

---

# Table des matières

---

<b>Introduction</b> . . . . .	11
<b>Chapitre 1. Les besoins spécifiques à la numérisation 3D d'édifices remarquables</b> . . . . .	15
1.1. L'offre existante en données 3D haute résolution . . . . .	15
1.2. L'expression des besoins . . . . .	17
1.2.1. Potentiels . . . . .	17
1.2.2. Traduction en cahier des charges . . . . .	18
1.2.3. Spécifications techniques de relevé . . . . .	19
1.3. Les méthodes de relevé existantes . . . . .	20
1.3.1. Méthodes d'acquisition existantes . . . . .	20
1.3.2. Exemples de relevés . . . . .	21
1.3.3. Eléments de géoréférencement . . . . .	21
1.4. Du cahier des charges à la réalisation . . . . .	24
1.4.1. Reconnaissance . . . . .	24
1.4.2. Acquisition . . . . .	26
1.4.3. Traitement des données . . . . .	26
1.5. Bibliographie . . . . .	28
<b>Chapitre 2. Numérisation à partir d'images</b> . . . . .	31
2.1. Historique en France . . . . .	31
2.2. Matériel . . . . .	33
2.2.1. Le matériel historique . . . . .	33
2.2.2. Modernisation de l'équipement . . . . .	35
2.2.3. Les caméras . . . . .	35

2.2.3.1. Caméras argentiques . . . . .	36
2.2.4. Comment mesurer avec une caméra ? . . . . .	37
2.2.4.1. Modélisation de la matière première : l'image . . . . .	37
2.2.4.2. Résolution spatiale des images . . . . .	37
2.2.4.3. Condition de colinéarité – Formule d'image . . . . .	39
2.2.4.4. Détermination des paramètres de la formule d'image : mise en place photogrammétrique . . . . .	39
2.2.4.5. Utilisation des images mises en place . . . . .	41
2.3. Acquisition des images . . . . .	41
2.3.1. Caractéristiques des images . . . . .	41
2.3.1.1. Exposition . . . . .	42
2.3.1.2. Netteté . . . . .	42
2.3.1.3. Format des images . . . . .	42
2.3.2. La prise de vues stéréoscopique traditionnelle . . . . .	44
2.3.3. La prise de vues stéréoscopique pour la production automatique de nuages de points 3D . . . . .	45
2.3.3.1. Augmenter les recouvrements de 60 à 80 % pour garantir le succès des algorithmes d'appariement . . . . .	45
2.3.3.2. Ne pas hésiter à prendre des photos convergentes . . . . .	46
2.3.3.3. Lier les éventuels points de vue pour que tout soit exprimé dans un unique système de coordonnées . . . . .	46
2.3.3.4. Prendre des images spécifiques destinées à calculer l'étalonnage de la caméra . . . . .	47
2.3.3.5. Doubler si possible les bases stéréoscopiques latérales par des bases stéréoscopiques perpendiculaires pour rendre les algorithmes d'appariement plus robustes . . . . .	47
2.3.3.6. Doubler les prises de vues faites avec un objectif à longue focale de prises de vue au grand-angle . . . . .	48
2.3.3.7. Eviter le vide (ciel, zones sans texture), les surfaces brillantes et les motifs répétitifs . . . . .	49
2.3.4. Les dispositifs de prise de vue . . . . .	49
2.3.4.1. Pied photo, mât, perche . . . . .	49
2.3.4.2. Tête panoramique . . . . .	51
2.3.4.3. Acquisitions mobiles . . . . .	51
2.3.4.4. Mode vidéo . . . . .	53
2.3.4.5. Caméras stéréoscopiques et caméra « temps de vol » . . . . .	53
2.3.5. Eléments de géoréférencement . . . . .	54
2.4. Mise en place des images . . . . .	54
2.4.1. Principes . . . . .	54
2.4.2. Automatisation . . . . .	57
2.4.2.1. Automatisation de la mesure des points de liaison . . . . .	57

