

# Numérisation 3D de bâtiments

*cas des édifices remarquables*

Raphaële Héno  
Laure Chandelier



# Numérisation 3D de bâtiments

First published 2014 in Great Britain by ISTE Editions, an imprint of Hermes Science Publishing Ltd.

Apart from any fair dealing for the purposes of research or private study, or criticism or review, as permitted under the Copyright, Designs and Patents Act 1988, this publication may only be reproduced, stored or transmitted, in any form or by any means, with the prior permission in writing of the publishers, or in the case of reprographic reproduction in accordance with the terms and licenses issued by the CLA. Enquiries concerning reproduction outside these terms should be sent to the publishers at the undermentioned address:

ISTE Editions  
An imprint of  
Hermes Science Publishing Ltd  
27-37 St George's Road  
London SW19 4EU  
UK

© Hermes Science Publishing Ltd 2014  
The rights of the authors of this work have been asserted by them in accordance with the Copyright, Designs and Patents Act 1988.

---

British Library Cataloguing-in-Publication Data  
A CIP record for this book is available from the British Library  
ISBN: 978-1-78405-034-4 (print)  
ISBN: 978-1-78406-034-3 (e-book)

---



Printed and bound in Great Britain by CPI Group (UK) Ltd., Croydon, Surrey CR0 4YY, May 2014

---

# Numérisation 3D de bâtiments

---

*cas des édifices remarquables*

Raphaële Héno  
Laure Chandelier

**ISTE**  
editions

---

Ouvrage publié sous la direction de  
Anne Ruas

---

---

# 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

---

# Introduction

---

Les bases de données topographiques classiques, obtenues le plus souvent par saisie sur des images aériennes ou spatiales, fournissent une modélisation 3D simplifiée de notre environnement urbain qui répond aux besoins de nombreuses applications comme l'aménagement, la prévention des risques ou la gestion de la mobilité. Pourtant, lorsqu'il s'agit de représenter et d'analyser des sites remarquables comme des monuments, des ouvrages d'art ou des sites archéologiques, ces bases de données ne suffisent plus et d'autres moyens d'acquisition et de traitement doivent être mis en œuvre. Cet ouvrage propose un état des lieux des moyens de levé adaptés aux édifices remarquables et des recherches en cours dans ce domaine. Les méthodes abordées dans cet ouvrage vont de la lasergrammétrie aux techniques actuelles de corrélation dense à partir d'images en passant par la photogrammétrie traditionnelle.

Ces méthodes permettent de relever des édifices remarquables, c'est-à-dire d'en restituer les formes et l'aspect avec une précision et un niveau de détails convenus à l'avance dans un cahier des charges. Elles sont appelées à prendre le relais des techniques habituellement mises en œuvre pour la réalisation des bases de données topographiques, dans le cas de commandes spécifiques, comme la description du relief des façades et le relevé 3D complet (intérieur et extérieur) d'un monument. Dans le contexte de cet ouvrage, la numérisation porte principalement sur un rendu 3D géométrique, et n'inclut ni l'inventaire, ni l'analyse des matériaux de construction, ni l'analyse structurelle de l'édifice, ni son historique.

Il convient tout d'abord de préciser ce qu'on entend ici par « édifice remarquable ». Il s'agit de bâtiments, d'ensembles de bâtiments, de monuments ou d'ouvrages d'art qui présentent un intérêt tel que les produits 3D classiques existants ne suffisent pas à en rendre toute la richesse. La taille des sites traités dans cet ouvrage est à jager à hauteur d'homme : on s'intéressera à des édifices allant d'une petite cave à tout un

quartier, en passant par des châteaux, des églises, des ponts, des tours. Enfin, on ne travaillera que sur des objets statiques.

L'objectif de cet ouvrage est de donner une vision d'ensemble des méthodes actuelles de relevé 3D. Il ne s'agit ni d'un cours théorique ni d'une collection de manuels procéduraux. Le lecteur n'y trouvera pas d'algorithmes détaillés, mais des éléments d'information sur toutes les étapes d'un chantier visant à produire le relevé 3D d'un édifice remarquable. Il y trouvera aussi des recommandations et des conseils, que les auteurs ont toujours formulés dans un souci de produire un résultat aussi fiable, honnête et précis que permis par les méthodes actuelles, qui, de ce fait, ne devront pas être systématiquement pris au pied de la lettre.

En effet, certains cahiers des charges mettent davantage l'accent sur le rendu visuel que sur l'exactitude générale. Dans ce cas, les contraintes sur les phases d'acquisition des données seront relâchées, tandis que les phases de post-traitements cosmétiques seront rallongées. Cet ouvrage s'adresse donc à tous ceux qui sont concernés par le relevé 3D à haute résolution (maîtres d'ouvrage, géomètres, conservateurs du patrimoine, urbanistes, infographistes) et qui souhaitent connaître les moyens techniques disponibles, les méthodologies envisageables et les étapes à suivre dans un tel projet.

Il ne prétend pas à l'exhaustivité, ni s'agissant des méthodes ni des références, mais il présente le point de vue des auteurs nécessairement marqué par leur formation et leur métier d'ingénieur photogrammètre.

## Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord à Anne Ruas, directrice de recherche à l'IFSTTAR, qui nous a proposé de nous lancer dans cette aventure. Sans cette invitation, le travail réalisé tout au long de ces années n'aurait pu être capitalisé à travers cet ouvrage.

Ce livre est l'occasion de rendre un hommage particulier à Yves Egels, ingénieur géographe qui tout au long de sa carrière à l'IGN, a inlassablement contribué au développement de la photogrammétrie en général et plus particulièrement à l'application de cette technique au service de la documentation du patrimoine. Incontestable référence en photogrammétrie, c'est à lui que nous devons notre expertise dans le domaine des relevés architecturaux.

Sans les conseils avisés de nos relecteurs, Yves Egels, Patrice Bueso et Jean-Charles Pruvost, ce manuscrit n'aurait pas été le même et nous leur sommes donc reconnaissantes du temps passé et des éléments critiques apportés.

De nombreuses personnes, enseignants de l'ENSG et instructeurs de l'IGN, ont travaillé avec nous sur les projets architecturaux au coeur de ce livre. Nous les remercions donc pour leur investissement et leur passion.

Il ne faut pas oublier les commanditaires qui ont fait naître ces projets et les ont portés avec nous, notamment, Marylène Barret pour le Yémen et El Mustapha Mouaddib pour la cathédrale d'Amiens.

Enfin, s'il n'est pas possible de tous les nommer, nous remercions également l'ensemble des étudiants de l'ENSG et d'ailleurs qui ont travaillé sur les sujets traités dans ce livre.



---

# Les besoins spécifiques à la numérisation 3D d'édifices remarquables

---

## 1.1. L'offre existante en données 3D haute résolution

En France, l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) produit et entretient, sur l'ensemble du territoire, le RGE<sup>1</sup> (référentiel à grande échelle) qui contient quatre couches d'informations : une ortho-image haute résolution, une base de données « adresses », le cadastre géoréférencé, et une composante topographique en 3D de précision métrique contenant une description des éléments du paysage, classés selon une thématique adaptée. Un RGE nouvelle génération, mieux résolu, plus précis et plus riche, notamment grâce à la collaboration des nombreux intervenants qui recueillent et gèrent de l'information géographique sur le territoire, est à l'étude.

L'IGN met également en œuvre un processus de production semi-automatique à partir d'images aériennes haute résolution (pixel de taille inférieure à 20 cm) et fortement redondantes (recouvrements importants entre images) qui permet de produire des bases de données vecteur répondant aux spécifications LOD2 (*level of detail*) de la norme CityGML<sup>2</sup>. Il a notamment été mis en œuvre sur quelques grandes villes françaises comme Paris, Nantes, Rennes, Besançon, ou Marseille. On y représente les quartiers, les structures de toits, la végétation et le mobilier urbain généralisé. Ce produit, Bati3D® (Maillet *et al.*, 2004), contient non seulement le relevé des formes des bâtiments (ou des groupes de bâtiments quand il s'agit d'îlots), mais aussi leur aspect, puisque le volume reconstruit par des procédés photogrammétriques automatisés est texturé par les images aériennes. On sait

---

1. <http://professionnels.ign.fr/rge>.

2. [www.citygml.org](http://www.citygml.org).

améliorer le rendu et la précision des façades et du mobilier urbain par l'ajout de données acquises au sol, par des véhicules équipés de caméras stéréoscopiques, de laser, et de dispositifs de géoréférencement direct (antenne GNSS<sup>3</sup>, centrale à inertie, ou odomètre), rarement autosuffisants en milieux urbains, mais indispensables pour initier le géoréférencement des images par photogrammétrie.

De nombreuses collectivités locales (voir les exemples fameux de Monaco<sup>4</sup>, de Genève<sup>5</sup>, du Grand Lyon dont la maquette est dorénavant consultable sur Internet) ont financé des maquettes 3D numériques de leur territoire, considérant que les produits sur étagère ne répondaient pas à leurs besoins. En général, des équipes spécifiques gèrent la production de MNT (modèle numérique de terrain), d'ortho-images, et de modèles vecteurs décrivant les bâtiments, le mobilier urbain et la végétation, à partir de prises de vues aériennes et d'acquisition lidar adaptées. Les grandes entreprises de l'Internet travaillent également à la représentation 3D des villes, proposant des services de navigation dans des reproductions les plus réalistes possible de nos environnements. C'est le cas, par exemple, de Google qui propose des reconstitutions fines de quartiers entiers. Les méthodes pour y parvenir sont variées (de la restitution photogrammétrique classique, en passant par l'infographie pure, à la saisie multi-images offerte à tout internaute<sup>6</sup>). Cette diversité de procédés pose la question de la traçabilité de la donnée et de la confiance à lui accorder.

La qualité des images aériennes et les outils informatiques de plus en plus automatisés permettent de produire massivement des bases de données urbaines toujours mieux résolues. Cependant, la majorité d'entre elles se contente de donner la description d'une ville d'un point de vue extérieur, sans pénétrer dans ses bâtiments ni ses sous-sols.

La maquette numérique de l'architecte, ou BIM (*Building Information Modeling*), est quant à elle exhaustive : elle montre le bâtiment ou le quartier sous toutes ses coutures : intérieur, extérieur, sous-sol et vue du ciel. Soit elle précède la construction, et c'est alors une vue d'architecte, soit elle intervient dans des projets de restructuration urbaine (faire du neuf avec du vieux), et elle répond alors au besoin d'un modèle « tel que construit ».

Les méthodes de numérisation présentées dans le présent ouvrage sont celles qui permettent d'obtenir une description d'un édifice particulier plus pertinente que celle des offres sur étagères en matière de résolution spatiale supérieure ou de meilleure exhaustivité. On se gardera d'évoquer des procédés essentiellement DAO

---

3. *Global Navigation Satellite System*.

4. [www.gouv.mc/Action-Gouvernementale/La-Qualite-de-Vie/La-Prospective/Actualites/La-maquette-3D-de-Monaco-presentee-par-la-DPUM-a-Imagina](http://www.gouv.mc/Action-Gouvernementale/La-Qualite-de-Vie/La-Prospective/Actualites/La-maquette-3D-de-Monaco-presentee-par-la-DPUM-a-Imagina).

5. <http://ge.ch/sitg/cartes/3d>.

6. [www.google.com/earth/learn/3dbuildings.html#](http://www.google.com/earth/learn/3dbuildings.html#).

(dessin assisté par ordinateur) qui privilégient le rendu à la précision du relevé. On s'en tiendra aux méthodes des géomètres qui, tout en se modernisant, savent rester objectives et rendre un édifice tel qu'il est et non tel qu'on l'imagine.

## 1.2. L'expression des besoins

Les méthodes de numérisation qui sont abordées dans cet ouvrage englobent les étapes (Barber *et al.*, 2011) suivantes :

- explicitation du besoin ;
- choix des techniques à mettre en œuvre ;
- acquisition sur le terrain ;
- traitement des données ;
- contrôle qualité ;
- mise en forme et livraison.

### 1.2.1. Potentiels

L'expression des besoins de numérisation, préalable à la rédaction d'un cahier des charges pour les prestataires, est un exercice difficile. La numérisation complète, précise, bien géolocalisée d'un édifice remarquable peut être demandée dans le cadre d'un inventaire, d'une restauration, de fouilles archéologiques, ou dans le but de le rendre accessible à tous et partout *via* une maquette numérique visualisable par internet (tourisme virtuel). Les besoins, portant sur le contenu, la résolution, la précision, ou l'actualité, varient évidemment selon les contextes. Mais leur expression est souvent résumée dans un premier temps en une commande utopique : le modèle 3D de tout à la meilleure résolution. Les contraintes budgétaires ramènent heureusement les commanditaires à la raison. Il leur faut donc énumérer les raisons qui motivent la numérisation, en termes de potentiels, dont voici quelques exemples :

- comprendre le monument :
  - modéliser les déplacements ;
  - retrouver l'histoire de sa construction ;
  - analyser ses déformations ;
- disposer d'une base de mesures :
  - pouvoir compter les ouvertures ;
  - pouvoir mesurer la surface des toits ;

- pouvoir afficher des sections ;
- étudier la stabilité du monument ;
- placer le monument dans le temps et dans l'espace :
  - pouvoir superposer le levé à des relevés antérieurs ou ultérieurs ;
  - obtenir un modèle 3D évolutif ;
  - visualiser le site et son zonage dans son environnement ;
  - voir les installations et équipements existants ;
  - présenter des projets ou aménagements futurs ;
- communiquer, diffuser et échanger :
  - pouvoir diffuser la maquette sur le web ;
  - être consultable en ligne ;
  - être interopérable avec le cadastre ou avec d'autres couches SIG (Système d'information géographique) traditionnelles ;
  - offrir une immersion en 3D ;
- administrer :
  - prendre des décisions sur des projets stratégiques ;
  - réaménager le bâtiment pour l'accueil du public ;
  - visualiser et présenter les projets lors du dépôt de permis de construire ;
  - permettre de contrôler les règlements urbanistiques.

Le relevé conservatoire est par essence une exception s'agissant du cahier des charges. Il sert de mémoire en cas de détériorations, voire de destructions totales ou partielles, qui peuvent être dues à de multiples causes : « guerre, grands travaux, mais aussi désintérêt, manque d'entretien » (Saint-Aubin, 1992). Mais faute de pouvoir prédire comment le relevé sera utilisé dans ce cas, il est difficile d'établir un cahier des charges complet.

### **1.2.2. Traduction en cahier des charges**

Ces potentiels devront d'abord être traduits en spécifications de produits à livrer (nature, système de coordonnées de référence, précision de la géolocalisation, résolution, couverture, délais de réalisation, etc.). Selon la formulation des demandes,

les produits à livrer peuvent se décliner en une multitude de formes, comme le montrent les exemples suivants :

- nuages de points permettant de retrouver les grandes lignes structurelles de l'édifice ;
- nuages de points permettant de compter les marques de tâcheron ;
- nuages de points à 1 cm de résolution spatiale, avec un bruit autorisé de 2 mm ;
- dessin filaire 3D donnant les grandes lignes structurelles de l'édifice ;
- dessin filaire 3D donnant les grandes lignes structurelles et le parement de pierre ;
- dessin filaire 3D, triangulé, texturé ;
- courbes de niveau permettant de rendre le volume d'un dôme ;
- élévations des façades ;
- sections ;
- etc.

En plus des éléments à lever, le cahier des charges doit spécifier la précision de géolocalisation associée. La précision interne du levé doit être cohérente avec la résolution de levé, car dans le cas contraire, des écarts géométriques importants pourraient être interprétés comme des caractéristiques de l'objet. Les exigences peuvent souvent être relâchées sur la précision absolue de localisation : le positionnement dans l'espace est utile pour situer l'édifice dans son environnement, ou pour connaître l'orientation des axes principaux par rapport aux points cardinaux par exemple. La précision nécessaire peut alors être décimétrique, voire métrique.

Si le commanditaire ajoute le besoin de pouvoir communiquer, diffuser et échanger autour du modèle 3D produit, alors des post-traitements sur le nuage de points 3D seront nécessaires pour l'alléger, le structurer, et lui attribuer des informations sémantiques. Si la commande porte plutôt sur l'interopérabilité du relevé, avec notamment le besoin de superposer au modèle des données existantes, on soignera particulièrement le géoréférencement absolu. Hélas, il est impossible d'établir de simples correspondances entre la demande et les produits à fournir, tant la combinaison des nombreux paramètres à prendre en compte, comme le budget, les délais, la formation, rend chaque projet unique.

### **1.2.3. Spécifications techniques de relevé**

Les spécifications de produit à livrer seront ensuite traduites en spécifications techniques de relevé par le prestataire : acquisition laser et/ou image (résolution,

nombre prévisionnel de stations, ou de photographies), éléments de géoréférencement (comment, combien et où ?), matériel et logiciels à prévoir pour les traitements (Bryan *et al.*, 2009).

La résolution optimale des images dépend évidemment du besoin : pour modéliser un édifice dans ses grandes lignes, une résolution centimétrique, voire décimétrique suffit. Pour être capable de modéliser des détails, on devra opter pour une meilleure résolution (par exemple, 1 cm pour décrire le parement de pierre, 2 mm pour modéliser les marques de tâcheron). A l'époque des prises de vues argentiques, on préconisait un relevé au 1/100<sup>e</sup> pour un rendu général du bâtiment, un relevé au 1/50<sup>e</sup> pour un plan plus détaillé avec le parement de pierre, et un relevé au 1/20<sup>e</sup> pour un plan très détaillé incluant le parement de pierre, les sculptures et inscriptions. En ce qui concerne le choix de la résolution des nuages de points selon l'échelle de sortie (Colombo *et al.*, 2010) conseille des résolutions de 2, 4, 15 et 25 mm, respectivement pour des levés au 1/10<sup>e</sup>, au 1/20<sup>e</sup>, au 1/50<sup>e</sup> et au 1/100<sup>e</sup>.

Ces valeurs sont données à titre indicatif et il est fortement conseillé de vérifier sur le site que la résolution d'acquisition choisie permet d'obtenir les éléments à lever.

### **1.3. Les méthodes de relevé existantes**

#### **1.3.1. Méthodes d'acquisition existantes**

Numériser un édifice remarquable consiste à enregistrer fidèlement ses formes et son aspect, éventuellement dans un système de coordonnées de référence. Les données ainsi produites seront livrées dans un format prédéfini à l'avance. Selon les besoins et les moyens, les méthodes employées peuvent varier. La plus simple, mais ni la plus rapide, ni la plus fiable, est le dessin manuel direct que pratiquent architectes et archéologues en plaquant des calques sur les zones à relever ou en recourant à des outils de mesure courants comme le distancemètre ou le fil à plomb. La production d'un modèle 3D haute résolution par cette méthode n'est pas raisonnablement envisageable. Des modèles expédiés peuvent aussi être produits par extrapolation de plans existants (Remondino *et al.*, 2009).

Les géomètres sont certes très habiles pour numériser rapidement un bâtiment avec un tachéomètre, mais ce procédé implique nécessairement une assez forte simplification des formes, dictée par une interprétation et des choix. Le relevé au scanner laser automatise en quelque sorte ce procédé, puisque l'appareil balaye systématiquement l'espace selon un intervalle angulaire constant, éventuellement

très fin, quand le tachéomètre ne peut viser que des points isolés. Le rendu brut d'une numérisation au scanner laser est un nuage très dense de points 3D décrivant la surface du bâtiment. Le modèle global est obtenu par juxtaposition de nuages voisins calés dans un unique système de référence par des méthodes adéquates. Le produit final est rarement le nuage de points, mais plutôt des plans, coupes et élévations qu'on peut en dériver par des méthodes semi-automatisées, ou un modèle allégé triangulé et texturé. Les méthodes photogrammétriques, c'est-à-dire basées sur des prises de vues stéréoscopiques, permettent de produire du dessin 3D, des déroulés ou des ortho-images, et des nuages de points 3D colorés.

Sur la plupart des sites, et en particulier pour les édifices remarquables, on choisira de combiner ces méthodes pour optimiser le rapport qualité/prix et pour pouvoir répondre aux différents cas de figure que l'on rencontrera (Remondino *et al.*, 2009). On verra dans cet ouvrage les qualités respectives de ces techniques en termes de rapidité, de précision, de simplicité de mise en œuvre et de traitement, ainsi que de fiabilité.

### 1.3.2. Exemples de relevés

Le tableau 1.1 donne quelques exemples de relevés illustrant la diversité des besoins et des réponses techniques possibles.

### 1.3.3. Éléments de géoréférencement

Les exigences actuelles d'interopérabilité des données 3D relevées imposent dans la plupart des cas qu'elles soient géolocalisées dans un système de coordonnées de référence (par exemple, RGF93 en France). Pour ce faire, les géomètres utilisent ou mettent en place des réseaux de points géodésiques, qu'il est facile de densifier en points d'appui pour les besoins spécifiques du géoréférencement des données laser et images. Ces opérations, classiques pour les géomètres, nécessitent leur savoir-faire et leur équipement (récepteurs GNSS, tachéomètres, et logiciels de calcul topométrique). Sur des sites simples, on peut parfois se contenter d'orientations (connaissance de la verticale, donnée par un fil à plomb ou un niveau, du nord, donné par une boussole) et d'une mise à l'échelle, donnée par une distance sur l'édifice. De façon générale, on appellera dans cet ouvrage *système de coordonnées global*, tout système de coordonnées qui permet d'exprimer le géoréférencement de l'ensemble dans un même repère, qu'il soit lié à l'édifice ou qu'il soit un système de référence.

Site	Date	Besoin	Techniques mises en œuvre	Produits livrés
<b>Temples d'Abou Simbel</b> (Égypte) UNESCO – IGN France (Bonneval, 1958)	1955	Relevé détaillé des deux temples rupestres d'Abou Simbel en vue de leur déplacement avant la construction du barrage d'Assouan	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Photogrammétrie « classique »</li> <li>– Prise de vues stéréoscopiques (par une chambre métrique destinée à la photogrammétrie aérienne) en vue de la restitution avec représentation en courbes de niveau des différents éléments</li> <li>– Rattachement à un unique système de coordonnées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Plans et élévations des différentes surfaces constituant l'édifice</li> <li>– Descriptions précises de ces surfaces par courbes de niveau (échelles demandées : du 1/10<sup>e</sup> au 1/150<sup>e</sup>)</li> </ul>
<b>Grotte de Lascaux</b> IGN France (Hours <i>et al.</i> , 1981)	1966	Reconstitution de la grotte en vraie grandeur	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Photogrammétrie « classique » (prise de vues stéréoscopiques et restitution graphique)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Coupes longitudinales et transversales tous les 25 cm à l'échelle 1 de la salle des taureaux ; texturation par des photos couleur à l'échelle 1 pour produire un facsimilé exposé au Grand Palais en 1980</li> </ul>
<b>Tour de Pise</b> IGN France (IGN, 1992)	1992	Modélisation 3D de la tour comme support d'analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Topométrie de précision pour déterminer quelques cibles</li> <li>– Prise de vues photogrammétrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Coordonnées 3D photogrammétriques de toutes les cibles</li> <li>– Plans en coupe de la tour</li> </ul>
<b>Saint-Guilhem-le-Désert*</b> MAP**, UMR 694	2007	Modélisation 3D du cloître ainsi que de tous les éléments dispersés	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Levé laser 3D à longue portée</li> <li>– Acquisition d'images pour l'apparence visuelle et l'état de conservation des matériaux</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Anastylose virtuelle des fragments dispersés</li> <li>– Système d'information spatiotemporel à l'échelle architecturale</li> </ul>

Site	Date	Besoin	Techniques mises en œuvre	Produits livrés
<b>Karnak</b> ATM3D – ENSG*** (Chandelier <i>et al.</i> , 2009)	2008	Déroulés photos des 134 colonnes de la salle Hypostyle du temple Karnak	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Levé laser 3D des colonnes</li> <li>– Acquisition d'images stéréoscopiques par perche (32 images par colonne)</li> <li>– Rattachement à un unique système de coordonnées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Déroulé de chaque colonne</li> </ul>
<b>Cluny</b> ENSAM (Père <i>et al.</i> , 2010)	2009	Maquette numérique de la plus grande église abbatiale romane du XII <sup>e</sup> siècle	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Levé laser 3D (temps de vol pour les vestiges du bâti et par triangulation pour le lapidaire)</li> </ul>	Rétroconception des éléments subsistants à partir des nuages de points 3D
<b>Cathédrale d'Amiens</b> ENSG – Laboratoire MIS (Héno <i>et al.</i> , 2011)	2010 2013	Modèle 3D complet comme base de données support aux historiens, aux conservateurs, comme archive numérique, et support de visite virtuelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Levé laser 3D (résolution adaptée à la complexité de l'objet – de quelques mm à 2 cm)</li> <li>– Prise de vues aériennes (très haute résolution), et terrestres pour la production automatisée de nuages de points 3D</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Réseau de points géodésiques documentés</li> <li>– Nuages de points 3D géoréférencés dans le système légal français</li> <li>– Images panoramiques géoréférencées dans le système légal français</li> </ul>

\* [www.map.archi.fr/3D-monuments/telechargements/sgdesert\\_doc-ecrit.pdf](http://www.map.archi.fr/3D-monuments/telechargements/sgdesert_doc-ecrit.pdf)

\*\* [www.map.archi.fr](http://www.map.archi.fr)

\*\*\* Ecole nationale des sciences géographiques : [www.ensg.eu](http://www.ensg.eu)

**Tableau 1.1. Exemples de relevés**

## 1.4. Du cahier des charges à la réalisation

### 1.4.1. *Reconnaissance*

La reconnaissance d'un chantier débute par la visite de la zone à lever telle que spécifiée dans le cahier des charges. Elle conduit à la définition précise des éléments à numériser, associés à la résolution et la précision de géolocalisation exigées. La présence du commanditaire du projet peut être utile pour lever les éventuelles ambiguïtés subsistant dans le cahier des charges.

Pour l'équipe chargée de l'acquisition, la réflexion porte tout d'abord sur l'emplacement où les différents instruments de mesure (scanner laser, pied photo, tachéomètres) devront être installés. Pour gagner du temps et simplifier l'acquisition, on tâche de minimiser le nombre de stations laser à réaliser. Les stations photographiques quant à elles sont globalement définies (on n'est pas à une photographie près dans cette phase de planification) en fonction du matériel photographique disponible (tel ou tel objectif photographique obligera à s'écarter plus ou moins de l'objet d'intérêt). Les autorisations d'accès à toutes les zones directement concernées par le relevé doivent, bien entendu, avoir été négociées en amont de cette phase de reconnaissance, de même que la possibilité de momentanément détourner le public pour accéder sans gêne à une partie de l'édifice. En effet, il est rare que l'on ne soit pas confronté sur un site à l'un ou plusieurs des problèmes suivants : encombrement ou accès restreints dans certaines zones, passage continu de public, inaccessibilité de certains détails, site éphémère, etc. Au besoin, on devra aussi avoir demandé des autorisations pour coller des cibles, ou pour percer des trous en vue d'y planter des repères géodésiques.

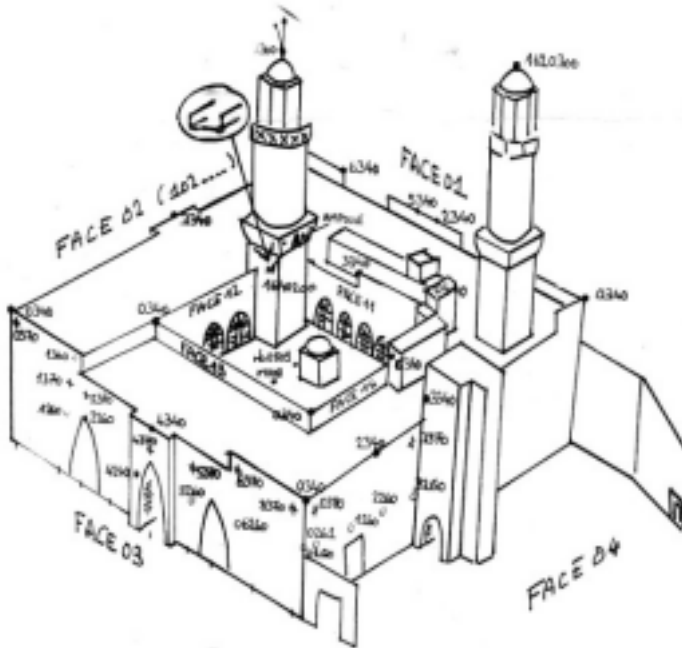
Une fois la position des stations laser et photographiques définies, on optimise celles des stations topométriques (trépied + tachéomètre) d'où seront mesurés les points d'appui qui serviront à géoréférencer les données laser et image. Ces points peuvent être de différentes natures, mais seront toujours choisis pour être visibles dans le nuage de points du laser ou sur les images, selon ce qu'il faut géoréférencer :

- *détail naturel* : élément caractéristique du site, angle de pierre, détail de peinture ;
- *cibles artificielles* : dispositif matériel (bois, papier, plastique, céramique) avec des motifs (croix, point, cercle) ou des formes (sphère) géométriques caractéristiques, posé sur le chantier par collage ou aimantation ;
- *points géodésiques* : dispositif pérenne (repère en bronze, clou) mis en place sur le chantier afin de faciliter la revisite du site, potentiellement utilisé comme élément de calage.

Le recours à un type d'élément de calage plutôt qu'à un autre est dicté par :

- les contraintes du site (possibilité ou non d'implanter des points) ;
- la facilité de mise en œuvre et de repérage ;
- la précision de localisation induite par le détail : la précision des cibles est généralement haute alors que celle d'un détail naturel est plus variable, fonction de sa finesse géométrique, et parfois moins bonne ;
- la nécessité de revisite ;
- l'exigence de disposer d'un réseau d'éléments de calage avec une géométrie robuste.

A l'abord d'un chantier complexe, il est pertinent de garder à l'esprit la diversité des éléments de calage auxquels on peut recourir afin d'apporter une solution pragmatique, efficace et souple. Enfin, quelle que soit la nature de l'élément de calage utilisé, il est nécessaire d'en disposer d'un nombre suffisant pour permettre l'assemblage ou le géoréférencement des données acquises. Des détails supplémentaires sur les points de calage à prévoir seront donnés dans les chapitres 2 et 3.



**Figure 1.1.** Schéma de la grande mosquée de Sana'a avec proposition de numérotation

A l'issue de la reconnaissance, un plan du site avec la position des différentes stations des scanners laser, caméras et tachéomètres, et des points à mesurer, est établi ainsi qu'une numérotation adaptée. On tâche en général de définir une numérotation qui permette de reconnaître sans ambiguïté la nature du point considéré (point de calage, ou station portant un instrument), et sa position (intérieur ou extérieur, points cardinaux, haut/bas).

Dans l'idéal, le site est à considérer dans son ensemble, même lorsque la commande ne concerne qu'une partie du site. C'est en effet parfois le cas pour les édifices remarquables dont la taille et la complexité ne permettent pas le traitement en une fois, pour des raisons variées comme la limitation du budget, les contraintes d'accessibilité ou la météo défavorable. Il peut donc être nécessaire de revenir plusieurs fois sur un même site afin de compléter au fur et à mesure les acquisitions. Le cahier des charges gagnera à prendre en compte cet aspect et à spécifier clairement les éléments à mettre en œuvre pour permettre une organisation dans le temps cohérente et efficace. Cela se traduira notamment par la définition de points d'appui ou d'éléments suffisamment pérennes, stables et précis.

### **1.4.2. Acquisition**

Une fois le chantier pensé dans sa globalité, l'acquisition peut démarrer. Si la phase de reconnaissance a été suffisamment approfondie, il *ne s'agit plus que* de suivre le plan établi et de gérer les contraintes extérieures.

Le déroulement des opérations est défini en fonction des éléments suivants :

- nombre d'opérateurs ;
- nombre d'instruments disponibles et de leurs caractéristiques techniques ;
- possibilité ou non de travailler à plusieurs sur une même zone sans se gêner ;
- prévisions météorologiques pour les acquisitions en extérieur ;
- présence éventuelle de public dans certaines zones ;
- éclairage (pour les photographies principalement).

### **1.4.3. Traitement des données**

Le traitement des données commence si possible sur le terrain, de façon à pouvoir prévoir des reprises si nécessaire. L'intégrité des données (peut-on ouvrir et lire les fichiers ?), leur exhaustivité (toute la zone d'intérêt est-elle couverte ?), leur conformité avec les spécifications requises (a-t-on respecté la résolution et les recouvrements stéréoscopiques ?) doivent d'abord être vérifiées. Par prudence, les

données brutes, c'est-à-dire en sortie d'instruments de mesure, avant tout traitement, sont dupliquées et archivées. Les images sont éventuellement renommées par zone et par caméra. Les calculs de compensation topométrique sont lancés dès que possible, de façon à pouvoir refaire des mesures en cas de problème.

De retour au bureau, les données laser et image doivent être géoréférencées dans le système de coordonnées de référence du projet. Si cela est possible, les opérations de géoréférencement gagnent à être menées immédiatement après l'acquisition, éventuellement pendant la campagne terrain, car il peut être plus facile de détecter les manques sur les données assemblées (Borel *et al.*, 2010).

Ensuite, selon les produits demandés dans le cahier des charges, on fera tout ou partie des traitements énoncés dans le tableau 1.2. On y donne, pour chacune des étapes, une estimation des temps relatifs à prévoir, l'ordre de grandeur absolu correspondant à un édifice remarquable de taille moyenne, par exemple une église ou un petit château.

<b>Étapes</b>	<b>Temps de traitement</b>	<b>Dont traitement automatique</b>
<b><i>Acquisition des données sur le terrain</i></b>		
Reconnaissance	1 jour	
Acquisition (topométrie, GNSS, images, laser)	6 jours	
Traitements préliminaires : vérification de l'intégrité et de la qualité de données, du respect des spécifications, renommage	1 jour	
<b><i>Traitement des données : géoréférencement des données</i></b>		
Calcul topométrique du canevas de points de référence	1 jour	
<i>Géoréférencement des images</i>	<i>2 jours</i>	<i>Calcul des points de liaison : 1 jour</i>
<i>Géoréférencement des stations laser</i>	<i>1 jour</i>	
<b><i>Traitement des données : exploitation des données</i></b>		
<i>Calcul de nuages de points 3D à partir des images</i>	<i>4 jours</i>	<i>Corrélation dense : 3 jours</i>
<i>Prétraitement des nuages de points</i>	<i>1 jour</i>	<i>Echantillonnage, débruitage, etc. : 1 jour</i>

Etapes	Temps de traitement	Dont traitement automatique
<i>Stéréorestitution manuelle</i>	<i>Variable en fonction des spécifications : levé des lignes caractéristiques, parements de pierre et sculptures =&gt; 30 jours</i>	
<i>Dessins au trait et reconstruction 3D par saisie sur nuages de points</i>	<i>Variable en fonction des spécifications : levé des lignes caractéristiques, parements de pierre et sculptures =&gt; 30 jours</i>	
<i>Maillage ou reconstruction semi-automatique et texture</i>	<i>Variable en fonction des spécifications =&gt; 6 jours</i>	<i>Des opérations manuelles sont à prévoir, variables selon les outils logiciels utilisés</i>
<i>Génération de produits images dérivés (ortho-images, etc.)</i>	<i>2 jours</i>	<i>Orthorectification, égalisation radiométrique : 1 jour</i>
<b>Export</b>		
Mise en base, diffusion, archivage, etc.	1 jour	

**Tableau 1.2.** Exemple de répartition des charges par étape du processus (en italique : étape mise en œuvre selon la technique d'acquisition et en fonction des produits demandés)

## 1.5. Bibliographie

- BARBER D., MILLS J. *et al.*, « 3D Laser Scanning for Heritage », *Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*, English Heritage, Londres, 2011, (2<sup>e</sup> édition).
- BONNEVAL H., « Utilisation de la photogrammétrie aux levés architecturaux. Application au temple d'Abou-Simbel (Haute-Egypte) », *Communication de l'Institut géographique national au congrès des sociétés savantes*, Paris, 1958.
- BOREL L., CABARROU M., DUBOURG S., EGELS Y., « D'X, Y à X, Y, Z, de nouveaux outils pour l'étude architecturale et archéologique. Restitution 3D, lasergrammétrie et photogrammétrie : le cas de la citerne el-Nabih à Alexandrie », *Actes du colloque Virtual Retrospect 2009*, Pessac, France, 18-20 novembre 2009, p. 215-228, *Archeovision*, vol. 4, Ausonius Editions, Bordeaux, 2010.
- BRYAN P., BLAKE B., BEDFORD J., BARBER D., MILLS J., ANDREWS D., *Metric Survey Specifications for Cultural Heritage*, English Heritage, Londres, 2009.

- CHANDELIER L., CHAZALY B., EGELS Y., LAROZE E., SCHELSTRAETE D., « Numérisation 3D et déroulé photographique des 134 colonnes de la Grande Salle Hypostyle de Karnak », *Revue XYZ*, n° 120, 3<sup>e</sup> trimestre 2009.
- COLOMBO L., MARANA B., « Terrestrial laser scanning », *GIM International*, vol. 24, n° 12, décembre 2010.
- HÉNO R., CHANDELIER L., CLAUZEL L., HANON R., « Complementarity of terrestrial laser scanning and DSM from aerial photography: the example of the cathedral of Amiens », *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> CIPA Symposium*, Prague, République Tchèque, 2011.
- HOURS M. (DIR.), *La vie mystérieuse des chefs-d'œuvre : la science au service de l'art*, Réunion des musées nationaux, Paris, 1980.
- IGN, *GEOFIL, Magazine de l'Institut géographique national*, Paris, 1992.
- MAILLET G., FLAMANC D., « Une approche opérationnelle pour la production de modèles 3D urbains », *Revue française de photogrammétrie et télédétection*, n° 176, p. 14-20, 2004.
- PÈRE C., LANDRIEU J., ROLLIER-HANSELMANN J., SCHOTTE G., « Reconstitution virtuelle de l'église abbatiale Cluny III : des fouilles archéologiques aux algorithmes de l'imagerie », *Actes du colloque of Virtual Retrospect 2009*, Pessac, 18-20 novembre 2009, p. 151-159, *Archeovision*, vol. 4, Ausonius Editions, Bordeaux, 2010.
- REMONDINO F., EL-HAKIM S., GIRARDI S., RIZZI A., BENEDETTI S., GONZO L., « 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures – The '3D-ARCH' Project », *Proceedings of the ISPRS Working Group V/4, Workshop 3D-ARCH Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architecture*, Trento, Italie, 2009.
- SAINT-AUBIN J.-P., « Le relevé et la représentation de l'architecture », *Documents et méthodes*, n° 2, 1992.



---

## Numérisation à partir d'images

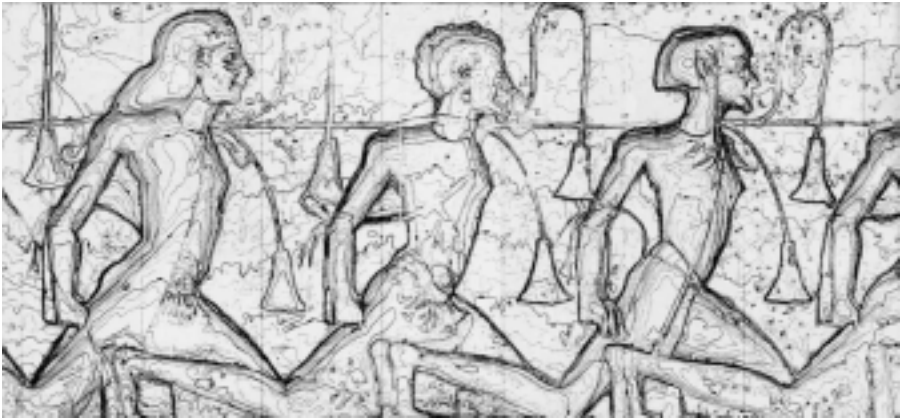
---

### 2.1. Historique en France

S'il ne semble pas nécessaire de refaire ici un historique de la photogrammétrie (on se reportera plutôt à Laussedat, 1899 ; Roussilhe, 1936 ou Vincent *et al.*, 2013), il est cependant intéressant de souligner que les premiers travaux utilisant cette technique portaient justement sur des bâtiments remarquables. On citera l'exemple précoce d'Aymée Laussedat qui, dès 1850, en utilisant une chambre claire, produisait un plan des immeubles faisant face à son bureau. En Allemagne, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, Meydenbauer institutionnalisait la photogrammétrie pour le relevé architectural des monuments (Albertz, 2001).

En France, un des précurseurs de l'utilisation de la photogrammétrie dans le domaine du relevé architectural fut Henri Deneux (Deneux, 1930), architecte en chef de la cathédrale de Reims, qui mit au point sa propre méthodologie pour obtenir une restitution graphique des monuments. Peu après sa création en 1940, l'IGN (à l'époque Institut géographique national) se vit confier la mission d'examiner le potentiel de la photogrammétrie pour la documentation du patrimoine architectural. C'est Georges Poivilliers (Vincent *et al.*, 2013), le fondateur de l'industrie photogramétrique française, qui mena cette étude. Il fit les premiers tests en hiver 1944 dans la Sainte-Chapelle à Paris, et les présenta au congrès international de photogrammétrie de La Haye (IGN, 1948). La photogrammétrie a rapidement montré son potentiel pour la documentation architecturale : elle permet de dissocier les opérations de terrain de l'établissement des plans, la production de documents variés, et fournit de manière totalement objective la forme d'un monument à une date donnée (Icomos, 1972). Jusqu'au début des années 1990, l'IGN a entrepris de grands travaux de documentation du patrimoine architectural par photogrammétrie, en France et dans le monde. On peut citer quelques projets emblématiques comme

les grandes cathédrales françaises (Strasbourg, Saint-Denis, chevet de Notre-Dame de Paris, Amiens, Rouen), des travaux liés à des interventions de restauration (Panthéon, cathédrale de Beauvais, grotte de Lascaux), des travaux à but scientifique comme l'étude de la maladie de la pierre à Moissac. Des projets à l'étranger, financés par l'UNESCO ou le ministère des Affaires étrangères ont valu à la photogrammétrie une belle notoriété : l'Acropole d'Athènes, les temples de Nubie (voir figure 2.1), le temple de Borobudur, le Palais royal de Katmandou, les pagodes de Pagan, jusqu'à la tour de Pise en 1992 (IGN, 1992). La plupart des planches résultant de ces campagnes peuvent encore aujourd'hui être consultées à la cartothèque de l'IGN à Saint-Mandé.



**Figure 2.1.** *Abou Simbel, Egypte, planche XVI (IGN, 1967)*

En parallèle, un service spécifique était créé au ministère de la Culture pour mener à bien l'inventaire national exhaustif et systématique du patrimoine tangible initié dans les années 1960 par André Malraux. Il s'agissait d'une unité localisée à Paris spécialisée dans la stéréorestitution et en région, d'équipes composées essentiellement de bénévoles pour les travaux de terrain.

A partir du début des années 1990, le relevé d'édifices remarquables par des méthodes photogrammétriques n'est plus pratiqué que par des cabinets de géomètres privés et des équipes universitaires, dotés de matériel professionnel et de compétences pointues en photogrammétrie. Les laboratoires de recherche qui pratiquent le relevé sont avant tout composés d'experts liés aux métiers des géomètres (Grussenmeyer, 1994). La production reste classique : coupes et élévations au trait par stéréorestitution manuelle, accompagnées parfois d'ortho-images jusqu'au début des années 2000 où

l'arrivée massive des scanners laser bouleverse les modes opératoires, déborde de la sphère classique des géomètres et stimule les rendus réellement tridimensionnels.

## 2.2. Matériel

### 2.2.1. Le matériel historique

La photogrammétrie à ses débuts imposait de travailler avec des chambres métriques (caméras) dont les caractéristiques optiques et mécaniques étaient étalonnées avec grande précision en laboratoire (voir figure 2.2).

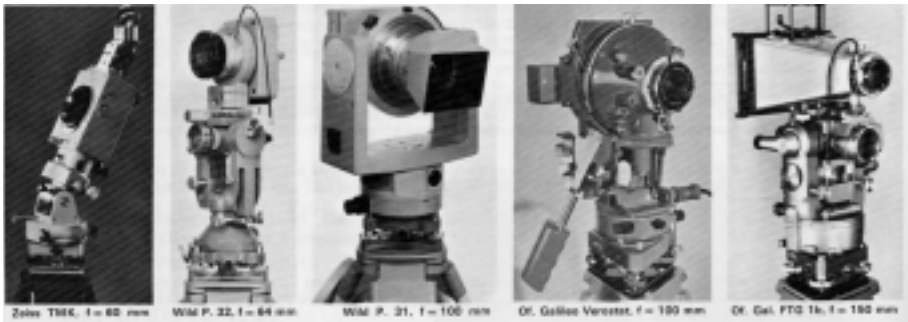


Figure 2.2. Exemples de chambres métriques (ICOMOS, 1972)

On prenait des clichés formant deux à deux des couples stéréoscopiques, clichés présentant un recouvrement d'au moins 50 % sur la zone d'intérêt en nombre suffisant pour couvrir l'intégralité du monument, selon le contexte (échelle du levé demandé, recul face au monument, parties cachées et angles morts).

