons dire d'une part que ces deux scanners laser ne sont pas adaptés à de l'acquisition à courte distance. Afin de réduire ce bruit sur la mesure, il faudrait sans doute optimiser les conditions d'acquisition, à savoir de faire les numérisations dans l'obscurité totale afin d'éviter les interférences dues à la lumière. De plus, l'expérimentation a été menée sur une statue particulièrement complexe par sa morphologie et présentant de très hautes fréquences sur le drapé. Cette statue a aussi la particularité d'être très sombre, ce qui a posé sans doute des problèmes d'absorption du signal et donc une faible réflectivité du rayon laser.

Certes, nous n'utilisons qu'un seul type de système de numérisation, mais nous devons faire face à de nombreux masques dus aux différents éléments de la statue elle-même. Par conséquent, la numérisation de certaines parties des statues est difficile. Un système de scanner laser à repérage de position semble beaucoup plus adapté pour ce type de travaux. Un essai de numérisation a été réalisé avec le Handyscan, qui est extrêmement maniable et souple d'utilisation, en collaboration avec le laboratoire MAP-CRAI, qui se situe au sein de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy. Malheureusement, l'acquisition de données au Handyscan sur l'Amazone a été impossible, car le rayon laser projeté sur la statue à une quinzaine de centimètre n'était pas réfléchi à cause de sa couleur sombre. Un autre exemple d'un buste en plâtre blanc a été numérisé et figure en Annexe 27.

En ce qui concerne la procédure de filtrage, le principal problème réside dans la construction de la « Range Image » des données Trimble. Nous nous sommes rendu compte que le scanner Trimble GX acquiert des données angulaires avec un pas qui subit de très légères variations au cours de la numérisation.



De ce fait, nous perdons des données en utilisant le mode de construction adopté. Une étude est toujours en cours pour pallier ce problème.

Pour essayer d'optimiser le filtrage des données, à la fois sur les parties lisses et les parties présentant des hautes fréquences sur la statue, nous avons choisi d'utiliser un filtre adaptatif de type « Wiener », l'unique filtre adaptatif proposé par le logiciel Matlab. Cette étude n'avait pas pour objectif de créer un nouveau filtre, mais d'utiliser le filtre le plus adapté, proposé par le logiciel Matlab. Il serait sans doute utile de s'intéresser à un nouveau type de filtrage basé sur les ondelettes, qui semble apporter une réponse relativement satisfaisante dans le traitement du bruit du nuage de points.

Le programme créé génère des temps de calcul très longs, pouvant s'étaler sur plusieurs jours, et Matlab gère très difficilement les fichiers comptant plus de 500 000 points. Il serait sans doute intéressant de compiler le programme dans un langage plus performant du type C ou C++, afin d'augmenter la capacité de traitement du nombre de points et de réduire les temps de calcul.

En revanche, le logiciel de modélisation 3DReshaper s'est avéré très efficace pour la modélisation des zones complexes et pour apporter des solutions de reconstruction du maillage. Son outil de cartographie des écarts permet de se donner une bonne idée de la qualité du modèle obtenu.

Le travail effectué lors de ce projet permet d'ouvrir de nouvelles perspectives dans la modélisation architecturale et la conservation du patrimoine pour le laboratoire MAP-PAGE. C'était la première fois que le laboratoire effectuait des modélisations de statues. Le procédé mis en place doit être amélioré mais il reste néanmoins une solide base de travail. En effet, si nous observons l'état des données de départ et le modèle que nous parvenons à générer, nous avons un résultat relativement satisfaisant, même s'il est aussi décevant que des déformations persistent et que de nombreux détails aient disparus.

## Table des illustrations

<i>Figure 1-1 : Les théoriciens de la représentation</i>	- 9 -
<i>Figure 1-2 : Résultat d'un dessin complexe entièrement effectué à la main</i>	- 11 -
<i>Figure 1-3 : Modélisation du cénotaphe de la Hofkirche</i>	- 12 -
<i>Figure 1-4 : Modélisation des statues du Pharaon Pepi I</i>	- 12 -
<i>Figure 1-5 : Projection des 4 premières séquences géométriques du scanner (Akca et al. [2006])</i>	- 14 -
<i>Figure 1-6 : Modèles architecturaux (Queste [2006], modifié de Kadi [2004])</i>	- 15 -
<i>Figure 1- 7 : Représentation ambiguë d'un même objet (De La Losa [2000])</i>	- 15 -
<i>Figure 1-8 : Représentations conformes à la réalité d'une boîte à l'aide de modèles filaire, surfacique et volumétrique (Grussenmeyer et al. [2001])</i>	- 16 -
<i>Figure 1-9 : Modélisation par primitives géométriques (Fuchs [2006] modifié)</i>	- 17 -
<i>Figure 1-10 : Modélisation par balayage (De Luca [2006])</i>	- 18 -
<i>Figure 1-11 : Modélisation par interpolation</i>	- 18 -
<i>Figure 2-1 : Variantes de numérisation d'un objet en 3D (Specht [2005])</i>	- 20 -
<i>Figure 2-2 : A gauche, principe de la mesure par triangulation (Marbs et al. [2001])</i>	- 21 -
<i>Figure 2-3 : A droite, le capteur SOISIC de Mensi (Fuchs [2006])</i>	- 21 -
<i>Figure 2-4 : A gauche, principe de la mesure du temps de vol (Marbs et al. [2001])</i>	- 22 -
<i>Figure 2-5 : Au centre, le Leica HDS 3000 (Leica-geosystems@)</i>	- 22 -
<i>Figure 2-6 : A droite, le Trimble GX (Trimble@)</i>	- 22 -
<i>Figure 2-7 : Mesure de différence de phase et modulation d'amplitude (Fuchs [2006])</i>	- 22 -
<i>Figure 2-8 : Le scanner FastSCAN de Polhemus (Polhemus@)</i>	- 23 -
<i>Figure 2-9 : Fonctionnement du Handyscan (Handyscan@)</i>	- 23 -
<i>Figure 2-10 : A gauche, principe de la lumière structurée codée (Pagès [2004])</i>	- 24 -
<i>Figure 2-11 : A droite, projection de lumière structurée (Guhring, [2001])</i>	- 24 -
<i>Figure 2-12 : A gauche, le scanner laser FARO LS (Faro@)</i>	- 29 -
<i>Figure 2-13 : A droite, interchangeabilité des modules du laser</i>	- 29 -
<i>Figure 2-14 : Détail du miroir rotatif</i>	- 29 -
<i>Figure 2-15 : Utilisation de trois longueurs d'onde de modulation [Faro@]</i>	- 31 -
<i>Figure 2-16 : Objet décomposé en octrees et une partie de son arbre (De La Losa [2000])</i>	- 34 -
<i>Figure 3-1 : Les différents types d'Amazone, (Educnet@)</i>	- 35 -
<i>Figure 3-2 : Processus classique et processus proposé</i>	- 36 -
<i>Figure 3-3 : Risque d'ambiguïté pour la détermination des points</i>	- 36 -
<i>Figure 3-4 : A gauche, Amazone de type « Mattéi », copie figurant à la gypsothèque de l'UMB Strasbourg 2 (Gypsothèque@)</i>	- 37 -
<i>Figure 3-5 : A droite, numérisation de l'Amazone avec le scanner Trimble GX</i>	- 37 -
<i>Figure 3-6 : Influence de la compression de bruit sur le nuage de points</i>	- 38 -
<i>Figure 3-7 : Numérisation avec le scanner Faro</i>	- 39 -

**Figure 3-8 : Maillage du nuage de points brut de l'Amazone** \_\_\_\_\_ - 40 -

**Figure 3-9 : Evaluation des valeurs aberrantes par la détermination de la valeur médiane (Bonaz & Rinaudo) [2004]** \_\_\_\_\_ - 40 -

**Figure 3-10 : Analogie entre une région locale en traitement d'images et le maillage d'une surface (Mashiko et al. [2004])** \_\_\_\_\_ - 41 -

**Figure 3-11 : Application du filtre « moyenne » et du filtre « médian » (Yagou et al.[2002] modifié)** \_\_\_\_\_ - 41 -

**Figure 3-12 : Résultats et comparaison des filtres « moyenne », « médian » et de la transformée en distance** \_\_\_\_\_ - 42 -

**Figure 3-13 : Schéma général de la chaîne de traitement des données** \_\_\_\_\_ - 43 -

**Figure 3-14 : Système de coordonnées sphériques** \_\_\_\_\_ - 43 -

**Figure 3-15 : Structure des fichiers Faro exportés en fichier textuel** \_\_\_\_\_ - 45 -

**Figure 3-16 : Relation entre l'image à filtrer Faro et son « image jumelle »** \_\_\_\_\_ - 46 -

**Figure 3-17 : Relation entre l'image à filtrer Trimble et son « image jumelle »** \_\_\_\_\_ - 47 -

**Figure 3-18 : Illustration du filtre « moyenne »** \_\_\_\_\_ - 49 -

**Figure 3-19 : Application du filtre « moyenne » à l'image contenant les distances radiales** \_\_\_\_\_ - 50 -

**Figure 3-20 : Schéma synoptique de la procédure de filtrage** \_\_\_\_\_ - 52 -

**Figure 3-21 : Sphère Faro, rayon 72.5 mm (à gauche)** \_\_\_\_\_ - 52 -

**Figure 3-22 : Sphère Trimble, rayon 38.1 mm (au centre)** \_\_\_\_\_ - 52 -

**Figure 3-23 : Génération d'une sphère au plus proche du nuage de points (à droite)** \_\_\_\_\_ - 52 -

**Figure 3-24 : Consolidation des nuages de points (Amazone de type « Mattéi »)** \_\_\_\_\_ - 54 -

**Figure 3-25 : Le facteur de forme idéale** \_\_\_\_\_ - 56 -

**Figure 3-26 : Bouchage de trous, en continuité de courbure, à l'aide d'un pont dont l'orientation est définie** \_\_\_\_\_ - 57 -

**Figure 4-1 : Nuage de points consolidé ; à gauche, en nuances de gris ; à droite, en couleur par station** \_\_\_\_\_ - 58 -

**Figure 4-2 : Comparaison de l'épaisseur du nuage brut et du nuage filtré** \_\_\_\_\_ - 58 -

**Figure 4-3 : Différentes vues du buste modélisé avec les données Faro** \_\_\_\_\_ - 59 -

**Figure 4-4 : Différentes vues du buste modélisé avec les données Trimble** \_\_\_\_\_ - 60 -

**Figure 4-5 : Comparaison entre les photos de la statue et des images du modèle Faro** \_\_\_\_\_ - 62 -

**Figure 4-6 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Faro et le modèle associé** \_\_\_\_\_ - 63 -

**Figure 4-7 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Trimble et le modèle associé** \_\_\_\_\_ - 64 -

**Figure 4-8 : Comparaison des écarts entre le modèle Faro et le modèle Trimble** \_\_\_\_\_ - 65 -

**Figure 4-9 : Comparaison de l'échantillon filtré une fois et de l'échantillon filtré deux fois** \_\_\_\_\_ - 66 -

**Figure 4-10 : Cartographies des écarts entre le nuage brut et les échantillons filtrés une et deux fois** \_\_\_\_\_ - 66 -

**Figure 4-11 : Cartographie des écarts entre les deux modèles** \_\_\_\_\_ - 67 -

## Table des formules

<i>Formule 2-1 : Formule de détermination de la distance pour les scanners à mesure de temps de vol</i>	- 22 -
<i>Formule 2-2 : Formule de la longueur d'onde en fonction de la période</i>	- 30 -
<i>Formule 2-3 : Formule de la fréquence en fonction de la période</i>	- 30 -
<i>Formule 2-4 : Formule de la longueur d'onde en fonction de la fréquence</i>	- 30 -
<i>Formule 2-5 : Formule de la fréquence en fonction de la longueur d'onde</i>	- 30 -
<i>Formule 2-6 : Formule de calcul du trajet aller-retour de l'onde, et temps associé</i>	- 30 -
<i>Formule 2-7 : Signal sinusoïdal émis</i>	- 30 -
<i>Formule 2-8 : Pulsation du signal sinusoïdal</i>	- 30 -
<i>Formule 2-9 : Phase du signal émis</i>	- 30 -
<i>Formule 2-10 : Signal sinusoïdal reçu</i>	- 30 -
<i>Formule 2-11 : Formule de la différence de phase</i>	- 30 -
<i>Formule 2-12 : Calcul de la variation du temps</i>	- 30 -
<i>Formule 2-13 : Calcul de la différence de phase</i>	- 30 -
<i>Formule 2-14 : Expression de la différence de phase en fonction de la distance</i>	- 31 -
<i>Formule 2-15 : Expression de la distance en fonction de la différence de phase</i>	- 31 -
<i>Formule 2-16 : Expression de la distance en fonction de la fréquence</i>	- 31 -
<i>Formule 2-17 : Introduction de l'ambiguïté entière</i>	- 31 -
<i>Formule 3-1 : Transformation des coordonnées cartésiennes en coordonnées sphériques</i>	- 44 -
<i>Formule 3-2 : Calcul du nombre de colonnes de l'image</i>	- 46 -
<i>Formule 3-3 : Calcul du nombre de lignes de l'image</i>	- 46 -
<i>Formule 3-4 : Calcul de la moyenne et de la variance locale autour de chaque pixel</i>	- 50 -
<i>Formule 3-5 : Calcul de la nouvelle valeur de pixel selon le filtrage « Wiener »</i>	- 50 -
<i>Formule 3-6 : Transformation des coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes</i>	- 52 -
<i>Formule 3-7 : Expression de la similitude spatiale</i>	- 53 -
<i>Formule 3-8 : Coefficients réduits de la matrice rotation R</i>	- 53 -
<i>Formule 3-9 : Coefficient du vecteur translation T</i>	- 53 -
<i>Formule 3-10 : Expression développée de la matrice rotation R</i>	- 53 -
<i>Formule 4-1 : Détermination des coordonnées d'un point en trois dimensions</i>	- 60 -
<i>Formule 4-2 : Erreurs moyennes quadratiques théoriques des coordonnées</i>	- 60 -
<i>Formule 4-3 : Distance scanner-objet</i>	- 61 -
<i>Formule 4-4 : Distance scanner-objet avec les coordonnées du scanner nulles</i>	- 61 -
<i>Formule 4-5 : Erreur planimétrique</i>	- 61 -

## Récapitulatif des tableaux

<i>Tableau 1-1 : Test de précision : différences de distances absolues par rapport aux valeurs obtenues par une station totale (Bitteli et al. [2002])</i>	- 13 -
<i>Tableau 1-2 : Inventaire des différents logiciels de traitement de nuage de points (i3mainz@).</i>	- 19 -
<i>Tableau 2-1 : Comparaison des différents types de scanners</i>	- 27 -
<i>Tableau 3-1 : Influence de la compression du bruit sur le pas d'acquisition</i>	- 38 -
<i>Tableau 3-2 : Ecart-types relatifs de différents échantillons sur les trois stations de l'Amazonie</i>	- 51 -
<i>Tableau 3-3 : Influence du filtrage sur la consolidation des nuages de points</i>	- 55 -
<i>Tableau 4-1 : Comparaison de la détermination d'un point</i>	- 61 -

## **Bibliographie**

### **Ouvrages et revues**

- [AKC06] AKCA D., GRUEN A., ALKIS Z., DEMIR N., BREUKMANN B., ERDUYAN I., NADIR E., “3D modeling of the weary Herakles statue with a coded structured light system”, ISPRS Commission V, Symposium 2006, September, 25-27, 2006, Dresden, Germany.  
Disponible sur : [www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/AKCA\\_652.pdf](http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/AKCA_652.pdf)
- [BEL06] BELTON D. & LICHTI D., “Classification and segmentation of terrestrial laser scanner point clouds using local variance information”, ISPRS Commission V, Symposium 2006, September, 25-27, 2006, Dresden, Germany.  
Disponible sur : [http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~isprs/proceedings/paper/BELT\\_619.pdf](http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~isprs/proceedings/paper/BELT_619.pdf)
- [BIT06] BITTELI G., CAPRA A., ZANUTTA A., “Digital photogrammetry and laser scanning in surveying the « Nymphaea » in Pompeii”, ISPRS Commission V, Symposium 2002, September, 1-2, 2002, Corfu, Greece.  
Disponible sur : <http://www.isprs.org/commission5/workshop02/part5.pdf>
- [BOE02a] BOEHLER W. & MARBS A., “3D Scannings instruments”, Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, 2002.  
Disponible sur : [http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05\\_Boehler.pdf](http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p05_Boehler.pdf)
- [BOE02b] BOEHLER W., MARBS A., HEINZ G., SIEBOLD M., “3D scanning software : an introduction”, Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording, Corfu, 2002.  
Disponible sur : [http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p11\\_Boehler.pdf](http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/korfu/p11_Boehler.pdf)
- [BOE03] BOEHLER W., MARBS A., BORDAS VICENT M., « Investigating Laser Scanner Accuracy », Actes du XIX Symposium International CIPA, Antalya, Turquie, 30 Septembre - 3 Octobre 2003.  
Disponible sur : <http://cipa.icomos.org/fileadmin/papers/antalya/189.pdf>
- [BON04] BONAZ L. & RINAUDO F., “Terrestrial Laser scanner data processing”, ISPRS Commission V, Congress 2004, July, 12-23, 2004, Istanbul, Turkey.  
Disponible sur : <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm5/papers/608.pdf>
- [BUC06] BUCKSCH A. & APPEL VAN WAGENINGEN H., “Skeletonization and segmentation of point clouds using octrees and graph theory”, ISPRS Commission V, Symposium 2006, September, 25-27, 2006, Dresden, Germany.  
Disponible sur : [http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/1252\\_Dresden06.pdf](http://www.isprs.org/commission5/proceedings06/paper/1252_Dresden06.pdf)



- [CAL06] CALLIERI M., CIGNONI P., SCORPIGNO R., GORIG., RISALITI M., “Beyond manual drafting: a restoration-oriented system”, Journal of Cultural Heritage, Volume 7, Issue 3, July-September 2006, Pages 214-226.  
Disponible sur : [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleListURL&\\_method=list&\\_ArticleListID=556905088&\\_sort=d&view=c&\\_acct=C000008898&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=113008&md5=1c85ba012177df5a2c0b64b3acac5e6f](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleListURL&_method=list&_ArticleListID=556905088&_sort=d&view=c&_acct=C000008898&_version=1&_urlVersion=0&_userid=113008&md5=1c85ba012177df5a2c0b64b3acac5e6f)  
et sur : [http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2006/CCSGR06/beyond\\_drafting\\_finale\\_Wfigs.pdf](http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2006/CCSGR06/beyond_drafting_finale_Wfigs.pdf)
- [ENC95] ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS, - corpus 15 -, Edition Messiaen-Matalité, Paris, p530, 1995.
- [FAB05] FABRY V., « Réalisation de modèles 3D texturés type réalité visuelle à partir de données lasergrammétriques et photogrammétriques », Mémoire de soutenance de Projet de Fin d’Etude du diplôme Ingénieur INSA, filière topographie, TPLM-3D, Septembre 2005.
- [FOU06] FOURNIER M., DISCHLER J.-M., BECHMANN D., « Filtrage adaptatif des données acquises par un scanner 3D et représentées par une transformée en distance volumétrique », 19èmes journées de l’Association Française de l’Informatique Graphique (AFIG) et de l’Association Chapitre Français d’Eurographics, 22-24 novembre 2006, Bordeaux, France.  
Disponible sur : <http://afig2006.labri.fr/Articles/114.pdf>
- [FRE96] FREMY D. & FREMY M., « Quid 1996 », Edition Robert Laffont SA, ISBN 2-221-8055-6, 2190p, 1996.
- [FUC04] FUCHS A., ALBY E., BEGRICHE R., GRUSSENMEYER P., PERRIN J.-P., « Confrontation du relevé laser 3D aux techniques de relevé conventionnelles et développement d’outils numériques pour la restitution architecturale », Revue de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection n°173/174, pp. 36-47, 2004.  
Disponible sur : [http://www.crai.archi.fr/media/pdf/SFPT\\_FUCHS.pdf](http://www.crai.archi.fr/media/pdf/SFPT_FUCHS.pdf)
- [FUC06] FUCHS A., « Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-1, 2006.
- [GRU01] GRUSSENMEYER P., HANKE K., STREILEIN A., « Application métrologiques de la Photogrammétrie numérique ». Chap 4 de “Photogrammétrie numérique”, sous la direction de Kasser M., Egels Y.,Hermes, France p317 à 361, 2001.
- [GUH01] GUHRING J., “Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components”, Publication in “Photonics West, Videometrics VII”, Vol. 4309, SPIE, San Jose, USA, 2001.  
Disponible sur : <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/Videometrics01-Guehring-4309-24.pdf>
- [HAC94] HACHETTE, « Dictionnaire Hachette encyclopédique illustré 1994 », édition Hachette Livre, ISBN 2.01.020255.4, 2065 p, 1994.

- [HAN04] HANKE K. & BOEHLER W., “Recording and visualization of the cenotaph of German Emperor Maximilian I”, ISPRS Commission V, Congress 2004, July, 12-23, 2004, Istanbul, Turkey.  
Disponible sur : <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm5/papers/588.pdf>
- [HEI05] HEINZ G. & MÜLLER H., “Surveying of Pharaohs in the 21st Century”, Proceedings of the FIG Working Week 2005, i3mainz, Cairo, Egypt, April 2005.  
Disponible sur : [http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/mueller05/fig05\\_heinz\\_mueller.pdf](http://www.i3mainz.fh-mainz.de/publicat/mueller05/fig05_heinz_mueller.pdf)
- [KAD04] KADI H., « Du modèle architectural au modèle géométrique. Modélisation de colonnettes khmères à partir de nuages de points », Mémoire de DEA, MAP – CRAI, Nancy 2004.
- [LAD 91] LADRIERE J., « Herméneutique et épistémologie », p 107 à 125 de “Les métamorphoses de la raison herméneutique, Hommage à Paul Ricoeur”, acte de colloque de Cerisy-la-Salle, 1er/11 août 1988/ sous la direction de Jean Gresich, Richard Kearney.-Paris : CERF, 1991.-413.- (Collection Passages).
- [LOS00] DE LA LOSA A., « Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques », Thèse de doctorat, Spécialité Science de l’information géographique, Université de Marne-La-Vallée, 2000.
- [LUC06] DE LUCA L., « Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural : définition d’une approche hybride de reconstruction 3D d’édifices », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Aix-en-Provence, 2006.  
Disponible sur : <http://www.lsis.org/recherche/uploads/Luca06.pdf>
- [MAR01] MARBS A., HEINZ G., BOEHLER W., “The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording”, Proceedings of CIPA International Symposium, Potsdam, Germany, 2001.  
Disponible sur : <http://cipa.icomos.org/fileadmin/papers/potsdam/2001-11-wb01.pdf>
- [MAR02] MARBS A., “Experiences with laser scanning at i3mainz”, ISPRS Commission V, Symposium 2002, September, 1-2, 2002, Corfu, Greece.  
Disponible sur : <http://www.isprs.org/commission5/workshop02/part5.pdf>
- [MAT01] THE MATHWORKS, “Image Processing Toolbox for use with Matlab”, User’s guide, Version 3, The MathWorks Inc, 2001.
- [MAS04] MASHIKO T., YAGOU H., WEI D., DING Y., WU G., “3D triangle mesh smoothing via adaptive MMSE filtering”, Proceedings of the Fourth International Conference on Computer and Information Technology (CIT’04), September 14 – 16, 2004, pages 734 – 740.  
Disponible sur : <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9381/29791/01357282.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=1357282>

- [QUE06] QUESTE D., « Vers un processus automatique de modélisation du patrimoine architectural au moyen de données lasergrammétriques, le savoir architectural comme principal source d'information », Mémoire de soutenance de Master Design Global « Modélisation et Simulation des Espaces Bâti », Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, Université Henry Poincaré, Octobre 2006.
- [RAV06] RAVIER C., « Etude comparative des différentes méthodes de modélisation architecturale 3D à partir de données laser scanner terrestre et analyse de la précision finale des modèles 3D texturés », Mémoire de soutenance de Projet de Fin d'Etude du diplôme Ingénieur INSA, filière topographie, TPLM-3D, Octobre 2006.
- [RAB06] RABBANI T., VAN DEN HEUVEL F.A., VOSSelman G., “Segmentation of point clouds using smoothness constraint”, ISPRS Commission V, Symposium 2006, *September, 25-27, 2006, Dresden, Germany*.  
Disponible sur : <http://www.itc.nl/personal/vosselman/papers/rabbani2006.dresden.pdf>
- [SAI92] SAINT AUBIN J.-P., « Le relevé et la représentation de l'architecture », Inventaire Général, Paris, 231p, 1992.
- [SAL04] SALVI J., PAGES J., BATLLE J., “Pattern codification strategies in structured light systems”, Pattern Recognition, Volume 37, Issue 4, Agent Based Computer Vision, April 2004, pages 827-849.  
Disponible sur : <http://eia.udg.es/~jpages/ReportCodedLight03.pdf>
- [SPE05] SPECHT J., « Modélisation d'objet 3D par construction incrémentale d'un maillage triangulaire dans un contexte robotique », Thèse de doctorat en spécialité systèmes informatiques, Université de Toulouse III, Toulouse, 2005, 161 pages.  
Disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/81/48/PDF/tel-00009525.pdf>
- [TEC07] TECHNODOGIT, « 3DReshaper application tutorial V4.2 », Tutorial d'utilisation du logiciel 3DReshaper, Technodogit, 2007.
- [VIG06] ViIGUIER F., « Suivi des mouvements des Ouvrages en Terre de la SNCF par lasergrammétrie », Mémoire de soutenance de Projet de Fin d'Etude du diplôme Ingénieur INSA, filière topographie, SNCF, Octobre 2006.
- [YAG02] YAGOU H., OHTAKE Y., BELYAEV A., “Mesh smoothing via mean and median filtering applied to face normals”, Proceedings of the Geometric Modeling and Processing – Theory and Applications, IEEE, Pages 124 – 131, 2002.  
Disponible sur : <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7976/22067/01027503.pdf>

**Documents de formation**

- [BEL06] BELBIDIA S., « Représentation des courbes et surfaces : Modélisation géométrique et Architecture non-standard », Cours de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy, Master Recherche Design Global, spécialité « Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis », 2006.
- [LAN06a] LANDES T., « Télédétection, chapitre 7 : Acquisition de données du visible à l'infrarouge », Cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Filière Topographie, 2006.
- [LAN06b] LANDES T., « Télédétection, chapitre 5 : Les modes d'affichage et de traitement », Cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Filière Topographie, 2006.
- [LED06] LEDIG J., « Télémétrie et tachéométrie électroniques », Cours de l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Filière Topographie, 2006.

**Sites Internet**

Culture@[2007], Ministère de la culture et de la communication, *Mesure, relevé et représentation de l'objet culturel*.

URL : [http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/methodes/mesu\\_obj.htm#Historique](http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/methodes/mesu_obj.htm#Historique)

Educnet@[2006], Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, rubrique « Musagora »

URL : <http://www.educnet.education.fr/musagora/default.htm>

Faro@[2007], Constructeur FARO

URL : <http://www.faro.com/content.aspx?ct=fr&content=pro&item=5>

Gim@[2007], Gim International, *The Global Magazine for Geomatics*

URL : <http://www.gim-international.com/productsurvey/index.php>

Granddictionnaire@[2007], Grand dictionnaire terminologique, Office québécois de la langue française.

URL : <http://www.granddictionnaire.com>

Gypsothèque@[2007], Gypsothèque de l'Université Marc Bloch de Strasbourg

URL : <http://misha1.u-strasbg.fr/gypsothq/gypso/index.html>

Handyscan@[2007], Constructeur Handy 3D Scan

URL : <http://www.handyscan3d.com/en/index.php>

Leica-geosystems@[2007], Constructeur Leica Geosystems

URL : [http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs\\_405.htm](http://www.leica-geosystems.com/corporate/en/lgs_405.htm)

i3mainz@[2007], Site of i3mainz about 3D scanning

URL : <http://scanning.fh-mainz.de/>

Polhemus@[2007], Constructeur Polhemus

URL : <http://www.polhemus.com/>

Technodigit@[2007], Technodigit, Développeur du logiciel 3DReshaper

URL : [http://www.technodigit.com/fr1/Fr\\_index.htm](http://www.technodigit.com/fr1/Fr_index.htm)

Trimble@[2007], Constructeur Trimble

URL : <http://www.trimble.com/index.aspx>

Universalis@[2007], Encyclopedia Universalis

URL : [http://www.universalis.fr/corpus2encyclopedie/117/0/T228681/encyclopedie/AMAZONES\\_mythologie\\_.htm](http://www.universalis.fr/corpus2encyclopedie/117/0/T228681/encyclopedie/AMAZONES_mythologie_.htm)

Reconstructor@[2007], JRC 3D Reconstructor, logiciel de modélisation

URL : [http://www.topotek.it/rec2engl/index.php?option=com\\_content&task=view&id=16&Itemid=55](http://www.topotek.it/rec2engl/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=55)

### **Autre documentation**

#### **- Présentation Powerpoint**

[PAG04] PAGES J., “Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling”, Universitat de Girona, Computer Vision and Robotics Group, Institut d’informàtica i Aplicacions, 2004.

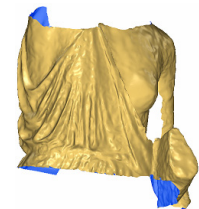
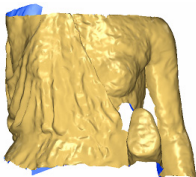
Disponible sur : <http://eia.udg.es/~jpages/>

*École Nationale Supérieure d'Architecture de Nancy  
Université Henri Poincaré (Nancy1)  
Institut National Polytechnique de Lorraine  
École Nationale Supérieure d'Architecture de Strasbourg  
Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg*

**Mémoire de Master Design Global, spécialité  
« Modélisation et Simulation des Espaces Bâti »**

**ANNEXES**

**RELEVÉ LASERGRAMMETRIQUE ET TRAITEMENT  
DES NUAGES DE POINTS DE MOULAGES DE LA  
GYPSOTHEQUE DE L'UNIVERSITE MARC BLOCH  
DE STRASBOURG**



*Présenté par Cyril CALLEGARO*

**Laboratoire d'Accueil :**

MAP-PAGE, UMR 694  
INSA de Strasbourg  
24, Boulevard de la Victoire  
67084 STRASBOURG Cedex



**Directeur de stage :**

M. Pierre GRUSSENMEYER  
Professeur des Universités

*Septembre 2007*



## Sommaire des Annexes

<i>Sommaire des Annexes</i>	- 81 -
<i>Annexe 1 : Tableau comparatif de logiciels</i>	- 83 -
<i>Annexe 1.1 : Tableau comparatif de logiciels de modélisation</i>	- 83 -
<i>Annexe 1.2 : Tableau comparatif de logiciels de traitement de nuage de points</i>	- 85 -
<i>Annexe 2 : Tableau comparatif de différents scanners lasers</i>	- 90 -
<i>Annexe 3 : Documentations des constructeurs</i>	- 94 -
<i>Annexe 3.1 : Documentations Trimble</i>	- 94 -
<i>Annexe 3.2 : Documentations Faro</i>	- 104 -
<i>Annexes 4 : Les risques liés au laser</i>	- 108 -
<i>Annexe 5 : Exemple d'une vue planaire avec le logiciel Faro Scene</i>	- 110 -
<i>Annexe 6 : Algorithme du « Marching Cube »</i>	- 111 -
<i>Annexe 7 : Illustration du seuillage</i>	- 115 -
<i>Annexe 8 : Programme réalisé pour filtrer les données Faro</i>	- 116 -
<i>Annexe 9 : Programme réalisé pour filtrer les données Trimble</i>	- 120 -
<i>Annexe 10 : Influence des zéros présents dans la matrice à filtrer</i>	- 126 -
<i>Annexe 11 : Modélisation d'un pinacle des Œuvres Notre-Dame de Strasbourg</i>	- 127 -
<i>Annexe 12 : Etude sur les filtres passe-bas</i>	- 128 -
<i>Annexe 13 : Utilisation de l'outil « Recalage à base de cibles » dans RealWorks</i>	- 140 -
<i>Annexe 14 : Rappels de compensation par la méthode des intermédiaires</i>	- 148 -
<i>Annexe 15 : Algorithme d'extraction de sphères</i>	- 157 -
<i>Annexe 16 : Consolidation des nuages de points en utilisant les sphères de recalage</i>	- 159 -
<i>Annexe 17 : Triangulation de Delaunay</i>	- 163 -
<i>Annexe 18: Rapport d'erreur de la consolidation du buste issu des données Faro</i>	- 167 -
<i>Annexe 19 : Modélisation d'une jambe de l'Amazonie avec un filtre « moyenne »</i>	- 172 -
<i>Annexe 20 : Comparaison des maillages du nuage brut, du nuage filtré et du modèle final Faro.</i>	- 174 -
<i>Annexe 21 : Vues du modèle du buste Faro</i>	- 175 -
<i>Annexe 22 : Rapport d'erreur de la consolidation du buste issu des données Trimble</i>	- 177 -
<i>Annexe 23 : Comparaison des maillages du nuage brut, du nuage filtré et du modèle final Trimble.</i>	- 182 -
<i>Annexe 24 : Vues du modèle du buste Trimble</i>	- 183 -
<i>Annexe 25 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Faro et le modèle Faro</i>	- 185 -

**Annexe 26 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Trimble et le modèle Trimble \_\_\_\_ - 189 -**

**Annexe 27 : Numérisation au Handyscan d'un buste en plâtre blanc \_\_\_\_\_ - 193 -**

## Annexe 1 : Tableau comparatif de logiciels

Ces tableaux ont été établis grâce à i3mainz@ et Gim@.

### Annexe 1.1 : Tableau comparatif de logiciels de modélisation

Logiciel	Constructeur	Outils de mesure	Réduction du bruit
JRC Reconstructor	Ipsc-JRC	mesures sur modèle possible, volumes	oui (sur le nuage)
PolyWorks	InnovMetric Software	mesure sur modèle et nuage, distance volume	oui (sur les surfaces)
RapidForm	INUS Technology	mesure sur modèle et nuage, distance volume	oui (nuage+surfaces)
PointCloud	Kubit	mesure sur modèle et nuage, distance volume	oui (nuage+surfaces)
Geomagic	Raindrop Geomagic	mesure sur modèle et nuage, distance volume	oui (nuage+surfaces)
3DIpsos	Trimble	mesure sur modèle et nuage, distance volume	non spécifié
3DReshaper	Technodigit	mesure sur modèle et nuage, distance volume	oui (nuage+surfaces)

Logiciel	Réduction du bruit	Repérage 3D	Maillage
JRC Reconstructor	oui (sur le nuage)	possible par géométrie	création de surface 3D
PolyWorks	oui (sur les surfaces)	alignement des scans, géoreférencement	création de maillage 3D, reconnaissance de primitives géométriques
RapidForm	oui (nuage+surfaces)	alignement des scans par géométrie	maillage 3D polygonal
PointCloud	oui (nuage+surfaces)	alignement des scans par géométrie	maillage 3D polygonal
Geomagic	oui (nuage+surfaces)	alignement des scans par géométrie et manuellement	maillage 3D polygonal, maillage surfacique, NURBS
3DIpsos	non spécifié	alignement des scans par géométrie	maillage 3D polygonal, maillage surfacique
3DReshaper	oui (nuage+surfaces)	alignement des scans par géométrie et manuellement	maillage 3D polygonal, maillage surfacique, maillage 2D

Logiciel	Post traitement	Texture
JRC Reconstructor	lissage	Placage de photos possible
PolyWorks	bouchage des trous, lissage, reconstruction	non spécifié
RapidForm	bouchage des trous, lissage	Placage de photos possible
PointCloud	bouchage des trous, lissage	Placage de photos possible
Geomagic	bouchage des trous, lissage	Création de texture possible
3Dlpsos	bouchage des trous, lissage	non spécifié
3DReshaper	bouchage des trous, lissage, reconstruction	Création de couleurs

Logiciel	Inspection	Export
JRC Reconstructor	possibilité de comparaison de modèles	ASCII, dxf, vrml, ptc...
PolyWorks	non spécifié	dxf, IGES
RapidForm	possibilité de comparaison de modèles	IGES, STEP
PointCloud	possibilité de comparaison de modèles	IGES, STEP
Geomagic	possibilité de comparaison de modèles, cartographie des écarts	3DS, DXF, IGS, OBJ, STL, VRML, IGES
3Dlpsos	non spécifié	ASCII, VRML, IGES
3DReshaper	cartographie des écarts, comparaison de modèles	ASCII, VRML, STL

Annexe 1.2 : Tableau comparatif de logiciels de traitement de nuage de points

# 3D Laser Scanner Software

*In GIM International December 2004 we published an earlier product survey on 3D terrestrial laser scanners. The successful use of laser-scanner systems depends not only on the characteristics of the data-collection instruments themselves, but also on the capabilities of the processing software necessary to obtain meaningful information after field acquisition of the 3D point-cloud. So we now present a product survey on commercial software available for processing point-clouds generated by 3D-laser scanners.*

3D-laser scanning is a relatively new measurement technology for efficiently obtaining a dense set of 3D-coordinates of objects. The data is collected at a speed of several thousand points per second. This technology uses either phase-shift or time-of-flight measurement (for a detailed overview, see the feature article by Lemmon in this issue). The diversity of characteristics shown by the different software packages demonstrates that 3D-laser scanning is still a young, but above all a promising surveying technology, that is in the process of ongoing and rapid development.

Some of the software packages presented here, such as SiteMonitor from 3D Laser Mapping, are developed for specialised applications, while others, like Cyclone SCAN from Leica Geosystems HDS and RealWorks Survey from Trimble, offer a full suite of point-cloud processing tools from scan registration and georeferencing through to feature extraction. They are specifically developed to support manufacture - specific scanners. There are also packages that offer full support for the entire laser-scanning process, right through to reverse engineering and data comparison, and are not associated with a particular type of scanner; PolyWorks from InnovMetric is an example. The characteristics of the software package available from Zoller + Froehlich indicate that there is also software on the market specifically developed for editing 3D-laser scan point-clouds.

3D-laser scanning was not initially specifically developed as a technology to support the needs of the land surveyor. However, manufacturers of surveying instruments are now recognising the attention being paid by surveyors to the technology. In response, these manufacturers are increasingly adapting the technology, both instruments and processing software, to the needs of the surveyor. As a result, new features may soon be added in support of even better surveying workflows than are presently available and portrayed here.

Mathias Lemmens, editor-in-chief, GIM International,



PRODUCT SURVEY

Manufacturer	3D Laser Mapping
Type/Name of software	3DLM SiteMonitor
Name(s) of module(s)	Scanner control module, Alarm module, Comparison module, Analysis module
Date of introduction	2004
System Requirements/capacity	
Operating Systems	Windows 2000, XP
Processors	Pentium or better
Min. required RAM	256MB
Min. size hard disk	10MB for software, plus data storage
Min. number of points in point-cloud	N/A
Geo-referencing	
Automatic Target Recognition	SiteMonitor reflectors, user definable
Automatic overlap determination between multiple scans	N/A
Automatic determination of cloud constraints	N/A
Bundle Adjustment	N/A
Automatic generation of:	
Lines through selected points	N/A
Planes through selected points	N/A
Boxes through selected points	N/A
Editing	
Removal of (groups of) points	N/A
Labelling of extracted features	N/A
Visualization	
Reflected signal strength?	Y
Wire frame of extracted features	N/A, comparison results can be viewed as a wireframe.
Rendered representation of extracted features	N/A
Draping images on features	N, although measured points can be overlaid onto images in 2D.
Communication	TCP/IP, RS232, RS422
Data Import from 3D Laser Scanners	Riegl LMS and LPM series
Data Import Formats	3DD
Data Export Formats	ASCII, DXF, CSV, 3DD
Additional Information	Developed specifically for automated monitoring of unstable slopes, SiteMonitor measures a pre-defined point grid at set intervals, compares the results, and provides notification of movement according to specified parameters.



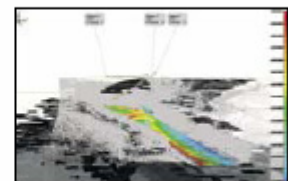
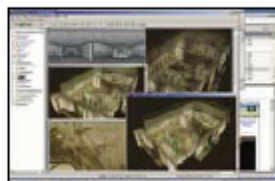
N/A = Not Applicable

PRODUCT SURVEY



Manufacturer	3rd Tech	Callidus precision systems	InnovMetric
Type/Name of software	SceneVision-3D	Point cloud processing software 3D - Extractor	PolyWorks V9
Names of modules		Fuzzy Join, RGB, Local-into-Global, Face List, Height Colours	PolyWorks Modeller, PolyWorks Inspector
Date of Introduction	July 2003	1997-2006	2000 (V9 released 2005)
System Requirements/capacity			
Operating Systems	Windows 2000/XP	Windows NT, 2000, XP	Windows
Processors	Pentium 4 or better	1GHz	Pentium (dual processor recommended)
Min. required RAM	512MB	512MB	512MB (>1024MB recommended)
Min. size hard disk	500MB	100MB	> 1GB
Max. number of points in point cloud	100 million points	Not limited	100 million points
Geo-referencing			
Automatic Target Recognition	N	Y, surveying prism	N
Automatic overlap determination between multiple scans	N	Y	Y
Automatic determination of cloud constraints	N	Y	Y
Bundle Adjustment	N	Y, both	Y, both control points and overlapping point cloud
Automatic generation of:			
Lines through selected points	Y	Y	Y
Planes through selected points	Y	Y	Y
Boxes through selected points	N	N	N
Editing			
Removal of (groups of) points	Y	Y	Y
Labelling of extracted features	Y	Y	Y
Visualization			
Reflected signal strength?	Y	Y	Y
Wire frame of extracted features	Y	Y	Y
Rendered representation of extracted features	Y	Y	Y
Draping images on features	Y	N	N
Communication	RTP, XYZ, 3DD, VRML	See 'Data Import Formats' and 'Data Export Formats'	
Data Import from 3D Laser Scanners	DeltaSphere, Faro, Polhemus, Rieg	Callidus CP 3200, Callidus CPW 8000	3rd Tech, Callidus, Faro LS, IQolution, Leica, Minst, Minolta, Opacch, Rieg, Z+F
Data Import Formats	RTP (DeltaSphere), XYZ, 3DD (Rieg)	Sac	RTP, FLS, IQscan, PTX, SCL, IXE, RIE, 3DD, Rieg, RSP, ZFC, ZFS, XYZ, CDK, CDM, VDO, ASCII
Data Export Formats	RTP, XYZ, RGB, VRML	Dxf, asc, sac, obj, raw, stl, wrt, surf, CATIA, IGES, STER/ VDA-FS	PTX, STL, VRML, PIF, POL, PQK, ASCII, XYZ, DXE, IGS, OBJ, NAS, PLY
Additional Information	SceneVision-3D can create photorealistic, full-colour 3D models. It has functions for range and colour alignment and intelligent polygon reduction. It includes measurement and viewing tools and special functions for forensics.	Point clouds can be displayed in true colours (RGB).	PolyWorks is a standalone package that offers a full suite of point-cloud processing tools from scan registration and geo-referencing through to feature extraction, reverse engineering and data comparison.