2.4.2.2. Semi-automatisation de la mesure des points d'appui . . . . .	59
2.4.2.3. Mise en place des images et auto-étalonnage . . . . .	59
2.4.3. Stratégies de mise en place de l'ensemble des images d'un chantier. . . . .	60
2.4.4. Qualification de la mise en place des images. . . . .	61
2.5. Production de nuages de points 3D à partir d'images . . . . .	61
2.5.1. Définition, utilisation des nuages de points 3D . . . . .	61
2.5.2. Principe de la production de nuages de points 3D par corrélation dense d'images. . . . .	62
2.5.2.1. Fonction de ressemblance. . . . .	63
2.5.2.2. Appariement dans l'espace « image » ou dans l'espace « objet ». . . . .	63
2.5.2.3. Données en sortie. . . . .	65
2.5.2.4. Ecueils classiques en appariement d'images . . . . .	66
2.5.3. Optimisation . . . . .	66
2.5.3.1. Approche hiérarchique . . . . .	66
2.5.3.2. Méthode globale et optimisation. . . . .	66
2.5.3.3. Influence du paramétrage . . . . .	68
2.5.3.4. Passage à l'échelle . . . . .	68
2.5.4. Qualification des données produites . . . . .	69
2.5.5. Avantages et limites . . . . .	70
2.5.6. Autres approches de reconstruction 3D automatique basée image . . . . .	70
2.6. Dessin 3D par saisie stéréoscopique ou multi-images . . . . .	71
2.6.1. Définition, utilisation du dessin 3D . . . . .	71
2.6.2. Principe de la production du dessin 3D . . . . .	71
2.6.3. Qualification de la restitution 3D. . . . .	74
2.7. L'offre logicielle en photogrammétrie rapprochée. . . . .	74
2.8. Les perspectives en recherche . . . . .	75
2.8.1. Production en temps quasi réel . . . . .	75
2.8.2. Acquisition participative des données . . . . .	75
2.8.3. Reconstruction automatisée de modèles 3D vecteur à partir d'images . . . . .	76
2.9. Bibliographie. . . . .	76
<b>Chapitre 3. Numérisation par scanner laser. . . . .</b>	<b>81</b>
3.1. Historique. . . . .	81
3.2. Matériel . . . . .	82
3.2.1. Fonctionnement d'un scanner laser terrestre . . . . .	82
3.2.2. Différentes familles de technologies laser . . . . .	83

3.2.2.1. Scanner laser à temps de vol ou à impulsions . . . . .	83
3.2.2.2. Scanner laser à décalage de phase . . . . .	83
3.2.2.3. Scanner laser à triangulation optique . . . . .	84
3.2.3. Caractéristiques des scanners laser terrestres . . . . .	86
3.2.4. Erreurs affectant la mesure et étalonnage . . . . .	89
3.2.4.1. Aspects géométriques . . . . .	89
3.2.4.2. Aspects radiométriques . . . . .	91
3.2.5. Les principaux constructeurs . . . . .	91
3.2.6. Cas d'utilisation . . . . .	92
3.3. Acquisition par lasergrammétrie . . . . .	93
3.3.1. Conception du chantier . . . . .	93
3.3.2. Besoins en éléments de calage . . . . .	94
3.3.3. Réalisation pratique . . . . .	97
3.3.4. Avantages et limites de cette technologie . . . . .	98
3.3.5. Couplage avec des photographies externes . . . . .	99
3.4. Calage des stations laser . . . . .	100
3.4.1. Principe des différentes stratégies de calage . . . . .	101
3.4.2. Automatisation de tout ou partie de la phase de calage . . . . .	103
3.4.2.1. Extraction automatique des cibles artificielles . . . . .	103
3.4.2.2. Calage automatique par appariement de primitives géométriques . . . . .	103
3.4.2.3. Calage automatique par exploitation d'images externes . . . . .	104
3.4.3. Qualification du calage des stations laser . . . . .	104
3.4.4. Export des nuages de points laser assemblés . . . . .	105
3.5. Qualification des nuages de points obtenus . . . . .	106
3.5.1. Qualité géométrique . . . . .	106
3.5.2. Qualité radiométrique . . . . .	107
3.5.3. Autres éléments de qualité . . . . .	108
3.6. Bibliographie . . . . .	108
<b>Chapitre 4. Complémentarité des techniques . . . . .</b>	<b>113</b>
4.1. Introduction . . . . .	113
4.2. Comparaison des techniques . . . . .	113
4.2.1. Acquisition des données sur le terrain . . . . .	113
4.2.2. Qualité des données . . . . .	114
4.2.3. Traitement des données . . . . .	114
4.3. Exemple du relevé de la cathédrale d'Amiens . . . . .	115
4.3.1. Méthodologie de relevé proposée : ossature par lasergrammétrie et complètement photogrammétrique . . . . .	115
4.3.2. Géoréférencement des données . . . . .	117