Des mesures topométriques réalisées simultanément sur le terrain permettaient d'obtenir un canevas de points d'appui pour l'utilisation photogrammétrique des clichés. L'exploitation sous forme de restitution photogrammétrique en élévations, plans, coupes et courbes de niveau, se faisait à l'aide d'appareils de photogrammétrie dits « universels », parce qu'ils permettaient non seulement le traitement des clichés aériens, mais aussi d'autres types de prises de vue (Bonneval, 1958). Ces appareils, basés sur de la mécanique et de l'optique, permettaient à l'opérateur de voir la scène photographiée en relief, mais surtout d'en dessiner les éléments remarquables grâce à un index lumineux asservi à un crayon, que l'opérateur déplaçait sur le contour de ces formes.

Les appareils de photogrammétrie analogiques ont été remplacés dans les années 1970 par des appareils de photogrammétrie dits « analytiques », enrichis d'un ordinateur

permettant d'implémenter informatiquement la formule d'image, c'est-à-dire la loi fondamentale modélisant la relation entre un point sur la scène photographiée et son image sur le cliché. Toujours aussi encombrants (voir figure 2.3), puisqu'on y met encore les porte-clichés et les périphériques de déplacement dans le modèle stéréoscopique (souvent des manivelles pour le déplacement dans le plan de référence, et une pédale circulaire pour le déplacement dans le sens de la profondeur), ces appareils permettent cependant d'alléger un peu les spécifications de prises de vues, le modèle implémenté permettant de gérer davantage de cas.



a)



b)

**Figure 2.3.** Exemples d'appareils de restitution photogrammétrique :  
a) appareil de photogrammétrie analogique (Planimat, Zeiss) ;  
b) appareil de photogrammétrie analytique (SD2000, Leica)

### 2.2.2. Modernisation de l'équipement

Il faut attendre les années 1990 pour voir les premiers postes de photogrammétrie numérique libérer encore les contraintes de relevé par photogrammétrie. Les appareils photographiques numériques conquièrent rapidement les photogrammètres qui fondent, dans ces images de qualité, l'espoir d'implémenter dans leurs processus de production des algorithmes de mesures automatiques déjà éprouvés sur des clichés argentiques scannés (Maître *et al.*, 1992). Aujourd'hui, une station de photogrammétrie numérique est un ordinateur standard, toutes les exigences relatives aux déplacements fluides des images sur l'écran, ou même à l'affichage stéréoscopique, étant désormais intégrées dans les configurations normales des ordinateurs grand public (hormis parfois la carte graphique).

La tendance récente aux logiciels libres, qui plus est automatiques, a achevé de démocratiser la photogrammétrie, longtemps restée l'apanage de quelques spécialistes, aujourd'hui débordant les traditionnels cartographes pour investir notamment les métiers du patrimoine. En effet, il n'est parfois même plus nécessaire d'avoir une station de travail « complète », la reconstruction 3D s'automatise et remplace (partiellement) la saisie 3D (voir section 2.5).

### 2.2.3. Les caméras

Les logiciels d'exploitation photogrammétrique actuels permettent non seulement de tenir compte de toutes les caractéristiques géométriques des caméras (distance focale et loi de distorsion optique), mais aussi dans la plupart des cas de les déterminer à partir d'images spécifiques acquises sur un polygone d'étalonnage ou même sur une surface quelconque (auto-étalonnage, voir section 2.4.2). Il n'est donc plus nécessaire d'utiliser des chambres métriques précautionneusement étalonnées en laboratoire. En d'autres termes, toutes les caméras permettent aujourd'hui de faire de la photogrammétrie. Mais toutes les caméras ne garantissent pas la même qualité d'image et ne sont pas équivalentes en ce qui concerne leur stabilité dans le temps. Le savoir-faire du photographe est également un paramètre important.

Le choix de tel ou tel appareil photographique est guidé avant tout par le besoin de voir plus ou moins de détails dans les images (c'est-à-dire par la résolution spatiale des images souhaitée, régie par la combinaison de l'éloignement à la scène et de la distance focale de l'objectif photographique utilisé, voir figure 2.6). D'autres contraintes, comme pouvoir enregistrer des informations dans le canal infrarouge, pouvoir télécommander la caméra, autoriser un crash (pour des prises de vue par drone notamment) peuvent encore restreindre l'éventail des possibles.

Il n'est pas interdit d'utiliser des appareils photographiques compacts ou bridges, mais le fait qu'ils ne soient pas parfaitement stables, et qu'on ne puisse pas régler manuellement tous les paramètres peut nuire à la qualité photogrammétrique du résultat. L'utilisation d'appareils réflex doit être privilégiée, si possible avec plusieurs objectifs (voir figure 2.4) pour s'adapter à toutes les situations sur le terrain (du très grand angle, le *fisheye*, qui permettra de photographier avec efficacité des couloirs étroits par exemple, au téléobjectif, grâce auquel des détails inaccessibles seront bien restitués, en passant par des objectifs dits normaux pour les cas plus classiques).



**Figure 2.4.** Exemple d'appareil photographique réflex avec différents objectifs (15 mm, 24 mm, 35 mm, 50 mm, 100 mm)

### 2.2.3.1. Caméras argentiques

Les caméras numériques ayant fait leurs preuves à bien des égards (qualité radiométrique, souplesse d'utilisation), les caméras argentiques ne servent presque plus aujourd'hui aux relevés photogrammétriques. Il peut arriver cependant qu'on ait à utiliser des images issues de la numérisation d'anciens clichés (voir figure 2.5). Le plus difficile est alors de retrouver le modèle de caméra, ainsi que ses caractéristiques géométriques : distance focale, loi de distorsion, et éventuellement position des repères de fond de chambre, qui permettront de définir précisément le lien entre le système de coordonnées « image » et le système de coordonnées « fond de chambre » de la caméra.

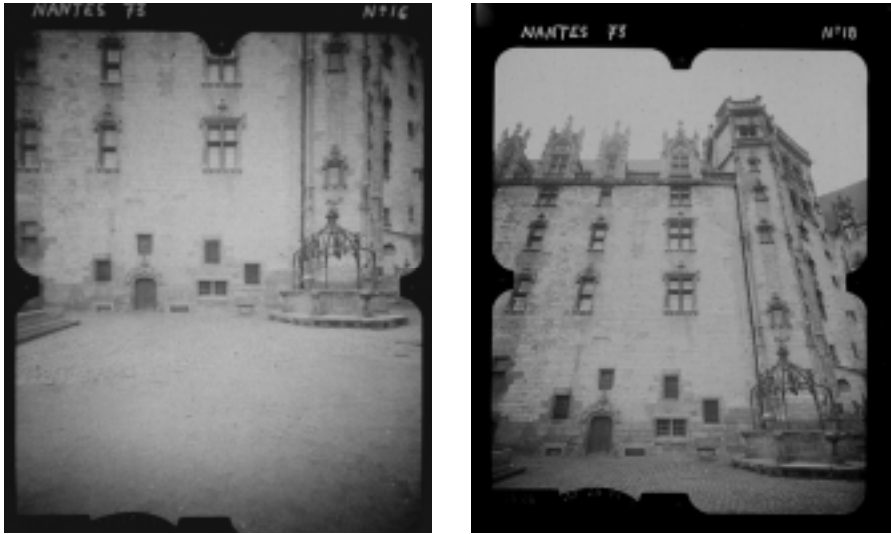


Figure 2.5. Films argentiques scannés

## 2.2.4. Comment mesurer avec une caméra ?

### 2.2.4.1. Modélisation de la matière première : l'image

L'image prise par une caméra classique (directement héritée de la *camera obscura* de Léonard de Vinci) se modélise par une projection du monde réel (en trois dimensions) sur un plan en deux dimensions (le fond de chambre de la caméra). Les propriétés géométriques de cette projection sont fonction, bien entendu, de la caméra utilisée.

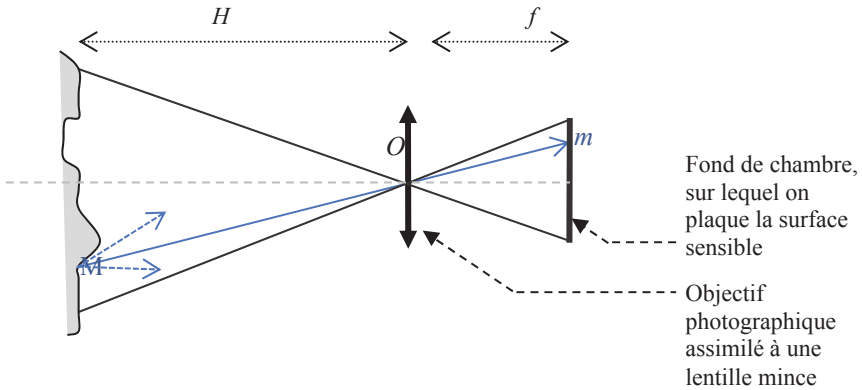
En première approximation, l'objectif photographique de la caméra, en réalité composé de plusieurs lentilles, peut être assimilé à une lentille mince. Dans ce cas, les lois de l'optique impliquent que tout rayon lumineux passant par le centre de la lentille n'est pas dévié. On peut donc représenter schématiquement la fabrication de la photographie, ou de l'image, comme le montre la figure 2.6.

### 2.2.4.2. Résolution spatiale des images

Les grandeurs dimensionnantes sont :

- l'éloignement à l'objet, noté  $H$  ;
- la distance focale de la caméra, notée  $f$  (distance du centre optique  $O$  de l'objectif au plan où les rayons lumineux issus de l'infini convergent et impriment une image nette sur le fond de chambre) ;

- les dimensions du fond de chambre (sur lequel est plaquée la surface sensible, émulsion argentique ou capteur CCD, qui permet de fixer la photographie) ;
- la taille du photosite sur le fond de chambre pour les caméras numériques (un photosite correspondant à un pixel de l'image en sortie), notée  $Tpx$ .



**Figure 2.6.** Schéma de fabrication d'une image

La résolution spatiale des images, que l'on nommera dorénavant  $R$ , désigne la taille de la zone couverte sur l'objet photographié par un pixel. Elle dépend de  $H$ ,  $f$  et  $Tpx$ , selon la formule :

$$R = H \times \frac{Tpx}{f}$$

Comme évoqué en section 1.2.3, la résolution des images est choisie en fonction du cahier des charges : une résolution de quelques centimètres peut suffire pour les grandes lignes structurales de l'édifice. Pour relever le parement de pierre, on choisira une résolution centimétrique. Si des détails encore plus fins doivent figurer dans le produit final, on affinera encore, au moins localement, la résolution image.

Il est évident que, pour une image donnée, la résolution spatiale n'est qu'une valeur moyenne (voir figure 2.7, où un pixel au sol correspond à une surface plus grande qu'un pixel sur la balustrade).



**Figure 2.7.** Résolution spatiale variable au sein d'une image

#### 2.2.4.3. Condition de colinéarité – Formule d'image

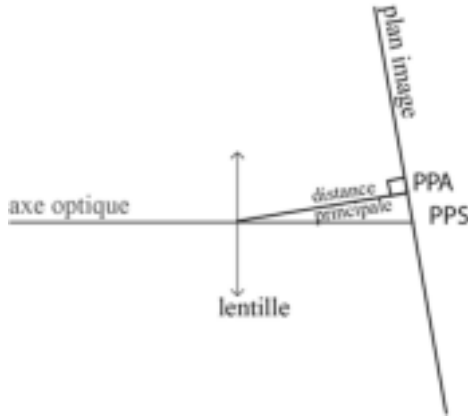
Afin d'utiliser les images comme des instruments de mesure, il est nécessaire de connaître précisément la relation entre un point objet  $M$  et son image  $m$ . Cette relation s'appelle la *formule d'image*, exprimée par une fonction mathématique  $m = \phi(M)$ . La figure 2.6 nous montre qu'un point objet  $M$  diffuse la lumière incidente dans toutes les directions, et qu'un des rayons ainsi réfléchis pénètre dans la caméra pour imprimer son image  $m$ . C'est pourquoi la formule d'image s'appelle, en première approximation, pour les images prises par une caméra classique, la *condition de colinéarité*, car elle décrit que  $M$ ,  $S$  et  $m$  sont alignés (Kasser *et al.*, 2001).

On doit aussi tenir compte de quelques différences entre la réalité et ce modèle, dans les cas où leur effet est supérieur à la précision attendue par cette méthode (la courbure de la Terre et la réfraction atmosphérique en photogrammétrie aérienne, la distorsion optique dans tous les cas). En photogrammétrie rapprochée (par opposition à la photogrammétrie aérienne, où l'on est plus loin de l'objet d'étude), la distorsion optique est le phénomène le plus important à prendre en compte.

#### 2.2.4.4. Détermination des paramètres de la formule d'image : mise en place photogramétrique

La formule d'image, indispensable à toute production photogramétrique, dépend de la position de la caméra au moment de la prise de vues ( $S$ ), de son orientation ( $R$ ), et des caractéristiques géométriques de la caméra elle-même. Ces caractéristiques

géométriques (voir figure 2.8) sont les points principaux (*PPA* – autocollimation et *PPS* – symétrie), la loi de distorsion (voir figure 2.9), et la distance principale (ou encore distance entre le centre optique et le plan image, différent du plan focal lors de mises au point rapprochées). Ils sont déterminés, soit en amont de la chaîne par une procédure d'étalonnage en laboratoire ou sur un site spécifique appelé polygone d'étalonnage, soit en utilisant directement les images destinées au relevé photogrammétrique (on parle alors d'auto-étalonnage).



**Figure 2.8.** Schéma d'un objectif photographique



**Figure 2.9.** Effet de la distorsion optique

Les paramètres externes de la caméra (*S* et *R*) sont, soit mesurés pendant la prise de vues par des dispositifs spécifiques (antenne GNSS, centrale à inertie, utilisées

surtout en prise de vues aéroportée), soit déterminés par des mises en place photogrammétriques (voir section 2.4).

#### 2.2.4.5. Utilisation des images mises en place

Une fois les images mises en place, il est possible de :

- restituer en 3D les détails visibles dans les images par saisie manuelle ;
- produire des nuages de points 3D automatiquement ;
- orthorectifier les images (si l'on dispose par ailleurs d'une connaissance du relief de la scène).

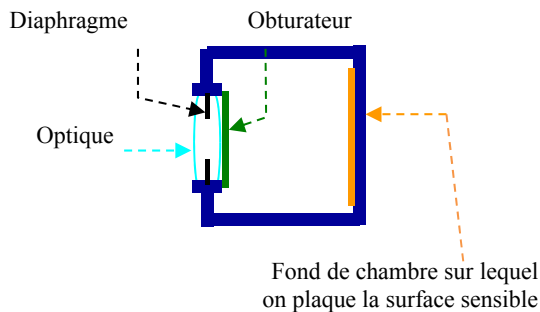
## 2.3. Acquisition des images

### 2.3.1. Caractéristiques des images

Les principales qualités demandées aux images techniques d'un chantier de photogrammétrie répondent au besoin de pouvoir correctement lire l'objet d'étude dans l'image :

- exposition correcte (pas de zone sur ou sous-exposée) ;
- netteté en tout point (en d'autres termes, grande profondeur de champ) ;
- couleurs réalistes et régulières ;
- mise au point fixe par sous-blocs d'images, dans la mesure du possible, de façon à ce que les caractéristiques géométriques de la caméra intervenant dans le modèle puissent être déterminées précisément par photogrammétrie.

La figure 2.10 schématise une caméra dont le réglage des différents composants influe sur la qualité de l'image.



**Figure 2.10.** Schéma simplifié d'un appareil photographique

### 2.3.1.1. Exposition

Une fois la caméra ou (pour les réflex) l'objectif choisi, l'exposition correcte des images est obtenue en jouant à la fois sur l'éclairage de l'objet d'étude, le temps de pose (temps d'ouverture de l'obturateur pendant lequel la lumière rentre dans la caméra), l'ouverture du diaphragme (qui règle la quantité de lumière qui peut rentrer dans la caméra) et la sensibilité du capteur (amplification du signal entrant). On considère que l'exposition est correcte quand l'histogramme des couleurs est équilibré (nombre de pixels par couleur, voir figure 2.11) et qu'il n'y a pas de couleurs saturées. Pour se donner la possibilité d'améliorer le réalisme des couleurs par des traitements *a posteriori* sur les images brutes, on peut inclure dans la scène une mire de couleurs standards.

### 2.3.1.2. Netteté

La netteté des images est réglée par la distance de mise au point. La profondeur de champ, c'est-à-dire l'étendue dans la scène des objets nets sur l'image, sera d'autant plus grande (De Ferrières, 2004) que :

- le diaphragme est raisonnablement fermé (grand nombre d'ouverture, de l'ordre de 9 ou 11 selon les appareils photographiques ; des valeurs supérieures pouvant entraîner de fâcheux phénomènes de diffraction) ;
- la focale est courte ;
- la distance de mise au point grande.

Pour favoriser une grande profondeur de champ, c'est-à-dire pour limiter le risque que certaines zones des images soient floues, donc mal appropriées aux traitements photogrammétriques, on travaille de préférence avec un diaphragme fermé.

### 2.3.1.3. Format des images

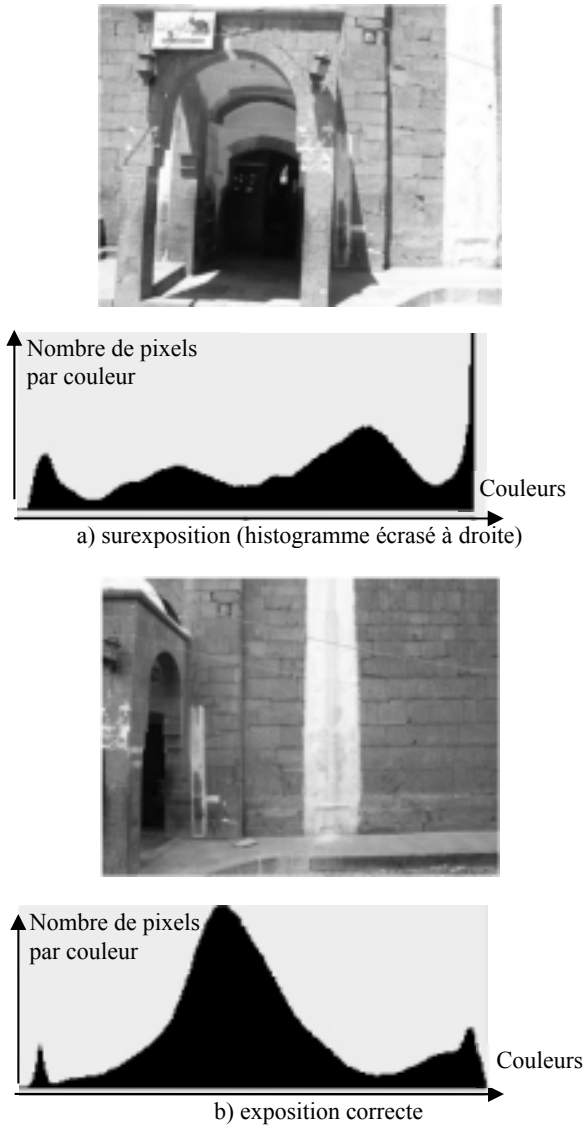
Enfin, il est préférable d'enregistrer les images dans un format non dégradé, de façon à ce que les applications automatiques basées sur des algorithmes de reconnaissance des formes soient les plus performantes possible. Car, la majorité des formats compressés (du type JPEG<sup>1</sup> ou ECW<sup>2</sup>) permettent d'alléger le volume des données à manipuler, mais la perte des données qu'ils induisent, implique aussi des artefacts (phénomènes de moirage visibles sur le format JPEG à de forts taux de compression). De plus, il est possible d'effectuer l'acquisition dans un format brut, c'est-à-dire sans modification du signal enregistré et de redévelopper ultérieurement ces images brutes, ce qui permet une plus grande souplesse quant à la compensation des erreurs de réglage de la caméra. Notons enfin que la plupart des caméras

---

1. *Joint Photographic Experts Group* : [www.jpeg.org](http://www.jpeg.org).

2. *Enhanced Compression Wavelet* : [http://en.wikipedia.org/wiki/ECW\\_\(file\\_format\)](http://en.wikipedia.org/wiki/ECW_(file_format)).

incorporent à certains formats d'images des métadonnées qui décrivent les paramètres de réglage de l'appareil photographique au moment de la prise de vues (dites données EXIF<sup>3</sup>).



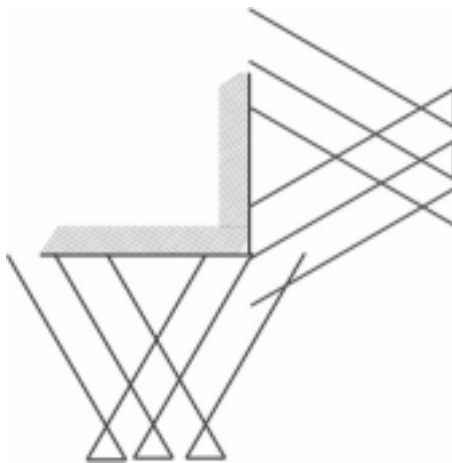
**Figure 2.11.** Expositions différentes sur deux images se recouvrant sur le mur sud extérieur de la grande mosquée de Sana'a (Yémen)

3. *Exchangeable image file format* : [www.cipa.jp/std/documents/e/DC-008-2012\\_E.pdf](http://www.cipa.jp/std/documents/e/DC-008-2012_E.pdf).

### 2.3.2. La prise de vues stéréoscopique traditionnelle

Tout processus photogrammétrique exige que chaque point de la scène photographiée soit vu sur deux images au moins. En d'autres termes, les images doivent se recouvrir d'au moins 50 %. Jusqu'à l'arrivée récente des outils logiciels très automatisés, les prises de vues stéréoscopiques, conçues pour des travaux de stéréorestitution manuelle ou d'orthorectification, étaient réalisées par bandes se recouvrant légèrement deux à deux (recouvrement latéral de 10 % à 20 %), composées d'images stéréoscopiques se recouvrant à 60 % au moins (recouvrement longitudinal au sein d'une bande). Les productions impliquant une visualisation des couples stéréoscopiques par un opérateur imposent une configuration stéréoscopique dite « normale », c'est-à-dire telles que les images soient à axes parallèles, perpendiculaires à la scène. De telles spécifications de prise de vues (recouvrements latéral et longitudinal de 20 et 60 % ; axes parallèles entre eux et perpendiculaires à la scène) sont simples à mettre en œuvre en aérien, dans le cas d'un paysage peu accidenté. Dans ce cas en effet, le déclenchement des images est asservi par des méthodes GNSS à une trajectoire calculée en fonction des spécifications de prise de vues et du relief de la zone. Il n'en est pas de même pour les prises de vues terrestres, où l'on est confronté à des façades très accidentées par rapport à l'éloignement de la caméra, à des parties cachées, au manque de recul, à l'inaccessibilité des points de vues de face (le haut des façades notamment).

Quel que soit le contexte, on doit respecter la contrainte d'avoir un  $B/H$  (rapport entre la base stéréoscopique et l'éloignement à la scène) compris entre  $1/2$  et  $1/6$  pour assurer le confort de l'opérateur qui fera les mesures, et garantir une bonne précision de restitution de la profondeur (voir figure 2.12) (Waldhäusl *et al.*, 1994).



**Figure 2.12.** *Prise de vues classique de zones d'intérêt sur un coin de bâtiment (vue de dessus)*

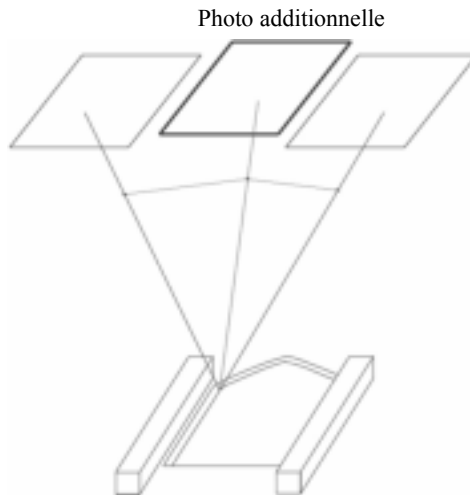
### 2.3.3. La prise de vues stéréoscopique pour la production automatique de nuages de points 3D

La plupart des prises de vues pratiquées aujourd'hui sont beaucoup plus redondantes que les prises de vues classiques. On passe en effet d'une contrainte imposant que tout point de l'objet d'étude soit vu sur deux photos au moins en configuration normale (pour des besoins de restitution manuelle par un opérateur), à une contrainte imposant que tout point de l'objet d'étude soit vu sur trois photos au moins (pour des besoins de robustesse des algorithmes de restitution automatiques) (Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2011).

Pour permettre l'utilisation des nouveaux outils logiciels automatiques de la photogrammétrie, il est conseillé d'appliquer pour la prise de vue des règles supplémentaires, listées ci-après par ordre d'importance.

#### 2.3.3.1. Augmenter les recouvrements de 60 à 80 % pour garantir le succès des algorithmes d'appariement

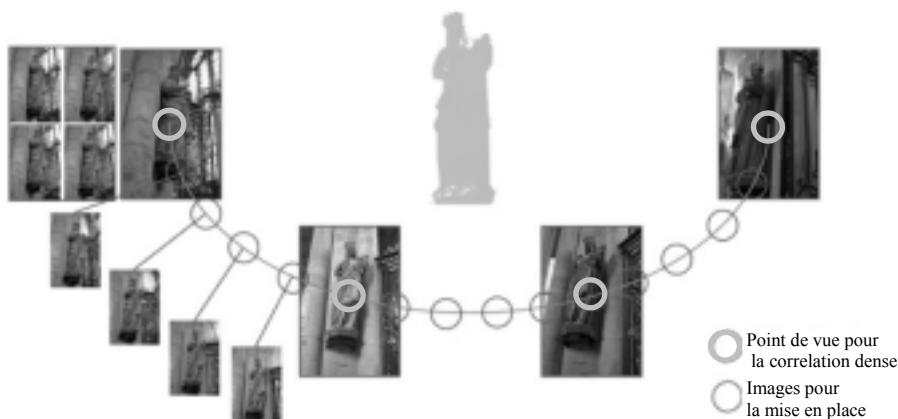
En effet, les nouveaux outils photogrammétriques qui permettent de fabriquer notamment des nuages de points 3D sont basés sur l'appariement automatisé de détails homologues (voir section 2.5). Pour garantir le succès de l'appariement automatique, les points de vue entre les images ne doivent pas être trop différents (le recouvrement doit donc être supérieur, voir figure 2.13).



**Figure 2.13.** Rajout d'images pour assurer le succès des algorithmes d'appariement

### 2.3.3.2. Ne pas hésiter à prendre des photos convergentes

En effet, en augmentant l'angle d'intersection des rayons perspectifs homologues, elles permettent d'augmenter la précision de reconstruction 3D. De plus, elles s'imposent pour certains objets vraiment 3D, par opposition aux photographies à axes parallèles qu'on privilégie pour les grandes surfaces relativement planes (figure 2.14).

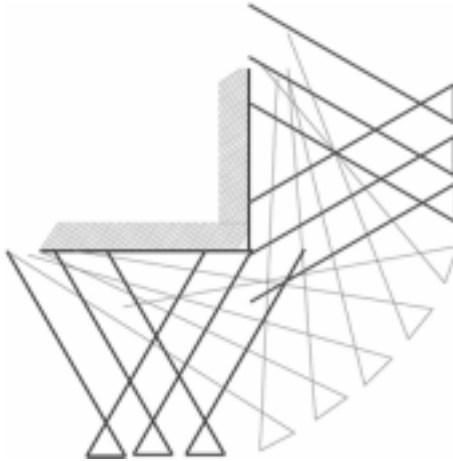


**Figure 2.14.** Stratégie de prise de vues pour un objet 3D (Héno et al., 2011)

### 2.3.3.3. Lier les éventuels points de vue pour que tout soit exprimé dans un unique système de coordonnées

Imaginons que l'on fasse quatre prises de vues stéréoscopiques pour documenter un bâtiment simple à quatre faces, dans le but d'obtenir quatre nuages de points 3D. Pour garantir que tous les nuages de points 3D puissent être utilisés simultanément, on doit travailler dans un unique système de coordonnées. Une façon simple d'y parvenir est de prendre des images stéréoscopiques liant les points de vue entre eux (voir figures 2.14 et 2.15), en évitant que deux axes de prise de vues consécutifs forment un angle supérieur à  $10^\circ$ , contrainte imposée par l'algorithme SIFT<sup>4</sup> (Lowe, 2004), très souvent utilisé pour l'extraction des points de liaison (voir la section 2.4). Ainsi, il y aura des points de liaison entre toutes les images du bloc, ce qui garantit la possibilité de calculer le géoréférencement de toutes les images en une seule fois.

4. SIFT : *Scale Invariant Feature Transform*.



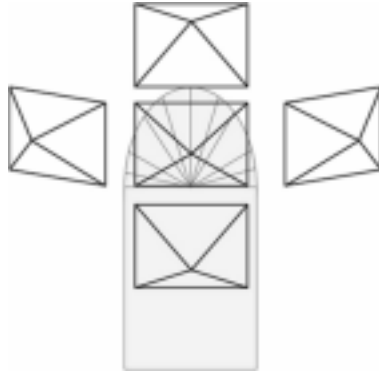
**Figure 2.15.** Photos complémentaires pour être en mesure de tout exprimer dans un seul système de coordonnées (vue de dessus)

#### 2.3.3.4. Prendre des images spécifiques destinées à calculer l'étalonnage de la caméra

Les processus tout automatique englobent l'étalonnage de la caméra dans la mise en place des images. Cependant, certaines configurations s'y prêtent mal, ou pas du tout : zone plate, axes de prise de vues parallèles entre eux, longues focales (Fraser, 2013). Il est préférable d'étalonner la caméra sur une prise de vues faite spécialement pour cela, sur une zone présentant à la fois de la texture et de la profondeur. Pour une caméra donnée, toute nouvelle combinaison « zoom + mise au point » entraîne théoriquement un nouvel étalonnage.

#### 2.3.3.5. Doubler si possible les bases stéréoscopiques latérales par des bases stéréoscopiques perpendiculaires, pour rendre les algorithmes d'appariement plus robustes

En effet, sachant que la recherche du meilleur détail homologue se fait le long d'une ligne parallèle à la base stéréoscopique (voir section 2.5.2), il est utile, pour discriminer les ambiguïtés sur tous les pixels contenus dans les objets parallèles à la base, de disposer d'images en recouvrement dans une configuration stéréoscopique différente. C'est cette recommandation qui motive la prise de vues en croix (voir figure 2.16) où l'on prend d'abord une image centrale, puis deux images de part et d'autre dans le sens latéral et deux images de part et d'autre dans le sens vertical.



**Figure 2.16.** Schéma de prise de vues en croix sur le haut d'un portail (cinq images)

### 2.3.3.6. Doubler les prises de vues faites avec un objectif à longue focale de prises de vue au grand-angle

La mise en place des images prises avec des objectifs à longue focale ( $> 100$  mm) est notoirement plus délicate que celle des images faites avec un objectif normal (l'intersection des rayons perspectifs homologues dans de telles images est ambiguë, voir figure 2.17). Pour contrer cet écueil, les photogrammètres conseillent de doubler la prise de vues d'images plus classiques (objectif normal ou grand-angle), sur laquelle on réalisera un survol photogrammétrique qui donnera une multitude de points d'appui pour géoréférencer les images « longue focale » par simples relèvements dans l'espace (voir section 2.4) (Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2012). La figure 2.18 montre un exemple d'une telle prise de vues.



**Figure 2.17.** Plus la focale est longue, plus l'intersection des rayons perspectifs homologues est ambiguë



**Figure 2.18.** Exemple d'utilisation conjointe d'images faites à des zooms différents  
(galerie des rois de la cathédrale d'Amiens)

### 2.3.3.7. Eviter le vide (ciel, zones sans texture), les surfaces brillantes et les motifs répétitifs

Sachant que les zones sans texture sont peu propices aux traitements automatiques, on peut envisager sur des sites de taille raisonnable de projeter de la texture qui permettra d'automatiser la mise en place des images, et parfois même la reconstruction 3D.

## 2.3.4. Les dispositifs de prise de vue

### 2.3.4.1. Pied photo, mât, perche

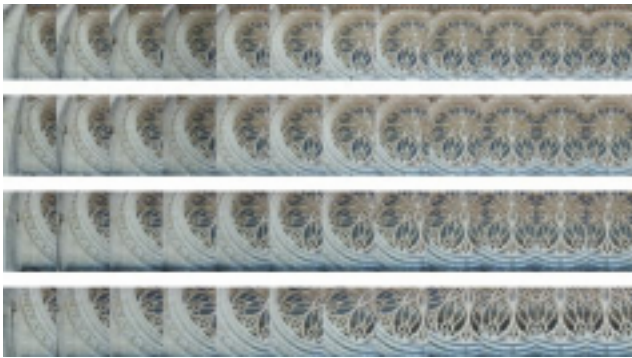
Pour prendre des photos statiques, il est conseillé de travailler avec un pied photo, qui permet des temps de pose assez longs (d'autant plus que l'on travaille généralement à diaphragme plutôt fermé, voir section 2.3.1). Dans ce cas, on utilise un déclencheur souple, qui évite de faire bouger la caméra pendant l'ouverture

de l'obturateur. Faute de déclencheur souple, on peut régler l'appareil en mode retardateur. Il va sans dire qu'on devra s'assurer de la stabilité du sol avant de démarrer des prises de vues sur pied avec de très longues poses.

Certaines configurations (détails remarquables inaccessibles) requièrent l'utilisation d'un mât ou d'une perche (voir figure 2.19), sur lesquels on fixe la caméra qui doit être pilotable à distance, souvent *via* un ordinateur, relié par réseau sans fil ou par un câble. Le maniement d'un mât d'une dizaine de mètres est évidemment plus compliqué que celui d'un pied classique, pour des raisons de sécurité et d'encombrement.



a)



b)

**Figure 2.19.** a) Mise en œuvre d'une perche ;  
b) prise de vue fortement redondante résultante (Héno et al., 2012)

#### 2.3.4.2. Tête panoramique

Il peut aussi être utile de se munir d'une tête panoramique, qui permet de produire des images de grande emprise à très haute résolution (D'annibale *et al.*, 2013). Il est possible en travaillant ainsi (utilisation de pied, mât avec ou sans tête panoramique) de combiner des images acquises à différents temps de pose pour obtenir la meilleure exposition en tout point (fusion HDR<sup>5</sup>, par post-traitement, Happa *et al.*, 2009).

#### 2.3.4.3. Acquisitions mobiles

Pour des raisons d'efficacité (sur de grands sites par exemple), ou d'inaccessibilité à certaines zones (parties hautes d'un édifice), on peut être amené à embarquer la caméra sur une voiture ou sur un aéronef. Quelques règles à respecter pour tous les types d'acquisition mobile peuvent être données.

De façon générale, on privilégie un éclairage homogène, si possible sous couvert nuageux, notamment pour éviter les ombres trop marquées, d'autant plus gênantes qu'elles se déplacent lorsque la durée de la prise de vues s'allonge. Concernant la caméra, elle doit autoriser une cadence suffisante pour obtenir des images stéréoscopiques à très haute résolution (de l'ordre de dix images au moins par seconde) et doit pouvoir être déclenchée à distance. Sur la plupart des caméras grand public, cette cadence est incompatible avec le format d'enregistrement brut des images, plus lourd que les formats compressés. Les caméras aériennes professionnelles (c'est-à-dire réellement dédiées à l'acquisition d'images stéréoscopiques pour la cartographie) sont souvent équipées d'un système de compensation de filé, pour éviter un flou lié au déplacement de la caméra pendant l'ouverture de l'obturateur. Sur les caméras grand public, faute d'un tel dispositif, il faudra privilégier des temps de pose très courts.

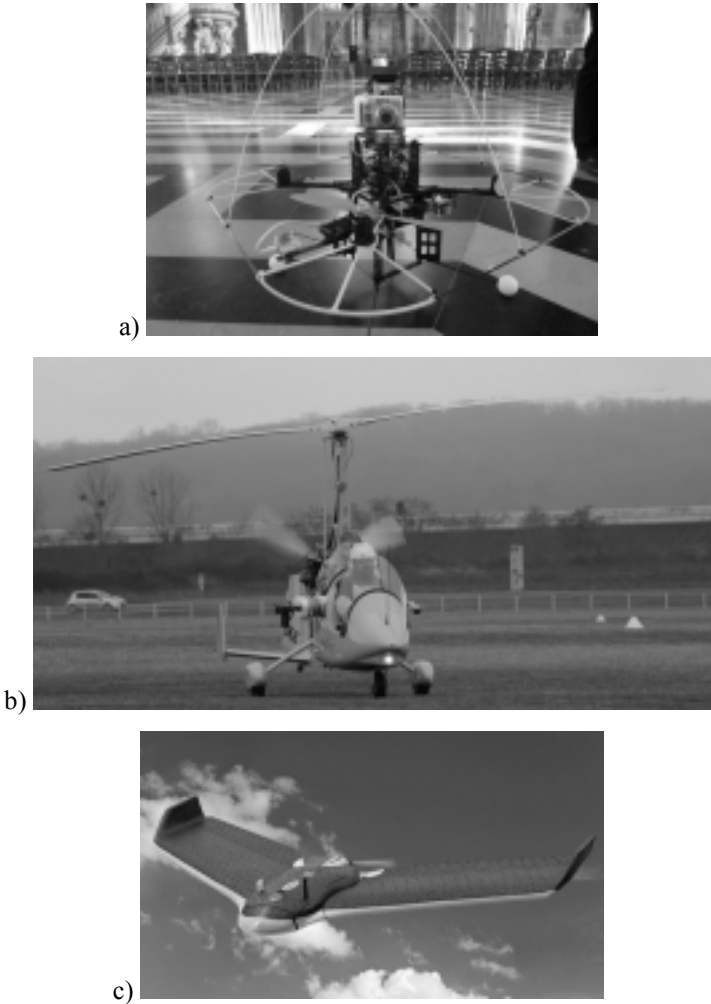
##### 2.3.4.3.1. Acquisitions aéroportées

On peut mettre en œuvre des prises de vues aériennes légères (c'est-à-dire pour un budget modeste) par petit avion, ULM ou drone (aéronef sans pilote), pour accéder aux parties hautes d'un édifice. On portera une attention supplémentaire aux conditions météorologiques, notamment au vent, pour les acquisitions aéroportées.

Les drones sont de plus en plus utilisés dans le relevé d'édifices remarquables, car ils permettent d'obtenir à coût modéré des images à très haute résolution, avec des angles de vues multiples, sur des parties inaccessibles du sol (Zhang (1), 2011). Ils peuvent être de type hélicoptère, aile ou avion (voir figure 2.20) sans parler des simples cerfs-volants ou des ballons, qui n'ont pas d'énergie propre, et qui ne peuvent donc pas suivre un plan de vol prédéfini (EisenBeiss, 2009).

---

5. *High Dynamic Range.*



**Figure 2.20.** Exemples d'aéronef et de drones : a) drone de type hélicoptère ;  
b) autogyre (la caméra est fixée sur une barre portée par le passager) ;  
c) drone de type avion (Sensefly)<sup>6</sup>

Les drones de type hélicoptère sont adaptés pour la couverture photographique de façade, ou de façon générale pour toute zone réclamant un vol stationnaire, tandis que les ailes ou avions sont utilisés pour survoler et photographier de plus grandes surfaces.

---

6. [www.sensefly.com/home.html](http://www.sensefly.com/home.html).

Quel que soit le modèle, l'utilisation d'un drone suppose que des démarches préalables (assurances, autorisations de vol, qualification du pilote) aient été effectuées, selon des scénarios qui dépendent de la distance maximale entre le drone et le pilote, la hauteur de vol et le type de zone survolée (peuplée ou non). Que l'on embarque la caméra dans un petit avion piloté, dans un ULM ou dans un drone, il faudra avoir prévu un système d'accrochage robuste, permettant le déclenchement à distance (signal radio, infrarouge, câble), et l'avoir fait valider par l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale)<sup>7</sup>.

#### 2.3.4.3.2. Acquisitions mobiles terrestres

Même au sol, des impératifs de productivité peuvent orienter la numérisation vers des dispositifs mobiles : camionnettes, voitures, chariots, etc. Les contraintes sur la cadence de déclenchement des images sont théoriquement moins strictes qu'en aéroporté, puisqu'on peut facilement rouler doucement sans mettre en péril la stabilité du porteur. Mais en pratique, pour des raisons de rentabilité, on utilisera aussi des caméras à déclenchement rapide. Il est évident que les images issues de tels dispositifs n'auront pas la qualité (netteté, absence d'occlusions) d'images acquises d'une station fixe. Mais elles peuvent suffire pour le relevé de tout un quartier où le rendu n'est pas l'objectif principal. Bien que ce mode d'acquisition ait surtout fait ses preuves pour des villes entières (Paparoditis, 2012), on compte cependant quelques initiatives pour des relevés plus ciblés avec des petits véhicules capables de dépasser l'espace public et éventuellement de rentrer dans les bâtiments<sup>8</sup>.

#### 2.3.4.4. Mode vidéo

On peut gagner du temps sur l'acquisition des images intermédiaires (par exemple des images de liaison entre les points de vue, ou des images au grand-angle pour faciliter la mise en place des images faites avec des objectifs longue focale) en réalisant la prise de vues en mode vidéo. On convertit ensuite cette vidéo en images fixes, qui seront traitées avec le processus habituel. Ces images sont certes moins résolues, et parfois, pour certaines d'entre elles, floues, mais elles ne servent pas à fabriquer le produit final (Samaan *et al.*, 2013).

#### 2.3.4.5. Caméras stéréoscopiques<sup>9</sup> et caméra « temps de vol »

Il existe des boîtiers qui intègrent deux ou trois caméras pour produire des images stéréoscopiques en un seul clic. La distance qui sépare les objectifs est proche de la distance interpupillaire (environ 7 cm). La synchronisation précise des différents objectifs n'est pas un point crucial dans le levé d'édifice remarquable (comme il peut l'être pour la modélisation 3D de surfaces en mouvement). L'intérêt de ce type

7. [www.icao.int/Pages/FR/default\\_FR.aspx](http://www.icao.int/Pages/FR/default_FR.aspx).

8. [www2.isprs.org/commissions/comm1/wgs.html#icwg\\_1-5a](http://www2.isprs.org/commissions/comm1/wgs.html#icwg_1-5a).

9. [http://en.wikipedia.org/wiki/Stereo\\_camera](http://en.wikipedia.org/wiki/Stereo_camera).

de matériel pour le relevé d'édifice remarquable est de produire des paires ou triplets d'images à base stéréoscopique connue, ce qui permet de donner une échelle au modèle (Ahmadabadian, 2013). Mais la base stéréoscopique étant petite, on ne peut pas raisonnablement s'éloigner beaucoup du site à relever.

Les caméras « temps de vol » permettent de fournir pour chaque pixel une mesure de distance. Elles peuvent enregistrer jusqu'à 50 images 3D par seconde. La taille des capteurs est encore assez basse, mais des applications dans le domaine du relevé architectural pourraient émerger prochainement (Rinaudo, 2013).

### ***2.3.5. Éléments de géoréférencement***

Au moment de la prise de vues, on prévoit les points d'appui connus dans le système de référence choisi (le système global) qui serviront à géolocaliser les produits photogrammétriques. Ces points peuvent être des détails naturels ou des cibles artificielles. Des règles établies pour la production classique (mise en place par bloc – ou aérotriangulation – de prises de vues standards) imposent d'avoir un point connu en trois dimensions à chaque coin du bloc d'images, plus un point par couple stéréoscopique. La précision absolue de la mise en place dépend directement des points d'appui utilisés : des mesures sur cible donneront une meilleure précision finale que des mesures sur des points naturels mal définis. On estime que la précision de pointé est subpixelaire sur cible, pixelaire sur des taches symétriques, des intersections de joint, et vaut jusqu'à quelques pixels sur des angles de pierre arrondis.

Si l'on connaît bien les spécifications de l'équipement en points d'appui des prises de vues classiques, peu d'études existent aujourd'hui sur la façon dont il faut équiper les prises de vues redondantes pour obtenir la qualité espérée. Cependant, les blocs de prises de vues redondantes étant très rigides, un équipement allégé devrait amplement suffire (un point à chaque angle du bloc, et un point tous les deux ou trois couples).

## **2.4. Mise en place des images**

### ***2.4.1. Principes***

Une fois les images stéréoscopiques acquises, elles sont traitées dans une chaîne logicielle en vue de produire, de façon plus ou moins automatique, des nuages de points 3D, des ortho-images, ou du dessin 3D métrique. Quels que soient les produits attendus et la chaîne utilisée, la première étape est la mise en place des images. Certes, les outils complètement automatisés qui n'autorisent aucune interaction une fois les images chargées, gèrent cette étape comme une boîte noire, mais ils mettent en œuvre des principes tout à fait similaires aux outils plus experts.

La mise en place des images vise à calculer la position ( $S$ ) et l'orientation ( $R$ ) des caméras au moment de la prise de vue et, dans certaines applications, les caractéristiques géométriques de la caméra utilisée (auto-étalonnage).

Le géoréférencement direct consiste à enregistrer la position et l'orientation de la caméra au moment de la prise de vue par des dispositifs externes (par exemple, antenne GNSS, centrale à inertie). Dans ce cas, la mise en place photogrammétrique est inutile. Mais les centrales à inertie qui permettraient d'obtenir la précision exigée pour les applications photogrammétriques en aval ont aujourd'hui un prix prohibitif. Seules les missions aéroportées pour des chantiers de grande ampleur sont susceptibles de bénéficier du géoréférencement direct. Par ailleurs, comme les centrales à inertie doivent être utilisées conjointement à un récepteur GNSS pour compenser leurs dérives, il est fort difficile de les utiliser en intérieur.

