

Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2)

■ Tania LANDES - Pierre GRUSSENMEYER - Hakim BOULAASSAL

Dans la précédente édition de la revue XYZ, un article était consacré aux notions fondamentales sur la lasergrammétrie terrestre (XYZ n°128, pages 39 à 51). Les types de scanners laser terrestres, leurs caractéristiques et les erreurs susceptibles d'entacher les mesures ont été évoqués. Dans cette seconde partie, nous abordons le traitement des données, de l'acquisition jusqu'au modèle maillé ou géométrique texturé, en passant par la segmentation et en terminant par quelques exemples de projets de modélisation.

Introduction

Pour obtenir un nuage de points exploitable, certaines règles doivent être respectées au moment de l'acquisition. Ces règles sont assez intuitives pour des topographes, car ils sont conscients des erreurs que peuvent générer des visées rasantes, des relèvements ou résections non favorables, un positionnement inadapté des cibles et des stations, etc. Le choix que devra faire l'opérateur avant de mettre en œuvre le balayage laser est celui du géoréférencement ou de la consolidation seule. Cet article traite la question du géoréférencement, avant d'aborder celle des traitements, à savoir les étapes de segmentation, de modélisation et de texturage. Si le degré d'automatisation est relativement élevé dans la phase d'acquisition, il baisse régulièrement avec le nombre d'étapes de traitements qui s'en suivent. Des exemples de projets réalisés avec des étudiants au sein de la spécialité Topographie de l'INSA de Strasbourg et avec différents partenaires viendront illustrer les notions abordées.

Géoréférencement direct et indirect de nuages de points

■ Plusieurs stations, comment faire ?

Généralement, un objet ne peut pas être numérisé à partir d'une seule station. Plusieurs raisons peuvent en être la cause : soit le champ de vision du scanner est limité, soit l'objet est de dimension importante, soit il est d'architecture

complexe, ou encore, il se peut que des obstacles empêchent la visée directe. A ce moment-là, pour couvrir toutes les faces de l'objet, plusieurs points de vue différents sont nécessaires.

Dans le chapitre précédent (*revue XYZ n°128*), nous avons vu que les nuages de points résultant de ces stations multiples sont chacun définis initialement dans un repère relatif au scanner laser (*figure 1*). Il faut donc dans un premier temps regrouper dans un même système de coordonnées l'ensemble des nuages de points acquis à partir des

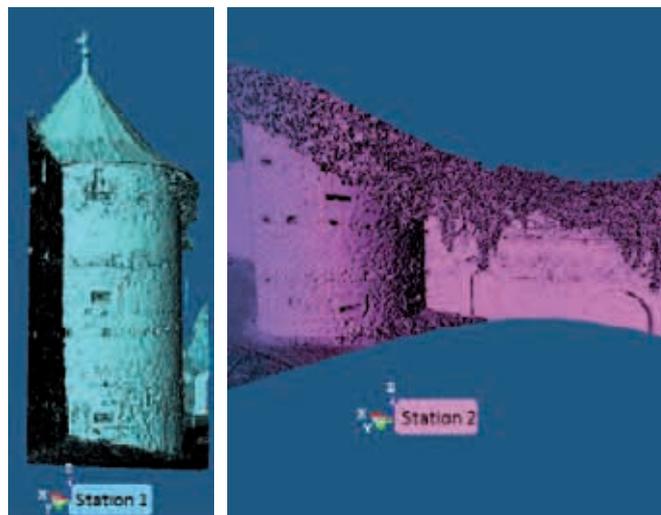


Figure 1. Nuages de points initiaux, définis dans le repère propre au scanner, pour chaque station.

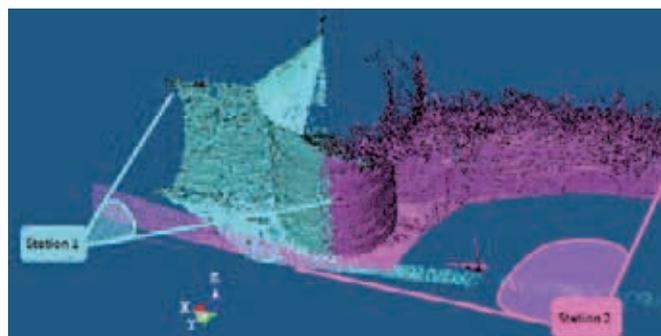


Figure 2. Nuages de points consolidés : les nuages sont ramenés dans un système de coordonnées unique.