N/A = Not Applicable  
 □ = No information received

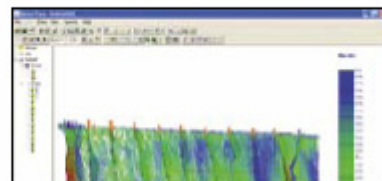
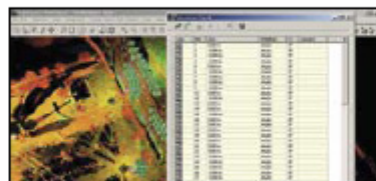
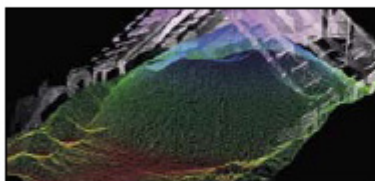






PRODUCT SURVEY

I-SITE	Leica Geosystems HDS	Measurement Devices Ltd (MDL)
ISITE Stud b	Cyclone Suite of Products (Standalone) and CloudWork (CAD Plug-ins) <sup>1)</sup>	ModelAce
N/A	Cyclone: scan, register, survey, model and server. CloudWork: MicroStation, AutoCAD, PDMS, Intergraph SmartPlant Review <sup>2)</sup>	☐
1999	Cyclone Suite 2000, Leica CloudWork/MicroStation 2003, AutoCAD 2002, PDMS 2005, Intergraph SmartPlant Review 2005	September 2006
Win XP64, Win XP, Win 2000	Microsoft Windows XP (SP1 or higher), Windows 2000 (SP2 or higher with up to date security patches)	Windows 2000, XP/Vista
1.0 GHZ min	2.0 GHz Pentium 4 or higher / Pentium M Processor 1.7 GHz or higher	32/64bit
500MB	512MB RAM (1GB or more recommended)	512MB
20GB (20,000MB)	10GB	2MB
200 million points	Unlimited	Typically 5 million
Y, retro reflectors	Y, spheres, HDS Targets, HDS Black & White Targets, Leica Twin Target	Y, retro reflector
Y	Y	N
Y	Y	N
N/A	Y	N
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	N, more sophisticated steel shape fitter	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Y	Y	Y
Data Import Formats: 3dp, 3di, 3dd, 3dv, pos, acs, txt, dxf, dxb, dwg, obj, 00t, dgd; Data Export Formats: 3dp, 3di, 3dv, txt, obj, dxf, dxb, dwg, ma, vrml, jpg, arch_d, 00t		xyz, dxf, xml, custom pgs, surpac, vdc
I-SITE 4400, I-SITE 4400LR, Riegl 3dd scan files, OpTech Iiris 3dv files, CyraX ptx files, MDL asc files	HDS2400, HDS2500, HDS3000, HDS4500, Leica ScanStation, Z+F Imager 5003, Riegl Any PTX/PTS capable scanner	All MDL products
3dp, 3di, 3dd, 3dv, pos, acs, txt, dxf, dxb, dwg, obj, 00t, dgd	ASCII (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT, Customised format) RIEGL 3DD, Cyclone Object Exchange (COE) format (from AutoCAD, MicroStation, via COE Data Transfer) CGR, BMR, TIF, JPEG, LandXML	dxf, xyz
3dp, 3di, 3dv, txt, obj, dxf, dxb, dwg, ma, vrml, jpg, arch_d, 00t	AutoCAD DXF R12, Cyclone Object Exchange (COE) format (to AutoCAD, MicroStation via COE Data Transfer) ASCII (XYZ, SVY, PTS, PTX, TXT, Customised format) BMR, TIF, JPEG, SDNF 3.0 (Intergraph Steel Detailing Neutral File), PCF (Atlas Piping Component File), Leica System 1200, LandXML	xyz, dxf, xml, custom pgs, surpac, vdc
First laser scan processing software for 64-bit systems; operate multiple projects & data engines per session; drag/drop data engines, files between projects/networks; high-resolution screen capture; smart license setup/startup.	Cyclone SCAN controls all Leica scanners, both time-of-flight and phase-based.	Drill pattern design, burden calculation, drill report

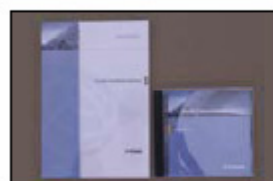


PRODUCT SURVEY



Manufacturer	RIEGL Laser Measurement Systems	Trimble	Zoller + Freshlich
Type/Name of software	3D Data Acquisition and Processing Software / RISCAN PRO	RealWorks Survey	Z+F LaserControl
Names of modules	RISCAN PRO plugins: Camera Module, MultiStation Adjustment, Ortho Photo	Contact your Trimble distributor	FreeWare, LCBasic, LCRegister/LCRegister Advanced, LCAdvanced, LCCo br
Date of Introduction	April 2003	2002	<input type="checkbox"/>
System Requirements/capacity			
Operating Systems	WIN 2000 SP2, WIN XP Professional	Microsoft Windows XP (Professional or Home Edition with SP1)	MS Windows, 2000, XP
Processors	No special requirements	Intel Pentium 4 or later (or compatible), 2 GHz or higher	Minimum Pentium 3, 1GHz, recommended pentium 4, 2GHz
Min. required RAM	256MB min / 1GB recommended	1GB RAM (2GB recommended)	Minimum 512MB, recommended 1GB
Min. size hard disk	30MB for core programm and plugins	60MB for application, 50MB per million points (of which 20MB for data)	60GB
Max. number of points in point cloud	Approx. 25 million points	Unlimited (memory and disk-space dependant)	200 million points
Geo-referencing			
Automatic Target Recognition	Y, retroreflecting targets	Y Trimble flat targets and spheres.	N
Automatic overlap determination between multiple scans	N	Y	N
Automatic determination of cloud constraints	Y	Y	N
Bundle Adjustment	Y, both and additionally on plane patches	Y, control points and cloud constraints.	Y
Automatic generation of:			
Lines through selected points	Y	Y	N
Planes through selected points	Y	Y	N
Rooms through selected points	N	Y	N
Editing			
Removal of (groups of) points	Y	Y	Y
Labelling of extracted features	N	Y	Y
Visualisation			
Reflected signal strength?	Y	Y	Y
Wire frame of extracted features	Y	Y	N
Rendered representation of extracted features	Y	Y	N
Draping images on features	Y	Y	Y
Communication		See below	<input type="checkbox"/>
Data Import from 3D Laser Scanners	Direct control and data acquisition of Riegl Laser Scanners	Faro, Riegl, Optech	IMAGER 5003
Data Import Formats	3dd, 3pf, vrp, ASCII, PCL, PLY	?)	zfs, zfc, pes, ptx, pt, pcc, txt, asc, dxg, vml, lv, picture
Data Export Formats	3dd, 3pf, vrp, ASCII, PCL, DXF, VRML, STL, OBJ, PLY	Trimble exchange format (.rwp), AutoCAD (.dxf), MicroStation (.dgn), Text files (.txt, .rtf), Spreadsheets (.csv), Images (.bmp, .tif), Export for native "PointCloud" format (.pec), Direct printouts – include legend, title, map scale, logo.	zfs, zfc, pt, ptx, pes, pcc, dxg, asc, vml, pictures
Additional Information	RISCAN PRO offers a clear and well documented XML project structure. Provides interactive tools for automatic generation of animations. Automatic global registration based on control points. Resampling and triangulation of unified pointclouds	RealWorks Survey - register, visualise, explore and manipulate as-built/scene point cloud data. Incorporates precision tools and empowering features particularly suited to civil survey, building, heritage, forensic, and other applications.	<input type="checkbox"/>

N/A = Not Applicable  
 = No information received







## Annexe 2 : Tableau comparatif de différents scanners lasers

Ce tableau provient de Gim@.

Company / manufacturer	Basis Software	Calidus precision systems	Callidus precision systems	Faro Europe
System	Surphaser 25HS	CPW 8000	CP 3200	LS 420
Date of introduction	May 2005	2007	1997-2006	2005
Laser Ranger				
Range measurement principle[1]	Phase Shift Measurement	Pulsed Wave (combination of pulsed and phase measurement)	Pulsed	Phase Shift Measurement
Wavelength [nm]	690	658	906	785nm
Laser safety classification	3R (IIIA)	3R	I	3R
Min./max. range [m]	1.8/99;1.2/21;	0 - 80	0 - 32	0.6m - 20m
Range resolution	0.1mm	□	□	0.6 mm - 17 Bit
Range accuracy at 50m [mm] (1 sigma)	0.5mm @10m	□	□	3mm @20m
Beam diameter at exit [mm]	2.7	3	□	3mm, circular
Beam divergence/spot diameter at 50 m distance [mm]	3mm @ 10m	0.2 mrad	□	Beam divergence 0.25 mrad
Intensity recording (Y[#bits]/N)/ export formats	Y[8]mns6yzi/pts/ptx	Y	□	9 Bit
Scanning Characteristics				
Max.FoV V'H [D]	360 x 270	150° x 360°	140° x 360°	320° x 360°
FoV with manual rotation of scan head	360 x 270	N/A	N/A	N/A
Scan angle step size H/V [D]	0.01/0.01	0.002° (H and V)	0.0625° (H) x 0.25° (V)	0.00067° / 0.009°
Scan angle accuracy H/V [D] (1 sigma)	0.005/0.005	0.002° (H and V)	0.005° (H) x 0.009°	±0.009° / ±0.009°
Beam deflection mechanism	Rotating mirror	Rotating mirror	Rotating mirror	Rotating mirror
Measurement rate[2] [kpts/s]	190kHz	50kHz	1.75kHz	120kHz
Scan duration typical/highest resolution [min]	7/50	130 seconds (typical res.) / 54 min (highest res.)	□	67s / 111min
Selection of area to be scanned (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Selection of scan density/spacing	Y	Y	Y	Y
Operation Characteristics				
Dimensions/weight[3] [m./kg]	510mm L x 170mm W x 285mm H, 11kg	(0.5x0.3x0.2)m, 12kg (measuring head only)	Diameter 0.4m, height 0.5m, 17kg (measuring head only)	l)
Temperature range/humidity range [OC/ %]	5-45/Non condensing	-10 - 50°C / 20-85%	-10 - 40°C / 20-80%	5° - 40° C, non condensing
Suited for indoor/outdoor/laboratory (Y/N)	Y/Y/Y	Y/Y/Y	Y/Y/Y	Y/Y/Y
Scan time per battery	3 hours	8 hours	8 hours (car battery)	up to 8 hours
Peripherals				
Camera(s) (Y[#type, sensor size]/N)	N	Y	Y	2)
Export formats of camera image		.bmp, .jpg	.bmp, .jpg	.jpg
User interface (e.g. PC)	PC, Notebook, Ultralight PC	PC	PC	3)
User interface specifications (RAM/OS, etc.)	Win XP, Windows Vista, 5GB	Windows	Windows	Windows 2000 or higher, 2GB RAM recommended
Additional sensors	□	□	□	Modular design allows to change sensors
Software Functionality				
Software name	3rd Party Software	3D - Extractor	3D - Extractor	Faro Scene
Registration/orientation methods	□	Best fit, global, with objects	Best fit, global, with objects	4)
Automatic detection of file points (Y/N)	□	Y	Y	Assisted target detection tools.
Integration of data from different scans (Y/N)	□	Y	Y	Y
Real time visualization during scanning (Y/N)	□	Y	Y	Y
Fly around, pan and zoom (Y/N)	□	Y	Y	Y
Geo-referencing (Y/N)	□	Y	Y	Y
Point (group) selection (Y/N)	□	Y	Y	Y
Fitting of primitives (Y[specify(4)]/N)	□	Y (lines, planes, cylinders, spheres)	Y (lines, planes, cylinders, spheres)	Y (points, lines, spheres, cylinders, planes)
Largest mode[5] (# of points/# of objects)	□	Not limited	Not limited	Only limited by the PC hardware
Export formats of processed data	□	sat, dxf, asc, stl, vrml, .dgn, Nemetschek, pts, ptc	sat, dxf, asc, stl, vrml, .dgn, Nemetschek, pts, ptc	Faro Scan, Faro Cloud, .dxf, VRML, .jrs, .pts, .ptx, .ptc
Import formats	□	sat, dxf, asc, stl, vrml, .dgn, Nemetschek, pts, ptc	sat, dxf, asc, stl, vrml, .dgn, Nemetschek, pts, ptc	Faro Scan, Faro Workspace, .ptx, .bct, .xyz, .cor, .cov, VRML, .bmp, .jpg, .png

- [1] Pulsed or phase measurement or triangulation
- [2] Points per second in KHz
- [3] Packed sensor, incl. Power supply, mount (tripod), etc.
- [4] e.g. lines, planes, cylinders, spheres
- [5] supported for practical, real-time visualization

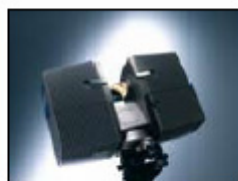
N/A = Not Applicable  
 □ = No information received





PRODUCT SURVEY

Faro Europe	Faro Europe	I-Site	I-Site	Leica Geosystems
LS 840	LS 880	4400-LR	4400-CR	ScanStation 2
2005	2005	2006	2006	July 2007
Phase Shift Measurement	Phase Shift Measurement	Pulsed Time of Flight	Pulsed Time of Flight	Pulsed laser; Time of Flight
785nm	785nm	905nm	905nm	532 nm
3R	3R	IEC-60825-1 class 3R	IEC-60825-1 class 3R	3R
0.6m - 40m	0.6m - 76m	5m/700m	2m/500m	5)
0.6mm - 17 Bit	0.6mm - 17 Bit	1mm	1mm	6)
3mm @ 25m	3mm @ 25m	20mm[6]	20mm[6]	4mm at 50m, single measurement, not averaged
3mm, circular	3mm, circular	15mm	15mm	6mm
Beam divergence 0,25 mrad	Beam divergence 0,25 mrad	1.4mrad/70mm	1.4mrad/70mm	0.01°/6mm
9 Bit	9 Bit	Y[10]/3DP	Y[10]/3DP	Y[12]float
320° x 360°	320° x 360°	80° vertical, 360° horizontal	80° vertical, 360° horizontal	270°, 360°
N/A	N/A	N/A	N/A	360°
0.00067° / 0.009° ±0.009° / ±0.009°	0.00067° / 0.009° ±0.009° / ±0.009°	0.108° vertical, 0.108° horizontal 0.02° +/- 0.04°	0.108° vertical, 0.108° horizontal 0.02° +/- 0.04°	0.0002° 0.0034°
Rotating mirror	Rotating mirror	Scanning mirror	Scanning mirror	Mirror
120kHz	120kHz	4.4kHz	4.4kHz	50
67s / 111min	67s / 111min	10mins/360°	10mins/360°	depends on scan; typical 15min
Y	Y	Y	Y	Y
Y	Y	190mm at 100m	190mm at 100m	Y
1)	1)	43cm x 27cm x 36cm/12kg	43cm x 27cm x 36cm/12kg	7)
5° - 40° C, non condensing	5° - 40° C, non condensing	-10 to 50 / Non-condensing	-10 to 50 / Non-condensing	8)
Y/Y/Y	Y/Y/Y	Y	Y	Y/Y/Y
up to 8 hours	up to 8 hours	3 hours	3 hours	> 3 hours
Y, Nikon D70s, 6MPixel or Nikon D200, 10,2MPixel	Y, Nikon D70s, 6MPixel or Nikon D200, 10,2MPixel	Integral 37 megapixel camera	Integral 37 megapixel camera	Y, internal camera can also be used with any external camera
.jpg	.jpg	.jpg	.jpg	.jpg/ tiff/ bmp
3)	3)	Tablet PC with touch screen	Tablet PC with touch screen	Tablet PC; Notebook
Windows 2000 or higher, 2GB RAM recommended	Windows 2000 or higher, 2GB RAM recommended	Window XP, XP64/1G RAM	Window XP, XP64/1 G RAM	512 MB RAM, 1.4 GHz processor, Windows XP; Windows 2000
Modular design allows to change sensors	Modular design allows to change sensors	Inclinometer, Alignment Telescope, Red laser pointer, Battery sensor	Inclinometer, Alignment Telescope, Red laser pointer, Battery sensor	Dual-axis compensator Internal camera
Faro Scene	Faro Scene	I-Site Studio	I-Site Forensic	Leica Cyclone
4)	4)	Survey based/fully automatic	Survey based/fully automatic	Any
Assisted target detection tools.	Assisted target detection tools.	Y	Y	N
Y	Y	Y	Y	Y
Y	Y	N	N	Y
Y	Y	Y	Y	Y
Y	Y	Y	Y	Y
Y (points, lines, spheres, cylinders, planes)	Y (points, lines, spheres, cylinders, planes)	Y(Lines, planes)	Y(Lines, planes)	Y;Y;Y;Y
Only limited by the PC hardware	Only limited by the PC hardware	200 million	20 million	9)
Faro Scan, Faro Cloud, .dxf, VRML, .igs, .pts, .ptc, .ptc	Faro Scan, Faro Cloud, .dxf, VRML, .igs, .pts, .ptc, .ptc	DXF, DWG, VRML, DXB, OBJ, 00T DGD, TXT, IREG, ARCH_D	DXF, DWG, VRML	10)
Faro Scan, Faro Workspace, .ptc, .txt, .xyz, .cor, .csc, VRML, .bmp, .jpg, .png	Faro Scan, Faro Workspace, .ptc, .txt, .xyz, .cor, .csc, VRML, .bmp, .jpg, .png	DXF, DWG, ASCII, TXT, 00T, 3DR, 3DI, 3DD	DXF, DWG, ASCII, TXT, 00T, 3DR, 3DI, 3DD	11)



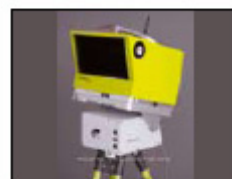
PRODUCT SURVEY



Company / manufacturer	Leica Geosystems	Optech	Optech	Rieg Laser Measurement Systems
System	HDS6000	ILRIS-3DER	ILRIS-3D	LMS-Z420i / LMS-Z390i
Date of introduction	December 2006	June 2006	June 2000	2003 / 2007
Laser Rangefinder				
Range measurement principle (1)	Phase Shift Measurement	Pulsed Time of Flight	Pulsed Time of Flight	Time of Flight
Wavelength [nm]	650, 690nm	1535	1535	Near Infrared
Laser safety classification	3R	1M	1	Laser Class I
Min./max. range [m]	79m @90%; 50m @18% abedo	3-1700 @ 80%	3-1200 @ 80%	2 to 1000m / 1 to 400m
Range resolution	12)	Less than 1mm	Less than 1mm	1mm
Range accuracy at 50m [mm] (1 sigma)	13)	7mm	7mm	10mm / 6mm
Beam ø at exit [mm]	3mm at exit;	14mm	14mm	10mm
Beam divergence/spot ø at 50 m distance [mm]	0.22mrad divergence, 14mm @50m	170 uRad/ 8mm @ 50 m	170 uRad/ 8mm @ 50m	0.3mrad (16m m)
Intensity recording (Y[#bits]/N)/ export formats	Y(12)/Raw	Y(8/ 16/ 24 bit RGB)	Y(8/ 16/ 24 bit RGB)	Y(12) / 3dd, 3pf, wp, ASCII
Scanning Characteristics				
Max. FoV/VxH [D]	310°, 360°	40 x 360	40 x 360	80x360° (VxH)
FoV with manual rotation of scan head	360°	360 x 360	360 x 360	Up to 360°x360° (VxH)
Scan angle step size H/V [D]	0.009°	.00115 (20uRad)	.00115 (20uRad)	0.004° to 0.2° / 0.002° to 0.2°
Scan angle accuracy H/V [D] (1 sigma)	0.0071 degree (25 seconds)	0.0046	0.0046	0.0025° / 0.001°
Beam deflection mechanism	Patented mirror system	Mirror	Mirror	Rotating Polygon, Rotating Head
Measurement rate(2) [kHz]	500	Up to 3.5kHz	Up to 3.5kHz	PRR 24kHz, eff. Meas. rate 11kHz
Scan duration typical/highest resolution [min]	Depends on scan; typical 3 - 7 minutes	Selectable	Selectable	Typ. 1min @ 80°x 80°
Selection of area to be scanned (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Selection of scan density/spacing (Y/N)	Y	Y	Y	0.004° / 0.002°
Operation Characteristics				
Dimensions/weight(3) [m/kg]	190mm D x 244mm W x 351.5mm H, 14 kg, nominal (Includes integrated battery)	320 x 320 x 220 mm/ 13 kg	320 x 320 x 220mm / 13kg	463mmx210mm (LxD), 15kg
Temperature range/humidity range [OC/ %]	Operating temp: 0° C to +40° C; Storage temp: -20° C to +50° C; Humidity: Non - condensing	0-40° C	0-40° C	0° C to +40° C (op.), -10° C to +50° C (stor.)
Suited for indoor/outdoor/lab/office (Y/N)	Y/Y/Y	Y/Y/Y	Y/Y/Y	Y,Y,Y
Scan time per battery	built-in battery >90min external battery > 4 hours	5 hours	5 hours	9 hours @ 60Ah PbGel
Peripherals				
Camera(s) (Y[#type,sensor size]/N)	N, any external digital camera can be used for photo-overlay using Leica Cyclone software	Y [Internal CMOS]	Y [Internal CMOS]	Y [Nikon D200, 3872x2592 pixels]
Export formats of camera image	.jpg, tif, bmp	.jpg	.jpg	.jpg, tif, raw
User interface (e.g. PC)	On-board controls, Tablet PC; Notebook, PDA	PC, UMPC, PC	PC, UMPC, PC	TOP/P, also Serial & ECP
User interface specifications (RAM/OS, etc)	512 MB RAM, 1.4 GHz processor; Windows XP/Windows 2000	☐	☐	1GB / Win2000, Win XP, OpenGL graphics card
Additional sensors	Dual-axis sensor	GPS, IMU, High Res Camera	GPS, IMU, High Res Camera	Inclination Sensors integrated, SyncTimer integrated
Software Functionality				
Software name	Leica Cyclone	Open source to 3rd party	Open source to 3rd party	R6/CAN PRO
Registration/orientation methods	Any	Post Process	Post Process	14)
Automatic detection of tie points (Y/N)	N	Y	Y	Y
Integration of data from different scans (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Real time visualization during scanning (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Fly around, pan and zoom (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Geo-referencing (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Point (group) selection (Y/N)	Y	Y	Y	Y
Fitting of primitives (Y (specify (4)) / N)	Y;Y;Y	Y	Y	Y (lines, planes)
Largest mode(5) (# of points/# of objects)	Unlimited po ints, dynamically managed with approx 40 million max points displayed at a time	Unlimited	Unlimited	Approx. 25 million points
Export formats of processed data	10)	Open source to 3rd party	Open source to 3rd party	15)
Import formats	11)	Unlimited	Unlimited	16)

(1) Pulsed or phase measurement or triangulation  
 (2) Points per second in kHz  
 (3) Packed sensor, ind. Power supply, mount (tripod), etc.  
 (4) e.g. lines, planes, cylinders, spheres  
 (5) supported for practical, real-time visualization

NA = Not Applicable  
 ☐ = No information received







PRODUCT SURVEY

Rigl Laser Measurement Systems	Trimble	Trimble	Zollner+Fröhlich GmbH
LPH-221	GX	VX	Imager 5004
September 2007	2005	2007	September 2006
Time of Flight	Pulsed	Pulsed	Phase Shift Measurement
Near infrared	532	870	
Laser Class IM	3R	2	3R (ISO EN 60825-1)
10m to 4000m	200 (to 35% reflective surface)	150+ scanning, 200+ single point (to 18% reflective surface)	1.0- 79.0m
5mm	1.6mm @ 50m	10mm minimum point spacing	0.1mm
25mm	4mm	3mm	18)
60mm	Consult Trimble	Consult Trimble	7mm
0.8mrad (40mm)	3	20 x 40	0.22 mrad/ 14 mm
Y [I] / 3dd, 3pt, vp, ASCII	Y [8] / PPP, SCL, secl	Y / jobXML, secl	16 bit / ASCII/ PTS/ PTX
150°x360° (VxH)	60° / 360°	270° / 360°	310° x 240°
150°x360° (VxH)	360°	360°	
0.018°	0.0018° / 0.0009°	10mm minimum point spacing	0.0018°/ 0.0018°
0.009°	Hx = 12°; Vx = 14°	1"	0.007°/ 0.007°
Pan & Tilt Mount	Oscillating mirror	Rotating telescope	Rotating mirror / vj device (H)
PRR 24KHz, alt. Measure up to 1000Hz	5	Up to 0.015	Max. 500KHz
Tip, 5min @ 10°x10°	Consult Trimble	Consult Trimble	10,000/ 40,000
Y	Y	Y	Y
0.018°	Y	Y	Y
(LxWxH) 315x170x450mm, 16kg	34x27x42cm, 13.6kg	20x18x45cm, 6.3kg	0.268m/ 0.190m/ 0.372m / 14kg
0°C to 45°C (op), -20°C to 47°C (stor.)	0°C to 40°C, non-condensing	-20°C to +50°C, non-condensing	0°C-40°C
N, YY	Y/Y/Y	Y/Y/Y	Y / Y / Y
9 hours @ 60Ah PbGel	8 hours	5 hours	1.5 hours (internal battery); 4 hours (external battery)
Y [Canon EOS 350D, 3456x2304 pixels]	Y (I), real-time video, 768x576 pixels	Y (I), real-time video, 2048x1536	Y [Nikon D40, 6.1 Mega Pixel]
jpg, tif, raw	jpg	jpg	jpg
TOP/PPRS422	PC	SQL or Trimble CU controllers	Stand alone concept
1GB / Win2000, Win XP, OpenGL graphics card	Consult Trimble	Consult Trimble	internal PC-HDD/ Linux
	N/A	Integrated pressure sensor	Tilt sensor
R/PR/FILE	PointScope, RealWorks Survey	17)	Z+F LaserControl/ LFM
14)	Survey traversa; Bundle adjustment; Least squares	Multiple (including Surveytraversa)	Bundle adjustment (Targets, Spheres)/ ICP
Y	Y	N/A	Y
Y	Y	Y	Y
Y	Y	Y	Y
Y	Y	Y	Y
Y	Y	Y	Y
Y (lines, planes)	Y.All+	Y	Y
Approx. 25 million points	> hundred million points, > 10,000 objects	Varies depending on controller. Consult Trimble	Database of approx. 2,500 Scans/ a scan: 50. Mio. points
15)	Multiple, Consult Trimble	Multiple, Consult Trimble	Sat, ASCII, PTX, Mikrostation, AutoCAD, PDS, PDMS
16)	Multiple, Consult Trimble	Multiple, Consult Trimble	ZFS, ZFC, jpg, vrm I, PTZ, PTX, ASC, SAT, ASCII, obj, LFD

- Notes
- 1) Scanner 400mm x 160mm x 280mm (LxWxH), 1.45kg. Dimensions with equipment depend on the used equipment and cannot be given in a general way.
  - 2) Nikon D70s, 6MPixel or Nikon D200, 10.2MPixel.
  - 3) PC, Notebook, PDA, any other device with WiFi interface and a web browser.
  - 4) Registration to imported survey coordinates or to reference scan positions / best fit.
  - 5) File range < 1m. Max. 3000/900, 134ml/10K. Fully scalable, < 1mm at any range.
  - 6) Dimension Scanner: 370mmx265mmx105mm. Weight Scanner: 18.5 kg. Operating temp.: 40° to 0° C. Storage temp.: 25°C to 65°C. Humidity: Non-condensing. Ultra-soft points, dynamically managed with approx. 40 million max. points displayed at a time. COE, COE (DNG, DGN), ASCII (XYZ, SVT, PTS, PTX, T-X), Coordinates of form obj, PTZ, BHP, TFE, JPEC, LandXML, SOME PCE, Leica System 1200, Realized Ortho Photo (GeoTiff), TrueView panoramic camera.
  - 7) ASCII (XYZ, SVT, PTS, PDX, TXT, customized format), Zollner+Fröhlich ZFS, ZFC, Raw, 3DC, COE (Cyclone Object Exchange), AutoCAD, MicroStation via Cyclone COE Data-transfer plug-in (free), BHP, PFC, CGP, Leica System 1200. Points: 50x50.8mm @10m; 250-250mm @50m; 150x150 (4x) 12.6x12.6mm @10m; 62x62mm @50m; High (H) 6.3x6.3mm @10m; 31.4x31.4mm @50m; Super High (SH) 3.1x3.1mm @10m; 15.8x15.8mm @50m; Ultra High (UH) 1.6x1.6mm @10m; 7.9x7.9mm @50m.
  - 8) 4mm at 90°; abled up to 25m; 5mm at 18°, up to 25m; 5mm at 90° up to 50m; 6mm at 18° up to 50m.
  - 9) Global registration by means of control site points, by aligning with GPS, overlapping surfaces / Multi Station Adjustment mode.
  - 10) 3D, DXF, ASCII, SOP, 3PFA, SC, PFC, OBJ, STL, PCL, PCL, VRML, X3D, VTF, D3D, OCT, ASCII, SOP, PFC, BHP, TFE, SCW, LAS, Obj, STL, PLY, POL.
  - 11) Trimble Survey Controller, Survey Pro, Trimble Survey Manager, RealWorks Survey. Linearity error up to 50 ± 1 mm. Noise: black: 7.5 mm rms; gray: 4.0 mm rms; white: 2.5 mm rms.
  - 12) Y (LFM Module) - 3D Solid, Maths, Orthophoto, Rms, Pipe, bend, dished end, Rings, cone, sphere, standard objects.



## Annexe 3 : Documentations des constructeurs

### Annexe 3.1 : Documentations Trimble

#### - Scanner laser GX (Trimble@)



#### PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

Un scanner 3D unique, conçu pour les professionnels de la topographie

Polyvalent, il s'adapte à toutes les exigences topographiques dans des applications traditionnelles ou innovantes

Il complète d'autres systèmes topographiques Trimble pour former une solution Integrated Surveying™

Il constitue un élément de base du Connected Survey Site (Site topographique connecté)



**LE SCANNER 3D TRIMBLE GX EST UN INSTRUMENT TOPOGRAPHIQUE DE POINTE QUI, GRÂCE À SA RAPIDITÉ D'ACQUISITION ET SA VIDÉO TEMPS RÉEL, EST CAPABLE DE CAPTURER DE GRANDES QUANTITÉS DE COORDONNÉES ET D'IMAGES**

#### UNE PROCÉDURE DE TRAVAIL TOPOGRAPHIQUE

Le Trimble® GX™ est le premier scanner Laser 3D s'adaptant complètement aux procédures de travail des géomètres. En tant que tel, le Trimble GX offre aux entreprises de services topographiques des possibilités uniques : il ouvre les portes de nouvelles applications tout en améliorant l'efficacité des applications traditionnelles.

La gestion des procédures de travail topographiques est assurée par des caractéristiques telles que la mise en station libre, les options d'alimentation flexibles et la prise en charge des contrôleurs "durcis" de Trimble, bien connus des géomètres et topographes<sup>1</sup>. Du fait qu'il « pense comme un géomètre », le Trimble GX offre des avantages considérables :

- Réglages plus rapides et moins nombreux<sup>2</sup>
- Portabilité
- Complète d'autres systèmes topographiques, tels que la station totale Trimble® S6 ou le système GNSS Trimble® R8

Le Trimble GX permet aux experts en topographie d'intégrer immédiatement le relevé laser 3D à l'éventail de services proposés par leur entreprise. Avec un minimum d'apprentissage, le Trimble GX fournit rapidement une capacité de production optimale, avec un retour rapide sur l'investissement.

#### POLYVALENCE EXCEPTIONNELLE

Le Trimble GX est remarquablement polyvalent. Les caractéristiques uniques du Trimble GX lui permettent de s'adapter aux exigences de chaque travail topographique :

- L'instrument est adapté à de multiples applications topographiques. Pour de nombreux travaux topographiques traditionnels, l'instrument permet de réaliser une économie en frais de personnel pouvant aller jusqu'à 80%, particulièrement lorsqu'il est combiné avec l'utilisation du logiciel de post-traitement RealWorks Survey™ de Trimble®, qui permet une gestion aisée de quantités importantes de données contenues dans les fichiers de numérisation.
- Pour certains travaux, les coordonnées et l'orientation du projet peuvent être déterminées via la technique de stationnement s'appliquant à un point de référence connu ou, plus traditionnellement, au relèvement polygonal/station. Pour d'autres travaux, effectuez l'alignement où vous le désirez et occupez-vous des coordonnées ultérieurement.

- La mise au point automatique (autofocus) en temps réel permet de collecter des données d'une haute précision en peu de temps ; un système servo 360° permet d'effectuer la numérisation tant en intérieur qu'en extérieur.
- Lorsqu'un travail requiert une définition moindre, mais une portée plus longue, la technologie OverScan™ de Trimble® permet de renforcer la capacité d'acquisition des données jusqu'à 350 m. Grâce à cette caractéristique, moins de réglages sont nécessaires, les temps de prise de mesures topographiques sont plus courts, et il est possible de numériser des objets de dimensions supérieures.

La polyvalence du Trimble GX garantit un excellent retour sur investissement, ainsi qu'une rentabilité sans cesse croissante.

#### SOLUTION INTEGRATED SURVEYING (TOPOGRAPHIE INTÉGRÉE) ET AU-DELÀ

Les systèmes de numérisation 3D de Trimble prennent en charge la solution Integrated Surveying et constituent un élément de base de la solution topographique totale de Trimble.

Sur le terrain, les techniques combinées permettent de répondre aux exigences de chaque travail topographique. Par exemple, établissez un canevas polygonal à l'aide d'une solution optique telle que la station totale Trimble S6, puis, aux points de contrôle, numérisez la zone topographique avec une résolution élevée à l'aide du Trimble GX.

Au bureau, RealWorks Survey permet d'importer et de gérer des fichiers de numérisation sur PC. Le logiciel prend également en charge les données GNSS et optiques, de sorte que toutes les informations collectées sur le terrain puissent être combinées dans un seul fichier de projet.

Lorsqu'un nouveau défi topographique se présente à vous, faites appel à Trimble et sa solution de relevé Laser 3D. Les systèmes topographiques de Trimble offrent une capacité d'intégration parfaite via le partage des procédures et technologies ; les différents éléments constitutifs de votre projet sont ainsi réunis en un ensemble dont le tout est supérieur à la somme de ses parties : bienvenue sur le Connected Survey Site (site topographique connecté).

<sup>1</sup> Par exemple, le Trimble Recon® Contrôle; un appareil Pocket PC  
<sup>2</sup> Un réglage classique prend à peine 5 minutes.





## SCANNER 3D TRIMBLE GX

### PERFORMANCES

Portée ..... standard : 200 m<sup>1</sup>; étendue : 350 m (avec OverScan)<sup>2</sup>  
 Vitesse de numérisation ..... jusqu'à 5 000 points par seconde  
 Écart type<sup>3</sup> ..... 1,4 mm à ≤50 m ; 2,5 mm à 100 m  
 3,6 mm à 150 m ; 6,5 mm à 200 m  
 Précision d'un point unique ..... position = 12 mm à 100 m ;  
 distance = 7 mm à 100 m  
 angle Hz = 12" (60 µrad) ; angle Vt = 14" (70 µrad)  
 Acquisition de cible ..... écart type <1 mm (cibles Trimble)  
 Précision de la modélisation de surface ..... ± 2 mm  
 (en fonction de la méthode)<sup>2</sup>  
 Nivellement ..... nivelle sphérique sur embase : 8' ;  
 Compensateur à axe double de ±6'  
 Compensation de niveau automatique en temps réel  
 Intégrité des données ..... étalonnage périodique de remise à zéro  
 compensation de température en temps réel  
 Paramètres avancés ..... corrections atmosphériques  
 (définies par l'utilisateur)  
 moyennage (défini par l'utilisateur)  
 mise au point automatique (autofocus) :  
 contrôlé par l'utilisateur ou implémentation automatique  
 Résolution de numérisation ..... taille du spot : 3 mm à 50 m  
 Taille du spot avec autofocus ..... 0,3 mm à 5 m ; 0,9 mm à 15 m ;  
 1,5 mm à 25 m  
 Espacement des points : peut descendre jusqu'à 3,2 mm à 100 m  
 (disponibilité de 1,6 mm vertical = 18 pts/cm<sup>2</sup>)  
 Ligne de numérisation (Hz) : 200 000 points ;  
 Ligne de numérisation (Vt) : 65 536 points

### SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME

Type de diode Laser ..... à impulsions 532 nm, vert  
 Classe : IEC 60825-1 – Classe 3R ; 21 CFR §1041.10 : Classe 2  
 Champ de vision ..... 360° x 60° numérisation unique continue  
 Optique ..... système optique de numérisation breveté  
 Transfert de données ..... port USB pour extensions éventuelles  
 Imagerie numérique ..... vidéo couleur intégrée en temps réel avec  
 zoom optique x5,5  
 Indicateurs d'état ..... système prêt, laser activé, état de comm.

### DIMENSIONS PHYSIQUES

Scanner Laser 3D ..... dimensions : 323 (largeur) x 343 (longueur)  
 x 404 (hauteur) mm  
 poids : 13,0 kg ; consommation : <100 W  
 Alimentation ..... bloc super compact. CA 90–240 V, 50–60 Hz ;  
 dimensions : 169 (largeur) x 65 (longueur) x 37,5 (hauteur) mm ;  
 poids : 0,7 kg (1,5 lb)  
 Coffret de transport ..... coffret de transport enregistrable  
 dimensions : 645 (largeur) x 490 (longueur) x 435 (hauteur) mm ;  
 poids : 14,2 kg (32,4 lb)  
 Conditions environnementales .. temp. de fonctionnement : 0 °C à 40 °C ;  
 temp. de stockage : -20 °C à 50 °C  
 luminosité : complètement opérationnel, quelles que soient  
 les conditions de luminosité ; étanchéité : IP53 (I.E.C.) ;  
 choc : IEC 60721-3-2 : 2M2 (scanner)

© 2005–2006, Trimble Navigation Limited. Tous droits réservés. Trimble et le logo du Globe et Trimble sont des marques déposées de Trimble Navigation Limited et enregistrées dans le Bureau des marques et brevets des États-Unis et d'autres pays. GI, Integrated Surveying, OverScan, PointScape, PocketScape, et RealWorks sont des marques de commerce de Trimble Navigation Limited. Recon est une marque déposée de Topod Data Systems Inc. Toutes les autres marques appartenant à leur propriétaire respectif. Numéro de commande 022543-1484-F (02/06)

2M2 (scanner dans son étui) conforme aux normes de transport  
 humidité : atmosphère sans condensation  
 Accessoires standards ..... caisse de transport enregistrable en cas  
 de transport aérien ; bloc d'alimentation super-compact  
 avec câbles CA ; trépied Trimble ; câble ethernet pour  
 connexion du scanner au collecteur de données ;  
 50 cibles adhésives plates ; kit d'installation du logiciel de  
 bureau du scanner 3D de Trimble  
 Accessoires en option ..... Recon Controller de Trimble avec  
 logiciel de terrain PocketScape ; sac à dos pour le  
 scanner 3D de Trimble ; kit de câblage pour batteries  
 kits de cibles ; (planaire, sphérique) ; batteries

### LOGICIEL DE TERRAIN

Le logiciel de terrain PointScape pour le Trimble GX s'exécute sur un ordinateur portable. Le logiciel de terrain PocketScape s'exécute sur un équipement Pocket PC, tel que le contrôleur Trimble Recon. Les deux applications offrent des fonctions de numérisation avancées :

#### Procédure de travail topographique :

- Niveau électronique
- Compensation à deux axes électroniques
- Corrections atmosphériques
- Alignement de la station et routines de relèvement polygonal station

#### Outils de création de cadrage :

- Cadrage rectangulaire
- Contrôle de zoom vidéo
- Mesure de cible plane, sphère et point unique

#### Options de numérisation :

- Paramètres de numérisation prédéfinis ou personnalisés
- Intensité de retour et nuage de points colorés
- Temps de numérisation estimé et contrôle de résolution

#### En outre, PointScape offre les fonctions avancées suivantes :

- Lecture vidéo streaming
- Panorama automatique
- Numérisation automatique d'images
- Création rapide de cadrage sur vidéo, panorama ou image
- Création de cadrage polygonal
- Création de cadrage multiple
- Reconnaissance automatique de cible plane et sphère
- Visualisation 3D, panoramique et zoom en temps réel, même en cours de numérisation
- Visualisation de l'emplacement du scanner
- Affichage des nuages de points en fonction des couleurs réelles ou de l'intensité
- Simulation de rendu de surface et luminosité environnementale
- Mesure et calcul inverse



- 1 Mesuré à 90% de surface blanche (albédo).
- 2 L'acquisition des données dépend du type de surface et de la distance.
- 3 Valeurs nominales correspondant à la capture de données standard à quatre répétitions, sur base de la mesure de distance.

Les spécifications peuvent être modifiées sans avis préalable.



**AMÉRIQUE DU NORD**  
 Trimble Engineering &  
 Construction Group  
 5475 Kellerburger Road  
 Dayton, Ohio 45424-1099  
 ÉTATS-UNIS  
 800-530-7800 (H<sup>9</sup> vert)  
 Tél : +1-937-245-5154  
 Fax : +1-937-233-9441

**EUROPE**  
 Trimble GmbH  
 Am Prime Park 11  
 65479 Raunheim • ALLEMAGNE  
 Tél : +49-6142-2100-0  
 Fax : +49-6142-2100-550

**ASIE-PACIFIQUE**  
 Trimble Navigation  
 Singapore Pty Limited  
 80 Marine Parade Road  
 #22-06, Parkway Parade  
 Singapour 449269 • SINGAPOUR  
 Tél : +65-6348-2212  
 Fax : +65-6348-2232



- Logiciel RealWorks (Trimble@)

# LOGICIEL REALWORKS SURVEY NOTES TECHNIQUES

Trimble RealWorks Survey est un logiciel d'édition et d'affichage de nuages de points (semi de points d'un scanner laser 3D). Grâce à un ensemble unique d'outils et de fonctionnalités avancées, le logiciel permet aux géomètres, et ingénieurs d'extraire des données métriques et géoréférencées à partir des données d'un scanner laser 3D.

Trimble® RealWorks Survey™ fait partie d'une suite logicielle intégrée destinée aux géomètres, topographes et ingénieurs exploitant l'ensemble des informations issues des scanners laser 3D disponibles sur le marché. Le logiciel comprend une série d'outils de précision et d'applications particulièrement adaptées à la topographie, au génie civil, aux applications de construction, de gestion de patrimoine, d'investigation de police scientifique et autres. Il permet de produire diverses sorties 2D et 3D pour impression directe ou exportation vers AutoCAD et MicroStation.

RealWorks Survey est le logiciel polyvalent de Trimble pour l'affichage, l'exploration et la manipulation de nuages de points Tel Que Construit ainsi que pour la production de données 2D et 3D. (impression directe ou exportation vers vos outils CAO) Avec ses nombreuses fonctions innovantes et uniques, Trimble RealWorks Survey est intuitif, flexible et exceptionnellement facile à apprendre et à utiliser.

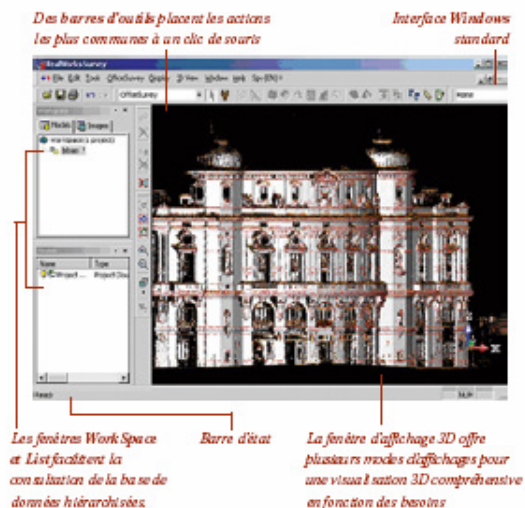
RealWorks Survey est complété par RealWorks Survey Lite, une version compacte qui permet aux géomètres, topographes et ingénieurs de proposer cette version du logiciel à leurs clients qui pourront afficher, manipuler, imprimer et éditer, en partie, les données fournies. RealWorks Survey Lite est aussi l'outil idéal pour apprendre les bases de l'édition de nuages de points. L'acquisition de plusieurs licences est une solution abordable et efficace pour une première expérience dans le monde de la numérisation laser 3D.

Trimble met également à disposition de tous et gratuitement RealWorks Viewer, un outil de visualisation des données natives de RealWorks Survey. Ce logiciel permet d'afficher et de manipuler les données natives de RealWorks Survey.

## UNE INTERFACE VISUELLE ET INTUITIVE

### Le confort inhérent au travail dans un environnement familier

RealWorks Survey offre une interface compatible et familière à l'environnement Microsoft® Windows®. Quand vous ouvrez une session RealWorks Survey, vous voyez la fenêtre principale et ses sous-fenêtres actives. Après l'ouverture d'un projet, ces composants s'activent au fur et à mesure lorsque vous en avez besoin. Vous pouvez personnaliser les paramètres des différents composants à l'intérieur de la fenêtre principale. Par défaut, une session RealWorks Survey ressemble à l'exemple ci-dessous.







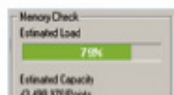
Simplicité pour arriver aux résultats et facilité d'utilisation sont les préoccupations essentielles de toutes les solutions logicielles de Trimble. RealWorks Survey valorise également ce concept en offrant des fonctions guidées pas-à-pas garantissant la facilité d'apprentissage et d'utilisation, en plus de réels gains de productivité. Laissez RealWorks Survey vous guider jusqu'au résultat voulu avec le minimum de risques et dans les délais de livraison les plus courts.

**GESTION DE GRANDE BASE DE DONNEES**

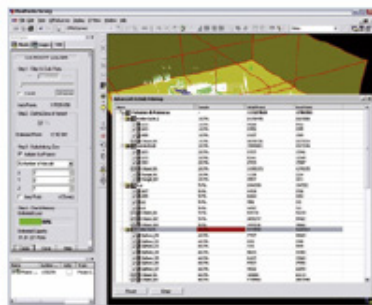
**Gérez aisément des centaines de millions de points relevés**

RealWorks Survey gère aisément d'énormes bases de données de points. Cette capacité permet aux utilisateurs de diviser des projets de grande envergure en sous-ensembles de données de plusieurs manières. Une panoplie d'outils permet aux utilisateurs de gérer avec précision les points à charger en mémoire et donc, les points disponibles à l'édition. Ces sous-ensembles (appelés aussi sous-projets) peuvent être créés à partir d'un levé, d'une station ou d'une zone d'intérêt.

Les utilisateurs peuvent afficher à l'écran l'état du filtrage sur le disque dur, choisir les rapports de zone pour la sous-division et vérifier l'espace mémoire, toujours selon le principe pas-à-pas du cheminement RealWorks Survey. Les sous-ensembles obtenus peuvent alors être facilement édités dans un environnement de mémoire informatique optimisé.



*Gestion de sous-projet à l'écran*



*Contrôle de mémoire dynamique*

**ALIGNEMENT / CONSOLIDATION**

**Méthodologies basées sur nuage de points, sur cible ou sur des points connus ; analyse, contrôle qualité et création de rapports**

Dans RealWorks Survey, les utilisateurs peuvent aligner (consolider) les levés grâce plusieurs méthodes différentes : basée sur les nuages de points, sur cible, ou par géoréférencement.

L'alignement de deux nuages de point se fait par recouvrement de parties communes. Un affinage automatique est ensuite appliqué. L'alignement des stations en utilisant des cibles se fait automatiquement dans le logiciel, quelle que soit la configuration des cibles. Le contrôle qualité est présent à chaque étape et se termine par l'édition d'un rapport de consolidation. L'alignement basé sur cible s'applique au positionnement libre, à l'implantation et au relèvement polygonal/station et au positionnement non aligné.

Pour l'alignement des stations via l'outil de géoréférencement, les utilisateurs affectent les coordonnées connues à plusieurs points dans la station à aligner. Ces points peuvent être des centres de cible, des points connus ou



*Enregistrement et rapport à l'écran*

des points topographiques relevés par d'autres instruments. Pour améliorer encore la procédure d'alignement, l'outil Target Analyser permet l'une des fonctions suivantes : vérifier s'il y a suffisamment de cibles ou de points topographiques, modifier ou supprimer ceux qui sont mal placés, créer des cibles supplémentaires dans le nuage de points où une cible est identifiée visuellement comme ayant été scannée.



*Rapport d'enregistrement au format .ref*

**OUTILS AVANCES D'INSPECTION**

**Comparez l'existant à la conception, l'avant et l'après et bien plus encore**

Procédez à plusieurs tâches d'inspection avec les outils de RealWorks Survey : inspection de surfaces jumelles, inspection Surface/Modèle et inspection Surface/Courbe.

## LOGICIEL REALWORKS SURVEY NOTES TECHNIQUES

Générez et visualisez vos résultats sous forme de cartes d'inspection avec couleurs personnalisables.