4.3.3. Exhaustivité du relevé . . . . .	118
4.4. Bibliographie . . . . .	118
<b>Chapitre 5. Traitement des nuages de points . . . . .</b>	<b>119</b>
5.1. Visualisation et organisation des nuages de points 3D . . . . .	119
5.1.1. Modes de visualisation des nuages de points . . . . .	119
5.1.1.1. Visualisation sous forme d'image de profondeur . . . . .	120
5.1.1.2. Rendu 3D . . . . .	121
5.1.2. Organisation des nuages de points . . . . .	124
5.1.2.1. Stratégies pour gérer les gros volumes de données 3D. . . . .	124
5.1.2.2. Intérêt et méthode d'obtention du voisinage . . . . .	126
5.1.2.3. Sélection de données 3D . . . . .	127
5.2. Prétraitements des nuages de points . . . . .	127
5.2.1. Débruitage et filtrage . . . . .	127
5.2.2. Fusion des données . . . . .	129
5.2.3. Sous-échantillonnage, rééchantillonnage et compression des nuages de points . . . . .	130
5.2.4. Segmentation . . . . .	132
5.3. Du nuage de points au modèle 3D géométrique . . . . .	135
5.3.1. Types de modèles 3D. . . . .	135
5.3.2. Saisie sur nuage de points 3D. . . . .	136
5.3.2.1. Que saisir et comment ? . . . . .	136
5.3.2.2. Saisie en 2D . . . . .	137
5.3.2.3. Saisie en 3D . . . . .	137
5.3.3. Maillage surfacique. . . . .	138
5.3.4. Reconstruction automatique. . . . .	141
5.3.5. Couplage des traitements des nuages de points laser avec des images . . . . .	143
5.3.6. Texturage. . . . .	144
5.3.7. Qualification des modèles géométriques . . . . .	145
5.4. Produits dérivés . . . . .	146
5.4.1. Dessins au trait . . . . .	146
5.4.2. Production d'ortho-images . . . . .	147
5.4.2.1. Définition, utilisation des ortho-images . . . . .	147
5.4.2.2. Principe de la production d'ortho-images . . . . .	148
5.4.2.3. Qualification d'une ortho-image . . . . .	150
5.4.3. Autres produits images. . . . .	150
5.5. Bibliographie . . . . .	151

<b>Chapitre 6. Gestion et exploitation des relevés</b> . . . . .	157
6.1. Introduction. . . . .	157
6.2. Gestion de la conservation des données . . . . .	157
6.2.1. Types de sauvegarde . . . . .	158
6.2.2. Enrichissement sémantique des données géométriques. . . . .	158
6.2.3. Normalisation . . . . .	159
6.2.4. Responsabilité et prise en charge de la conservation . . . . .	161
6.3. Diffusion des données . . . . .	162
6.3.1. Les fonctionnalités attendues . . . . .	162
6.3.2. SIG . . . . .	162
6.3.3. Plateformes web. . . . .	163
6.4. Bibliographie. . . . .	164
<b>Conclusion</b> . . . . .	167
<b>Index</b> . . . . .	169