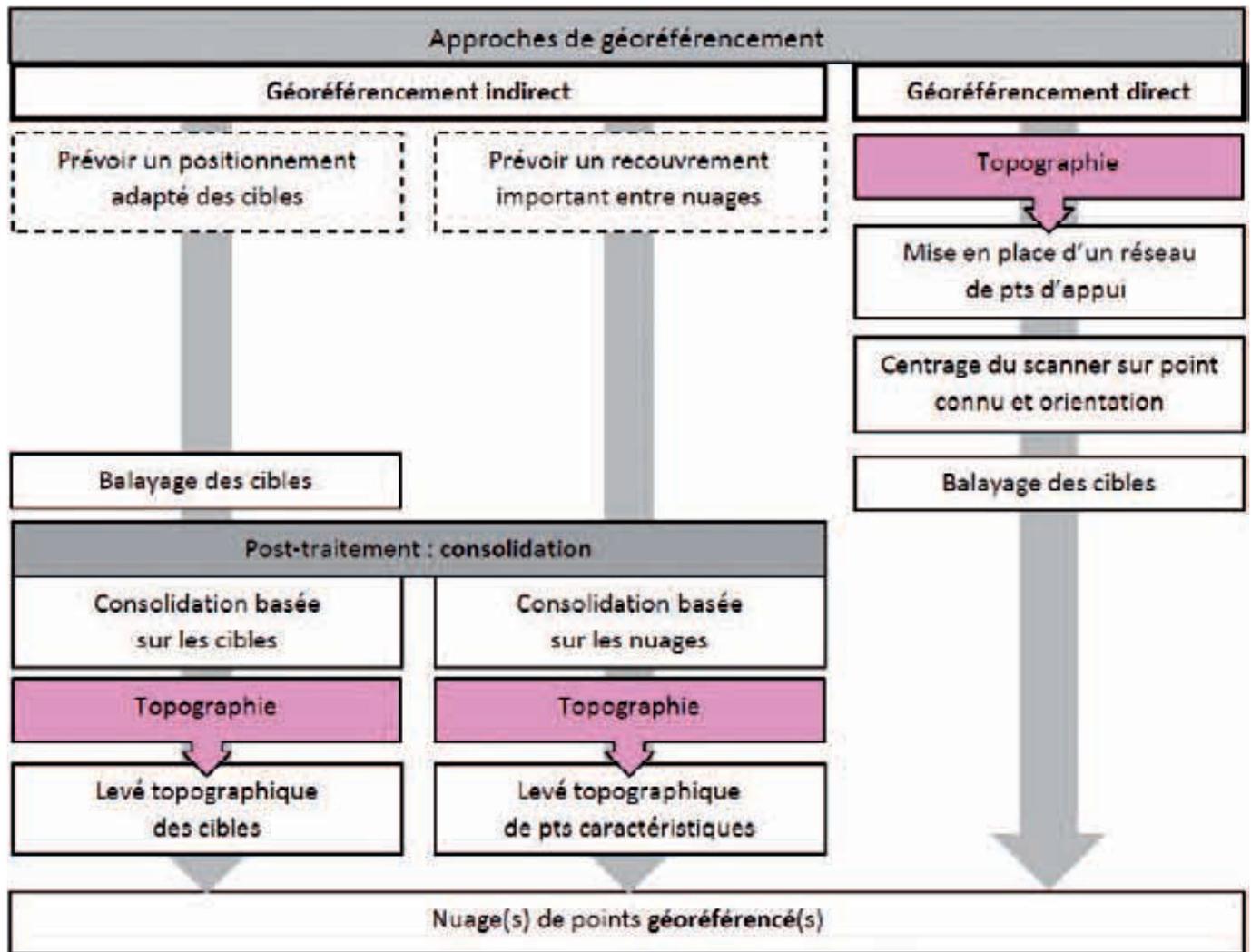


Figure 3. Approches de géoréférencement de nuages de points acquis par scanner laser terrestre (inspiré de Lerma Garcia et al., 2008)

différentes stations (figure 2). Cette opération est désignée par le terme de "consolidation" ou assemblage de nuages et sera étudiée en détail dans le paragraphe suivant. Si le système de coordonnées général choisi est un système de projection cartographique, l'opération ainsi effectuée est appelée un géoréférencement.

L'organigramme de la figure 3 présente les deux approches de géoréférencement envisageables : le géoréférencement direct et indirect. Le **géoréférencement direct** est possible avec des scanners laser conçus pour être centrés sur un point connu et orientés grâce à des visées sur des références.

Il peut ainsi prendre la place d'un tachéomètre au sein d'un cheminement polygonal. Ces scanners sont adaptés aux problématiques des géomètres, qui ont pour habitude de stationner des points connus et de s'orienter sur une ou plusieurs références avant d'effectuer un levé. Ainsi, chacun des points scannés sera calculable par point rayonné. Dans le milieu industriel, le rattachement n'est pas toujours indispensable, donc le **géoréférencement indirect** est plus approprié. Parfois une simple consolidation est suffisante. Si nécessaire, le rattachement pourrait se faire ultérieurement.

■ **Géoréférencement indirect**

Le géoréférencement indirect implique que les nuages de points soient assemblés au préalable, dans une étape de consolidation.

La consolidation (*registration*, en anglais) revient à effectuer un recalage relatif entre nuages. D'autres termes utilisés pour désigner cette opération sont le "**recalage**" ou encore l'"assemblage" de nuages. La consolidation se fait par l'identification de "points homologues" dans les deux nuages à consolider (soit des cibles, soit des points caractéristiques dans la scène numérisée).

Pour effectuer une consolidation, l'opérateur doit sélectionner au minimum trois paires de "points homologues" dans les deux nuages (deux suffisent si le compensateur du scanner était activé durant les mesures). Puis, les valeurs compensées des paramètres de la transformation peuvent être déterminées. L'erreur de consolidation est ensuite calculée et représente la distance moyenne subsistant entre les deux nuages de points.