Visualiser les volumes (remblai / déblai) et de déformations. Vous pouvez également importer des profils et des primitives géométriques à partir d'un fichier de conception CAO au format .dxf ou .dwg, et exporter des fichiers graphiques aux formats .dxf et .dgn.

La carte d'inspection vous permet d'extraire les résultats suivants:

- Sections transversales horizontales et verticales
- Point 3D / Polygone 3D
- Calcul de cubature / surface
- Courbes Iso exprimant les écarts entre les surfaces inspectées

Idéal pour contrôler des applications telles que dans le génie civil et l'exploitation minière, ces outils sont conçus pour donner un ensemble de données puissant, irrésistible qui donnent un nouveau sens à l'expression "prestataire de services".

### MULTI-ORTHOPROJECTION

**Produisez une série d'orthoimages sur plusieurs façades d'un même bâtiment grâce à cet outil unique**

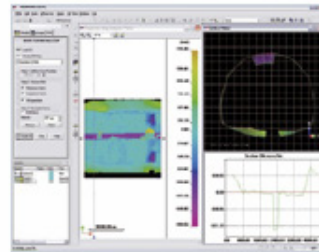
L'outil de multi-orthoprojection vous permet de créer plusieurs multi-orthoimages alignées sur plusieurs façades d'un bâtiment. Vous pouvez créer ou importer un plan, puis extraire les segments correspondants aux murs de façade le long de l'axe Z. La définition (taille du pixel) des orthoimages est personnalisable. Vous pouvez choisir d'afficher un aperçu de chaque orthoimage et de les créer une par une ou toutes à la fois. Vous pouvez exporter les résultats finaux vers un fichier DXF avec des renvois à chaque orthoimage exporté comme fichier TIFF référencé.

Un outil simple et intuitif qui permet de créer des orthoimages rapidement à partir d'un nuage de points.

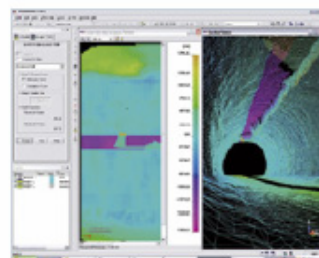
### CREATION DE COURBES DE NIVEAUX

**La manière la plus souple de créer des courbes de niveaux**

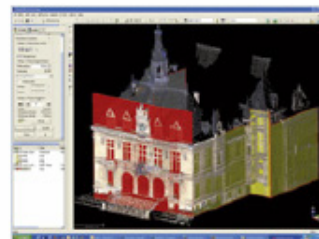
La création de courbes de niveaux se base sur tous les points mesurés (quelque soit le nombre de points capturés) pour garantir une image fidèle du relevé 3D. Aucun échantillonnage ni maillage n'est requis. Ce qui diminue considérablement la vitesse de calcul. Cet outil vous permet de produire des cartes topographiques standard et 3D délivrant les informations les plus précises qui soient. Les courbes de niveaux peuvent être imprimés en vue 2D ou 3D ou exportés vers AutoCAD et MicroStation. Le choix entre impression directe à partir de RealWorks et l'exportation vers AutoCAD ou MicroStation, est toujours disponible pour chaque résultat obtenu



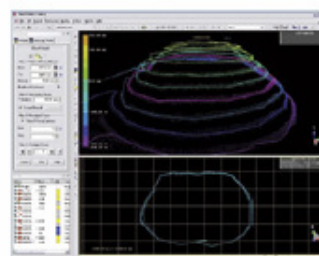
Carte d'inspection de tunnel.



Carte d'inspection de tunnel avec maillage



Extraction de façades successives dans RealWorks



Création de courbes de niveaux à l'écran





**PROFILS / SECTIONS TRANSVERSALES**

**Profilis personnalisables pour l'inspection et le contrôle dimensionnel et création unique de profils avec EasyProfile™**

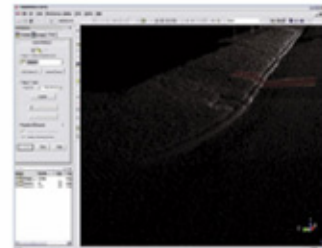
Dans RealWorks Survey, vous pouvez appliquer toutes les contraintes nécessaires lors de la création de profils et de sections transversales. Par exemple, les données d'analyse de tunnel peuvent suivre exactement l'axe central de celui-ci.

Lors de l'application d'une contrainte, trois vues sont automatiquement générées :

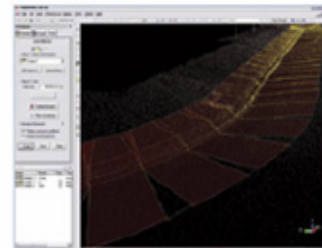
- Vue 3D montrant le profil et les données ;
- Vue en profondeur du profil dans laquelle les résultats sont développées dans un plan et exprimées par une polygone 2D,
- Vue en coupe montrant les polygones 2D ajustés à chaque section transversale.

Ces trois ensembles de données permettent aux utilisateurs de générer un rapport complet pour une inspection de tunnel ou d'autoroute.

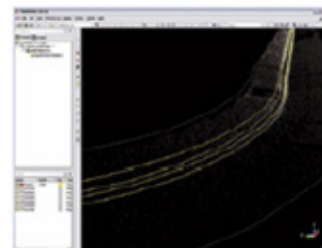
RealWorks Survey intègre l'outil EasyLine™ qui génère des polygones continus dans un plan sélectionné à partir d'un nuage de points et l'outil EasyProfile™, qui utilise un profil pré-positionné (fixé sur une section transversale d'un nuage de points) pour extraire automatiquement les lignes d'un nuage de points. Des profils générés en interne ou importés peuvent être positionnés de manière interactive dans un nuage de points en utilisant l'outil Profile Matcher. Une fois activé, EasyProfile utilise ce profil pour extraire les formes similaires dans le nuage de points. Les tracés sont alors automatiquement extraits. EasyProfile est une nouvelle étape vers la création entièrement automatique de croquis 2D à partir des données de scanner 3D. EasyProfile extrait automatiquement les voies vertées, les trottoirs, les profils de rues, les glissières médianes de route et pratiquement tout autre objet linéaire.



*Profil de référence ajusté à l'aide de Profile Matcher*



*Extraction automatique avec EasyProfile*

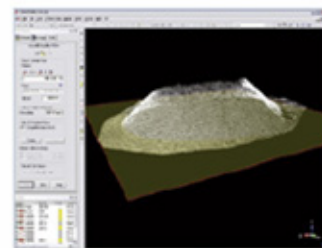


*Profilis résultats générés par EasyProfile*

**CALCUL DE VOLUME ET DE SURFACE**

**Calculs volumiques automatiques pour gérer au jour le jour les projets de construction et de prospection minière**

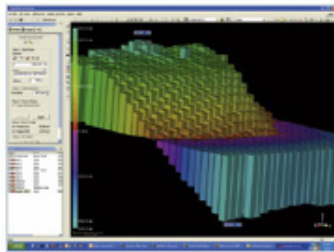
RealWorks Survey calcule les volumes grâce à une méthode de grille de haute précision, quelle que soit la densité du nuage de points. Les fonctionnalités de surface et de volume sont intégrées aux résultats RealWorks Survey et directement affichés à l'écran. Le calcul des volumes comprend les volumes de déblai et de remblai et peut s'effectuer à partir d'une surface scannée et à d'un plan personnalisé ou entre deux surfaces scannées. L'utilisateur peut définir la densité de la grille, définissant ainsi la résolution du volume. La surface scannée peut être représentée par un nuage de points ou par un maillage triangulaire. Les résultats des calculs peuvent être exportés sous forme de tranches, c'est-à-dire par des polygones générés automatiquement selon des intervalles définis par l'utilisateur.



*Préparation d'un calcul de volume*

Comme toujours, les utilisateurs ont le choix entre des impressions directes, la création de fichiers MSWord et MSeXcel et l'exportation de données vers AutoCAD ou MicroStation.

LOGICIEL REALWORKS SURVEY NOTES TECHNIQUES



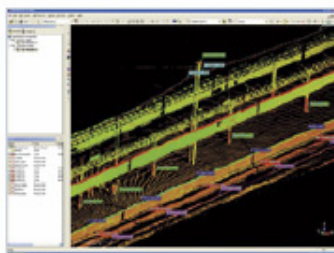
Calcul à l'écran d'un volume en 3D

**POINTS CARACTERISTIQUES**

**Codage des points caractéristiques sur votre bureau ... flexible et intuitif**

Une manière efficace d'harmoniser l'organisation d'un croquis et sa légende s'effectue par codage des points caractéristiques. RealWorks Survey permet aux utilisateurs d'importer des bibliothèques existantes de codes ou de créer leur propre bibliothèque. Le travail avec les ensembles de données générés par des scanners 3D devient alors aussi simple et précis que de mesurer sur le chantier avec des instruments topographiques conventionnels. Il vous suffit de lever des points dans le nuage de points. Le codage des points caractéristiques peut être exporté directement vers AutoCAD et MicroStation en le liant à un catalogue standard.

Le codage des points caractéristiques dans RealWorks Survey permet de multiplier par quatre, et parfois plus la productivité d'une équipe topographique (acquisition et édition de données) (source : analyse d'applications clients Trimble ; RealWorks Survey associé à un scanner Trimble série GS).



Sélection des codes dans RealWorks

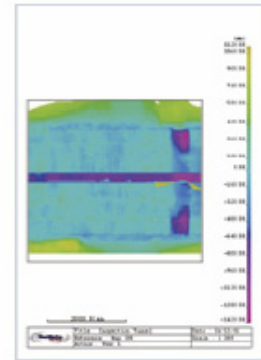
**IMPRESSIONS DIRECTES, EXPORTATION CAO, RAPPORTS TEXTE ET FEUILLES DE CALCUL**

**Résultats graphiques disponibles sur papier en quelques minutes ... ou exportez-les vers votre logiciel CAO**

Tous les résultats graphiques sont disponibles à l'impression et à l'exportation directe à partir de RealWorks Survey, grâce à l'interface d'impression incluant légende, titre, échelle de la carte et incrustations. Les résultats s'exportent également vers les principaux logiciels CAO, comme AutoCAD et MicroStation. Avec également la possibilité de générer des rapports écrits aux formats MS Word et MS Excel, RealWorks Survey vous offre une flexibilité maximale pour les exigences de vos clients en terme de rapport.



Impression des coupes et sections



Impression de carte pour inspection

**... ET BIEN PLUS ENCORE**

**Voici un aperçu de ce qu'il est possible de faire avec RealWorks Survey**

Les fonctions ci-dessus ne représentent qu'une partie de ce que RealWorks Survey peut vous apporter. Veuillez trouver une liste complète des fonctions ci-après.



**CARACTERISTIQUES**

Les fonctions disponibles dans RealWorks Survey Lite sont signalées par Lite

**Gestionnaire de sous-projet pour les bases de données de grande envergure**

**Gestion Nouveau dans V5**

- Créer des sous-projets avec
  - Filtrage global sur disque
  - Filtrage avancé sur disque
  - Définir des zones d'intérêts
  - Subdiviser par zone

- Activer/recharger un sous-projet
- Sauvegarder et restaurer un sous-projet
- Fusionner des sous-projets

**Enregistrement / Géoréférencement**

- Enregistrement global entièrement automatique de plusieurs levés
- Reconnaissance de cible topographique
- Analyse et correction de cible
- Automatic Refinement System (A.R.S.™) – Système d'ajustement automatique.
- Géoréférencement :
  - Importation de données en provenance d'un équipement topographique conventionnel - Lite (station totale, GPS, etc.)
  - Création avancée de référentiel local/global (manuelle/automatique) – Lite
  - Par sélection de points ou levé de cibles topographiques
  - Rapport texte personnalisé disponible (fichier rtf) – Lite
  - Créer une version point 3D de cibles à utiliser en mode OfficeSurvey™ Nouveau dans V5

**Outils d'inspection OfficeSurvey**

- Inspection surfaces jumelles
- Inspection surface/modèle
- Inspection surface/courbe (précédemment inspection 1D)
  - Générer et visualiser la carte d'inspection avec un code de couleurs personnalisable
  - Analyse de la carte d'inspection (Outil d'analyse d'inspection)
    - Création de plans sécants
    - Création de points 3D/de polygones 3D
    - Calcul de volume/surface
    - Création d'écarts d'iso-courbes Nouveau dans V5
    - Création de grilles en couleur Nouveau dans V5
    - Analyse de déformations basées sur une section Nouveau dans V5
  - Comparaison exécution / conception
  - Visualisation graphique d'intervalles et de déformations
  - Importation de profils et de primitives géométriques (.dxf, .dwg)
  - Exportation sous forme de fichier graphique (.dxf)
    - Exportation de carte d'inspection (TIFF, DXE, DWG) Nouveau dans V5

**Projection Orthographique OfficeSurvey™ :**

- Projection de plans - Lite
- Paramètres personnalisables
- Modes d'orthoprojection :
  - Altitude/ visualisation des normales
  - Retour de l'intensité laser
  - Couleurs réelles

- Mode aperçu
- Exportation images TIFF

**Muti-projection orthographique OfficeSurvey**

- Plans de projection déterminés à partir du plan de sol
- Hauteur réglable des plans de projection
- Paramètres personnalisables
- Modes de projection :
  - Altitude/ visualisation des normales
  - Retour de l'intensité laser
  - Couleurs réelles
  - Mode aperçu pour chaque projection
  - Mode de création en série des projections orthographiques
  - Exportation en fichier DXF relié aux images TIFF

**Création de courbes de niveaux OfficeSurvey**

- Créer des courbes de niveaux à partir d'un maillage ou directement à partir du nuage de points
- Définition de l'élévation
- Aperçu de la création de courbes de niveaux
- Ajustement au plus proche des points
- Mode aperçu

**Profils/ Coupes transversales OfficeSurvey**

- Créer des coupes à partir d'un maillage ou directement à partir du nuage de points
- Importation de profils et d'axes de tunnel (.dxf, .dwg)
- Définition de positions de coupe par intervalles ou segments importés (.dxf, .dwg)
- Réglage des sections transversales perpendiculairement au plan horizontal ou à l'axe central
- Création automatique de polygones
- Epaisseur des profils avec définition de tolérances
- Mode aperçu

**Calcul de volume et de surface OfficeSurvey**

- Méthode basée sur la grille
- Paramètres personnalisables
- Calcul de volumes de remblai
- Calcul de volumes de déblai
- Volume entre une surface scannée et un plan défini par l'utilisateur
- Volume entre deux surfaces scannées
- Création automatique de polygones associées
- Mode aperçu



## LOGICIEL REALWORKS SURVEY NOTES TECHNIQUES

### EasyProfile OfficeSurvey

Extraction de profils par définition de polygones 2D sur des nuages de points et recherche automatique par lignes de rupture

### Profile Matcher OfficeSurvey

Déplacer et dimensionner des profils dans une scène 3D  
Déterminer l'épaisseur  
Créer des profils

### Détection d'arêtes OfficeSurvey

Détection de discontinuités - Lite  
Marquage de discontinuités - Lite  
Création de sous-nuages de points - Lite  
Création automatique de plans 2D (avec EasyLine)  
Exportation vers principaux logiciels de CAO

### Codage de points caractéristiques OfficeSurvey

Importation de bibliothèques utilisateurs  
Création/édition/exportation de bibliothèques de points caractéristiques  
Mode décroche automatique au point pour la mesure  
Exportation directe vers les principaux logiciels de CAO

### OfficeSurvey 2D-EasyLine

Création automatique de croquis 2D à partir de nuages de points  
Création de lignes :  
Segment seulement / Segment et arcs  
Tolérance réglable  
Mode aperçu

### Outils génériques OfficeSurvey

Segmentation de nuages de points : Lite  
Organisation des données hiérarchiquement segmentées  
Décimation de nuages de points  
Filtrage aléatoire  
Filtrage spatial homogène  
Filtrage par station  
Filtrage par intensité  
Filtrage par discontinuité  
Filtre topographique  
Création de coupes de points dans un plan de coupe  
Mesures : Lite  
Distance, angle, coordonnées, orientation  
Rapport de mesures (fichier .rtf)  
Feuille de calcul de mesures  
Création de maillage :  
Projection basée sur un plan  
Projection basée sur l'affichage à l'écran  
Projection basée sur une station  
Projection cylindrique

Élimination automatique des discontinuités

Mode aperçu  
Édition du maillage  
Lissage  
Suppression des crêtes  
Texturage automatique

Importation d'images de caméra et mappage - Lite  
Affichage de boîte de propriété d'objet - Lite  
Outils de conception de base et de dessin 2D  
Gestion des annotations d'objet  
Création de sphères, de plans et de cylindres avec l'outil Geometry Fitter Nouveau dans V5

### Entrées : Lite

Format d'échange Trimble (.rwp)  
PointScape  
PocketScape  
ASCII (XYZ + couleur + intensité)  
Réseaux topographiques (.cr5, .crd)  
AutoCAD (.dxf, .dwg)  
Images (.jpg, .bmp, .tif) fichiers texte (.txt)  
Fichiers iQscan

### Sorties : Lite

Format d'échange Trimble (.rwp)  
AutoCAD (.dxf)  
MicroStation (.dgn)  
Fichiers texte (.txt, .rtf)  
Feuilles de calcul (.csv)  
Images (.bmp, .tif)  
Exportation du format du logiciel PointCloud<sup>®</sup> natif (.ptc)  
Nouveau dans V5  
Impressions directes - avec légende, titre, échelle de carte, votre logo.

### Affichage : Lite

Capture d'écran  
Affichage du nuage de points  
Niveau de détails automatique pour visualisation rapide  
Retour progressif à la vue complète après décimation 3D  
Nouveau dans V5  
Couleur simulée, par station ou réelle  
Niveaux de gris / Intensité codée  
Modes d'affichage : Mode Parcourir / Manipulation  
Zoom de points (facteurs de zoom 1 à 5)  
Direction d'éclairage personnalisable Nouveau dans V5  
Afficher/Cacher les étiquettes de points 3D Nouveau dans V5



**CONCLUSION**

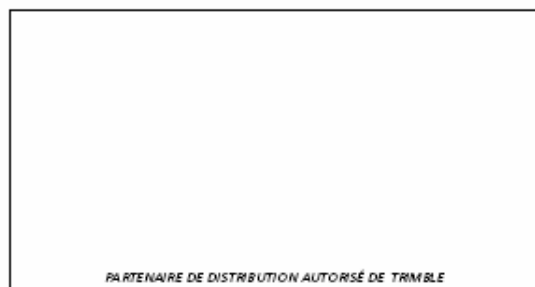
RealWorks Survey est le logiciel polyvalent d'alignement, d'affichage, d'exploration et de manipulation de données de nuages de points et de production de plans et autres résultats 2D et 3D pour impression directe ou exportation vers votre logiciel de CAO. Les nombreuses fonctionnalités innovantes et

uniques sur le marché, combinées à des fonctions standard de topographie et d'ingénierie font du logiciel Trimble RealWorks Survey un programme intuitif, flexible, facile à apprendre et à utiliser.

**CONFIGURATION MINIMALE REQUISE**

- Processeur Intel® Pentium® 4 ou supérieur ou compatible, 2 GHz (3 GHz ou plus recommandés)
- Microsoft Windows XP (Professional ou Home Edition SP1 ou SP2), Windows 2000 Professional SP4
- 1 Go de RAM (2 Go ou plus recommandés)
- Carte graphique 128 Mo 3D Open GL
- lecteur de CD-ROM
- Souris trois boutons

© 2015, Trimble Navigation Limited. Tous droits réservés. Trimble et le logo de Globe et Triangle sont des marques déposées de Trimble Navigation Limited enregistrées dans le Bureau des marques et des brevets des États-Unis et en d'autres pays. A, RS, EasyLine, EasyProfile, OfficeSurvey, et RealWorks Survey sont des marques de commerce de Trimble Navigation Limited. Microsoft et Windows sont des marques déposées ou des marques de Microsoft Corporation dans les États-Unis et d'autres pays. Toutes les autres marques appartiennent à leurs propriétaires respectifs. N° de commande 0256241230-F (11/15)



**AMERIQUE DU NORD**  
 Trimble Engineering & Construction Group  
 5475 Kellenburger Road  
 Dayton, Ohio 45424-1099  
 ETATS-UNIS  
 800-538-7800 (N° vert)  
 Tél: +1-937-245-5154  
 Fax: +1-937-233-9441

**EUROPE**  
 Trimble GmbH  
 Am Prime Parc 11  
 65479 Raunheim • ALLEMAGNE  
 Tél: +49-6142-2100-0  
 Fax: +49-6142-2100-550

**ASIE-PACIFIQUE**  
 Trimble Navigation Singapore Pty Limited  
 80 Marine Parade Road  
 #22-06, Parkway Parade  
 Singapour 449269 • SINGAPOUR  
 Tél: +65-6348-2212  
 Fax: +65-6348-2232



[www.trimble.com](http://www.trimble.com)

**Annexe 3.2 : Documentations Faro**

- Scanner laser Faro LS (Faro@)



www.faro.com

## FARO Laser Scanner LS 840/880



	<p><b>[A] Appareil photo (en option)</b> Des scans en couleurs pour plus de réalisme</p>
	<p><b>[B] Haute résolution</b> 28 millions de pixels 3D par scan</p>
	<p><b>[C] Rapidité</b> Acquisition de 120.000 points de mesure /s</p>
	<p><b>[D] Précision</b> Erreur de linéarité de ±3mm à 25m</p>
	<p><b>[E] Enveloppe de mesure</b> 360° horizontal et 320° vertical, soit le plus grand champ de vision offert sur le marché</p>
	<p><b>[F] Autonomie</b> Serveur web indépendant - Enregistrement des données sur le disque dur interne - Pas besoin d'un ordinateur portable</p>
	<p><b>[G] Montage rapide</b> Installation simple et rapide sur trépied</p>

**Conçu pour la performance !**

Le FARO Laser Scanner LS est un système de digitalisation utilisant la technologie laser. Il effectue un relevé 3D précis d'objets volumineux (ex. bâtiment de 1 5.000m<sup>2</sup>) en pivotant sur 360° et numérise tout ce qui se trouve dans son axe de visée, jusqu'à 76m de distance. Il enregistre des millions de mesures 3D à la vitesse de 120.000 points /s et permet d'obtenir en moins de 4 minutes des images 3D en couleurs, chaque pixel étant doté de coordonnées XYZ exploitables avec FARO Scene, le logiciel livré avec l'appareil. Les données de scan permettent ensuite de mesurer directement dans le nuage de points, de faire des analyses et de produire des modèles CAO précis.

**Applications les plus courantes**

- Design Produit/Comparaison, Architecture & Génie Civil :  
Documentation de l'existant, calculs dimensionnels
- Pétrochimie, Centrales Electriques, Industrie des Process, Usine Numérique :  
Rétro-conception, documentation de l'existant
- Analyse Forensique / Accidents : Analyse des projections de sang, trajectoire ballistique
- Conservation des Monuments : Orthophotos en couleurs, modèles 3D photo-réalistes

**Avantages**

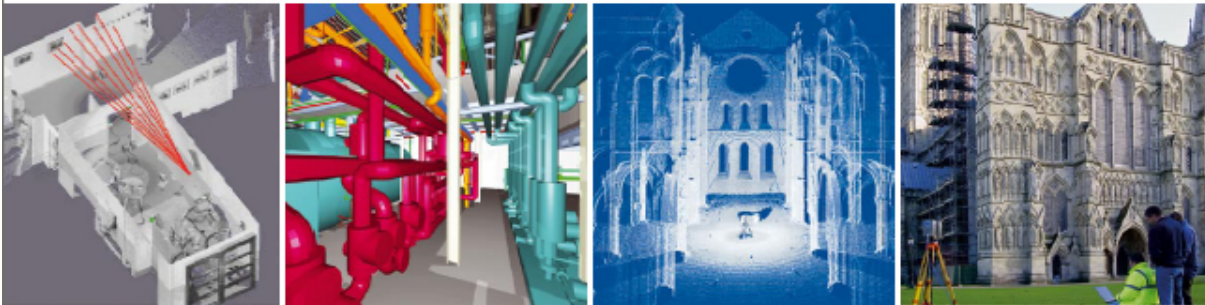
- ▶ Rendement et productivité élevés
- ▶ Vitesse de scan jusqu'à 120.000 points de mesure /s
- ▶ Haut niveau de précision
- ▶ Jusqu'à 100 fois plus rapide que les scanners 3D classiques basés sur le principe du temps de vol
- ▶ Colorisation automatique de haute résolution avec l'option couleurs
- ▶ Modularité



# FARO Laser Scanner LS 840/880



## Applications



## Caractéristiques

### Unité de mesure de distance

Distance : 0.6 m - 40 m<sup>1)</sup> (LS 840) / 0.6 m - 76 m<sup>1)</sup> (LS 880)  
 Résolution : 0.6 mm - 17 Bit Distance  
 Vitesse de mesure : 120 000 points/sec.  
 Incertitude de mesure<sup>2)</sup> : ±3 mm à 25 m  
 Répétabilité : (LS 840/10 mW)<sup>2,3)</sup>  
 @10 m: 0.8/3.1 mm rms @ 90 % refl. | 1.7/6.8 mm rms @ 10% refl.  
 (filtré/données brutes) :  
 @25 m: 1.4/5.4 mm rms @ 90 % refl. | 3.4/13.6 mm rms @ 10% refl.  
 Répétabilité : (LS 880/20 mW)<sup>2,3)</sup>  
 @10 m: 0.7/2.6 mm rms @ 90 % refl. | 1.3/5.2 mm rms @ 10% refl.  
 (filtré/données brutes) :  
 @25 m: 1.1/4.2 mm rms @ 90 % refl. | 2.5/10 mm rms @ 10% refl.

### Emetteur optique

Performance du laser (CW) :  
 (LS 840) 10 mW, (LS 880) 20 mW (Laser de classe 3R)  
 Longueur d'onde : 785 nm  
 Divergence du rayon : 0.25 mrad (0.014°)  
 Diamètre du rayon (à la sortie) : 3 mm, rond

### Traitement des données

Ordinateur interne : Pentium III avec 700 MHz,  
 256 MB RAM, 40GB HD; Windows® 2000,  
 Sauvegarde des données : locale sur disque dur interne,  
 à distance sur un ordinateur fixe ou portable connecté  
 via Ethernet  
 Contrôle du Scanner : par Ethernet ou Wlan sur PC ou PDA,  
 sur le réseau local ou sur Internet

### Bloc de réflexion (miroir)

Enveloppe verticale : 320°  
 Enveloppe horizontale : 360°  
 Résolution verticale : 0.009° (40.000 points 3D sur 360°)  
 Résolution horizontale : 0.00076° (470.000 points 3D sur 360°)  
 Résolution angulaire (hor/vert) : ±0.009°  
 Durée du scan : avec 2 millions de points de mesure env. 20s

<sup>1)</sup> Dépend de la lumière ambiante. La distance de mesure entière est atteinte sur des surfaces blanches mates à 90% avec un éclairage ambiant modéré. Une lumière plus vive réduit la portée effective du Scanner.  
<sup>2)</sup> Calculé sur papier de référence orthogonal avec une réflectivité de 90% en mode moyen.  
<sup>3)</sup> Basé sur des données brutes non filtrées.  
 Détails sur demande à info@faro-europe.com  
 Ces indications peuvent faire l'objet de modifications



## Général

Alimentation électrique : 24 V (batterie ou courant)  
 Consommation électrique : ~60 W  
 Température : 5° - 40° C  
 Humidité : sans condensation  
 Capteur d'inclinaison et d'orientation : en option (précision 0,1° ;  
 résolution 0,001° ; champ de mesure ±15°)  
 Poids : 14.5 kg (35lb)

Dimensions (LxIxH) : 400 mm x 160 mm x 280 mm  
 Maintenance / Calibration : une fois par an  
 Modules échangeables : Télémètre / Axe réflecteur / Ordinateur  
 Système de référence géographique : oui  
 Câble connecteur : situé dans la partie fixe du pied du scanner  
 Panneau de commande : oui, scanning sans ordinateur externe possible



Bureaux de Vente dans le Monde : Etats-Unis • Allemagne • Suisse • France • Royaume-Uni • Espagne • Italie • Pays-Bas • Pologne • Chine • Japon • Inde

www.faro.com

N° d'appel gratuit : 00800 3276 7253

04: 02 July 2007  
 07 FARO EUROPE GmbH & Co. KG

x:\control\referenc\04 market\franch\04 REF201-150.pdf

- Logiciel Faro Scene (Faro@)



www.faro.com

## Le logiciel FARO Scene

**Mesurer et analyser**



**Visualisation en nuages de points 3D**



**Importation VRML dans le nuage de points**



**Le logiciel pour la réalité virtuelle**

FARO Scene est le logiciel pratique et performant de gestion de nuages de points 3D destinés aux professionnels. FARO Scene est spécialisé dans l’affichage, l’administration et le traitement de nuages denses de points 3D provenant de Laser Scanner 3D haute définition tel que le FARO LS 880. Cet outil permet à l’opérateur de manipuler des lignes de points scannés 3D et d’acquérir, avec des fonctions analytiques, les données initiales de nuages de points. Grâce à cette analyse de données et la manipulation, on peut exporter les points scannés vers le système CAO de l’opérateur.

**Visionnage des points scannés 3D et des objets**

En vue 3D, les nuages de points ainsi que les objets sont visualisés. Le point de vue est arbitrairement sélectionnable, l'utilisateur peut bouger librement dans la zone. L'importation de modèles VRML rend possible l'analyse des modèles CAO et la reconnaissance de collisions et de déviations. Cette analyse s'effectue rapidement, directement et de manière intuitive sur le nuage de points 3D.

**Analyse 3D sur le nuage de points**

FARO Scene permet d'acquérir les données directement à partir des points scannés en 3D. Outre la mesure des distances entre les objets, les surfaces et les volumes devant être déterminés par l'utilisateur, des fonctions spéciales lui permettent d'examiner la planéité ou la régularité des sols ou des murs et font apparaître les résultats sous forme d'échelle couleur codifiée.

**Modélisation efficace**

FARO Scene supporte de manière efficace et rapide l'administration de projets lourds. La création de modèles et l'enregistrement des scannings se fait par des outils automatisés. FARO Scene retient l'information de base des données choisies. Celle-ci est traduite vers un écran numérique pour évaluer la qualité de la sélection. Une sélection simple et rapide des sphères de référence permet de repositionner les différents scans qui composent un même projet les uns par rapport aux autres. La réduction du volume de données des nuages de points à travers le scanning d'objets tels que tubes ou planéités simplifie l'exportation des données vers le système CAO. Le fait de pouvoir sélectionner des points complets ou en coupures complète cette fonctionnalité nécessaire pour le traitement ultérieur dans le système CAO.









www.faro.com

# FARO SCENE

# Le logiciel FARO Scene

### Création de modèles

- Scannings
- Objets CAO
- Reconnaissance d'objets avec évaluation de la qualité de boules / tubes / surfaces (reconnaissance automatique du bord inclus)
- Points de mesure
- Mesures effectuées
- Maniement aisé/Administration par l'affichage du plan ou support Drag-and-Drop entre Explorer et FARO Scene

### Affichage

- Visualisation 2D et 3D Scan
- Visualisation d'objets CAO
- Affichage de coordonnées dans le système scanner et de coordonnées universelles
- Aperçu avant impression
- Projection rapide (en teintes grises)
- Affichage avec valeur de réflexion ou de distance (codifié en couleur)

### Fonction d'importation/d'exportation

- Points d'appui (.cor)
- Points du scan (IQscan, IQcloud, .dxf, VRML, .igs, .pts, .pbx)
- Objets CAO (.igs, VRML)
- Images du scan (.jpg)

### Administration de projets lourds

- Structure hiérarchique
- Traitement de milliers de scans
- Sauvegarde très efficace, ex. : Scan dans la mémoire principale = 400 MB; Scan comprimé sur le disque dur = 60 MB

### Navigation

- Affichage des points de vues de scans et passage à d'autres scans en cliquant
- Libre choix de position dans la visualisation 3D, Transit

### Analyse

- Mesure de distances
- Analyse de planéité

### Avantages

**Prise en main rapide :** Des menus clairs et fonctionnels favorisent une pratique intuitive. La fonction Drag-and-Drop facilite la réalisation de modèles.  
**Vérification facile de modèles :** L'importation de modèles CAO à travers VRML directement dans FARO Scene facilite la vérification des données planes sur des nuages de points réels.  
**Réduction du temps de planification :** La mesure avec FARO Scene dans des nuages de points détaillés réduit le temps pour une nouvelle prise de points de mesure sur place.

### Champs d'application

- Pour planifier en temps réel, pressez le bouton :**  
 Solutions pour mesures, brouillons, planification et maintenance dans les secteurs :
- Usine digitale / Réalité virtuelle
  - Architecture
  - Bâtiment et travaux publics
  - Planification d'usine/ technique d'automatisation
  - Archéologie et patrimoine • Autres

### Exigences du système

- Windows XP (Prof. ou Home Ed. SP1 ou plus haut), Win 2000 (SP2 ou plus haut) ou Win NT 4.0 (SP6)
- Au moins 1 GHz P II (2,5 GHz P 4 recommandé)
- 1GB RAM (2GB recommandé)
- Souris avec 2 boutons et roulette
- OpenGL carte graphique accélérée
- Licence Ethernet



**De la conception à la production, de la grande échelle au détail, de plus en plus de constructeurs choisissent FARO - la référence en système de mesure portable.**

FARO EUROPE ☎ 00800 3276 7253



USA: Orlando, Detroit, Los Angeles, Charlotte, Columbus, Chicago, Dallas, Seattle, Philadelphia  
 800.736.0234, 407.333.9911 • Fax: 407.333.4181

Europe: Germany, France, United Kingdom, Spain, Italy  
 Asia: China, Japan  
 E-mail: info@faro-europe.com • www.faro.com



© 2007 FARO EUROPE GmbH & Co. KG  
 - FR - 04REF201-158.PDF  
 Référence de l'annexe

The Measure of Success • La Medida del Éxito • La misura del successo • Das Maß des Erfolgs • La misura del successo

## Annexes 4 : Les risques liés au laser



- Les classes de laser :

L'évaluation des risques présentés par les appareils lasers, repose sur leur classification déterminée essentiellement en fonction de leur puissance et de leur longueur d'onde :

- o Les classes sont définies comme suit :

Classe 1	Lasers qui sont sans danger dans toutes les conditions d'utilisation raisonnablement prévisibles ( $180\text{nm} \leq \lambda \leq 10^6\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 100\text{s}$ ou $30000\text{s}$ ).
Classe 1M	Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instruments d'optiques, peut être dangereuse ( $302,5\text{nm} \leq \lambda \leq 4000\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 100\text{s}$ ou $30000\text{s}$ ).
Classe 2	Lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueur d'onde de $400\text{nm}$ à $700\text{nm}$ . La protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral ( $400\text{nm} \leq \lambda \leq 700\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 0,25\text{s}$ ).
Classe 2M	Lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueur d'onde de $400\text{nm}$ à $700\text{nm}$ , Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instruments d'optiques, peut être dangereuse ( $400\text{nm} \leq \lambda \leq 700\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 0,25\text{s}$ ).
Classe 3R	Lasers dont l'exposition directe dépasse l'EMP (exposition maximale permise) pour l'œil, mais dont le niveau d'émission est limité à 5 fois la LEA (limite d'émission accessible) des classes 1 et 2 ( $400\text{nm} \leq \lambda \leq 700\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 0,25\text{s}$ et $302,5\text{nm} \leq \lambda \leq 4000\text{nm}$ et $700\text{nm} \leq \lambda \leq 10^6\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 100\text{s}$ ).
Classe 3B	Lasers dont la vision directe du faisceau laser est toujours dangereuse. La vision de réflexions diffuses est normalement sans danger ( $400\text{nm} \leq \lambda \leq 10^6\text{nm}$ , $T_{\text{base}} = 100\text{s}$ ).
Classe 4	Lasers qui sont aussi capable de produire des réflexions diffuses dangereuses. Ils peuvent causer des dommages sur la peau et peuvent aussi constituer un danger d'incendie. Leur utilisation requière des précautions extrêmes.

- o Dangers suivant les classes de laser :

Risques Classes	Œil Vision directe du faisceau	Œil Vision directe du faisceau avec optique	Œil Vision source étendue	Peau	Incendie
1					
1M		++			
2	+	+			
2M	+	++			
3R	++	+++			
3B	+++	+++	++	++	
4	+++	+++	+++	+++	XXX

+: Danger potentiel si durée d'exposition  $t > 0,25s$

++ : Peut être dangereux

+++ : Dangereux

xxx : Danger d'incendie potentiel

- o Protections collectives :

Les salles dans lesquelles un laser est présent comporte un autocollant « risque laser » sur la porte : il faut dans être très prudent en rentrant dans ce type de salles.

De plus une autre signalisation doit être mise en place liée directement au fonctionnement du laser : une lumière rouge doit s'éclairer à l'extérieur de la salle.

- o Protections individuelles :

Des lunettes de protection doivent obligatoirement être portées et adaptées à la classe du laser.

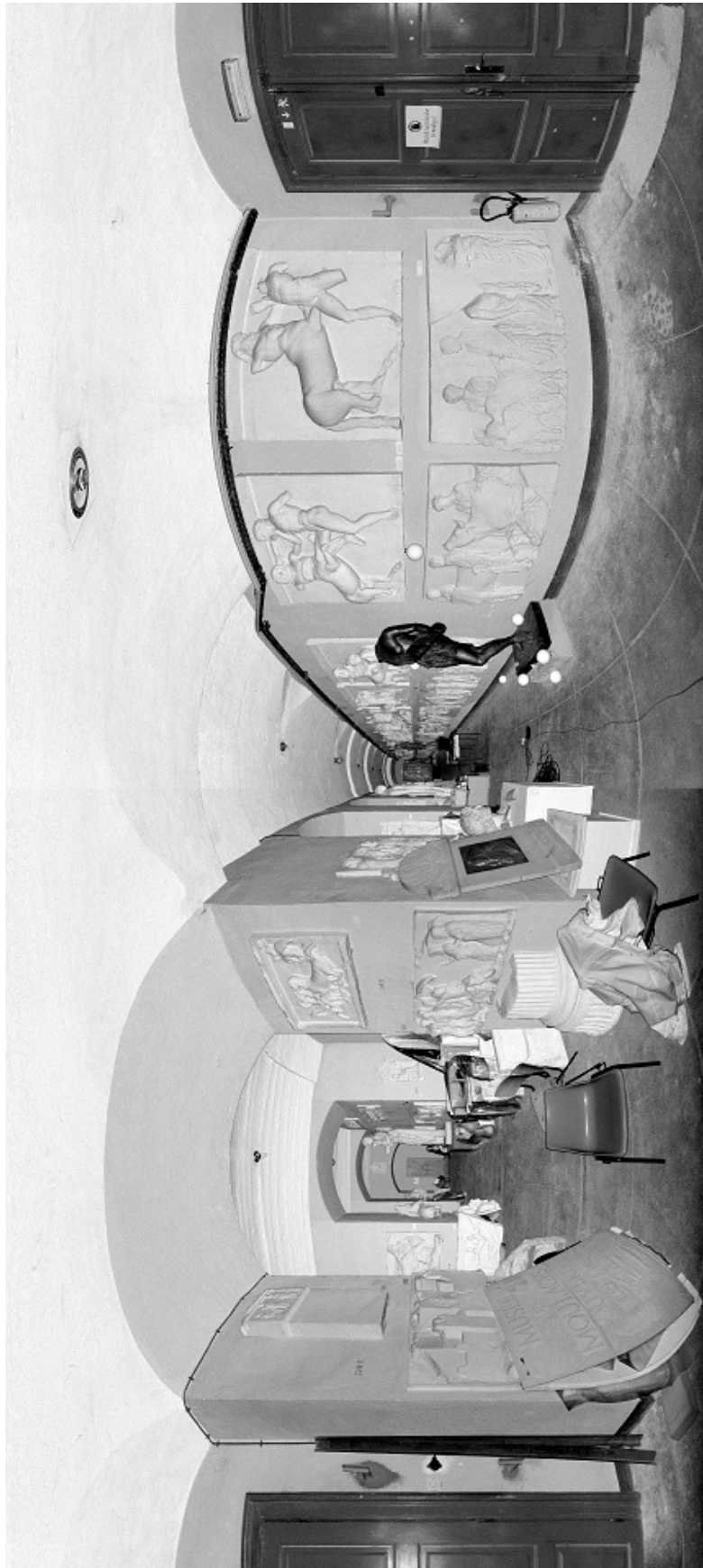
Il ne faut jamais regarder volontairement ou non le faisceau laser direct ou l'une de ses réflexions, même avec des lunettes adaptées.

Il ne faut jamais porter de lentille de contact car le rayonnement laser peut provoquer une combustion de la lentille aggravant les lésions cornéennes.

D'après : <http://www.phys.ens.fr/dpt/sg/hygienesecu/tvchgmt/RisqueLasers.pdf>



**Annexe 5 : Exemple d'une vue planaire avec le logiciel Faro Scene**



## Annexe 6 : Algorithme du « Marching Cube »

Avant de présenter l’algorithme du « Marching Cube », nous présenterons d’abord l’algorithme du « Marching Square » qui utilise la même approche en 2D.

### - Algorithme du « Marching Square »

L’algorithme du « Marching Square » a pour but de dessiner des lignes entre des valeurs interpolées les longs des côtés d’un carré. Un poids est affecté à chaque coin d’un carré. On considère aussi une valeur de référence. Nous pouvons considérer la grille suivante comme le montre la Figure 1 :

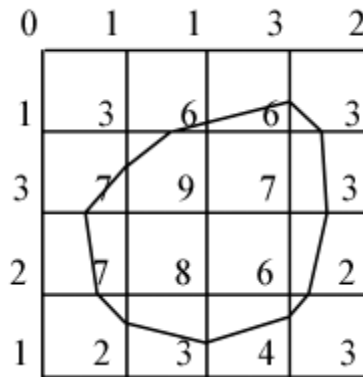


Figure 1 : Grille du « Marching Square »

Chaque point de cette grille est affecté d’un poids et d’une valeur de référence qui est connue : ici 5. Pour dessiner la courbe dont la valeur est constante et qui est égale à celle de référence, différentes sortes d’interpolations peuvent être utilisées. La plus répandue est l’interpolation linéaire. Pour dessiner cette courbe, différentes méthodes peuvent être réalisées. L’une d’elles consiste à prendre en compte chaque carré de la grille individuellement les uns des autres. C’est la méthode du « Marching Square ». Pour cette méthode 16 configurations ont été répertoriées, qui permettent la représentation de toutes les sortes de lignes en deux dimensions (cf. Figure 2).

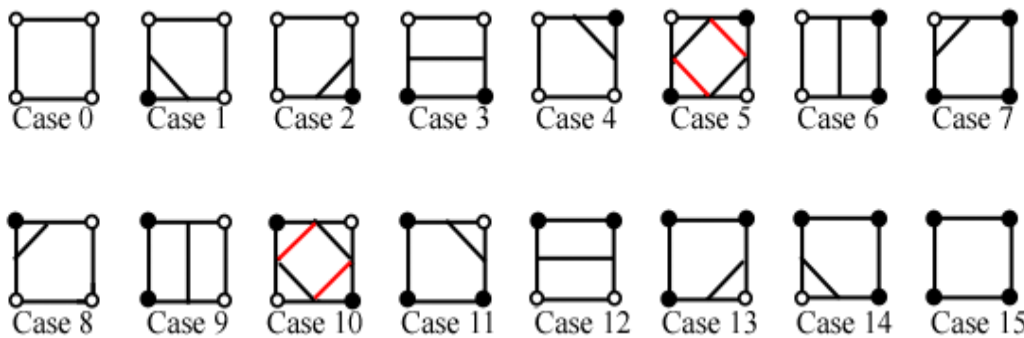


Figure 2 : Les 16 configurations possibles pour l’utilisation de l’algorithme du « Marching Square »

Le « Marching Square » présente quelques ambiguïtés. Nous pouvons le voir au niveau des carrés 5 et 10 comme l’illustre la Figure 2.

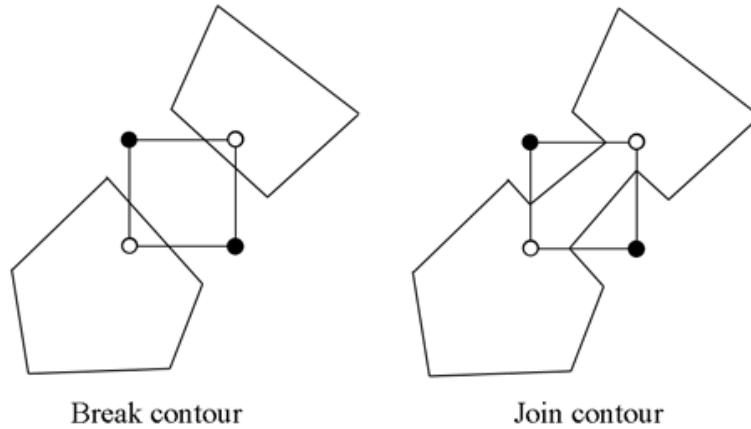


Figure 3 : Les ambiguïtés du « Marching Square »

Comme l'illustre la Figure 3, nous ne sommes pas en mesure de prendre une décision sur l'interpolation de ce genre de situation, c'est-à-dire si les contours sont disjoints ou joints. Cependant cette situation ne provoque pas de réelle erreur car les surfaces restent closes.

- L'algorithme du « Marching Cubes »

En suivant le principe du « Marching Square » nous pouvons adapter cette approche au cas de la 3D : c'est l'algorithme du « Marching Cubes ».

La méthode du « Marching Cubes » est un algorithme breveté par Cline, Lorensen et Crawford, qui génère un maillage à partir de données volumétriques. L'élément de base est le voxel, qui est une unité de discrétisation de l'espace.