La mise en place photogrammétrique par bloc d'images qui concerne tout de même l'immense majorité des chantiers de relevé d'édifice remarquable, se compose d'une phase de mesure des points de liaison (détails visibles sur plusieurs images en recouvrement) et éventuellement de points d'appui, ou d'éléments permettant la mise à l'échelle du produit final, et d'une phase de calcul. Les points de liaison servent à connecter les images les unes aux autres, soit pour une mise en place relative des images (on parle alors de *mise en place en l'air*, sans notion d'échelle ni d'orientation), soit pour alléger le besoin en points d'appui dans le processus de mise en place absolue (c'est-à-dire dans le système de coordonnées global). Traditionnellement, on choisit au minimum trois points de liaison au nadir de chaque image, chaque point étant ensuite mesuré sur toutes les images où il est visible.



**Figure 2.21.** Nadirs et points de liaison

La mise en place d'une image seule s'appelle *un relèvement dans l'espace* et se base sur la mesure d'au moins trois points d'appui.

La mise en place d'un bloc d'images se calcule en résolvant des systèmes d'équations basées sur les formules fondamentales de la photogrammétrie (condition de colinéarité et condition de coplanéité dans un couple stéréoscopique).

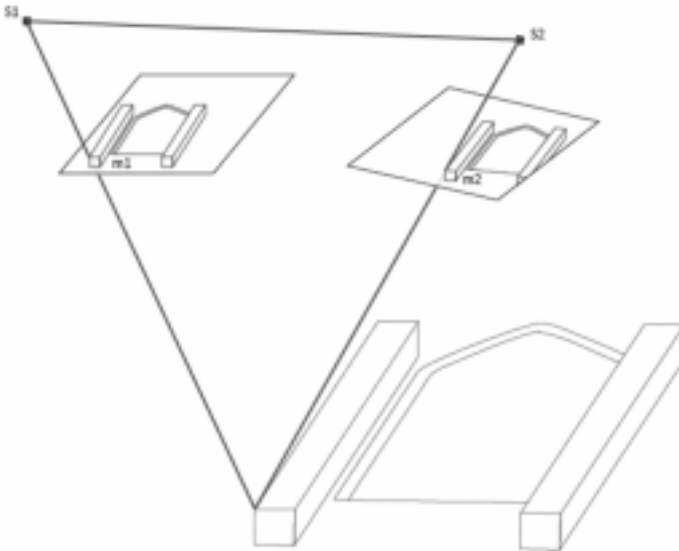
Pour mémoire (voir section 2.2.4) :

– l'équation de colinéarité :  $m=\phi(M)$  décrit l'alignement d'un point  $M$ , du sommet de prise de vues  $S$ , et de  $m$ , l'image de  $M$  sur le fond de chambre de la caméra (voir figure 2.6) ;

– l'équation de coplanéité est basée sur l'annulation du produit mixte entre trois vecteurs portés par la base et deux rayons perspectifs homologues :

$$\overrightarrow{S_1S_2} \cdot (\overrightarrow{S_1m_1} \wedge \overrightarrow{S_2m_2}) = 0$$

Elle décrit le fait que les deux rayons perspectifs homologues sont coplanaires (voir figure 2.22). Lorsque cette annulation est réalisée pour un nombre suffisant de points liaison (cinq au minimum) alors les images du couple sont correctement orientées relativement l'une par rapport à l'autre.



**Figure 2.22.** Coplanéité de la base avec deux rayons perspectifs homologues

Les étapes de la mise en place d'un bloc sont progressives : les bandes sont d'abord calculées en enchaînant les orientations relatives des couples qui les composent (mise en œuvre de l'équation de coplanéité et similitude 3D). Elles sont ensuite orientées les unes par rapport aux autres en appliquant à nouveau des similitudes 3D (transformation à 7 paramètres, composée d'une rotation, d'une translation et d'une mise à l'échelle) calculées sur au minimum 3 points non alignés communs aux deux bandes. Enfin, si des données d'appui sont disponibles, le bloc ainsi formé est basculé dans le système global en appliquant une similitude 3D calculée sur 3 points d'appui au minimum. Une compensation globale de toutes les mesures (sur les points de liaison et d'appui) est enfin calculée pour ajuster au mieux la mise en place des images. Pour ce faire, on met en œuvre les équations de colinéarité, linéarisées au voisinage d'une solution initiale approchée, calculée par les étapes précédentes (enchaînement des couples puis des bandes). Lors de cette étape, appelée « compensation par faisceaux », les observations sont pondérées pour tenir compte des précisions et ordres de grandeur divers des données en entrée.

### **2.4.2. Automatisation**

Le relevé complet à haute résolution d'édifices remarquables par photogrammétrie implique une prise de vues rapidement foisonnante, et variée en termes d'objectifs photographiques utilisés, pour faire face à toutes les configurations possibles (objectifs à courte focale en cas de manque de recul, à longue focale pour les parties éloignées, etc.). Il est donc essentiel que la phase de mise en place des images soit la plus automatisée possible.

#### *2.4.2.1. Automatisation de la mesure des points de liaison*

La mesure des points de liaison est longue à réaliser en mode manuel. Heureusement, elle s'automatise aujourd'hui dans la plupart des cas.

Les méthodes les plus fiables, actuellement, sont basées sur le principe suivant :

- détection de points d'intérêt, points dont la position n'est pas ambiguë, qui peuvent être détectés de façon robuste et répétable, sur toutes les images du bloc ;
- appariement ou mise en correspondance : les points d'intérêt représentant le même détail sur plusieurs images se voient attribuer un même identifiant.

Les détecteurs de points d'intérêt fréquemment mis en œuvre sont SIFT<sup>10</sup>, ASIFT<sup>11</sup>, SURF<sup>12</sup>, et MSER<sup>13</sup> (Barazetti *et al.*, 2010). Par exemple, parce qu'il est capable de détecter des points d'intérêts communs entre des images en recouvrement même si elles présentent des différences d'échelle ou de rotation, l'algorithme SIFT convient particulièrement au contexte de la photogrammétrie rapprochée. Il est en revanche peu robuste aux changements de points de vue, ce qui explique la contrainte souvent donnée de ne pas écarter deux axes de prises de vues consécutifs de plus de 10° dans une prise de vues stéréoscopique. On notera qu'ASIFT, une variante de SIFT plus gourmande en temps de calcul, est insensible aux transformations affines entre images. Certaines chaînes utilisent SURF, optimisé pour accélérer les temps de calcul, ou MSER, qui est un détecteur de régions, insensible notamment aux changements de points de vue.

La phase d'appariement peut se faire par mesure de ressemblance des vignettes photométriques extraites autour des points d'intérêt (voir aussi la section 2.5.2) ou en utilisant des descripteurs plus évolués. Par exemple, l'appariement des points SIFT se fait en utilisant les descripteurs de gradients de radiométrie du voisinage des points d'intérêt (l'appariement se fait entre les points les plus proches dans l'espace à 128 dimensions de ces descripteurs). Les appariements par couple sont ensuite propagés pour obtenir des appariements multiples, car les points de liaison en photogrammétrie sont d'autant plus utiles (puisque favorisant la rigidité du bloc d'images reconstitué) qu'ils sont mesurés sur un grand nombre d'images. Des considérations de voisinage servent à filtrer les fautes : par exemple, deux points voisins ne peuvent pas être appariés à deux points éloignés entre eux. Il arrive que l'on choisisse d'affiner la précision de l'appariement multi-images par corrélation automatique.

La quantité de points de liaison ainsi obtenus dépend bien entendu du contenu des images : plus les images sont texturées, et proches deux à deux, plus on obtiendra de points de liaison. Des algorithmes comme SIFT donnent facilement des milliers de points par image, alors que les outils photogrammétriques classiques n'en exigent que quelques-uns. Certains logiciels, comme Microsoft Photosynth<sup>14</sup>, fournissent d'ailleurs comme nuage de points 3D, les points de liaison reconstruits en 3D après la mise en place des images. Avoir nettement plus de points que le strict minimum exigé n'est pas un luxe inutile : les points densément répartis sur toute la surface des images contribuent à la robustesse de l'auto-étalonnage. Il faut

---

10. *Scale-invariant feature transform.*

11. *Affine-SIFT.*

12. *Speeded Up Robust Features.*

13. *Maximally Stable External Regions.*

14. <http://photosynth.net>.

cependant être en mesure de filtrer efficacement les éventuels points faux : ainsi la méthode d'estimation robuste RANSAC (Fischler *et al.*, 1981) a fait ses preuves (Barazetti *et al.*, 2010).

Enfin, sur certains édifices modernes pauvres en détails ponctuels bien définis (piles de ponts en béton par exemple), il est possible d'utiliser d'autres primitives que les points, comme des segments, pour lier les images les unes aux autres (Hottier, 1975 ; Zhang (2), 2011).

#### 2.4.2.2. *Semi-automatisation de la mesure des points d'appui*

L'utilisation de cibles codées sur le terrain permet d'automatiser la saisie des points d'appui. Certains logiciels permettent par ailleurs de faciliter la mesure des points d'appui plus classiques (cibles normales et points naturels). Ils proposent de commencer par mesurer trois points d'appui bien répartis, après un calcul de mise en place en l'air, afin d'obtenir une mise en place absolue, c'est-à-dire des valeurs approchées des positions et orientations des caméras, qui alimentent les formules d'image. Chaque point d'appui restant peut ainsi être projeté dans les images où il est visible, tout près de sa place correcte, où l'opérateur n'a plus qu'à affiner sa position (Fontaine, 2012).

#### 2.4.2.3. *Mise en place des images et auto-étalonnage*

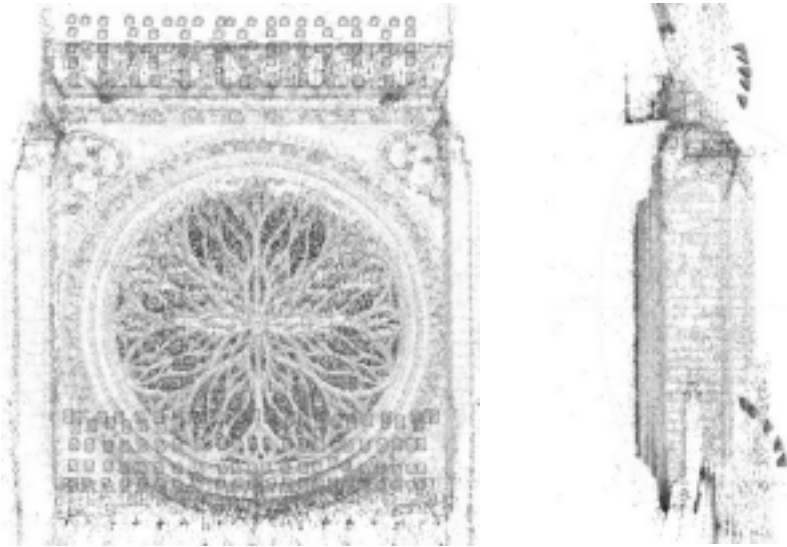
Dans les cas favorables, les chaînes logicielles actuelles sont capables de prendre toutes les images en entrée, et de choisir la meilleure stratégie pour les mettre en place. Ces stratégies consistent à traiter d'abord les images prises au grand angle (reconnues par les métadonnées EXIF). Les images prises avec une plus longue focale sont notoirement plus délicates à mettre en place. Dans le cas où la stratégie habituelle ne convient pas (voir section 2.4.1), des points de liaison communs entre les images à plus courte focale déjà mises en place et les images à traiter serviront de points d'appui pour réaliser des relèvements dans l'espace (résolution des inconnues ( $S$ ) et ( $R$ ) à partir de l'équation de colinéarité seulement, Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2012).

Il est souvent possible d'intégrer l'étalonnage de la caméra au calcul de la mise en place. Dans ce cas, les calculs décrits précédemment sont faits en partant d'une caméra déjà connue, ou au moins à partir d'une caméra approchée, estimée à partir des données EXIF. On considère qu'il n'y a pas de distorsion, que les points principaux sont au centre géométrique du capteur, et que la distance principale est celle fournie par le constructeur. Quand la mise en place des images converge, les paramètres de la caméra sont ré-estimés pour améliorer le résultat global (intersection des rayons perspectifs homologues notamment). On rappelle cependant qu'il est prudent, au moment de l'acquisition, de prévoir des images dédiées à

l'étalonnage, sur une zone adéquate (images convergentes sur une zone texturée présentant de la profondeur).

### 2.4.3. *Stratégies de mise en place de l'ensemble des images d'un chantier*

On découpe habituellement le traitement des images par entités liées au sujet d'étude : ainsi, on traite séparément les images couvrant les façades, puis la toiture, puis la statuaire, etc. Sur chaque entité, on commence par un calcul de mise en place en l'air, c'est-à-dire sans les points d'appui. Le résultat est qualifié par l'écart moyen des rayons perspectifs homologues, souvent exprimé en pixel. En cas de problème, c'est-à-dire si le calcul diverge, ou converge vers une valeur trop élevée, on commence par vérifier les données en entrée (caméras, images éventuellement retournées ou découpées), puis on recalculé un plus petit bloc, auquel on rajoute des images pas à pas. Les calculs vraiment récalcitrants peuvent avoir comme origine une caméra mal déterminée, une prise de vues mal configurée, un objet d'étude peu favorable (manque de texture) ou plusieurs de ces causes à la fois. Une fois le bloc d'images mis en place « en l'air », on mesure quelques points d'appui (au moins trois), et l'on calcule une orientation absolue pour vérifier qu'ils conviennent (numéros corrects, système de coordonnées approprié). Enfin, on les mesure tous et l'on termine le calcul (voir figure 2.23).



**Figure 2.23.** *Nuage de points 3D montrant la position des caméras et les points de liaison (rose de la façade occidentale de la cathédrale d'Amiens)*

Quand la prise de vues le permet, c'est-à-dire quand on a pris des images qui lient les différentes entités les unes aux autres, on essaye de calculer la mise en place de plusieurs entités en un seul calcul, afin d'optimiser le positionnement relatif de toutes les images, qui, sans cela, ne reposerait que sur les points d'appui. Sur de grands édifices, il est encore difficile de mettre en place toutes les images en une seule fois, pour des raisons logistiques liées au très grand volume de données à manipuler.

#### **2.4.4. Qualification de la mise en place des images**

Il est souhaitable de pouvoir valider la mise en place des images, dont la qualité conditionne celle de toute la production en aval. Quand cela est possible, plusieurs aspects doivent être vérifiés :

- écart moyen des rayons perspectifs homologues (de l'ordre du 1/3 de pixel, pour garantir des traitements ultérieurs performants, que ce soit en mode manuel ou en mode automatique) ;
- éventuellement résidus aux points d'appui et aux points de contrôle (points connus dans le système de référence, mais qui n'ont pas servi pour le calcul de mise en place des images) en accord avec l'écart type *a priori* sur les points d'appui ;
- proportion et répartition des points conservés raisonnables.

### **2.5. Production de nuages de points 3D à partir d'images**

#### **2.5.1. Définition, utilisation des nuages de points 3D**

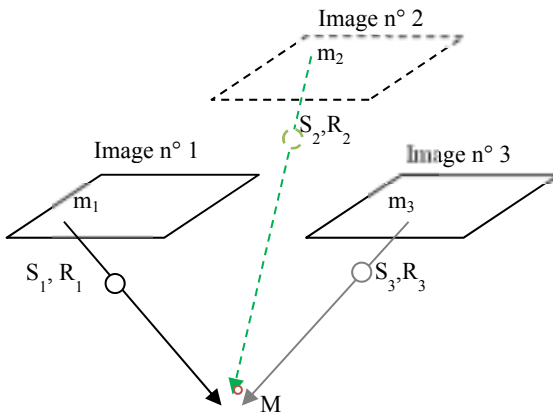
Un nuage de points 3D est un ensemble de points décrits par des coordonnées ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) dans un système de coordonnées, et le plus souvent par une couleur (voir figure 2.24). Il n'y a pas forcément de relation topologique entre les points. Les nuages de points 3D présentent un intérêt dans le contexte des relevés d'édifices remarquables, car ils constituent d'une part un support à la restitution des utilisateurs, virtuel et métrique, et d'autre part une description dense de la forme objective des éléments photographiés (par opposition aux modèles 3D extrapolés de la mesure de quelques points et d'hypothèse de construction) (Héno *et al.*, 2010). Les traitements à apporter aux nuages de points 3D pour les utiliser de manière optimale sont décrits dans le chapitre 5.



**Figure 2.24.** Nuage de points 3D en couleurs, imprimé ici en noir et blanc (chapelle de Lincel)

### 2.5.2. Principe de la production de nuages de points 3D par corrélation dense d'images

Le principe très schématisé de la production de nuages de points 3D par corrélation dense est le suivant : on apparie une image avec ses voisines généralement au niveau pixellaire (en d'autres termes, on trouve pour chaque pixel de l'image son homologue dans les images voisines), voire subpixellaire. Cela permet d'obtenir par intersection des rayons perspectifs issus des points appariés un nuage de points 3D à une résolution proche de la résolution moyenne des images (voir figure 2.25).



**Figure 2.25.** Construction de points 3D par intersection de rayons perspectifs homologues

### 2.5.2.1. Fonction de ressemblance

L'appariement d'images s'effectue généralement sur des vignettes (sous-parties d'images) et consiste à mesurer leur ressemblance, souvent donnée par le coefficient de corrélation,  $cor$  :

$$cor = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}$$

–  $\bar{x}$  est un vecteur à  $n$  dimensions ; ses coordonnées sont simplement les radiométries contenues dans la vignette de référence ;

–  $\bar{y}$  est un vecteur à  $n$  dimensions ; ses coordonnées sont les radiométries contenues dans la vignette que l'on compare avec la vignette de référence ;

–  $\bar{x}$  est la moyenne des coordonnées de  $\bar{x}$ , tandis que  $\bar{y}$  est la moyenne des coordonnées de  $\bar{y}$  ;

–  $n$  est le nombre total de pixels dans la vignette de référence (par exemple  $n = 9$  pour une vignette  $3 \times 3$ ).

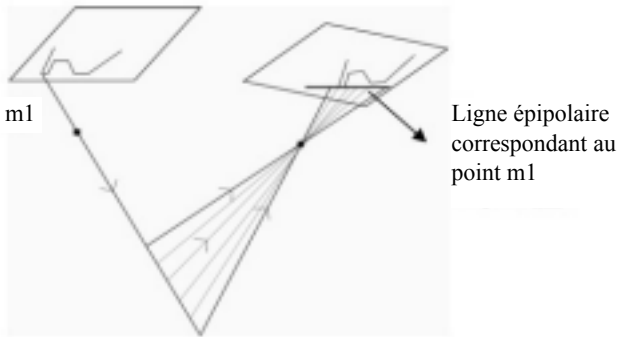
On montre facilement que  $cor$  est compris entre -1 et 1. Quand  $cor$  vaut 1, les vignettes sont proportionnelles (c'est-à-dire identiques à un facteur d'éclairement près).

### 2.5.2.2. Appariement dans l'espace « image » ou dans l'espace « objet »

Les corrélateurs permettent généralement de travailler dans l'espace « image » ; c'est-à-dire qu'ils fournissent, pour tous les pixels d'une image donnée, appelée image maîtresse, les pixels homologues dans les images voisines. On n'apparie pas les pixels eux-mêmes, mais des vignettes centrées sur les pixels. La recherche est faite sur toutes les paires d'images possibles, dans la géométrie épipolaire des couples correspondants (figure 2.26) : pour un pixel donné de l'image de référence, la géométrie épipolaire contraint la zone de recherche du point homologue à une droite (en supposant la distorsion optique nulle) sur l'image voisine. Cette droite est l'intersection du plan de cette image avec le plan passant par la base et le rayon perspectif issu du point à apparier sur l'image de référence.

Le résultat de l'appariement est une carte de disparités ou carte de parallaxes. La disparité ou parallaxe en un pixel d'une image est l'écart de position du pixel homologue sur l'image voisine. La carte de disparités peut directement être convertie

en carte de profondeur (voir figure 2.27) : c'est une image de mêmes dimensions que l'image de référence, dans les pixels de laquelle on trouve la profondeur à la scène sur le rayon perspectif. Cette géométrie de restitution est adaptée aux structures réellement tridimensionnelles, comme les colonnes, les escaliers ou les statues. Pour restituer complètement ces structures, on produira une carte de profondeur par point de vue (face, arrière, côtés, dessus, dessous, etc.).



**Figure 2.26.** Utilisation de la géométrie épipolaire pour l'appariement dans l'espace « image »



a)

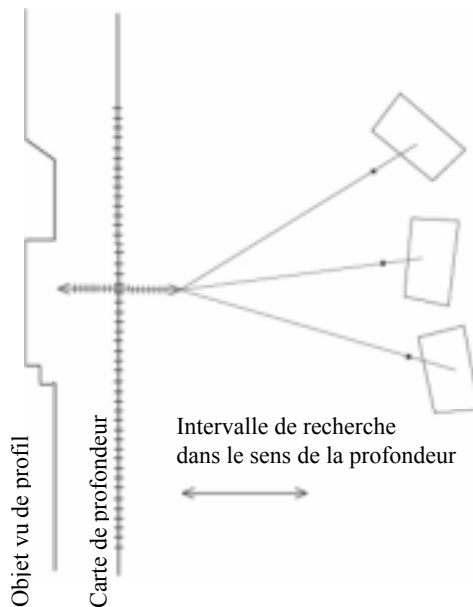


b)

**Figure 2.27.** a) Image maîtresse et b) carte de profondeur (galerie des Rois, cathédrale d'Amiens)

Certains corrélateurs permettent aussi d'explorer l'espace objet. Dans ce cas (voir figure 2.28), on découpe l'objet (ou la partie de l'objet) en pixels, que l'on projette à différentes profondeurs dans les images qui le voient. Pour chaque pixel dans l'espace objet, on conservera la profondeur qui donne les vignettes les plus ressemblantes (en se basant sur l'hypothèse qu'un objet est vu de la même façon sur les différentes images sur lesquelles il figure, ce qui n'est assuré que dans le cas de surfaces réellement isotropes). Si les objets traités sont globalement plans (façades, sol vu du ciel, etc.), la carte de profondeur résultant de la phase d'appariement dense peut être une image plaquée sur un plan choisi pour l'objet (souvent l'on choisit le plan moyen de l'objet), dans les pixels de laquelle on trouve l'éloignement au plan. Cette géométrie de restitution peut être adaptée au cas d'objets de formes différentes, comme des coupoles, que l'on modélisera en première approche par des hémisphères.

Souvent, pour réduire le temps de calcul et guider le résultat, on limite la zone de travail par des masques ou des silhouettes, issus de dessin manuel ou d'extraction automatique.



**Figure 2.28.** *Géométrie de restitution objet*

### 2.5.2.3. Données en sortie

Les données ainsi produites sont des cartes de profondeur, qui peuvent être converties en nuages de points 3D. Les différents nuages qui couvrent la scène se juxtaposent naturellement si la mise en place des images est faite de manière

globale, dans un seul système de coordonnées, mais les zones de raccord doivent cependant faire l'objet de traitements particuliers. Ces nuages de points 3D sont naturellement coloriés par les images utilisées pour l'appariement (en effet, tout point 3D du nuage étant issu de l'intersection de plusieurs rayons perspectifs, il peut prendre sa couleur au pixel dont est issu l'un de ces rayons).

#### 2.5.2.4. *Écueils classiques en appariement d'images*

Quelle que soit l'approche (géométrie de restitution image ou objet), l'appariement des pixels homologues peut être mis en échec sur des zones homogènes ou par des détails répétitifs dans les images. De plus, quand on travaille dans l'espace image, les objets linéaires parallèles à la base stéréoscopique (c'est-à-dire parallèles à la direction de recherche) peuvent poser un problème que des images supplémentaires peuvent aider à résoudre, comme on l'a vu en section 2.3.3. Enfin, la taille des vignettes est déterminante : de petites vignettes sont plus aptes à restituer les discontinuités, mais rendent un résultat global plus bruité.

On recense un très grand nombre de méthodes de reconstruction 3D basées image (Scharstein *et al.*, 2002 ; Seitz *et al.*, 2006) qui rivalisent d'ingéniosité pour dépasser les écueils évoqués ci-dessus et optimiser le résultat.

### 2.5.3. *Optimisation*

#### 2.5.3.1. *Approche hiérarchique*

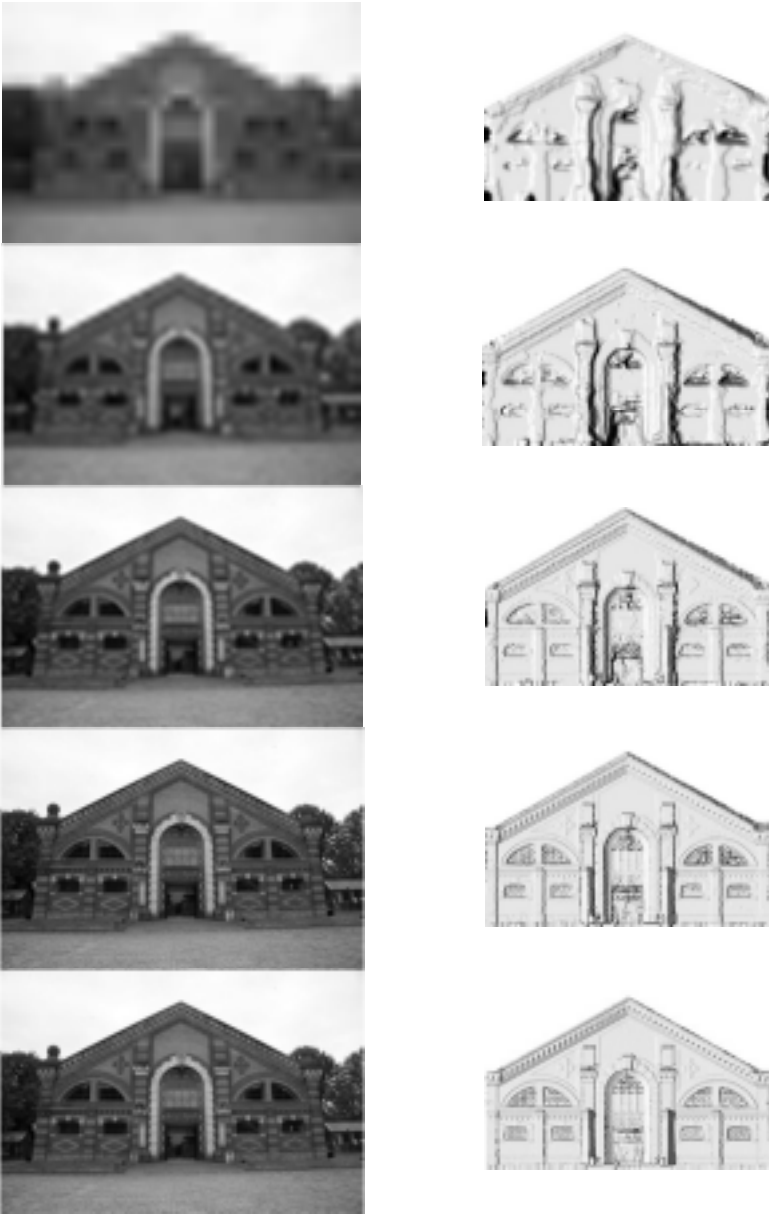
Pour optimiser le résultat en termes de rapidité et de qualité, la recherche des meilleurs homologues se fait en multirésolution (utilisation de pyramides d'images) : on travaille d'abord avec un jeu d'images très sous-échantillonnées, qui permet d'une part, de produire une solution grossière, que l'on affine petit à petit sur des images toujours mieux résolues (figure 2.29) et d'autre part, de réduire la zone de recherche en chaque pixel.

#### 2.5.3.2. *Méthode globale et optimisation*

En réalité, pour reconstruire une surface vraisemblable, on ne peut pas se contenter de juxtaposer des résultats obtenus de manière indépendante pixel après pixel. On utilise des méthodes dites globales, qui ont le mérite de gérer d'un seul coup toute la surface, mais l'inconvénient d'être extrêmement gourmandes en temps de calcul.

Des optimisations sont néanmoins possibles, comme la programmation dynamique ou la méthode des coupes de graphes. Ces méthodes consistent à chercher le minimum d'une fonction d'énergie composée d'un terme gérant la ressemblance

entre images et d'un terme de régularisation de la surface à reconstruire (Pierrot-Deseilligny *et al.*, 2006 ; Hirschmüller, 2008).



**Figure 2.29.** *Pyramide d'images et cartes de profondeur de plus en plus précises*

### 2.5.3.3. Influence du paramétrage

Le résultat final dépend bien sûr des images en entrée (géométrie de la prise de vues et qualité des images), mais aussi des paramètres utilisés pour le calcul de la carte de profondeur. Le résultat varie en effet selon la taille des vignettes de corrélation, le nombre d'images dans la pyramide d'images, le facteur de régularisation de la surface. Selon les logiciels utilisés, ces paramètres seront ouverts ou fixés par défaut.

### 2.5.3.4. Passage à l'échelle<sup>15</sup>

Il faut souligner que les algorithmes de corrélation dense font depuis longtemps l'objet de publications (Baillard, 1997), mais ne sont efficaces que depuis quelques années, grâce à la qualité des images de caméras numériques (en comparaison des films scannés qui servaient aux premiers tests) et à la puissance des détecteurs de points d'intérêt comme SIFT qui permettent d'automatiser complètement le processus photogrammétrique dès que la prise de vues est faite et donc d'exploiter un nombre important d'images.

Le challenge « Middlebury<sup>16</sup> » a montré qu'un grand nombre d'algorithmes de reconstruction 3D principalement issus de la communauté « vision par ordinateur » (où l'on emploie communément le terme SFM pour *Structure From Motion*) sont désormais opérationnels sur de petits objets. Mais leur aptitude à traiter des chantiers en grandeur réelle est variable, et nécessite souvent des ajustements algorithmiques (Vu *et al.*, 2009) et des précautions organisationnelles et logistiques.

On parle de passage à l'échelle quand des méthodes éprouvées sur des jeux-tests de petite taille doivent être mises en œuvre sur des données en grandeur réelle. Les contraintes de gestion des données numériques décrites dans les articles traitant du *big data*<sup>17</sup> sont de mise sur des projets de relevé d'édifices complets par photogrammétrie. On a vu que des questions de complexité des sites, de recul, de résolution souhaitée, et de matériel photographique disponible interdisent de prédire le nombre de photographies qu'il faudra prendre en vue d'une numérisation complète. On sait de plus qu'aux images brutes s'ajouteront inévitablement des données intermédiaires (points de liaison, pyramides d'images, cartes de profondeur, etc.), sans compter les sauvegardes de sécurité. Le traitement des données impose donc une organisation exemplaire :

– postes informatiques puissants, largement dotés en capacité de stockage, connectés en réseau, pour permettre le partage des calculs (*cloud computing*, voir Leymann, 2009) ;

---

15. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Scalability>.

16. <http://vision.middlebury.edu/mview>.

17. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Big\\_data](http://fr.wikipedia.org/wiki/Big_data).

- optimisation des algorithmes ;
- parallélisation du code ;
- programmation GPU<sup>18</sup> (utilisation du processeur graphique pour augmenter la puissance de calcul de l'ordinateur, voir Rotenberg *et al.*, 2013) ;
- gestion par une base de données (Cannelle, 2013) ;
- normalisation du nom des données selon la zone de l'édifice couverte ;
- normalisation des noms de fichiers selon les étapes du processus ;
- production impérative de métadonnées de qualité à chaque étape du processus.

#### 2.5.4. Qualification des données produites

Les grosses fautes de reconstruction, souvent liées à des matériaux impropres à la corrélation d'images (matériaux peu texturés ou brillants, surfaces trouées), ou à une mauvaise configuration géométrique de la prise de vues (caméra inappropriée, nombre insuffisant d'images, images floues), sont faciles à identifier, directement sur le nuage de points 3D, ou mieux, sur une image montrant le relief de la scène éclairé par un soleil fictif.

Problème observé	Causes possibles	Solution
Fort écart aux points de contrôle	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Point d'appui erroné, non détecté lors de la mise en place</li> <li>– Problème d'étalonnage ou de stabilité géométrique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Refaire la mise en place des images</li> </ul>
Reconstruction mitée	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Matériau impropre → mauvais coefficient de corrélation</li> <li>– Parties cachées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Utiliser les techniques de projection de texture si possible (sinon, pas de solution)</li> <li>– Si possible, rajouter des images</li> </ul>
Reconstruction bruitée	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Images de mauvaise qualité, mauvais paramétrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Redévelopper les images brutes, ne pas utiliser les images compressées</li> <li>– Changer le paramétrage (coefficient de régularisation)</li> </ul>
Reconstruction « molle »	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Mauvais paramétrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Changer le paramétrage (coefficient de ressemblance entre images)</li> </ul>

**Tableau 2.1.** Inventaire des problèmes observés sur le traitement photogrammétrique automatique d'une prise de vues et des causes possibles

18. *Graphic processing unit.*

Mais le résultat final peut présenter des erreurs plus insidieuses (bruit général, biais de localisation, artefacts locaux, etc.). L'inspection méticuleuse des images de relief estompé permet d'en détecter une partie, mais ne permet pas de les quantifier. Seule la qualité de positionnement absolu peut être évaluée à l'aide de points de contrôle.

### **2.5.5. Avantages et limites**

La photogrammétrie permet d'obtenir de manière quasiment automatique des nuages de points 3D denses en couleurs. Elle est donc tout à fait pertinente dans le contexte du relevé d'édifices remarquables. On rappelle ses avantages :

- coût du matériel très modéré ;
- grande automatisation des processus, accessibles à tous ;
- flexibilité du matériel photographique à mettre en œuvre (du *fisheye* au télé-objectif, éventuellement monté sur des perches, mâts ou drones) ;
- précision adaptable (distance à l'objet d'intérêt, focale de l'objectif, configuration stéréoscopique).

Ses limites sont cependant les suivantes :

- gros volumes de données à gérer, temps de calcul important ;
- incapacité à traiter certains matériaux, comme le brillant, le creux ;
- difficulté à qualifier de façon systématique les résultats obtenus.

### **2.5.6. Autres approches de reconstruction 3D automatique basée image**

L'approche présentée dans la section 2.5.2 vise à produire une carte de profondeur par point de vue. Ses variantes sont présentées dans (Scharstein *et al.*, 2002), notamment les points clés : mesure de ressemblance, régularisation de surface et optimisation. Par cette approche, la reconstruction 3D complète d'un objet ou d'un site demande que l'on fusionne les cartes de profondeur, en gérant les parties cachées. Mais il existe aussi des méthodes « basées image » différentes, largement discutées dans (Seitz *et al.*, 2006), pour lesquelles la scène 3D n'est pas l'assemblage de cartes de profondeur, mais est modélisée :

- par un ensemble de voxels : méthode de *carving* par exemple, qui consiste à enlever d'un volume initial les voxels qui ne respectent pas les critères de ressemblance dans les images (Kutulakos *et al.*, 2000) ;
- par des *level sets* : minimisation d'un ensemble d'équations aux dérivées partielles définies sur un volume (Faugeras *et al.*, 1998) ;

– ou par une triangulation évolutive : densification par une approche énergétique d'une tétraédrisation basée sur des points d'intérêt tenant compte des contraintes de visibilité (Vu *et al.*, 2009 ; Furukawa *et al.*, 2010).

L'intérêt de ces méthodes, par rapport aux méthodes produisant des cartes de profondeur, est de fournir une surface de séparation continue entre la matière et le vide, mais elles sont plus adaptées aux petits objets qu'aux grands sites (hormis les méthodes de triangulation évolutive, aussi convaincantes sur les petits objets à fortes discontinuités que sur les grands ensembles). La multitude des algorithmes de reconstruction 3D à partir d'images ne doit pas décourager les utilisateurs potentiels. Au contraire, elle permet de proposer des chaînes logicielles multimodales adaptées à toutes les configurations (jusqu'au traitement des zones réfractaires à l'appariement d'images) comme le montrent par exemple (Remondino *et al.*, 2008).

## 2.6. Dessin 3D par saisie stéréoscopique ou multi-images

L'application historique de la photogrammétrie consiste à dessiner manuellement sur un couple d'images visualisé en stéréoscopie. Cette technique fiable, et qui a fait ses preuves aussi bien sur images aériennes ou terrestres, est décrite dans les sections suivantes, ainsi que la mesure à partir d'un nombre d'images plus grand. Les méthodes qui traitent directement les nuages de points seront vues dans le chapitre 5.

### 2.6.1. Définition, utilisation du dessin 3D

Le dessin 3D est un modèle composé de points isolés, de lignes ou de polygones décrits par des coordonnées  $(X, Y, Z)$ . Il permet de représenter selon des spécifications particulières des éléments caractéristiques de la géométrie des édifices. On parle d'un *rendu filaire pertinent*, puisqu'on n'y trouve que ce qui est demandé. En effet, à l'opposé du nuage de points qui, quoique dense, ne rendra pas exactement les arêtes d'un bâtiment, le dessin manuel fournira le rendu décrit dans les spécifications (par exemple, le détail de l'appareil de pierre d'un mur nu ou l'arcature d'une façade).

### 2.6.2. Principe de la production du dessin 3D

Le dessin 3D peut se faire en mode multi-images, comme dans le logiciel Photomodeler<sup>19</sup>: dans ce cas, l'opérateur positionne indépendamment le curseur sur le détail voulu dans toutes les images en recouvrement disponibles. Le pointé est guidé par des contraintes géométriques liées au couple stéréoscopique (contrainte d'épipolarité, voir figure 2.26), et assisté par corrélation automatique (voir section 2.5.2).

19. [www.photomodeler.com/index.html](http://www.photomodeler.com/index.html).

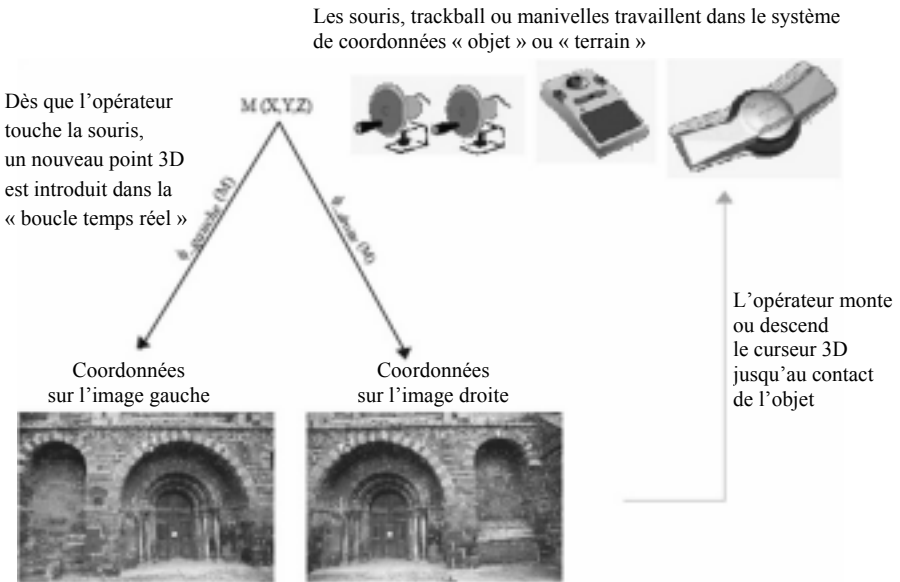
Le principe de la photomodélisation décrit dans (De Luca, 2009) est basé sur des mesures de points dans des images stéréoscopiques, et l'extrapolation éventuelle *via* le parallélisme et l'orthogonalité supposés des éléments architecturaux à reconstruire.

On peut aussi dessiner en visualisant les couples stéréoscopiques en 3D. On doit pour ce faire disposer d'une station de stéréorestitution composée comme suit :

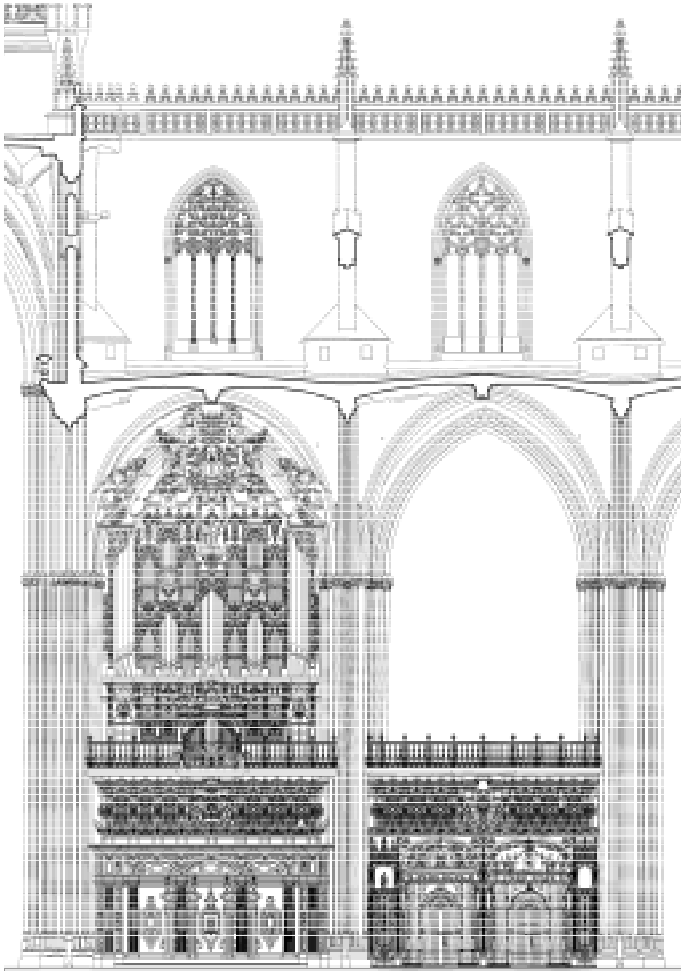
- un ordinateur équipé d'une carte graphique qui permet la visualisation 3D et des déplacements d'images fluides ;
- un écran 3D permettant aux deux images d'être affichées en stéréoscopie ;
- des lunettes stéréoscopiques permettant à l'œil gauche de ne voir que l'image gauche, et à l'œil droit l'image droite ;
- une souris 3D pour déplacer le curseur 3D dans la scène photographiée ;
- un opérateur entraîné.

Les raccords de dessin entre couples voisins doivent faire l'objet de soins particuliers, pour que le rendu final soit continu.

Le principe de la stéréorestitution sur un poste numérique est décrit dans la figure 2.30.



**Figure 2.30.** Boucle temps réel en stéréorestitution



**Figure 2.31.** Orgue et clôture du chœur de la Cathédrale de Séville, restitués par stéréophotogrammétrie (Almagro, 2010)

Des outils performants, permettant l'utilisation combinée des algorithmes de mise en place automatiques et de la stéréorestoration classique, restent à concevoir, sachant que toutes les briques existent aujourd'hui. De tels outils permettraient de mettre en place un bloc d'images sans aucune intervention de l'opérateur (comme le font aujourd'hui toutes les chaînes de corrélation dense), et présenteraient ensuite une interface pour saisir manuellement dans certains couples stéréo seulement, les éléments demandés.

La stéréorestitution intensive comme on la pratiquait à l'aube de l'ère numérique est rare aujourd'hui. Elle reste cependant la solution la plus efficace pour dessiner précisément des éléments particuliers dans un édifice (voir figure 2.31). Il est bon de le rappeler, car dans la période de profusion d'images et de relief automatique que nous vivons depuis quelques années, on oublie qu'il est parfois plus direct de tracer les éléments caractéristiques demandés sur les images plutôt que sur un nuage de points 3D (Almagro, 2010, Héno *et al.*, 2011).

### **2.6.3. Qualification de la restitution 3D**

On suppose que la mise en place des images est de qualité satisfaisante. On connaît depuis longtemps le potentiel de restitution 3D sur couple stéréoscopique. Que l'on travaille désormais sur des images numériques ne change rien : on estime que sur des images de qualité normale, un opérateur entraîné peut dessiner à une précision du demi-pixel dans le plan de référence. La précision de pointé dans le sens de la profondeur doit être pondérée par le rapport  $H/B$  (éloignement à la scène sur base stéréoscopique). Les spécifications de saisie doivent avoir été clairement présentées à l'opérateur pour éviter des généralisations abusives ou au contraire, de la surnumérisation. Contrairement aux méthodes automatiques, ce procédé s'applique à la plupart des matériaux, même pauvres en texture. Il est cependant nécessaire que la configuration du couple proposé à l'opérateur soit favorable (axes de prise de vue parallèles). Dans le cas contraire, il faudra travailler sur de nouvelles images obtenues par rééchantillonnage épipolaire (rééchantillonnage qui produit des images dont les lignes correspondent aux lignes épipolaires du couple). La qualification du dessin porte sur la complétude du rendu, sa pertinence et sa précision. Difficile à automatiser, elle peut donner lieu à des contrôles croisés entre opérateurs. Des sorties graphiques permettent aussi d'évaluer ce qui reste à faire, la qualité du tracé (les lignes ne sont-elles pas trop simplifiées ?) et la bonne codification des éléments saisis.