■ **Consolidation basée sur les cibles**

Les points homologues entre nuages sont dans ce cas des cibles réfléchissantes aux caractéristiques physiques bien

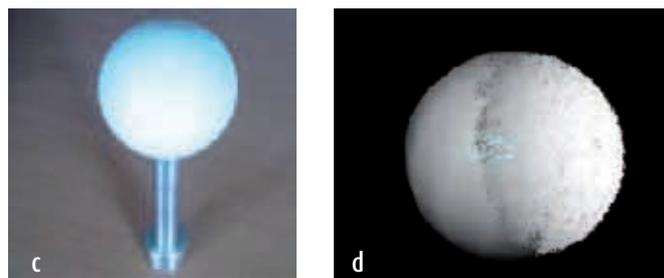
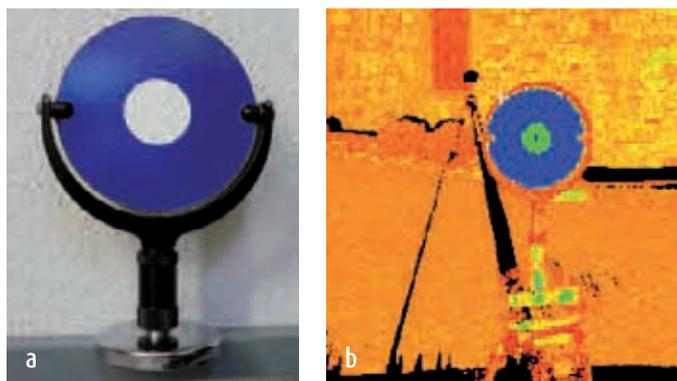


Figure 4. Types de cibles employées avec un scanner laser ; a) cible plane ; b) nuage couvrant la cible ; c) sphère ; d) sphère modélisée sur la base du nuage de points la couvrant.

identifiées par le logiciel de traitement des données. La figure 4 présente deux types de cibles associées généralement aux scanners laser : des cibles plates (orientables ou sous forme papier) et des sphères.

Pour les deux types de cibles, le logiciel d'acquisition du nuage identifie leur centre, qu'il utilise ensuite comme points de correspondance entre les nuages à consolider. La précision de mesure des cibles et la répartition des cibles dans l'espace affecteront la précision de consolidation des nuages de points. L'identification du centre s'effectue à ± 2 mm jusqu'à 50 m (donnée constructeur) et s'appuie sur une analyse de la géométrie et de l'intensité retour de la cible (diamètre connu du disque blanc central ou de la sphère). Lors de l'acquisition, on veillera à ce qu'il y ait au moins trois cibles visibles depuis deux stations à consolider. La distribution de ces cibles dans l'espace est importante sur le résultat de la consolidation. L'opérateur veillera à ne pas les placer sur un même axe, afin d'éviter tout cas défavorable et une consolidation peu fiable (si les cibles sont alignées, un axe de rotation n'est pas fixé). Même si deux cibles suffisent dans le cas où le scanner est calé et que le compensateur est activé, un nombre plus élevé de cibles est cependant souhaitable, d'une part pour assurer la redondance des observations et d'autre part pour faciliter le positionnement des cibles sur le terrain.

Consolidation basée sur les nuages de points

Ce principe de consolidation consiste à trouver automatiquement un certain nombre de points "homologues" dans les nuages de points que l'on envisage de consolider (figure 6). Des points "homologues" n'existent pas dans le sens strict du terme, car chaque nuage étant défini par un pas horizontal et un pas vertical particuliers, les probabilités qu'un même point à la surface d'un objet soit scanné depuis deux stations différentes est faible.

En plus de cette contrainte de haute densité, l'assemblage basé sur les nuages fonctionne correctement à condition que la zone commune soit importante, que la géométrie dans les nuages le permette (assemblage plan/plan impossible), que les éléments scannés ne bougent pas d'une station à l'autre (arbres, voitures...), etc.

Dans un souci d'automatisation, les chercheurs tentent de concevoir des algorithmes de consolidation en limitant le recours à l'intervention humaine. Il existe deux familles de méthodes : les méthodes effectuant une recherche de points

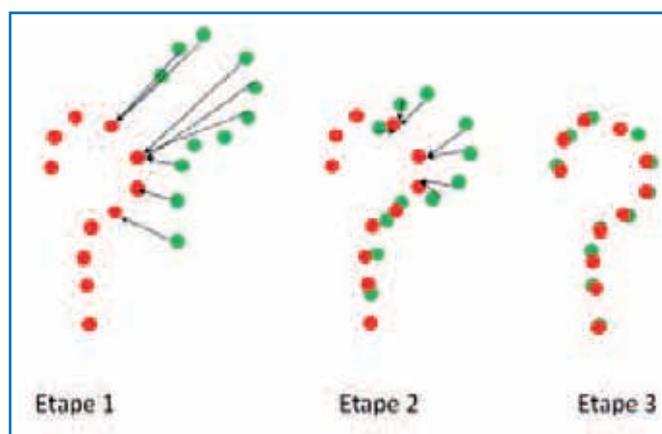


Figure 5. Recherche de points "homologues" sur deux nuages de points à consolider, à partir d'un processus d'ICP (les flèches désignent les points les plus proches dans le nuage de référence) ; en rouge : nuage de référence ; en vert, nuage à consolider.