Dans une première étape, l'algorithme exploite une fonction scalaire, qui assigne en tout point de l'espace, une isovaleur, nulle si le point est sur la surface de l'objet à modéliser, négative si le point est intérieur, positive s'il est extérieur : cette isovaleur est déterminée à partir du nuage de points 3D. Un voxel est caractérisé par ses huit sommets : une isovaleur sera donc associée à chaque sommet, nulle, négative ou positive en fonction de sa position vis-à-vis de la surface.

Dans une deuxième étape, chaque voxel sera analysé : si un ou plusieurs sommets ont des isovaleurs positives et négatives, alors ce voxel doit contribuer à la formation de la surface. En analysant les arêtes intersectées par l'isosurface, sachant quel sommet est à l'intérieur ou à l'extérieur, nous trouvons la combinaison de triangles assignée au voxel.

Après avoir connecté chaque combinaison de triangles, voxel par voxel, un maillage triangulaire est généré. Cet algorithme se fonde sur deux idées assez simples :

- la première est la classification des voxels en fonction de la répartition des isovaleurs sur ses sommets : la classe correspond directement à une répartition des triangles sur un voxel ;
- la deuxième est l'union entre voxels : du fait que les voxels adjacents partagent les sommets, la fusion des triangles générés pour chaque voxel va former une surface continue.

En théorie les configurations possibles des sommets d'un voxel sont au nombre de 256 (puisque un sommet ne peut avoir que deux étiquettes : - ou + ... le cas 0, donc du sommet exactement sur la surface, n'est pas considéré). Une configuration correspond à une classe de voxels, et donc à un découpage en triangles. Les deux configurations où tous les sommets sont à l'extérieur ou à l'intérieur du volume ne sont pas intéressantes, car ces voxels ne coupent pas la surface de l'objet. Pour toutes les autres 254 combinaisons, on doit savoir quelle arête du voxel a été intersectée afin de former un triangle ou un groupe de triangles. En tenant compte des symétries, les configurations se réduisent à 14 : elles sont représentées sur la Figure 4.

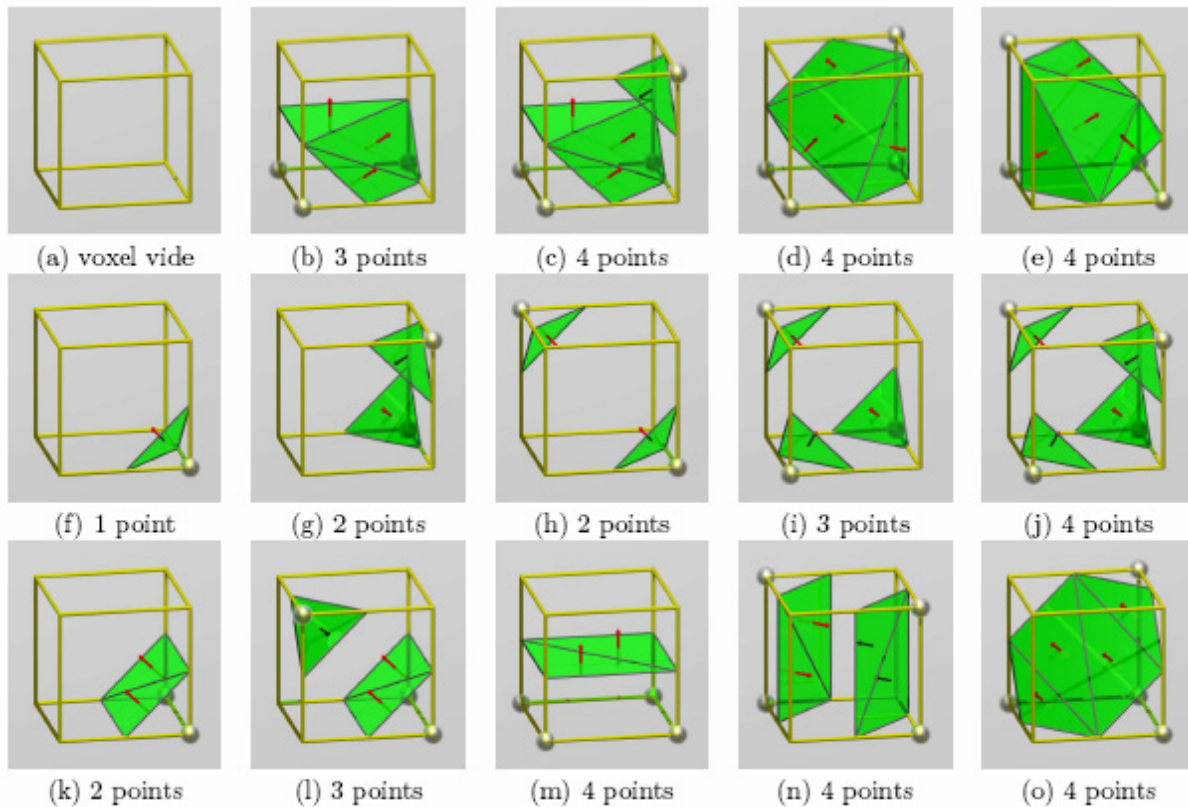


Figure 4 : Combinaisons de base des surfaces pour un voxel de l’algorithme des « Marching Cubes »

Plus exactement,

- si un seul sommet du voxel est négatif (point intérieur à l’objet) (figure (f)), un triangle avec une normale sortante est formée avec les intersections de la surface et de chaque arête qui part de ce sommet. Il y a 8 configurations possibles dans ce cas, une par position possible du sommet négatif.
- De manière duale si un seul sommet est positif, nous obtenons aussi un seul triangle avec la normale de signe inverse, les 7 autres sommets du voxel étant à l’intérieur du volume ; on a aussi 8 configurations possibles selon la position du sommet positif.
- Dans le cas de deux sommets qui sont négatifs, il existe trois configurations possibles et uniques (figures (g), (h) et (k)).
- Pour trois sommets négatifs, il existe aussi trois configurations uniques (figure (b), (i) et (l)).
- Et normalement pour quatre sommets nous en obtenons 7.

Chaque voxel qui a une configuration non triviale, donc qui coupe la surface, contribue au modèle de cette surface, avec de 1 à 4 triangles. Les sommets des triangles par interpolation le long des arêtes des voxels.

Avec ces contributions pour chaque voxel, la formation de la surface complète est obtenue par propagation en parcourant l’espace de voxel en voxel, deux voxels voisins partageant les arêtes créées sur leur face commune.

Cet algorithme est très utilisé afin de construire un maillage depuis un nuage de points ; il s’applique aussi à des données surfaciques. Il a les avantages et les inconvénients suivants :

- il est très performant, puisque un nuage de 20000 points 3D par exemple peut être maillé en 2 ou 3s.

- la résolution du maillage final est ajustable par la résolution de la discrétisation de l'espace. Plus les voxels sont petits, plus le maillage colle à la surface de l'objet.
- Un inconvénient qui peut s'avérer important selon l'application, est la possibilité d'avoir des trous dans le maillage final. En particulier, si la résolution en voxel est trop fine, des voxels « vides » peuvent s'intercaler entre les points de mesure. De tels problèmes peuvent se résoudre par une approche multi-résolution (en augmentant la taille des voxels connexes des trous), mais avec le risque de perdre la cohérence du maillage final.

Ce paragraphe a été écrit grâce à : <http://www.polytech.unice.fr/~lingrand/MarchingCubes/algo.html>, Specht [2005].



## Annexe 7 : Illustration du seuillage



*A gauche, nuage de points avec les « points-mixels » ; à droite, nuage de points sans les « points-mixels »*

Sur l'image de gauche nous voyons que le nuage de points de l'Amazone contient de nombreux points blancs (le fond d'écran est noir) qui correspondent aux « points-mixels ». Ces points ont des valeurs de  $R$ ,  $V$ ,  $B$  nulles. Nous pouvons les éliminer par seuillage des valeurs de  $RVB$ . L'image de droite montre le résultat du seuillage du nuage de points.

## Annexe 8 : Programme réalisé pour filtrer les données Faro

- o Code du programme principal « script\_faro\_wiener »

---

```
[FileName,PathName] = uigetfile({'*.asc'; '*.dat'; '*.txt'; '*.pts'; '*.neu'}, ...
    'le fichier ASCII comprenant votre nuage de points');
% permet d'ouvrir le fichier de points
fid = fopen([PathName,FileName]);
D= fscanf(fid, '%e %e %e %e %e %e', [6 inf]);
fclose(fid);
D=D';

statue_seuillee=seuillage(D); % seuillage des valeurs R,V,B nulles

X=statue_seuillee(:,3);
Y=statue_seuillee(:,4);
Z=statue_seuillee(:,5);

[THETA PHI R] = cart2sph(X,Y,Z); % conversion des coordonnées cartésiennes en
coordonnées sphériques

M=[statue_seuillee(:,1:2) THETA PHI R]; % génération du fichier à filtrer
[R R_filtered M_back] = matrix_conv_2(M); %construction de l'image, filtrage,
remplissage des trous

theta=M_back(:,1);
phi=M_back(:,2);
r=M_back(:,3);

[x y z]=sph2cart(theta,phi,r); %conversion des coordonnées sphériques en
coordonnées cartésiennes

C=[ x y z statue_seuillee(:,6:8)]; % génération du fichier de sortie et
récupération des RGB

dlmwrite('fichier_filtre_final.asc',C, ' '); %écriture du fichier final au
format ASCII
```

---

- o Code des fonctions associées créées

- statue\_seuillee=seuillage(D)

---

```
function [statue_seuillee]=seuillage (D);
statue_seuillee=[];
for k=1:length(D)
    if D(k,6)~=0%on élimine les points ayant un RGB=0
        statue_seuillee=[statue_seuillee; D(k,:)];
    end;
end;
```

---

- `[R R_filtered M_back] = matrix_conv_2(M)`

---

```
function [R R_filtered M_back] = matrix_conv_2(M)

%Transforme les données Faro avec les numéros de ligne et de colonne de la vue
planaire en une Range
row = 1;
col = 1;
threshold=1;
for i=1:length(M)
    if(i==1)
        %Insère la distance R du premier point dans la première ligne et la
première colonne de la Range
        R(row,col)=M(i,5); %création de la Range Image
        position(row,col)=i; %création de la matrice jumelle avec les numero
d'identifiant à la même position que la distance correspondante
        row=row+1;
    elseif(abs(M(i,1)-M(i-1,1))>threshold/2)
        %regarde l'information sur les numéros de lignes. Si cela change de
numéro de ligne, alors on insère la distance dans une colonne différente
        row=1;
        col=col+1;
        R(row,col)=M(i,5);%création de la Range Image
        position(row,col) = i;création de la matrice jumelle avec les numero
d'identifiant à la même position que la distance correspondante
        row=row+1;
    else

        R(row,col)=M(i,5);
        position(row,col)=i;
        row = row+1;
    end
end

R1=matrix_fill(R);
R_filt=wiener2(R1,[3 3]);%filtre adaptatif wiener
R_filtered=bord_valeur_brute(R1,R_filt,0.05);%élimination des effets de bords

[row col]=size(R_filtered);
t=1;
z=row*col;
p=[];
for i=1:z
    if(position(i)==0)
        %si dans la matrice position la valeur est nulle (donc pas de
distance), on conserve toutes les positons associées dans un vecteur p et les
lignes correpondantes dans le fichier seront effacées à la fin.
        M_back(i,:)=[position(i) position(i) R_filtered(i)];
        p(t)=i;
        t=t+1;
    else
        % création d'une matrice avec theta, phi, r'
        M_back(i,:)=[M(position(i),3) M(position(i),4) R_filtered(i)];
    end
end

M_back(p(:),:)=[];%efface toutes les lignes avec une position égale à 0
```

- `matrix_fill(R)`

---

```

function [A_res]=matrix_fill (R);
A12=~im2bw(R);%convertit l'image en binaire c'est-à-dire en valeurs 0 ou 1
% Les valeurs égales à 0 apparaissent en bleu
% Les valeurs égales à 1 apparaissent en rouge
% Ici on cherche à mettre en valeur les pixels manquants en leur affectant
% la valeur 1
%à cause du ~ les pixels manquants vont apparaître en rouge

A13=bwareaopen(A12,10);%enlève d'une image binaire tous les composants connectés
qui ont moins de 10 pixels, cette fonction produit une nouvelle image binaire
% le résultat est qu'il n'y a plus de "trous" dans l'image A12
aa=A12-A13;%créer une image binaire où les valeurs sont -1 ou 0. Les pixels que
l'on cherche à identifier apparaissent avec la valeur -1

figure(4),imshow(aa), title ('Identification des trous');
[i,j]=find(aa);% on recherche dans l'image aa les indices des lignes et des
colonnes des pixels que l'on veut à remplir

if i
    for il=1:size(i,1)
        if i(il)==1
            a1=i(il);
        else
            a1=i(il)-1;
        end
        if i(il)==size(R,1)
            a2=i(il);
        else
            a2=i(il)+1;
        end
        if j(il)==1
            b1=j(il);
        else
            b1=j(il)-1;
        end
        if j(il)==size(R,2)
            b2=j(il);
        else
            b2=j(il)+1;
        end
        [u,v,k]=find(R(a1:a2,b1:b2));
        R(i(il),j(il))=mean(k);
    end
end
end
A_res=R;

%figure(5),imagesc(A_res),title ('Image brute complétée');

```

---

- `bord_valeur_brute(A2,A_filtree,0.05)`
-

```
function [A_bord_brut]=bord_valeur_brute(R1,R_filt,treshold)
%{
  Le but de cette fonction est de comparer pixel par pixel l'image complete
  originale A2 avec l'image filtrée. Si la différence entre les deux pixels est
  plus grande que le seuil défini, la valeur filtrée fausse est remplacée par la
  valeur originale.
%}
[i,j]=size (A2);
A_bord_brut2=zeros(size(A2));
for k=1:i
  for t=1:j
    if A2(k,t)-A_filtree(k,t)>abs(treshold)% définition du seuil .05
      A_bord_brut2(k,t)=A2(k,t);% change la valeur par l'originale
    else
      A_bord_brut2(k,t)=A_filtree(k,t); % conserve la valeur filtrée
    end
  end
end
end
A_bord_brut=A_bord_brut2
```

---



## Annexe 9 : Programme réalisé pour filtrer les données Trimble

- o Code du programme principal « script\_trimble\_wiener »

```
[FileName,PathName] = uigetfile({'*.asc'; '*.dat'; '*.txt'; '*.pts'; '*.neu'},...
    'le fichier ASCII comprenant votre nuage de points') ;
% permet d'ouvrir le fichier de points
fid = fopen([PathName,FileName]);
D= fscanf(fid, '%e %e %e %e %e %e', [6 inf]);
fclose(fid);
D=D';

fichier_numerote=numerotation(D); )% création des identifiants des points(numéro
de ligne du fichier=numéro de point)

plot3(fichier_numerote(:,2),fichier_numerote(:,3),fichier_numerote(:,4),'.','Mar
kerSize',3)% nuage de point en 3D sous Matlab
[THETA,PHI,R] =
cart2sph(fichier_numerote(:,2),fichier_numerote(:,3),fichier_numerote(:,4)); %
conversion des coordonnées cartésiennes en coordonnées sphériques

fichier_spherique=[fichier_numerote(:,1),THETA,PHI,R,fichier_numerote(:,5),fichi
er_numerote(:,6),fichier_numerote(:,7)];

delta_phi=0.0002; %calcul du pas de variation de phi
delta_theta=0.0002; %calcul du pas de variation de thêta
phimax=max(fichier_spherique(:,3)); %recherche du phi max
phimin=min(fichier_spherique(:,3)); %recherche du phi min
nbre_ligne=ceil((phimax-phimin)/delta_phi); %calcul du nombre de lignes
thetamax=max(fichier_spherique(:,2)); %recherche du thêta max
thetamin=min(fichier_spherique(:,2)); %recherche du thêta min
nbre_colonne=ceil((thetamax-thetamin)/delta_theta); %calcul du nombre de
colonnes

% i indice des lignes de l'image
% j indice des colonnes de l'image
% l est l'indice des lignes du fichier de points

A=zeros(nbre_ligne,nbre_colonne);% matrice numérique de l'image avec les valeurs
de r
AA=zeros(nbre_ligne,nbre_colonne);% matrice jumelle de l'image avec les valeurs
d'identifiant

for l=1:length(fichier_spherique)
    theta_j=fichier_spherique(l,2); %variation de l'indice des colonnes
    phi_i=fichier_spherique(l,3); %variation de l'indice des lignes
    i=ceil((phi_i-phimin)/delta_phi); % affectation du numéro de ligne
    j=ceil(abs((theta_j-thetamin))/delta_theta);% affectation du numéro de colonne
    % Attention problème lorsque phi_i=phimin et theta_j=thetamin, l'indice
    % des lignes (resp. des colonnes) passe à 0 et donc impossibilité de
    % générer la matrice A(i,0)ou A(0,j)
    if i~=0
        if j~=0
            A(i,j)=fichier_spherique(l,4); %création de la matrice contenant la valeur R
pour (i,j)
```

```

AA(i,j)=fichier_spherique(1,1); %création de la matrice jumelle contenant la
valeur des identifiants pour (i,j)
    end
end
end

%figure(2), imagesc(A), title('Image brute');
%imagesc(A), title('Image brute'); % image brute r=f(phi,theta) dans la figure 2
%figure(3), imagesc(AA), title('Image identifiant');
%imagesc(AA), title('Image identifiant'); % image brute identifiant=f(phi,theta)
dans la figure 3

A2=matrix_fill(A); ); % recherche les trous de l'image et les complète

[AA_res]=matrix_fill_jumelle (AA,fichier_numerote); % recherche les trous de
l'image pour les identifiants et les complète

A_filtree=wiener2(A2,[3 3]); % filtrage « wiener »

A_finale=bord_valeur_brute(A2,A_filtree,0.05); % diminue les effets de bords

%colormap jet;
%figure(8), imagesc(A_finale), title ('Image filtrée');
%imagesc(A_filtree); % image filtrée r=f(phi,theta) dans la figure 4
%A_fin=reduction_effet_bord (A,A_filtree);

recup=recup_point (A_finale,AA_res,A); %permet d'associer les valeurs de R
filtrées et les identifiants correspondants

fichier_point=creer_nouveau_fichier(recup,fichier_spherique); %permet d'associer
au fichier précédent les anciennes valeurs de phi, thêta, R,V,B
theta2=fichier_point(:,1);
phi2=fichier_point(:,2);
R2=fichier_point(:,3);
[x,y,z]=sph2cart(theta2,phi2,R2); %conversion des coordonnées sphériques en
coordonnées cartésiennes
fichier_final=[x,y,z,[fichier_point(:,4)],[fichier_point(:,5)],[fichier_point(:,
6)]];

statue_sansx0y0z0=[];
for k=1:length(fichier_final)
    if fichier_final(k,1)~=0
        if fichier_final(k,2)~=0
            if fichier_final(k,3)~=0 %on élimine les points ayant un X=Y=Z=0
                statue_sansx0y0z0=[statue_sansx0y0z0; fichier_final(k,:)];
            end;
        end;
    end;
end;

dlmwrite('fichier_final_filtre.asc',statue_sansx0y0z0,' '); %écriture du fichier
final au format ASCII

```

o Code des fonctions associées créées

- numerotation (D)

---

```
function [identifiant]=numerotation(D);
identifiant=[];% liste vide des points numérotés
for h=1:length(statue_seuillée)% numérotation des points du fichier, création de l'identifiant
    identifiant=[identifiant;h, D(h,1), D(h,2), D(h,3),D(h,4),D(h,5), D(h,6)];
end
```

---

- matrix\_fill(A)

---

```
function [A_res]=matrix_fill (R);
A12=~im2bw(R);%convertit l'image en binaire c'est-à-dire en valeurs 0 ou 1
% Les valeurs égales à 0 apparaissent en bleu
% Les valeurs égales à 1 apparaissent en rouge
% Ici on cherche à mettre en valeur les pixels manquants en leur affectant
% la valeur 1
%à cause du ~ les pixels manquants vont apparaître en rouge

A13=bwareaopen(A12,10);%enlève d'une image binaire tous les composants connectés
qui ont moins de 10 pixels, cette fonction produit une nouvelle image binaire
% le résultat est qu'il n'y a plus de "trous" dans l'image A12
aa=A12-A13;%créer une image binaire où les valeurs sont -1 ou 0. Les pixels que
l'on cherche à identifier apparaissent avec la valeur -1

figure(4),imshow(aa), title ('Identification des trous');
[i,j]=find(aa);% on recherche dans l'image aa les indices des lignes et des
colonnes des pixels que l'on veut à remplir

if i
    for il=1:size(i,1)
        if i(il)==1
            a1=i(il);
        else
            a1=i(il)-1;
        end
        if i(il)==size(R,1)
            a2=i(il);
        else
            a2=i(il)+1;
        end
        if j(il)==1
            b1=j(il);
        else
            b1=j(il)-1;
        end
        if j(il)==size(R,2)
            b2=j(il);
        else
            b2=j(il)+1;
        end
        [u,v,k]=find(R(a1:a2,b1:b2));
        R(i(il),j(il))=mean(k);
    end
end
A_res=R;

%figure(5),imagesc(A_res),title ('Image brute complétée');
```

- `matrix_fill_jumelle (AA,fichier_numerote)`

---

```

function [AA_res]=matrix_fill_jumelle (AA,fichier_numerote);
A122=~im2bw(AA);%convertit l'image en binaire c'est-à-dire en valeurs 0 ou 1
% Les valeurs égales à 0 apparaissent en bleu
% Les valeurs égales à 1 apparaissent en rouge
% Ici on cherche à mettre en valeur les pixels manquants en leur affectant
% la valeur 1
%à cause du ~ les pixels manquants vont apparaître en rouge

A133=bwareaopen(A122,10);%enlève d'une image binaire tous les composants
connectés qui ont moins de 10 pixels, cette fonction produit une nouvelle image
binaire
% le résultat est qu'il n'y a plus de "trous" dans l'image A12
aaa=A122-A133;%créer une image binaire où les valeurs sont -1 ou 0. Les pixels
que l'on cherche à identifier apparaissent avec la valeur -1
figure(6),imshow(aaa),title('Recherche des identifiants manquants');
[i,j]=find(aaa);% on recherche dans l'image aa les indices des lignes et des
colonnes des pixels que l'on cherche à remplir

s=length(fichier_numerote);
r=s+1;
if i
    for il=1:size(i,1)
        if i(il)==1
            a1=i(il);
        else
            a1=i(il)-1;
        end
        if i(il)==size(AA,1)
            a2=i(il);
        else
            a2=i(il)+1;
        end
        if j(il)==1
            b1=j(il);
        else
            b1=j(il)-1;
        end
        if j(il)==size(AA,2)
            b2=j(il);
        else
            b2=j(il)+1;
        end
        [u,v,k]=find(AA(a1:a2,b1:b2));
        AA(i(il),j(il))=r;
        r=r+1;
    end
end
AA_res=AA;
figure(7),imagesc(AA_res),title('Image identifiant complétée');

```

---

- `bord_valeur_brute (A2,A_filtree,0.05)`

---

```

function [A_bord_brut]=bord_valeur_brute(A2,A_filtree,treshold)
%{
  Le but de cette fonction est de comparer pixel par pixel l'image complete
  originale A2 avec l'image filtrée. Si la différence entre les deux pixels est
  plus grande que le seuil défini, la valeur filtrée fausse est remplacée par la
  valeur originale.
%}
[i,j]=size (A2);
A_bord_brut2=zeros(size(A2));
for k=1:i
  for t=1:j
    if A2(k,t)-A_filtree(k,t)>abs(treshold)% définition du seuil .05
      A_bord_brut2(k,t)=A2(k,t);% change la valeur par l'originale
    else
      A_bord_brut2(k,t)=A_filtree(k,t);% conserve la valeur filtrée
    end
  end
end
end
A_bord_brut=A_bord_brut2

```

---

- recup\_point(A\_finale,AA\_res,A)

---

```

function [recuperation]=recup_point(A_finale,AA_res,A);
[g,k]=size (A);
recuperation=[];
for m=1:g
  for n=1:k
    rmn=A_finale(m,n);%variable pour récupérer les R filtrés
    %rmn=A_fin(m,n);%variable pour récupérer les r filtrés
    Nmnm=AA_res(m,n);% variable pour récupérer les numéro d'identifiant
    if Nmnm~=0 % il n'y a pas d'identifiants nuls, s'il y a un 0 pour cette
    valeur, c'est qu'il n'existe pas de point
      recuperation=[recuperation;Nmnm,rmn]; % liste de récupération des
    numéros d'identifiants et des R filtrés
    end
  end
end
end

```

---



- `creer_nouveau_fichier(recup, fichier_spherique)`

```
function [nouveau_point]=creer_nouveau_fichier(recup, fichier_spherique);
nouveau_point=[];
for o=1:length(recup)
    for p=1:length(fichier_spherique)
        if recup(o,1)==fichier_spherique(p,1)% association des bon phi et thêta
et des RGB avec les nouveaux R, via l'identifiant
nouveau_point=[nouveau_point;fichier_spherique(p,2), fichier_spherique(p,3), recup
(o,2)...
, fichier_spherique(p,5), fichier_spherique(p,6), fichier_spherique(p,7)];
        end
    end
end
```

### Annexe 10 : Influence des zéros présents dans la matrice à filtrer

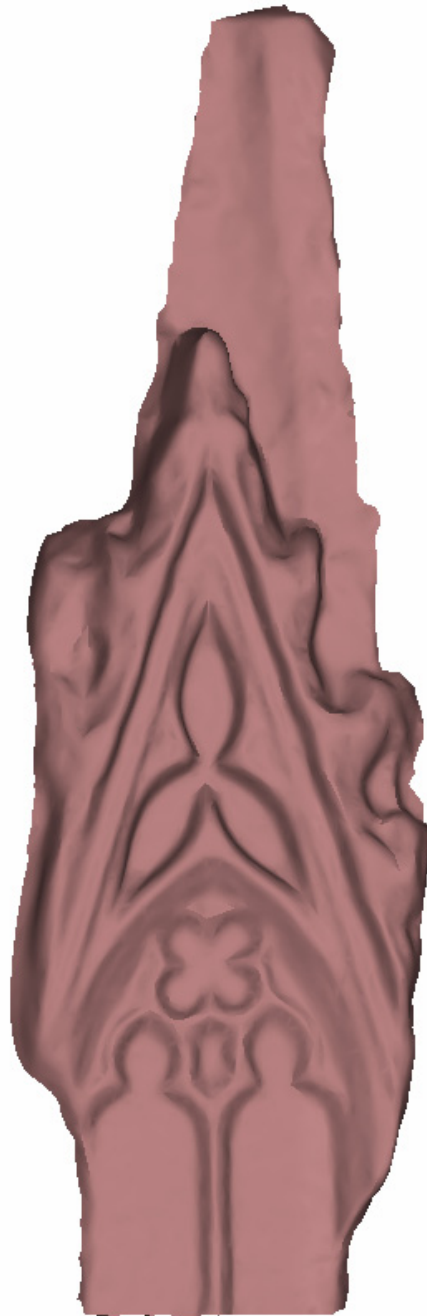
La phase de seuillage pour les données Faro et la méthode de construction de l'image pour les données Trimble peuvent générer des trous lors de la création des matrices à filtrer. Par conséquent, il convient de les localiser et de les compléter. Ces points manquants ont par défaut la valeur 0 au sein des matrices comportant l'information sur les distances radiales.

Ce phénomène a été identifié lors des premiers tests de filtrage avec le filtre « moyenne » comme nous le verrons au paragraphe suivant. Il s'avère qu'une fois le filtrage effectué, les nuages de points résultants présentaient un certain nombre de points formant des paquets distincts qui étaient décalés du nuage de points initial. Ainsi plusieurs « paquets » apparaissaient. Nous avons utilisé un filtre de convolution « moyenne » 3 x 3 sur une surface plane. Nous avons recherché des points manquants dans l'image brute. Nous avons remarqué que la matrice de convolution pouvait passer sur aucun, un ou plusieurs zéros en même temps. Nous avons mené une étude pour déterminer l'influence des zéros parsemés dans l'image à filtrer. Les valeurs des distances sont en mètres dans le tableau suivant :

Nombre de zéros dans l'image brute	Matrice image brute	Matrice image filtrée	Constat graphique																		
0	<table border="1"> <tr><td>7,4414</td><td>7,4398</td><td>7,4397</td></tr> <tr><td>7,4417</td><td>7,4439</td><td>7,4370</td></tr> <tr><td>7,4433</td><td>7,4381</td><td>7,4408</td></tr> </table>	7,4414	7,4398	7,4397	7,4417	7,4439	7,4370	7,4433	7,4381	7,4408	<table border="1"> <tr><td>7,4419</td><td>7,4407</td><td>7,4398</td></tr> <tr><td>7,4416</td><td>7,4406</td><td>7,4401</td></tr> <tr><td>7,4410</td><td>7,4396</td><td>7,4395</td></tr> </table>	7,4419	7,4407	7,4398	7,4416	7,4406	7,4401	7,4410	7,4396	7,4395	Plan correspondant au nuage brut
7,4414	7,4398	7,4397																			
7,4417	7,4439	7,4370																			
7,4433	7,4381	7,4408																			
7,4419	7,4407	7,4398																			
7,4416	7,4406	7,4401																			
7,4410	7,4396	7,4395																			
1	<table border="1"> <tr><td>7,4415</td><td>7,4428</td><td>7,4460</td></tr> <tr><td>7,4449</td><td>7,4438</td><td>7,4430</td></tr> <tr><td>7,4436</td><td>0</td><td>7,4437</td></tr> </table>	7,4415	7,4428	7,4460	7,4449	7,4438	7,4430	7,4436	0	7,4437	<table border="1"> <tr><td>7,4431</td><td>7,4432</td><td>7,4429</td></tr> <tr><td>6,6162</td><td>6,6166</td><td>6,6171</td></tr> <tr><td>6,6148</td><td>6,6155</td><td>6,6164</td></tr> </table>	7,4431	7,4432	7,4429	6,6162	6,6166	6,6171	6,6148	6,6155	6,6164	1 <sup>er</sup> plan décalé
7,4415	7,4428	7,4460																			
7,4449	7,4438	7,4430																			
7,4436	0	7,4437																			
7,4431	7,4432	7,4429																			
6,6162	6,6166	6,6171																			
6,6148	6,6155	6,6164																			
2	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>7,4677</td><td>0</td></tr> <tr><td>7,4651</td><td>7,4634</td><td>7,4583</td></tr> <tr><td>7,4621</td><td>7,4592</td><td>7,4560</td></tr> </table>	0	7,4677	0	7,4651	7,4634	7,4583	7,4621	7,4592	7,4560	<table border="1"> <tr><td>6,6360</td><td>5,8075</td><td>6,6332</td></tr> <tr><td>6,6340</td><td>5,8035</td><td>6,6328</td></tr> <tr><td>7,4636</td><td>7,4621</td><td>7,4617</td></tr> </table>	6,6360	5,8075	6,6332	6,6340	5,8035	6,6328	7,4636	7,4621	7,4617	2 <sup>em</sup> plan décalé
0	7,4677	0																			
7,4651	7,4634	7,4583																			
7,4621	7,4592	7,4560																			
6,6360	5,8075	6,6332																			
6,6340	5,8035	6,6328																			
7,4636	7,4621	7,4617																			
3	<table border="1"> <tr><td>7,4641</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>7,4705</td><td>7,4670</td><td>7,4634</td></tr> <tr><td>7,4693</td><td>0</td><td>7,4673</td></tr> </table>	7,4641	0	0	7,4705	7,4670	7,4634	7,4693	0	7,4673	<table border="1"> <tr><td>3,3186</td><td>3,3183</td><td>2,4885</td></tr> <tr><td>4,9779</td><td>4,9780</td><td>4,1475</td></tr> <tr><td>6,6382</td><td>6,6377</td><td>6,6375</td></tr> </table>	3,3186	3,3183	2,4885	4,9779	4,9780	4,1475	6,6382	6,6377	6,6375	3 <sup>em</sup> plan décalé
7,4641	0	0																			
7,4705	7,4670	7,4634																			
7,4693	0	7,4673																			
3,3186	3,3183	2,4885																			
4,9779	4,9780	4,1475																			
6,6382	6,6377	6,6375																			
4	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>7,4670</td><td>7,4634</td><td>7,4659</td></tr> <tr><td>0</td><td>7,4673</td><td>7,4639</td></tr> </table>	0	0	0	7,4670	7,4634	7,4659	0	7,4673	7,4639	<table border="1"> <tr><td>3,3183</td><td>2,4885</td><td>3,3179</td></tr> <tr><td>4,9780</td><td>4,1475</td><td>5,8069</td></tr> <tr><td>6,6377</td><td>6,6375</td><td>7,4667</td></tr> </table>	3,3183	2,4885	3,3179	4,9780	4,1475	5,8069	6,6377	6,6375	7,4667	4 <sup>em</sup> plan décalé
0	0	0																			
7,4670	7,4634	7,4659																			
0	7,4673	7,4639																			
3,3183	2,4885	3,3179																			
4,9780	4,1475	5,8069																			
6,6377	6,6375	7,4667																			

Nous nous rendons compte qu'à l'issue du filtrage, le nuage de points est éclaté en neuf plans. Nous nous apercevons que le nombre de 0 présents dans l'échantillon sur lequel passe la matrice de convolution influe directement le nombre de plans qui sera généré.

## ***Annexe 11 : Modélisation d'un pinacle des Œuvres Notre-Dame de Strasbourg***



Pour modéliser ce pinacle nous avons filtré les nuages de points avec un filtre « Wiener ».

## Annexe 12 : Etude sur les filtres passe-bas

Le logiciel Matlab propose plusieurs filtres passe-bas. Nous avons essayé leurs performances à partir de la simulation d'un plan. Nous avons défini un plan mathématique parfait auquel nous avons rajouté un bruit gaussien simple. Nous avons essayé les filtres suivants : filtre « moyenne », filtre « convolution 2D », filtre « disque », filtre « gaussien », filtre « Laplacien », filtre « Motion », filtre « Unsharp », filtre « Median », filtre « Wiener ». Nous avons créé une fonction « Gain » qui calcule le rapport signal sur bruit entre l'image filtrée et l'image bruitée. Nous avons répété cette opération sur un plan bruité ayant subi une déformation sinusoïdale de période et d'amplitude constantes, et sur un plan ayant subi une déformation sinusoïdale de période et d'amplitude variables. L'explication du fonctionnement des filtres « moyenne », « médian » et « Wiener » figure dans le mémoire aux paragraphes 3.5.3.5.2., 3.5.3.5.3. et 3.5.3.5.4. Nous allons expliquer le fonctionnement des autres différents filtres :

- Filtre « disque » : c'est un filtre « moyenne » circulaire qui s'applique à l'intérieur d'une matrice carrée dont le côté vaut  $2 \cdot \text{rayon} + 1$
- Filtre « gaussien » : ce filtre fonctionne en entrant deux paramètres. Il faut spécifier la taille de la fenêtre d'application et l'écart-type (positif) que l'on souhaite. C'est un filtre gaussien passe-bas.
- Filtre « Laplacien » : ce filtre donne une fenêtre de taille  $3 \times 3$  approximant les formes d'un opérateur Laplacien en deux dimensions.
- Filtre « Motion » : pour ce filtre, nous devons spécifier le nombre de pixels sur lequel le filtre s'applique et une valeur d'angle dans le sens horaire. En réalité ce filtre s'applique pour contrer les effets de mouvements dont peuvent souffrir les images issues d'une caméra.
- Filtre « unsharp » : il permet d'améliorer les contrastes d'une image.

Nous créons un plan mathématique parfait, auquel nous ajoutons un bruit connu et nous créons une fonction « gain »

```

delta_phi = (.2*2*pi/360);
delta_theta = (.2*2*pi/360);
x_o = 2;

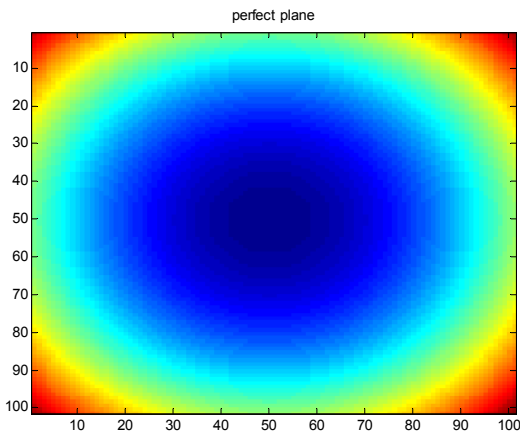
for k=1:101
    phi = (-10*2*pi/360) + k* delta_phi;
    for l=1:101
        theta = (-10*2*pi/360) + l* delta_theta;
        y = x_o*tan(theta);
        z = x_o*tan(phi)*cos(theta);

        d = sqrt((x_o)^2+(y)^2+(z)^2);
        R(k,l)=d;
    end
end
R = R./max(max(R));

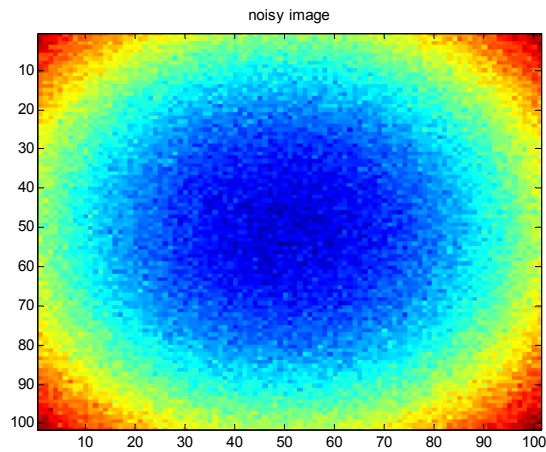
R_noisy = imnoise(R, 'gaussian', 0, .000001);

```

Plan parfait



Plan bruité

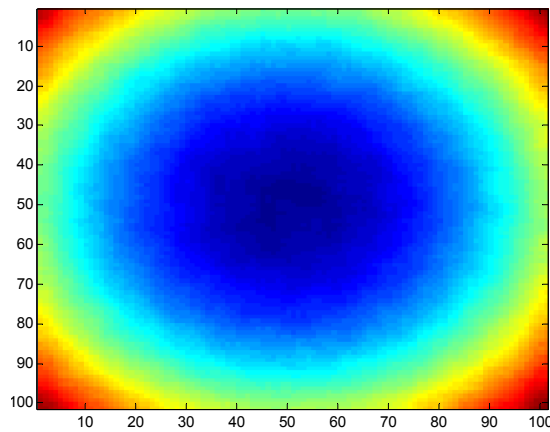
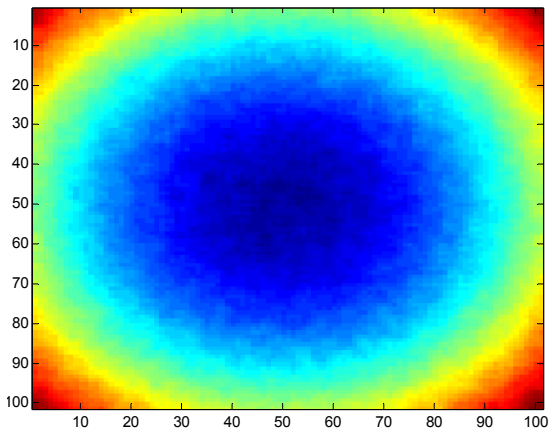


```
h=ones(3,3)/9;
R_filtered2=imfilter(R_noisy,h2,'replicate')
```

```
h=ones(5,5)/25;
R_filtered2=imfilter(R_noisy,h2,'replicate')
```

ave 3x3

ave 5x5



Gain = 3.0320

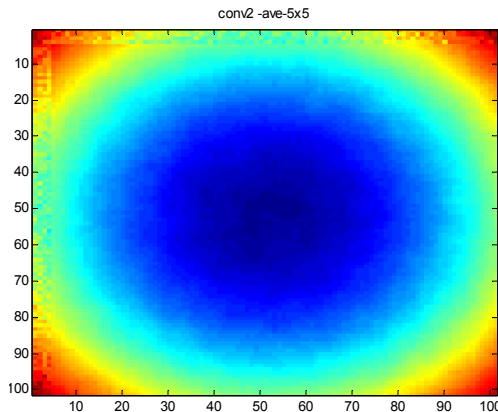
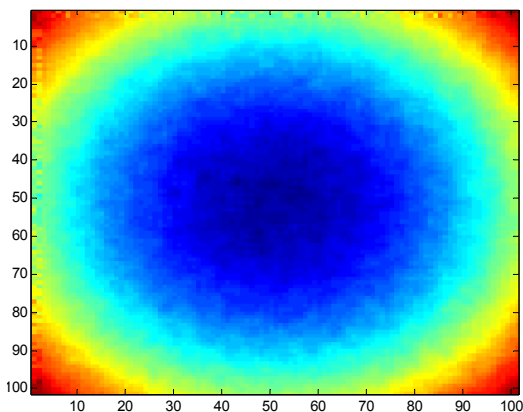
Gain = 4.6981

```
h=ones(3,3)/9;
R_filt3 = conv2(R_noisy,h);
R_filtered3=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt3,.2)
```

```
h=ones(5,5)/25;
R_filt4 = conv2(R_noisy,h2);
R_filtered4=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt4,.19);
```

conv2 -ave-3x3

conv2 -ave-5x5



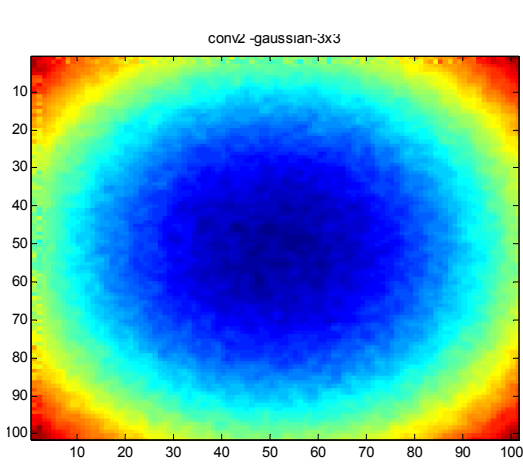
Gain = 1.6790

Gain = 1.0389

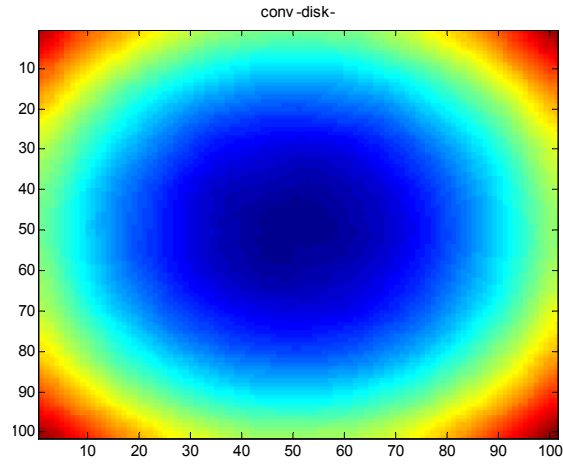
```
h3=(1/16)* [1 2 1;2 4 2;1 2 1];
R_filt5 = conv2(R_noisy,h3);
R_filtered5=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt5,.2)
```

```
h4=fspecial('disk');
R_filtered6=imfilter(R_noisy,h4,'conv','replicate')
```





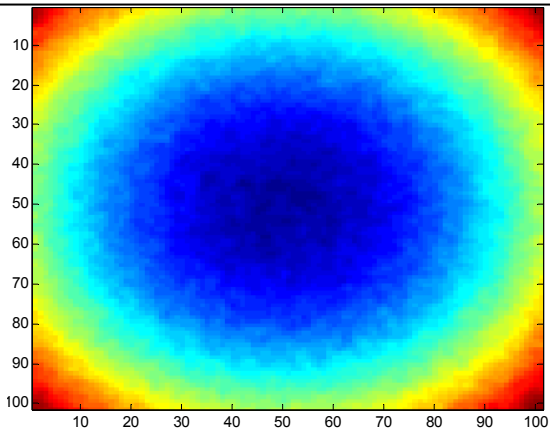
Gain = 1.6184



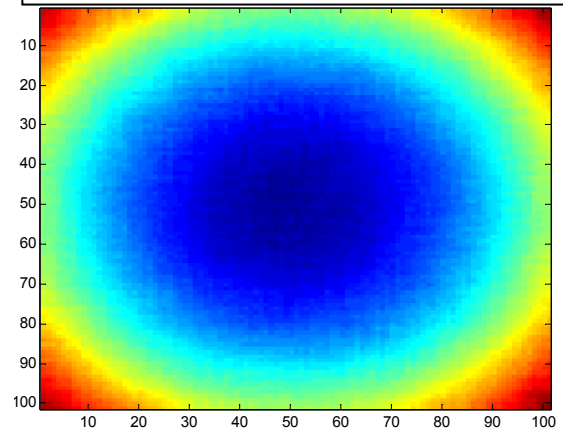
Gain = 5.2024

```
h5=fspecial('gaussian',[3 3],1);
R_filtered7=imfilter(R_noisy,h5,'conv','replicate')
```

```
h6=fspecial('log',[5 5],.5);
R_filtered8=imfilter(R_noisy,h6,'replicate');
```



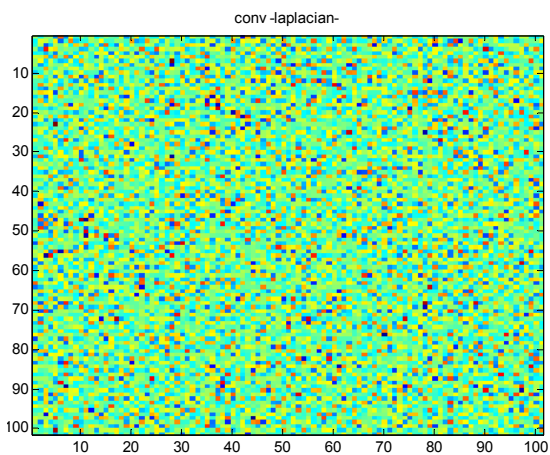
Gain = 2.8550



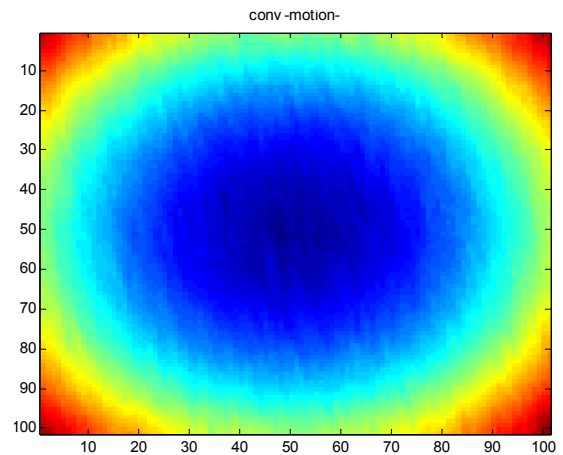
Gain = 0.0010

```
h7=fspecial('laplacian',.2);
R_filtered9=imfilter(R_noisy,h7,'conv','replicate')
```

```
h8=fspecial('motion',9,0);
R_filtered10=imfilter(R_noisy,h8,'conv','replicate');
```