## **2.7. L'offre logicielle en photogrammétrie rapprochée**

Les fabricants traditionnels de matériel photogrammétrique proposent désormais des outils logiciels mis à jour régulièrement des derniers progrès de la recherche. Ils sont cependant plutôt conçus pour le traitement des gros blocs d'images aériennes. Aujourd'hui, de nouveaux outils issus de la convergence des savoir-faire des photogrammètres et des ingénieurs en vision par ordinateur permettent de traiter toutes sortes de configuration de prise de vues, jusqu'aux acquisitions complètement déstructurées composées de moissonnage sur Internet d'images d'un seul édifice. Leur format est extrêmement variable, du logiciel gratuit, voire *open source*, au logiciel payant plus traditionnel, de l'application à installer en local, très paramétrable donc

destinée à des experts, aux applications sur le web, où l'utilisateur se contente d'envoyer un lot d'images et d'attendre le résultat.

## 2.8. Les perspectives en recherche

Les récentes avancées de la photogrammétrie, dont la plus spectaculaire est la possibilité de produire, à l'instar des scanners laser, des nuages de points 3D en couleurs uniquement à partir d'images stéréoscopiques, sont directement issues des laboratoires de recherche en traitement d'images. D'autres aspects, plus ou moins liés à ces outils, font encore l'objet d'études ou de recherche.

### 2.8.1. Production en temps quasi réel

La production des données en temps réel n'est *a priori* pas un enjeu crucial dans le contexte du relevé d'édifice remarquable comme il l'est, par exemple, dans les applications de robotique. Cependant, pouvoir produire en temps quasi réel est souhaitable, d'une part pour ne pas voir s'accumuler les données acquises et non traitées, d'autre part pour réagir à temps en cas de lacune dans les acquisitions.

### 2.8.2. Acquisition participative des données

L'acquisition participative (*crowd sourcing*) explose dans tous les domaines grâce à Internet et aux réseaux sociaux notamment. Dans le domaine de la géomatique, l'exemple le plus fameux est celui d'OpenStreetMap<sup>20</sup>, une base de données en particulier routières notamment mises à jour par les traces GPS des usagers (Heipke, 2010). S'agissant du relevé d'édifices remarquables, (Snively *et al.*, 2006) ont montré depuis quelques années qu'il était possible de modéliser un monument à partir d'images moissonnées sur Internet. L'opportunité offerte à tous de contribuer aux relevés d'édifices remarquables, que ce soit sur le plan géométrique ou sémantique, par l'envoi d'images et d'annotations *via* une tablette ou un smartphone à des serveurs dédiés, résout en théorie des problèmes économiques voire culturels, par exemple pour des pays qui ne peuvent investir dans l'inventaire de leur patrimoine architectural (Héno, 2009 ; Sylaiou, 2013). Elle pose aussi de nouvelles questions sur un plan informatique (Quelle architecture choisir pour un transfert rapide ? Quels formats de données utiliser pour une plus grande universalité, pour une gestion des données dans le temps ? Etc.) et surtout sur un plan qualitatif (Comment contrôler les données entrantes ?).

---

20. <http://openstreetmap.fr>.

### 2.8.3. Reconstruction automatisée de modèles 3D vecteur à partir d'images

Enfin, la perspective de produire un modèle 3D vecteur automatiquement mobilise de nombreux chercheurs. Des résultats prometteurs obtenus sur des prises de vues aériennes en vue d'automatiser la production des bases de données urbaines sont régulièrement publiés (Chehata *et al.*, 2004 ; Haala *et al.*, 2010 ; Hammoudi *et al.*, 2011), en utilisant parfois des bases de données existantes pour améliorer le résultat (Vallet *et al.*, 2011). L'extraction automatique des ouvertures sur les façades photographiées de la rue par des dispositifs mobiles, en utilisant ou non une acquisition laser supplémentaire (Pinte *et al.*, 2011), ainsi que l'extraction des bâtiments à partir de vidéo (Tian *et al.*, 2010) semblent également possibles. Mais on trouve moins de résultats sur la reconstruction en mode vecteur à partir d'images prises pour le relevé à très haute résolution d'un édifice particulier. Les problèmes y sont en effet plus variés et de ce fait, moins automatisables : prises de vues généralement plus aléatoires qu'en aérien ou en numérisation mobile, lignes caractéristiques à reconstruire potentiellement moins régulières, du fait de la courte distance à l'édifice et de ses éventuelles déformations, parties cachées (Barazetti *et al.*, 2010). On verra dans le chapitre 5 que la reconstruction est plutôt lancée sur les nuages de points 3D et utilisera conjointement les informations radiométriques fournies par les images et les informations géométriques des nuages de points 3D.

## 2.9. Bibliographie

- AHMADABADIAN A., ROBSON S., BOEHM J., SHORTIS M., WENZEL K., FRITSCH D., « A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 78, p. 157-167, avril 2013.
- ALBERTZ J., « Albrecht Meydenbauer – Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage », *Proceedings of the 18<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Potsdam, Allemagne, 2001.
- ALMAGRO A., « Photogrammétrie pour la recherche architecturale : vingt ans d'expérience à l'Ecole d'études arabes », *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, n° 196, p. 10-20, 2010.
- BAILLARD C., Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3D des milieux urbains. Détection et caractéristique du sursol, Thèse de doctorat en signal et images, Ecole nationale supérieure des télécommunications de Paris, France, 1997.
- BARAZETTI L., SCAIONI M., REMONDINO F., « Orientation and 3D modelling from markless terrestrial images: combining accuracy with automation », *The Photogrammetric Record*, vol. 25, n° 132, p. 356-381, décembre 2010.
- BONNEVAL H., « Utilisation de la photogrammétrie aux levés architecturaux. Application au temple d'Abou-Simbel (Haute-Egypte) », *Communication de l'Institut géographique national au congrès des sociétés savantes*, Paris, 1958.

- CANNELLE B., Estimation de pose centimétrique sur un corpus de plusieurs milliers d'images terrestres acquises depuis la rue, Thèse de doctorat en sciences de l'information géographique, Université Paris Est, 2013.
- CARBONNELL M., *Le fil des pierres : photogrammétrie et conservation des monuments*, département des relations publiques de la société Kodak-Pathé, Ozoir-la-Ferrière, octobre 1978.
- CHEHATA N., PIERROT-DESEILLIGNY M., STAMON G., « Génération de MNE hybrides (raster/vecteur) : optimisation à base de flots de graphes contrainte par des primitives », *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, n° 176, p. 30-41, 2004.
- D'ANNIBALE E., TASSETTI A.N., MALINVERNI E.S., « From panoramic photos to a low-cost photogrammetric workflow for cultural heritage 3D documentation », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- DE LUCA L., *La photomodélisation architecturale. Relevé, modélisation et représentation d'édifices à partir de photographies*, Eyrolles, Paris, 2009.
- DE FERRIÈRES M., *Eléments de technologie pour comprendre la photographie*, Editions VM, Paris, 2004.
- DENEUX H., *La métrophotographie appliquée à l'architecture*, Paul Catin Editeur, Paris, 1930.
- EISENBEIB H., *UAV Photogrammetry*, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie and der Eidgenössischen Technischen Hochschule, IGP Mitteilungen, n° 105, Zürich, Suisse, 2009.
- FAUGERAS O., KERIVEN R., « Variational principles, surface evolution, PDE's, level set methods and the stereo problem », *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 7, n° 3, p. 336-344, 1998.
- FONTAINE C., Création d'une interface pour le positionnement automatique des points d'appui, Rapport de stage du cycle ingénieur 2<sup>e</sup> année, Ecole nationale des sciences géographiques, 2012.
- FRASER C., « Automatic camera calibration in close-range photogrammetry », *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, vol. 79, n° 4, p. 381-388, avril 2013.
- FURUKAWA Y., PONCE J., « Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, n° 8, p. 1362-1376, août 2010.
- GRUSSENMEYER P., « Photogrammetry for the study and safeguard of historic sites and monuments », *Workshop on new methods and techniques for the preservation of historic sites and monuments*, Cairo, 4-8 décembre 1994, Ecole des mines, Laboratoire de mécanique des terrains, Nancy, France, 1994.
- HAALA N., KADA M., « An update on automatic 3D building reconstruction », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, n° 65, p. 570-580, 2010.

- HAPPA J., MUDGE M., DEBATTISTA K., ARTUSI A., GONÇALVES A., CHALMERS A., « Illuminating the Past – State of the Art », *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST - State of the Art Reports*, La Valette, Malte, 2009.
- HAMMOUDI K., DORNAIKA F., « A Featureless Approach to 3D Polyhedral Building Modeling from Aerial Images », *Sensors Journal, 10 Years Sensors - A Decade of Publishing*, MDPI publisher, n° 1, p. 228-259, 2011.
- HEIPKE C., « Crowdsourcing geospatial data », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, n° 6, p. 550-557, 2010.
- HÉNO R., EGELS Y., « Architectural patrimony management in Yemen », *Proceedings of the 21<sup>st</sup> CIPA Symposium*, Athènes, Grèce, 2007.
- HÉNO R., « Towards a Sustainable Project for Architectural Heritage Conservation in Yemen », *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> CIPA Symposium*, Kyoto, Japon, 2009.
- HÉNO R. *et al.*, « Archéologie et photogrammétrie : les nouveaux potentiels », *Géomètre*, n° 2075, novembre 2010.
- HÉNO R., CHANDELIER L., « Complementarity of terrestrial laser scanning and DSM from aerial photography: the example of the cathedral of Amiens », *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> CIPA Symposium*, Prague, République Tchèque, 2011.
- HÉNO R., CHANDELIER L., SCHELSTRAETE D., « Costless platform for high resolution stereoscopic images of a high gothic façade », *Proceedings of the ISPRS symposium*, Melbourne, Australie, 2012.
- HIRSCHMÜLLER H., « Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 30, n° 2, p. 328-341, 2008.
- HOTTIER P., *Photogrammétrie analytique par arcs de courbe homologues ; application au chantier de Massy-Vilaine*, Etude faite pour le compte du Centre d'études des bâtiments et des travaux publics, Rapport de l'Institut géographique national, 1975.
- ICOMOS, *Photogrammétrie des monuments et des sites*, Saint-Mandé, France, 1972.
- IGN, « La stéréophotogrammétrie au service de l'architecture », *Actes du Congrès international de la Société Internationale de Photogrammétrie*, Commission 5, 1948.
- IGN, *Photogrammétrie architecturale. Application des méthodes photogrammétriques au relevé des monuments*, 1967.
- IGN, *GEOFIL*, magazine de l'Institut géographique national, Paris 1992.
- KASSER M., EGELS Y., *Photogrammétrie numérique*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2001.
- KUTULAKOS K., SEITZ S., « A theory of shape by space carving », *International Journal of Computer Vision*, vol. 38, n° 3, p. 199-218, 2000.
- LAUSSE DAT A., *La métrophotographie*, Gauthier-Villars, Paris, 1899.

- LEYMANN F., « Cloud Computing: The Next Revolution in IT », *Proceedings of the 52<sup>nd</sup> Photogrammetric Week*, Stuttgart, Allemagne, 2009.
- LOWE D., « Distinctive image features from scale-invariant keypoints », *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, n° 2, p. 91-110, 2004.
- MAÎTRE H., LUO W., « Using Models to Improve Stereo Reconstruction », *Journal IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence - Special issue on interpretation of 3D scenes – part II*, vol. 14, n° 2, p. 269-277, février 1992.
- PAPARODITIS N., PAPELARD J.-P., CANNELLE B., DEVAUX A., SOHEILIAN A., DAVID N., HOUZAY E., « Stereopolis II: A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 200, p. 69-79, 2012.
- PIERROT-DESEILLIGNY M., PAPARODITIS N., « A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo-imagery », *ISPRS Workshop on Topographic Mapping from Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, Ankara, Turquie, février 2006.
- PIERROT-DESEILLIGNY M., CLÉRY I., « Évolutions récentes en photogrammétrie et modélisation 3D par photo des milieux naturels », dans S. Jaillet, E. Ployon, T. Villemin (dir.), *Images et Modèles 3D en Milieux naturels*, coll. Edytem, vol. 12, p. 51-66, Le Bourget-du-Lac, 2011.
- PIERROT-DESEILLIGNY M., CLÉRY I., « Some possible protocols of acquisition for optimal use of the 'APERRO' open source software in automatic orientation and calibration », *Tutorial for EuroCow*, Castelldefels, Espagne, 8-10 février 2012.
- PINTE A., BAILLARD C., DENIS E., « Modélisation de façade par analyse conjointe d'images terrestres et de données laser », *Revue française de photogrammétrie et télédétection*, n° 194, mai 2011.
- REMONDINO F., EL-HAKIM S., GRUEN A., ZHANG L., « Development and performance analysis of image matching for detailed surface reconstruction of heritage objects », *Signal Processing Magazine*, IEEE, vol. 25, n° 4, 2008.
- RINAUDO F., CHIABRANDO F., « Calibrating and evaluating a range camera for cultural heritage metric survey », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- ROTENBERG K., SIMARD L., SIMARD P., « Dense DSM Generation using the GPU », *Proceedings of the 54<sup>th</sup> Photogrammetric Week*, Stuttgart, Allemagne, 2013.
- ROUSSILHE H., *La photogrammétrie et ses applications générales, tome I, Principes généraux et restitution de clichés isolés*, Eyrolles, Paris, 1936.
- SAMAAN M., HÉNO R., PIERROT-DESEILLIGNY M., « Close-range photogrammetric tools for small 3D archeological objects », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- SEITZ S., CURLESS B., DIEBEL J., SCHARSTEIN D., SZELISKI R., « A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms », *Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE Computer Society Conference, vol. 1, p. 519-528, 2006.

- SCHARSTEIN D., SZELISKI R., « A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms », *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, n° 1-3, p. 7-42, 2002.
- SNAVELY N., SEITZ S., SZELISKI R., « Photo tourism: Exploring photo collections in 3D », *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH Proceedings)*, vol. 25, n° 3, p. 835-846, 2006.
- SYLAIYOU S., BASIOUKA S., PATIAS P., STYLIANIDIS E., « The volunteered geographic information in archaeology », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- TIAN Y., GERKE M., VOSSELMAN G., ZHU Q., « Knowledge-based building reconstruction from terrestrial video sequences », *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, n° 4, p. 395-408, juillet 2010.
- VALLET B., PIERROT-DESEILLIGNY M., BRÉDIF M., BOLDO D., « Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3D : une approche par découpe et fusion », *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 195, p. 42-50, 2011.
- VU H.H., KERIVEN R., LABATUT P., PONS J.-P., « Towards high-resolution large-scale multi-view stereo », *Conférence on Computer Vision and Pattern Recognition*, Miami (FL), Etats-Unis, juin 2009.
- VINCENT R., POIVILLIERS J., « Georges Poivilliers 1892 – 1968 », *REVUE XYZ*, n° 134, 1<sup>er</sup> trimestre 2013.
- WALDHÄUSL P., OGLEBY C., « 3x3-Rules for Simple Photogrammetric Documentation of Architecture », *International archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 30, part 5, p. 426-429, Melbourne, Australie, 1994.
- ZHANG Y., XIONG J., HAO L., « Photogrammetric processing of low-altitude images acquired by unpiloted aerial vehicles », *The Photogrammetric Record*, vol. 26, n° 134, p. 190-211, juin 2011.
- ZHANG Y., HU B., ZHANG J., « Relative orientation based on multi-features », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, n° 5, p. 700-707, septembre 2011.

---

## Numérisation par scanner laser

---

La technique de numérisation par scanner laser est relativement récente, en particulier si on la compare à l'ancienneté des méthodes de levés photogrammétriques présentées dans le chapitre précédent. Pourtant, en peu de temps, la lasergrammétrie s'est imposée comme un outil efficace et adapté à la restitution 3D d'environnement, en particulier d'édifices remarquables. Ce chapitre présente les matériels dédiés à ce type de levés puis décrit les méthodes à mettre en œuvre pour acquérir et traiter les données issues des scanners laser en vue de la constitution de modèles 3D sous forme de nuages de points.

### 3.1. Historique

L'émission laser a été mise en œuvre pour la première fois en 1960 par Théodore Maiman (Maiman, 1960). Deux ans plus tard, son utilisation en télédétection (c'est-à-dire en mesure à distance) a suivi avec la mesure de la distance de la Terre à la Lune réalisée (Smullin *et al.*, 1962) selon le principe de la technologie lidar (*light detection and ranging*) qui repose sur l'analyse des propriétés d'une lumière laser renvoyée vers son émetteur. L'industrialisation de cette technologie s'est concrétisée en 1964 avec le Géodolite<sup>1,2</sup> produit par Spectra-Physics (Mountain View, Californie) qui a permis des mesures de profils par l'embarquement de l'instrument sur une plateforme aéroportée.

Progressivement, la technologie s'est développée à toutes les échelles d'observation (appareils embarqués dans des satellites, des avions ou utilisés depuis le sol) avec des évolutions portant principalement sur la fréquence d'acquisition, la possibilité de balayage des surfaces et l'augmentation de la portée instrumentale.

---

1. <http://amhistory.si.edu/surveying/object.cfm?recordnumber=748473>.

2. <http://historywired.si.edu/object.cfm?ID=22>.

Ainsi, à la fin des années 1990, plusieurs constructeurs proposaient des scanners laser terrestres à balayage dotés d'une fréquence d'acquisition d'environ 5 000 points par seconde. Ces performances ont permis des applications nouvelles dans le domaine de la topographie, notamment pour la réalisation de levés tridimensionnels à haute résolution d'ouvrages d'art ou de bâtiments. Les premières expérimentations dans le domaine de la conservation du patrimoine datent de cette même époque : d'abord avec des instruments conçus dans des laboratoires de recherche (Wehr *et al.*, 1999 ; Fangi *et al.*, 1999) puis avec des scanners laser commerciaux<sup>3</sup> (Barber *et al.*, 2001 ; Boehler *et al.*, 2001 ; Goskar *et al.* 2003 ; Williams *et al.*, 2003).

Depuis, la technologie s'est renforcée débouchant sur des instruments de plus en plus compacts, capables d'acquérir des scènes entières sous forme de millions de points 3D, en des temps très réduits. Des sites de taille plus importante peuvent désormais être enregistrés en 3D. Aujourd'hui, ce matériel s'est largement démocratisé et a trouvé sa place dans la boîte à outils de référence des géomètres. Des campagnes de numérisation massives du patrimoine sont également lancées sur les cinq continents<sup>4</sup>.

Par leur efficacité, les scanners laser terrestres constituent des outils incontournables de la numérisation d'environnements complexes et donc des édifices remarquables qui le sont souvent par leur audace architecturale, fastidieuse à traduire par les méthodes de levés classiques (tachéométrie et photogrammétrie).

## 3.2. Matériel

### 3.2.1. *Fonctionnement d'un scanner laser terrestre*

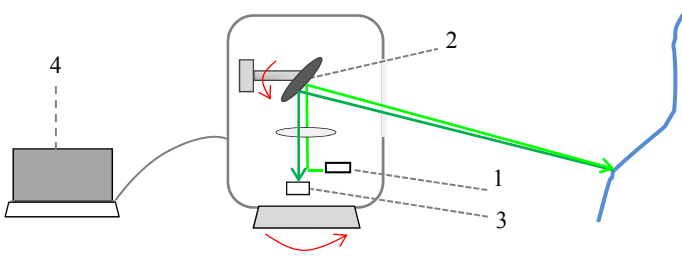
Un scanner laser terrestre ou scanner 3D est un instrument qui permet la numérisation en trois dimensions de son environnement par balayage laser. Les principaux éléments constituant un tel appareil sont :

- la tête laser émettant un rayon laser à la fréquence et à la puissance désirée (figure 3.1-1) ;
- le système de balayage utilisant un miroir rotatif ou un prisme et qui permet de faire varier l'angle du rayon laser afin de déplacer le faisceau sur l'objet. Il est bien entendu nécessaire de connaître les angles verticaux et horizontaux de cette émission si bien que des codeurs angulaires sont présents (figure 3.1-2) ;
- le système optique récepteur enregistrant le retour de l'onde (figure 3.1-3) ;
- un logiciel de pilotage permettant de régler les paramètres d'acquisition et effectuant des calculs et prétraitements nécessaires à l'obtention de données exploitables (figure 3.1-4).

---

3. [www.ensg.eu/La-cooperation-du-DIAS-avec-le-Yemen](http://www.ensg.eu/La-cooperation-du-DIAS-avec-le-Yemen).

4. <http://archive.cyark.org>.



**Figure 3.1.** Schéma simplifié d'un scanner laser

Les données obtenues sont des nuages de points 3D dans un système de coordonnées instrument, propre au scanner laser, initialement en coordonnées sphériques ( $\rho$ ,  $\phi$ ,  $\theta$ ) avec  $\rho$  la distance au centre. Ces valeurs sont généralement converties en coordonnées cartésiennes ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Les points 3D ainsi obtenus sont souvent accompagnés d'une valeur d'intensité (mesure du signal laser retourné) et, si une caméra est présente, de valeurs colorimétriques dans le rouge, le vert et le bleu.

### 3.2.2. Différentes familles de technologies laser

Il existe plusieurs technologies d'acquisition par balayage laser dont le principe est rappelé succinctement dans ce paragraphe. Pour une description plus détaillée du fonctionnement instrumental, on pourra se référer à (Lerma *et al.*, 2008 ; Beraldin *et al.*, 2010 ; Landes *et al.*, 2011).

#### 3.2.2.1. Scanner laser à temps de vol ou à impulsions

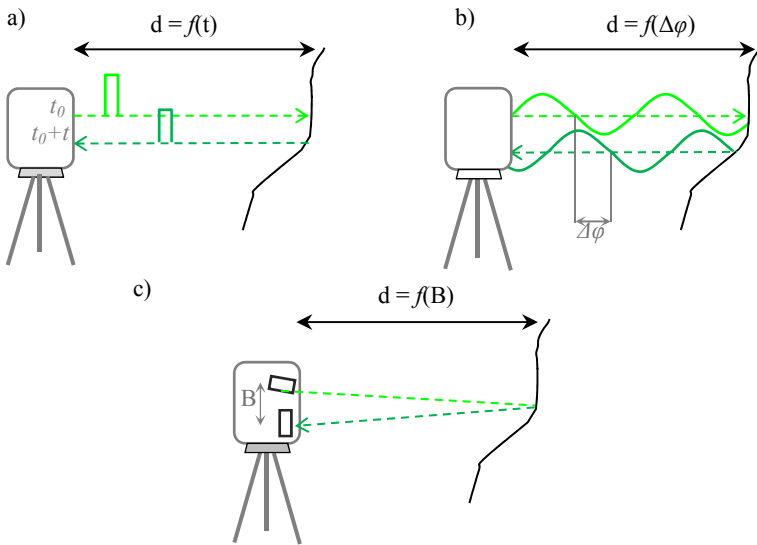
L'instrument mesure le temps de parcours du rayon laser entre son émission et la réception de l'onde réfléchiée par l'objet touché. La distance entre le laser et la scène en est directement déduite. Pour la détection du retour de l'onde, différents critères sont utilisés dans les instruments, dont l'extraction du pic du signal enregistré, un seuillage sur l'intensité retournée et le calcul d'un ratio de l'amplitude de l'onde.

#### 3.2.2.2. Scanner laser à décalage de phase

L'émission laser se fait en continu, à forte intensité et avec une modulation sinusoïdale en amplitude. La distance entre le laser et la scène est déterminée par la comparaison des phases de l'onde émise et de l'onde retournée. D'autres scanners, moins adaptés au cas des levés terrestres du fait d'une fréquence d'acquisition moins grande, effectuent une modulation en fréquence de l'onde.

### 3.2.2.3. Scanner laser à triangulation optique

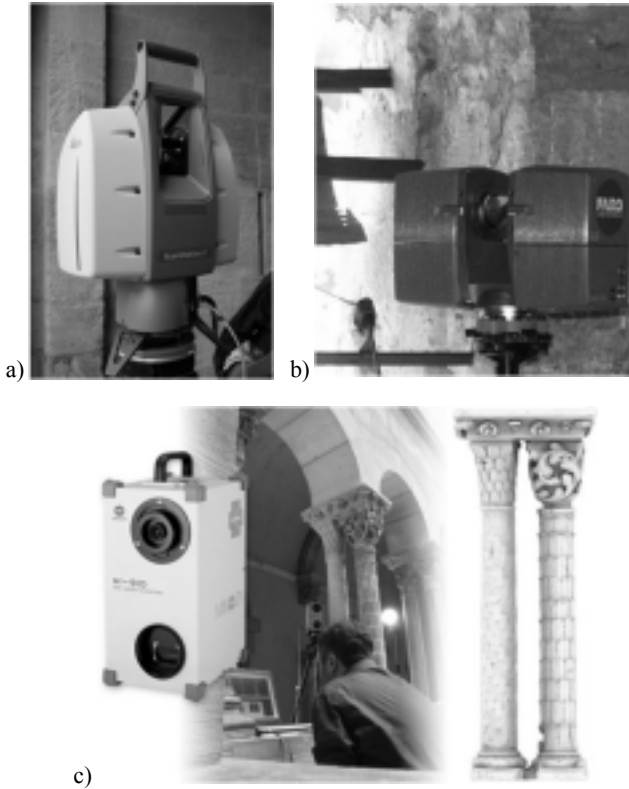
Le retour de l'onde émise est observé depuis un système optique récepteur décalé dans l'espace par rapport à la source d'émission laser d'une certaine distance. La position de l'objet d'intérêt est déterminée par la résolution d'un triangle. Dans le passé, des scanners de ce type ont été utilisés pour des levés de parties de bâtiments. Aujourd'hui, on retrouve cette technique principalement dans les scanners à bras ou scanners manuels qui sont des systèmes dont le principe est proche des scanners à triangulation, à ceci près que le dispositif d'émission du laser est mobile et qu'il est donc nécessaire d'en connaître la position à tout moment. Ils sont utilisés pour numériser de petits objets avec une grande précision.



**Figure 3.2.** Fonctionnement des trois principaux types de scanner laser :  
a) à temps de vol, b) à décalage de phase, c) à triangulation

Ces trois technologies se distinguent donc fondamentalement par le mode de détermination (fonction  $f$  de la figure 3.2) de la distance entre le scanner et l'objet à numériser. Il faut noter l'existence de scanners laser combinant ces différentes méthodes dans le but d'améliorer les performances de l'instrument<sup>5</sup>. Le paragraphe suivant présentera les caractéristiques instrumentales de chacune de ces technologies dont des exemples de matériel sont présentés figure 3.3.

5. [www.trimble.com/3d-laser-scanning/cx.aspx?dtID=overview&](http://www.trimble.com/3d-laser-scanning/cx.aspx?dtID=overview&).



**Figure 3.3.** Exemples de scanners laser :  
 a) temps de vol, b) à décalage de phase, c) à triangulation

Par ailleurs, pour répondre à des besoins équivalents à ce qui a été vu dans le chapitre 2 (section 2.3.4) à propos des acquisitions mobiles d'images, il existe également des véhicules mobiles qui embarquent des scanners laser, soit seul, soit en complément de caméras. Il peut s'agir de systèmes terrestres (Paparoditis *et al.* 2012) ou aéroportés (avion, ULM, hélicoptère, drone).

Les applications sont nombreuses, les deux principales étant la numérisation 3D de rues et la constitution de MNT sur des zones étendues. Les scanners laser employés dans ces cas doivent avoir une portée importante et sont accompagnés d'une centrale à inertie et d'une antenne GNSS qui permettent de connaître à tout moment la position et l'orientation de l'instrument en mouvement.

Enfin, même si ce n'est pas non plus l'objet de ce livre, d'autres technologies de mesures permettent de faire des levés en 3D (scanner à lumière structurée, à lumière modulée) qui sont plutôt utilisées dans le domaine industriel, pour de petites scènes.

### 3.2.3. *Caractéristiques des scanners laser terrestres*

De nombreux éléments dimensionnent les scanners laser terrestres. Ces paramètres sont listés ci-dessous et les ordres de grandeur par technologie sont synthétisés dans le tableau 3.1 :

- fréquence d’acquisition (points par seconde) : les plus grandes fréquences dépassent actuellement le million de points par seconde et sont atteintes par les scanners à décalage de phase ;

- distance minimale d’acquisition (mètres) : les scanners laser terrestres ne peuvent enregistrer de mesure en deçà d’une certaine valeur, qui varie selon la technologie, de l’ordre de quelques décimètres au mètre ;

- distance maximale ou portée (mètres) : le faisceau laser est émis avec une certaine puissance qui, compte tenu de l’atténuation se produisant au cours du trajet du rayon, contraint l’acquisition à une certaine portion de l’espace. Cette portion dépend de la puissance du laser et de la réflectance de l’objet (rapport du signal renvoyé par l’objet atteint au signal incident selon la longueur d’onde et l’incidence du laser) puisque celle-ci conditionne l’amplitude du signal retourné. Les constructeurs spécifient ainsi la portée instrumentale pour une certaine réflectance de l’objet, souvent 90 %. Dans le cas des scanners à décalage de phase, la portée est également limitée par la technologie, du fait de l’ambiguïté liée au passage à un nouveau cycle dans la modulation de l’onde. La distance maximale est donc très variable selon la technologie laser sous-jacente, de l’ordre du mètre à plusieurs kilomètres ;

- résolution horizontale et verticale ou incrément moteur (degré ou millimètre) : il s’agit de l’angle minimal entre deux positions voisines du laser, horizontales et verticales. Elle peut éventuellement s’exprimer en distance minimale entre deux points voisins sur l’objet pour un certain éloignement. Il est bien entendu possible de régler l’acquisition à des valeurs supérieures et l’on emploie alors le terme « pas d’acquisition ». La combinaison des pas horizontal et vertical permet de contrôler la densité (en points par mètre carré) sur l’objet, même si en pratique celle-ci est irrégulière ;

- taille et divergence du faisceau (millimètres et radians) : à la sortie de l’instrument, le faisceau laser mesure une certaine taille et fait un certain angle ;

- précision en distance (mètres) : ce paramètre permet de qualifier le système de mesure de distance. Se dégradant avec l’éloignement, la précision est généralement fournie à un sigma près et pour une certaine distance ;

– précision angulaire (degré) : ce paramètre permet de qualifier la position angulaire du système à balayage donnée par les codeurs angulaires. La précision de positionnement des points mesurés sur l'objet est donc une combinaison de ces deux derniers paramètres auxquels il faut ajouter la nature de l'interaction entre le faisceau laser et le matériau rencontré. En effet, la granularité de la surface, sa réflectance et l'angle d'attaque influencent la façon dont l'onde va être retournée. Ce sujet est, entre autres, traité dans la section 3.2.4. Par ailleurs, il faut noter que les résolutions proposées par de nombreux instruments permettent un balayage plus fin que la précision qu'il est possible d'atteindre. Une conséquence est qu'on obtiendra parfois des nuages de points denses, mais bruités ;

– champs de vision horizontal et vertical (degrés) : ces paramètres indiquent la portion de l'espace visible par l'instrument qui est limitée par les contraintes matérielles ;

– longueur d'onde (nanomètre) : le rayonnement laser correspond à une onde monochromatique dont la longueur d'onde se situe, pour les scanners laser terrestres, entre 530 et 1 550 nm, du vert au proche infrarouge ;

– classe de sécurité : le constructeur doit spécifier la classe de sécurité du scanner laser, telle que décrite par le standard IEC 60825-1 ed2.0 (IEC, 2007) établi par l'International Electrotechnical Commission qui classe selon quatre catégories principales la dangerosité des lasers, de 1 pour les lasers les moins dangereux à 4 pour les plus dangereux. Les classes de sécurité des scanners laser habituellement utilisés dans le cadre de levés topographiques terrestres, vont de 1 à 3R et 3B, ces derniers standards impliquant plus particulièrement des mesures de sécurité à respecter.

En plus de ces paramètres que l'on retrouvera quel que soit le type de scanner laser, d'autres éléments optionnels peuvent être présents :

– système de verticalisation : certains scanners laser sont capables d'aligner la verticale de leur référentiel interne avec la verticale locale, par un compensateur de niveau intégré ;

– système de centrage : certains scanners laser terrestres permettent de centrer l'instrument sur un point par un plomb optique ou laser et une marque de hauteur instrumentale ;

– caméra : un appareil photographique ou une caméra vidéo sont parfois inclus dans l'instrument pour obtenir la couleur de l'objet au point mesuré. En complément du volume obtenu et de l'intensité du retour, cette information est utile dans de nombreux cas : présence de peintures, nécessité d'appréhender l'état du matériau, de produire un rendu réaliste, etc. Du fait de la difficulté mécanique à aligner les axes de rotation instrumentaux, on observe très souvent un décalage géométrique entre la caméra et le laser même après les corrections qui peuvent être effectuées en

prétraitement, ce qui limite l'utilisation de cette information. De plus, les caméras actuellement employées fournissent des images de qualité nettement inférieure à celles que l'on obtient avec des appareils photographiques reflex du marché. Par conséquent, des prises de vues complémentaires effectuées avec des appareils photographiques externes sont, aujourd'hui encore, souvent exigées (voir section 3.3.5) ;

– retour d'onde complète : ce type d'appareil permet le traitement de l'ensemble du signal retourné, ce qui peut apporter des informations à la fois sur le matériau touché (sa rugosité notamment par l'étude de la forme de l'onde renvoyée) ainsi que sur l'ensemble des objets atteints lors du parcours de l'onde (avec une certaine capacité à discriminer les objets dans le sens de la profondeur). Ce dernier point est intéressant, en particulier dans le cas où des éléments gênants (par exemple des branches d'arbres) se trouvent sur le parcours du rayon laser (Doneus *et al.*, 2009).

<b>Technologie</b> <b>Paramètre</b>	<b>Temps de vol</b>	<b>Décalage de phase</b>	<b>Triangulation</b>
<b>Fréquence d'acquisition</b>	10 000 à 300 000 points/s	1 million de points/s	Quelques dizaines de milliers de points/s
<b>Distance minimale</b>	1 à 5 m	0.3 à 0.5 m	à partir de 0.1 m
<b>Distance maximale/portée</b>	300 à 6 000 m	80 à 180 m	1.0 à 2.5 m
<b>Résolution horizontale et verticale</b>	0.0002 à 0.0125°	0.001 à 0.002°	0.1 à 0.3 mm
<b>Taille du spot</b>	6-18mm	3 mm	-
<b>Divergence du spot</b>	0.15 à 0.35 mrad	0.16 à 0.25 mrad	-
<b>Précision en distance</b>	3 à 5 mm @50 m	2 à 3 mm @50 m	<1/10° de mm
<b>Précision angulaire</b>	0.0002 à 0.01°	0.001 à 0.007°	-
<b>Champs de vision horizontal et vertical</b>	H : 360° V : 60 à 360°	H : 360° V : 270 à 360°	0,5 x 0,5 x 0,22 mm à 1,5 x 1,1 x 1,7 m
<b>Longueur d'onde</b>	532 à 1 550 nm	670 à 905 nm	Autour de 660 nm
<b>Classe de sécurité</b>	1 ou 3B ou 3R	1 ou 3R	1
<b>Poids</b>	10 à 20 kg	5 à 15 kg	2 à 7 kg

**Tableau 3.1.** *Ordre de grandeur des caractéristiques instrumentales selon la technologie (d'après geo-matching<sup>6</sup> et Remondino, 2011)*

6. [www.geo-matching.com/category/id46-terrestrial-laser-scanners.html](http://www.geo-matching.com/category/id46-terrestrial-laser-scanners.html).

### 3.2.4. Erreurs affectant la mesure et étalonnage

Un certain nombre d'erreurs affectent les mesures obtenues par scanner laser terrestre que ce soit au niveau de la distance obtenue et des angles (donc du positionnement dans l'espace des points mesurés) ou de l'intensité retournée.

#### 3.2.4.1. Aspects géométriques

On peut classer ces erreurs en plusieurs catégories, selon leur origine (Schulz, 2007 ; Reshetyuk, 2009 ; Litchi *et al.*, 2010) :

- *erreurs aléatoires liées à la physique de la mesure par laser* : la mesure de la distance est soumise à certains phénomènes qui réduisent sa précision : bruit thermique, bruit quantique et courant d'obscurité. Il est possible de limiter l'impact de ces perturbations en faisant plusieurs mesures consécutives et en les moyennant, mais cela diminue naturellement la vitesse d'acquisition ;

- *erreurs systématiques liées au matériel et à sa construction* :

- la qualité individuelle de chacun des composants du scanner laser a un impact direct sur le résultat : qualité des codeurs angulaires, du convertisseur analogique numérique du signal, précision de l'horloge, type et performance du miroir oscillant utilisé, etc. ;

- des imprécisions dans l'assemblage des différents composants, de type non-alignement ou non-orthogonalité des axes, conduisent à des erreurs en angle et en distance ;

- des interférences internes, optiques ou électriques peuvent également réduire les performances de l'instrument ;

- *artefacts liés à l'environnement* :

- la vitesse de propagation de l'onde dépend du milieu parcouru, caractérisé par son indice de réfraction. Selon la météo, des variations peuvent subvenir du fait de changements dans la température, la pression ou l'humidité et selon la nature du milieu parcouru. On privilégiera des temps secs et stables et on évitera le passage dans l'eau ou dans le verre ;

- la lumière ambiante est susceptible de perturber la mesure et il peut être recommandé d'effectuer des acquisitions de nuit ;

- *artefacts induits par l'interaction entre le scanner laser et l'objet atteint* :

- la divergence du faisceau laser implique que, en bord d'objet, une partie de l'onde peut être renvoyée vers le scanner et une autre peut poursuivre son chemin jusqu'à un autre objet. Si les deux objets sont proches, au regard de la résolution dans le sens de la profondeur du scanner laser, alors le détecteur ne sera pas en

mesure de distinguer ces deux retours et le point 3D obtenu sera positionné entre les deux objets : on parle de pixel mixte ;

- l'angle d'incidence du faisceau laser sur l'objet a un impact au niveau de la qualité du signal retourné (Soudarissanane *et al.*, 2011) ;

- les objets très réfléchissants risquent de déborder sur leur voisinage et seront agrandis dans le nuage de points. Dans ce cas, on peut également observer des traînées devant et derrière l'objet ;

- les surfaces spéculaires peuvent créer des multitrajets, en particulier à courte distance ;

- les objets sombres, de faible réflectance, renvoient peu d'énergie. L'onde retournée a alors un rapport signal sur bruit moins bon et la distance mesurée est, par conséquent, plus sensible au type de détecteur du retour ;

- le faisceau laser est inopérant pour certains matériaux bien spécifiques : pénétration dans la matière (marbre (Godin, 2001), polystyrène, etc.), réflexion totale (dorures, bois ciré sombre et fortement réfléchissant), transmission à travers le verre. Dans ce dernier cas, le faisceau est partiellement retourné et partiellement transmis avec une modification de son parcours.

De façon plus générale, on pourra se référer à (Vöegtle *et al.*, 2008) pour avoir une idée de l'impact du matériau observé sur la mesure laser.

Un étalonnage du scanner laser peut être effectué pour déterminer une partie des erreurs systématiques, soit par une modélisation physique si l'origine des phénomènes rencontrés est connue, soit par une modélisation empirique souvent polynomiale. Les artefacts et les erreurs aléatoires ne peuvent être corrigés par ce type de procédure et sont souvent traités manuellement.

Diverses stratégies d'étalonnage existent :

- les différents composants du scanner laser sont étalonnés séparément ce qui implique de bien comprendre l'origine des erreurs rencontrées et de disposer d'équipements spécifiques pour ces étalonnages individuels ;

- l'ensemble du système est, simultanément, étalonné sur un site spécifique composé de cibles et acquis selon différentes positions et orientations. Les paramètres inconnus (positions et orientations des stations du scanner, positions des cibles et paramètres du modèle d'étalonnage) sont déterminés en utilisant la redondance d'information induite par ce levé. Cette méthode ressemble à ce qui est couramment mis en œuvre pour l'étalonnage géométrique des caméras. Une attention particulière doit être portée quant à la disposition des cibles observées (prévoir notamment différents éloignements, dans l'ensemble du champ de vision du scanner) et à leur

redondance afin de lever les ambiguïtés dues à la corrélation entre les différents paramètres à déterminer ;

- une autre solution consiste à exploiter des objets caractéristiques comme des plans, lors d'un étalonnage par des mesures *in situ*, ce qui allège les procédures, mais ne permet pas forcément d'assurer une précision équivalente.

Les spécifications finalement fournies avec l'instrument, en particulier les précisions indiquées (voir tableau 3.1), rendent compte des erreurs résiduelles qui n'ont pu être corrigées par l'étalonnage. Cette opération est généralement réalisée par le constructeur.

#### 3.2.4.2. *Aspects radiométriques*

L'intensité du retour du signal laser est une mesure qui peut contribuer à la compréhension de la scène en donnant des informations sur les matériaux constituant les objets. Pour certaines applications, il peut être nécessaire de disposer d'une mesure absolue. Outre l'influence de la réflectance de l'objet atteint, ce que l'on cherche en pratique, l'intensité est modifiée du fait de certains phénomènes :

- l'énergie décroît inversement au carré de la distance ;
- l'atmosphère atténue le signal ainsi que les composants du scanner qui transmettent ou réfléchissent le faisceau laser ;
- le signal est amplifié lors de la conversion analogique numérique ;
- certains prétraitements sont effectués, dont il est difficile de connaître la nature.

Au final, les expériences (Pfeifer *et al.*, 2007 ; Kaasalainen *et al.*, 2009 ; Krooks *et al.*, 2013) visant à évaluer la qualité de l'intensité mesurée par scanner laser montrent qu'il est difficile d'établir des règles communes à l'ensemble des scanners notamment parce que l'étalonnage radiométrique est réalisé différemment selon les constructeurs. Certains logiciels de prétraitements des nuages de points ne corrigent pas ces phénomènes, d'autres incluent une correction dont le contenu est inconnu de l'utilisateur.

A notre connaissance, il n'existe pas d'évaluations sur la qualité des comptes numériques issus des caméras accompagnant les scanners laser.

#### 3.2.5. *Les principaux constructeurs*

Pour les scanners laser à temps de vol et à décalage de phase, une petite dizaine de constructeurs se partagent le marché. Ces sociétés sont souvent en concurrence directe, certaines proposant des produits très proches en termes de performance.

Le site [geo-matching.com](http://geo-matching.com)<sup>35</sup> propose un comparateur régulièrement actualisé des instruments disponibles.

En ce qui concerne les scanners par triangulation, le marché est sensiblement différent puisqu'il s'agit de numériser très finement des objets de petite taille, plus en lien avec le monde de la CAO (conception assistée par ordinateur). Le coût de ce matériel est globalement plus bas, variant de quelques centaines à plusieurs milliers d'euros, selon la précision de reconstruction recherchée.

Enfin, l'avenir semble être aux plateformes multi-instrumentales combinant mesure topométrique précise, numérisation à haute densité par scanner laser (1 000 points/s jusqu'à 300 m), antenne GNSS et appareil photographique de bonne qualité pour texturer les nuages de points<sup>7</sup>.

### 3.2.6. Cas d'utilisation

Dans le cas d'un chantier de numérisation d'un édifice remarquable, les trois technologies présentées peuvent être considérées comme complémentaires :

- la portée des scanners laser à temps de vol permet de viser les parties de l'édifice distantes, ce qui est souvent utile, soit parce que le bâtiment est particulièrement grand, soit parce qu'un recul permettra un meilleur point de vue, moins rasant ;
- la performance des scanners à temps de vol en lumière naturelle fait qu'on les privilégie souvent pour les acquisitions extérieures ;
- les scanners à décalage de phase par leur rapidité et par l'étendue de leur champ de vision se montrent particulièrement adaptés aux intérieurs, notamment pour de petites pièces ou des zones d'organisation complexe telles que les escaliers ;
- les scanners à triangulation peuvent être employés si le monument comprend des éléments architecturaux, de décor ou du mobilier pour lesquels une numérisation plus fine est nécessaire pour répondre aux exigences du cahier des charges.

Les travaux effectués sur la chartreuse de Villeneuve-lès-Avignon illustrent cette complémentarité (Favre-Brun *et al.*, 2010) : des scanners à temps de vol et à décalage de phase ont été utilisés pour numériser l'ensemble du site et un scanner laser à triangulation a été employé pour l'acquisition d'objet plus petit ou comportant des détails. L'exemple de l'abbaye de Cluny (Landrieu *et al.*, 2011) montre également une utilisation conjointe de différents matériels adaptée à l'intérêt de l'objet à lever.

---

7. [www.leica-geosystems.com/en/Leica-Nova-MS50\\_103592.htm](http://www.leica-geosystems.com/en/Leica-Nova-MS50_103592.htm).

Il faut enfin noter l'efficacité et la fiabilité de la mesure laser dans son ensemble, ce, pour quasiment tous les matériaux, à l'exception des cas évoqués dans la section 3.2.4.

### 3.3. Acquisition par lasergrammétrie

Les scanners laser terrestres sont des instruments relativement simples à mettre en œuvre. Les compétences nécessaires pour réaliser une mise en station et piloter la numérisation peuvent être acquises en quelques jours de formation seulement. C'est au niveau de la conception du chantier et de l'élaboration du réseau d'éléments de calage que l'expérience, teintée d'une pointe de créativité, est un réel atout. Elle permet en effet d'éviter des erreurs qui peuvent conduire à une impossibilité d'exploitation des levés et dont on se rend compte parfois trop tard, au moment du post-traitement, lorsqu'on n'a plus accès au site.