"homologues" entre nuages et celles basées sur la recherche d'entités géométriques homologues.

a - Méthodes basées sur la recherche de points "homologues"

La méthode ICP (*Iterative Closest Point*) a été proposée par (Besl et Mc Kay, 1992) et est probablement la méthode la plus fréquemment employée dans les logiciels réalisant une consolidation automatique entre deux modèles géométriques. Elle cherche à minimiser la distance entre deux nuages, par itérations successives. La consolidation par ICP exige de définir un nuage de référence (fixe) par rapport auquel se déplaceront les autres nuages à consolider. Si les points homologues dans les deux nuages n'existent pas, l'algorithme tente de remplacer le point homologue par le point le plus proche, d'où le nom de la méthode. La figure 5 illustre de façon simplifiée le processus itératif de l'ICP. Besl et Mc Kay (1992) ont étudié les relations mathématiques permettant de définir le point le plus proche spatialement d'un autre point connu. Ils considèrent que la distance entre un point et un ensemble de points est définie par celle minimale entre ce point et chaque point de l'ensemble. Le point de l'ensemble qui permet le calcul de ce minimum sera considéré comme étant le plus proche. Supposons que R soit la matrice de rotation et que T soit le vecteur de translation.



Figure 6. Consolidation de deux nuages (mur d'enceinte de Ribeauvillé, Alsace).

▶ La fonction f à minimiser est décrite par l'équation suivante (Besl et Mc Kay, 1992) :

$$f(R, T) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|x_i - R \cdot p_i - T\|^2$$

Avec : R : matrice de rotation

T : vecteur de translation

N_p : le nombre de points du nuage le moins dense, situés dans la zone de recouvrement

x_i : un point du nuage de référence

p_i : son homologue dans le nuage à consolider

Pour pouvoir résoudre, par les moindres carrés, le système surdéterminé que représente l'équation précédente, on procède tout d'abord à la linéarisation de cette équation. Une fois les paramètres de transformation calculés, le nuage à consolider subit la transformation, puis les étapes précédentes sont réappliquées de manière itérative jusqu'à ce que les distances ne dépassent plus un certain seuil.

Les inconvénients principaux de la méthode de l'ICP dans sa forme originale sont d'une part qu'elle risque de converger vers un minimum local et non pas global, surtout lorsque les données sont très bruitées. D'autre part, un grand nombre d'itérations est nécessaire à la convergence du modèle. Plusieurs solutions constituant des variantes de l'ICP ont été mises en œuvre pour surmonter ces inconvénients. Mais, en dépit de toutes les études qui essaient de trouver automatiquement les valeurs initiales de l'algorithme ICP et d'accélérer sa convergence, son utilisation reste encore semi-automatique, en laissant la main à l'utilisateur pour sélectionner trois points homologues dans les deux nuages. Avec ces points de départ, il est possible de calculer des valeurs approchées des paramètres d'une transformation initiale, (3 rotations, 3 translations), pour ensuite démarrer les itérations et converger vers les paramètres compensés de la transformation finale.

La méthode DARCES (*Data-Aligned Rigidity-Constrained Exhaustive Search*) est une autre méthode conçue pour effectuer une consolidation nuage-nuage. Le lecteur pourra se référer aux travaux de (Chen et al., 1999).

b - Méthodes basées sur la recherche d'entités géométriques

Ces méthodes ont pour objectif de chercher non plus des points, mais des entités géométriques homologues dans deux nuages à consolider, dans l'hypothèse où elles ont été extraites préalablement du nuage considéré. Les entités géométriques sont de type sphères, cylindres, plans ou droites (arêtes). Lorsque les appariements entre ces entités sont exacts, ces méthodes n'exigent pas la définition de

valeurs approchées pour initialiser le calcul des paramètres les plus probables de la transformation permettant de lier les deux nuages. Toutefois, leur handicap est leur dépendance de détails locaux proéminents ou saillants. S'ajoute à cet inconvénient celui du temps de traitement nécessaire pour extraire les entités et pour les sauvegarder. Pour plus d'informations au sujet de la consolidation par recherche de surfaces 3D ou d'arêtes, le lecteur pourra par exemple se reporter aux travaux de (Akca et Gruen, 2007), (Mian et al., 2006), (Sappa et al., 2001).

Laquelle des deux consolidations faut-il privilégier ?

La tendance est à la combinaison des deux. C'est-à-dire qu'une première consolidation est effectuée sur la base des cibles, puis cette consolidation s'affine sur la base des nuages. La première consolidation fournit ainsi les paramètres d'initialisation du calcul itératif de l'ICP. Cette solution est conseillée lorsque les nuages à consolider ont été acquis avec des scanners à différence de phase. Ceux-ci nécessitent de positionner les cibles dans un rayon de 10 à 20 m, tandis que les nuages sont acquis à une portée allant jusqu'à 100 m parfois.

■ Géoréférencement direct

La question de la consolidation ne se pose pas lorsque le scanner est prévu pour être centré sur un point et orienté, selon un mode opératoire identique à la mise en station d'un tachéomètre. On peut alors obtenir directement les coordonnées réelles des points numérisés au moment de leur relevé (points rayonnés). Par conséquent, le nuage de points acquis depuis une station est directement géoréférencé au moment de l'acquisition. De la même manière, les différentes stations de scannage seront ramenées dans le même système de référence et la totalité des points seront regroupés. La figure 7 montre le réseau de polygonation mis en place pour permettre la numérisation du lycée des Pontonniers de Strasbourg. La figure 8 présente les nuages de points colorés en fonction des stations et couvrant une partie du bâtiment principal du lycée. L'ensemble des nuages, géoréférencés sur place, a permis de visualiser sur le terrain, sans post-traitement, l'ensemble du bâtiment scanné.