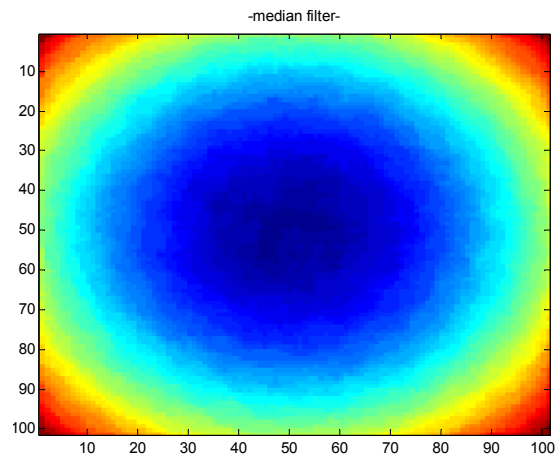
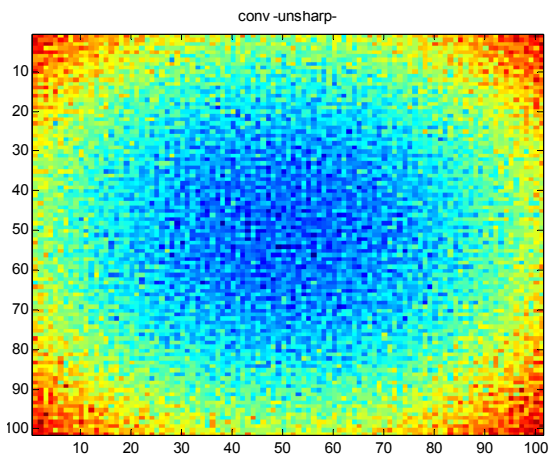
Gain = 0.0010



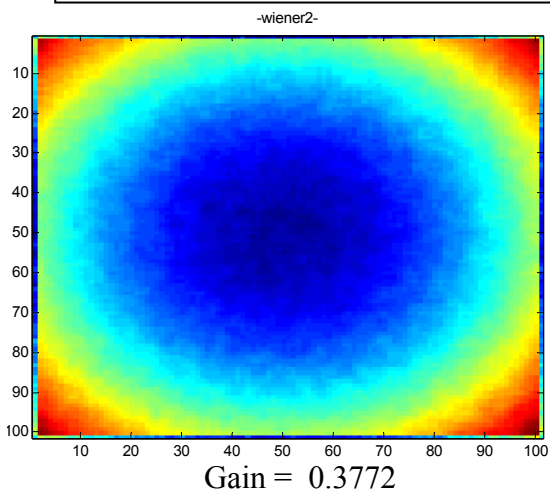
Gain = 3.3562

```
h9=fspecial('unsharp',1);
R_filtered11=imfilter(R_noisy,h9,'conv','replicate');
```

```
R_filtered12=medfilt2(R_noisy,[5 5],'indexed');
```



```
R_filtered13=wiener2(R_noisy,[3 3]);
```



On utilise le même plan et on lui appliqué une déformation sinusoïdale constante :

```
delta_phi = (.2*2*pi/360);
delta_theta = (.2*2*pi/360);
x_o = 2;

for k=1:101
    phi = (-10*2*pi/360) + k* delta_phi;
    for l=1:101
        theta = (-10*2*pi/360) + l* delta_theta;
        y_o=x_o*tan(theta);
        x= x_o + x_m*sin(2*pi*f_o*y_o);
        y = x*tan(theta);
        z = x*tan(phi)*cos(theta);

        d = sqrt((x)^2+(y)^2+(z)^2);
        R(k,l)=d;
    end
end

R = R./max(max(R));
R_noisy = imnoise(R,'gaussian',0,.000001);
```

Image  
perfect image

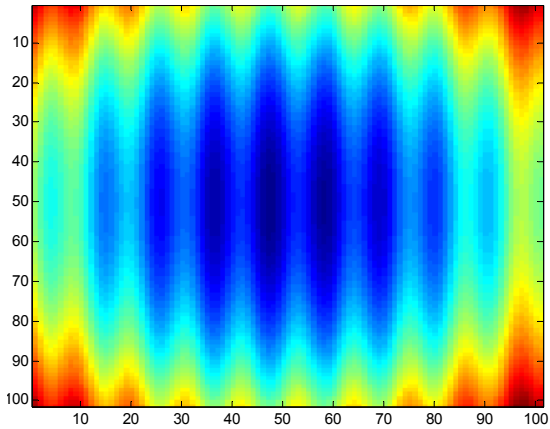
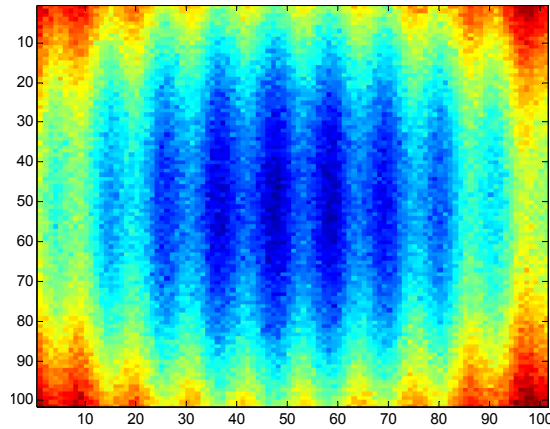
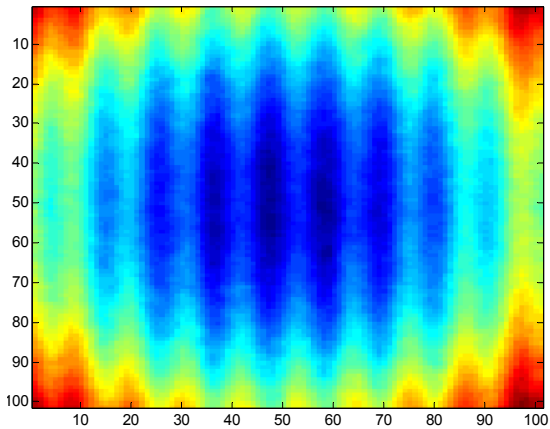


Image bruitée  
noisy image



```
h=ones(3,3)/9;
R_filtered2=imfilter(R_noisy,h2,'replicate')
```

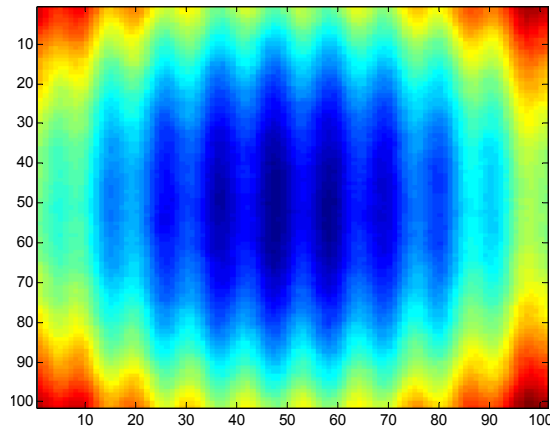
ave 3x3



Gain = 2.5709

```
h=ones(5,5)/25;
R_filtered2=imfilter(R_noisy,h2,'replicate')
```

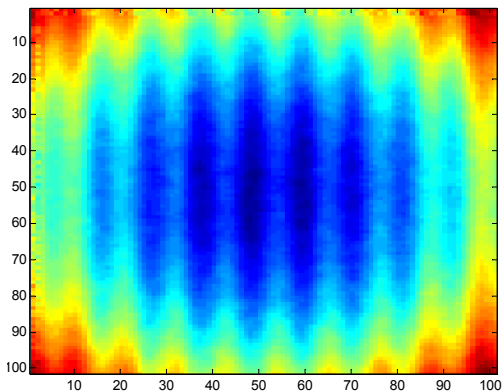
ave 5x5



Gain = 1.7970

```
h=ones(3,3)/9;
R_filt3 = conv2(R_noisy,h);
R_filtered3=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt3,.2)
```

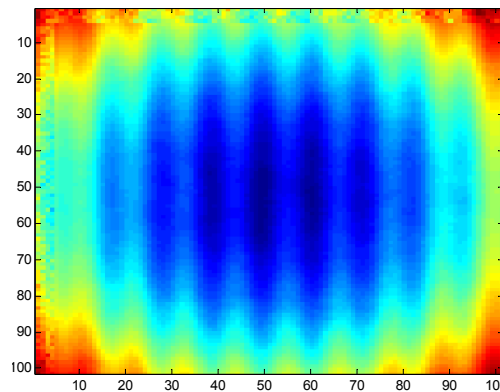
conv2 -ave-3x3



Gain = 0.8986

```
h=ones(5,5)/25;
R_filt4 = conv2(R_noisy,h2);
R_filtered4=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt4,.19);
```

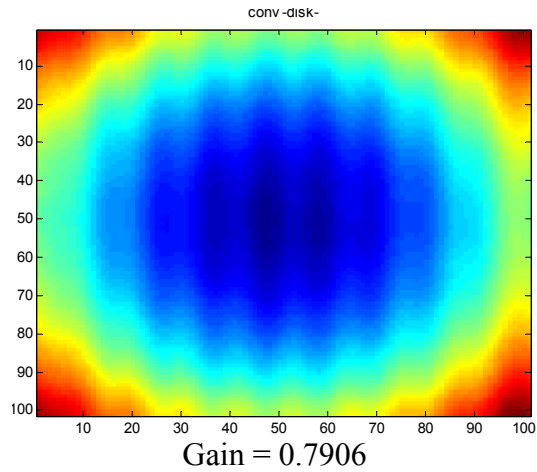
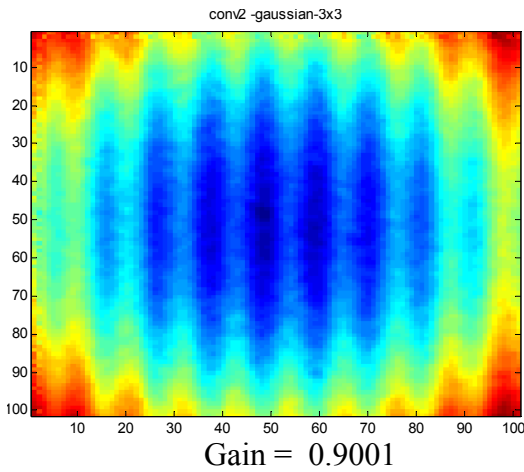
conv2 -ave-5x5



Gain = 0.5384

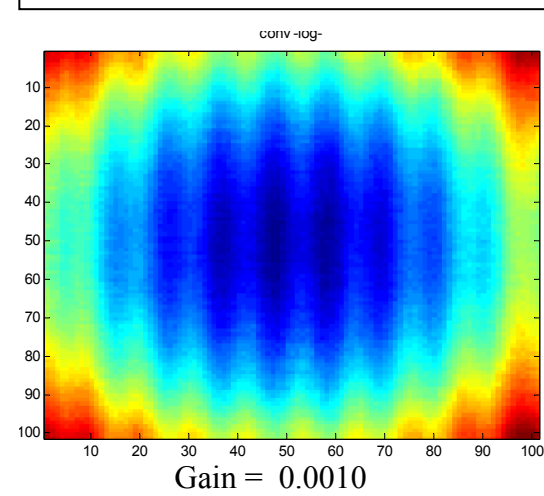
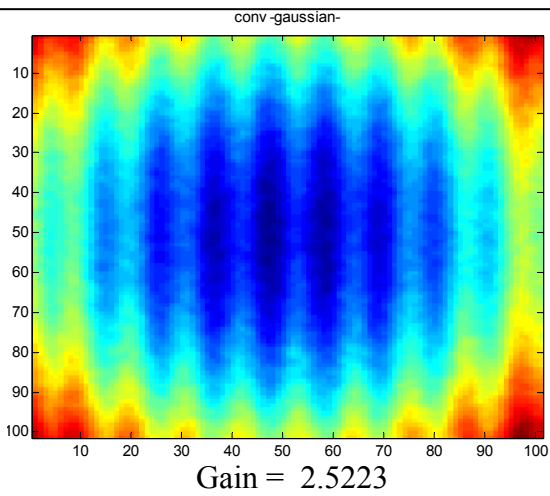
```
h3=(1/16)* [1 2 1;2 4 2;1 2 1];
R_filt5 = conv2(R_noisy,h3);
R_filtered5=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt5,.2)
```

```
h4=fspecial('disk');
R_filtered6=imfilter(R_noisy,h4,'conv','replicate')
```



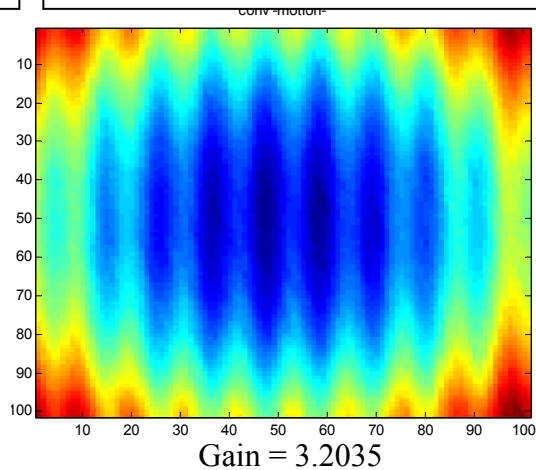
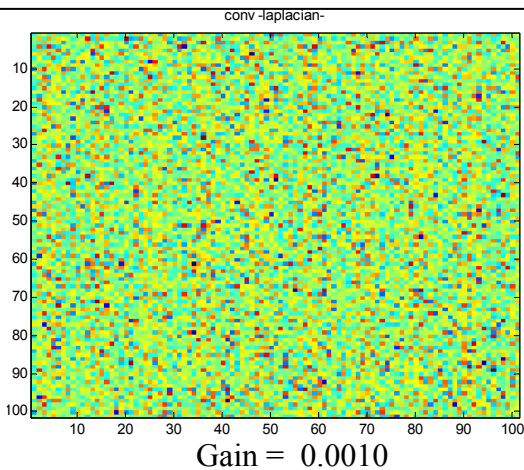
```
h5=fspecial('gaussian',[3 3],1);
R_filtered7=imfilter(R_noisy,h5,'conv','replicate')
```

```
h6=fspecial('log',[5 5], 100000000);
R_filtered8=imfilter(R_noisy,h6,'replicate');
```



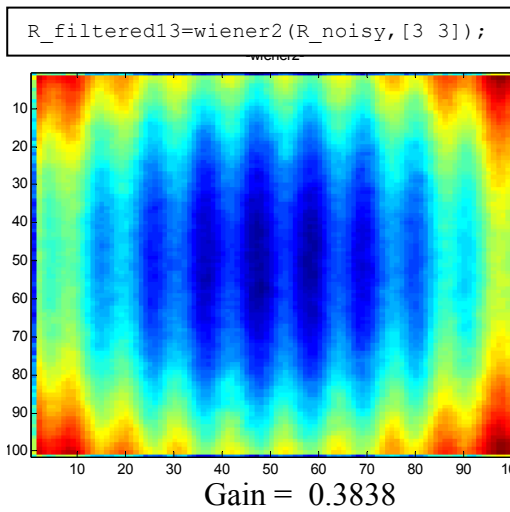
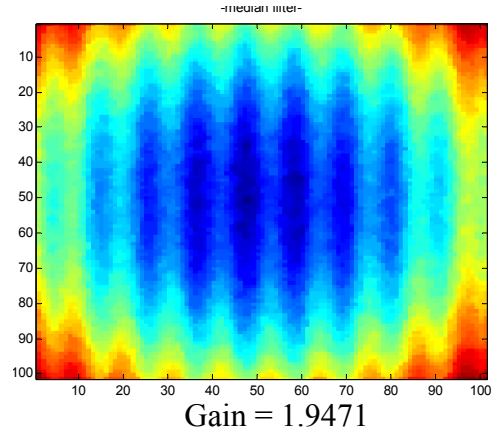
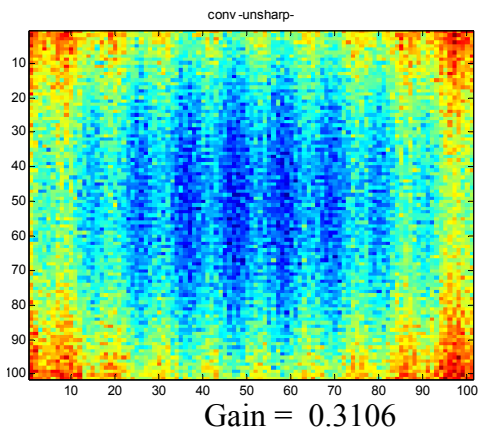
```
h7=fspecial('laplacian',.2);
R_filtered9=imfilter(R_noisy,h7,'conv','replicate')
```

```
h8=fspecial('motion',9,100);
R_filtered10=imfilter(R_noisy,h8,'conv','replicate');
```



```
h9=fspecial('unsharp',1);
R_filtered11=imfilter(R_noisy,h9,'conv','replicate');
```

```
R_filtered12=medfilt2(R_noisy,[5 5],'indexed');
```

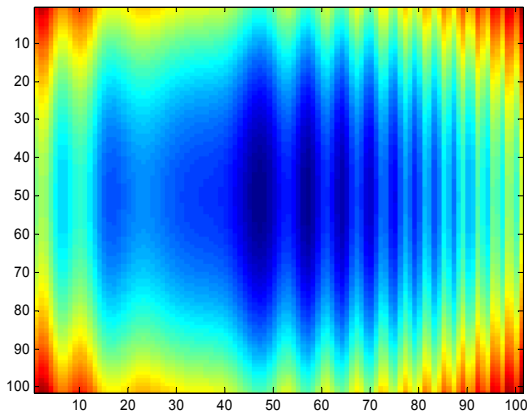


On utilise le même plan sur lequel on appliqué des déformations sinusoidales variables en fréquence.

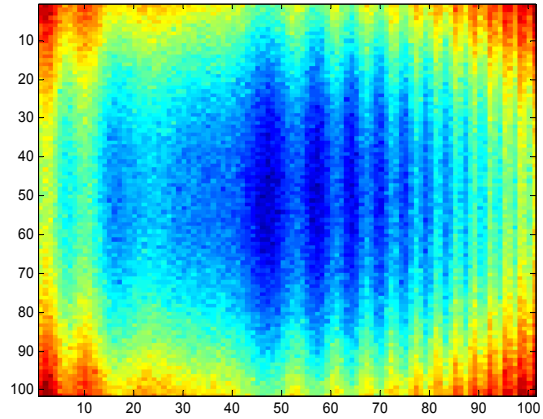
```
x_o = 2;
f_o=13;
x_m = .005;
f_m = 50;
for k=1:101
    phi = (-10*2*pi/360) + k* delta_phi;
    for l=1:101
        theta = (-10*2*pi/360) + l* delta_theta;
        y_o=x_o*tan(theta);
        f=f_o+f_m*y_o;
        x= x_o + x_m*sin(2*pi*f*y_o);
        y = x*tan(theta);
        z = x*tan(phi)*cos(theta);

        d = sqrt((x)^2+(y)^2+(z)^2);
        R(k,l)=d;
    end
end
R = R./max(max(R));
R_noisy = imnoise(R,'gaussian',0,.000001);
```

**Image**  
perfect image

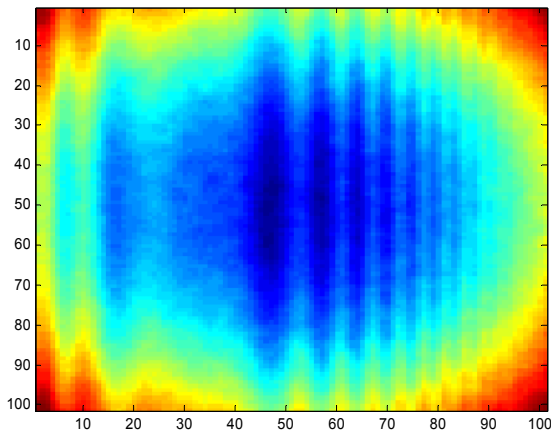


**Noisy Image**  
noisy image



```
h=ones(3,3)/9;
R_filtered2=imfilter(R_noisy,h2,'replicate')
```

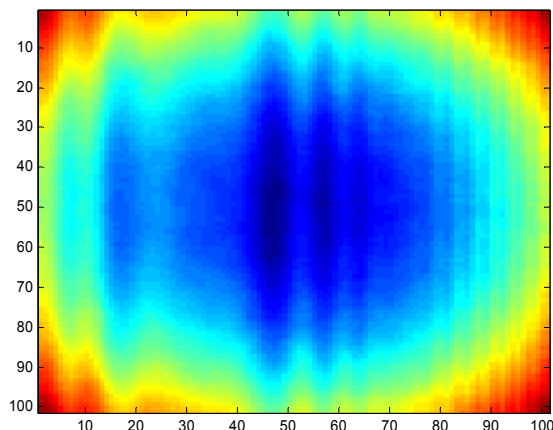
ave 3x3



Gain = 1.1616

```
h=ones(5,5)/25;
R_filtered2=imfilter(R_noisy,h2,'replicate')
```

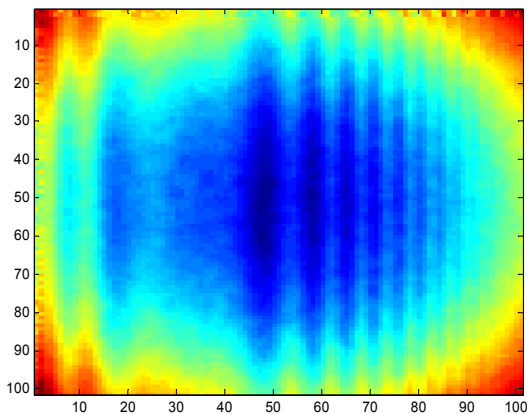
ave 5x5



Gain = 0.7571

```
h=ones(3,3)/9;
R_filt3 = conv2(R_noisy,h);
R_filtered3=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt3,.2)
```

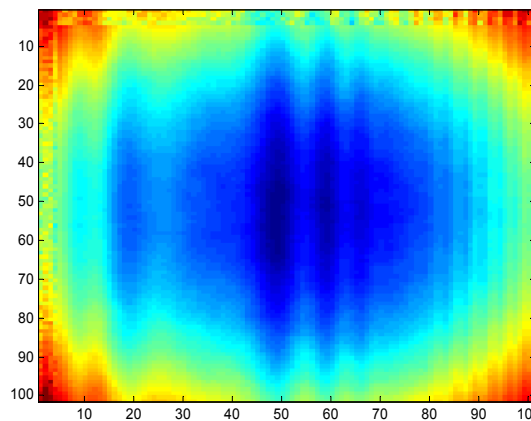
conv2 -ave-3x3



Gain = 0.7068

```
h=ones(5,5)/25;
R_filt4 = conv2(R_noisy,h2);
R_filtered4=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt4,.19);
```

conv2 -ave-5x5

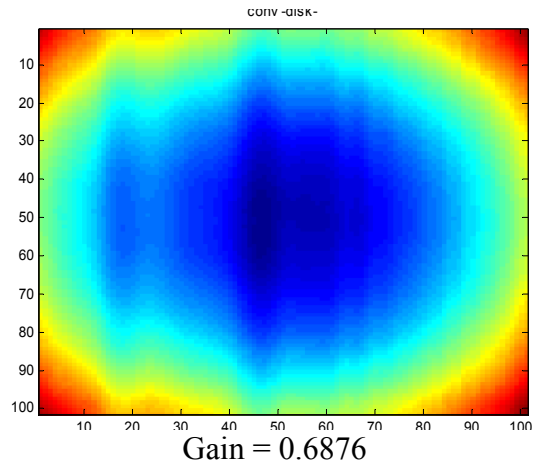
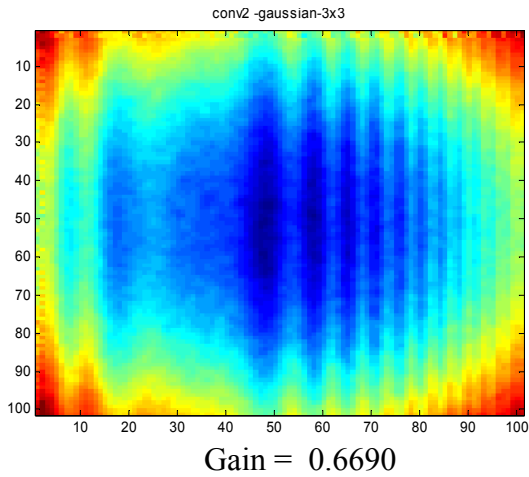


Gain = 0.5670

```
h3=(1/16)* [1 2 1;2 4 2;1 2 1];
R_filt5 = conv2(R_noisy,h3);
R_filtered5=bord_valeur_brute(R_noisy,R_filt5,.2)
```

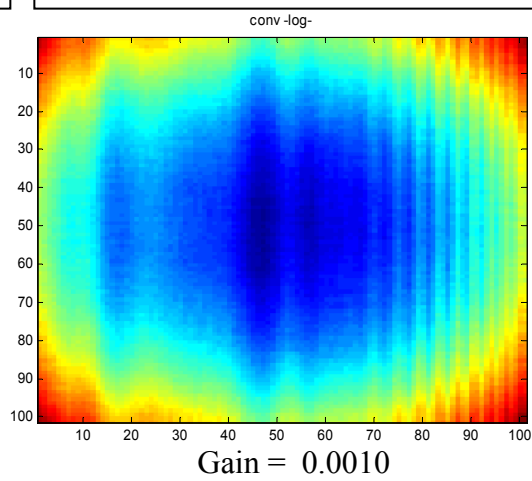
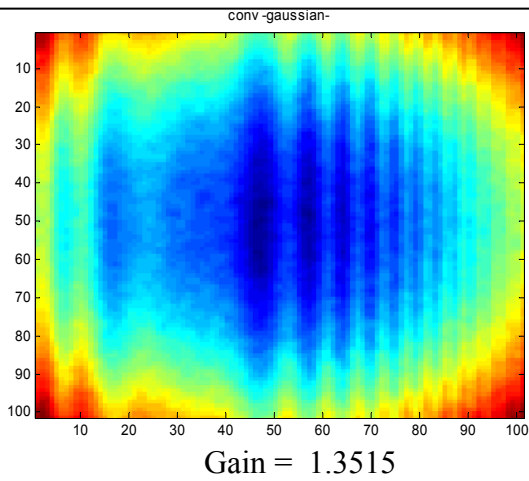
```
h4=fspecial('disk');
R_filtered6=imfilter(R_noisy,h4,'conv','replicate')
```





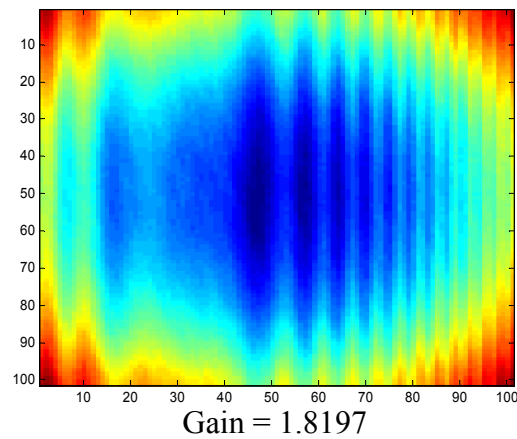
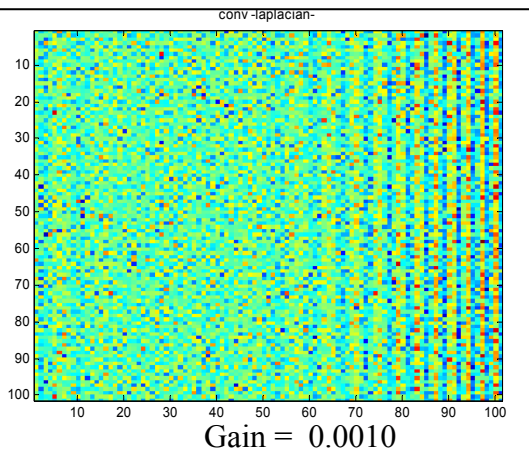
```
h5=fspecial('gaussian',[3 3],1);
R_filtered7=imfilter(R_noisy,h5,'conv','replicate')
```

```
h6=fspecial('log',[5 5], 100000000);
R_filtered8=imfilter(R_noisy,h6,'replicate');
```



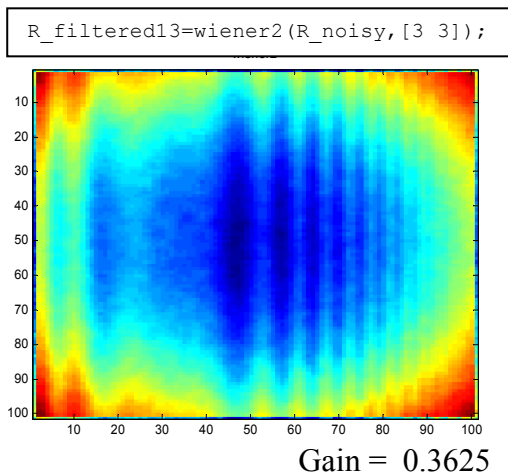
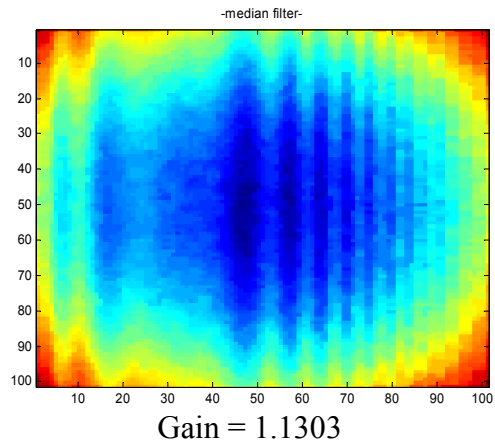
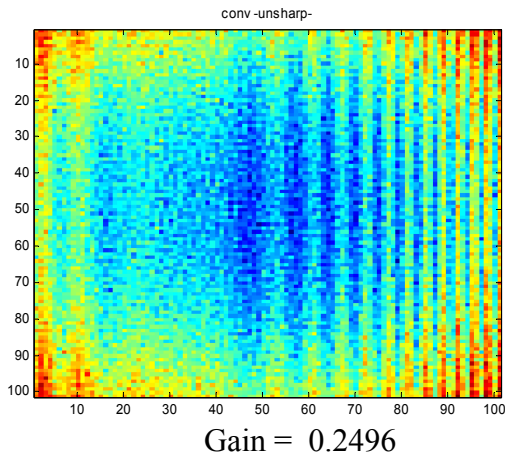
```
h7=fspecial('laplacian',.2);
R_filtered9=imfilter(R_noisy,h7,'conv','replicate')
```

```
h8=fspecial('motion',9,100);
R_filtered10=imfilter(R_noisy,h8,'conv','replicate');
```



```
h9=fspecial('unsharp',1);
R_filtered11=imfilter(R_noisy,h9,'conv','replicate');
```

```
R_filtered12=medfilt2(R_noisy,[5 5],'indexed');
```



Résumé : Réduction du bruit Gain			
	Plan Basique	Différentes fréquences	Fréquences variables
Ave 3x3	3.0320	2.5709	1.1616
Ave 5x5	4.6981	1.7970	.7571
Conv2 3x3	1.6790	.8986	.7068
Conv2 5x5	1.0389	.5384	.5670
Conv2 Gaussian	1.6184	.9001	.6690
Disk	5.2024	.7906	.6876
Gaussian	2.8550	2.5223	1.3515
Log	.0010	.0010	.0010
Laplacian	.0010	.0010	.0010
Motion	3.3562	3.2035	1.8197
Unsharp	.3142	.3106	.2496
Median2	3.2149	1.9471	1.1303
Wiener	.3772	.3838	.3625

Nous avons numérisé un plan avec le scanner Faro. On cherche à déterminer la réduction du bruit que l'on obtient en appliquant divers filtres. Pour cela on calcule le plan moyen et on détermine les écarts à ce plan.

```
function [R virtual_R] = matrix_conv(M)

%M = [1 1 21;2 1 23; 3 1 13;1 2 18; 2 2 28; 3 2 31; 4 2 46; 1 3 19;2 3 28; 3 3 38]
% Trasforms the data into a range image. It takes in a matrix
% consisting of [theta phi range] and it converts it to a range
% image with a new column everytime phi varies according to a threshold
% and a new row with the changes in theta.

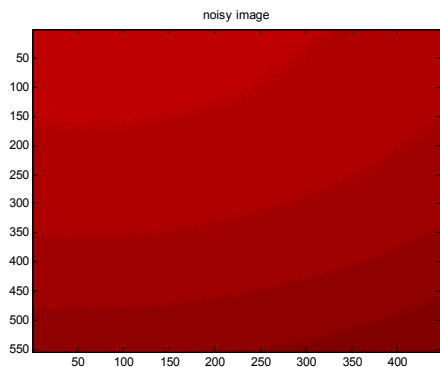
k = (M(2,2)-M(1,2));
j=1; %accounts for the "row column" to place the range
l=1; %accounts for the "row number" to place the range
res = .0006; %threshold resolution
for i=1:length(M)
    if (i==length(M)) %if it's the last number, place it in the last row of the same
column
        R(l,j)=M(i,3);

        elseif abs(k) <(res/2); %if the difference is below the threshold place it in the
same column
            R(l,j) = M(i,3);
            % V_theta(i)=M(i,1);
            % V_phi(i)=M(i,2);
            l=l+1;
            k = M(i,2)-M(i+1,2);

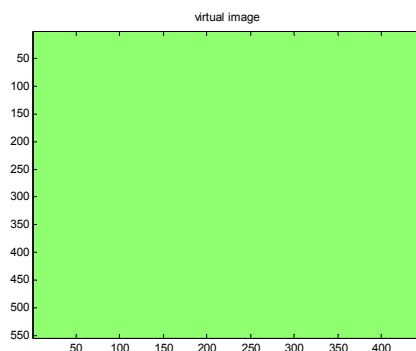
        else %if the difference is not less than the threshold than switch to the next
column
            k = M(i,2);
            l=1;
            j=j+1;
            R(l,j)=M(i,3);
            % V_theta(i)=M(i,1);
            % V_phi(i)=M(i,2);
            l=l+1;
            k = M(i,2)-M(i+1,2);
        end
end
figure, imagesc(R), title('noisy image');
[row col]=size(R);
mean_R = mean(mean(R));
virtual_R=[mean_R * ones(row, col)];

figure(2), imagesc(virtual_R), title('virtual image');
```

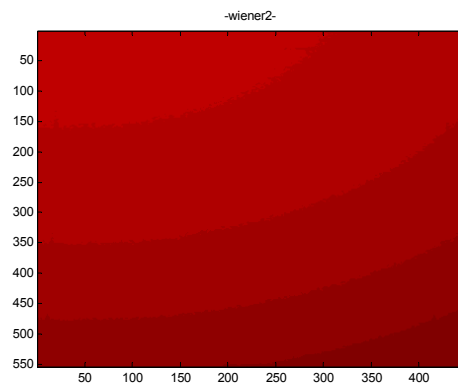
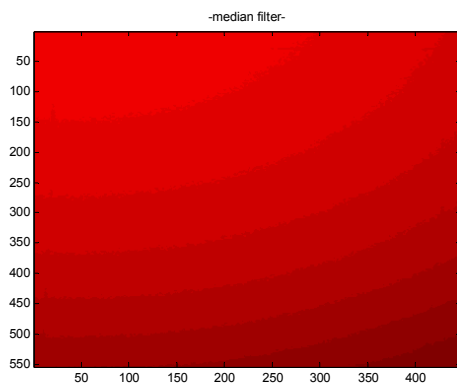
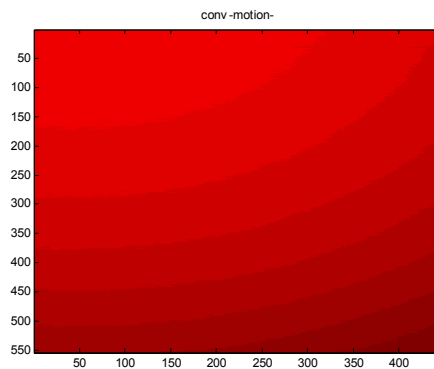
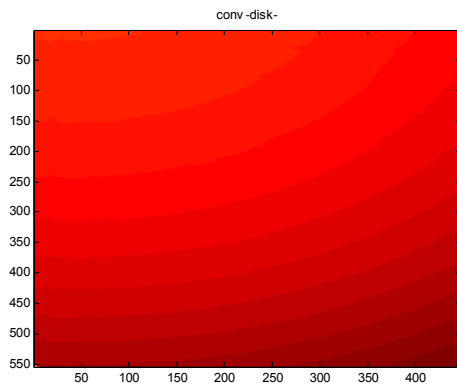
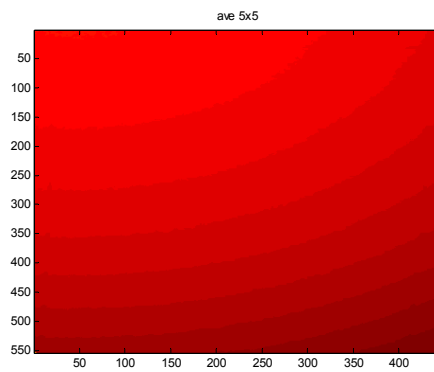
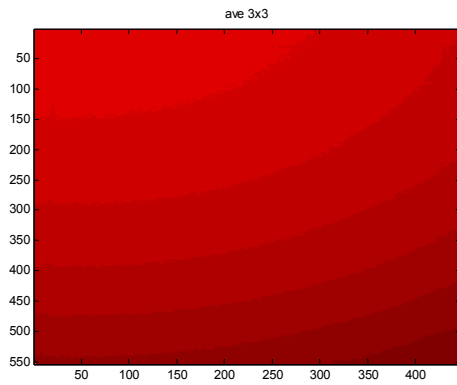
Image bruitée



Plan Moyen



Images filtrées



Résumé : Réduction du bruit			
	Gain	Moyenne (R <sub>filtered</sub> - R)	Écart-type (R <sub>filtered</sub> - R)
moyenne 3x3	1.0181	-5.8593e-016	0.0035
moyenne 5x5	1.0217	-7.4605e-006	0.0026
Disk	1.0222	-3.0528e-005	0.0023
Motion	1.0118	-2.4102e-005	0.0041
Median2	1.0190	-6.6177e-006	0.0037
Wiener	1.0206	5.7451e-006	0.0033

## Annexe 13 : Utilisation de l'outil « Recalage à base de cibles » dans RealWorks

Pour utiliser cet outil il est nécessaire de n'avoir qu'un seul projet dans lequel on pourra trouver les différents scans.

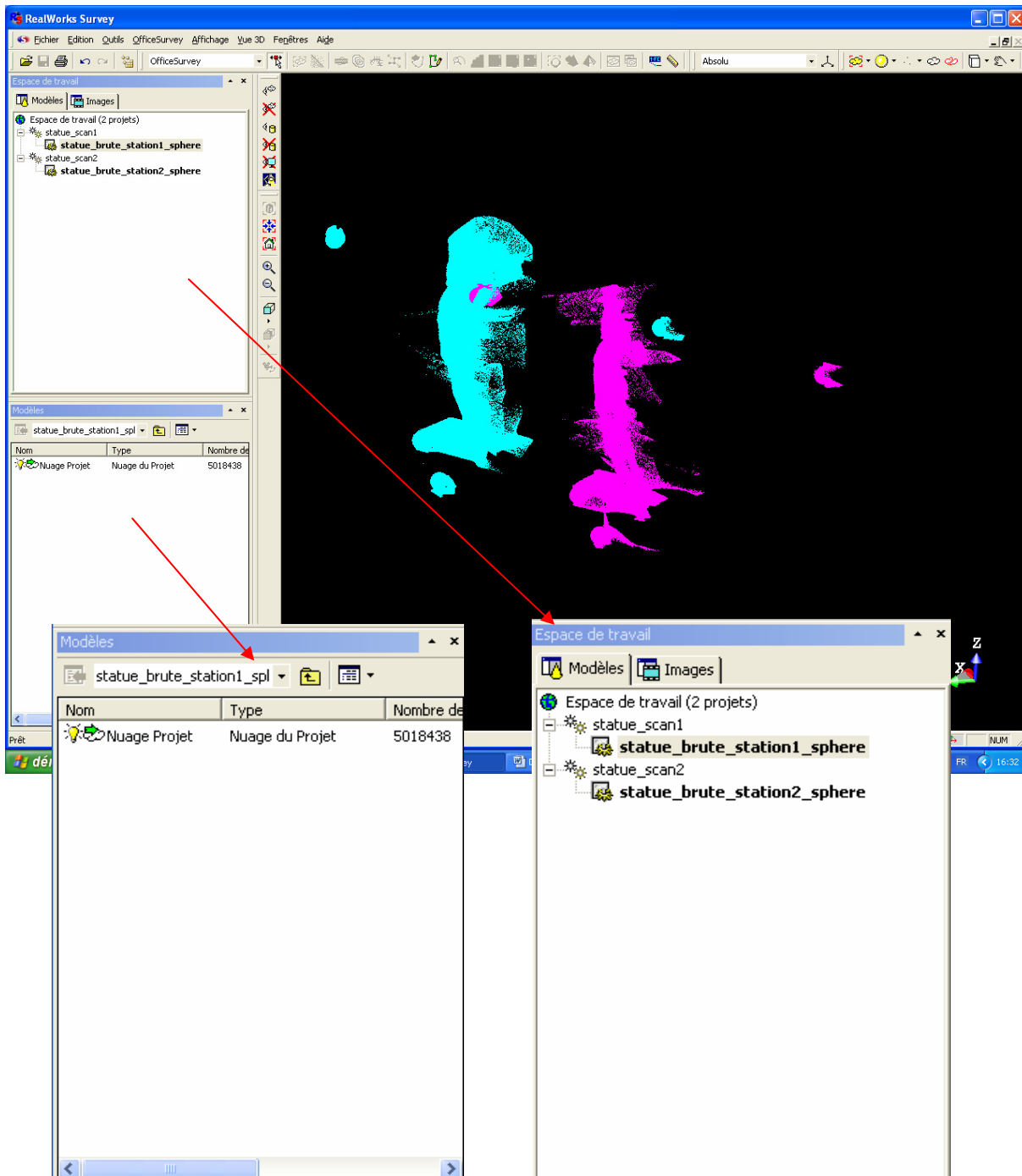
Si ce n'est pas le cas il faut appliquer la procédure ci-dessous.

### 1) Fusionner les projets

Il peut arriver que l'on soit en présence d'un projet par scan pour un même objet.

Dans ce cas il faut ouvrir tous les projets dans une même fenêtre RealWorks :

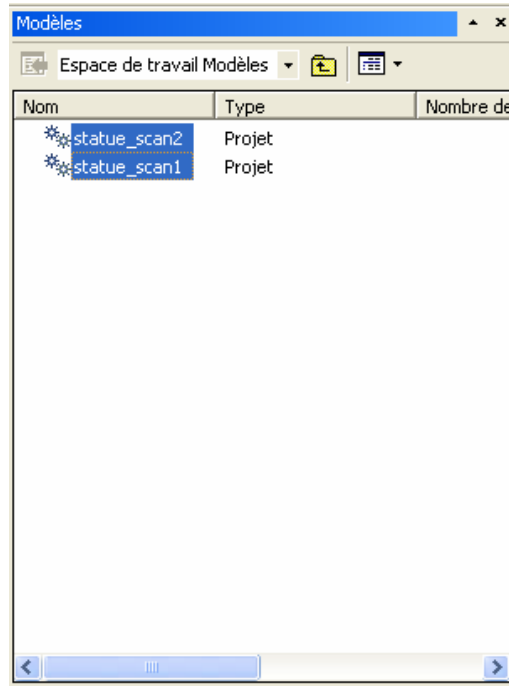
*Fichier-> Ouvrir*, et sélectionner les projets à fusionner.



Dans cet exemple on cherche à fusionner deux projets. Dans la fenêtre « Espace de travail » les noms des deux projets s'affichent. A partir de cette fenêtre nous pouvons sélectionner le projet sur lequel nous voulons travailler et afficher le nuage de points à partir de la fenêtre « Modèles ».

Dans la fenêtre « Espace de travail », sélectionner *Espace de travail* qui devient surligné en bleu. Le nom de chaque projet s'affiche alors dans la fenêtre « Modèles ».

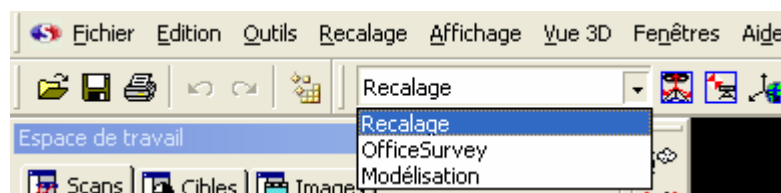
Dans la fenêtre « Modèles » sélectionner tous les projets à fusionner (à l'aide de la touche Ctrl pour permettre plusieurs sélections).



Puis aller dans la barre de menu et sélectionner : *Fichier -> Avancé -> Fusionner les projets*. Dans la fenêtre « Espace de travail » le nouveau projet s'appelle alors « Fusion ». Un dossier est créé dans cette même fenêtre qui permet d'accéder aux fichiers sources de la fusion.