Ceci est d'autant plus sensible dans le cas des édifices complexes où les sources d'erreurs sont potentiellement plus nombreuses. Cette partie s'attache donc à décrire les éléments à prendre en compte lors de toute acquisition par lasergrammétrie et en particulier ceux pertinents pour le traitement de ce type d'édifice.

#### 3.3.1. Conception du chantier

La reconnaissance s'effectue en intégrant les recommandations données dans la section 1.4. D'autres spécificités liées à l'acquisition laser doivent être prises en compte. En effet, la géométrie sphérique d'acquisition et les limitations du champ de vision de l'appareil impliquent que plusieurs stations laser sont généralement à réaliser pour couvrir la totalité de la zone à numériser. Il est courant de prendre comme postulat que le nombre de stations doit être minimal afin de gagner en temps et simplifier l'acquisition. En pratique, il y a des cas où chercher l'optimum de ce point de vue introduit une complexité non souhaitable : visées rasantes, positionnement des points de calage moins performant, stationnement périlleux, voire manque de données si l'on est « trop juste ». Une certaine souplesse est donc conseillée d'autant plus pour les systèmes d'acquisition de fréquences rapides et simples à mettre en station. Si l'on dispose de scanners laser avec des caractéristiques significativement différentes, notamment en termes de portée et de champ de vision, il sera naturellement judicieux de planifier le recours à un scanner plutôt qu'à un autre selon sa pertinence.

Au total, le nombre de stations pourra être très important : sur la cathédrale d'Amiens, pour une acquisition complète de la structure du monument (intérieur et extérieur, à tous les niveaux) à un pas de 1 cm, en extrapolant les chiffres issus des

premières campagnes d'acquisition (Héno *et al.*, 2011), l'ordre de grandeur est d'une centaine de stations laser pour environ 2 milliards de points. Ce nombre dépendra, bien sûr, de la taille du monument, mais également et surtout de sa complexité. Les grandes salles avec une architecture relativement simple nécessitent souvent un nombre de stations beaucoup moins important que les dédales de couloirs et escaliers s'imbriquant ou que les façades sculptées.

### 3.3.2. Besoins en éléments de calage

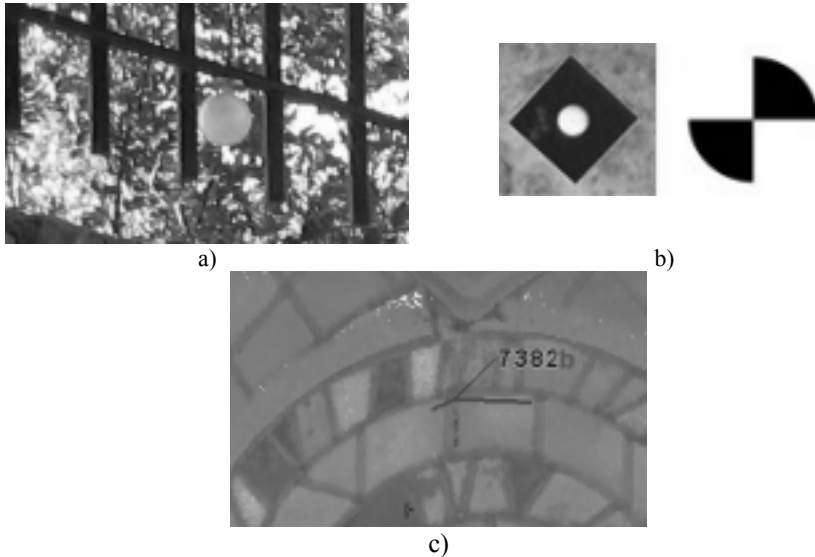
Un scanner laser terrestre fournit les coordonnées des points mesurés dans un système de coordonnées lié à l'instrument. Deux stations acquises en deux lieux différents ont donc deux systèmes de coordonnées indépendants qu'il est nécessaire de lier : on parle d'assemblage ou de consolidation des stations laser.

Cette transformation relative peut se faire grâce à des points de liaison (éléments ponctuels communs) ou en utilisant les zones de recouvrement (zones communes entre les nuages de points des différentes stations laser).

Pour disposer des données dans un système de coordonnées de référence, en positionnant et orientant le chantier de façon absolue, il faut également procéder au géoréférencement des stations laser en utilisant des points d'appui.

Comme évoqué en section 1.3.3, des points de différentes natures peuvent être utilisés pour mener à bien ces opérations : détails naturels, cibles artificielles et points géodésiques. Quelques recommandations peuvent cependant être données pour tenir compte de la nature de la mesure laser et des configurations d'acquisition. Les matériaux noirs renvoient peu, voire aucun signal et sont donc à proscrire. Les formes géométriques invariantes selon le point de vue, sphère par exemple, sont bien adaptées même si elles peuvent être moins discrètes et plus compliquées à positionner sur le site. Des angles de pierre correctement définis, peu usés, pourront être employés ainsi que des éléments de décor bien visibles. Le choix de points naturels est à adapter au scanner utilisé notamment en fonction de la qualité de l'intensité obtenue. Par ailleurs, une acquisition spécifique à un pas très fin, de l'ordre de quelques millimètres, est généralement effectuée sur ces détails pour pouvoir les repérer le plus précisément possible dans le nuage de points laser. La figure 3.4 donne des exemples de points de calage appropriés aux scanners laser.

Enfin, dans le cas d'une station pour laquelle le scanner laser a été verticalisé et éventuellement centré sur un point, on dispose de connaissances complémentaires sur le calage (verticale du chantier, centre du système de coordonnées du laser). Cette possibilité permet de diminuer le nombre d'éléments de calage nécessaire.



**Figure 3.4.** Points de calage adaptés à la numérisation laser :  
*a) sphère en céramique, b) cible en papier, c) détail naturel*

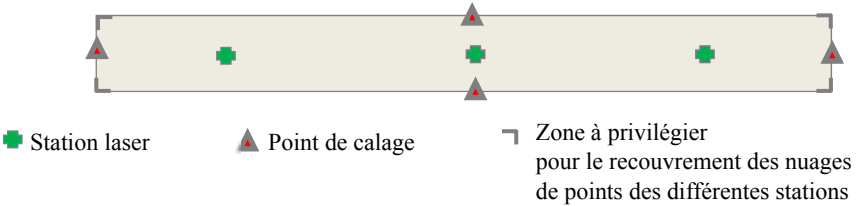
Concernant la disposition des points sur le chantier, les règles suivantes peuvent être suivies :

- les éléments doivent être répartis si possible dans l'ensemble du champ de vision du scanner, à différentes distances et, quand cela est possible, loin du point de positionnement de la station ;
- les visées multiples sur les points sont à favoriser, car elles consolident le réseau et améliorent le contrôle ;
- certaines configurations ne fixant pas tous les degrés de liberté (points alignés, zones de recouvrement planes) sont à proscrire.

La complexité induite par les édifices remarquables contraint souvent l'établissement du réseau des éléments de calage. Chaque chantier est à appréhender dans ses spécificités. L'objet n'est pas ici de faire des recommandations exhaustives (ce qui est impossible à la vue de la multiplicité des cas de figure qui peuvent se présenter), mais plutôt de sensibiliser le responsable d'un projet de lasergrammétrie à l'importance de la conception du réseau. La section 3.4 du présent chapitre propose une discussion sur la précision géométrique obtenue en fonction de la nature du réseau constitué et des variables permettant de concevoir au mieux ce réseau.

Les cas suivants sont quelques illustrations des difficultés que l'on peut rencontrer :

– *alignement naturel des éléments à numériser* tel qu'un couloir sans ouverture ou un enchaînement de pièces : il peut alors être judicieux d'utiliser les zones de recouvrement entre nuages pour minimiser les ambiguïtés, notamment en bloquant la figure sur les fonds et les angles (voir figure 3.5). Les éléments de calage sont à disposer au maximum de part et d'autre de l'alignement formé par les stations laser, horizontalement et verticalement ;



**Figure 3.5.** Exemple d'équipement en points de calage adapté à un long couloir étroit

– *zones difficilement accessibles* telles que puits, pièces en sous-sol : des dispositifs complémentaires pourront être mis en œuvre. Le scanner laser pourra par exemple être positionné sur des supports adaptés ou être acheminé par des dispositifs spécifiques (figure 3.6) ;



**Figure 3.6.** Exemples d'adaptation au site d'étude : numérisation dans une citerne (Borel et al., 2010) et dans un puits

– *intérieur et extérieur* : si ce point n'est pas spécifique aux édifices complexes, une attention particulière doit y être portée dans ce cas. En effet, il faut veiller à créer de multiples relais entre l'extérieur et l'intérieur (par les ouvertures que sont les portes et les fenêtres) afin d'éviter les déformations dues à des déséquilibres dans la répartition des points. Ces relais peuvent être assurés par des éléments de calage (figure 3.7) ou en plaçant directement des stations laser dans les ouvertures.



**Figure 3.7.** *Placement d'une sphère dans une ouverture*

### **3.3.3. Réalisation pratique**

Les contraintes exprimées précédemment peuvent être fortes, voire contradictoires : ainsi, il est parfois nécessaire de faire des compromis entre les différentes exigences évoquées. Dans les cas les plus complexes, le pragmatisme et l'ingéniosité des concepteurs du chantier d'acquisition peuvent être mis à l'épreuve. L'expérience aidera bien entendu à faire les bons choix. Dans le cas du laser, il faudra en plus du reste, prendre en compte les précautions d'utilisation dictées par la classe de sécurité : travail de nuit si nécessaire, fermeture des accès dans un certain périmètre.

Dans tous les cas, la mise en œuvre d'une station laser nécessite la réalisation de tâches bien établies pouvant être regroupées au sein d'un aide-mémoire qui permettra de vérifier que rien n'est omis. Il est par ailleurs recommandé de porter une attention particulière à la documentation (papier ou numérique) de la station, qui permet souvent de corriger les erreurs commises et de lever les ambiguïtés.



**Figure 3.8.** *Vue en plan d'une partie du chantier de lasergrammétrie de Saint Syméon (Syrie) : au total, le site s'étend sur plus de 5 km<sup>2</sup> et comporte 297 stations laser (points noirs sur la figure)*

### 3.3.4. *Avantages et limites de cette technologie*

Les scanners laser terrestres permettent d'obtenir directement des nuages de points 3D globalement précis et fiables. Ils sont donc, à ce titre, des instruments de numérisation extrêmement performants et adaptés au levé de grands ensembles architecturaux.

Leurs limites sont les suivantes :

- coût du matériel qui reste élevé même si le marché propose aujourd'hui des instruments de moins en moins onéreux ;
- mise en œuvre relativement lourde même si les derniers modèles plus compacts, légers, et intégrant les dispositifs de pilotage tendent à réduire cet inconvénient. Il reste que les édifices remarquables comportent souvent des décors sculptés dont la numérisation est facilitée si l'on peut se déplacer librement avec l'instrument de mesure, ce qu'autorisent les scanners à main ou les techniques de photogrammétrie ;
- zones inaccessibles : c'est le cas des parties extérieures hautes qui ne peuvent être atteintes qu'en recourant à des porteurs légers (ULM, drones, perches) accueillant

plus facilement des appareils photographiques. Les équivalents pour les scanners laser devraient apparaître prochainement sur le marché<sup>8</sup>. Pour des applications à plus grande échelle, certaines sociétés<sup>9</sup> embarquent des scanners laser sur des hélicoptères, par exemple dans le cadre de levés de corridors (routes, voies ferrées), pour la modélisation d'ouvrages d'art (barrages, ponts) ou pour des analyses géologiques ;

- qualité médiocre de l'information fournie par les caméras des scanners actuels tant du point de vue de la couleur que de la localisation de cette information ;
- nécessité de travailler sur un sol suffisamment stable pendant l'acquisition.

### 3.3.5. Couplage avec des photographies externes

Pour certaines applications comme la visite virtuelle ou si le site contient des décors ayant des couleurs qui ont un intérêt, il peut être demandé d'obtenir un rendu réaliste de l'environnement. En attendant que les scanners laser intègrent des caméras suffisamment performantes, des solutions alternatives ont été conçues pour disposer d'une information colorimétrique de qualité :

- des photographies peuvent être réalisées avec des appareils indépendants. Les règles d'obtention d'images de qualité détaillées dans le chapitre 2 sont valables ici. En revanche, les contraintes géométriques d'acquisition sont assez différentes puisque la stéréoscopie n'est pas indispensable. Beaucoup de travaux de recherche portent depuis plusieurs années sur le calcul automatique du géoréférencement d'images sur des nuages de points laser afin de traiter le plus rapidement possible ces données complémentaires (voir section 5.3.5) ;

- pour disposer d'images de qualité dans la géométrie d'acquisition du scanner laser, il est possible d'utiliser une tête d'acquisition panoramique portant un appareil photographique numérique (voir figure 3.9) et que l'on positionne au plus proche du centre du scanner laser, si nécessaire en ajoutant des pièces usinées pour assurer cette correspondance ou en plaçant la caméra sur le scanner laser. Des traitements sont nécessaires pour recalibrer finement la géométrie des deux types de données (Meierhold *et al.*, 2010 ; Craciun *et al.*, 2012).

Une réflexion devra être menée sur le choix du positionnement des prises de vues. En effet, le placement des stations laser est fortement contraint par les exigences de réalisation du chantier de numérisation. En conséquence, les positions des stations laser retenues ne sont souvent pas optimales pour l'acquisition photographique (images avec une basse résolution et une forte incidence) ni pour le

---

8. <http://yellowscan.lavionjaune.com>.

9. [www.helimap.ch](http://www.helimap.ch).

moment où elles sont réalisées (influence des conditions d'éclairage sur la qualité des images).



**Figure 3.9.** a) *Système d'acquisition d'images panoramiques,*  
b) *exemple d'image panoramique*

### 3.4. Calage des stations laser

Le terme *calage* a, dans cet ouvrage, une portée générale recouvrant les méthodes d'assemblage, de géoréférencement et leurs combinaisons. Dans tous les cas, il s'agit de déterminer la transformation permettant de passer du système de coordonnées instrument, lié au scanner laser, à un système global, qui peut être lié au chantier d'acquisition laser, au monument, ou être un système de référence. Cette transformation est composée d'une rotation  $R_{Instrument \rightarrow Global}$  et d'une translation  $T_{Instrument \rightarrow Global}$ . Elle comporte donc 6 paramètres qui peuvent être calculés en utilisant des points (calage « point à point ») ou les zones de recouvrement des nuages de points (calage « nuage à nuage »).

### 3.4.1. Principe des différentes stratégies de calage

Pour déterminer les paramètres de la transformation pour une station, en utilisant la seule méthode de calage point à point, il est nécessaire de connaître au minimum les coordonnées de 3 points non alignés dans le système instrument  $M_{Instrument}$  et dans le système global  $M_{Global}$ . La formulation mathématique matricielle est la suivante :

$$M_{Global} = R_{Instrument \rightarrow Global} \times M_{Instrument} + T_{Instrument \rightarrow Global}$$

L'utilisation de deux points laisse en effet un degré de liberté autour de la droite les reliant. Le système d'équations peut se résoudre en utilisant la méthode de compensation par moindres carrés qui nécessite ici la linéarisation du problème et donc de disposer d'une solution approchée pour initialiser le calcul. En pratique, il est conseillé de disposer au minimum de 5 points par station pour être en mesure de détecter les éventuelles erreurs et les corriger. On cherchera à mutualiser les points entre les différentes stations par souci de rentabilité, mais aussi pour rendre plus robuste le réseau. Si le scanner laser est verticalisé, voire centré sur un point connu, le nombre de points extérieurs nécessaire au calage est réduit : au minimum, deux points dans le premier cas et un dans le second, auxquels il faut toujours ajouter les points supplémentaires, nécessaires à la détection des erreurs.

Lorsque l'on recourt à une méthode de calage nuage à nuage seule, le système de sortie ne pourra être qu'un système local lié à l'acquisition ou au monument et il faudra s'assurer que les nuages de points des différentes stations laser ont suffisamment de recouvrement. Il faut notamment vérifier que l'on peut enchaîner les stations les unes après les autres (pas de sous-ensembles indépendants). Dans ce cas, le calcul des 6 paramètres de la transformation se fait avec des méthodes de minimisation de la distance entre les points des nuages, dont la plus connue et répandue est la méthode ICP (*Iterative Closest Point*, voir Besl *et al.*, 1992) qui comporte de très nombreuses variantes, développées pour améliorer l'algorithme initial et l'adapter aux spécificités des données (Pomerleau *et al.*, 2013). Pour une revue de différentes méthodes, on pourra se référer à (Rusinkiewicz *et al.*, 2001). Dans tous les cas, il est nécessaire de connaître une solution initiale et, par conséquent, il faut tout de même saisir des points de liaison entre nuages dont les contraintes sur leur nombre et leur précision sont relâchées. Des recherches sont en cours pour automatiser cette phase également. Enfin, pour que le problème soit correctement conditionné, comme évoqué précédemment, les zones de recouvrement ne doivent pas être ambiguës. En particulier, la zone commune ne doit pas être à courbure constante.

Si on utilise simultanément les deux types d'éléments de calage, le besoin en équipement est logiquement intermédiaire. Peu d'études existent en pratique sur

l'optimisation du réseau de points dans ce cas. Cette problématique rappelle celle de l'équipement en points d'appui pour la réalisation d'aérotriangulation (voir section 2.3.5) qui, elle, a été largement traitée et qui est sensiblement plus simple du fait de la régularité des prises de vues aériennes et de la possibilité offerte par les logiciels de photogrammétrie d'extraire automatiquement de nombreux points de liaison entre images. Au minimum, il faut trois points d'appui pour basculer l'ensemble du chantier vers le système de référence, mais, si on se limite à ce nombre, des dérives locales seront possibles et il ne sera pas possible de les détecter.

Le tableau 3.2 récapitule les principales stratégies possibles.

Nom	Système de coordonnées de sortie	Description de la méthode	Avantages	Inconvénients
<b>Assemblage seul</b>	Système lié à l'acquisition laser ou au monument	Les différentes stations laser sont calées par des méthodes nuage à nuage et/ou point à point (de liaison)	– Méthode légère sur le terrain	– Risque de dérive – Calage seulement relatif
<b>Géo-référencement seul</b>	Système de référence	Chaque station laser est géoréférencée par une méthode point à point qui utilise uniquement des points d'appui (5 points par station recommandés)	– Peu de risque de dérive par rapport au terrain	– Ecart entre nuages non minimisés – Lourdeur de l'équipement en point d'appui
<b>Assemblage et géo-référencement</b>	Système de référence	Des éléments de liaison (point à point et nuage à nuage) et d'appui sont utilisés simultanément	– Méthode hybride diminuant le besoin en points d'appui – Compromis sur les contraintes entre calage relatif et absolu	– Difficulté à bien spécifier le besoin en points de liaison et d'appui

**Tableau 3.2.** Description des différentes stratégies de calage des stations laser

Lorsqu'il s'agit de traiter un chantier d'envergure, il peut être judicieux de travailler par sous-ensembles et d'ajouter progressivement les stations laser à assembler. Cela permet en effet de détecter plus facilement les erreurs et de les

corriger progressivement ainsi que de vérifier la qualité du géoréférencement zone par zone. Une compensation globale mettant en œuvre toutes les observations (points de liaison, points d'appui et zone de recouvrement) est conseillée en fin de processus, mais elle peut être lourde à calculer dans les cas extrêmes de très grands sites. Dans ce cas, on peut garder des calculs locaux qui sont tout de même exprimés dans le système global grâce à la densification du réseau d'appui. La combinaison d'éléments de calage de différentes natures qui ont souvent des précisions variables nécessite par ailleurs la pondération des mesures par leur précision *a priori*.

### **3.4.2. Automatisation de tout ou partie de la phase de calage**

Pour augmenter la rentabilité du chantier de lasergrammétrie et améliorer les résultats, il peut être judicieux de chercher à automatiser cette phase de calage des stations laser. Le gain sera d'autant plus sensible que le projet est de taille conséquente, ce qui est le cas pour les édifices remarquables.

#### *3.4.2.1. Extraction automatique des cibles artificielles*

En ce qui concerne les éléments artificiels, les logiciels incluent généralement des algorithmes qui, à partir de la connaissance du motif ou de la forme à rechercher, proposent un positionnement automatique du point (Kregar *et al.*, 2013). Cependant, il est généralement nécessaire de disposer d'une position approchée, souvent fournie par une saisie par un opérateur sur le nuage de points à proximité de la zone d'intérêt. Si l'intervention humaine reste présente et que le gain en temps de traitement est donc un peu limité, il faut tout de même noter que le positionnement du point dans le nuage est amélioré.

Dans le cas des sphères, une estimation classique par moindres carrés permet de calculer la meilleure sphère (dont le rayon est éventuellement connu, ce qui rend l'opération plus robuste) correspondant aux points relevés.

#### *3.4.2.2. Calage automatique par appariement de primitives géométriques*

Certaines méthodes cherchent à construire des liaisons *via* des invariants géométriques qui puissent être retrouvés facilement d'une station à une autre (Barnea *et al.*, 2008 ; Al-Durgham *et al.*, 2013). Elles sont notamment mises en œuvre dans le cas des sites industriels qui sont souvent structurés par des formes géométriques simples telles que des plans et des cylindres. Ce type de stratégie est parfois utilisé pour remplacer des solutions initiales déterminées manuellement. La génération des objets géométriques est faite selon des méthodes similaires à celles qui seront présentées dans la section 5.3.4, elle est complétée par une phase d'appariement de ces primitives.

Des approches cherchant à utiliser les primitives extraites images de réflectance (Wang *et al.*, 2008 ; Kang *et al.*, 2009) ont également été mises en œuvre avec succès. Toutefois, les logiciels appliquant ces méthodes ne sont pas, à ce jour, disponibles dans le commerce.

#### 3.4.2.3. *Calage automatique par exploitation d'images externes*

Lorsque le scanner laser est équipé d'un appareil photographique, une autre façon de faire consiste à calculer la position relative des images issues de la caméra par des méthodes classiques à partir d'images et d'en déduire celles des scanners laser, éventuellement en affinant par la méthode ICP cette première estimation.

Dans tous les cas, il restera à déterminer le positionnement absolu par la connaissance de points d'appui dans les nuages laser.

#### 3.4.3. *Qualification du calage des stations laser*

Suite au calcul des transformations de passage des systèmes des différentes stations laser vers le système global du chantier, il est nécessaire de qualifier le résultat du calage pour s'assurer que la qualité géométrique du chantier est respectée au regard du cahier des charges. Cette qualité du calage dépend d'un certain nombre de facteurs :

- précision du matériel (en distance et en angle, voir section 3.2.3) ;
- météo : les conditions météorologiques peuvent avoir une influence sur la qualité des résultats. Par exemple, lors de fortes chaleurs, l'instrument et le matériel (trépied en particulier) peuvent subir des déformations dégradant la précision géométrique ; la pluie perturbe la mesure par lasergrammétrie ;
- environnement : certains sites nécessitent des précautions spécifiques pour assurer une certaine stabilité (parquet non rigide, sols meubles) ;
- type, nombre, disposition et méthode de pointage des points de calage ;
- position des stations laser par rapport à l'objet et aux points de calage ;
- précision des coordonnées des points d'appui dans le système de référence ;
- méthodes de calcul, pondération, mise en équation.

La qualité du résultat s'évalue en étudiant les résidus sur les différents éléments de calage. Ils sont de deux types :

- *résidus sur les liaisons qui apportent une information sur la précision relative* :
  - pour les zones de recouvrement entre nuages, la valeur habituellement contrôlée est la moyenne des distances calculées. Pour les scanners laser généralement

utilisés dans le domaine architectural, lors d'un assemblage seul (pas de contraintes induites par des points d'appui), on peut espérer des résidus dont l'ordre de grandeur est d'environ 1 à 2 mm. La visualisation des distances entre nuages après calcul (en attribuant une échelle de couleur selon l'écart) permet de contrôler la qualité de l'assemblage de façon systématique ;

- pour les points de liaison, le résidu est la distance entre les coordonnées obtenues après transformation vers le système global et les coordonnées calculées par la compensation. La valeur du résidu obtenue dépend d'une combinaison de plusieurs facteurs dont le principal est la plus ou moins bonne définition du point ;

- *résidus sur les appuis qui apportent une information sur la précision absolue :*

- pour les points d'appui : le résidu est la distance entre la position dans le système de référence donnée par les méthodes externes et celle donnée par le calcul. Sa valeur dépend à la fois de la précision de la mesure externe et du positionnement du détail dans le nuage de points ;

- pour le centrage : le résidu est la distance entre la position dans le système de référence et celle du centre de la station laser après calcul.

En toute rigueur, les valeurs de précision sont à déterminer sur des points de contrôle, c'est-à-dire des points qui ne sont pas intervenus dans le calcul du calage et qui permettent donc de qualifier objectivement le résultat.

En pratique, avec le matériel le plus courant et si les recommandations décrites ici ont été suivies, des précisions de l'ordre de 0,5 à 1 cm pourront être atteintes sans difficulté en positionnement relatif pour une numérisation complète de l'édifice. La précision absolue dépendra bien entendu des moyens de positionnement mis en œuvre. Par exemple, pour les systèmes GNSS, le choix du positionnement en temps réel ou en statique conditionne naturellement la précision obtenue.

#### **3.4.4. Export des nuages de points laser assemblés**

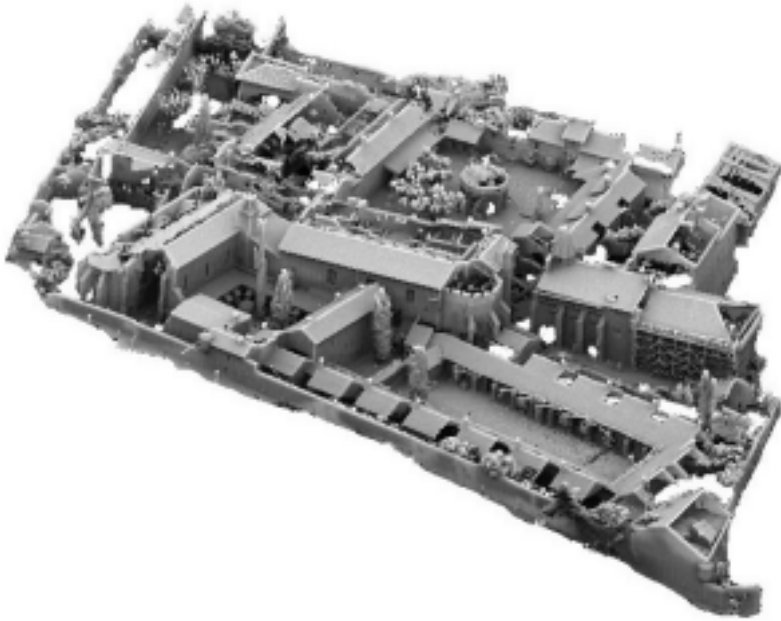
L'étape de calage permet d'obtenir les six paramètres de chacune des transformations de passage du système des stations laser au système global du site ainsi que des éléments de qualité sur la précision du résultat. Deux solutions s'offrent alors à l'utilisateur :

- les coordonnées des points 3D peuvent être conservées dans le système d'origine lié au scanner et sont transformées en temps réel par le logiciel qui affiche ou traite les données ;

- les coordonnées des points 3D sont reprojctées une fois pour toutes dans le système de coordonnées global.

La première méthode a l'avantage de conserver la géométrie d'acquisition et donc de garder le lien topologique entre les points, ce qui permet de connaître leur position relative dans l'espace et de l'utiliser pour certains traitements. La deuxième solution permet d'exploiter tous les points simultanément.

Enfin, si la visualisation du nuage de points 3D assemblé constitue un premier rendu souvent jugé spectaculaire (figure 3.10), des traitements complémentaires sont généralement nécessaires pour obtenir une information réellement exploitable (voir chapitre 5).



**Figure 3.10.** Ensemble des nuages de points géoréférencés sur la chartreuse de Villeneuve-lès-Avignon (Gressin, 2009)

### 3.5. Qualification des nuages de points obtenus

#### 3.5.1. Qualité géométrique

La qualité géométrique peut s'appréhender comme la capacité du modèle 3D à décrire la forme et la position de l'objet d'intérêt face aux spécifications établies.

Dans le cas de nuages de points obtenus par lasergrammétrie, la qualité géométrique est principalement liée à la qualité du calage (voir section 3.4.3) puisque la

précision du positionnement obtenu par le balayage laser peut être, dans la grande majorité des cas, considérée comme supérieure à celle du calage.

Si l'on s'intéresse à ce qui se passe plus localement, les nuages de points ne sont tout de même pas exempts de défauts (voir section 3.2.4) :

- le bruit de la mesure de distance implique que les surfaces lisses ne seront pas reproduites telles quelles ;
- des points parasites peuvent être présents ;
- l'échantillonnage spatial aléatoire ne permet pas d'accéder directement aux lignes caractéristiques d'intérêt et leur extraction impliquera forcément des approximations.

Des traitements pourront être effectués pour corriger, au moins partiellement, ces défauts (voir chapitre 5, section 5.2).

### **3.5.2. *Qualité radiométrique***

En pratique, l'intensité du retour laser est peu évaluée. Deux explications peuvent être proposées :

- la difficulté de disposer de mesures absolues comparables à l'intensité laser ;
- le peu d'utilisation qui est faite de cette donnée en tant que mesure radiométrique.

De plus, comme cela a été vu dans la section 3.2.4, les corrections sur l'intensité effectuées par les logiciels sont hétérogènes d'un scanner laser à un autre et il est difficile de connaître le contenu des traitements effectués.

La couleur apportée par l'appareil photographique associé au scanner laser, qu'il soit interne à ou externe, peut être évaluée selon différents aspects :

- fidélité des couleurs : même limite pour l'évaluation objective de la qualité (absence d'information absolue) qui fait que l'on se restreint souvent à une estimation visuelle du rendu ;
- superposition correcte des images avec les données du scanner laser : elle peut être estimée en pointant des détails vus dans les deux types de données et en étudiant l'écart à rapporter à l'éloignement de l'objet.

### 3.5.3. Autres éléments de qualité

D'autres aspects peuvent enfin être inclus dans l'évaluation de la qualité des nuages de points obtenus : exhaustivité (des manques peuvent subsister du fait d'éléments perturbateurs tels des piétons ou des obstacles liés au monument lui-même), fiabilité, interprétabilité et compréhension de la scène.

### 3.6. Bibliographie

- AL-DURGHAM K., HABIB A., KWAK E., « RANSAC approach for automated registration of terrestrial laser scans using linear features », *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, part. 5/W2, p. 13-18, 2013.
- BARBER D., MILLS J., BRYAN P., « Laser scanning and photogrammetry: 21<sup>st</sup> century metrology », *Proceedings of the 18<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Postdam, Allemagne, 2001.
- BARNEA S., FILIN S., « Keypoint Based Autonomous Registration of Terrestrial Laser Point Clouds », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 63, n° 1, p. 19-35, 2008.
- BERALDIN J.-A., BLAIS F., LOHR U., « Laser scanning technology », dans G. Vosselman, H.G. Maas (dir.), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, Dunbeath, Ecosse, Royaume-Uni, 2010.
- BESL P.J., MCKAY N.D., « A method for registration of 3-D shapes », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, n° 2, p. 239-256, février 1992.
- BOEHLER W., HEINZ G., MARBS A., « The Potential of Non-Contact Close Range Laser Scanners for Cultural Heritage Recording », *Proceedings of the 18<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Postdam, Allemagne, 2001.
- BOREL L., CABARROU M., DUBOURG S., EGELS Y., « D'X, Y à X, Y, Z, de nouveaux outils pour l'étude architecturale et archéologique. Restitution 3D, lasergrammétrie et photogrammétrie : le cas de la citerne el-Nabih à Alexandrie », *Actes du colloque of Virtual Retrospect 2009*, Pessac, 18-20 novembre 2009, *Archeovision*, vol. 4, p. 215-228, Ausonius Editions, Bordeaux, 2010.
- CRACIUN D., PAPANODITIS N., SCHMITT F., « Image-Laser Fusion for In Situ 3D Modeling of Complex Environments: A 4D Panoramic-Driven Approach », dans C. Alexandru (dir.), *Modeling and Simulation in Engineering*, InTech, 2012.
- DONEUS M., PFENNIGBAUER M., STUDNICKA N., ULLRICH A., « Terrestrial Waveform Laser Scanning for Documentation of Cultural Heritage », *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> CIPA Symposium*, Kyoto, Japon, 2009.
- FANGI G., NARDINOCCHI C., « Experiences of laser autoscanning for architecture : the domus aurea in Rome and the San Giovanni's Baptistery in Florence », *Proceedings of the 17<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Olinda, Brésil, 1999.

- FAVRE-BRUN A., DE LUCA L., « De l'acquisition 3D à la réalité augmentée : le cas de l'église de la chartreuse pontificale de Villeneuve-lès-Avignon (Gard) », *Revue Française de photogrammétrie et de télédétection*, n° 196, p. 52-58, 2010.
- GODIN G., RIOUX M., BERARDIN J.-A., LEVOY M., COURNOYER L., « An Assessment of Laser Range Measurement of Marble Surfaces », *Proceedings of the 5<sup>th</sup> Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, p. 49-56, Vienne, Autriche, 2001.
- GOSKAR T.A., CARTY A., CRIPPS P., BRAYNE C., VICKERS, D., « The Stonehenge laser show », *British Archaeology*, n° 73, p. 9-13, novembre 2003.
- GRESSIN A., Conception et développement d'un système permettant l'intégration et la constitution des données hétérogènes dans un SGBD spatial, Rapport de stage du cycle ingénieur 2<sup>e</sup> année, Ecole nationale des sciences géographiques, France, 2009.
- HÉNO R., CHANDELIER L., « Complementarity of terrestrial laser scanning and DSM from aerial photography: the example of the cathedral of Amiens », *Proceedings of the 23<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Prague, République Tchèque, 2011.
- IEC, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, Safety of laser products - Part 1: Equipment classification and requirements, International standard, IEC 60825-1 ed2.0. 30, mars 2007.
- KAASALAINEN S., KROOKS A., KUKKO A., KAARTINEN H., « Radiometric Calibration of Terrestrial Laser Scanners with External Reference Targets », *Remote Sensing*, vol. 1, n° 3, p. 144-158, 2009.
- KANG Z., LI J., ZHANG L., ZHAO Q., ZLATANOVA S., « Automatic Registration of Terrestrial Laser Scanning Point Clouds using Panoramic Reflectance Images », *Sensors*, vol. 9, n° 4, p. 2621-2646, 2009.
- KREGAR K., GRIGILLO D., KOGOJ D., « High precision target center determination from a point cloud », *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, part. 5/W2, p. 139-144, 2013.
- KROOKS A., KAASALAINEN S., HAKALA T., NEVALAINEN O., « Correction of intensity incidence angle effect in terrestrial laser scanning », *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 2, part. 5/W2, Antalya, Turquie, 2013.
- LANDES T., GRUSSENMEYER P., « Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques », *XYZ, Revue de l'Association française de topographie*, n° 128, p. 37-49, 2011.
- LANDRIEU J., PÈRE C., ROLLIER-HANSELMANN J., CASTANDET S., SCHOTTE G., « Digital rebirth of the greatest church of Cluny Maior Ecclesia: From optronic surveys to real time use of the digital Model », *Proceedings of 4<sup>th</sup> ISPRS International Workshop 3D-ARCH 2011 : 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, vol. 38, part. 5/W16, Trento, Italie, 2011.
- LERMA GARCÍA J.L., VAN GENECHTEN B., HEINE E., SANTANA QUINTERO M., « Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning », *Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia*, Valence, Espagne, 2008.

- LICHTI D., SKALOUD J., « Registration and Calibration », dans G. Vosselman, H.-G. Maas (dir.), *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Whittles Publishing, Dunbeath, Ecosse, Royaume-Uni, 2010.
- MAIMAN T., « Stimulated Optical Radiation in Ruby », *Nature*, vol. 187, n° 4736, p. 493-494, août 1960.
- MEIERHOLD N., SPEHR M., SCHILLING A., GUMBOLD S., MAAS H.-G., « Automatic feature matching between digital images and 2d representations of a 3d laser scanner point cloud », *Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium on Close Range Image Measurement Techniques*, vol. 38, p. 446-451, Newcastle upon Tyne, Royaume-Uni, 2010.
- PAPARODITIS N., PAPELARD J.-P., CANNELLE B., DEVAUX A., SOHEILIAN A., DAVID N., HOUZAY E., « Stereopolis II: A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology », *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, n° 200, p. 69-79, 2012.
- PFEIFER N., DORNINGER A., FAN H., « Investigating terrestrial laser scanning intensity data: quality and functional relations », *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, p. 328-337, Zurich, Suisse, 2007.
- POMERLEAU F., COLAS F., SIEGWART R., MAGNENAT S., « Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets », *Autonomous Robots*, vol. 34, n° 3, p. 133-148, avril 2013.
- REMONDINO F., « Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning », *Remote Sensing*, vol. 3, n° 6, p. 1104-1138, 2011.
- RESHETYUK Y., Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning, Thèse de doctorat, Département of Transport and Economics, Division of Geodesy, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Suède, 2009.
- RUSINKIEWICZ S., LEVOY M., « Efficient Variants of the ICP Algorithm », *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling, 3DIM*, p. 145-152, 2001.
- SCHULZ T., Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy, Thèse de doctorat, ETH Zurich, Suisse, 2007.
- SMULLIN L., FIOCCO G., « Project Luna See », *Institute of Electrical and Electronics Engineers Proceedings*, vol. 50, p. 1703-1704, 1962.
- SOUDARISSANANE S., LINDENBERGH R., MENENTI M., TEUNISSEN P., « Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, n° 4, p. 389-399, 2011.
- VÖEGTLE T., SCHWAB I., LANDES T., « Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, part. B5, p. 1061-1066, Pékin, Chine, 2008.

- WANG Z., BRENNER C., « Point based registration of terrestrial laser data using intensity and geometry features », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, part. B5, p. 583-589, Pékin, Chine, 2008.
- WEHR A., WIEDEMANN A., « Fusion of photogrammetric and laser data », *Proceedings of the 17<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Olinda, Brésil, 1999.
- WILLIAMS N., HANTAK C., LOW K., THOMAS J., KELLER K., NYLAND L., LUEBKE D., LASTRA A., « Monticello Through the Window », *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage (VAST 2003)*, Brighton, Royaume-Uni, 2003.



---

## Complémentarité des techniques

---

### 4.1. Introduction

La photogrammétrie et la lasergrammétrie ont été présentées successivement dans les précédents chapitres de cet ouvrage. Il est utile de les comparer (voir également Grussenmeyer *et al.*, 2008 ; Andrews *et al.*, 2013 ; Rasztovits *et al.*, 2013) et de montrer sur un exemple comment ces deux techniques gagnent à être utilisées de manière complémentaire. Seules les phases d'acquisition des données et de production seront abordées ici, les phases de traitement des nuages de points étant largement détaillées au chapitre 5, et ce, indépendamment de leur origine.

### 4.2. Comparaison des techniques

Les deux techniques décrites précédemment peuvent être comparées sous différents aspects.

#### 4.2.1. Acquisition des données sur le terrain

*Matériel* : le matériel moyen utilisé pour des numérisations laser est plus cher que le matériel utilisé pour des chantiers photogrammétriques. Les moyens logistiques à déployer pour mettre en œuvre un scanner laser sont aussi plus conséquents (matériel parfois lourd, besoin d'une alimentation électrique). De plus, la prise de données étant assez longue avec un scanner laser (en comparaison de la quasi-instantanéité de la prise de vues), il est impératif de travailler sur un sol parfaitement stable. Les caméras qui fournissent la matière première aux chantiers photogrammétriques peuvent quant à elles être facilement utilisées *via* de multiples

dispositifs de prise de vues (mâts, perches, véhicules terrestres et aéroportés) pour faire face à toutes les configurations possibles du terrain.

*Eclairage et rendu* : l'éclairage est un point délicat pour la prise de vues, tandis que la numérisation laser peut théoriquement se passer de toute lumière.

*Matériaux* : la lasergrammétrie est opérationnelle sur la plupart des matériaux, tandis que la photogrammétrie (et particulièrement les méthodes automatiques) est inopérante sur les surfaces non texturées, brillantes, réfléchissantes et peu performante sur les édifices creux, comme la Tour Eiffel par exemple.

#### **4.2.2. Qualité des données**

*Couleur* : les images fournissent naturellement une information colorimétrique qui n'est pas toujours présente dans le cas des scanners laser ou alors qui est de moins bonne qualité.

*Fautes* : les données obtenues par lasergrammétrie ne comportent pas ou peu de fautes, au sens où tout ce qui est visible dans le champ de l'appareil est enregistré. Les méthodes photogrammétriques de corrélation dense, qui produisent des données de même nature que la lasergrammétrie, peuvent générer de faux reliefs (appariements erronés dus à des matériaux impropres ou à des motifs répétitifs).

*Précision* : la précision des scanners laser est relativement constante sur la portée de l'appareil ; elle dépend en photogrammétrie de la résolution spatiale des images et de la configuration stéréoscopique de la prise de vues (influence combinée du  $B/H$  et du nombre d'images où les points sont visibles).

#### **4.2.3. Traitement des données**

*Géoréférencement* : le calage des stations laser peut être quasi immédiat si les points de liaison et d'appui ont été saisis lors de l'acquisition sur le terrain. Pour les images, les traitements sont un peu plus longs (notamment du fait de l'étape de génération automatique des points de liaison).

*Production de modèles 3D* : quelles que soient les méthodes utilisées pour obtenir des modèles 3D (stéréorestitution manuelle ou traitement des nuages de points issus de lasergrammétrie ou de photogrammétrie automatique), on peut considérer que les temps de production sont relativement équivalents.

### 4.3. Exemple du relevé de la cathédrale d'Amiens

La cathédrale d'Amiens, chef-d'œuvre gothique édifié au XIII<sup>e</sup> siècle, est par sa taille, ses décors fractals, sa charge symbolique, un édifice particulièrement remarquable. Ses sculptures foisonnantes sont célèbres pour leur extrême finesse, particulièrement sur le portail du transept sud et sur la façade occidentale.

(Chastel, 2006) la décrit « comme une sorte d'écran géant de dentelle » ! Il évoque aussi « une sorte de buisson foisonnant de gâbles et de pinacles ». Elle est inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO et mérite à ce titre des relevés géométriques complets, fidèles aux formes et aux décors. Le laboratoire MIS de modélisation, information et systèmes, de l'Université Picardie Jules Verne a initié le projet *e-Cathédr@le*<sup>1</sup> dont les objectifs sont la numérisation de l'édifice dans sa totalité et la fourniture d'outils d'exploitation du modèle (Héno *et al.*, 2011).

#### 4.3.1. Méthodologie de relevé proposée : ossature par lasergrammétrie et complétement photogrammétrie

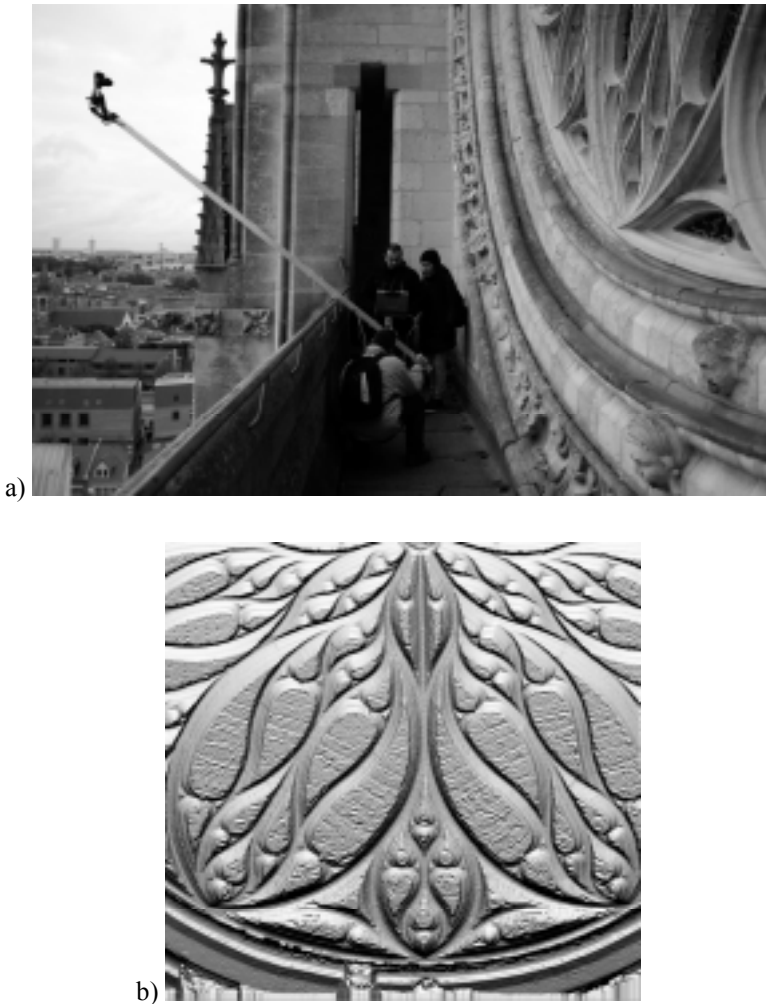
L'ossature du modèle 3D (intérieur et extérieur) est obtenue par lasergrammétrie grâce à des scanners laser terrestres paramétrés pour fournir des nuages de points relativement denses (de 5 mm pour les détails remarquables à 2 cm pour les murs relativement plans). Les zones que le scanner laser peut difficilement numériser (bas de la rose cachée du sol par une balustrade par exemple, toitures) sont traitées par photogrammétrie, de même que les zones particulièrement riches en détails ou en couleurs qui méritent une prise de vues photographiques à haute résolution (sculptures sur les portails, statues).