D'après Reshetyuk (2009), l'approche de géoréférencement direct est plus largement acceptée par la communauté des topographes, car elle rejoint les pratiques professionnelles conventionnelles. Toutefois, l'imprécision inhérente au réseau de points sur lequel s'appuieront les relevés, se répercute sur la position des nuages et peut dans certains cas

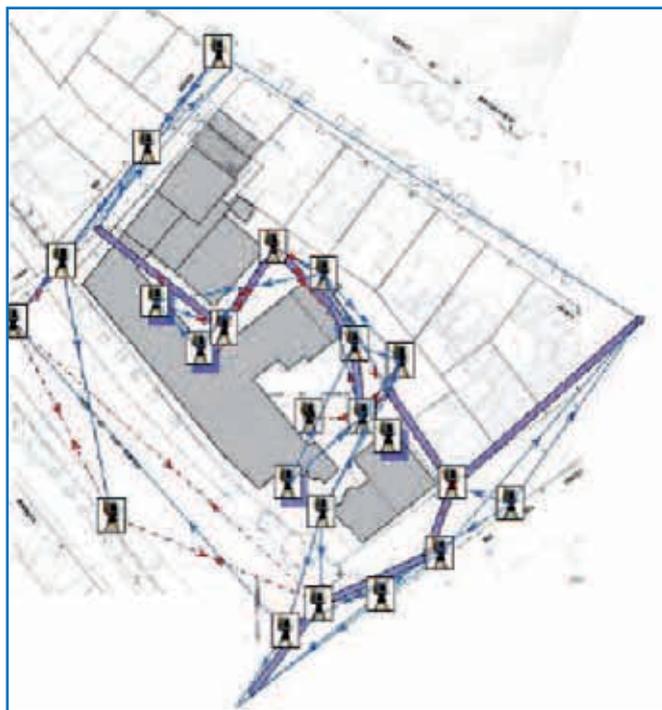


Figure 7. Réseau de polygonation mis en place pour scanner le lycée de Pontonniers (Strasbourg).

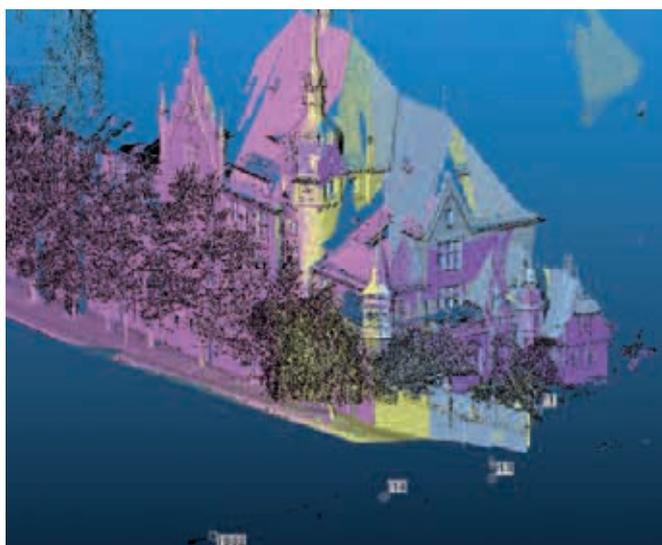


Figure 8. Géoréférencement direct de chaque nuage dès l'acquisition (Queste, 2006).

nécessiter une consolidation plus fine de nuages adjacents. En revanche, contrairement à ce qu'exige un géoréférencement indirect, un chevauchement important entre nuages n'est pas nécessaire, ce qui devient un atout en termes de productivité et de gestion de volumes de données.

Pré-traitement du nuage de points et premiers produits

■ Pré-traitement

La phase de pré-traitement est souvent une étape nécessaire à l'obtention de données cohérentes. Son objectif est de réduire le bruit dans le nuage et d'appliquer un processus de

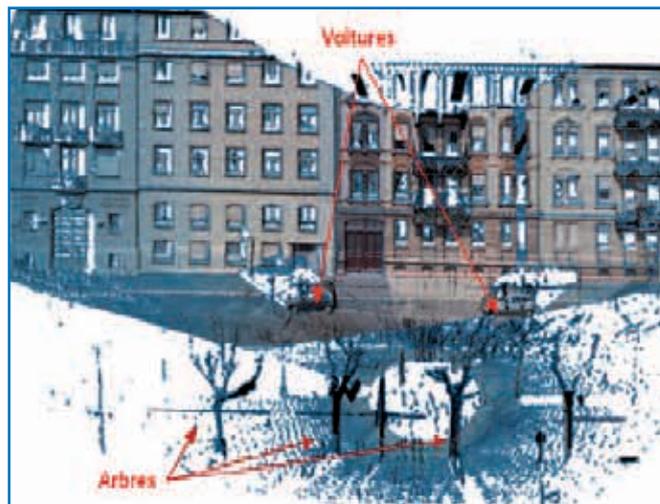


Figure 9. Pré-traitement d'un nuage de points : points indésirables dans la scène (arbres, voitures...).

correction et/ou de suppression de points faux et indésirables dans le nuage, afin de ne conserver que les points d'intérêt pour le projet.