## 2) Recalage à base de cibles

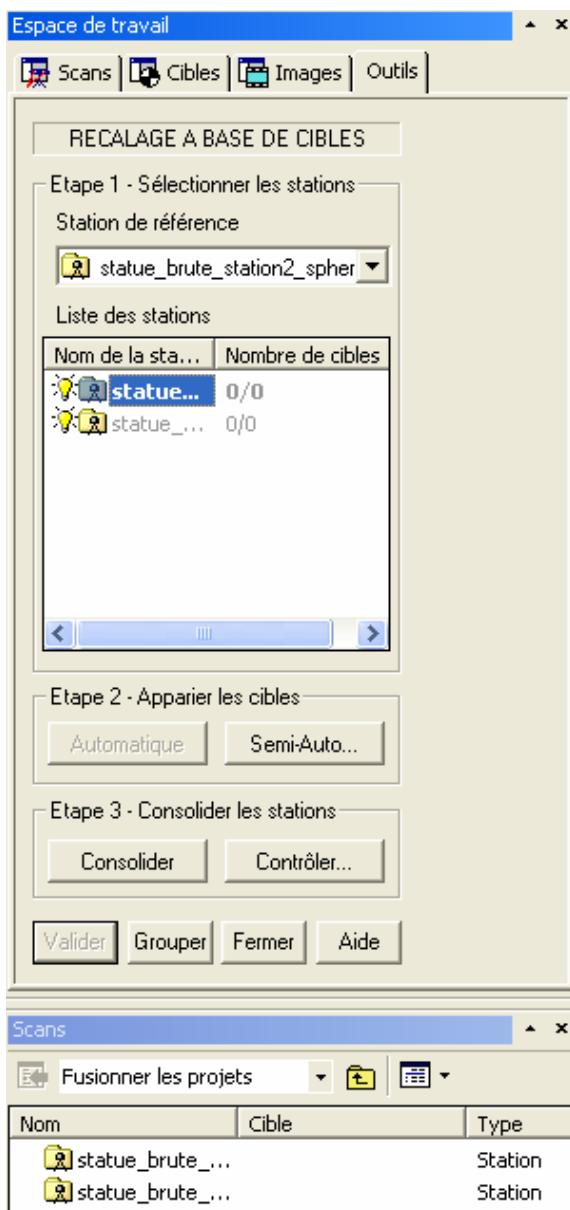
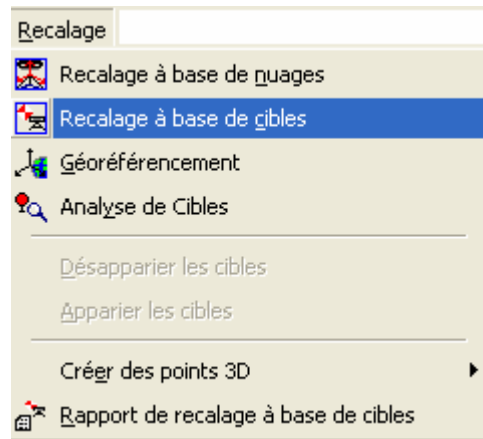
Pour procéder à cette étape il faut passer en mode « Recalage ».



Dans la fenêtre « Espace de travail », sélectionner *Fusionner les projets* qui devient en surbrillance bleue.

Puis dans la barre de menu, sélectionner *Recalage -> Recalage à base de cibles*.





La fenêtre « Espace de travail » se décompose donc en trois étapes.

La première étape consiste à la sélection des stations.

La deuxième étape est « Appariier les cibles ».

La troisième étape est « Consolider les stations »

a) *Etape 1: Sélectionner les stations*

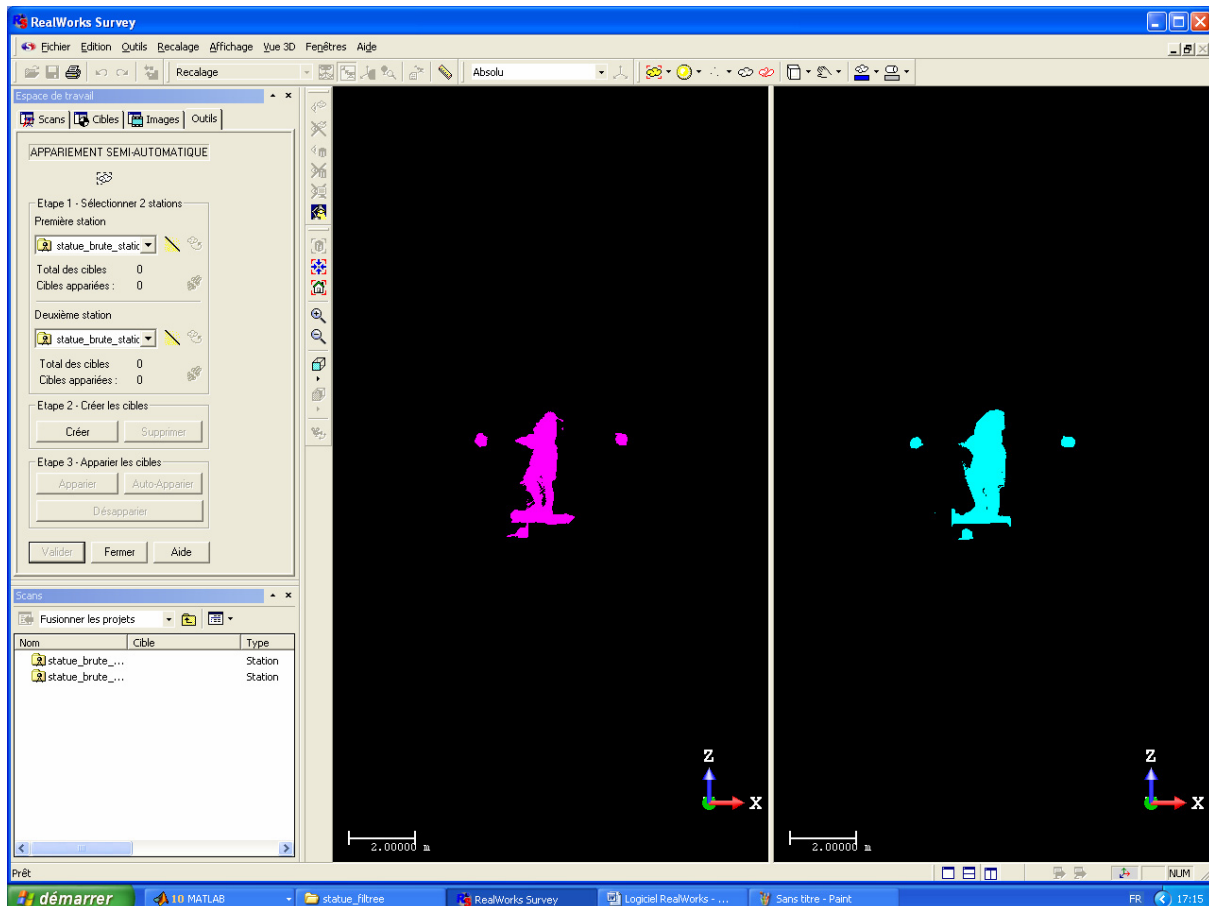
A l'aide du menu déroulant, il faut choisir la station de référence.

Dans la fenêtre « Liste des stations » nous pouvons sélectionner les stations que l'on souhaite regrouper.

b) *Etape 2 : Appariement des cibles*

Il faut presser le bouton « *Semi-Automatique* »

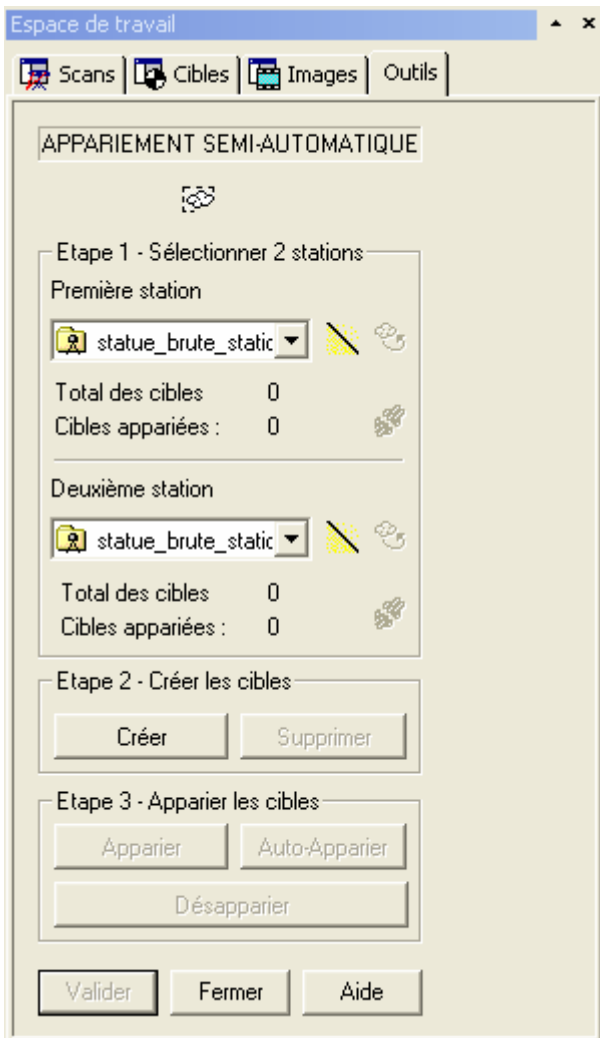
L'écran qui apparaît est alors le suivant.



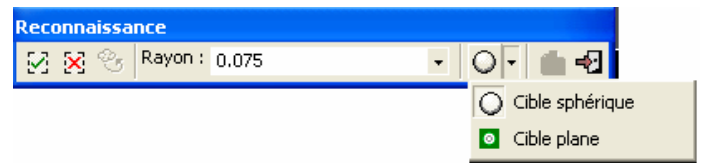
L'écran des nuages de points se divise en deux parties comportant chacun un nuage de points.

Cette étape se divise elle-même en trois sous étapes comme l'indique la fenêtre « *Espace de travail* ».

Dans un premier temps il faut sélectionner grâce au menu déroulant la première station (positionnée dans le demi-écran de gauche), puis la deuxième station (positionnée dans le demi-écran de droite).

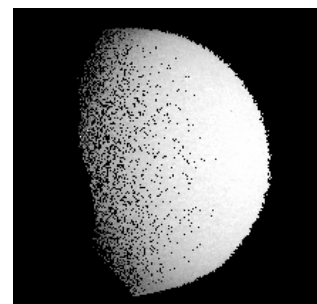
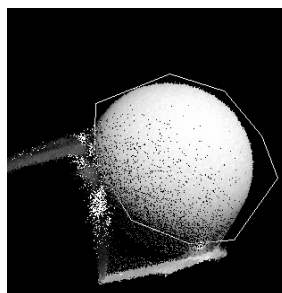
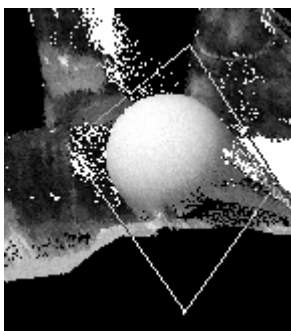


Dans un deuxième temps il faut créer les cibles. Il faut donc presser le bouton « Créer ». Une boîte de dialogue pour créer les cibles s'ouvre :



On sélectionne dans le nuage de points la partie qui nous intéresse. Cette partie peut se situer soit à l'intérieur de la frontière dessinée, soit à l'extérieur. Ainsi on choisira dans la boîte de dialogue de conserver ce qui est à l'intérieur (bouton vert) ou ce qui est à l'extérieur (bouton rouge). Il faut donc presser le bouton adéquat après avoir sélectionné les points (comme dans l'outil de segmentation)


Dans cet exemple on voit que la sphère est à l'intérieur de la frontière dessinée. On peut itérer ce procédé afin de n'obtenir que les points de la cible. Ci-dessous nous pouvons voir différentes phases de sélection de la sphère.

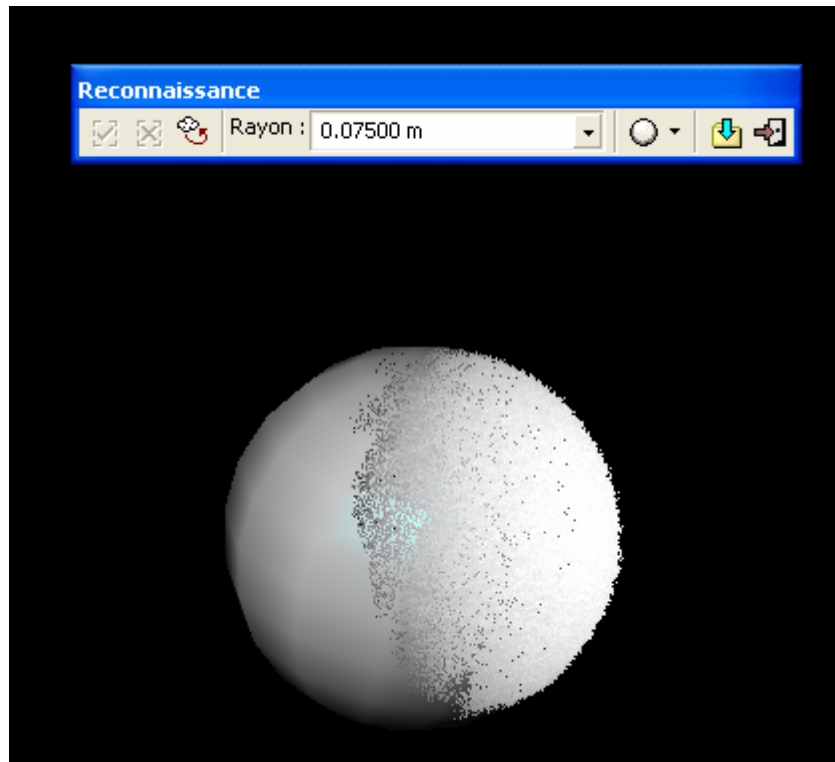



Nous avons maintenant les points de la cible. Le logiciel nous permet de choisir entre deux types de cibles : soit des sphères, soit des cibles planes. Dans le cas de sphères, nous pouvons soit entrer une valeur de rayon de sphère si elle est connue (attention aux unités employées, ici ce sont des mètres)


soit le logiciel à la possibilité de calculer un rayon de sphère automatique. Dans ce dernier cas la valeur « AUTO » est attribué au rayon.

Dans cet exemple nous utiliserons des sphères se 0.075 m de rayon.

On presse alors l'icône  et la sphère est automatiquement générée avec le rayon attribué à l'aide du nuage de points.

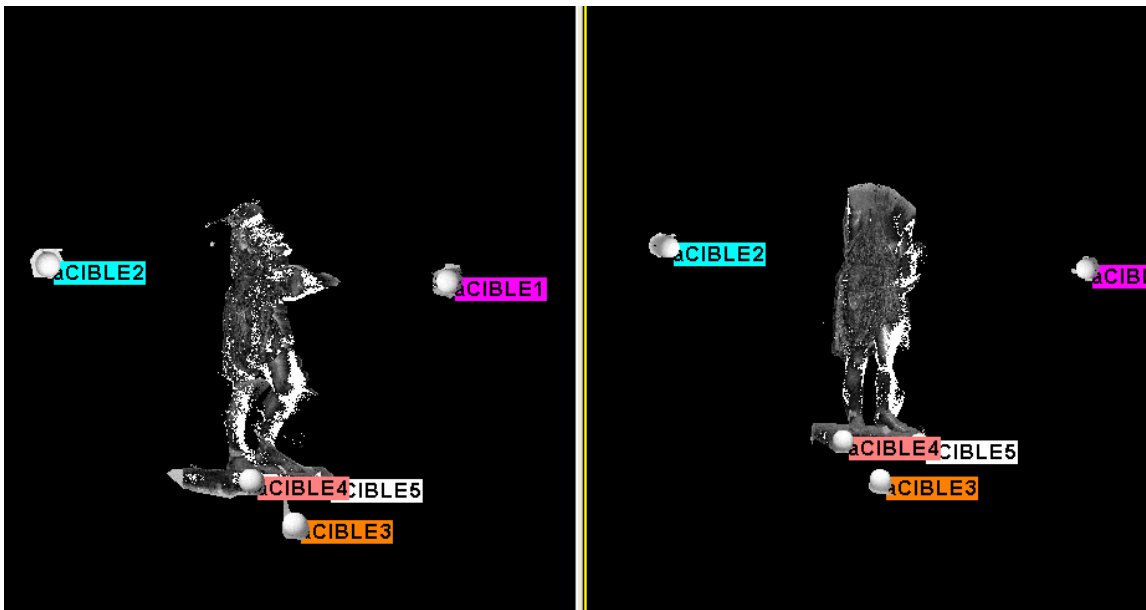


On vérifie que la sphère correspond au nuage de points. Si c'est le cas on presse  pour créer l'objet.

Puis sortir .

Il faut répéter cette opération pour toutes les cibles dans les deux scans.

Une fois que toutes les sphères ont été créées, nous pouvons passer à la sous-étape 3 qui est « Apparier les cibles » en appuyant sur le bouton « *Auto-Apparier* ».



On vérifie que les cibles ont été bien associées, dans le cas contraire il faut sélectionner les cibles concernées dans chacun des scans et presser « Désapparier ». Sinon presser « Valider ».

c) Etape 3 : Consolider les stations

On consolide les stations en pressant sur la touche « Consolider ».

Un tableau des erreurs apparaît :

Vue selon les stations

Détail de l'interface 'Détail de contrôle' :

- Vue Stations
- Bouton Désapparier
- Stations apparées

Nom	Scan par station	Cible correspondante	Scan par cible	Erreur résiduelle	Delt
statu...	5			<b>0.00098 m</b>	
OBJET_SCAN6		aCIBLE1	2	0.00138 m	-0.0
OBJET_SCAN7		aCIBLE2	2	0.00113 m	0.00
OBJET_SCAN8		aCIBLE3	2	0.00083 m	-0.0
OBJET_SCAN9		aCIBLE4	2	0.00064 m	0.00
OBJET_SCAN10		aCIBLE5	2	0.00093 m	-0.0
statu...	5			<b>0.00098 m</b>	
OBJET_SCAN1		aCIBLE4	2	0.00064 m	-0.0
OBJET_SCAN2		aCIBLE2	2	0.00113 m	-0.0
OBJET_SCAN3		aCIBLE1	2	0.00138 m	0.00
OBJET_SCAN4		aCIBLE3	2	0.00083 m	0.00
OBJET_SCAN5		aCIBLE5	2	0.00093 m	0.00

Vue selon les cibles

**Dutil de contrôle**

Vue Cibles

Désapparier

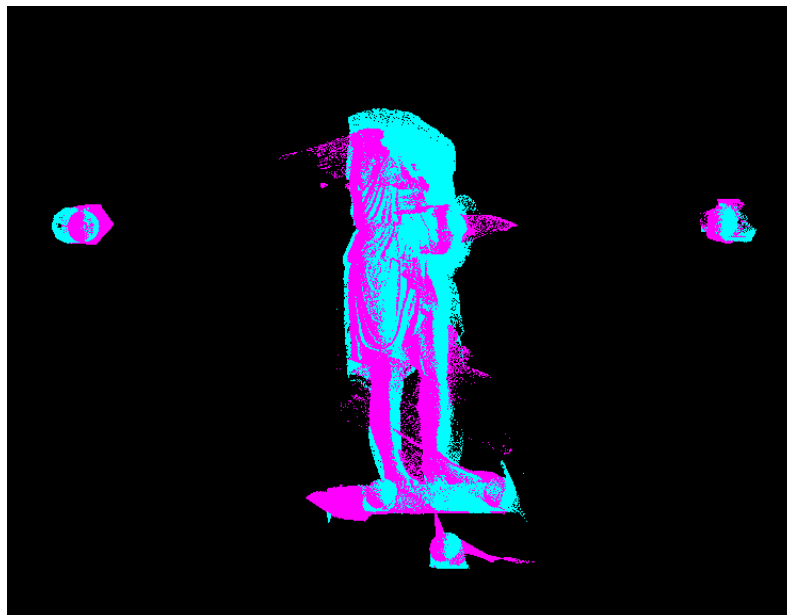
Cibles appariées | Cibles non appariées

Nom	Scan par cible	Station correspondante	Erreur résiduelle	Delta X	Delt
- aCIBLE1	2		<b>0.00138 m</b>		
OBJET_SCAN3		statue_brute_s...	0.00138 m	0.00092 m	0.00
OBJET_SCAN6		statue_brute_s...	0.00138 m	-0.00092 m	-0.00
- aCIBLE2	2		<b>0.00113 m</b>		
OBJET_SCAN2		statue_brute_s...	0.00113 m	-0.00078 m	-0.00
OBJET_SCAN7		statue_brute_s...	0.00113 m	0.00078 m	0.00
- aCIBLE3	2		<b>0.00083 m</b>		
OBJET_SCAN4		statue_brute_s...	0.00083 m	0.00037 m	0.00
OBJET_SCAN8		statue_brute_s...	0.00083 m	-0.00037 m	-0.00
- aCIBLE4	2		<b>0.00064 m</b>		
OBJET_SCAN1		statue_brute_s...	0.00064 m	-0.00062 m	-0.00
OBJET_SCAN9		statue_brute_s...	0.00064 m	0.00062 m	0.00
- aCIBLE5	2		<b>0.00093 m</b>		
OBJET_SCAN5		statue_brute_s...	0.00093 m	0.00011 m	-0.00
OBJET_SCAN10		statue_brute_s...	0.00093 m	-0.00011 m	0.00

On peut faire un contrôle des valeurs en pressant sur « Contrôler ».

Si les écarts paraissent satisfaisants nous pouvons alors presser les boutons « Valider » puis « Grouper ».

En revenant dans le mode « Office Survey » nous avons bien les deux scans consolidés.





## ***Annexe 14 : Rappels de compensation par la méthode des intermédiaires***

La compensation ne peut avoir lieu que lorsque le nombre d'observations est supérieur au nombre d'inconnues.

La méthode de compensation par les intermédiaires n'est pas la seule méthode existante pour réaliser une compensation, cependant elle s'avère ici très pratique grâce au calcul matriciel.

### a) Principes et notations

#### i) *Définitions et notations*

Pour une observation  $i$ , nous avons :

$$\boxed{L_i = v_i + l_i}$$

Avec :

- $L_i$  : valeur la plus probable de  $l_i$ , observation compensée
- $v_i$  : écart apparent
- $l_i$  : observation de poids  $p_i$

$$\boxed{X = x + dx}$$

$$\boxed{Y = y + dy}$$

Avec :

- $X, Y$  : valeurs recherchées, les inconnues
- $x, y$  : valeurs approchées des inconnues (calculables ou estimées)
- $dx, dy$  : appoints calculés par la compensation

Soient :

- $n$  : nombre d'observations  $l_i$
- $q$  : nombre d'inconnues (observations strictement nécessaires)

Conditions pour la compensation :  $n > q$

#### ii) *Equations d'erreurs primitives fondamentales*

On écrit tout d'abord chaque observation en fonction des inconnues :

Soit l'équation d'observation  $L_i = F_i(X, Y, Z)$

Or  $v_i = L_i - l_i$

Donc nous aboutissons aux équations d'erreurs primitives :

$$v_i = F_i(X, Y, Z) - l_i$$

iii) Equations d'erreurs transformées

On a l'expression  $L_i = F_i(X, Y, Z)$

Avec  $X = x + dx$

$Y = y + dy$

$Z = z + dz$

Dans cette notation,  $x, y, z$  sont des valeurs approchées des inconnues, en théorie proches des inconnues  $X, Y, Z$ . Ainsi les  $dx, dy, dz$  sont des appoints.

Nous obtenons donc :

$$L_i = F_i(x + dx, y + dy, z + dz)$$

Afin d'obtenir une fonction linéaire qui approxime  $F$  au voisinage de  $x, y, z$  en appliquant un développement en série selon la formule de Taylor :

$$F_i(X, Y, Z) \approx F_i(x, y, z) + \frac{\partial F_i(x, y, z)}{\partial x} dx + \frac{\partial F_i(x, y, z)}{\partial y} dy + \frac{\partial F_i(x, y, z)}{\partial z} dz$$

On pose alors :

$$a_i = \frac{\partial F_i(x, y, z)}{\partial x}$$

$$b_i = \frac{\partial F_i(x, y, z)}{\partial y}$$

$$c_i = \frac{\partial F_i(x, y, z)}{\partial z}$$

$$F_i(x, y, z) = L'_i$$

On obtient donc :

$$\begin{cases} v_i = F_i(X, Y, Z) - l_i \\ v_i = L'_i + a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz - l_i \end{cases}$$

Et donc :

$$v_i = a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + k_i$$

Avec :

- $k_i = L'_i - l_i =$  valeur approchée - valeur brute
- $a_i, b_i, c_i$  : les dérivées partielles calculables
- $dx, dy, dz$  : les appoints inconnus

iv) *Etablissement des équations normales ou finales*

A partir de l'expression des équations d'erreurs transformées trouvées précédemment, on cherche à appliquer le principe des moindres carrés. Pour ce faire on réduit à l'unité de poids l'expression précédente en la multipliant par  $\sqrt{p_i}$ . On met au carré l'expression ainsi obtenue que l'on somme de 1 à n.

Pour appliquer le principe des moindres carrés il faut rendre la somme des pvv ainsi obtenue minimale.

Cette condition implique que les dérivées par rapport à  $dx, dy, dz$  soient simultanément nulles. On aboutit alors au système de trois équations à trois inconnues c'est-à-dire le système d'équations normales ou finales :

$$\begin{cases} [paa] \cdot dx + [pba] \cdot dy + [pca] \cdot dz + [pak] = 0 \\ [pab] \cdot dx + [pbb] \cdot dy + [pcb] \cdot dz + [pbk] = 0 \\ [pac] \cdot dx + [pbc] \cdot dy + [pcc] \cdot dz + [pck] = 0 \end{cases}$$

Ce système d'équations nous fournit  $dx, dy, dz$  et nous sommes donc en mesure de déterminer :

$$\begin{cases} X = x + dx \\ Y = y + dy \\ Z = z + dz \end{cases}$$

On peut alors calculer l'écart apparent :

$$v_i = a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + k_i$$

et la valeur la plus probable des observations :

$$L_i = v_i + l_i$$

v) *Calculs de précision*

Grâce au calcul de compensation par la méthode des intermédiaires nous pouvons déterminer plusieurs erreurs moyennes quadratiques c'est-à-dire l'emq de l'unité de poids appelée  $emq_0$ , et l'emq des observations brutes et celle des inconnues.

➤ **Emq de l'unité de poids**

Soit l'emq<sub>0</sub>, l'emq de l'unité de poids :

$$mq_0 = \pm \sqrt{\frac{[pvv]}{n - q}}$$

Avec :

- n : nombre d'observations
- q : nombre d'inconnues
- n - q : nombre d'observations excédentaires

➤ **Emq des observations brutes**

Soit l'observation l<sub>i</sub> de poids p<sub>i</sub>

Les observations brutes ont pour précision :

$$mq_{li} = mq_0 \sqrt{\frac{1}{p_i}}$$

On peut écrire la relation suivante :

$$mq_{li} \sqrt{p_i} = mq_0$$

➤ **Emq des inconnues**

Soient p<sub>x</sub>, p<sub>y</sub>, p<sub>z</sub> les poids des inconnues X, Y, Z.

On pose :

$$\frac{1}{p_x} = Q_{xx}$$

$$\frac{1}{p_y} = Q_{yy}$$

$$\frac{1}{p_z} = Q_{zz}$$

On obtient :

$$\begin{aligned}
 mq_X &= mq_0 \sqrt{\frac{1}{p_X}} = mq_0 \sqrt{Q_{XX}} \\
 mq_Y &= mq_0 \sqrt{\frac{1}{p_Y}} = mq_0 \sqrt{Q_{YY}} \\
 mq_Z &= mq_0 \sqrt{\frac{1}{p_Z}} = mq_0 \sqrt{Q_{ZZ}}
 \end{aligned}$$

$Q_{XX}$ ,  $Q_{YY}$  et  $Q_{ZZ}$  sont obtenus en résolvant les systèmes suivants :

$$\begin{cases}
 [paa] \cdot Q_{XX} + [pba] \cdot Q_{XY} + [pca] \cdot Q_{XZ} = 1 \\
 [pab] \cdot Q_{XX} + [pbb] \cdot Q_{XY} + [pcb] \cdot Q_{XZ} = 0 \\
 [pac] \cdot Q_{XX} + [pbc] \cdot Q_{XY} + [pcc] \cdot Q_{XZ} = 0
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 [paa] \cdot Q_{XY} + [pba] \cdot Q_{YY} + [pca] \cdot Q_{YZ} = 0 \\
 [pab] \cdot Q_{XY} + [pbb] \cdot Q_{YY} + [pcb] \cdot Q_{YZ} = 1 \\
 [pac] \cdot Q_{XY} + [pbc] \cdot Q_{YY} + [pcc] \cdot Q_{YZ} = 0
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 [paa] \cdot Q_{XZ} + [pba] \cdot Q_{YZ} + [pca] \cdot Q_{ZZ} = 0 \\
 [pab] \cdot Q_{XZ} + [pbb] \cdot Q_{YZ} + [pcb] \cdot Q_{ZZ} = 0 \\
 [pac] \cdot Q_{XZ} + [pbc] \cdot Q_{YZ} + [pcc] \cdot Q_{ZZ} = 1
 \end{cases}$$

vi) Contrôles

➤ Contrôle des  $v_i$

$$\begin{aligned}
 v_i &= a_i \cdot dx + b_i \cdot dy + c_i \cdot dz + k_i \\
 v_i &= L_i - l_i
 \end{aligned}$$

Ces deux expressions doivent être égales

➤ **Equations d'erreurs implicites**

On doit vérifier que :

$$\begin{cases} [pav] = 0 \\ [pbv] = 0 \\ [pcv] = 0 \end{cases}$$

➤ **Contrôle du calcul de [pvv]**

$$[pkv] = [pvv] = [pak] dx + [pbk] dy + [pck] dz + [pkk]$$

➤ **Contrôle final**

Nous devons reprendre le calcul de la compensation en introduisant X, Y, Z à la place de x, y, z dans le calcul suivant. Le résultat à obtenir est que dx, dy, dz soient peu différents de 0.

vii) *Calcul matriciel*

Pour simplifier les calculs on peut écrire les formules précédentes sous forme matricielle.

• **Matrice des équations finales**

Soit la matrice  $A_{(n,q)}$  la matrice des dérivées :

$$A_{(n,q)} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & \dots & q_1 \\ a_2 & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ a_n & \dots & \dots & \dots & q_n \end{bmatrix}$$

Soit la matrice  $k_{(n,1)}$  représentant le vecteur de fermeture :

$$k_{(n,1)} = \begin{bmatrix} -k_1 \\ -k_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ -k_n \end{bmatrix}$$

Soit  $P_{(n,n)}$  la matrice des poids des observations brutes :



$$P_{(n,n)} = \begin{bmatrix} P_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & P_n \end{bmatrix}$$

On peut dès lors calculer la matrice des inconnues dans les équations normales, on obtient la matrice  $N_{(q,q)}$  :

$$N_{(q,q)} = A^T \cdot P \cdot A = \begin{bmatrix} [paa] & [pab] & \cdots & \cdots & [paq] \\ [pab] & [pbb] & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots \\ [paq] & [pbq] & \cdots & \cdots & [pqq] \end{bmatrix}$$

• **Résolution du système des équations finales :**

On considère la matrice  $dx_{(q,1)}$  représentant le vecteur des inconnues :

$$dx_{(q,1)} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}$$

On détermine la matrice  $n_k$  représentant la matrice des coefficients en k dans les équations normales :

$$n_{k(q,1)} = A^T \cdot P \cdot k = \begin{bmatrix} -[pak] \\ -[pbk] \\ \vdots \\ \vdots \\ -[pqk] \end{bmatrix}$$

Donc les équations finales s'écrivent sous la forme matricielle suivante qui est la traduction de l'écriture du principe des moindres carrés sous forme matricielle :

$$N \cdot dx - n_k = 0$$

Ou encore

$$N \cdot dx = n_k$$

Donc

$$dx = N^{-1} \cdot n_k$$

et le calcul de la valeur la plus probable des inconnues :

$$X = x + dx$$

- **Emq de l'unité de poids**

De ce qui précède nous pouvons calculer le vecteur des résidus  $v$  qui représente l'équation d'erreurs transformées sous forme matricielle :

$$v = A \cdot dx - k$$

Ainsi connaissant ce résultat nous pouvons calculer l'emq de l'unité de poids ( $n > q$ ) :

$$mq_0^2 = \frac{v^T \cdot P \cdot v}{n - q}$$

- **Emq des inconnues**

Les éléments de la diagonale de la matrice  $N^{-1}$  nous fournissent les cofacteurs des inconnues, notés  $Q_{xx}, Q_{yy}, \dots$

$$Q_{xx} = N^{-1} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & & & & \\ & Q_{yy} & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & Q_{zz} \end{bmatrix}$$

On peut alors obtenir les emq des inconnues :

$$mq_{inconnues} = mq_0 \sqrt{Q_{xx}}$$

- **Emq des observations compensées**

On rappelle que  $\frac{1}{P_{L_i}} = Q_{L_i L_i}$

Les éléments de la diagonale de la matrice  $A \cdot N^{-1} \cdot A^T$  nous donnent les  $Q_{L_i L_i}$  des observations compensées :

$$Q_{LiLi} = A.Q_{XX}.A^T = A.N^{-1}.A^T = \begin{bmatrix} Q_{L1L1} & & & & \\ & Q_{L2L2} & & & \\ & & \cdot & & \\ & & & \cdot & \\ & & & & Q_{LnLn} \end{bmatrix}$$

Et donc :

$$mq_{\text{obs compensées}} = mq_0 \sqrt{Q_{LiLi}}$$

- **Contrôles**

On pourra contrôler les résultats obtenus par les relations suivantes :

$$A^T . P . v = 0$$

$$v^T . P . v = -v^T . P . k$$

### Annexe 15 : Algorithme d'extraction de sphères

Une des méthodes les plus employées pour extraire des primitives géométriques simples à partir d'un nuage de points est de déterminer les paramètres du modèle, de type connu, qui s'ajuste au mieux au modèle.

Le procédé le plus utilisé pour traiter ce genre de problème est celui des moindres carrés. Ce processus consiste à rechercher le vecteur paramètre  $a$  du modèle qui minimise la somme des carrés des écarts  $d$  des points  $X_i (x_i, y_i, z_i)$  au modèle considéré. Ainsi pour un ensemble de  $N$  points nous aurons :

$$\sum_{i=1}^N d(X_i; \text{modèle}(a))^2$$

Dans notre cas le modèle considéré est une sphère dont les inconnus sont a priori son centre  $c$  de coordonnées  $(x_c, y_c, z_c)$  et son rayon  $r$ . Cependant ici nous imposons la valeur du rayon. Cette donnée nous permet d'établir un contrôle à la fin du calcul. En utilisant l'algèbre linéaire, nous arrivons à une solution directe du problème. En effet nous pouvons établir que la sphère est une surface algébrique qui peut s'écrire sous la forme  $P(x, y, z)=0$  où  $P$  est un polynôme. Pour ce faire nous prenons en compte la base canonique  $q(x, y, z) = (1, x, y, z, (x^2+y^2+z^2))^T$ . Ainsi la fonction à ajuster devient  $a^T q(x, y, z) = 0$  où  $a$  est un vecteur de coefficients constants. On souhaite alors trouver le modèle de ce type qui minimise la fonction :

$$\sum_{i=1}^N (a^T q(x_i, y_i, z_i))^2$$

Formule 1

Ceci revient à considérer que  $d(x) = a^T q(x, y, z) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5(x^2 + y^2 + z^2)$  .

On détermine les paramètres  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  du vecteur  $a$  qui vérifient l'équation :

$$a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5(x^2 + y^2 + z^2) = 0$$

Formule 2

Pour ce faire on introduit la matrice  $M$  symétrique réelle positive définie par :

$$M = \left[ \sum_{i=1}^N (q(x_i, y_i, z_i)q(x_i, y_i, z_i)^T) \right]$$

Formule 3

$a$  correspond aux valeurs propres de  $M$  associées à la plus petite valeur propre de  $M$ .

On calcule alors la dérivée de la métrique  $d$  en fonction des  $x_i, y_i$  et  $z_i$  :

$$\frac{\partial d}{\partial x} = a_2 + 2a_5x \quad \frac{\partial d}{\partial y} = a_3 + 2a_5y \quad \frac{\partial d}{\partial z} = a_4 + 2a_5z$$

Formule 4

On en déduit les coordonnées du centre  $c$  de la sphère lorsque  $a_5 \neq 0$

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = -\frac{1}{2a_5} \begin{pmatrix} a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{pmatrix}$$

*Formule 5*

Minimiser la formule 1 Revient à calculer la valeur absolue au carré du gradient de  $d$  :

$$\begin{aligned} |\nabla d|^2 &= 4a_5(a_2x + a_3y + a_4z + a_5(x^2 + y^2 + z^2)) + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 \\ &= 4a_5(d(x) - a_1) + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 \end{aligned}$$

*Formule 6*

$d(x)$  tends vers 0 lorsque  $|\nabla d|^2 = -4a_1a_5 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2$

On en déduit la valeur du rayon  $r$ , lorsque  $a_5 \neq 0$

$$r = \frac{\sqrt{-4a_1a_5 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2}}{2|a_5|}$$

*Formule 7*

## Annexe 16 : Consolidation des nuages de points en utilisant les sphères de recalage

Après avoir associé toutes les sphères homologues dans chaque nuage de points, nous pouvons regrouper tous les nuages de points en un seul dont le référentiel est celui du nuage de points « maître ». Le but du calcul est de déterminer, pour chaque nuage, les trois rotations et les trois translations à effectuer pour que tous les nuages soient dans le même système de coordonnées.

Etant donné que nous avons réalisé trois stations et que nous avons six inconnues par stations, nous avons donc à déterminer  $6 \times 3 = 18$  inconnues. Cette transformation est une similitude spatiale. Nous prendrons un facteur d'échelle égal à 1.

Nous appelons  $(x_i, y_i, z_i)$ , les coordonnées des centres des sphères dans le système local du nuage de points n°i ayant pour origine la position du scanner.

Nous appelons  $(X, Y, Z)$ , les coordonnées des sphères dans le système du nuage de points « maître » ayant pour origine la position du scanner dans le nuage de points « maître ».

Nous allons exprimer les coordonnées des sphères en fonction des inconnues. Nous écrivons sous forme matricielle le passage des coordonnées du système du nuage de points « esclave » dans le système du nuage de points « maître ». L'expression matricielle de la similitude spatiale est la suivante :

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = R_i \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + T_i \quad \text{avec} \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & -r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$

**Formule 1 : Expression de la similitude spatiale**

**Formule 2 : Coefficients réduits de la matrice rotation R**

**Formule 3 : Coefficient du vecteur translation T**

$$R = \begin{pmatrix} \cos \varphi \times \cos \kappa & -\cos \varphi \times \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \times \sin \kappa + \sin \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa & \cos \omega \times \cos \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa & -\sin \omega \times \cos \varphi \\ \sin \omega \times \sin \kappa - \cos \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa & \sin \omega \times \cos \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa & \cos \omega \times \cos \varphi \end{pmatrix}$$

**Formule 4 : Expression développée de la matrice rotation R**

Où  $R_i$  et  $T_i$  sont les matrices de rotation et de translation permettant de réaliser la similitude spatiale. Nous appelons  $\omega, \varphi, \kappa$  les angles de rotation autour des axes X, Y, Z et  $T_x, T_y, T_z$  les translations suivant les axes X, Y, Z.

A partir des équations précédentes, nous pouvons écrire le système d'équations d'observation (cf. Figure 5). Une fois que nous avons déterminé les valeurs approchées des paramètres de la transformation. Nous pouvons procéder alors au calcul des dérivées partielles pour déterminer les coefficients des termes des équations d'erreurs transformées. Nous déterminons alors la valeur des appoints à rajouter pour obtenir les valeurs les plus probables des inconnues, en appliquant le principe des moindres carrés. Nous réitérons les calculs jusqu'à que la valeur des appoints des inconnues converge vers 0.

$$\begin{aligned} x &= \cos \varphi \times \cos \kappa \times X - \cos \varphi \times \sin \kappa \times Y + \sin \varphi \times Z + T_x \\ y &= (\cos \omega \times \sin \kappa + \sin \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa) \times X + (\cos \omega \times \cos \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa) \times Y - \sin \omega \times \cos \varphi \times Z + T_y \\ z &= (\sin \omega \times \sin \kappa - \cos \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa) \times X + (\sin \omega \times \cos \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa) \times Y + \cos \omega \times \cos \varphi \times Z + T_z \end{aligned} \quad \text{For}$$

**Formule 5 : Expression des équations d'observation**



Afin de simplifier les calculs nous écrivons le système d'équation sous forme matricielle en notant les inconnues de la sorte :  $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}, T_x, T_y, T_z$ .  
 Nous avons donc ici un système avec 12 inconnues, il nous faut donc quatre centres de sphère connus en X, Y, Z. Il faut noter qu'en réalité nous n'avons que six inconnues, mais pour le calcul des valeurs approchées des inconnues dans le nouveau système, nous considérons tous les coefficients de la matrice comme inconnues.

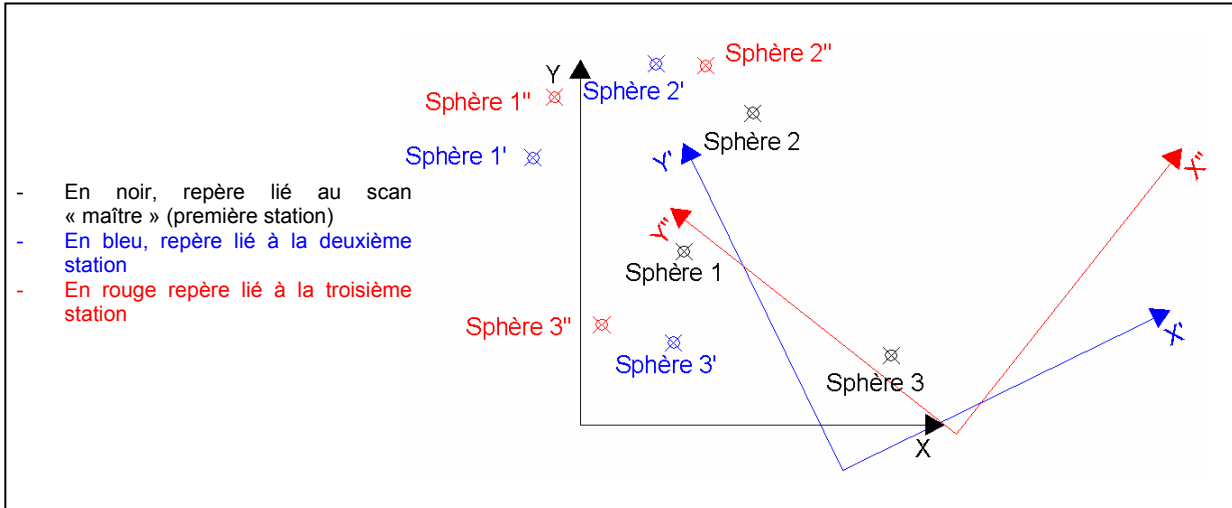


Figure 1 : Détermination des valeurs approchées des inconnues

Pour chaque station, nous avons numérisé l'ensemble des sphères. Chaque nuage de points est acquis dans un repère lié au scanner. Sur la Figure 1 le repère du scan « maître » est en noir, le repère lié à la position du scanner pour la deuxième station est en bleu, le repère lié à la troisième station est rouge. Or les coordonnées des points de chaque nuage sont importées dans le logiciel RealWorks dans le repère général en conservant les valeurs liées aux repères locaux. De ce fait, bien que l'on ait trois sphères dans cet exemple pour le recalage (sphères 1, 2, 3), il apparaîtra à l'écran neuf sphères (sphères 1, 2, 3, 1', 2', 3', 1'', 2'', 3''). Lors de la génération des sphères de recalage dans l'étape précédente, le logiciel calcule donc neuf centres de sphère dans le repère général. Par conséquent, nous pouvons obtenir les valeurs approchées des inconnues relativement simplement.

Nous obtenons les angles  $\omega, \varphi, \kappa$  en utilisant les relations suivantes :

$$\tan \omega = \frac{-r_{23}}{r_{33}}$$

$$\sin \varphi = r_{13}$$

$$\tan \kappa = \frac{-r_{12}}{r_{11}}$$

**Formule 6 : Relation permettant d'obtenir  $\omega$**

**Formule 7 : Relation permettant d'obtenir  $\varphi$**

**Formule 8 : Relation permettant d'obtenir  $\kappa$**

Nous pouvons procéder alors au calcul des dérivées partielles pour déterminer les appoints à rajouter pour obtenir les valeurs les plus probables des inconnues.