Ainsi, pour compléter les parties cachées de la rose, on monte dans les corniches accessibles, et l'on photographie de très près la façade, en fixant un appareil photographique muni d'un objectif à très courte focale sur une perche. Cette prise de vues par perche sera traitée par corrélation dense pour compléter les nuages de points acquis par lasergrammétrie (voir figure 4.1).

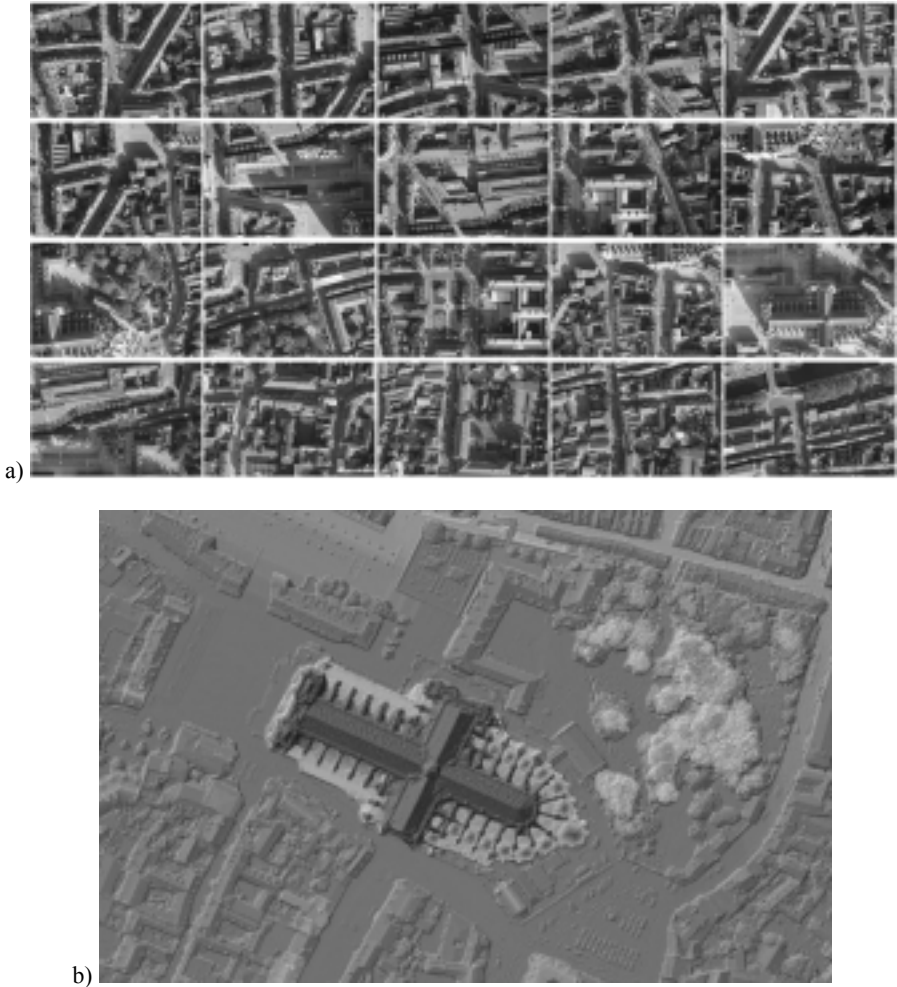
Les toitures de la cathédrale quant à elles sont photographiées à très haute résolution depuis un ULM ou un petit avion autorisé à voler à basse altitude. Les images stéréoscopiques très redondantes sont traitées par corrélation dense et

1. <https://mis.u-picardie.fr/E-Cathedrale>.

fournissent un nuage de points 3D (voir figure 4.2). Il faut cependant noter que la complexité de la forme des toits rend difficile l'acquisition d'images aussi bien résolues que les images acquises du sol, ce qui complique la fusion des différentes données.



**Figure 4.1.** a) *Prise de vue du bas de la rose ;*  
b) *image de relief ombré correspondante*



**Figure 4.2.** *Photogrammétrie sur les parties hautes de la cathédrale d'Amiens : a) vues aériennes, b) relief ombré sur la cathédrale et ses alentours*

### 4.3.2. Géoréférencement des données

L'enjeu d'une bonne exploitation de ces acquisitions de différentes natures repose dans un premier temps dans la capacité à mettre en cohérence les données. Différents moyens de positionnement sont déployés pour géoréférencer toutes les données dans un même système : rattachement par GNSS au référentiel national, densification par topométrie classique, appariement image ou laser sur les zones

communes. Ceci permet, par exemple, que le nuage de points calculé sur les images aériennes se juxtapose naturellement aux nuages obtenus du sol par lasergrammétrie. Sur un tel édifice, un repère local adapté à son architecture peut également être proposé (avec formule de passage entre les différents repères).

Malgré la colocalisation des différentes données (nuage de points 3D obtenus grâce aux images aériennes ou par lasergrammétrie), il ne faut pas sous-estimer les difficultés de fusion dues à d'inévitables écarts de géoréférencement et à des résolutions différentes. Ces questions seront abordées au chapitre 5.

### 4.3.3. Exhaustivité du relevé

La complexité de l'édifice rend impossible une numérisation laser exhaustive, que ce soit à l'extérieur ou à l'intérieur. Les meilleures volontés seront toujours vaincues par l'aspect fractal du décor qui révèle de nouveaux détails alors qu'on pense tout avoir enregistré. Cependant, si des besoins spécifiques d'exhaustivité sur une zone sont exprimés, c'est le complètement par photogrammétrie qui sera le plus simple à mettre en œuvre, le matériel étant plus portable. Une façon de procéder consiste à effectuer une prise de vues en raccord avec les données géoréférencées existantes (images ou laser). Le géoréférencement de ces images peut se calculer par survol dans les données existantes (création de nouveaux points d'appui communs aux deux jeux de données). Il est alors possible de traiter les nouvelles images.

## 4.4. Bibliographie

- ANDREWS D.P., BEDFORD J., BRYAN P.G., « A comparison of laser scanning and structure from motion as applied to the great barn at Harmondsworth, UK », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- CHASTEL A., *L'Art français. Pré-Moyen Age. Moyen Age*, Flammarion, Paris, 2006.
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., VOEGTLE T., RINGLE K., « Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings », *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 37, part. B5, Pékin, Chine, 2008.
- RASZTOVITS S., DORNINGER P., « Comparison of 3D reconstruction services and terrestrial laser scanning for cultural heritage documentation », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA symposium*, Strasbourg, France, 2013.

---

## Traitement des nuages de points

---

Les méthodes de levés par lasergrammétrie ou par photogrammétrie peuvent donc conduire à des représentations numériques des sites d'intérêt sous forme de nuages de points 3D détaillés, avec une certaine précision et exhaustivité. Si ce type de modèle offre assez directement des visualisations spectaculaires de l'édifice, ces nuages sont souvent difficiles à exploiter tels quels d'un point de vue opérationnel : ce sont des objets volumineux, non interprétés et dont il est parfois difficile d'extraire une information directement lisible. En pratique, il est assez rare que le cahier des charges de la numérisation s'arrête à cette étape, sauf si les traitements ultérieurs sont prévus en interne, en recourant à un autre prestataire ou si l'objet du projet est de disposer d'une archive numérique de l'édifice. Des opérations sont dans la plupart des cas nécessaires pour exploiter réellement la mine d'information qu'a permis d'obtenir l'acquisition.

### 5.1. Visualisation et organisation des nuages de points 3D

#### 5.1.1. Modes de visualisation des nuages de points

La visualisation des données acquises est une question centrale pour l'exploitation efficace et fidèle des nuages de points 3D. Une partie de l'évaluation de la qualité de ces données est souvent réalisée par visualisation directe dans un logiciel dédié, ce qui permet d'obtenir de nombreuses informations, notamment sur la complétude du levé et la présence d'erreurs ou de bruit dans la mesure. Si une évaluation quantitative de la numérisation et des traitements effectués reste bien entendu indispensable puisqu'elle garantit l'objectivité, ces éléments qualitatifs permettront souvent de détecter rapidement les éventuels défauts et de les corriger au plus tôt. Dans la pratique, le mode de rendu choisi devra permettre de lire le plus facilement possible les données et il est recommandé de recourir à plusieurs méthodes de visualisation pour utiliser celles qui seront les plus pertinentes selon l'objectif.

### 5.1.1.1. Visualisation sous forme d'image de profondeur

La géométrie d'acquisition des deux méthodes de levés, image et laser, offre une visualisation naturelle des nuages de points 3D sous forme d'image de profondeur (image raster 2D pour laquelle le compte numérique associé à chaque pixel représente une distance) :

- dans le cas de la corrélation dense d'image, la recherche des points 3D se fait depuis une grille en 2 dimensions calée, soit sur une image maîtresse, soit sur un plan lié à l'objet ;

- la géométrie sphérique d'acquisition du scanner laser permet une représentation quasi immédiate en 2D par une projection sphérique, la profondeur pouvant prendre comme valeur l'intensité du retour laser ou la distance  $\rho$  au centre du système instrument en coordonnées sphériques.



**Figure 5.1.** Exemples de visualisation de nuages de points 3D sous forme d'image raster en projections : a) orthocylindrique, b) sphérique

Ce mode de visualisation en 2D est bien adapté pour les résultats de corrélation : pour une image maîtresse seule, pour une unique station laser, ou lorsque l'objet ou la partie de l'objet considéré peut s'appréhender en deux dimensions, soit directement (cas d'une façade globalement plane), soit par une transformation géométrique simple (par exemple, cas d'une projection sphérique pour un dôme). La carte de profondeur est alors un mode de visualisation efficace, intuitif et compatible avec les écrans couramment utilisés dans les logiciels d'exploitation.

Si l'on recourt à un plan 2D de visualisation différent de celui naturellement offert par la géométrie d'acquisition, il est alors nécessaire de spécifier la grille régulière utilisée. Elle est déterminée par la position et l'orientation du plan dans l'espace la portant, ainsi que par la position dans ce plan de l'origine de la grille et par le pas de la grille. De plus, la nature de la profondeur à attribuer aux nœuds de la grille, distance ou parallaxe, ainsi que le mode de calcul des valeurs de profondeur en chaque nœud, doivent être précisés.

Plusieurs méthodes d'interpolation peuvent être utilisées : celles que l'on retrouve classiquement en traitement d'images (plus proche voisin, valeur moyenne ou médiane, etc.) ou en passant par un maillage du nuage de points.

Une fois connues les valeurs de cette image 2D, plusieurs types d'affichages peuvent être utilisés pour les représenter : niveaux de gris, teintes hypsométriques, estompage ou ombrage (voir figure 5.2).

Chaque méthode apporte un éclairage spécifique sur les données et peut faire apparaître des éléments d'intérêt (Bryan, 2013). Par exemple, la vue avec ombrage rend bien compte du niveau de bruit dans les données. Des combinaisons de plusieurs modes peuvent également être effectuées.

#### 5.1.1.2. Rendu 3D

Les logiciels d'exploitation des nuages de points utilisent des bibliothèques de rendus 3D, dont les deux principales sont OpenGL<sup>1</sup> et DirectX<sup>2</sup>, pour assurer la visualisation en 3D. L'utilisateur peut naviguer dans les données, zoomer et dézoomer, pivoter autour des objets.

Différents modes d'affichage sont généralement disponibles. C'est en combinant ces possibilités que l'utilisateur trouvera le meilleur moyen de consulter ses données et de les comprendre :

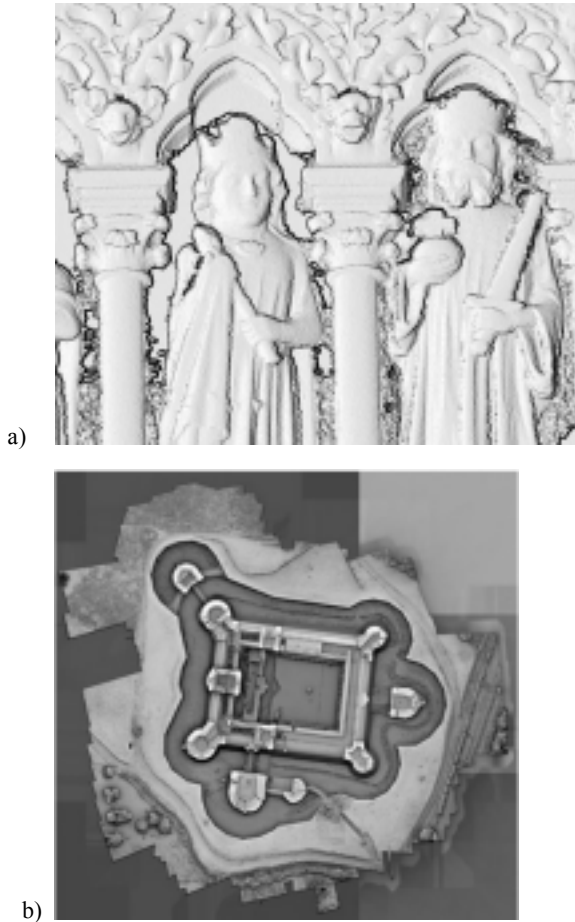
- coloriage des points selon les valeurs d'intensité, de couleur ou de distance, selon l'origine de la donnée (station laser ou image maîtresse) et, éventuellement, en appliquant des traitements visant à améliorer l'aspect et faciliter la lecture (ré-étalement, correction de gamma ou toute autre opération d'amélioration d'image) ;
- sous-échantillonnage des données à la volée pour alléger les manipulations ;
- modification de la taille des points ;

---

1. [www.opengl.org](http://www.opengl.org).

2. <http://msdn.microsoft.com/fr-fr/library/dd144146.aspx>.

- projection orthogonale ou centrale ;
- utilisation de rendus spécifiques ayant pour objectif de mettre en valeur certains aspects de l'objet.



**Figure 5.2.** Modes de visualisation de cartes de profondeur : a) avec ombrage, cathédrale d'Amiens – galerie des Rois, b) mixant ombrage et teintes hypsométriques (en noir et blanc ici), forteresse de Salses (Pierrot-Deseilligny, 2013)

Sur ce dernier point, il existe de nombreuses méthodes dans le domaine de l'infographie 3D dont certaines sont disponibles dans les logiciels de gestion de nuages de points. Elles sont toutefois plus généralement employées pour représenter les maillages (voir section 5.3.3) issus de ces nuages. Ces rendus 3D peuvent être

photoréalistes en cherchant à reproduire la réalité le plus fidèlement possible, ils comportent alors (Malgouyres, 2005) :

- une méthode d’illumination qui définit l’éclairage des objets en fonction des sources de lumière présentes et des interactions entre les objets, soit par calcul local (algorithmes de Gouraud, de Phong), soit par calcul global (méthode de la radiosité) ;

- une méthode de calcul de visibilité : la plus courante est la méthode du Z-buffer qui permet de gérer la profondeur et les parties cachées des scènes 3D en créant une carte superposable à la vue 2D et comportant, pour chaque pixel, la distance entre l’observateur et l’objet de la scène le plus proche.

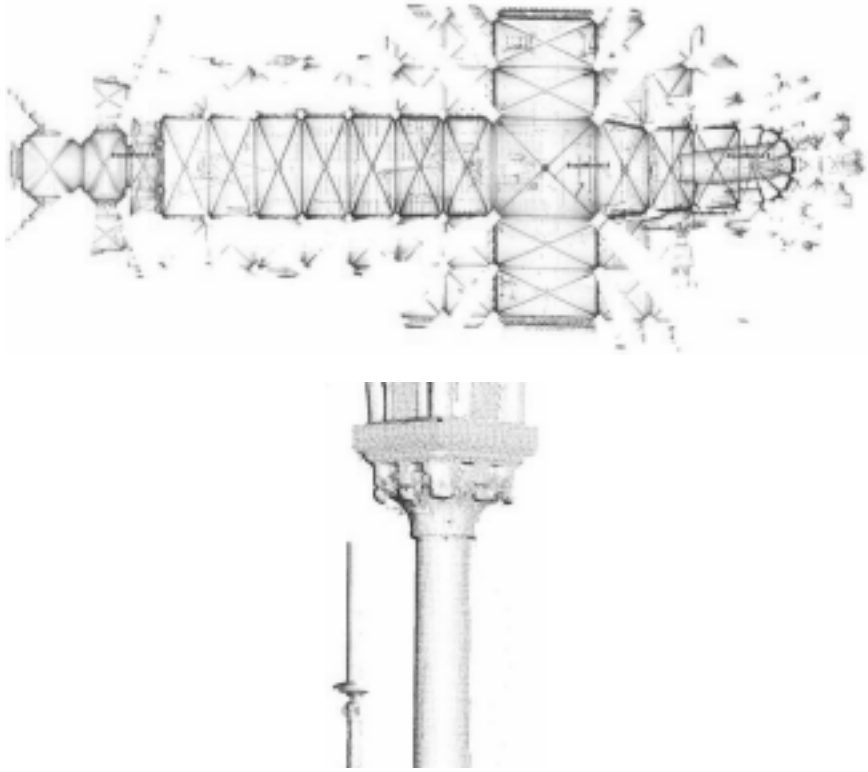
L’algorithme classique du lancer de rayon comprend ces deux aspects. Il consiste à simuler le parcours inverse de la lumière, en partant de l’observateur : les propriétés de réflexion et de diffusion des objets sont prises en compte, de même que les obstacles rencontrés par le rayon, ce qui revient à déterminer les parties cachées de la scène.

Certaines méthodes de rendus chercheront à reproduire le plus fidèlement possible les conditions d’éclairage de l’époque de construction de l’édifice (Happa *et al.*, 2009).

Les modes de rendus non-photoréalistes ont souvent un objectif artistique ou, plus spécifiquement dans notre cas, contribuent à faciliter la lecture de l’objet. On retiendra en particulier les méthodes qui accentuent les contours et la silhouette de l’édifice (voir figure 5.3). Elles utilisent la connaissance de la normale à la surface en chaque point. Cette dernière peut être calculée en estimant le plan tangent au nuage sur le voisinage du point, par moindres carrés, ou en faisant une analyse en composantes principales également sur le voisinage du point. (Dey *et al.*, 2005 ; Klasing *et al.*, 2009) proposent des comparaisons de méthodes existantes. Les variations peuvent porter sur différents aspects : optimisation du temps de calcul, insensibilité au bruit des nuages, etc. Afin de fluidifier la navigation et puisqu’elle est utilisée pour de nombreux traitements, la normale pourra être calculée une fois pour toutes et enregistrée au niveau de chaque point.

En pratique, toutes les méthodes ne permettent pas un calcul en temps réel et l’on pourra envisager de recourir à des images 2D statiques pour certaines analyses si le mode de rendu le plus approprié ne permet pas une visualisation dynamique (voir aussi la section 5.4).

Enfin, si le nuage brut est affiché tel quel dans le logiciel, des effets de bord peuvent apparaître lorsqu’on le visualise de près ou de loin. Des méthodes d’interpolation adaptées existent pour limiter ces artefacts (voir également sur ce sujet la section 5.2.3).



**Figure 5.3.** *Visualisation en mode silhouette – Cathédrale de Saint-Denis*

### **5.1.2. Organisation des nuages de points**

#### **5.1.2.1. Stratégies pour gérer les gros volumes de données 3D**

Sur de grands édifices, il est rare d'avoir besoin d'accéder à l'ensemble des données, de les visualiser ou de les traiter simultanément. Pour éviter d'avoir à gérer plus de données que nécessaire, une façon de faire pragmatique et assez naturelle, consiste à définir des sous-projets ou des couches correspondant à des entités cohérentes de l'édifice d'intérêt (par étage, selon l'intérieur et l'extérieur, par pièce, etc.). Ce travail peut être quelque peu fastidieux, car il requiert des sélections manuelles, mais il permet souvent de gagner du temps sur la suite des traitements à effectuer, puisque les performances de calcul et de navigation sont améliorées. Il y a tout intérêt à définir ces entités élémentaires en accord avec le commanditaire du projet qui connaît généralement parfaitement le monument et qui saura, le cas échéant, si un découpage de l'espace et une nomenclature existent et sont susceptibles de convenir pour l'organisation des données numérisées. Des formes

d'organisation peuvent avoir été définies à un échelon local ou national, avoir été mises en œuvre sur d'autres sites (Père *et al.*, 2010) et il peut donc être judicieux de s'en inspirer.

Dans les logiciels dédiés au traitement de données 3D, des partitionnements de l'espace, indépendants du contenu et de la signification des données, sont souvent utilisés pour gagner en efficacité. Le parcours des données est alors optimisé et permet ainsi d'accélérer nombre de traitements et de gérer simplement différents niveaux de détails. Plusieurs types de partitions sont classiquement utilisés dans les domaines de l'indexation spatiale, de la recherche de voisins, pour la détection de collision et plus généralement en infographie 3D :

- *partition selon une grille régulière découpée en un ensemble de voxels* (cubes, équivalents des pixels en 3D) de tailles identiques comme dans une image 2D : la simplicité de ce type de structure et la rapidité de son parcours sont à opposer à la subsistance de nombreuses cellules vides et à la problématique du choix du pas de la grille ;

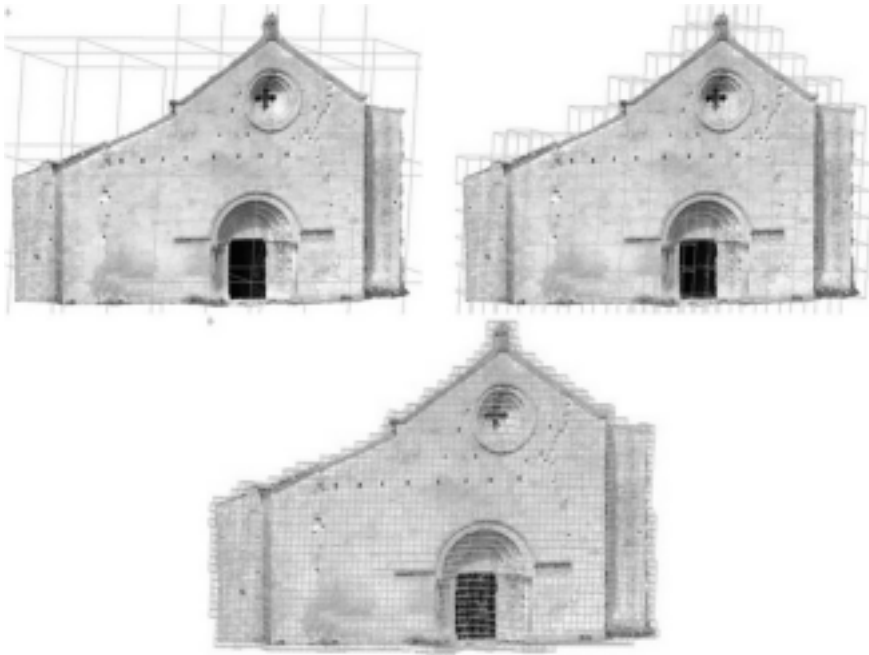
- *partition selon une grille hiérarchique ou adaptative* qui subdivise l'espace jusqu'à ce qu'aucune cellule ne contiennent plus de  $n$  éléments ou que le nombre maximal de niveaux prédéfinis soit atteint. Ce type d'organisation permet de s'adapter à l'irrégularité de la répartition des données dans l'espace et permet de faciliter le stockage et l'exploitation des données très volumineuses (Elseberg *et al.*, 2013). Les principales méthodes de constitution de grilles hiérarchiques sont :

- les *octrees* qui sont la généralisation des *quadrees* 2D à la troisième dimension (voir figure 5.4) : à partir d'un voxel englobant l'ensemble des données, l'espace est découpé récursivement et hiérarchiquement en 8 sous-cubes jusqu'à ce que les critères d'arrêt choisis soient atteints ;

- les partitionnements binaires de l'espace (BSP, *binary space partition*) qui posent uniquement comme principe que l'espace est successivement séparé par des plans quelconques. Les *kdtrees* en sont un cas particulier où les plans sont choisis parallèlement aux axes du système de coordonnées (Goswami *et al.*, 2013) ;

- *partition selon la méthode des boîtes englobantes, adaptée aux objets en mouvement.*

Quel que soit le mode de partitionnement choisi, la liste des données (points ou polygones) appartenant à chaque nœud de l'arbre (cellule d'un certain niveau) est stockée en vue de l'optimisation du parcours des données. La méthode la plus souvent implémentée dans les logiciels est celle des *octrees*. Beaucoup de traitements décrits dans ce chapitre utilisent ces structurations de l'espace.



**Figure 5.4.** *Structuration en octree : nuage de points et différents niveaux de la grille hiérarchique*

#### 5.1.2.2. Intérêt et méthode d'obtention du voisinage

Il est souvent nécessaire de connaître les voisins d'un point dans le nuage : pour estimer la normale, initier une segmentation, sous-échantillonner les données, etc.

Comme évoqués précédemment, les nuages de points sont parfois conservés dans leur géométrie d'acquisition, qui fournit directement une information de nature topologique. Les voisins dans une image sont les 4 ou 8 pixels entourant l'élément considéré : on parle de 4-connexité ou de 8-connexité. Le balayage d'un scanner laser se fait verticalement, si bien que l'on peut déduire le voisinage d'un point comme les points précédents et successifs selon la verticale et comme les points de même incrément sur les lignes adjacentes.

Mais, dans bien des cas, il est nécessaire de considérer le chantier dans son ensemble ou du moins selon un sous-ensemble correspondant à plusieurs géométries d'acquisition. Pour cela, les données sont transformées selon une liste de points (X, Y, Z), non structurée, dans laquelle la connaissance des relations entre points est perdue. Des techniques existent alors pour recréer des liens entre les éléments, notamment en recourant à la notion de voisinage (Demantké *et al.*, 2011). On peut

utiliser les partitionnements de l'espace décrits plus haut en considérant que les points appartenant à une même cellule sont voisins. Lorsque l'on dispose d'un maillage du nuage de points, il est également assez simple de calculer des voisinages en considérant comme voisins les points reliés par une ou plusieurs arêtes des facettes composant le maillage.

### 5.1.2.3. *Sélection de données 3D*

Dès lors que des opérations manuelles sur les données doivent être effectuées, des outils de sélection sont nécessaires. En pratique, on retrouve dans les logiciels de traitement de nuages de points, les fonctionnalités classiques de la CAO : sélection point par point, par rectangle, par polygone, etc. Si quelques logiciels permettent une visualisation en 3D par stéréoscopie, celle-ci n'est pas à notre connaissance, associée à de « vrais » outils de sélection en 3D. Souvent, la sélection s'effectue donc en 2D : l'ensemble des points se trouvant derrière la zone dessinée, au sens de la projection utilisée pour l'affichage, est retenu. Il faut alors procéder en plusieurs fois pour obtenir la sélection désirée et l'opérateur doit vérifier sous plusieurs angles la validité de sa sélection. En effet, la présence de parties cachées pourra masquer la présence de points non désirés. Certains logiciels permettent de définir des boîtes englobantes dont les limites sont déplacées et redessinées progressivement en tournant autour de l'objet.

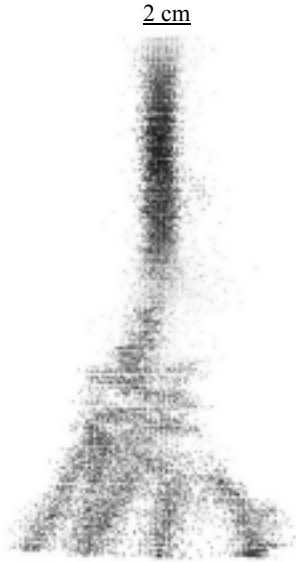
## 5.2. **Prétraitements des nuages de points**

### 5.2.1. *Débruitage et filtrage*

On a vu dans les sections 2.5.5 et 3.5 que les nuages de points peuvent être affectés des défauts suivants :

- bruit du nuage de points qui est très variable selon l'origine des données : inférieur au mm ou de l'ordre de quelques millimètres (figure 5.5) ;
- parasites ou points faux ;
- éléments à filtrer, car n'appartenant pas à l'objet d'intérêt : piétons, voitures, poussières, etc.

Peu de traitements automatiques existent pour ce dernier défaut et il conviendra souvent de reprendre les données à la main, afin de les supprimer par sélection. Cette étape est d'autant plus longue que l'acquisition a peu pris en compte les zones spécifiées par le commanditaire. Là encore, si le temps disponible sur site le permet, les opérateurs en charge du levé peuvent avoir intérêt à prendre en considération ces traitements ultérieurs en ne numérisant que ce qui entre dans le cahier des charges et en organisant en amont les données. Ces efforts permettront de limiter la charge de travail au bureau.



**Figure 5.5.** Illustration d'un bruit important sur une cible vue de profil :  
l'écart type du nuage de points au niveau de la cible est de 8 mm

Pour diminuer le bruit présent dans les nuages de points, il existe des algorithmes de lissage des données. Deux grandes familles de méthodes peuvent être distinguées :

- les méthodes qui utilisent les algorithmes classiques de débruitage d'images 2D et qui les adaptent aux images de profondeur : par exemple (Smigiel, 2011) applique des méthodes par ondelettes et des moyennes non locales à de petits objets ; dans (Smigiel, 2013), la technique de l'acquisition comprimée qui consiste à simplifier le nuage dès l'enregistrement des données est reprise ;

- les méthodes travaillant en 3D sur le nuage de points : il peut s'agir de filtres comme (Digne, 2012) qui effectue le débruitage sur des descripteurs calculés en chaque point ou de l'estimation par moindres carrés de la meilleure surface lissée qui correspond au nuage de points, méthode des *moving least square* introduite par (Levin, 1998) et largement reprise et enrichie par la suite (Deschaud *et al.* 2010).

Les points faux et parasites peuvent être filtrés en étudiant la distribution de leur voisinage dans l'espace et en seuillant sur la distance moyenne du point à ses voisins comme cela est fait dans la bibliothèque PCL<sup>3</sup>.

---

3. *Point cloud library* : [www.pointclouds.org](http://www.pointclouds.org).

Selon le cas, ces traitements peuvent être appliqués dès l'acquisition ou, plus tard, au cours de la chaîne de traitement. La difficulté est bien entendu de réduire le bruit sans perdre l'information présente dans le jeu de données. Des algorithmes existent par ailleurs qui fonctionnent directement sur les données maillées.

### 5.2.2. Fusion des données

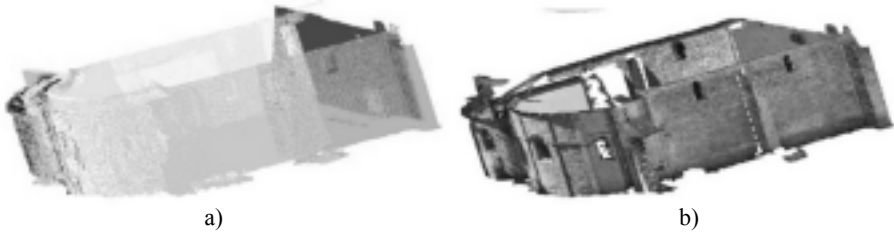
Les numérisations 3D réalisées par scanner laser ou à partir d'images conduisent à l'obtention d'ensembles de données qui, assemblées, fournissent une représentation *a priori* continue et complète de l'objet d'étude. Nous avons vu précédemment que les positions et orientations calculées lors des étapes de calage ou de mise en place, ont une certaine précision qui dépend des moyens mis en œuvre pour la réalisation des étapes de géoréférencement et de leur contrôle. De plus, pour assurer la continuité de la représentation, des marges ont été prises lors de l'acquisition entre les différentes stations de prise de mesures. En conséquence, la représentation globale de l'objet souffre parfois de défauts :

- densité irrégulière des nuages de points du fait des zones de recouvrement entre différents jeux de données : ce type de défaut pourra être corrigé par des méthodes de rééchantillonnage uniforme des nuages de points ;
- écarts entre les données d'origines différentes : l'utilisation de points de liaison entre entités ou l'optimisation de la distance entre nuages de points, par la méthode ICP par exemple, peut permettre de diminuer ces effets directement lors de la phase de mise en place.

Les problèmes rencontrés peuvent s'avérer plus importants si différentes technologies d'acquisition (laser *versus* image) ont été utilisées et si, au sein d'une même technique, différents matériels ont été employés. Le paramétrage à l'acquisition ne permettant pas, de toute façon, de compenser la totalité des écarts, la question de la fusion se posera dans tous les cas.

Selon l'exploitation que l'on souhaite faire de la numérisation et selon le cahier des charges du projet, il sera éventuellement nécessaire de corriger ces phénomènes. (Curless *et al.*, 1996) rappelle que les attentes vis-à-vis d'un algorithme de fusion de données sont nombreuses : prise en compte des imprécisions relatives des données en entrée (exploitation du coefficient de corrélation, angle d'incidence, variation de profondeur avec les voisins, etc.), utilisation de la redondance d'information pour améliorer le jeu de données (par exemple, en diminuant le bruit), indépendance de l'ordre d'intégration des données, capacité d'ajouter de nouvelles données, comptabilité des temps de calcul avec les moyens informatiques à disposition, robustesse aux erreurs, reproductibilité sur tout type d'objet, capacité à compléter les zones sans information.

Le problème de fusion de données 3D est un problème ancien et qui a été largement traité pour des objets individuels (statues, mobiliers) ou pour des sous-ensembles cohérents (portails, piliers, tours). Une distinction entre les algorithmes se fait quant à la prise en compte ou non de la topologie des nuages de points 3D. Par ailleurs, il existe deux stratégies de calculs : les méthodes volumiques qui travaillent en 3D (figure 5.6) et les méthodes surfaciques en 2D.



**Figure 5.6.** Fusion de nuage de points : a) nuage de points assemblés, b) fusionnés avec texture (Gardon, 2009)

Pour de plus grands ensembles de données, par exemple si l'on considère les nuages de points qui correspondent aux grandes structures d'un édifice, on pourra répondre à cette problématique en gérant les écarts entre nuages au moment du géoréférencement et en traitant les surdensités sur les zones de recouvrement par un échantillonnage spatial régulier (voir section 5.2.3). Ce dernier traitement est de toute façon potentiellement exigé par les variations de résolution dues aux méthodes d'acquisition.

### 5.2.3. Sous-échantillonnage, rééchantillonnage et compression des nuages de points

Les motivations qui peuvent conduire à retravailler les nuages de points 3D bruts sont assez nombreuses : irrégularité de la densité des nuages sur l'objet du fait des caractéristiques géométriques d'acquisition, inadéquation de la densité aux formes de l'objet (un plan quasi parfait, fermé, pouvant être défini seulement par ses quatre coins) et enfin, nécessité de disposer de données allégées pour certaines opérations (pour visualiser l'ensemble de l'édifice, effectuer des calculs intermédiaires ne nécessitant pas d'afficher toutes les données). On distingue les différents types d'opérations qui permettent de répondre à ces besoins selon la terminologie suivante :

- un sous-échantillonnage correspond à l'extraction d'un sous-ensemble de points du nuage initial, les points conservés ne sont pas modifiés ;

- un rééchantillonnage consiste en la création d'un nuage de nouveaux points 3D calculés depuis les points initiaux ;
- une compression correspond à la recherche d'une écriture informatique permettant de diminuer le volume de données, avec ou sans perte d'information.

Dans le cas d'un édifice remarquable, où les volumes de données sont très importants, ces phases peuvent devenir cruciales pour permettre une gestion souple des données.

Si le maintien des éléments structurant la forme de l'objet d'étude (arêtes, sommets) n'est pas une priorité, un sous-échantillonnage très simple consistera à conserver un point tous les  $n$  points. Pour des données issues d'un scanner laser, l'acquisition se fait généralement selon la verticale et une façon de faire consiste à garder 1 point tous les  $n$  points dans une ligne et une ligne sur  $n$ . Pour une image de profondeur, les algorithmes de sous-échantillonnage classiques de traitement d'images pourront être réutilisés. Une autre façon de faire consiste à sous-échantillonner le nuage de points en conservant un nombre de points prédéfini par l'utilisateur de façon aléatoire. Les limites de ces méthodes simplistes comme la non-prise en compte des variations de la complexité de l'objet et la nécessité de travailler sur un nuage de points ordonnés, font qu'elles ne sont, en pratique, utilisées que pour les besoins de visualisation expédiée.

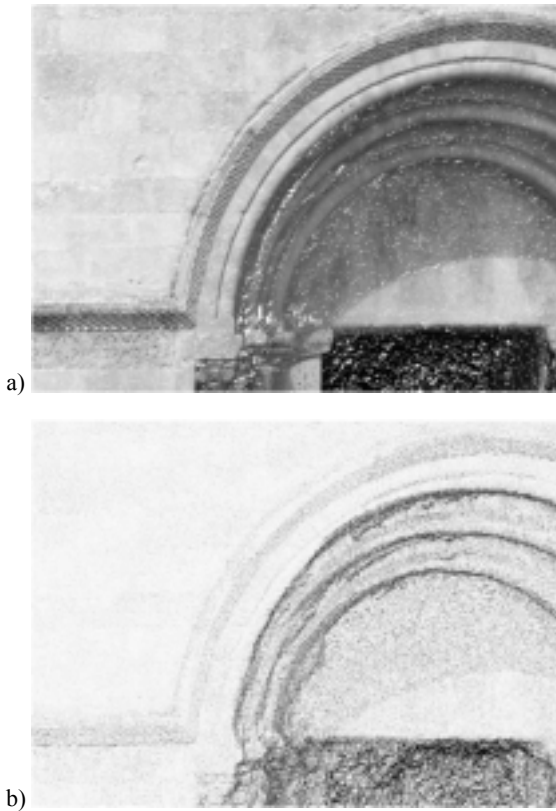
Pour prendre en compte l'organisation spatiale des points composant le nuage, on peut recourir à la structuration en *octree* (voir section 5.1.2) qui permet de fournir différents niveaux de sous-échantillonnage des données selon la profondeur de l'arbre. Le nuage sous-échantillonné est alors composé pour chaque feuille de l'arbre, du point le plus proche de son centre.

Un rééchantillonnage possible consiste à conserver le centre de la feuille ou le centre de gravité des points présents à l'intérieur de la cellule (figure 5.7).

D'autres méthodes d'échantillonnages utilisent la conservation des distances entre points et permettent ainsi de disposer d'une répartition uniforme des points dans l'espace (Puttonen, 2013).

Des développements restent à faire en ce qui concerne l'adaptation de la densité à la complexité de l'objet, fonctionnalité qui n'est pas, à notre connaissance, disponible dans les logiciels actuels.

La stratégie de codage informatique des données complètera éventuellement la compression des données pour obtenir un volume de données compatible avec les contraintes de stockage et de diffusion qui peuvent exister. Les formats les plus courants sont présentés dans le chapitre 6, section 6.2.3.



**Figure 5.7.** Rééchantillonnage d'un nuage de point : a) nuage initial, b) nuage rééchantillonné par la méthode de l'octree au niveau 10

#### 5.2.4. Segmentation

La segmentation d'un nuage de points 3D consiste en la réalisation d'une partition en sous-ensembles de points cohérents. Le critère de cohérence peut être géométrique (regroupement selon des formes simples : plans) ou sémantique (séparation en entités structurellement indépendantes, par exemple : salles, statues, mobilier). La phase de segmentation est généralement une étape préalable à la reconstruction : en isolant les objets à traiter des éléments extérieurs qui pourraient être perturbateurs, elle facilite les traitements automatiques ainsi que la manipulation et la saisie sur nuage de points.

La segmentation est un sujet largement étudié en traitement d'images (Maître, 2008) et les développements proposés pour les nuages de points 3D sont bien souvent des adaptations prenant en compte les informations tridimensionnelles

disponibles. Ainsi, peut-on également distinguer les méthodes à base de contours (pour lesquelles la segmentation se fait à l'intérieur de formes bordées par des arrêtes détectées automatiquement), de celles à base de régions (qui cherchent à définir des régions homogènes) ou de combinaisons des deux.

Les méthodes « basées région » sont les plus courantes et adaptées au cas des nuages de points 3D. On peut évoquer les approches ascendantes que sont les méthodes par croissance de région, *region growing* : d'une surface d'origine calculée depuis un point amorce, l'appartenance des points restants à l'objet ainsi défini est examinée selon un critère donné. Ce critère comprend généralement plusieurs aspects parmi les suivants : coplanéité, variation de la normale, proximité, couleur, intensité. Les différences entre les algorithmes proposés (par exemple (Vosselman *et al.*, 2004 ; Rabbani *et al.*, 2006)) portent sur la façon de calculer les surfaces d'origine et sur les critères de croissance qui constituent des points sensibles et conditionnent grandement la qualité des résultats.

La méthode de division et fusion, *split and merge*, approche descendante, a également été adaptée au cas des nuages de points : (Wang *et al.*, 2004) utilise une partition itérative selon l'*octree*, la division s'arrêtant lorsque les points 3D au sein d'une feuille de l'arbre vérifient un critère donné et faisant ensuite place à une étape de regroupement des ensembles obtenus.

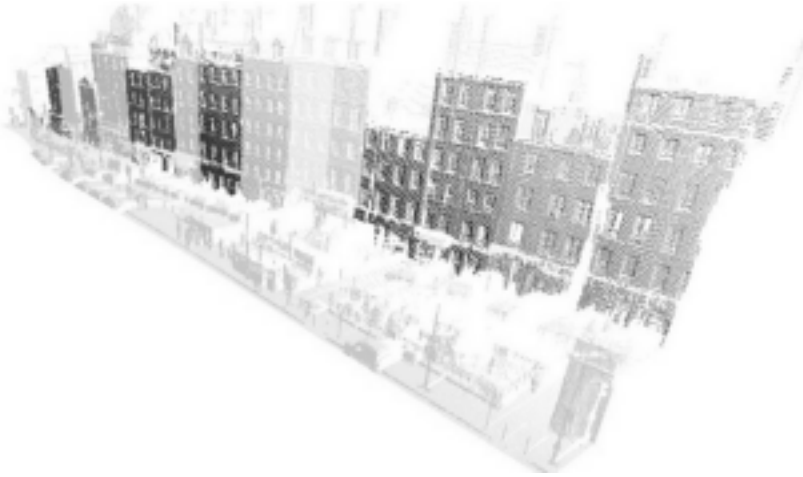
Ces méthodes itératives ont l'avantage d'être assez rapides et de pouvoir traiter de grands volumes de données.

Certains algorithmes reposent sur une analyse des caractéristiques des points, dans un esprit de partitionnement de données. (Barnea *et al.*, 2013) propose ainsi une méthode qui effectue une segmentation par *mean shift* (Cheng, 1995) en prenant comme canaux la radiométrie, la profondeur et la normale à la surface, combinées par un vote majoritaire.

Une autre grande famille d'algorithmes de segmentation est composée de méthodes dites directes, qui cherchent le plus souvent à extraire des plans depuis les données. Il s'agit fréquemment de généralisations en 3D de la transformée de Hough en passant donc dans un espace paramétrique adapté (Borrmann *et al.*, 2011) ou d'algorithmes de type RANSAC (Fischler *et al.*, 1981) qui permettent de mieux prendre en compte les données aberrantes (Boulaassal *et al.*, 2007).

L'état de l'art dans le domaine de l'acquisition terrestre porte principalement sur l'exploitation des levés par scanners laser mobiles : en effet, ces systèmes ont pour objectif la reconstruction des canyons de rue en complément des informations obtenues depuis les images aériennes. Le besoin en automatisation est fort afin de fournir, dans des temps de production raisonnables, des modèles géométriques sur de vastes études. Dans ce cadre, les entités à isoler sont généralement assez simples,

principalement des plans : façades (figure 5.8), toits et éventuellement éléments composant les bâtiments tels que les portes, fenêtres, balcons. Parfois, ce sont les éléments pouvant perturber la reconstruction (piétons, véhicules, mobilier urbain) qui sont recherchés (Hernández *et al.*, 2009).



**Figure 5.8.** *Segmentation d'un nuage de points issu d'un scanner laser mobile (Hammoudi, 2011)*

En pratique, on trouve moins d'exemples d'algorithmes de segmentations adaptés aux édifices plus complexes qui font l'objet de ce livre et qui permettraient d'isoler des objets plus évolués que les simples formes géométriques évoquées précédemment. (Deveau *et al.*, 2005) propose une méthode en deux temps utilisant conjointement des données laser et une image externe sur une église : un algorithme de segmentation hiérarchique est appliqué à l'image puis les informations géométriques sont introduites dans la fonction d'énergie qui décrit la façon dont les segments de la première étape sont fusionnés. (Zhan *et al.*, 2009) applique la méthode de croissance de région sur un critère combinant voisinage et couleur au cas d'une maison traditionnelle chinoise. Ces techniques ont comme point commun de combiner des informations géométriques et radiométriques pour optimiser la réponse au problème posé (Aitelkadi *et al.*, 2013). Des connaissances *a priori* sur l'objet à isoler peuvent être également bénéfiques : existence d'une direction privilégiée (verticale pour le cas d'un bâtiment), symétrie, répétition.