Si le nuage est affecté d'un bruit important, il est détectable en analysant l'épaisseur du nuage de points obtenu en scannant une surface plane, de faible rugosité et claire. Ce problème complique la digitalisation directe dans le nuage de points, car avant de réaliser une coupe, il faut au préalable ajuster le nuage de points par une surface moyenne. Il peut alors être nécessaire de le filtrer avec des outils de filtrage comparables à ceux employés en traitement d'images, visant à réduire la fréquence spatiale. Un exemple de méthode de débruitage est présenté dans Smigiel et al. (2011)

En plus du bruit inhérent aux mesures, des points indésirables sont relevés lorsque des objets sont situés entre la station et l'objet à scanner (en extérieur, présence d'obstacles tels que véhicules, arbres, piétons) comme l'illustre la figure 9. D'autre part, en scannant une façade disposant d'ouvertures transparentes, telles que portes vitrées et fenêtres, le faisceau laser pénètre dans les pièces jusqu'à son interaction avec une cloison opaque. Ainsi sont créés des points situés à l'intérieur des locaux. Ces points sans intérêt peuvent être écartés par segmentation (voir paragraphe suivant).

Le problème des ombres portées par les éventuels obstacles situés devant la façade, peut partiellement être contourné par la multiplication des stations (comme en photogrammétrie). Mais, si la multiplication des stations s'avère indispensable pour contourner les masques, elle soulève le problème du recouvrement entre nuages. La densité devient ainsi très importante dans ces zones de recouvrement, ce qui alourdit encore davantage le nuage de points. Les logiciels de traitements de nuages de points disposent d'outils d'échantillonnages automatiques permettant d'homogénéiser le nuage de points en se basant sur une densité de points fixe pour l'ensemble du nuage. D'autres types d'échantillonnages basés sur l'intensité des points, la topographie, les discontinuités dans le nuage sont généralement mis à disposition de l'utilisateur.





Figure 10. Nuage de points colorisé du Château d'Andlau (Alsace). Partenariat INSA/Imag'Ing - vidéo sur www.imag-ing.com

■ Produits dérivés

A ce stade, le nuage de points constitue déjà un produit en soi. Il est très précieux dans sa forme brute, pour plusieurs raisons. Visuellement, lorsque le nuage de points est colorisé et suffisamment dense, l'effet produit par ce type de rendu est saisissant (figure 10) et peut servir évidemment à des fins de communication (création de vidéos, d'animations). Il peut également servir de support à la mesure (voir figure 11a). La plupart des utilisateurs de données laser exploitent le nuage de points pour en extraire généralement l'information utile à la génération de plans en 2D. Ainsi les outils de coupes, de création de profils, associés à des outils d'extraction de droites moyennes sont employés communément pour aider à la digitalisation dans le nuage de points (figure 11b). Par ailleurs, un nuage de points archivé est une source d'informations précieuse, car il reste exploitable (extraction d'autres plans que ceux commandés initialement), sans nécessiter de reprise sur le terrain. Enfin, le nuage de points est employé de plus en plus souvent comme support d'intégration de projets de CAO en milieu industriel (figure 12).

Des logiciels de visualisation et de mesure spécifiques voient le jour, comme par exemple les visualiseurs Web "TruView" (Leica TruView & Cyclone Publisher) ou "Scene

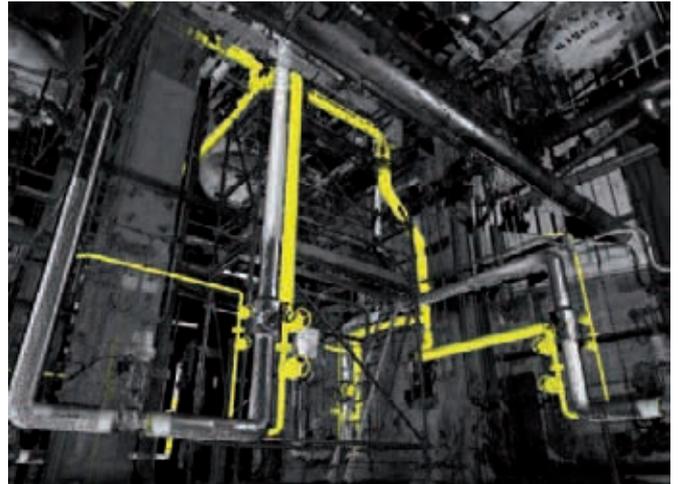


Figure 12. Intégration d'un modèle CAO dans un nuage de points en milieu industriel, analyse d'interférence (propriété Imag'ing).

Webshare" (Faro). Ce genre d'outils permet non seulement de naviguer dans le nuage de points tel que vu depuis la station, mais aussi d'y effectuer des mesures, d'associer des liens à des vues, etc. (voir figure 13). Ces outils vont probablement révolutionner l'utilisation de la donnée laser, car ils valorisent l'apport de la 3D par rapport à la 2D, en donnant un accès aisé à toute la richesse d'un nuage de points, tant du point de vue de la géométrie, de l'intensité, que de la radiométrie associée aux points.

Segmentation

La **segmentation** d'un nuage de points est un partage/subdivision de l'ensemble des points 3D en sous-ensembles (sous-nuage de points) homogènes, suivant des critères prédéfinis.

Elle permet qu'un sous-ensemble de points appartenant à un même objet ou à une même surface puisse ensuite être traité, dans les étapes ultérieures, comme un objet à part.