- Calcul des dérivées partielles de x par rapport à  $\omega, \varphi, \kappa, T_x, T_y, T_z$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \omega} &= 0 \\ \frac{\partial x}{\partial \varphi} &= -\sin \varphi \times \cos \kappa \times X + \sin \varphi \times \sin \kappa \times Y + \cos \varphi \times Z \\ \frac{\partial x}{\partial \kappa} &= -\cos \varphi \times \sin \kappa \times X - \cos \varphi \times \cos \kappa \times Y = r_{12} \times X - r_{11} \times Y \\ \frac{\partial x}{\partial T_x} &= 1 \qquad \frac{\partial x}{\partial T_y} = 0 \qquad \frac{\partial x}{\partial T_z} = 0 \end{aligned}$$

**Formule 9 : Dérivées partielles de x par rapport à ω, φ, κ, T<sub>x</sub>, T<sub>y</sub>, T<sub>z</sub>**

- Calcul des dérivées partielles de y par rapport à ω, φ, κ, T<sub>x</sub>, T<sub>y</sub>, T<sub>z</sub>

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial \omega} &= (-\sin \omega \times \sin \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa) \times X + (-\sin \omega \times \cos \kappa - \cos \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa) \times Y - \cos \omega \times \cos \varphi \times Z \\ \frac{\partial y}{\partial \omega} &= -r_{31} \times X - r_{32} \times Y - r_{33} \times Z \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi} &= \sin \omega \times \cos \varphi \times \cos \kappa \times X - \sin \omega \times \cos \varphi \times \sin \kappa \times Y + \sin \omega \times \sin \varphi \times Z \\ \frac{\partial y}{\partial \varphi} &= -r_{23} \times \cos \kappa \times X + r_{23} \times \sin \kappa \times Y + \sin \omega \times \sin \varphi \times Z \\ \frac{\partial y}{\partial \kappa} &= (\cos \omega \times \cos \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa) \times X + (-\cos \omega \times \sin \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa) \times Y \\ \frac{\partial y}{\partial \kappa} &= r_{22} \times X - r_{21} \times Y \\ \frac{\partial y}{\partial T_x} &= 0 \qquad \frac{\partial y}{\partial T_y} = 1 \qquad \frac{\partial y}{\partial T_z} = 0 \end{aligned}$$

**Formule 10 : Dérivées partielles de y par rapport à ω, φ, κ, T<sub>x</sub>, T<sub>y</sub>, T<sub>z</sub>**

- Calcul des dérivées partielles de z par rapport à  $\omega, \varphi, \kappa, T_x, T_y, T_z$

$$\frac{\partial z}{\partial \omega} = (\cos \omega \times \sin \kappa + \sin \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa) \times X + (\cos \omega \times \cos \kappa - \sin \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa) \times Y - \sin \omega \times \cos \varphi \times Z$$

$$\frac{\partial z}{\partial \omega} = r_{21} \times X + r_{22} \times Y + r_{23} \times Z$$

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = -\cos \omega \times \cos \varphi \times \cos \kappa \times X + \cos \omega \times \cos \varphi \times \sin \kappa \times Y - \cos \omega \times \sin \varphi \times Z$$

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = -r_{33} \times \cos \kappa \times X + r_{33} \times \sin \kappa \times Y - \cos \omega \times \sin \varphi \times Z$$

$$\frac{\partial z}{\partial \kappa} = (\sin \omega \times \cos \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \sin \kappa) \times X + (-\sin \omega \times \sin \kappa + \cos \omega \times \sin \varphi \times \cos \kappa) \times Y$$

$$\frac{\partial z}{\partial \kappa} = r_{32} \times X - r_{31} \times Y$$

$$\frac{\partial z}{\partial T_x} = 0 \quad \frac{\partial z}{\partial T_y} = 0 \quad \frac{\partial z}{\partial T_z} = 1$$

**Formule 11 : Dérivées partielles de z par rapport à  $\omega, \varphi, \kappa, T_x, T_y, T_z$**

## Annexe 17 : Triangulation de Delaunay

Au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, un problème majeur de géométrie, celui des Diagrammes de Proximité, s'était posé dans une motivation mathématique (ex : Démonstration de l'unique réductibilité des formes quadratiques, Dirichlet) ou physique (ex : Croissance et arrangements cristallins). Ce fut Voronoï, mathématicien russe, qui formalisa en premier cette notion. Par la suite, Delaunay un autre mathématicien russe qui l'a formalisé et étendu. Ainsi fut définie la Triangulation de Delaunay, obtenue en reliant par une arête les points dont les régions correspondantes dans le diagramme de Voronoï sont adjacentes, que nous détaillerons dans la suite de ce chapitre.

### I DIAGRAMME DE VORONOÏ

#### I.1 POINTS, SITES, GERMES

On désigne par  $P$  un ensemble composé de  $n$  points  $P_i$  de l'espace  $\mathbb{R}^2$  appelés aussi sites ou germes :  $P = \{P_i \in \mathbb{R}^2, i = 1, \dots, n\}$

#### I.2 Arête

Le segment ou l'arête est repéré par deux points d'appui  $x$  et  $y$ .



#### I.3 Region de Voronoï

On appelle polygone de Voronoï associé au site  $P_i$  la région  $Vor(P_i)$  (chaque région étant l'ensemble de points  $(x,y)$  les plus proches à un point de  $P$  telle que chaque point de  $P$  a pour plus proche site  $P_i$ ).

$$Vor(P_i) = \{x \in \mathbb{R}^2, d(x, P_i) \leq d(x, P_j), \forall P_j \in P - P_i\}$$

Où  $d$  représente la distance Euclidienne.

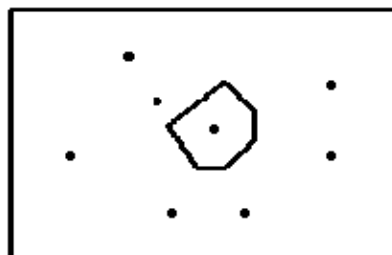


Figure 1 : Polygone de Voronoï d'un point  $P_i$

### I.4 Diagramme de Voronoï

On décrit le diagramme de Voronoï comme l'union des régions de Voronoï de tous les points.

$$VOR(P) = \bigcup_{p \in P} Vor(p)$$

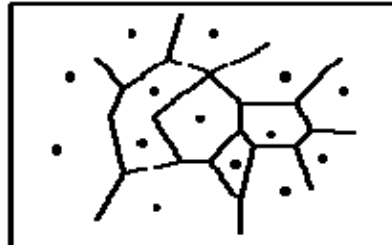


Figure 2 : Diagramme de Voronoï de l'ensemble P formé de N points.

### I.5 Propriétés du Diagramme de Voronoï

① Chaque sommet du diagramme de Voronoï est le point de rencontre de trois arêtes de Voronoï



Figure 3 : Trois arêtes autour d'un sommet de Voronoï.

② Pour chaque sommet S du diagramme de Voronoï, le cercle passant par les trois points voisins à ce sommet, ne contient aucun autre point de P.

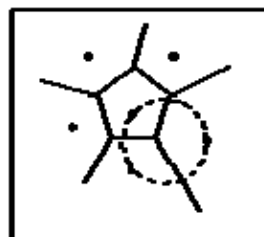


Figure 4 : Le cercle ne contient aucun autre point de P, c'est un diagramme de Voronoï.

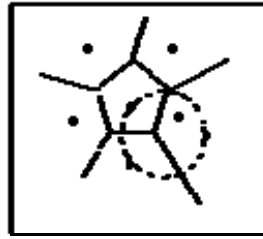


Figure 5 : Le cercle contient un point de P, ce n'est pas un diagramme de Voronoï.

③ Une arête de Voronoï sépare tout point de son plus proche voisin.



Figure 6 : Une arête sépare un point de son plus proche voisin.

## II LA TRIANGULATION DE DELAUNAY

On peut à partir du diagramme de Voronoï, en construire le *dual* (figure 7), c'est à dire construire un nouveau diagramme où cette fois, on relie par un segment toutes les paires de sites dont les régions de Voronoï correspondantes sont adjacentes, c'est à dire séparées par une arête de Voronoï.

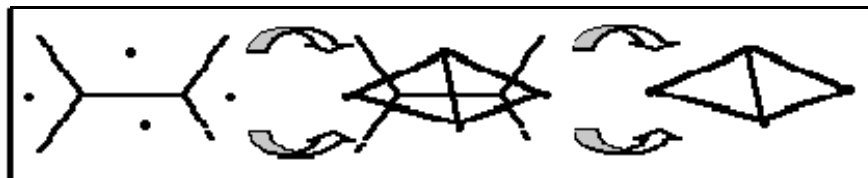


Figure 7 : Construction du dual.

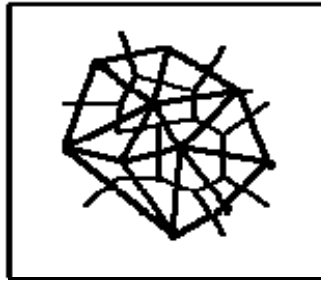
Nous donnons alors le théorème fondamental suivant:

*Le dual du diagramme de Voronoï est une triangulation sur l'ensemble des points.*

Ce théorème est démontré en vérifiant que ce dual définit une partition du domaine intérieur à l'enveloppe convexe de l'ensemble des points. En ayant remarqué de manière préliminaire qu'à chaque sommet de Voronoï correspondait un triangle du dual, on vérifie pour cela que :

- Un triangle intersectant l'intérieur de l'enveloppe convexe n'est pas plat.
- Pour une paire de sommets de Voronoï donnée, si les cercles associés à ces deux sommets ont une intersection sachant qu'ils ne peuvent être l'un à l'intérieur de l'autre, alors les deux points d'intersections qu'ils définissent forment un segment séparant les deux triangles correspondants.
- Chaque point intérieur à l'enveloppe convexe est aussi contenu dans au moins un triangle.
- On définit la triangulation de Delaunay d'un ensemble de points du plan comme étant la dual du diagramme de Voronoï correspondant (figure 8).

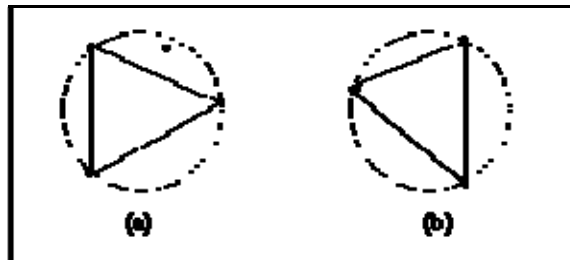




*Figure 8 : La triangulation de Delaunay, duale du diagramme de Voronoï.*

On peut par la dualité et non colinéarité de tous les points et non cocyclicité de quatre points déduire des résultats portant sur le diagramme de Voronoï les propriétés suivantes:

- La triangulation de Delaunay est unique.
- La triangulation de Delaunay est une triangulation complète.
- Les cercles passant par les trois sommets de chaque triangle ne contiennent aucun autre site en leur intérieur.



*Figure 9 : (a) Triangle non-Delaunay – (b) Triangle Delaunay*

Cette dernière propriété est essentielle, et elle va être utilisée pour caractériser la triangulation de Delaunay sans avoir à recourir à la dualité avec le diagramme de Voronoï. Elle va aussi être utilisée comme critère de choix des triangles à construire, lors de l'exécution d'une triangulation.

Cette annexe est tirée de [www.kaddour.com](http://www.kaddour.com)

**Annexe 18: Rapport d'erreur de la consolidation du buste issu des données Faro**

**Target-Based Registration  
Report by stations**

User Name: cyril Date: Mon Aug 20 10:33:32 2007  
 Linear Measurement Units: Meter Project Name: Project  
 Coordinates System: X, Y, Z

3 STATION(S) - Mean Distance: 0.0011 Max Distance: 0.0014  
 7 TARGET(S) - Mean Distance: 0.0011 Max Distance: 0.0020

**buste3\_filtre\_sphereNF\_net\_coupe\_franche - 7 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0010**

Object Name	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT8	mTARGET1	3	0.0004 m	-0.0003 m	0.0002 m	0.0001 m	0.0016 m	0.9632 m
SCAN_OBJECT9	mTARGET2	3	0.0004 m	-0.0001 m	-0.0003 m	-0.0002 m	0.0014 m	1.4156 m
SCAN_OBJECT10	mTARGET3	3	0.0020 m	0.0020 m	0.0000 m	0.0001 m	0.0014 m	1.6747 m
SCAN_OBJECT11	mTARGET4	3	0.0007 m	-0.0005 m	0.0005 m	-0.0002 m	0.0014 m	1.8366 m
SCAN_OBJECT12	mTARGET5	3	0.0012 m	0.0012 m	-0.0003 m	-0.0001 m	0.0014 m	2.0477 m
SCAN_OBJECT13	mTARGET6	3	0.0012 m	-0.0011 m	0.0002 m	0.0005 m	0.0014 m	1.7563 m
SCAN_OBJECT14	mTARGET7	3	0.0012 m	-0.0012 m	-0.0003 m	-0.0002 m	0.0013 m	2.4179 m



**bustel\_filtre\_sphereNF\_net\_coupe\_franche - 7 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0014**

Object Name	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT1	mTARGET1	3	0.0008 m	0.0006 m	-0.0002 m	-0.0004 m	0.0014 m	1.1613 m
SCAN_OBJECT2	mTARGET2	3	0.0008 m	0.0000 m	0.0002 m	0.0007 m	0.0013 m	1.1864 m
SCAN_OBJECT3	mTARGET3	3	0.0027 m	-0.0024 m	0.0011 m	-0.0008 m	0.0013 m	1.5913 m
SCAN_OBJECT4	mTARGET6	3	0.0008 m	0.0002 m	-0.0000 m	-0.0008 m	0.0013 m	1.7208 m
SCAN_OBJECT5	mTARGET4	3	0.0015 m	0.0010 m	-0.0009 m	0.0008 m	0.0013 m	1.7249 m
SCAN_OBJECT6	mTARGET5	3	0.0013 m	-0.0013 m	-0.0001 m	-0.0002 m	0.0014 m	1.9705 m
SCAN_OBJECT7	mTARGET7	3	0.0019 m	0.0018 m	-0.0001 m	0.0006 m	0.0014 m	2.5228 m

**buste2\_filtre\_sphereNF\_net\_coupe\_franche - 7 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0008**

Object Name	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT15	mTARGET2	3	0.0005 m	0.0000 m	0.0002 m	-0.0005 m	0.0014 m	1.4255 m
SCAN_OBJECT16	mTARGET1	3	0.0004 m	-0.0003 m	0.0000 m	0.0002 m	0.0015 m	0.9304 m
SCAN_OBJECT17	mTARGET3	3	0.0014 m	0.0004 m	-0.0011 m	0.0007 m	0.0014 m	1.5902 m
SCAN_OBJECT18	mTARGET6	3	0.0009 m	0.0009 m	-0.0002 m	0.0003 m	0.0013 m	1.6304 m
SCAN_OBJECT19	mTARGET4	3	0.0009 m	-0.0005 m	0.0004 m	-0.0006 m	0.0013 m	1.7238 m
SCAN_OBJECT20	mTARGET5	3	0.0005 m	0.0001 m	0.0004 m	0.0003 m	0.0026 m	1.9235 m
SCAN_OBJECT21	mTARGET7	3	0.0008 m	-0.0006 m	0.0003 m	-0.0004 m	0.0013 m	2.3285 m



Report by targets

User Name: CYRIL

Date: Mon Aug 20 10:33:32 2007  
Project Name: Project

Linear Measurement Units: Meter  
Coordinates System: X, Y, Z

3 STATION(S) - Mean Distance: 0.0011 Max Distance: 0.0014  
7 TARGET(S) - Mean Distance: 0.0011 Max Distance: 0.0020

mTARGET1 - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0005 - Mean Position: X=-3.3812 Y=1.8232 Z=-0.0009

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
...sphereNF_net_coupe_franche	SCAN_OBJECT1	0.0008 m	0.0006 m	-0.0002 m	-0.0004 m	0.0014 m	1.1613 m
...sphereNF_net_coupe_franche	SCAN_OBJECT8	0.0004 m	-0.0003 m	0.0002 m	0.0001 m	0.0016 m	0.9632 m
...sphereNF_net_coupe_franche	SCAN_OBJECT16	0.0004 m	-0.0003 m	0.0000 m	0.0002 m	0.0015 m	0.9304 m

mTARGET2 - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0006 - Mean Position: X=-1.2439 Y=1.7277 Z=-0.0023

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
...sphereNF_net_coupe_franche	SCAN_OBJECT2	0.0008 m	0.0000 m	0.0002 m	0.0007 m	0.0013 m	1.1864 m
...sphereNF_net_coupe_franche	SCAN_OBJECT9	0.0004 m	-0.0001 m	-0.0003 m	-0.0002 m	0.0014 m	1.4156 m
...sphereNF_net_coupe_franche	SCAN_OBJECT15	0.0005 m	0.0000 m	0.0002 m	-0.0005 m	0.0014 m	1.4255 m



**mTARGET3** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0020 - Mean Position: X=-2.1707 Y=1.7509 Z=-1.1650

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT3	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0027 m	-0.0024 m	0.0011 m	-0.0008 m	0.0013 m	1.5913 m
SCAN_OBJECT10	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0020 m	0.0020 m	0.0000 m	0.0001 m	0.0014 m	1.6747 m
SCAN_OBJECT17	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0014 m	0.0004 m	-0.0011 m	0.0007 m	0.0014 m	1.5902 m

**mTARGET4** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0010 - Mean Position: X=-2.0457 Y=1.1950 Z=-1.2755

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT5	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0015 m	0.0010 m	-0.0009 m	0.0008 m	0.0013 m	1.7249 m
SCAN_OBJECT11	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0007 m	-0.0005 m	0.0005 m	-0.0002 m	0.0014 m	1.8366 m
SCAN_OBJECT19	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0009 m	-0.0005 m	0.0004 m	-0.0006 m	0.0013 m	1.7238 m

**mTARGET5** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0010 - Mean Position: X=-2.3028 Y=1.1100 Z=-1.5338

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT6	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0013 m	-0.0013 m	-0.0001 m	-0.0002 m	0.0014 m	1.9705 m
SCAN_OBJECT12	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0012 m	0.0012 m	-0.0003 m	-0.0001 m	0.0014 m	2.0477 m
SCAN_OBJECT20	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0005 m	0.0001 m	0.0004 m	0.0003 m	0.0026 m	1.9235 m

**mTARGET6** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0010 - Mean Position: X=-2.6114 Y=1.2201 Z=-1.2778

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT4	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0008 m	0.0002 m	-0.0000 m	-0.0008 m	0.0013 m	1.7208 m
SCAN_OBJECT13	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0012 m	-0.0011 m	0.0002 m	0.0005 m	0.0014 m	1.7563 m
SCAN_OBJECT18	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0009 m	0.0009 m	-0.0002 m	0.0003 m	0.0013 m	1.6304 m

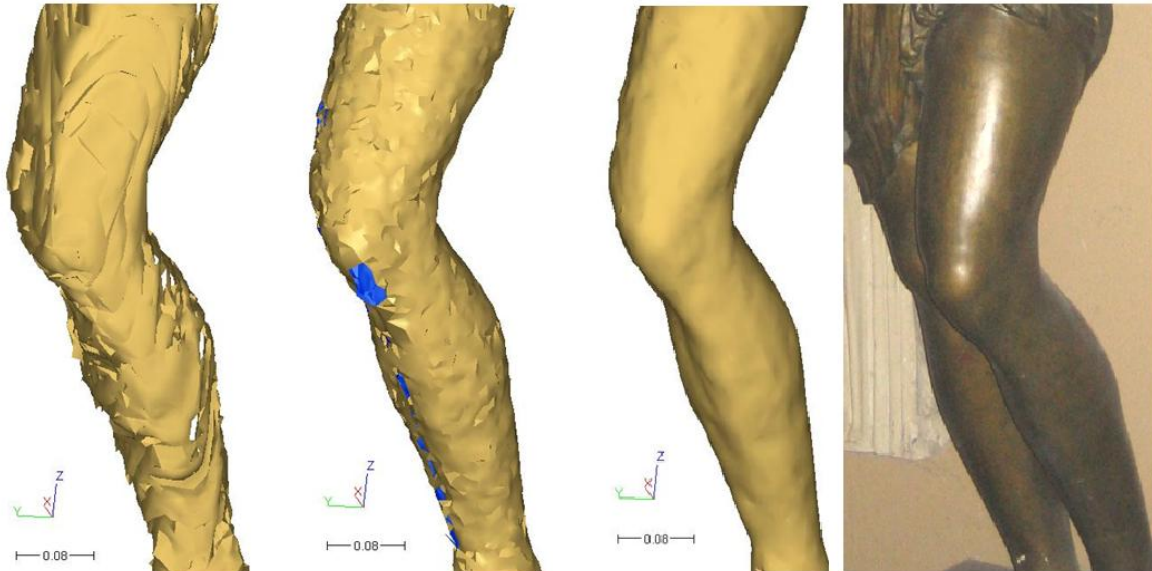
**INTARGET7** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0013 - Mean Position: X=-3.9320 Y=1.8442 Z=-1.5304

Object Name	Corresponding Station	Residual Error		Delta			Fitting Error		Distance to Scanner
				X	Y	Z			
SCAN_OBJECT7	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0019 m	0.0018 m	-0.0001 m	0.0006 m	0.0014 m	0.0004 m	2.5228 m	
SCAN_OBJECT14	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0012 m	-0.0012 m	-0.0003 m	-0.0002 m	0.0013 m	0.0013 m	2.4179 m	
SCAN_OBJECT21	...sphereNF_net_coupe_franche	0.0008 m	-0.0006 m	0.0003 m	-0.0004 m	0.0013 m	0.0013 m	2.3285 m	



## Annexe 19 : Modélisation d'une jambe de l'Amazone avec un filtre « moyenne »

Nous avons appliqué notre procédure avec un filtre « moyenne » sur une jambe de l'Amazone.



Sur l'illustration ci-dessus nous pouvons voir le maillage obtenu avec le nuage de points brut. Le résultat est très médiocre, nous notons la présence de trous, le maillage est irrégulier voire déformé.

La deuxième image correspond au maillage brut de la jambe après avoir filtré les données. Bien que le résultat soit meilleur, nous pouvons remarquer la présence de trous et d'irrégularités.

La troisième image est le résultat que nous obtenons après avoir retravaillé le maillage précédent et après avoir lissé le modèle.

Cependant le résultat demeure quelque peu décevant. En effet nous ne parvenons pas à obtenir une surface aussi lisse que sur la photo.

Nous avons projeté le nuage brut sur le modèle obtenu afin de réaliser une cartographie des écarts : 90.5% des points sont situés à  $\pm 4.5$  mm du modèle. L'écart maximal est 3 cm sur une partie reconstruite derrière la jambe à la limite du nuage de points.



Compare Mesh / jambe\_brute 1

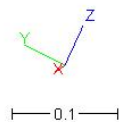
0% 0.03372 Set  
Max  
6.65%  
Middle\_max 0.0045330  
90.5% Middle\_range  
Middle\_min -0.0045330  
2.81%  
Min -0.0226 Set  
0%

Undefined

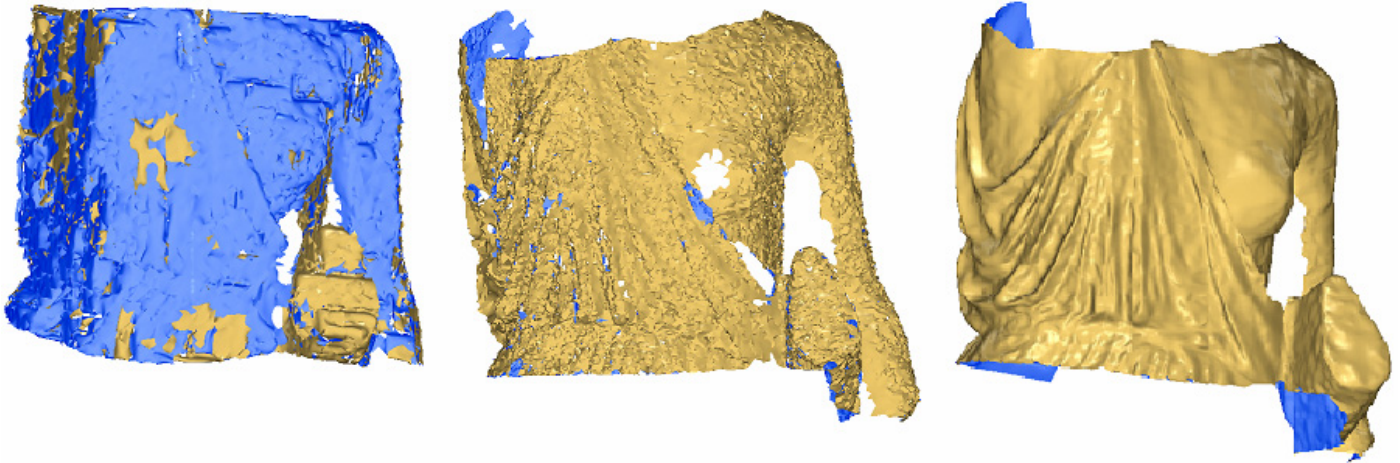
Default  
Save Restore  
Coloring method HSL Shortest

Display is scene  
 No display  
 ForeGround  
 BackGround

OK Cancel

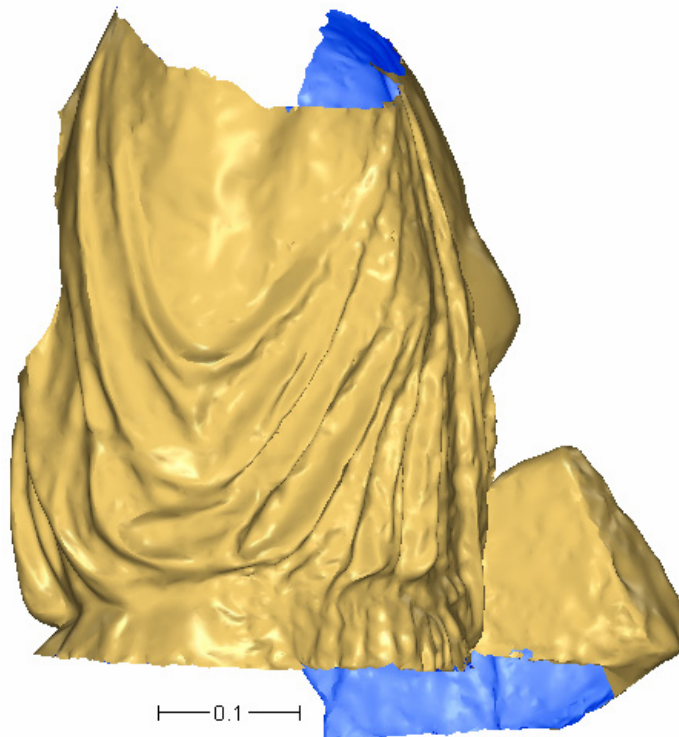
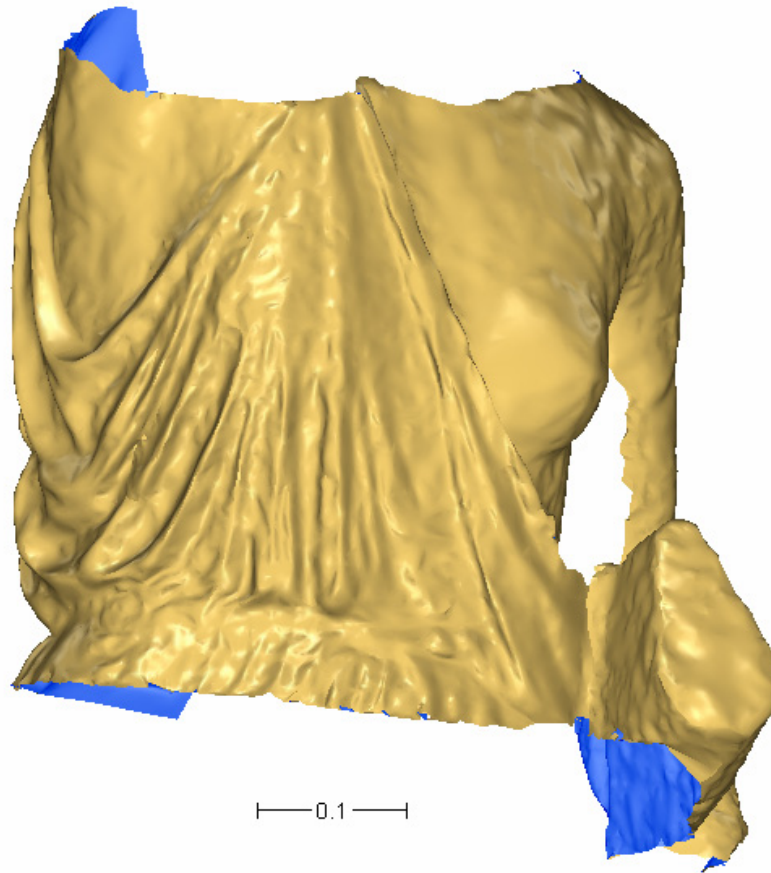


***Annexe 20 : Comparaison des maillages du nuage brut, du nuage filtré et du modèle final Faro.***

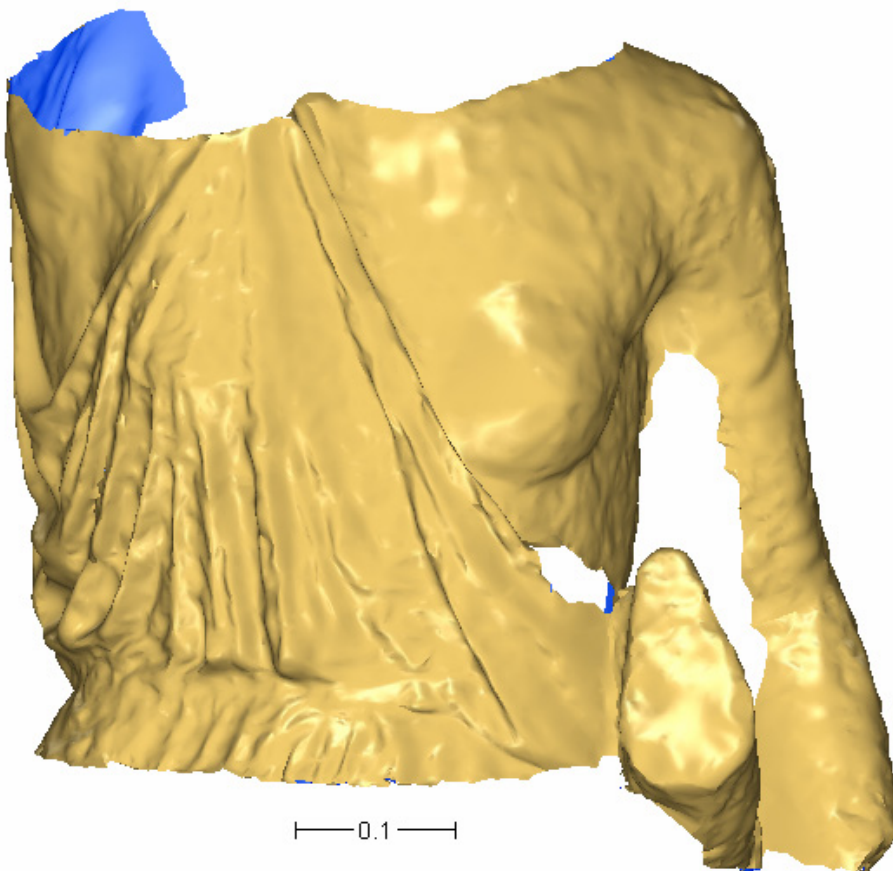
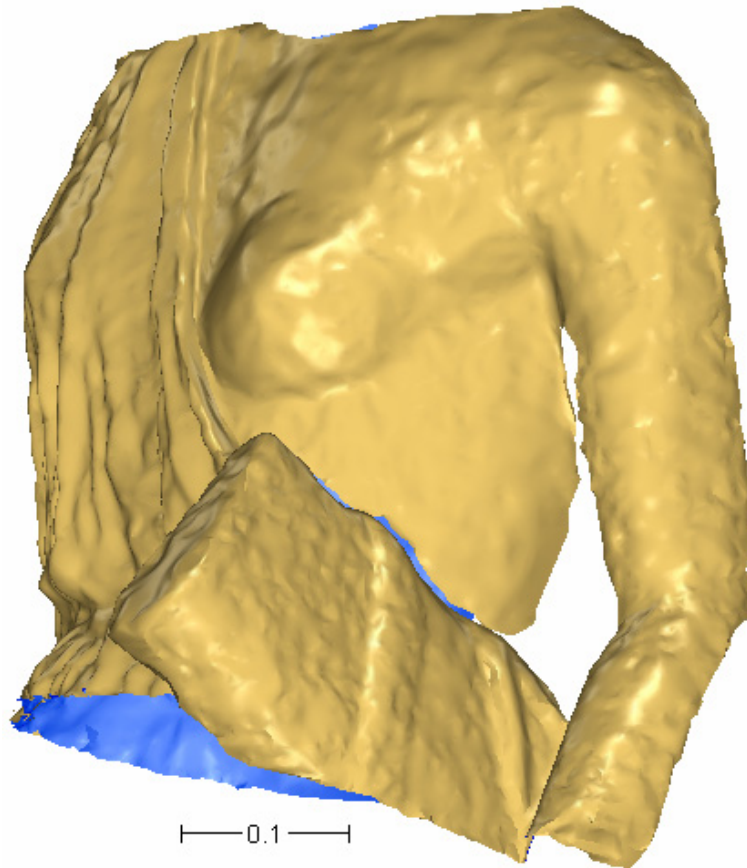


Dans l'ordre de gauche à droite : maillage du nuage brut, maillage brut du nuage filtré, modèle final Faro.

**Annexe 21 : Vues du modèle du buste Faro**







**Annexe 22 : Rapport d'erreur de la consolidation du buste issu des données Trimble**

**Target-Based Registration  
Report by stations**

User Name: Cyril  
 Date: Mon Aug 27 11:00:05 2007  
 Project Name: Project

Linear Measurement Units: Meter  
 Coordinates System: X, Y, Z

3 STATION(S) - Mean Distance: 0.0018 Max Distance: 0.0022  
 9 TARGET(S) - Mean Distance: 0.0018 Max Distance: 0.0025

**buste3\_sphereNF\_coupe\_franche - 7 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0017**

Object Name	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
				X	Y	Z		
SCAN_OBJECT20	mTARGET8	3	0.0011 m	0.0005 m	0.0002 m	0.0021 m	1.6142 m	
SCAN_OBJECT21	--	--	--	--	--	0.0018 m	1.9901 m	
SCAN_OBJECT22	mTARGET11	3	0.0024 m	-0.0010 m	-0.0005 m	0.0016 m	1.9541 m	
SCAN_OBJECT23	--	--	--	--	--	0.0019 m	1.8678 m	
SCAN_OBJECT24	mTARGET9	3	0.0023 m	0.0014 m	0.0000 m	0.0017 m	1.7481 m	
SCAN_OBJECT25	--	--	--	--	--	0.0013 m	2.1405 m	
SCAN_OBJECT26	mTARGET10	3	0.0009 m	-0.0005 m	0.0002 m	0.0012 m	1.7839 m	



**bustel\_sphereNF\_coupe\_franche - 9 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0022**

Object Name	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
				X	Y	Z		
SCAN_OBJECT1	mTARGET7	2	0.0016.m	-0.0016.m	0.0002.m	-0.0000.m	0.0013.m	2.1281.m
SCAN_OBJECT2	mTARGET9	3	0.0030.m	-0.0024.m	0.0017.m	0.0002.m	0.0032.m	1.8278.m
SCAN_OBJECT3	mTARGET10	3	0.0028.m	-0.0025.m	0.0013.m	-0.0000.m	0.0024.m	1.4411.m
SCAN_OBJECT4	mTARGET14	2	0.0021.m	-0.0020.m	0.0005.m	-0.0004.m	0.0036.m	0.0714.m
SCAN_OBJECT9	mTARGET13	2	0.0021.m	0.0020.m	-0.0002.m	-0.0003.m	0.0017.m	2.1623.m
SCAN_OBJECT10	mTARGET5	2	0.0005.m	0.0004.m	-0.0001.m	-0.0004.m	0.0015.m	1.7839.m
SCAN_OBJECT11	mTARGET8	3	0.0016.m	0.0016.m	-0.0003.m	0.0002.m	0.0022.m	2.0128.m
SCAN_OBJECT12	mTARGET11	3	0.0035.m	0.0027.m	-0.0022.m	0.0002.m	0.0031.m	1.6784.m
SCAN_OBJECT13	mTARGET12	2	0.0025.m	0.0021.m	-0.0012.m	0.0002.m	0.0027.m	1.3162.m

**buste2\_sphereNF\_coupe\_franche - 10 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0016**

Object Name	Corresponding Target	Scan Per Target	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
				X	Y	Z		
SCAN_OBJECT5	mTARGET7	2	0.0016.m	0.0016.m	-0.0002.m	0.0000.m	0.0032.m	2.0914.m
SCAN_OBJECT6	mTARGET9	3	0.0010.m	0.0010.m	0.0001.m	-0.0002.m	0.0031.m	1.7919.m
SCAN_OBJECT7	mTARGET14	2	0.0021.m	0.0020.m	-0.0005.m	0.0004.m	0.0017.m	0.0730.m
SCAN_OBJECT8	mTARGET10	3	0.0021.m	0.0020.m	-0.0005.m	-0.0002.m	0.0025.m	1.4234.m
SCAN_OBJECT14	mTARGET13	2	0.0021.m	-0.0020.m	0.0002.m	0.0003.m	0.0024.m	2.1008.m
SCAN_OBJECT15	mTARGET5	2	0.0005.m	-0.0004.m	0.0001.m	0.0004.m	0.0026.m	1.7260.m
SCAN_OBJECT16	--	--	--	--	--	--	0.0021.m	0.2807.m
SCAN_OBJECT17	mTARGET8	3	0.0008.m	-0.0006.m	-0.0001.m	-0.0005.m	0.0025.m	1.9699.m
SCAN_OBJECT18	mTARGET11	3	0.0018.m	-0.0018.m	0.0001.m	0.0003.m	0.0032.m	1.6459.m
SCAN_OBJECT19	mTARGET12	2	0.0025.m	-0.0021.m	0.0012.m	-0.0002.m	0.0021.m	1.3087.m

Report by targets

User Name: cyril  
 Date: Mon Aug 27 11:00:05 2007  
 Project Name: Project

Linear Measurement Units: Meter  
 Coordinates System: X, Y, Z

3 STATION(S) - Mean Distance: 0.0018 Max Distance: 0.0022  
 9 TARGET(S) - Mean Distance: 0.0018 Max Distance: 0.0025

mTARGET5 - 2 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0005 - Mean Position: X=2.0574 Y=-3.8132 Z=0.0912

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT10	buste1_sphereNF_coupe_franche	0.0005.m	0.0004.m	-0.0001.m	-0.0004.m	0.0015.m	1.7839.m
SCAN_OBJECT15	buste2_sphereNF_coupe_franche	0.0005.m	-0.0004.m	0.0001.m	0.0004.m	0.0026.m	1.7260.m

mTARGET7 - 2 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0016 - Mean Position: X=2.0128 Y=-3.7634 Z=-1.0794

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT1	buste1_sphereNF_coupe_franche	0.0016.m	-0.0016.m	0.0002.m	-0.0000.m	0.0013.m	2.1281.m
SCAN_OBJECT5	buste2_sphereNF_coupe_franche	0.0016.m	0.0016.m	-0.0002.m	0.0000.m	0.0032.m	2.0914.m

mTARGET8 - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0012 - Mean Position: X=1.8363 Y=-3.1579 Z=-1.1849

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT11	buste1_sphereNF_coupe_franche	0.0016.m	0.0016.m	-0.0003.m	0.0002.m	0.0022.m	2.0128.m
SCAN_OBJECT17	buste2_sphereNF_coupe_franche	0.0008.m	-0.0006.m	-0.0001.m	-0.0005.m	0.0025.m	1.9699.m
SCAN_OBJECT20	buste3_sphereNF_coupe_franche	0.0011.m	-0.0009.m	0.0005.m	0.0002.m	0.0021.m	1.6142.m





**mTARGET9** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0021 - Mean Position: X=1.5901 Y=-3.0450 Z=-1.1572

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
			X	Y	Z		
SCAN_OBJECT2 buste1_sphereNF_coupe_franche		0.0030 m	-0.0024 m	0.0017 m	0.0002 m	0.0032 m	1.8278 m
SCAN_OBJECT6 buste2_sphereNF_coupe_franche		0.0010 m	0.0010 m	0.0001 m	-0.0002 m	0.0031 m	1.7919 m
SCAN_OBJECT24 buste3_sphereNF_coupe_franche		0.0023 m	0.0014 m	-0.0018 m	0.0000 m	0.0017 m	1.7481 m

**mTARGET10** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0019 - Mean Position: X=1.1186 Y=-3.4625 Z=-1.0419

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
			X	Y	Z		
SCAN_OBJECT3 buste1_sphereNF_coupe_franche		0.0028 m	-0.0025 m	0.0013 m	-0.0000 m	0.0024 m	1.4411 m
SCAN_OBJECT8 buste2_sphereNF_coupe_franche		0.0021 m	0.0020 m	-0.0005 m	-0.0002 m	0.0025 m	1.4234 m
SCAN_OBJECT26 buste3_sphereNF_coupe_franche		0.0009 m	0.0005 m	-0.0007 m	0.0002 m	0.0012 m	1.7839 m

**mTARGET11** - 3 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0025 - Mean Position: X=1.2965 Y=-2.9794 Z=-1.1834

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
			X	Y	Z		
SCAN_OBJECT12 buste1_sphereNF_coupe_franche		0.0035 m	0.0027 m	-0.0022 m	0.0002 m	0.0031 m	1.6784 m
SCAN_OBJECT18 buste2_sphereNF_coupe_franche		0.0018 m	-0.0018 m	0.0001 m	0.0003 m	0.0032 m	1.6459 m
SCAN_OBJECT22 buste3_sphereNF_coupe_franche		0.0024 m	-0.0010 m	0.0021 m	-0.0005 m	0.0016 m	1.9541 m

**mTARGET12** - 2 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0025 - Mean Position: X=0.8069 Y=-3.4511 Z=-1.0552

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta			Fitting Error	Distance to Scanner
			X	Y	Z		
SCAN_OBJECT13 buste1_sphereNF_coupe_franche		0.0025 m	0.0021 m	-0.0012 m	0.0002 m	0.0027 m	1.3162 m
SCAN_OBJECT19 buste2_sphereNF_coupe_franche		0.0025 m	-0.0021 m	0.0012 m	-0.0002 m	0.0021 m	1.3087 m

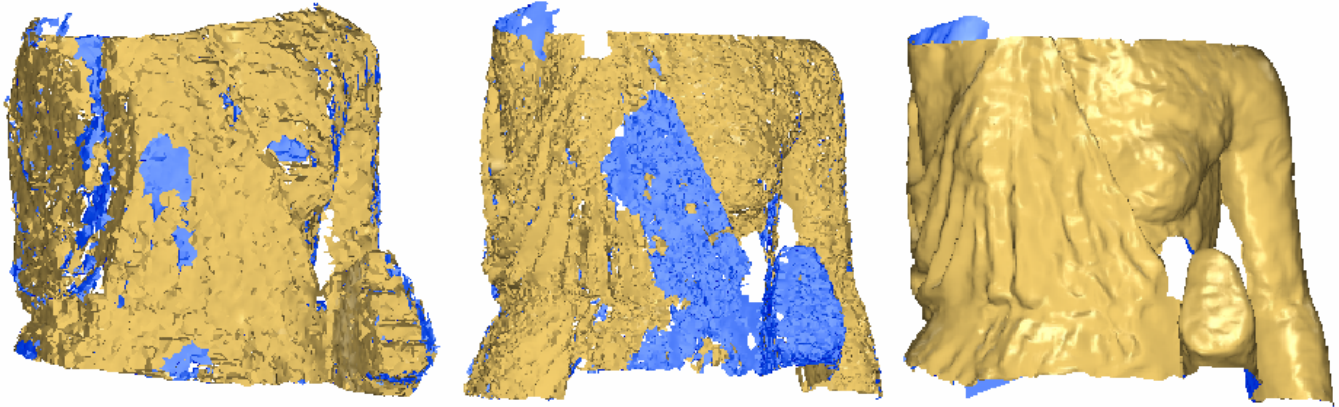
mTARGET13 - 2 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0021 m - Mean Position: X=2.4201 Y=-3.9162 Z=0.0878

Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT9	buste1_sphereNF_coupe_franche	0.0021 m	0.0020 m	-0.0002 m	-0.0003 m	0.0017 m	2.1623 m
SCAN_OBJECT14	buste2_sphereNF_coupe_franche	0.0021 m	-0.0020 m	0.0002 m	0.0003 m	0.0024 m	2.1008 m

mTARGET14 - 2 Scanned Objects - Mean Distance: 0.0021 m - Mean Position: X=0.4039 Y=-3.2933 Z=0.1165

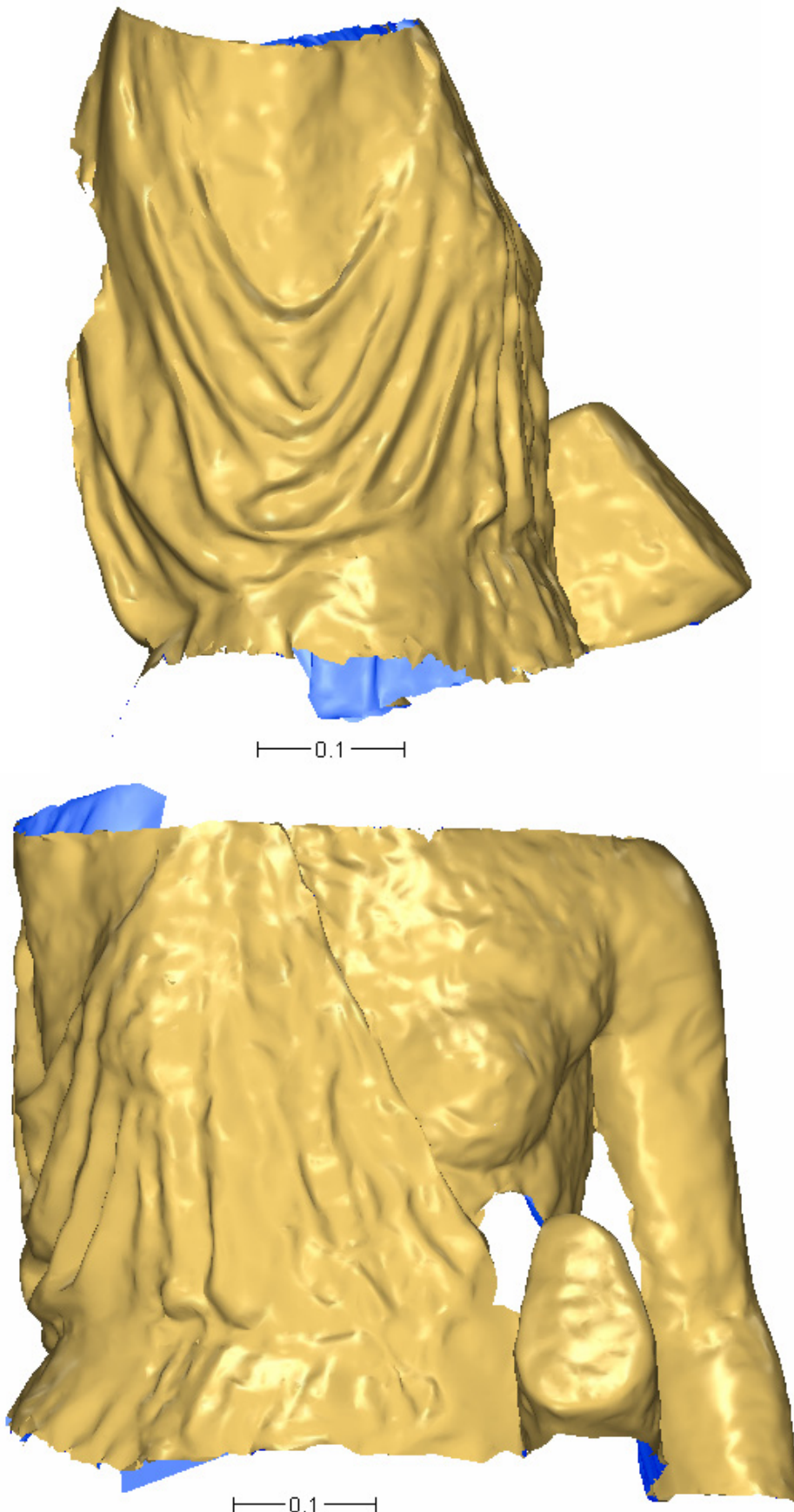
Object Name	Corresponding Station	Residual Error	Delta X	Delta Y	Delta Z	Fitting Error	Distance to Scanner
SCAN_OBJECT4	buste1_sphereNF_coupe_franche	0.0021 m	-0.0020 m	0.0005 m	-0.0004 m	0.0036 m	0.0714 m
SCAN_OBJECT7	buste2_sphereNF_coupe_franche	0.0021 m	0.0020 m	-0.0005 m	0.0004 m	0.0017 m	0.0730 m

***Annexe 23 : Comparaison des maillages du nuage brut, du nuage filtré et du modèle final Trimble.***

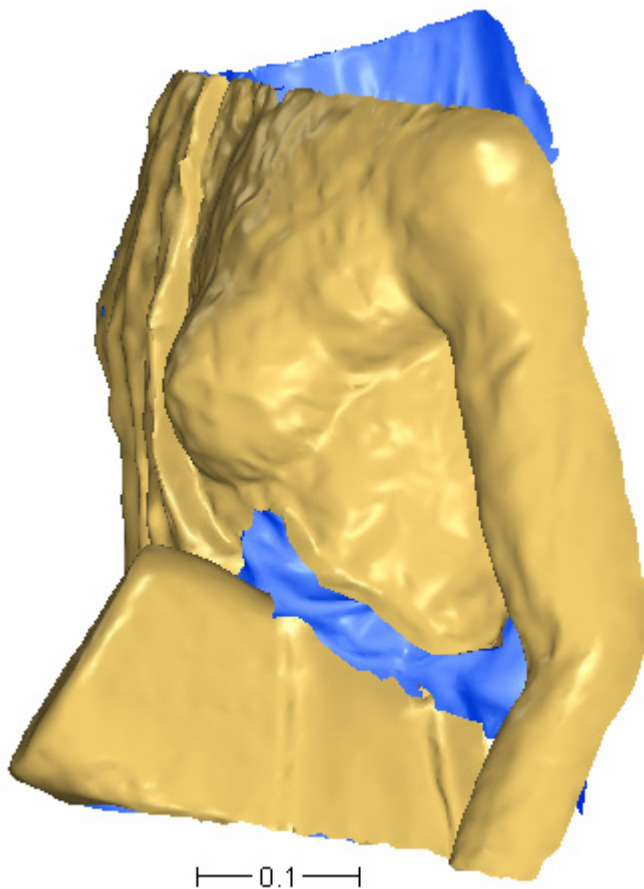
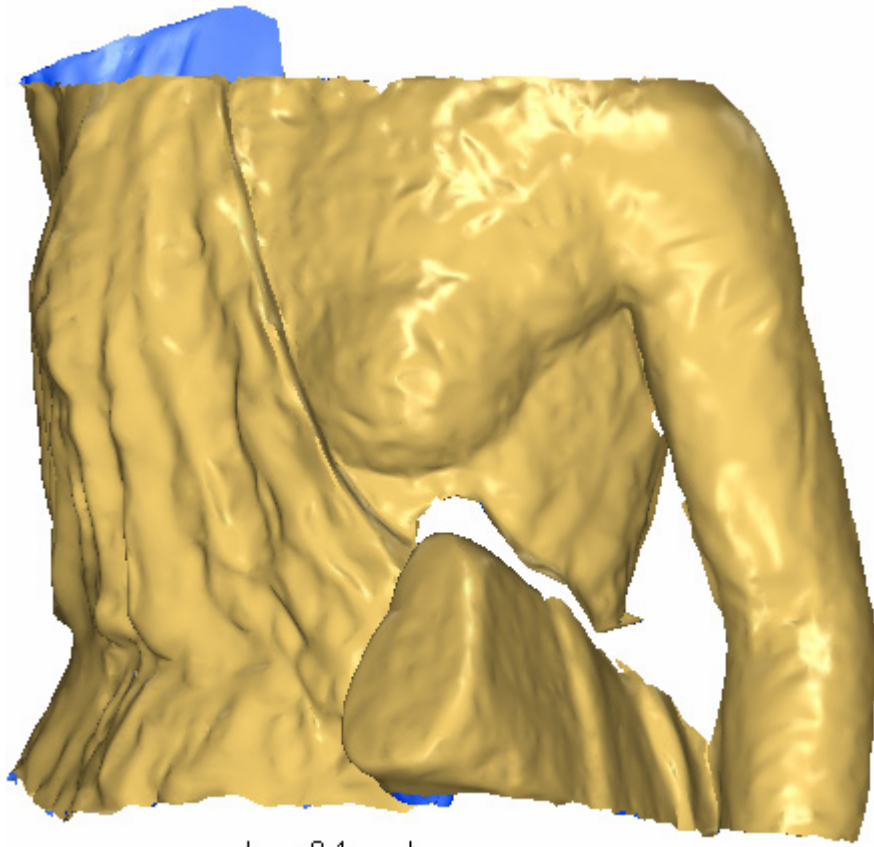


Dans l'ordre de gauche à droite : maillage du nuage brut, maillage brut du nuage filtré, modèle final Trimble.