Les résultats des segmentations automatiques sont évalués en quantifiant le nombre de sur-segmentation (découpage trop important) ou de sous-segmentation (regroupements d'objets de différentes natures). Enfin, une étape complémentaire d'attribution sémantique peut être nécessaire pour donner un sens aux ensembles extraits.

### 5.3. Du nuage de points au modèle 3D géométrique

Cette partie a pour objectif d'expliquer comment il est possible de passer d'une modélisation sous forme de nuages de points 3D à un modèle 3D géométrique permettant de représenter de façon continue le site d'intérêt dans l'espace. Pour être complet, le modèle devra également comporter des informations sémantiques sur leur nature et les relations qui les lient. Ces aspects seront traités dans le chapitre 6.

#### 5.3.1. Types de modèles 3D

Il existe différents types de modélisations 3D plus ou moins adaptées au cas des édifices remarquables :

- modélisation par des volumes : assemblage de volumes élémentaires (cubes, sphères, cylindres, etc.) selon des opérations ensemblistes (union, intersection, différence, etc.) ;
- modélisation par des limites ou rendu filaire : représentation de l'objet par des ensembles de lignes ou de surfaces. Il peut s'agir de simples segments ou d'objets géométriques plus complexes tels que les NURBS, généralisation des B-splines ;
- autres modélisations un peu moins usitées en tant que produit final : ensemble de *surfels*, de voxels, etc.

En pratique, pour les édifices complexes, si l'on cherche à représenter l'objet « tel qu'il est » avec un minimum de simplification, on se tourne souvent vers les modélisations à base de segments et de surfaces. Il peut alors s'agir d'un maillage composé de cellules (souvent des triangles) reliées entre elles par leurs sommets (souvent les points du nuage). De nombreux algorithmes automatiques de triangulation existent et permettent d'obtenir directement ce type de modèle 3D depuis les nuages de points (voir section 5.3.3). L'intérêt est qu'il est possible de représenter assez fidèlement l'objet d'origine en restant proche des points levés. L'inconvénient est que le modèle ainsi obtenu peut être assez lourd puisqu'il va multiplier les données à conserver. Dans ce cas, disposer en entrée d'un nuage de points d'une densité adaptée à l'objet est souvent primordial. En outre, les algorithmes automatiques commettent des erreurs qu'il peut être nécessaire de corriger manuellement, ce qui peut s'avérer assez fastidieux.

Une autre façon de modéliser avec des segments consiste, comme cela a été présenté dans le chapitre 2, section 2.6, à représenter l'objet par des polygones correspondant aux éléments caractéristiques de l'objet : bords, arêtes, limites de matériaux, etc. Quelques algorithmes d'extraction automatique existent pour les bâtiments simples (voir section 5.3.4), mais ils sont souvent insuffisants dans le cas des édifices complexes. En conséquence, il est généralement nécessaire de prévoir une phase de saisie manuelle sur le nuage de points (voir section 5.3.2).

Par ailleurs, des travaux existent sur la constitution de bibliothèques de modèles 3D architecturaux adaptés au cas des édifices plus complexes et qui peuvent être élaborés *via* une analyse des règles et modèles de construction en lien avec le type d'architecture (Dekeyser *et al.*, 2003 ; De Luca *et al.*, 2007 ; Chevrier *et al.*, 2009).

Enfin, il ne faut pas mettre de côté définitivement les modélisations par des volumes qui peuvent être une réponse adaptée au cas où l'objectif est, par exemple, la communication au grand public.

### **5.3.2. Saisie sur nuage de points 3D**

Comme évoquée dans la partie précédente et malgré les recherches en cours depuis plusieurs années, la modélisation en 3D d'un édifice complexe passe aujourd'hui le plus souvent par de la saisie manuelle. Cette phase est extrêmement chronophage : par exemple (Sternberg *et al.*, 2004) estime que trois quarts du temps global d'un projet sont consacrés à la saisie, de l'acquisition à la livraison, pour un site architectural d'intérêt. Elle nécessite des capacités d'abstraction lorsqu'il est par exemple nécessaire de dessiner des objets non réguliers (statues, corniches) ou des objets courbes (voûtes, colonnes) avec des outils linéaires. L'emploi de formes géométriques régulières, éventuellement prédéfinies et la faiblesse des catalogues généralement mis à disposition, ont tendance à induire des approximations qui ne sont pas toujours judicieuses.

#### **5.3.2.1. *Que saisir et comment ?***

Cette question est simplement rappelée ici puisqu'elle conditionne fondamentalement le travail de saisie à effectuer. En tout état de cause, elle a dû être traitée lors de l'élaboration du cahier des charges et prise en compte dans le paramétrage de l'acquisition afin qu'il soit, à ce stade, possible d'identifier et de relever les éléments exigés.

Là encore, selon le cahier des charges, des produits 2D ou 3D peuvent être demandés, impactant directement la nature des méthodes à mettre en œuvre. Comme cela a été évoqué auparavant, les modes de rendu et la segmentation permettront de faciliter la saisie et d'éviter les erreurs en présentant à l'opérateur les données nécessaires avec une visualisation adaptée. Les opérations de saisie se font souvent dans des logiciels de CAO comportant un module spécifique de gestion des gros volumes de données pour que la navigation dans les nuages de points soit possible et ergonomique. Les formes géométriques utilisées pour ces saisies peuvent être des formes classiques (polyligne, arc, spline) ou, comme évoqué précédemment, des modèles paramétriques spécifiquement conçus.

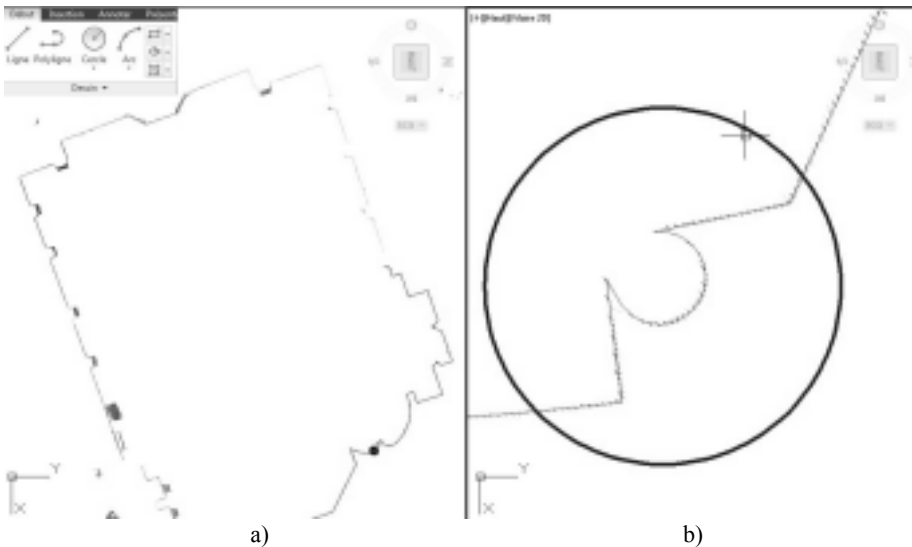
La question peut également se poser de l'opportunité de compléter les modèles saisis là où l'information manque. Si (Chevrier *et al.*, 2009) indique que ce travail de

complètement peut être réalisé par des experts, il faut être conscient que l'on sort de l'objectivité offerte par les techniques ici décrites. Il peut alors être judicieux de sauvegarder dans un attribut l'origine de la donnée saisie.

### 5.3.2.2. Saisie en 2D

Parfois, la commande passée porte sur des représentations 2D du site (voir section 5.4) ce qui peut paraître un peu dommage au regard de la mine d'informations apportées par la 3D. Cela traduit certainement le manque actuel en outils d'exploitation et d'interprétation 3D de ces données. De plus, comme on le verra dans le paragraphe suivant, les moyens à mettre en œuvre pour obtenir des données réellement 3D sont significativement plus lourds et coûteux.

La saisie en 2D commence par la définition du plan du relevé et consiste ensuite, assez simplement, à tracer sur ce plan, les éléments d'intérêt à partir d'une tranche du nuage de points (voir figure 5.9). Des fonctions d'accrochage peuvent être utilisées pour s'assurer que les lignes dessinées sont au plus proches des données d'entrée.



**Figure 5.9.** Saisie 2D sur nuage de points :  
 a) vue d'ensemble de la coupe du nuage dans un plan, b) zoom sur une saisie

### 5.3.2.3. Saisie en 3D

Une première possibilité pour obtenir une saisie en 3D consiste à associer plusieurs saisies 2D telles que présentées dans le paragraphe précédent en faisant

varier le plan de référence. Pour obtenir une surface continue, il convient alors de relier les éléments linéaires par des outils appropriés : par exemple, extrusion, découpage. Cette méthode a l'avantage d'être assez simple à mettre en œuvre, mais elle implique tout de même des approximations relativement importantes dans la saisie dues aux écarts potentiels des points par rapport au plan.

Pour travailler réellement en 3D, une façon de faire consiste à utiliser les options d'accrochage souvent disponibles dans les outils, qui permettent, à partir d'une interrogation en 2D dans l'écran, de rechercher dans le sens de la profondeur le point le plus proche. Une difficulté est que l'on ne visualise pas forcément si le point accroché est pertinent et correct. En effet, en bord d'objet par exemple, il se peut que le point retenu soit un point en arrière de l'objet sans que l'on s'en rende compte. Pour éviter cela, il faut multiplier les points de vue en tournant autour de l'objet, ce qui peut être quelque peu fastidieux, ou prérégler dans l'interface plusieurs points de vue simultanément pour vérifier que les éléments saisis sont corrects.

Enfin, des techniques intermédiaires existent qui montrent que selon les outils à disposition et en fonction de la saisie à effectuer, il peut être pertinent de définir une méthode de travail spécifique qui soit la plus ergonomique et la plus efficace possible (Balletti *et al.*, 2013). En particulier, la saisie 3D à base de formes paramétriques, qui consiste à plaquer des objets choisis dans la bibliothèque sur les nuages de points 3D ((Murphy *et al.*, 2013) et le HBIM (*Historic Building Information Modeling*) peut être une méthodologie pertinente.

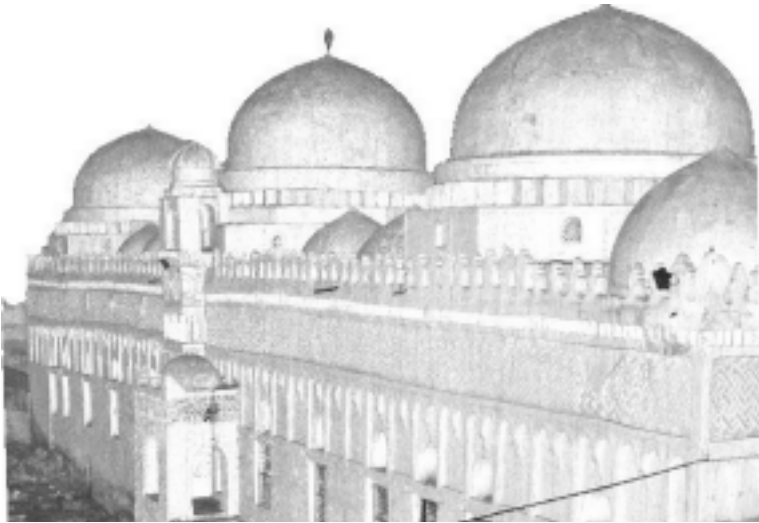
Dans tous les cas, l'ordinateur utilisé pour cette production doit avoir des performances, notamment au niveau de la carte graphique, en accord avec les manipulations à réaliser ; il s'agit donc généralement de matériel technique dédié. Une solution probablement plus efficace consisterait en un outil permettant de saisir en 3D avec une visualisation stéréoscopique des nuages de points.

### **5.3.3. Maillage surfacique**

Le maillage correspond à une discrétisation de l'espace sous la forme d'un ensemble de facettes, souvent des triangles (on parle alors de triangulation, voire de tétraédrisation) ou des polygones tels que deux cellules élémentaires sont, soit disjointes, soit ont une arête en commun. Ce type de modèle permet de représenter l'objet d'intérêt sans interruption, sans connaissance *a priori* et avec peu de risque d'interprétation de sa forme et de son aspect. Il est particulièrement bien adapté au traitement des nuages de points puisque les sommets des facettes peuvent être, si on le souhaite, directement pris parmi les points du nuage, ce qui permet de conserver le lien avec la mesure d'origine. Le calcul de maillage et la reconstruction de surface à partir de points sont des sujets de fort intérêt dans le domaine de la géométrie

algorithmique. Par conséquent, les références que l'on trouvera ici seront plutôt issues de ce domaine et les objets traités très variés. Des outils et bibliothèques libres proposent ce type de service<sup>4,5</sup>.

Différentes triangulations en 2D existent et la plus connue est certainement la triangulation de Delaunay (Delaunay, 1934). Elle vérifie la propriété suivante : « aucun point n'est situé à l'intérieur du cercle circonscrit d'un des triangles obtenus ». Là encore, les images de profondeur issues des acquisitions font qu'un algorithme visant à obtenir une triangulation de Delaunay peut être appliqué directement sur les nuages de points si on les considère selon leur projection en 2D (voir figure 5.10). Dans ce cas, un inconvénient assez important est qu'il faut travailler station par station ou image par image et que les raccords ne sont pas gérés. De plus, des filtrages sont nécessaires, car tous les points n'ont pas vocation à être reliés : les triangles ayant un côté anormalement long et ceux dont les sommets relient des points de profondeurs très différentes peuvent être éliminés simplement par une valeur de seuil.



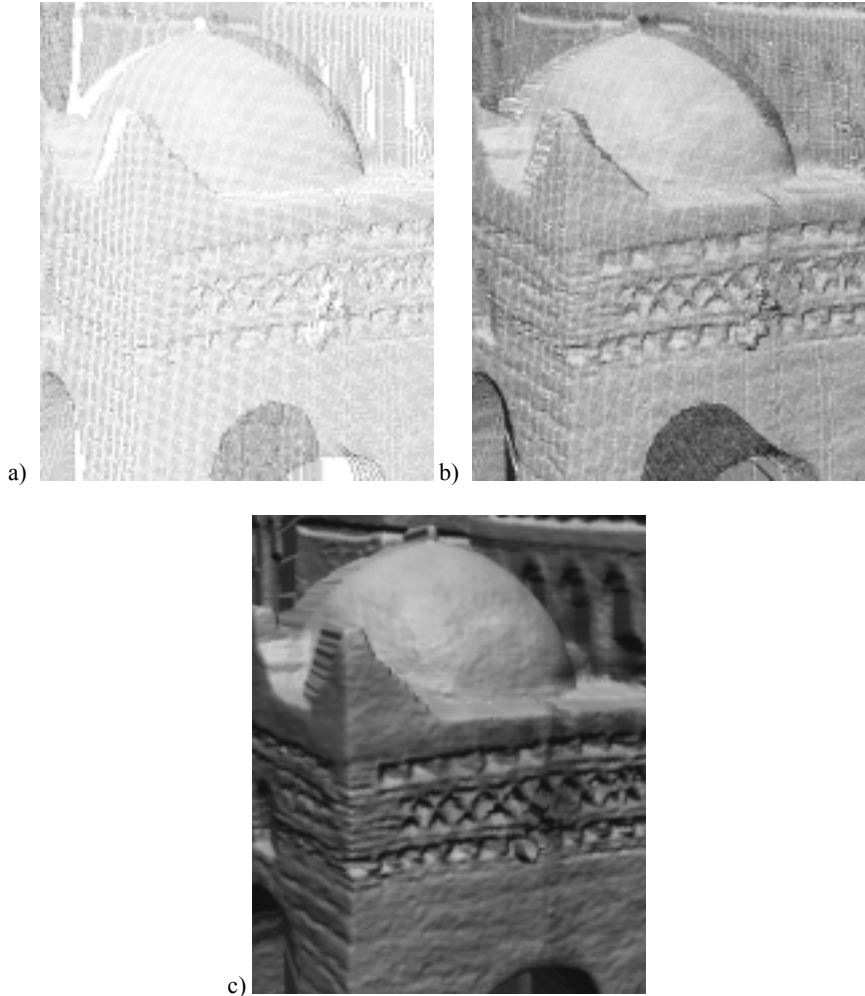
**Figure 5.10.** Maillage obtenu par triangulation de Delaunay 2D sur données laser

Les méthodes véritablement 3D permettent de considérer toutes les données acquises simultanément. La stratégie à adopter peut différer selon les connaissances disponibles sur le nuage de points (normales, voisinage, organisation des données selon une matrice régulière).

4. CGAL (*Computational Geometry Algorithms Library*) : [www.cgal.org](http://www.cgal.org).

5. PCL (*Point Cloud Library*) : [www.pointclouds.org](http://www.pointclouds.org).

Dans le domaine des approches explicites, c'est-à-dire qui construisent directement des triangles à partir des points, on peut citer, sans être exhaustif, quelques algorithmes classiques, comme les adaptations de la triangulation de Delaunay en 3D (Liu *et al.*, 2005), les méthodes de *Power Crust* (Amenta *et al.*, 2001), d'*Alpha Shape* (Edelsbrunner *et al.*, 1994) et de *Ball Pivoting* (Bernardini *et al.* 1999).



**Figure 5.11.** Zoom de la figure 5.10 : a) nuage de points, b) maillage filaire, c) maillage ombré

Si les données sont bruitées ou comportent des fautes, et ce, malgré les prétraitements qui ont pu être faits, il sera préférable de recourir à des méthodes implicites

qui approximent la surface à reconstruire. Ces algorithmes fonctionnent généralement en deux temps : tout d'abord, la surface est approchée par une fonction puis le maillage est généré. Dans cette famille, on retrouve les approches qui se basent sur les méthodes de *marching cubes* (Lorensen *et al.*, 1987), de *moving least-squares* (Levin, 1998), de *radial basis function* (Carr *et al.*, 2001) ou la reconstruction de Poisson (Kazhdan *et al.*, 2006).

Une alternative aux maillages surfaciques proposée par (Pfister *et al.*, 2000) exploite le principe des *surfels* (*surface elements*, le terme *points splat* est aussi utilisé) : il s'agit d'associer à chaque point un disque perpendiculaire localement au nuage et d'un rayon tel que les disques se recouvrent pour former une surface continue.

Les attentes vis-à-vis de ces reconstructions portent sur leur robustesse (présence de triangles faux) et sur leur capacité à traiter des cas de figure très variés (différentes densités, différents objets), à boucher ou pas les trous (Fabris *et al.*, 2007), à prendre en compte des contraintes géométriques (lignes caractéristiques de l'édifice). En pratique, il est rare qu'on puisse parvenir à une triangulation parfaite, et ce, quel que soit l'algorithme choisi. En conséquence, il sera bien souvent nécessaire de procéder à des corrections manuelles pour obtenir un modèle géométrique 3D propre.

Pour disposer d'informations plus complètes, il est conseillé de se référer aux ouvrages du domaine de la géométrie algorithmique, par exemple (Botsch *et al.*, 2010).

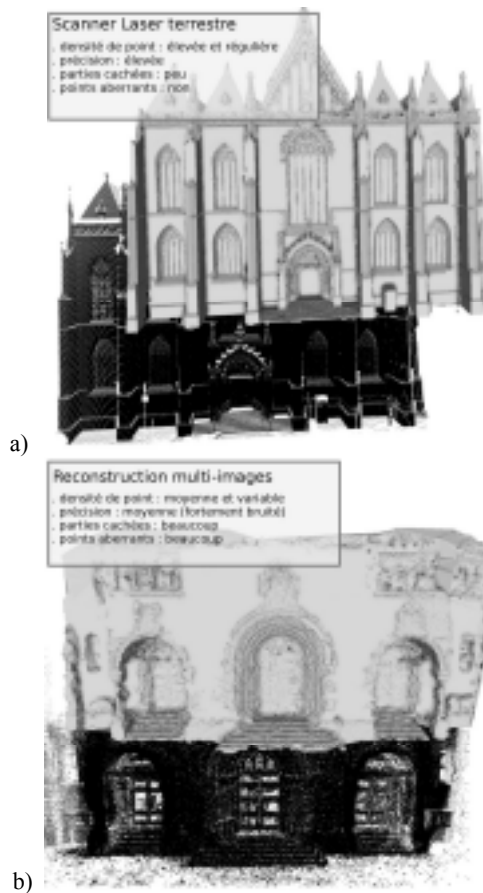
### 5.3.4. Reconstruction automatique

Au-delà du calcul automatique de maillage, de nombreux travaux de recherche ont été menés, en particulier depuis l'arrivée des scanners laser, pour reconstruire automatiquement les éléments caractéristiques de bâtiments à partir des nuages de points 3D. Il s'agit de reproduire, par le calcul, la saisie manuelle d'un opérateur. Bien entendu, donner à un algorithme un cahier des charges des éléments à relever et obtenir en retour un modèle 3D géométrique n'est pas envisageable aujourd'hui. Là encore, les résultats les plus aboutis portent sur les reconstructions de façades de rue à l'échelle de la ville puisque, en moyenne, les éléments à relever possèdent des caractéristiques communes qu'il est possible de formaliser au travers d'un socle de connaissance de base mis en entrée des algorithmes : verticalité des murs, présence d'éléments structurants (fenêtres, portes, balcons), symétrie, alignements horizontaux dus aux étages, etc.

En ce qui concerne les édifices remarquables, dont l'architecture est plus difficilement traduisible en règles, l'automatisation doit plutôt être envisagée comme une solution partielle, initialisation qui permettrait d'aider à la saisie et de travailler plus rapidement.

Les méthodes automatiques fonctionnent le plus souvent en extrayant des ensembles de primitives (contours, plans, sphères, etc., voir par exemple Boulaassal *et al.*, 2010) qui sont obtenues avec des processus équivalents à ceux présentés dans la partie sur la segmentation pour la recherche de formes (voir section 5.2.4). La plus courante et la plus efficace est la méthode RANSAC qui, comme le montrent (Schnabel *et al.*, 2007), permet d'obtenir les différents types de primitives évoquées plus haut. La limite de ces méthodes est qu'il n'est généralement pas possible de tout représenter par des primitives : des trous subsistent qu'il faut combler.

Des approches (Lafarge *et al.*, 2013) combinant la reconstruction par primitives et par maillage peuvent permettre de répondre aux cas complexes qui nous concernent en s'adaptant aux variations de contenu des édifices à traiter (figure 5.12).



**Figure 5.12.** Résultats d'une méthode de reconstruction hybride à partir de nuages de points : a) issus de laser, b) issus d'images (Lafarge *et al.*, 2013)

Il faut tout de même noter que ces algorithmes sont gourmands en temps de calcul et qu'il ne faut pas imaginer aujourd'hui pouvoir traiter les cas des édifices remarquables en mettant en entrée l'ensemble des données. La décomposition en sous-éléments est indispensable pour réaliser ce type d'opération.

### 5.3.5. Couplage des traitements des nuages de points laser avec des images

Les informations contenues dans les nuages de points issus de scanner laser sont généralement excellentes du point de vue de la qualité géométrique. Nous avons vu dans le chapitre 3, section 3.5.2, que des progrès étaient encore à faire en termes de qualité radiométrique, en particulier par comparaison avec les images provenant des appareils photographiques disponibles sur le marché.

Si, pour des rendus photoréalistes, il pourra être indispensable de compléter les acquisitions laser, les images externes sont également susceptibles de favoriser les opérations décrites précédemment, que ce soit au niveau des prétraitements ou au niveau de l'extraction automatique d'information des nuages de points.

Pour que les deux types d'informations puissent être utilisés de façon complémentaire lors des traitements, il est nécessaire qu'elles soient parfaitement recalées les unes par rapport aux autres. Les procédés habituels mis en œuvre pour calculer leur géoréférencement (voir sections 2.4 et 3.4) permettent de répondre à cette condition sans difficulté particulière. Cependant, dans certains cas précis, par exemple lorsque l'une des familles de données vient en complément de l'autre, il peut être pertinent de calculer le recalage relatif de l'un des jeux de données vers l'autre. Cette opération peut se faire manuellement en repérant au minimum trois points communs entre l'image et le nuage de points. Il existe également des algorithmes qui effectuent cette étape automatiquement, en extrayant des primitives dans les deux types de données et en les appariant (Deveau *et al.*, 2004 ; Meierhold *et al.*, 2010 ; Crombez *et al.*, 2013). Les données laser sont transformables en 2D et les méthodes classiques de détection de points d'intérêt et d'appariement développées pour les images peuvent être reprises. De plus, il peut être judicieux de les reprojeter dans une géométrie compatible avec celle des images, de façon à limiter les effets de perspective. En pratique, cette opération n'est pas toujours couronnée de succès, car les signaux présents dans les deux types de données peuvent être assez différents du fait d'écart dans la longueur d'onde utilisée, des différences d'éclairage au moment de l'acquisition et des variations des points de vue.

Dans les problématiques de reconstruction évoquées précédemment, l'utilisation conjointe des deux types de données améliore les résultats puisqu'une information

plus riche est utilisée (Deveau *et al.*, 2004 ; Becker, 2007 ; Pu *et al.*, 2009 ; Hammoudi, 2011) : les images ont souvent une meilleure résolution, elles représentent mieux les bords des objets et rendent compte de différences colorimétriques.

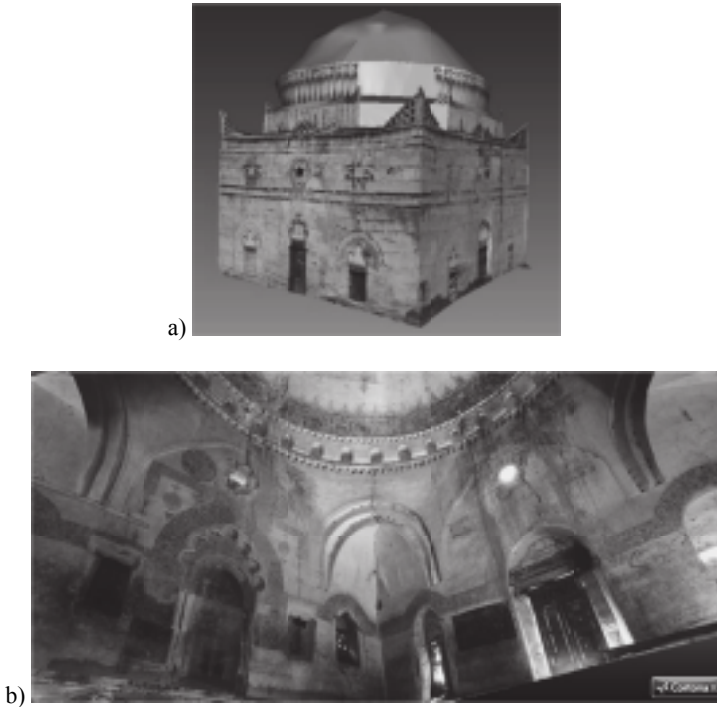
### 5.3.6. Texturage

Afin d'obtenir un modèle géométrique avec un aspect réaliste, il peut être nécessaire de texturer les objets 3D par des images. (Kersten *et al.*, 2012) rappelle les différents cas de figure :

- si la reconstruction 3D s'est faite par corrélation d'images, l'information de couleur est directement disponible au niveau des points du modèle 3D ;
- le texturage peut être réalisé manuellement sous des logiciels de CAO ;
- le texturage peut être calculé après la reconstruction 3D, par des images externes dont la géométrie interne est connue ainsi que la position et l'orientation dans le système de coordonnées du modèle géométrique.

Dans ce dernier cas, l'opération peut consister à améliorer la couleur des points du nuage (Crombez *et al.*, 2013). Le plus souvent, elle est opérée sur le modèle surfacique dont on cherche à colorier les facettes. Le calcul de la texture pour chaque facette du maillage peut se faire automatiquement (Alshawabkeh *et al.*, 2005). Tout d'abord, il est nécessaire de connaître les parties cachées entre l'image et le modèle 3D. Il y a deux grandes familles de méthodes de calcul des occlusions : depuis l'image (Z-buffer, par exemple) ou depuis l'objet. Ensuite, si plusieurs images sont susceptibles de voir une facette donnée, une règle de choix de l'image à utiliser doit être définie. Cela peut se faire sur un critère de résolution, d'angle entre le point de vue de l'image et la normale à la surface. Enfin, l'interpolation de la radiométrie au sein de la facette pour colorier de façon continue la surface peut être, soit affine (plus simple, mais moins rigoureuse), soit prenant en compte la perspective de l'image (un peu plus long à calculer).

Les modèles 3D texturés (voir figure 5.13) sont très recherchés pour la facilité d'interprétation qu'ils apportent, mais les étapes qui y conduisent sont assez longues, correspondant à ce qui a été décrit dans les paragraphes précédents, et ce, d'autant plus qu'on souhaite disposer de détail. De plus, il convient de noter qu'aujourd'hui, il n'existe pas d'outil unique qui permette de répondre entièrement à cette problématique. En pratique, les entreprises spécialisées ou les organismes traitant de ces sujets utilisent bien souvent des combinaisons de logiciels : bibliothèques d'infographie, modeleurs 3D, etc.



**Figure 5.13.** *Modèles 3D texturés (Godet, 2009) :*  
*a) vue du modèle 3D texturé de l'extérieur de la mosquée d'Arad (Yémen) ;*  
*b) vue du modèle 3D texturé de l'intérieur de cette même mosquée*

### 5.3.7. *Qualification des modèles géométriques*

L'évaluation du résultat est particulièrement délicate.

D'un point de vue purement géométrique, il peut être pertinent de cartographier les écarts entre les modèles reconstruits et les nuages de points initiaux. Mais l'information qualitative ainsi obtenue ne permet pas d'évaluer de façon absolue la qualité du modèle. En effet, le nuage de points n'est pas exempt de défauts : parties cachées et imprécisions de géoréférencement notamment. Pour disposer de données absolues, il peut être judicieux d'effectuer des mesures tachéométriques spécifiques sur le terrain et qui permettront d'avoir une vision plus objective. (Landes *et al.*, 2012) proposent une méthode d'évaluation de la segmentation et de la reconstruction à partir de la définition d'un ensemble d'indicateurs de qualité.

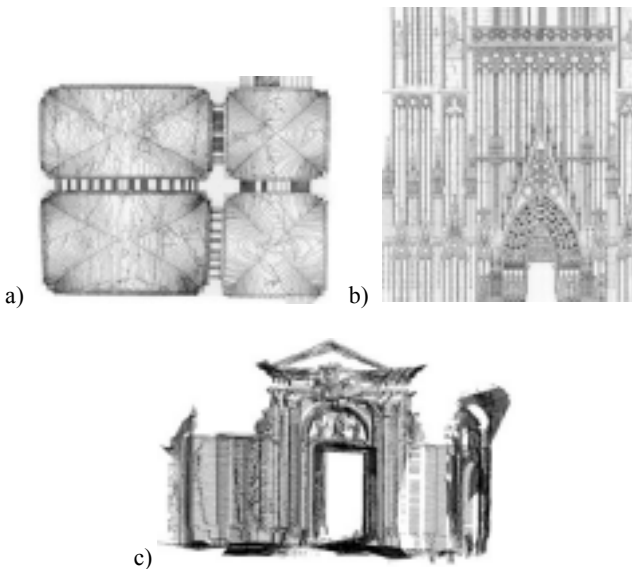
## 5.4. Produits dérivés

L'analyse du site nécessite parfois l'extraction de produits 2D complémentaires : dessins au trait, ortho-images, déroulés.

### 5.4.1. Dessins au trait

Ces produits sont très classiques dans les études architecturales d'édifices. Il en existe plusieurs types (voir figure 5.14) :

- section : l'objet est intersecté par un plan particulier. Pour des surfaces non planes, une représentation par des sections parallèles ou des courbes de niveau permet de rendre compte de ces formes géométriques. L'équidistance se définit en fonction du relief des formes, de l'échelle du relevé et de la précision recherchée ;
- coupe : il s'agit d'une section avec, en plus, la projection sur le plan de section des lignes architecturales d'une partie du bâtiment. Le plan topographique est un cas particulier correspondant à une coupe horizontale ;
- élévation : représentation orthogonale d'une façade sur un plan.



**Figure 5.14.** Courbes de niveau (a), élévations (b) et sections parallèles (c)

Le choix du plan de section se fait en fonction des analyses à conduire. Dans le passé, les vues axonométriques ou isométriques permettaient en complément d'obtenir des représentations sous d'autres angles. Aujourd'hui, ces modes sont largement périmés, remplacés par les affichages directement 3D.

Ces produits peuvent être générés selon différentes méthodes :

- par levé manuel sur le site, en complétant éventuellement par quelques mesures au distancemètre ;
- par levé tachéométrique, également sur site ;
- par restitution photogrammétrique (voir section 2.6) ;
- par saisie sur nuages de points : les logiciels permettent bien souvent d'isoler des tranches sur lesquelles un opérateur peut aller saisir les éléments caractéristiques qui l'intéressent (voir section 5.3.2) ;
- par traitement automatique des nuages de points en reliant automatiquement par des polygones les points des tranches extraites ;
- par traitement automatique des modèles surfaciques : le calcul de l'intersection du modèle par un plan est direct. Chaque facette produit un segment et l'ensemble constitue une polygone. L'inconvénient de ce type de méthode est que, selon la qualité de la reconstruction, la coupe ainsi obtenue risque d'être bruitée voire imprécise. Dans ce cas, il pourra être nécessaire de nettoyer le résultat. Des algorithmes existent également pour améliorer la régularité des polygones générées et pour alléger les produits obtenus (Van Genechten *et al.*, 2009) ;
- par relevé graphique sur un redressement ou une ortho-image (voir section 5.4.2).

Encore une fois, le grand avantage de ces produits est qu'ils sont facilement lisibles par tous et qu'ils forment des représentations que les spécialistes ont l'habitude de lire et d'analyser.

## 5.4.2. Production d'ortho-images

### 5.4.2.1. Définition, utilisation des ortho-images

Une ortho-image est une image projetée orthogonalement sur un plan (voir figure 5.15). Le plan est défini par le commanditaire, selon les besoins de l'analyse. L'ortho-image est géoréférencée, c'est-à-dire que tous ses pixels sont connus dans le système de coordonnées de référence. C'est une image ou une mosaïque d'images corrigée des déformations dues au relief de la scène photographiée, à l'inclinaison de l'axe de prise de vues et à la distorsion optique.

Une ortho-image est une image métrique qu'on peut donc utiliser comme base de mesures. Elle est caractérisée par son emprise, son pas (ou résolution spatiale : taille équivalente sur l'objet d'un pixel), sa résolution spectrale (couleur, noir et blanc, infrarouge, etc.), sa précision, son système de coordonnées et la date d'acquisition des images.

Ce produit conservant toute l'information radiométrique de l'image est donc particulièrement riche. Comme pour les dessins au trait, le fait d'être en 2D permet une compréhension immédiate et ici, dans n'importe quel logiciel de traitement d'images. L'ortho-image peut toutefois nécessiter des opérations complémentaires d'interprétation et de saisie, notamment pour accéder à l'information métrique qu'elle contient.

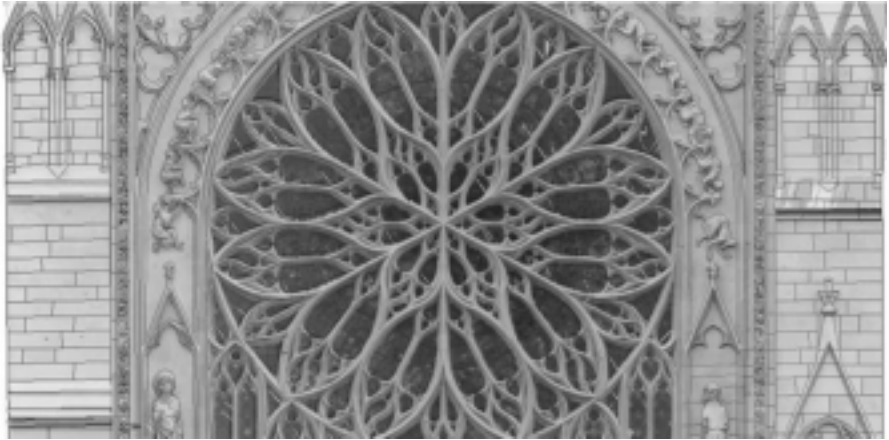
#### 5.4.2.2. Principe de la production d'ortho-images

Plusieurs images sont généralement nécessaires pour couvrir l'intégralité de la zone à traiter. Il est tout à fait possible de réutiliser les images d'une prise de vue photogrammétrique. En pratique, la contrainte de recouvrement stéréoscopique n'est pas obligatoire à ce stade et l'attention portera plutôt sur la qualité des images, notamment pour que la résolution sur l'objet soit la plus constante possible, que l'angle d'incidence soit orthogonal et que les images soient radiométriquement homogènes.

Outre les images elles-mêmes, il est nécessaire, pour effectuer les corrections géométriques de la projection orthogonale et du relief de la scène, de disposer du géoréférencement des images ainsi que d'une description de la forme de l'objet à traiter.

L'orthorectification de chaque image est, en elle-même, automatique. Elle comporte deux variantes selon que l'on traite des surfaces continues ou continues par morceaux, ce qui est généralement le cas pour les édifices remarquables et qui implique la présence de parties cachées. Dans ce second cas, une méthode consiste à construire le Z-buffer de l'image qui spécifie pour chaque pixel la distance du point concerné au plan de projection. Ce Z-buffer permettra de savoir si pour le pixel concerné, il existe un correspondant dans l'image ou s'il est caché (Chandelier *et al.*, 2013). En un pixel de l'ortho-image finale, il est alors possible qu'il y ait une ou plusieurs images qui puissent venir fournir l'information. Le choix se fait en définissant un critère qui peut, là aussi, être basé sur la résolution, l'incidence, la continuité dans le choix des images, une combinaison de ces paramètres, voire une moyenne des informations radiométriques disponibles (Grammatikopoulos *et al.*, 2007). Certains logiciels calculent une ligne de raccord optimisée de façon à minimiser les écarts visuels entre ortho-images adjacentes.

Malgré les précautions prises lors de la prise de vues, il est souvent nécessaire d'effectuer une égalisation radiométrique des images : les conditions d'éclairage changent bien souvent d'une image à l'autre, ainsi que les paramètres de prises de vue et parfois même l'appareil photo. Un traitement sera donc nécessaire pour masquer les écarts visuels entre les images : il peut s'agir de corrections cosmétiques réalisées manuellement avec des logiciels de retouches d'image classiques ou automatiquement comme le fond aujourd'hui de nombreux logiciels de création de panoramas, voir par exemple (d'Angelo, 2007).



**Figure 5.15.** *Superposition d'une ortho-image et d'une élévation obtenue par restitution photogrammétrique*

#### 5.4.2.3. *Qualification d'une ortho-image*

Outre les paramètres de l'ortho-image que sont le plan de projection et la résolution et dont il est facile de vérifier la justesse *via* les métadonnées de production, la qualité géométrique d'une ortho-image porte principalement sur sa précision géométrique. Cette dernière dépend de la qualité du modèle 3D, du géoréférencement des images, du processus de production et du type de mosaïquage. Pour chaque pixel de l'ortho-image, les imprécisions géométriques augmentent lorsque la position de l'image s'éloigne de la perpendiculaire au plan de projection qui passe par le point considéré. Les problèmes de recalages relatifs seront d'autant plus visibles que l'on se situe en bord d'objet.

La précision géométrique peut être vérifiée en utilisant des points de contrôle identifiés dans l'image et dont la position dans le système de référence est connue par d'autres méthodes. La mesure des écarts de distance entre les deux types de position permet d'établir une moyenne des erreurs qui doit être en accord avec les attendus du cahier des charges. Il est possible également de comparer des distances mesurées sur l'objet et dans l'ortho-image et de vérifier la continuité géométrique aux raccords entre images, ce qui peut être fait très rapidement, même si l'information obtenue ainsi ne qualifie pas complètement la géométrie.

Enfin, la qualité radiométrique rend compte de la fidélité de l'image à l'aspect de la scène traitée et de sa capacité à reproduire de fines variations d'intensité ou de couleur. En l'absence d'instrument de mesure adapté, elle est souvent estimée visuellement globalement et plus localement au niveau des raccords entre images. Il faut noter que les imprécisions géométriques pourront produire du flou sur les ortho-images dans le cas où la radiométrie de chaque pixel est calculée selon une combinaison des images disponibles.

#### 5.4.3. *Autres produits images*

La projection orthogonale est bien adaptée aux façades et plus généralement aux ensembles globalement plans. Dans les autres cas, pour limiter les déformations induites par la projection ou tout simplement pour rendre lisible l'objet d'intérêt, on pourra recourir à d'autres types de transformations : développement plan d'un cylindre dans le cas d'une colonne (Chandelier *et al.*, 2009), projection sphérique pour une coupole, projection géodésique plus généralement (voir figure 5.16).



**Figure 5.16.** Coupole de la mosquée d'Al Ashrafieh à Taëz (Yémen) :  
*a) projection orthogonale, b) projection azimutale polaire équidistante*

## 5.5. Bibliographie

AITELKADI K., TAHIRI D., SIMONETTO E., SEBARI I., POLIDORI L., « Segmentation of heritage building by means of geometric and radiometric components from terrestrial laser scanning », *Proceedings of the 2<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2013.

- ALSHAWABKEH Y., HAALA N., « Automatic Multi-Image Photo Texturing of Complex 3D Scenes », *Proceedings of the 20<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Turin, Italie, 2005.
- AMENTA N., CHOI S., KOLLURI R., « The power crust », *Proceedings of the 6<sup>th</sup> ACM symposium on Solid modeling and applications, SMA'01*, ACM, p. 249-266, New York (NY), Etats-Unis, 2001.
- BALLETTI C., BERTO M., GOTTARDI C., GUERRA F., « Ancient structures and new technologies : survey and digital representation of the wooden dome of SS. Giovanni E Paolo in Venice », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- BARNEA S., FILIN S., « Segmentation of terrestrial laser scanning data using geometry and image information », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 76, p. 33-48, février 2013.
- BECKER S., « Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, n° 6, p. 640-653, novembre 2009.
- BERNARDINI F., MITTLEMAN J., RUSHMEIER H., SILVA C., TAUBIN G., « The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction », *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 5, n° 4, p. 349-359, octobre-décembre 1999.
- BORRMANN D., ELSEBERG J., LINGEMANN K., NÜCHTER A., « The 3D Hough Transform for Plane Detection in Point Clouds: A Review and a new Accumulator Design », *3D Research*, vol. 2, n° 2, n° 32, Springer, 2011.
- BOTSCH M., KOBELT L., PAULY M., ALLIEZ P., LEVY B., *Polygon Mesh Processing*, AK Peters/CRC Press, Londres, 2010.
- BOULAASSAL H., CHEVRIER C., LANDES T., « From laser data to parametric models: towards an automatic method for building façade modelling », *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> international conference on Digital heritage, EuroMed'10*, p. 42-55, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010.
- BOULAASSAL H., LANDES T., GRUSSENMEYER P., TARSHA-KURDI, F., « Automatic segmentation of building facades using terrestrial laser data », *Proceedings of the ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, vol. 36, Espoo, Finlande, 2007.
- BRYAN P.G., ABBOTT M., DODSON A.J., « Revealing the Secrets of Stonehenge Through the Application of Laser Scanning, Photogrammetry and Visualisation Techniques », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- CARR J.C., BEATSON R.K., CHERRIE J.B., MITCHELL T.J., FRIGHT W.R., MCCALLUM B.C., EVANS T.R., « Reconstruction and representation of 3d objects with radial basis functions », *Proceedings of the 2<sup>8th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'01*, ACM, New York (NY), Etats-Unis, p. 67-76, 2001.
- CHANDELIER L., CHAZALY B., EGELS Y., LAROZE E., « Numérisation 3D et déroulé photographique des 134 colonnes de la Grande Salle Hypostyle de Karnak », *Revue XYZ*, n° 120, p. 33-39, 2009.

- CHANDELIER L., EGELS Y., HÉNO R., SCHELSTRAETE D., Photogrammétrie rapprochée pour l'architecture, Cours de l'Ecole nationale des sciences géographiques, France, août 2013.
- CHENG Y., « Mean Shift, Mode Seeking, and Clustering », *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 17, n° 8, p. 790-799, août 1995.
- CHEVRIER C., MAILLARD Y., PERRIN J.-P., « A method for the 3d modelling of historic monuments: the case of a gothic abbey », *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ISPRS International Workshop 3D Arch'09: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, Trento, Italie, 2009.
- CROMBEZ N., CARON G., MOUADDIB E.-M., « Colorisation photo-réaliste de nuages de points 3D », *Orasis, Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateur*, Cluny, France, 2013.
- CURLESS B., LEVOY M., « A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images », *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> annual conference on computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'96*, ACM, p. 303-312, New York (NY), Etats-Unis, 1996.
- D'ANGELO P., « Radiometric Alignment and Vignetting Calibration », *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision Systems, Camera Calibration Methods for Computer Vision Systems, CCMVS2007*, Bielefeld, Allemagne, mars 2007.
- DE LUCA L., VÉRON P., FLORENZANO M., « A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements », *The Visual Computer*, vol. 23, n° 3, p. 181-205, 2007.
- DEKEYSER F., GASPARD F., DE LUCA L., FLORENZANO M., CHEN X., LERAY P., « Cultural heritage recording with laser scanning, computer vision and exploitation of architectural rules », *International Workshop on vision techniques for digital architectural and archaeological archives*, Ancona, Italie, 2003.
- DELAUNAY D., « Sur la sphère vide », *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk*, vol. 7, p. 793-800, 1934.
- DEMANTKÉ J., MALLET C., DAVID N., VALLET B., « Dimensionality based scale selection in 3D lidar point cloud », *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Proceedings of the ISPRS Workshop Laserscanning*, vol. 38, part. 5/W12, p. 97-102, Calgary, Canada, août 2011.
- DESCHAUD J.-E., GOULETTE F., « Point cloud non local denoising using local surface descriptor similarity », *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 38, part. A, Saint-Mandé, France, 2010.
- DEVEAU M., PAPANODITIS N., PIERROT-DESEILLIGNY M., CHEN X., THIBAUT G., « Strategy for the extraction of 3D architectural objects from laser and image data acquired from the same viewpoint », *Proceedings of the ISPRS Working Group V/4 Workshop, 3D-ARCH 2005 : 3D Virtual Reconstruction & Visualization of Complex Architectures*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, part. 5/W17, Mestre-Venise, Italie, 2005.