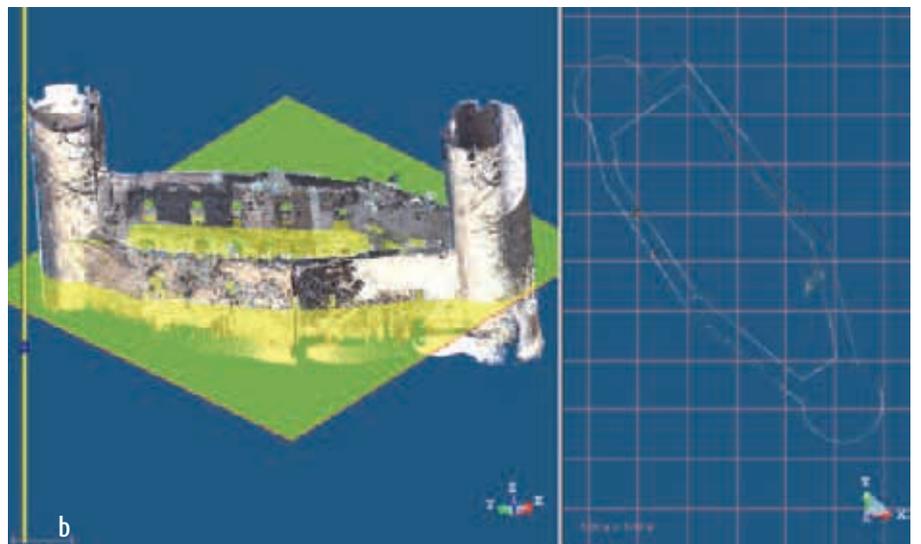


Figure 11. Le nuage de points comme support de mesure (a) ou de création de coupes (b).



Figure 13. Visualisation et annotation d'un nuage de points dans TruView (château d'Andlau, partenariat INSA-Imag'ing).

La segmentation peut être manuelle, cependant, des segmentations (semi-)automatiques sont préférées dans un souci de production. La segmentation manuelle consiste à isoler la partie du nuage de points représentant un objet spécifique (ex. : arbres devant façade d'étude), avant de le traiter. Des méthodes de segmentation semi-automatiques ou automatiques consistent à isoler les points répondant à des caractéristiques particulières (classe d'intensité, direction de la normale au point, position par rapport au sol, etc.).

Les méthodes de segmentation de données laser cherchent en général à détecter dans les images, des points ayant des caractéristiques similaires par rapport à leur voisinage en s'appuyant sur le principe de l'agrégation de points (par croissance de surfaces par exemple). Lorsqu'il s'agit de détecter des formes géométriques particulières (de type droite, cylindre, plan, etc.), deux algorithmes issus du domaine de la vision par ordinateur sont largement utilisés. Il s'agit du paradigme RANSAC (Fischler et Bolles, 1981) et de la transformée de Hough (Hough, 1962). Ces deux techniques ont fait leur preuve pour la détection automatique de primitives géométriques, même en présence d'une forte proportion de points aberrants. Tarsha-Kurdi et al. (2007) ont réalisé une étude comparative entre les algorithmes de Hough et de RANSAC, dans un objectif de détection automatique de plans des toits à partir de données LiDAR. Il en ressort que RANSAC est plus adapté au traitement des données laser en termes de temps de traitement et d'insensibilité au bruit affectant les nuages.

Dans une méthode basée sur la reconnaissance de primitives géométriques, les points sont supposés satisfaire aux mêmes conditions mathématiques. Par exemple, les points décrivant une surface plane rentrent tous dans le calcul de l'équation du plan passant par ces points. La figure 14b montre un exemple de résultat de segmentation appliquée



Figure 14. Segmentation d'une façade (Strasbourg) ; a) nuage de points initial, colorisé ; b) éléments plans extraits (Boulaassal et al., 2011a)

au nuage de la figure 14a. Cette approche de segmentation a été développée dans le cadre d'une thèse à l'INSA de Strasbourg (Boulaassal, 2010). La primitive recherchée au sein du nuage couvrant la façade était la primitive géométrique "plan". Dans la figure 14b, chaque couleur correspond à un segment plan extrait et chaque segment plan est défini par une épaisseur de nuage (bruit).

Modélisation

■ Types de modèles

Le but de la modélisation est de construire et créer des liens entre des points caractéristiques du nuage, afin de réaliser un tout, qui peut être un bâtiment, une façade ou tout autre objet. Selon l'usage et la destination du produit final, le modèle doit reprendre certaines caractéristiques et