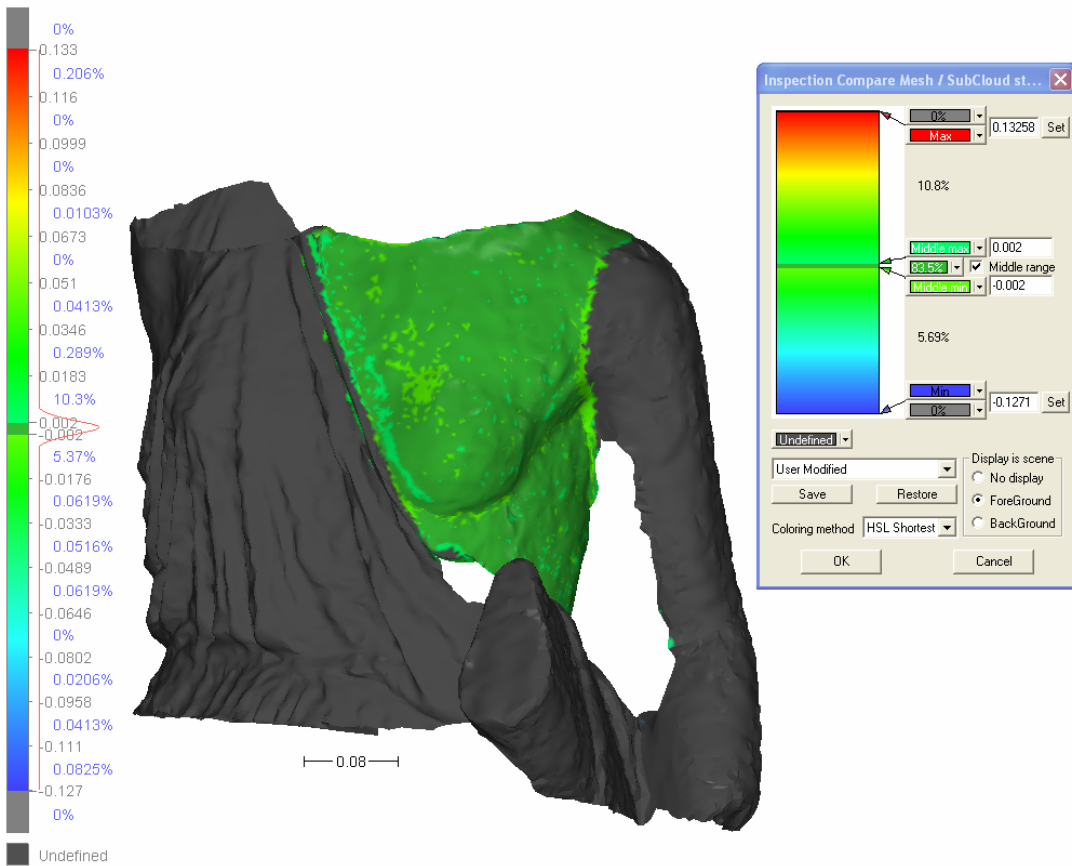
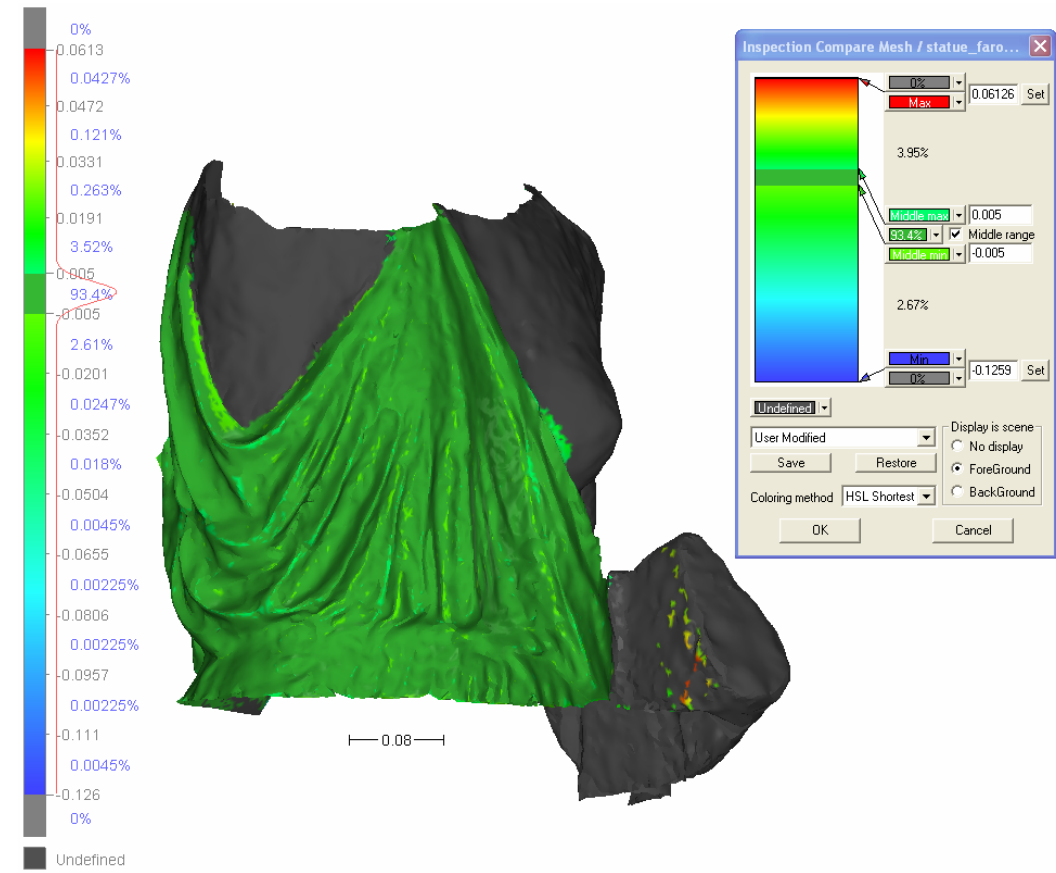
**Annexe 24 : Vues du modèle du buste Trimble**

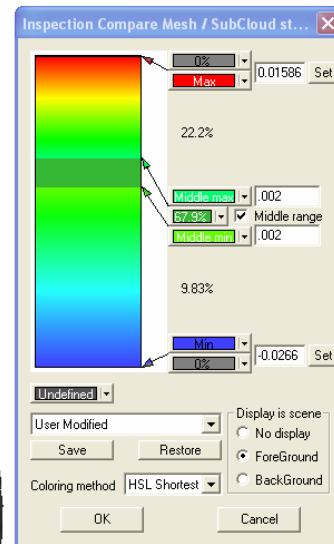
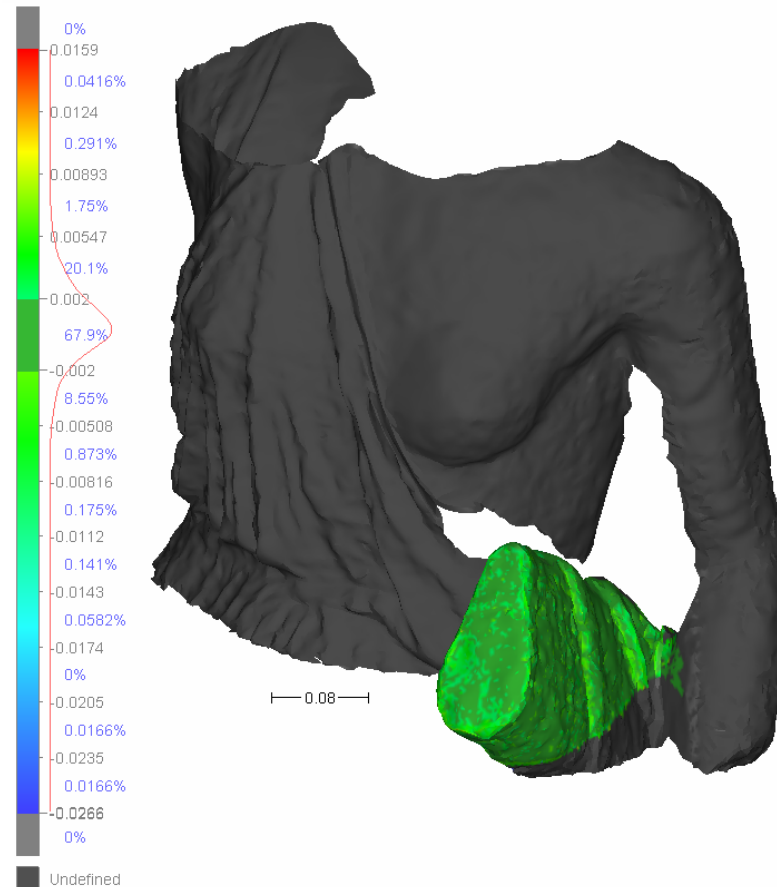
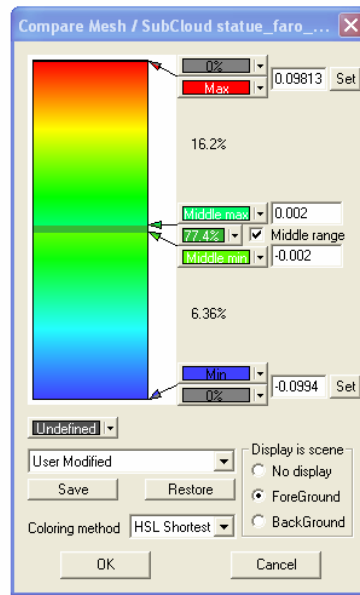
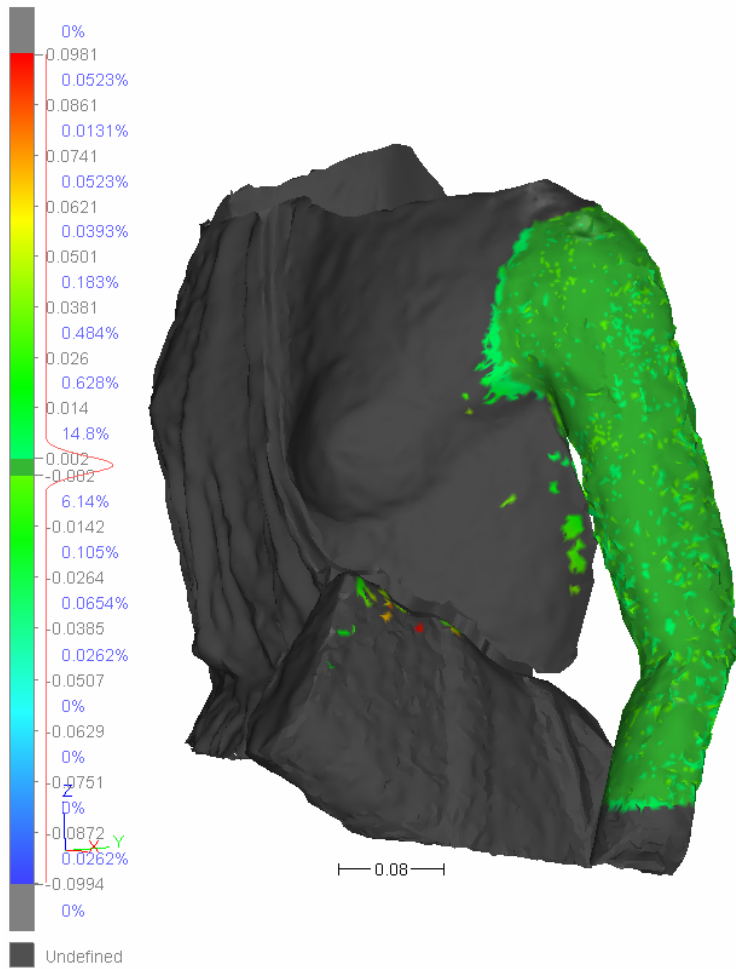


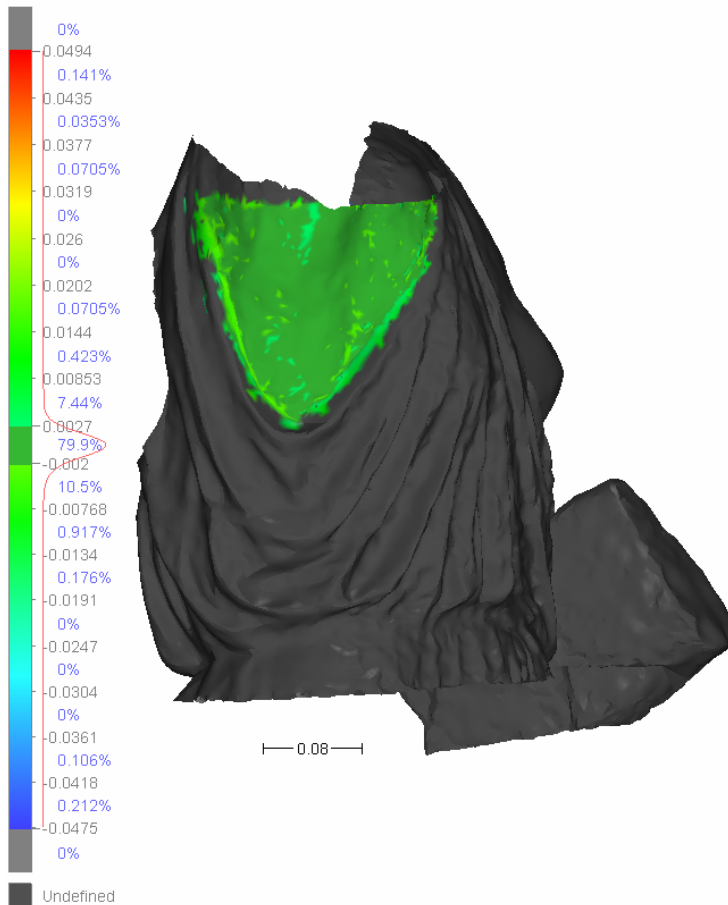




## Annexe 25 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Faro et le modèle Faro







Inspection Compare Mesh / SubCloud st...

0%  
Max 0.04935 Set  
8.18%  
Middle max 0.0027  
79.9% Middle range  
Middle min -0.002  
12%  
Min -0.0474 Set  
0%

Undefined

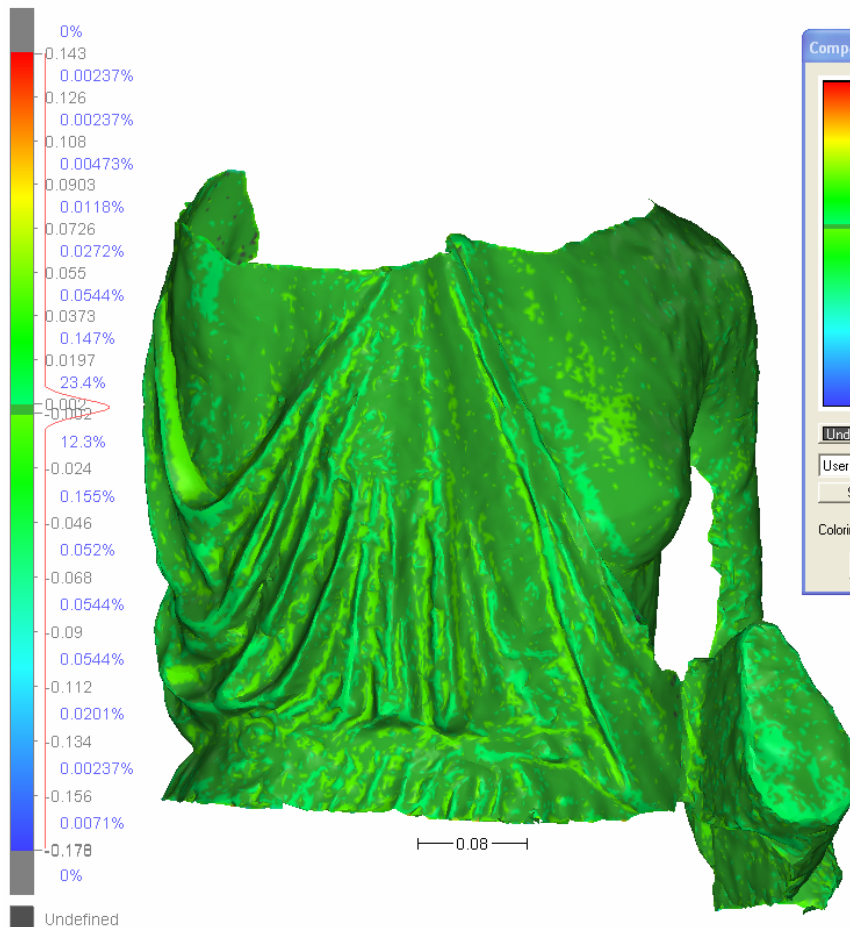
User Modified

Save Restore

Coloring method HSL Shortest

Display is scene  
 No display  
 ForeGround  
 BackGround

OK Cancel



Compare Mesh / statue\_faro\_brute 1

0%  
Max 0.14327 Set  
23.6%  
Middle max 0.002  
63.7% Middle range  
Middle min -0.002  
12.7%  
Min -0.1780 Set  
0%

Undefined

User Modified

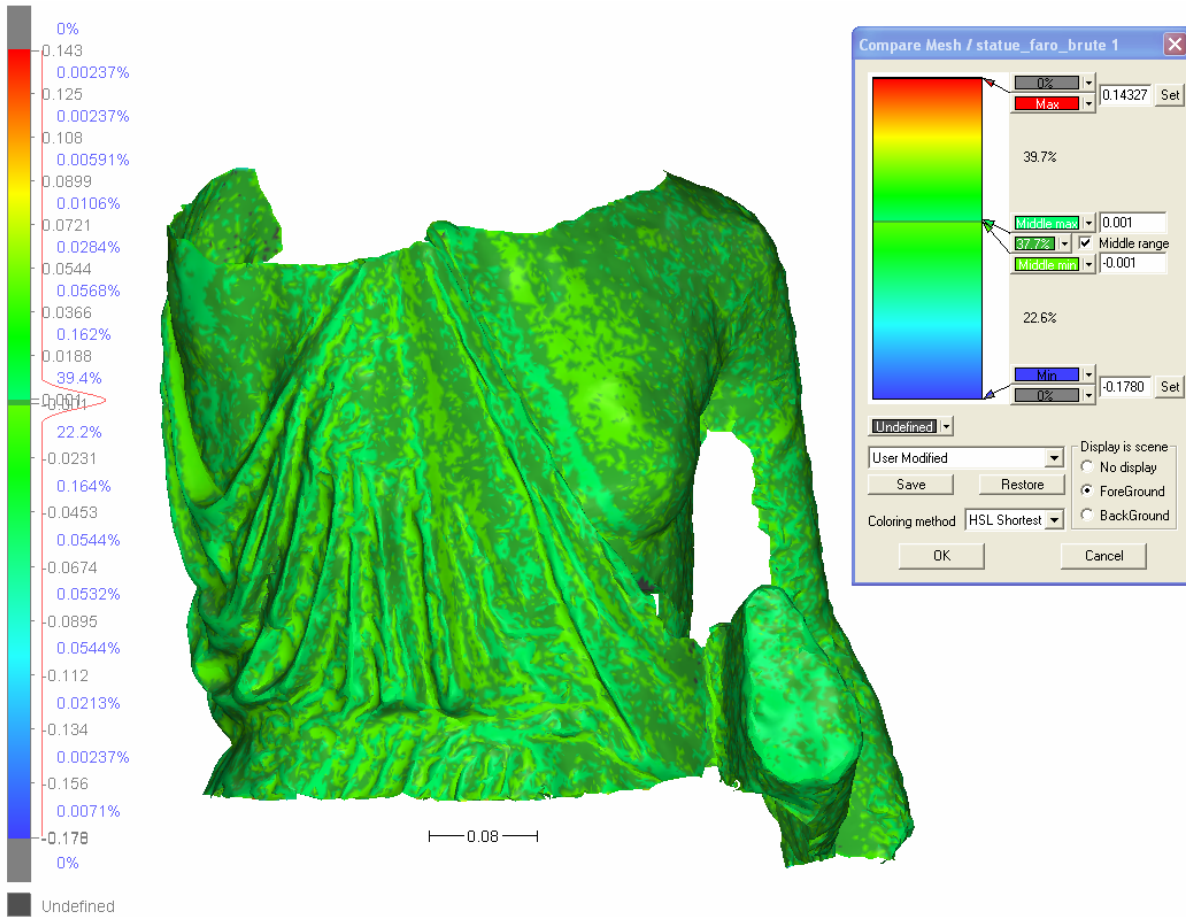
Save Restore

Coloring method HSL Shortest

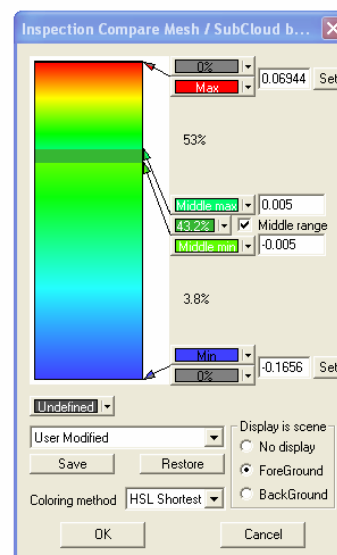
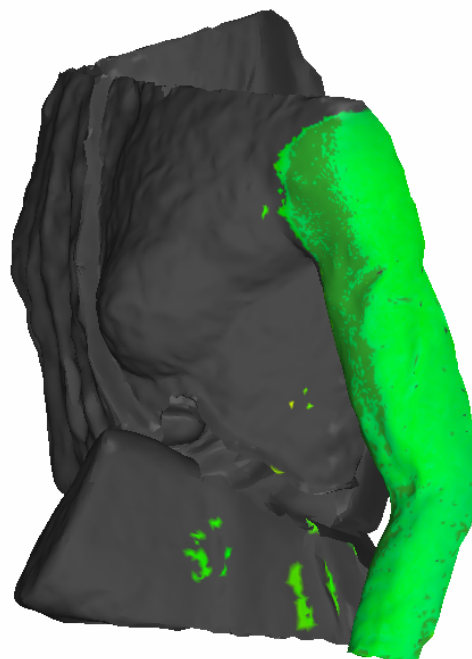
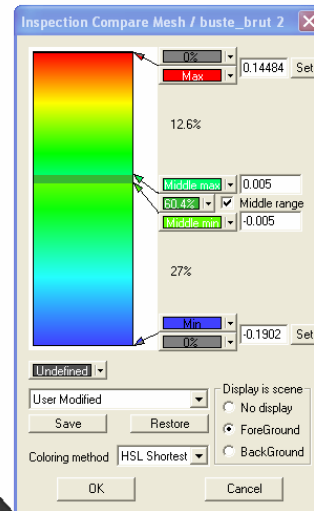
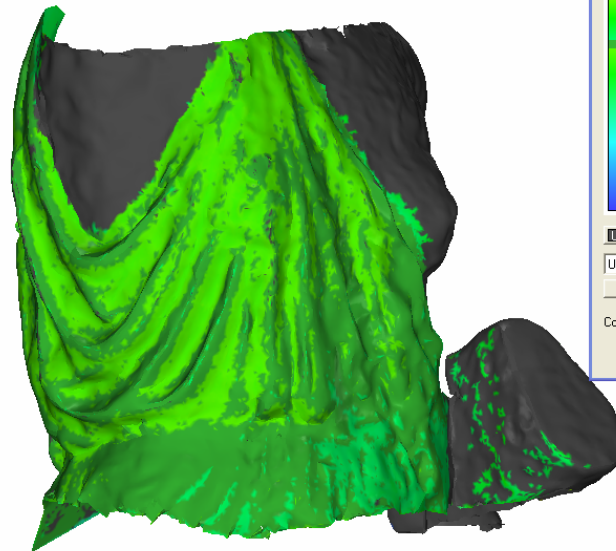
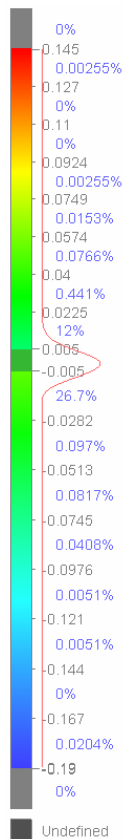
Display is scene  
 No display  
 ForeGround  
 BackGround

OK Cancel

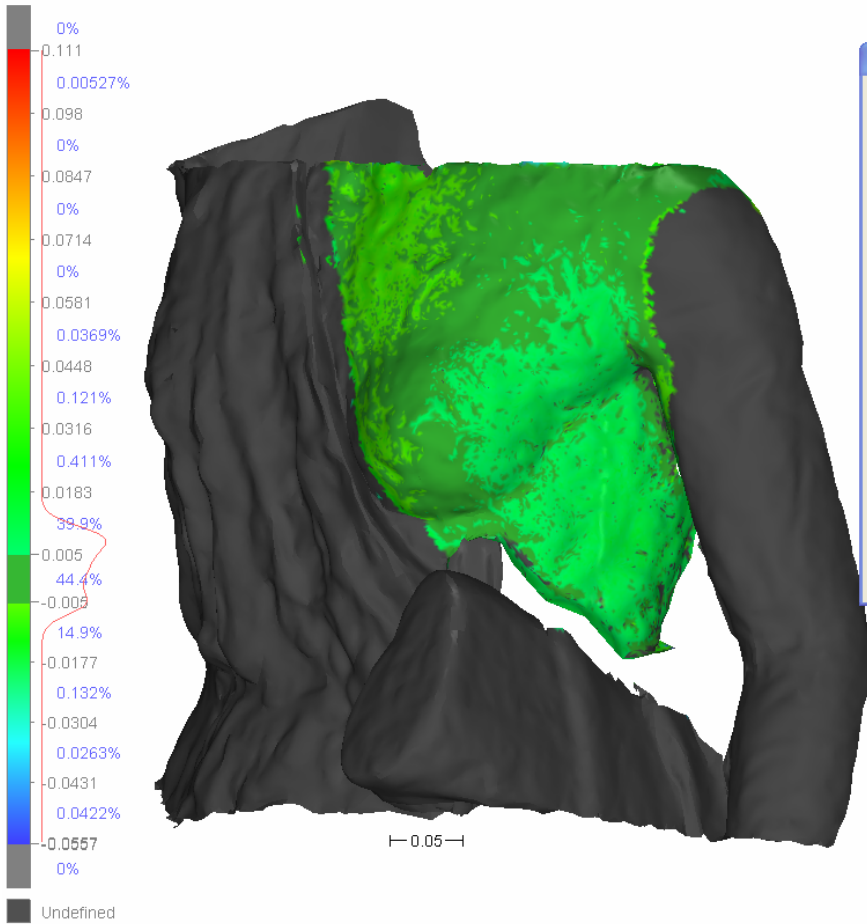




## Annexe 26 : Cartographie des écarts entre le nuage brut Trimble et le modèle Trimble







Inspection Compare Mesh / SubCloud b...

0% Max 0.11126 Set

40.5%

Middle max 0.005  
44.4% Middle range  
Middle min -0.005

15.1%

Min -0.0557 Set

0%

Undefined

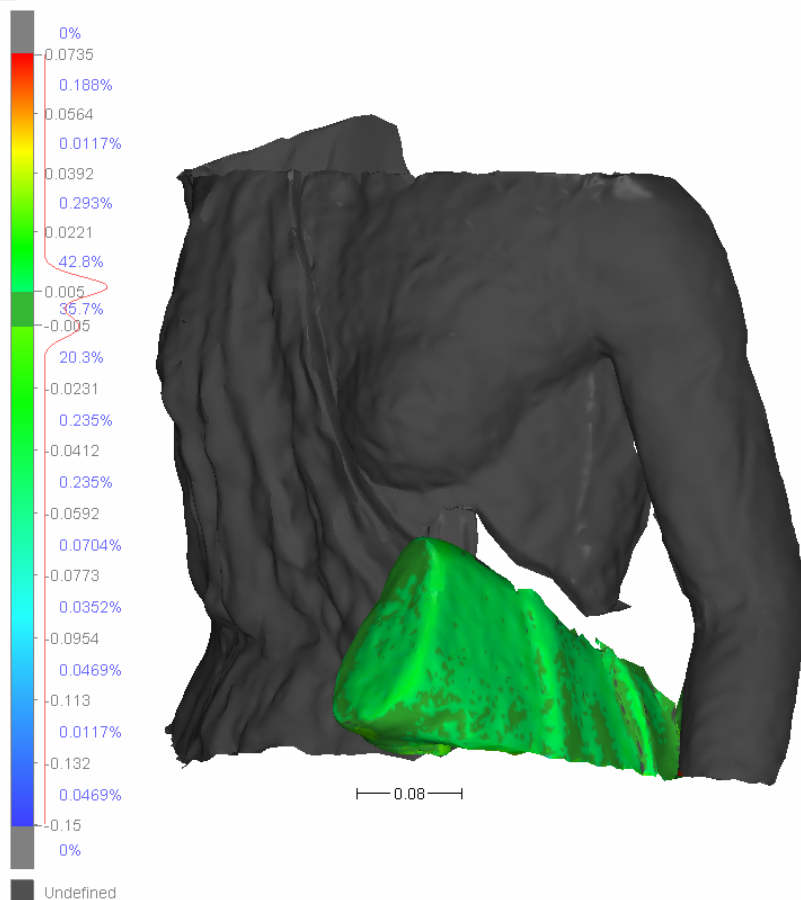
User Modified

Save Restore

Coloring method HSL Shortest

Display is scene  
 No display  
 ForeGround  
 BackGround

OK Cancel



Inspection Compare Mesh / SubCloud b...

0% Max 0.07346 Set

43.3%

Middle max 0.005  
35.7% Middle range  
Middle min -0.005

21%

Min -0.1496 Set

0%

Undefined

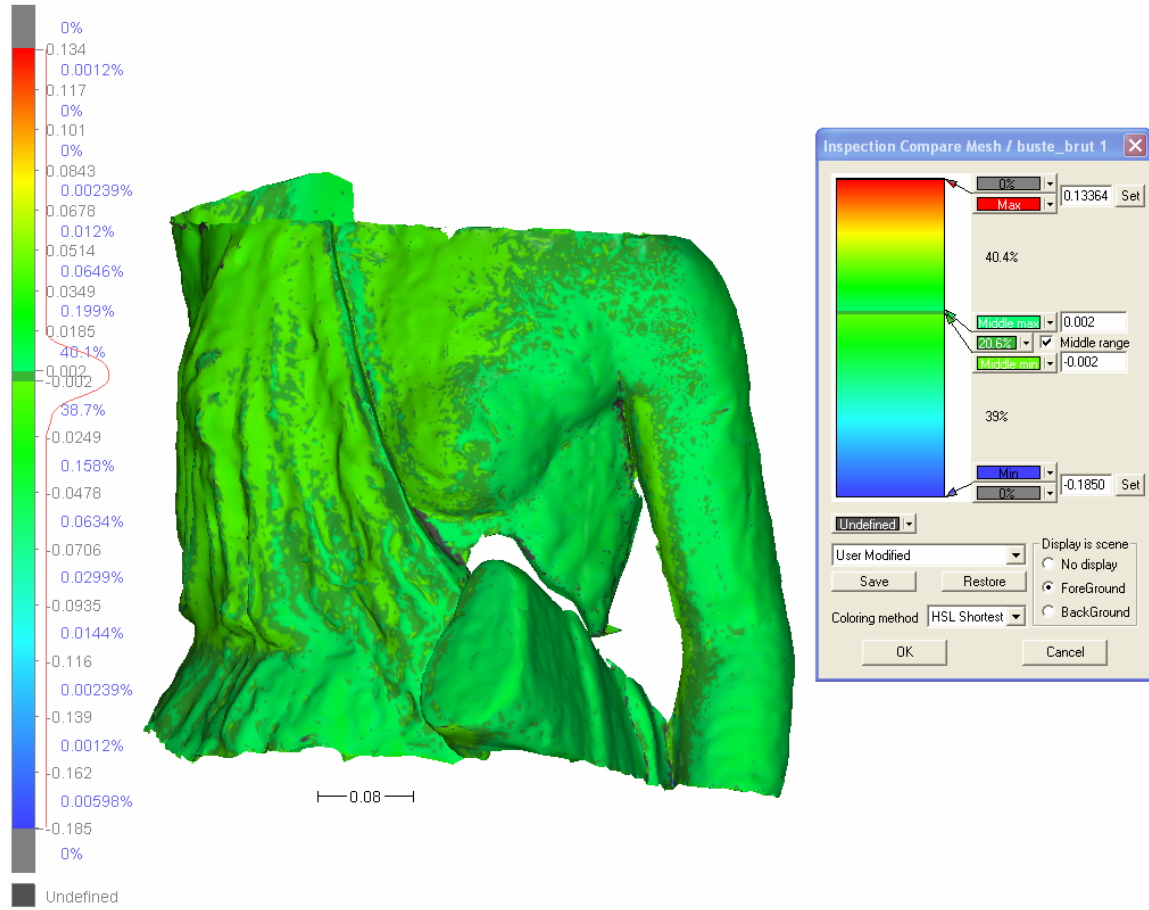
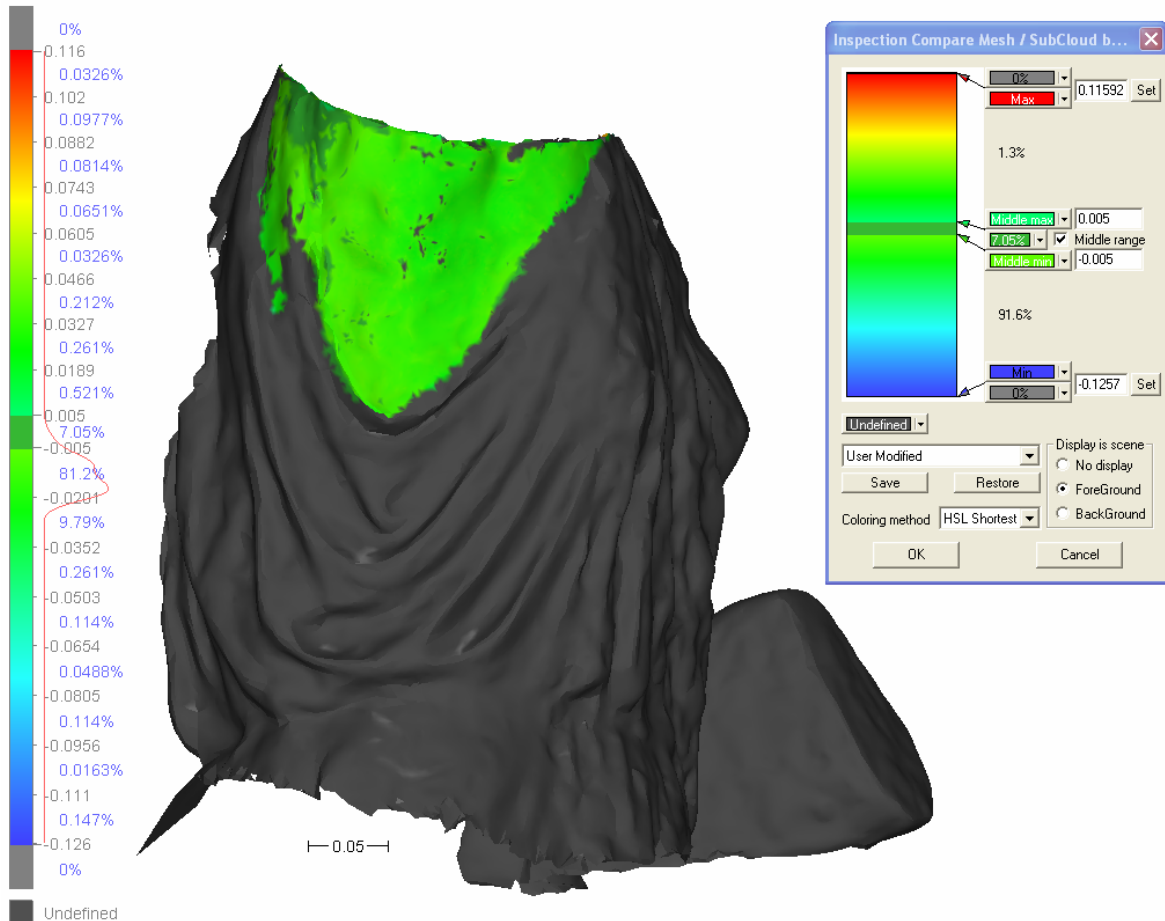
User Modified

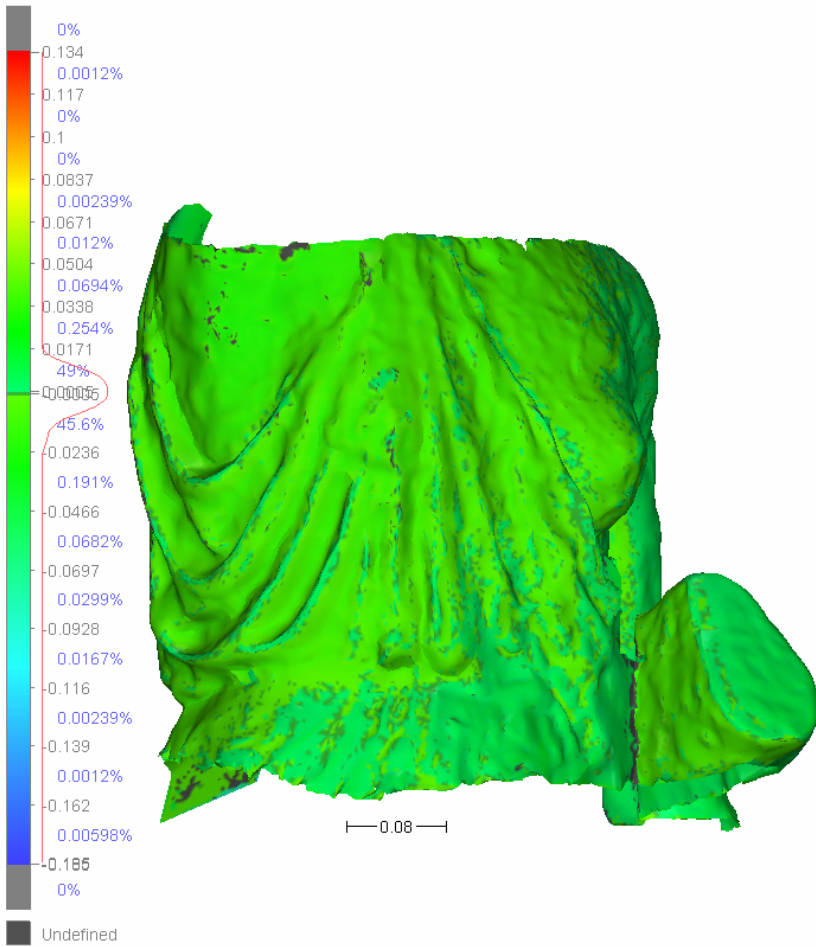
Save Restore

Coloring method HSL Shortest

Display is scene  
 No display  
 ForeGround  
 BackGround

OK Cancel





Inspection Compare Mesh / buste\_brut 1

0%  
Max 0.13364 Set  
49.4%  
Middle max 0.0005  
4.75% Middle range  
Middle min -0.0005  
45.9%  
Min -0.1850 Set  
0%

Undefined

User Modified

Save Restore

Coloring method HSL Shortest

Display is scene  
 No display  
 ForeGround  
 BackGround

OK Cancel

**Annexe 27 : Numérisation au Handyscan d'un buste en plâtre blanc**