- DEVEAU M., PIERROT-DESEILLIGNY M., PAPARODITIS N., CHEN X., « Relative laser scanner and image pose. Estimation from points and segments », *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, part. 3A, Istanbul, Turquie, juillet 2004.
- DEY T.K., LI G., SUN J., « Normal estimation for point clouds : A comparison study for a voronoi based method », *Proceedings of Eurographics/IEEE VGTC Symposium Point-Based Graphics*, vol. 0, p. 39-46, 2005.
- DIGNE J., « Similarity based filtering of point clouds », *Proceedings of the International Workshop on Point Cloud Processing, CVPR2012*, p. 73-79, 2012.
- EDELSBRUNNER H., MÜCKE E.P., « Three-dimensional alpha shapes », *ACM Transactions on Graphics*, vol. 13, n° 1, p. 43-72, janvier 1994.
- ELSEBERG J., BORRMANN D., NÜCHTER A., « One billion points in the cloud – an octree for efficient processing of 3D laser scans », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 76, p. 76-88, 2013.
- FABRIS M., ACHILLI V., BRAGAGNOLO D., MENIN A., SALEMI G., « Filling lacunas in terrestrial laser scanning data: the ‘Cavallo ligneo’ of the ‘Palazzo della Ragione’ (Padua, Italy) », *Proceedings of the 2<sup>th</sup> International Symposium CIPA*, p. 301-306, Athènes, Grèce, 2007.
- FISCHLER M.A., BOLLES R.C., « Random Sample Consensus : A paradigm for model fitting with application to image analysis and Automated Cartography », *Communication Association and Computing Machine*, vol. 24, n° 6, p. 381-395, 1981.
- GARDON E., Fusion de cartes de profondeur en photogrammétrie architecturale, Rapport de stage du Mastère photogrammétrie, positionnement et mesure de déformation, Ecole nationale des sciences géographiques, Marne-la-Vallée, 2009.
- GODET A., Création de modèle 3D pour le WEB du patrimoine Yéménite, Rapport de stage du cycle ingénieur 2<sup>e</sup> année, Ecole nationale des sciences géographiques, Marne-la-Vallée, 2009.
- GOSWAMI P., EROL F., MUKHI R., PAJAROLA R., GOBBETTI E., « An Efficient Multi-resolution Framework for High Quality Interactive Rendering of Massive Point Clouds using Multi-way kd-Trees », *The Visual Computer*, vol. 29, n° 1, p. 69-83, 2013.
- GRAMMATIKOPOULOS L., KALISPERAKIS I., KARRAS G., PETSAS, E., « Automatic multi-view texture mapping of 3d surface projections », *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> ISPRS International Workshop 2007: 3D Virtual Reconstruction & Visualization of Complex Architectures, 3D Arch'07*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36, part. 5/W47, Zurich, Suisse, 2007.
- HAMMOUDI K., Contributions to the 3D city modeling : 3D polyhedral building model reconstruction from aerial images and 3D facade modeling from terrestrial 3D point cloud and images, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Saint-Mandé, France, 2011.
- HAPPA J., MUDGE M., DEBATTISTA K., ARTUSI A., GONÇALVES A., CHALMERS A., « Illuminating the Past – State of the Art », *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST - State of the Art Reports*, 2009.

- HERNÁNDEZ J., MARCOTEGUI B., « Point Cloud Segmentation towards Urban Ground Modeling », *Proceedings of 5<sup>th</sup> GRSS/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas*, Shanghai, Chine, 2009.
- KAZHDAN M., BOLITHO M., HOPPE H., « Poisson surface reconstruction », *Proceedings of the Symposium on Geometry processing*, Cagliari, Italie, p. 61-70, 2006.
- KERSTEN T., STALLMANN D., « Automatic texture mapping of architectural and archaeological 3D Models », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 34, part. B5, p. 273-278, Melbourne, Australie, 2012.
- KLASING K., ALTHOFF D., WOLLHERR D., BUSS M., « Comparison of surface normal estimation methods for range sensing applications », *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA '09*, p. 3206-3211, 2009.
- LAFARGE F., ALLIEZ, P., « Surface Reconstruction through Point Set Structuring », *Computer Graphics Forum*, vol. 32, n° 2, p. 225-234, 2013.
- LANDES T., BOULAASSAL H., GRUSSENMEYER P., « Quality Assessment Of Geometric Façade Models Reconstructed From TLS Data », *The Photogrammetric Record*, vol. 27, n° 138, p. 137-154, juin 2012.
- LEVIN D., « The approximation power of moving least squares », *Mathematics of Computation*, vol. 67, p. 1517-1531, 1998.
- LIU Y., SNOEYINK J., « A Comparison of Five Implementations of 3D Delaunay Tessellation », *Combinatorial and Computational Geometry*, vol. 52, p. 439-458, 2005.
- LORENSEN W.E., CLINE H.E., « Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm », *Proceedings of the 14<sup>th</sup> annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'87*, p. 163-169, ACM, New York (NY), Etats-Unis, 1987.
- MAÎTRE H., *Image processing*, ISTE, Londres et John Wiley, New York, 2008.
- MALGOUYRES R., « Algorithmes pour la synthèse d'images et l'animation 3D », *Sciences SUP*, Dunod, Paris, 2008 (2<sup>e</sup> édition).
- MEIERHOLD N., SPEHR M., SCHILLING A., GUMBOLD S., MAAS H.-G., « Automatic feature matching between digital images and 2D representations of a 3D laser scanner point cloud », *Proceedings of the ISPRS Commission V Mid-Term Symposium on Close Range Image Measurement Techniques*, vol. 38, p. 446-451, Newcastle upon Tyne, Royaume-Uni, 2010.
- MURPHY M., MCGOVERN E., PAVIA S., « Historic Building Information Modeling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture », *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 76, p. 89-102, février 2013.
- PERE C., LANDRIEU J., ROLLIER-HANSELMANN J., SCHOTTE G., « Reconstitution virtuelle de l'église abbatiale Cluny III : des fouilles archéologiques aux algorithmes de l'imagerie », *Actes du colloque Virtual Retrospect 2009*, Pessac, 18-20 novembre 2009, p. 151-159, Archeovision, vol. 4, Ausonius Editions, Bordeaux, 2010.

- PFISTER H., ZWICKER M., VAN BAAR J., GROSS M., « Surfels : Surface Elements as Rendering Primitives », *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH'00*, p. 335-342, ACM, New York (NY), Etats-Unis, 2000.
- PIERROT-DESELLIGNY M., MicMac, Apero, Pastis and Other Beverages in a Nutshell!, Documentation de la suite MicMac, 2013.
- PU S., VOSSELMAN G., « Building Facade Reconstruction by Fusing Terrestrial Laser Points and Images », *Sensors*, vol. 9, n° 6, p. 4525-4542, 2009.
- PUTTONEN E., LEHTOMÄKI M., KAARTINEN H., ZHU L., KUKKO A., JAAKKOLA A., « Improved Sampling for Terrestrial and Mobile Laser Scanner Point Cloud Data », *Remote Sensing*, vol. 5, n° 4, p. 1754-1773, 2013.
- RABBANI T., VAN DEN HEUVEL F.A., VOSSELMAN, G., « Segmentation of point clouds using smoothness constraints », *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, part. 5, p. 248-253, Dresden, Allemagne, 2006.
- SCHNABEL R., WAHL R., KLEIN R., « Efficient RANSAC for point-cloud shape detection », *Computer Graphics Forum*, vol. 26, n° 2, p. 214-226, 2007.
- SMIGIEL E., ALBY E., GRUSSENMEYER P., « Terrestrial laser scanner data denoising by dictionary learning of sparse coding », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA Symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- SMIGIEL E., ALBY E., GRUSSENMEYER P., « TLS data denoising by range image processing », *Photogrammetric record*, vol. 26, n° 134, p. 171-189, juin 2011.
- STERNBERG H., HERSTEN T., JAHN L., KINZEL R., « Terrestrial 3D laser scanning – data acquisition and object modeling for industrial as-built documentation and architectural applications », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 35, part. B7, p. 942-947, Istanbul, Turquie, 2004.
- VAN GENECHTEN B., SANTANA QUINTERO M., DEMEYERE T., HERINCKX S., SCHUEREMANS L., ROOSE D., « Terrestrial Laser Scanning in Architectural Heritage - Deformation Analysis and the Automatic Generation of 2D Cross-Section », *Proceedings of the CIPA 22<sup>nd</sup> International Symposium*, Kyoto, Japon, 2009.
- VOSSELMAN G., GORTE B.G.H., SITHOLE G., RABBANI T., « Recognising structure in laser scanner point clouds », *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 46, part. 8/W2, p. 33-38, Freiburg, Allemagne, octobre 2004.
- WANG M., TSENG Y.-H., « LIDAR data segmentation and classification based on octree structure », *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 20, part. B3, Istanbul, Turquie, 2004.
- ZHAN Q., LIANG Y., XIAO Y., « Color-based segmentation of point clouds », *Proceedings of ISPRS Laserscanning 09 workshop*, vol. 38, part. 3/W8, p. 248-252, Paris, France, 2009.

---

# Gestion et exploitation des relevés

---

## 6.1. Introduction

La conception du modèle 3D d'un édifice remarquable telle qu'elle est décrite dans les chapitres précédents n'a de sens que si les besoins qui l'ont motivée peuvent être satisfaits aisément, à tout instant, par les utilisateurs. Ceci suppose que les données sont disponibles au bon format, au bon endroit, au bon moment. En effet, les méthodes actuelles de relevé d'un édifice remarquable produisent des données variées (en nature, et format), par essence très volumineuses (images en très grande quantité, nuages de plusieurs millions de points), et ce d'autant plus que l'acquisition est stimulée par les performances toujours meilleures des matériels et logiciels, et par le coût toujours plus bas du stockage numérique. Passé l'enthousiasme suscité par les nouvelles techniques de relevé (la lasergrammétrie et plus récemment la photogrammétrie « tout automatique »), ou la possibilité de numérisation participative, des questions fondamentales se posent concernant la conservation et la diffusion de ces données.

## 6.2. Gestion de la conservation des données

Les méthodes de relevé présentées dans cet ouvrage permettent de produire des données de grande qualité, en combinant à des technologies de pointe des procédures issues de l'expérience d'experts en production de données métriques de grande précision. Ces données ont un coût qu'il est raisonnable de rentabiliser, en les rendant partageables et évolutives. Pour ce faire, on s'assurera qu'elles sont :

- intègres : les données doivent avoir été expurgées des éventuelles versions intermédiaires. De plus, on doit pouvoir, grâce aux métadonnées de qualité, connaître la valeur des données archivées ;

- visibles : car savoir qu'un relevé numérique existe évite de refaire un travail existant ;
- lisibles : les relevés existants doivent pouvoir être consultés, au-delà du cercle des experts qui ont participé à leur élaboration ;
- accessibles par morceau : il est important de pouvoir consulter une partie spécifique d'un édifice remarquable ;
- durables : on doit utiliser des supports de stockage et des formats de fichiers durables.

### **6.2.1. Types de sauvegarde**

A défaut de se conformer à un standard, chacun juge ce qu'il est bon de garder :

- toutes les données brutes en sortie d'instrument : images au format brut, nuages de points laser, observations topométriques brutes ;
- toutes les données traitées : répertoire des points d'appui, images avec leur géoréférencement, nuages de points photogrammétriques, restitution photogrammétrique ;
- toutes les données à livrer : nuages de points traités, modèle 3D complet « packagé », rapport.

(Huc, 2011) conseille d'éliminer au préalable tous les documents éphémères et les versions provisoires. Les données (hors données brutes) doivent avoir été renommées pour être plus compréhensibles. Les copies sont faites sur des supports adaptés au volume des données, en plusieurs exemplaires, dont un conservé dans un lieu distant.

Les données intermédiaires (points de liaison entre images, pyramides d'images, etc.) ne doivent pas être obligatoirement conservées, mais on doit pouvoir les régénérer, notamment dans le cas où l'on veut reprendre ou étendre le chantier. Ceci souligne la nécessité impérieuse de documenter rigoureusement les étapes de la production (nom et version des logiciels utilisés, commandes, arguments, qualification des résultats intermédiaires).

### **6.2.2. Enrichissement sémantique des données géométriques**

Les relevés d'édifices remarquables tels qu'ils sont présentés ici sont essentiellement composés d'éléments géométriques : points, lignes, surfaces ou maillages

parfois texturés par des images, qu'il est nécessaire d'enrichir par des attributs sémantiques. Ces attributs sont d'une part, une réelle plus-value pour les utilisateurs, et d'autre part, facilitent l'accessibilité aux données. Mais la manière de décrire les données relevées (date de relevé, équipe responsable, méthodes employées, qualité obtenue ou nature de l'édifice ou de ses sous-parties, etc.) peut évidemment prendre de multiples formes : ce qui est évident pour les uns peut rester obscur pour les autres. Les métadonnées doivent donc être normalisées, ou dérivées d'ontologies spécifiques au domaine du relevé (Vrochidis *et al.*, 2008).

Au-delà de la réflexion essentielle sur la forme des métadonnées sémantiques, la façon de le faire pose aussi question, au regard du volume de données considéré. Certaines informations sont enregistrées pendant l'acquisition (par exemple, données EXIF des images) et le traitement (rapports de calcul), mais la plupart doivent être renseignées en mode interactif, en remplissant un formulaire par exemple. Des automatisations sont envisageables : (Manuel *et al.*, 2013) propose de propager automatiquement des annotations faites manuellement sur des images brutes à toutes les images en recouvrement *via* le nuage de points 3D. Les techniques de recherche d'images et de parties d'images par contenu visuel peuvent aussi être utilisées pour labéliser des objets dans les images. Ces techniques procèdent classiquement en deux étapes : extraction des caractéristiques comme la couleur, la forme, puis mesures de ressemblance. Dans le domaine architectural, la description sémantique d'un élément relevé peut être basée sur des grammaires de formes adaptées de traités d'architecture (De Luca *et al.*, 2011).

### 6.2.3. Normalisation

La crainte que les données acquises aujourd'hui ne soient pas réutilisables en dehors de la structure où elles ont été produites (*a fortiori* dans quelques années) suscite le besoin de promouvoir des standards et des normes dans le domaine du relevé d'édifice remarquable.

Certes, les divers types de données acquises lors d'un relevé sont naturellement sauvegardés dans des formats sinon standards, au moins très répandus : TIFF<sup>1</sup>, JPEG, JPEG 2000<sup>2</sup> pour les images, LAS<sup>3</sup> principalement pour les nuages de points

---

1. *Tagged Image File Format* : <http://partners.adobe.com/public/developer/tiff/index.html>.

2. [www.jpeg.org/jpeg2000/index.html](http://www.jpeg.org/jpeg2000/index.html).

3. Format d'échange de données laser : [www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS\\_1\\_4\\_r13.pdf](http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/LAS_1_4_r13.pdf).

aériens, STL<sup>4</sup> et PLY<sup>5</sup> pour les maillages ainsi que OBJ<sup>6</sup> pour les nuages de points, qui supporte également d'autres types de modèles 3D, et PDF3D<sup>7</sup> pour la diffusion. Il existe également des formats standard pour les produits dérivés (modèles 3D au format vecteur). Le format CityGML<sup>8</sup>, créé pour de la modélisation urbaine, mérite d'être examiné. Il permet en effet de modéliser la ville jusqu'au bâtiment individuel en incluant de la géométrie vecteur 3D géoréférencée, de la topologie 3D (c'est-à-dire le lien entre les différentes entités du modèle), de la sémantique et de la texture. Ce format, normalisé par l'OGC (*Open Geospatial Consortium*) en 2008, propose cinq niveaux de détails (LOD, *level of details*) de LOD0 à LOD4, dont LOD3 et LOD4 sont adaptés aux données produites dans le cas du relevé d'un édifice remarquable (description du bâtiment au niveau architectural, incluant l'intérieur et l'extérieur). De même, le format IFC<sup>9</sup> est un format de fichier orienté objet utilisé par l'industrie du bâtiment pour échanger et partager des informations entre logiciels, et pourrait convenir pour le stockage des modèles de bâtiments bien qu'il gère le texturage et le géoréférencement de façon plus basique que CityGML. Ces standards (CityGML et IFC) ne concernent que la partie post-traitée des données, puisque les nuages de points bruts par exemple, qui regorgent d'informations plus fines sur l'édifice relevé, ne sont pas gérés. On ne discutera pas ici d'autres standards 3D (X3D<sup>10</sup>, COLLADA<sup>11</sup>) essentiellement conçus pour des applications de visualisation.

Mais le relevé d'un édifice remarquable est bien plus qu'un modèle vecteur ou qu'une collection éparsée d'images et de nuages de points : c'est un ensemble ordonné et structuré qui doit être conservé comme tel, interprétable et accessible au-delà de l'unité de production. Les avantages et les inconvénients de l'utilisation d'une norme dans un service réalisant des relevés sont recensés dans (MIDAS Heritage, 2012). Sans surprise, s'aligner sur une norme engendre des lourdeurs dans le processus de production général, mais augmente la crédibilité des données produites, et surtout facilite leur réutilisation.

Le domaine de la documentation du patrimoine historique architectural, où les données à très haute résolution que sont les images brutes ou les nuages de points 3D sont fréquemment utilisées pour des analyses, est depuis quelques années très actif sur les questions de partage et d'interopérabilité des relevés. Ainsi le CIPA<sup>12</sup>,

4. [http://en.wikipedia.org/wiki/STL\\_%28file\\_format%29](http://en.wikipedia.org/wiki/STL_%28file_format%29).

5. *Polygon File Format* : <http://paulbourke.net/dataformats/ply>, format pouvant aussi être utilisé pour le stockage des nuages de points.

6. [http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/txt/obj\\_format.txt](http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/txt/obj_format.txt).

7. [www.pdf3d.fr](http://www.pdf3d.fr).

8. [www.citygml.org](http://www.citygml.org).

9. [www.ifcwiki.org/index.php/Main\\_Page](http://www.ifcwiki.org/index.php/Main_Page).

10. [www.web3d.org/x3d](http://www.web3d.org/x3d).

11. <https://collada.org>.

12. Comité international de photogrammétrie architecturale : <http://cipa.icomos.org>.

un des comités de l'ICOMOS (Conseil international des monuments et des sites) spécialisé dans la documentation du patrimoine culturel, en partenariat avec l'ISPRS (Société internationale de photogrammétrie et télédétection), qui milite pour des données durables et partageables, promeut d'une part l'application de protocoles (charte de Londres<sup>13</sup>, EPOCH<sup>14</sup>, principes de Séville ; Lopez Menchero *et al.*, 2011), et encourage d'autre part l'émergence de normes adaptées au patrimoine architectural historique (Ioannides *et al.*, 2005).

Il existe déjà des technologies ouvertes et des protocoles standards favorisant l'interopérabilité nationale et européenne des métadonnées (Dublin Core<sup>15</sup>, EAD<sup>16</sup>, protocole OAI-PMH<sup>17</sup>), et des outils logiciels libres de catalogage (Geonetwork<sup>18</sup> par exemple), mais ils ne couvrent pas tous les besoins liés à la gestion des données géométriques 3D d'un relevé d'édifice remarquable.

### 6.2.4. Responsabilité et prise en charge de la conservation

La charte sur la préservation du patrimoine numérique de l'UNESCO<sup>19</sup> préconise que le patrimoine numérique soit géré par une structure institutionnelle légale, et que la notion de « dépôt légal » soit étendue au domaine du patrimoine. Cette recommandation permettrait certes de savoir sur un site donné si des relevés géométriques ont déjà été entrepris, mais elle semble incompatible avec les enjeux économiques et concurrentiels du secteur privé. (Ioannides, 2005) souligne quant à lui que seuls des organismes publics sont en mesure de promouvoir l'utilisation de normes, et plus généralement, les bonnes pratiques concernant l'interopérabilité des relevés d'édifice remarquable. Europeana<sup>20</sup>, la bibliothèque numérique lancée par la Commission européenne en 2008, vise à accueillir, entre autres objets muséaux, des relevés d'édifices remarquables. Les pays membres disposent aussi de bases de données décrivant les sites (par exemple *Atlas des patrimoines*<sup>21</sup> en France), avec, quand ils existent et qu'ils ont été signalés, un lien sur les relevés 3D numériques.

13. [www.londoncharter.org](http://www.londoncharter.org).

14. [www.epoch-net.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=212&Itemid=357](http://www.epoch-net.org/index.php?option=com_content&task=view&id=212&Itemid=357).

15. <http://dublincore.org>.

16. [www.loc.gov/ead](http://www.loc.gov/ead).

17. [www.openarchives.org/pmh](http://www.openarchives.org/pmh).

18. <http://geonetwork-opensource.org>.

19. [http://portal.unesco.org/en/ev.php-URL\\_ID=17721&URL\\_DO=DO\\_TOPIC&URL\\_SECTION=201.html](http://portal.unesco.org/en/ev.php-URL_ID=17721&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html).

20. [www.europeana.eu](http://www.europeana.eu).

21. <http://atlas.patrimoines.culture.fr>.

### 6.3. Diffusion des données

#### 6.3.1. Les fonctionnalités attendues

Les données diffusables (modèle 3D final et éventuellement les données intermédiaires, comme les images ou les nuages de points géoréférencés, les points d'appui, etc.) devraient être accessibles *via* un catalogue, en local ou par Internet :

- par emprise géographique : relation d'ensemble sur des volumes paramétrables, par exemple, en lien avec un plan d'ensemble. Ainsi, sur une cathédrale, chargement des nuages de points et du modèle vecteur intersectant le cube de côté 5 m centré sur le point intersection de la nef et du transept ;

- selon la nature des entités : par exemple, chargement des nuages de points décrivant le portail principal extérieur ;

- par des requêtes sémantiques : par exemple, chargement des données acquises avant 1995 ;

- par point de vue défini par les stations de numérisation : par exemple, chargement de tout ce que l'on perçoit depuis tel point de vue ;

- ou par point de vue quelconque : interpolation entre les vues issues des stations de numérisation.

Ces fonctionnalités doivent pouvoir être combinées (par exemple, dans une cathédrale, chargement des ortho-images couvrant le triforium sud acquises avant 2005). Enfin, l'accès doit être multirésolution, et permettre de charger non seulement les modèles reconstruits nécessairement un peu simplifiés, mais aussi les points 3D s'ils existent, jusqu'à leur pleine résolution.

Les stratégies de gestion des données volumineuses présentées en section 5.1 sont bien sûr essentielles à une bonne accessibilité des données. La représentation des éléments de l'édifice selon plusieurs niveaux de détails (LOD) peut également faciliter la navigation dans les données en affichant le niveau de détail adapté à l'éloignement du point de vue et en évitant ainsi de devoir charger la totalité des données.

#### 6.3.2. SIG

Les fonctionnalités demandées précédemment rappellent évidemment celles d'un système d'information géographique. Les logiciels actuels, dont certains gèrent

la 3D<sup>22</sup>, sont avant tout adaptés à des représentations de quartiers ou de villes. Ils ne conviennent pas encore complètement pour la gestion de toutes les données d'un relevé d'édifice remarquable : incapacité à traiter les gros nuages de points notamment, de représenter les formes complexes composant le monument. Il est cependant naturel d'organiser les données dans une base de données spatiales.

### 6.3.3. Plateformes web

Les globes virtuels permettent de visualiser des données correctement formatées, raisonnablement dimensionnées (pas de nuages de points 3D, mais des modèles vectorisés). Ainsi, le format KML<sup>23</sup>, un format de fichier basé sur la grammaire XML permet la modélisation et le stockage de caractéristiques géographiques comme les points, les lignes, les images, les polygones et les modèles pour un affichage dans Google Earth.

D'autres plateformes plus spécifiquement dédiées à la visualisation et à l'analyse des relevés d'édifice remarquable coexistent, parmi lesquelles on peut citer :

- Cyark<sup>24</sup> : plateforme de documentation du patrimoine mondial, sorte d'agrégateur de relevés de sites culturels. Les sites sont décrits par divers médias : textes, dessins d'archives, vidéos, et parfois modèles 3D (nuages de points 3D issus de lasergrammétrie essentiellement). Pour certains des sites présentés, il est possible de visualiser et de manipuler les données laser sous-échantillonnées et prédécoupées par zone (exemple sur la cathédrale de Beauvais<sup>25</sup> dans un visualisateur 3D intégré) ;

- Mappinggothic.org<sup>26</sup> : initié par deux professeurs américains d'histoire de l'art, ce site regroupe une grande variété de documents sur de nombreux sites gothiques en Europe (essentiellement en France et en Angleterre). Sur chaque site, on peut afficher des informations textuelles (histoire de la construction, contexte historique, etc.) et des vues panoramiques, des couples stéréoscopiques en anaglyphe, des images à très haute résolution de certains éléments de décor, des images de nuages de points laser. Des affichages comparés d'éléments caractéristiques des différentes cathédrales modélisées sont également proposés ;

22. <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/00q8000000wv000000>.

23. *Keyhole Markup Language* : <https://developers.google.com/kml/documentation>.

24. <http://archive.cyark.org>.

25. <http://archive.cyark.org/cathedral-of-beauvais-gallery>.

26. <http://mappinggothic.org>.

– 3D Monuments<sup>27</sup> : programme pour la visualisation et la valorisation de modèles 3D de monuments nationaux, *via* la plateforme Nubes, développée et entretenue par le MAP (UMR 3495). Cette plateforme donne à voir, sur certains sites, les données acquises et les traitements réalisés, *via* des images et des vidéos.

Cette liste n'est certes pas exhaustive, mais il semble qu'aucune plateforme web qui permettrait de manipuler de manière dynamique toutes les données produites lors d'un relevé ne fasse encore référence. Il faut toutefois signaler (Devaux *et al.*, 2012) qui présente une plateforme web performante de visualisation et d'interaction avec des images et des nuages de points, utilisant la technologie WebGL<sup>28</sup>, et (Guarnieri *et al.*, 2009) dont l'application en client web léger permet de visualiser et d'éditer des modèles 3D. Dans le domaine des relevés par lasergrammétrie, certains constructeurs fournissent des applicatifs simples de visualisation et partage des données, comportant quelques outils d'exploitation. Ces logiciels peuvent s'avérer suffisants pour certaines opérations de mesure et d'analyse<sup>29</sup>.

#### 6.4. Bibliographie

- DE LUCA L., BUSAYARAT C., STEFANI C., VÉRON P., FLORENZANO M., « A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage », *Computers & Graphics*, vol. 35, n° 2, p. 227-241, avril 2011.
- DEVAUX A., PAPANODITIS N., BRÉDIF M., « A Web-Based 3D Mapping Application using WebGL allowing Interaction with Images, Point Clouds and Models », *20<sup>th</sup> ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems (ACM SIGSPATIAL GIS 2012)*, Redondo Beach (CA), Etats-Unis, 6-9 novembre 2012.
- GUARNIERI A., PIROTTI F., VETTORE A., « An open source application for interactive exploration of cultural heritage 3D models on the web », *Proceedings of 3D-ARCH 2009: 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, ISPRS Archives, vol. 38, part. 5/W1, WG V/4, Trento, Italie, 25-28 février 2009.
- HUC C., « Le risque de tout perdre. Archivage numérique », *Géomètre*, n° 2080, 2011.
- IOANNIDES M., GEORGOPOULOS A., SCHERER M., « Standards in cultural heritage : the missing grammar for the digital documentation of the past », *Proceedings of the 20<sup>th</sup> CIPA symposium*, Turin, Italie, 2005.
- LOPEZ-MENCHERO V.M., GRANDE A., « The principles of the Seville charter », *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> CIPA symposium*, Prague, République Tchèque, 2011.

27. [www.map.archi.fr/3D-monuments](http://www.map.archi.fr/3D-monuments).

28. [www.khronos.org/webgl](http://www.khronos.org/webgl).

29. [http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-TruView\\_63960.htm](http://hds.leica-geosystems.com/en/Leica-TruView_63960.htm).

- MANUEL A., STEFANI C., DE LUCA L., VERON P., « 2D/3D semantic annotation towards a set of spatially-oriented photographs », *Proceedings of the 24<sup>th</sup> CIPA symposium*, Strasbourg, France, 2013.
- MIDAS HERITAGE, *The UK Historic Environment Data Standard (V 1.1)*, English Heritage, Londres, 2012.
- VROCHIDIS S., DOULAVERAKIS C., GOUNARIS A., NIDELKOU E., MAKRIS L., KOMPATSIARIS I., « A Hybrid Ontology and Visual-based Retrieval Model for Cultural Heritage Multimedia Collections », *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies*, vol. 3, n° 3, 2008.



---

## Conclusion

---

On ne peut raisonnablement parler de conclusion, quand les méthodes évoquées dans cet ouvrage pour documenter les édifices remarquables sont, on l'a vu, en pleine effervescence. Le matériel, laser ou photo, est en effet toujours plus léger, plus performant, moins cher, plus maniable. Les logiciels sont plus automatiques, opérationnels dans des contextes toujours plus complexes, déployables sur des chantiers qu'on pensait irréalisables encore récemment, mais que les progrès incessants de l'informatique permettent aujourd'hui de traiter.

Il est cependant des valeurs que la performance et la modernité des méthodes n'ont pas altérées : dans (Saint-Aubin, 1992), on rappelle que le relevé « doit fixer les formes de l'objet, leurs dimensions et proportions, énoncer les relations multiples qui lient les parties entre elles ». Saint-Aubin souligne que « l'observation de la représentation est insuffisante pour établir ce qui est relevé et ce qui est interpolé et, plus grave, ce qui dans les éléments relevés est précis et ce qui l'est moins ». Cette mise en garde énoncée en 1992, à l'aube du déploiement des scanners laser et bien avant l'automatisation de la photogrammétrie, prend tout son sens aujourd'hui : les données produites par les méthodes actuelles, dorénavant accessibles bien au-delà du cercle des géomètres, n'ont de valeur qu'accompagnées de métadonnées les qualifiant méthodiquement, et décrivant le processus de fabrication. On pressent aussi, comme on l'a évoqué au chapitre 6, que l'accessibilité à ces données est un enjeu crucial pour une exploitation optimale. Les avancées dans ce domaine sont très attendues, d'autant plus qu'en parallèle, on continue de faire évoluer les méthodes de relevé, rendant toujours plus simple la production de données.

Au-delà de ces réserves, il faut souligner à nouveau l'intérêt des techniques lasergrammétriques et photogrammétriques modernes pour l'analyse et la documentation des édifices remarquables. On notera enfin leur apport inestimable à la conservation du patrimoine. Les exemples récents de destruction de site (les bouddhas de Bamyán, en Afghanistan, en 2001, de nombreux sites syriens classés au patrimoine

mondial de l'UNESCO très endommagés par la guerre civile) nous rappellent l'importance de disposer d'une documentation qui, au minimum, conserve leur souvenir, mais qui devrait aussi permettre des reconstructions fidèles.

## **Bibliographie**

SAINT-AUBIN J.-P., « Le relevé et la représentation de l'architecture », *Documents et méthodes*, n° 2, 1992.

---

# Index

---

## A

accrochage, 137  
acquisition participative, 75  
aéronef, 51  
aérotriangulation, 54, 102  
Alpha Shape, 140  
amplitude, 83, 86  
analyse en composantes principales, 123  
annotation, 165  
appareil photographique, 35, 41, 43, 87,  
92, 99, 104, 107, 115  
appariement, 45, 57, 63-66, 71, 103, 117,  
143  
dense, 65  
approche  
ascendante, 133  
descendante, 133  
hiérarchique, 66  
ASIFT, 58  
assemblage, 25, 94, 100, 105, 135  
automatisation, 57-59, 103, 133, 141, 167  
avion, 51-53, 85, 115  
axe de prise de vue, 44, 46, 147

## B

B/H, 44, 114  
balayage, 81-83, 87, 107, 126  
*Ball Pivoting*, 140  
bande, 44  
base

de données, 15, 23, 69, 75, 80, 163  
stéréoscopique, 44, 47, 54, 66, 74

*big data*, 68

BIM, 16

bloc d'images, 54-56, 58, 60, 73

boucle temps réel, 72

bruit, 70, 89, 107, 119, 121, 123, 127-129

B-spline, 135

## C

cadence, 51, 53

cahier des charges, 11, 17-19, 24-27, 38,

92, 104, 119, 127, 129, 136, 141, 150

calage, 24, 25, 93-97, 100-106, 114, 129

nuage à nuage, 101

point à point, 101

caméra, 27, 35-37, 39-42, 44, 47, 50-56,

59, 60, 69, 83, 87, 99, 104

temps de vol, 53

canevas de points d'appui, 33

CAO, 92, 127, 136, 144

carte

de disparités, 63

de parallaxes, 63

de profondeur, 64, 65, 68, 70, 120

graphique, 35, 72, 138

centrage, 87, 105

centrale à inertie, 16, 40, 55, 85

chambre

claire, 31

métrique, 22

champ de vision, 90, 92, 93, 95  
 charte, 161  
 cibles artificielles, 24, 54, 94, 103  
 CityGML, 15, 160  
 classe de sécurité, 87, 88  
 cliché, 34  
 coefficient de corrélation, 63, 129  
 colinéarité, 39, 56, 57, 59  
 colocalisation, 118  
 commanditaire, 13, 17, 19, 24, 124, 127, 147  
 compensation, 27, 42, 51, 57, 101, 103, 105  
   de filé, 51  
   par faisceaux, 57  
   par moindres carrés, 101  
 compression, 42, 130, 131  
 configuration  
   normale, 45  
   stéréoscopique, 44, 47, 70, 114  
 connexité, 126  
 conservation du patrimoine, 82, 167  
 consolidation, 94  
 contour, 33  
 contrainte d'épipolarité, 71  
 conversion analogique-numérique, 91  
 coplanéité, 56, 57, 133  
 corrélation  
   automatique, 58, 71  
   dense, 11, 27, 62, 68, 73, 114, 115, 120  
 coupe, 22, 137, 146, 147  
 couple stéréoscopique, 54, 56, 71, 74  
 croissance de région, 133, 134  
*crowd sourcing*, 75

## D

débruitage, 27, 127, 128  
 densité, 86, 92, 129, 130, 131, 135  
 déroulé, 23, 29, 152  
 descripteur 58, 128  
 dessin  
   3D, 21, 54, 71  
   au trait, 146  
 détail  
   homologue, 47  
   naturel, 24, 25, 95

détecteur  
   de points d'intérêts, 58, 68  
   de régions, 58  
 diaphragme, 42, 50  
 distance  
   focale, 35-37  
   principale, 40, 59  
 distorsion optique, 35, 39, 40, 63, 147  
 données brutes, 27, 158  
 drone, 35, 51-53, 85

## E

échantillonnage spatial, 107, 130  
 échelle, 15, 20, 22, 33, 54, 55, 58, 99, 105, 141, 146  
 éclairage, 26, 42, 51, 114, 121, 123, 143  
 égalisation radiométrique, 28, 149  
 élévation, 146, 149  
 éloignement, 35, 37, 44, 65, 74, 86, 107, 162  
 émission, 81-84  
 emprise, 51, 148, 162  
 estompage, 121  
 étalonnage, 47, 58, 59, 69, 89-91  
   auto-étalonnage 35, 40, 55, 59  
   polygone d'étalonnage, 35, 40  
 EXIF, 43, 59, 159  
 export, 28, 105  
 exposition, 41-43, 51

## F

facette, 144, 147  
 faisceau laser, 86-91  
 filtrage, 127  
*fish-eye*, 36, 70  
 fond de chambre, 36-38, 56  
 formule d'image, 34, 39  
 fréquence d'acquisition, 81-83, 86, 88  
 fusion, 80, 108, 111, 116, 118, 129, 130, 133, 154, 155  
 HDR, 51

## G

géolocalisation, 18  
 géomatique, 75

## géométrie

- algorithmique, 139, 141
- d'acquisition, 99, 106, 120, 121, 126
- de restitution, 64-66
- épipolaire, 63, 64
- sphérique, 93, 120
- géoréférencement, 16, 19, 21, 25, 27, 46, 54, 55, 94, 99, 100, 103, 114, 117, 118, 129, 130, 143, 145, 148, 150, 158, 160
- absolu, 19
- des données, 21, 25, 27, 117
- des images, 16, 27, 148, 150
- des stations laser, 94
- direct, 16, 55
- éléments de, 20
- GNSS, 21, 27, 44, 105, 117
  - antenne, 16, 40, 55, 85, 92
  - récepteur, 55
- grille, 120, 121, 125, 126

**H, I**

- hauteur de vol, 53
- hélicoptère, 51, 52, 85
- homologue, 62, 63
- ICP, 101, 104, 110, 129
- IFC, 160
- IGN, 12, 13, 15, 22, 29, 31, 32, 78
- image
  - de profondeur, 120, 131
  - métrique, 148
- incidence, 86, 90, 99, 109, 129, 148
- indexation spatiale, 125
- indice de réfraction, 89
- infographie, 16, 122, 125, 144
- intensité, 83, 87, 89, 91, 94, 107, 120, 121, 133, 150
- interopérabilité, 19, 21, 160, 161
- interpolation, 121, 123, 144, 162

**K, L**

- kdtrees*, 125
- lasergrammétrie, 11, 28, 81, 93, 95, 98, 103, 104, 106, 108, 109, 113-115, 118, 119, 157, 163, 164
- lidar, 16, 81, 153

## linéarisation, 101

- lissage, 128
- LOD, 160, 162

**M**

- maillage, 28, 121, 127, 135, 138-142, 144
- maquette numérique, 16, 17, 23
- Marching cubes*, 155
- masque, 65
- mât, 49-51
- métadonnées, 43, 59, 69, 150, 157, 159, 161, 167
- méthode globale, 66
- mise
  - à l'échelle, 21, 55, 57
  - au point, 41, 42, 47
  - en correspondance, 57
  - en place, 39, 47-49, 53-61, 65, 69, 73, 74, 129
    - absolue, 55, 59
    - en l'air, 55, 59, 60
- mobile, 51, 76, 79, 84, 110, 134, 156
- modèle 3D, 17-20, 23, 76, 106, 115, 135, 141, 144, 145, 150, 154, 157, 158, 162
  - géométrique, 135, 141
- mosaïque d'images, 147
- moving least square*, 128, 141, 155
- moyennes non locales, 128
- MSER, 58
- multirésolution, 66, 162

**N**

- netteté, 41, 42, 53
- norme, 15, 160
- nuage de points, 21, 24, 58, 60-62, 69, 71, 74, 90, 94, 103, 105, 106, 116, 118, 121, 126-128, 130-135, 137, 139, 140, 143, 145, 159
- NURBS, 135

**O**

- objectif photographique, 24, 35, 37, 40
- obturateur, 42, 50, 51
- occlusion, 53, 144
- octree*, 126, 131-133, 154, 156

ombrage, 121, 122  
 ondelettes, 128  
 ontologie, 159  
 opération ensembliste, 135  
 optimisation, 66, 69, 70, 77, 102, 123, 125, 129  
 ortho-image, 15, 16, 21, 28, 32, 54, 146-150, 162  
 orthorectification, 28, 44, 148  
 ouverture, 42, 50, 51, 96, 97

## P

parasite, 107, 127  
 parties cachées, 33, 44, 69, 70, 76, 115, 123, 127, 144, 145, 148  
 partition, 125, 132, 133  
 partitionnement, 125, 133  
 pas d'acquisition, 86  
 passage à l'échelle, 68  
 perche, 23, 49, 50, 115  
 photogrammétrie, 11, 12, 16, 22, 28, 29, 31-35, 39, 41, 45, 56-58, 68, 70, 71, 74-80, 82, 98, 102, 108-110, 113-119, 153, 154, 157, 160, 161, 167  
 aérienne, 22, 39  
 numérique, 35, 78  
 rapprochée, 39, 58, 74, 153  
 photomodélisation, 72, 77  
 photosite, 38  
 pied photo, 24, 49  
 pixellaire, 54, 62  
 point  
 d'appui, 59, 69, 102  
 d'intérêts, 58, 68  
 de calage, 26  
 de contrôle, 61, 70, 105, 150  
 de liaison, 46, 55, 57-60, 68, 94, 101-103, 105, 114, 129, 158  
 géodésique, 21, 94  
 naturel, 54, 59, 94  
 principal, 40, 59  
*splat*, 141  
 polyligne, 136, 147  
 pondération, 103, 104  
 portée, 22, 52, 81, 85, 86, 88, 90, 92, 93, 97, 100, 114

*Power Crust*, 140  
 précision  
 absolue, 19, 54, 105  
 de géolocalisation, 19, 24  
 du relevé, 17  
 géométrique, 95, 104, 150  
 interne, 19  
 relative, 104  
 prétraitement, 27, 88  
 prise de vues stéréoscopique, 22, 44, 45, 58  
 profondeur de champ, 41, 42  
 projection  
 géodésique, 150  
 orthogonale, 122, 148, 150, 151  
 sphérique, 120, 150  
 pyramide d'images, 67, 68

## Q, R

*quadtree*, 125  
*radial basis function*, 141  
 RANSAC, 59, 108, 133, 142, 156  
 rapport signal sur bruit, 90  
 rayons perspectifs homologues, 46, 48, 56, 59-62  
 recalage relatif, 143  
 reconnaissance, 24, 26, 27, 42, 93  
 reconstruction  
 3D, 28, 35, 46, 49, 66, 68, 70, 71, 80, 144  
 de Poisson, 141  
 recouvrement, 33, 44, 45, 47, 55, 58, 71, 94-96, 100-104, 129, 130, 148, 159  
 latéral, 44  
 longitudinal, 44  
 stéréoscopique, 148  
 rééchantillonnage, 74, 129-132  
 épipolaire, 74  
 réflectance, 86, 87, 90, 91, 104  
 régularisation de surface, 70  
 relèvement dans l'espace, 56  
 rendu filaire, 71, 135  
 résidu, 105  
 résolution, 16-20, 23, 24, 26, 35, 37-39, 59, 62, 68, 84, 86, 88, 89, 99, 114, 130, 144, 148, 150, 162

haute résolution, 12, 15, 20, 23, 51, 57,  
76, 82, 115, 160, 163  
horizontale, 86  
spatiale, 16, 19, 35, 37-39, 114, 148  
spectrale, 148  
verticale, 86  
ressemblance, 58, 63, 66, 69, 70, 159  
restitution, 16, 22, 28, 31, 33, 34, 44, 45,  
61, 74, 76, 79, 81, 108, 147, 149, 158  
3D, 28, 74, 76, 81, 108  
photogrammétrique, 16, 33, 34, 147,  
149, 158  
stéréorestitution, 28, 32, 44, 72-74, 114  
retour d'onde complète, 88  
rugosité, 88

## S

saisie  
en 2D, 137  
en 3D, 137  
manuelle, 41, 135, 136, 141  
multi-images, 16  
stéréoscopique, 71  
sur nuage de points, 132, 136  
satellite, 16  
scanner laser  
à bras, 84  
à décalage de phase, 83  
à impulsions, 83  
à temps de vol, 83  
à triangulation, 84, 92  
section, 19, 146  
segmentation, 126, 132-136, 142, 145,  
151, 152, 155, 156  
sémantique, 75, 132, 134, 158-160  
SIFT, 46, 58, 68  
similitude 3D, 57  
sous-échantillonnage, 121, 130, 131  
standard, 35, 87, 109, 158, 160, 165  
subpixelaire, 54, 62

SURF, 58  
surface sensible, 38  
surfels, 135, 141, 156  
système de coordonnées  
de référence, 18, 20, 21, 27, 94, 147  
fond de chambre, 36  
global, 21, 55, 105  
image, 36  
instrument, 83, 100

## T

tachéomètre, 20, 24  
teinte hypsométrique, 121  
téléobjectif, 36, 70  
temps de pose, 42, 49, 51  
tête panoramique, 51  
tétraédrisation, 71, 138  
texturage, 144, 160  
topologie, 130, 160  
traitement d'images, 75, 121, 131, 132,  
148  
transformée de Hough, 133  
trépied, 24, 104  
triangulation, 23, 71, 84, 85, 88, 92, 135,  
138-141  
de Delaunay, 139, 140

## U, V, Z

ULM, 51, 53, 85, 98, 115  
verticalisation, 87  
vignette, 63  
photométrique, 58  
visibilité, 71, 123  
vision par ordinateur, 68, 74, 153  
visite virtuelle, 23, 99  
voisinage, 57, 58, 90, 123, 126, 128, 134,  
139  
voxel, 125  
Z-buffer, 123, 144, 148