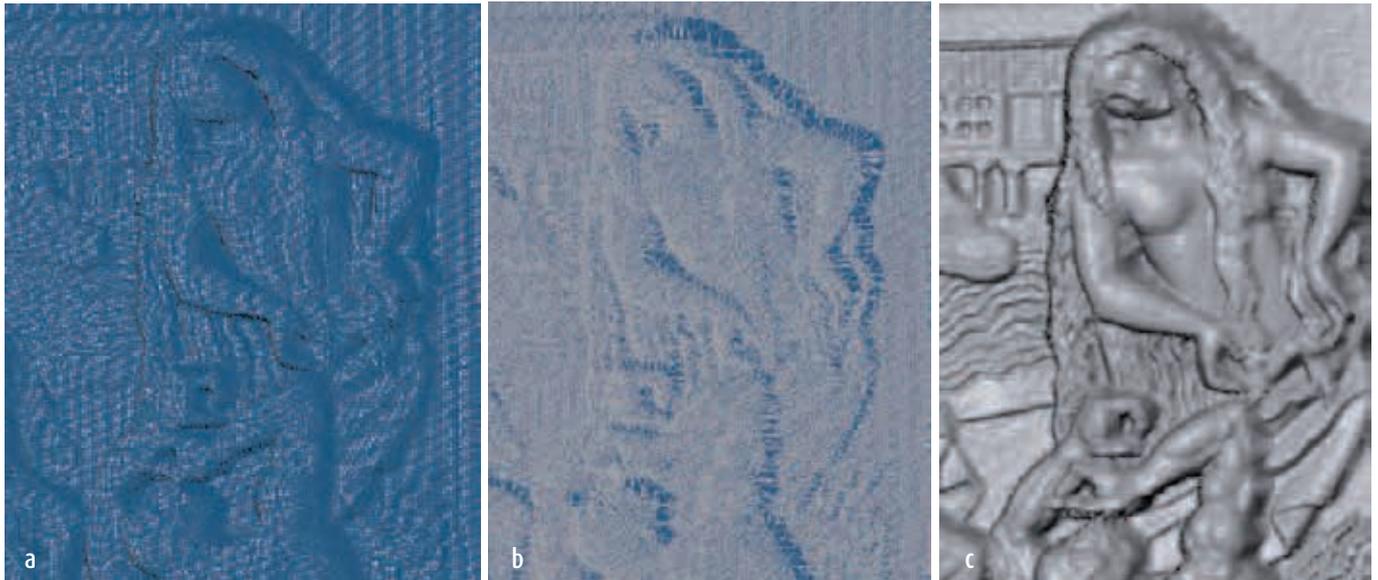


Figure 15. Maillage d'une partie de la fresque de l'INSA : a) nuage de points ; b) modèle maillé sous forme filaire ; c) modèle maillé surfacique avec ombrage.

propriétés de l'objet réel. Dans la littérature, une distinction est faite entre le modèle "reconstruit", le modèle "tel que construit" et le modèle "tel que saisi" (www.tplm-3d.fr).

- Le modèle "**reconstruit**" ou "restitué" est le modèle 3D, souvent utilisé en archéologie, pour la représentation des reconstitutions de vestiges en états fragmentaires. Dans ce cas, le modèle élaboré à partir des relevés seuls est complété par l'expertise des archéologues ou architectes, pour aboutir au modèle complet reconstitué.

- Le modèle "**tel que saisi**" représente l'objet d'étude tel qu'il est au moment de l'acquisition des données. Les informations nécessaires à sa construction sont celles issues du relevé de l'objet uniquement. C'est une construction fidèle à l'objet en l'état, au moment de sa mesure.

- Le modèle "**tel que construit**" est élaboré sur la base de plans ou de connaissances de l'objet, en plus d'éventuelles mesures effectuées sur celui-ci, sans aucune extrapolation, ni aucune hypothèse. Il s'agit de représenter l'objet dans son état idéal, tel qu'il était juste après sa construction.

Les techniques de modélisation couramment utilisées et intégrées aux logiciels de traitements de nuages de points sont les méthodes de modélisation par maillage et les méthodes de modélisation géométrique.

■ **Principe de la modélisation par maillage**

La modélisation par maillage est utilisée principalement pour représenter des objets difficiles à paramétrer du point de vue mathématique (géométrie complexe). Contrairement au nuage de points, qui décrit l'objet à partir de points sans connexion entre eux, le modèle maillé génère une surface en reliant les points entre eux. Les algorithmes sur lesquels ces méthodes s'appuient sont en général des algorithmes de triangulation (de Delaunay) ou des algorithmes basés sur la méthode des éléments finis (George et Borouchaki, 1997). Des facettes sont ainsi construites entre les différents points du nuage. L'avantage d'un maillage est d'aboutir à des

modèles très fidèles à l'objet relevé, puisqu'ils esquissent son allure réelle. Ces modèles rentrent ainsi dans la catégorie des modèles "tels que saisis". La figure 15 montre le résultat d'une modélisation par maillage d'une partie de la fresque de l'INSA (vue dans XYZ n°128 page 37). Le rendu peut être envisagé sous forme de modèle filaire (figure 15b) ou de modèle maillé surfacique (avec facettes colorées), comme l'illustre la figure 15c. A ce stade, sur la base du maillage surfacique, il est envisageable d'y appliquer une texture (voir paragraphe sur le texturage).

L'inconvénient majeur des maillages réside dans la lourdeur des fichiers créés. Les données n'y sont pas optimisées, c'est-à-dire que la surface d'objets à géométrie simple est représentée par des triangles de même taille que ceux décrivant des surfaces complexes. Pour optimiser le nuage, il faudrait en post-traitement, simplifier les zones où les triangles sont plus nombreux que nécessaire (parties planes par exemple). Pour ces raisons, lorsque l'objet et le cahier des charges le permettent, il est judicieux d'avoir recours aux techniques de modélisation géométrique.

■ **Principe de la modélisation géométrique**

La modélisation géométrique est basée sur la construction géométrique d'éléments identifiables et descriptibles d'un point de vue mathématique dans le nuage de points. Elle



Figure 16. Exemple de modélisation géométrique : a) Photographie ; b) Nuage de points ; c) Modèle géométrique (Begrliche, 2003).

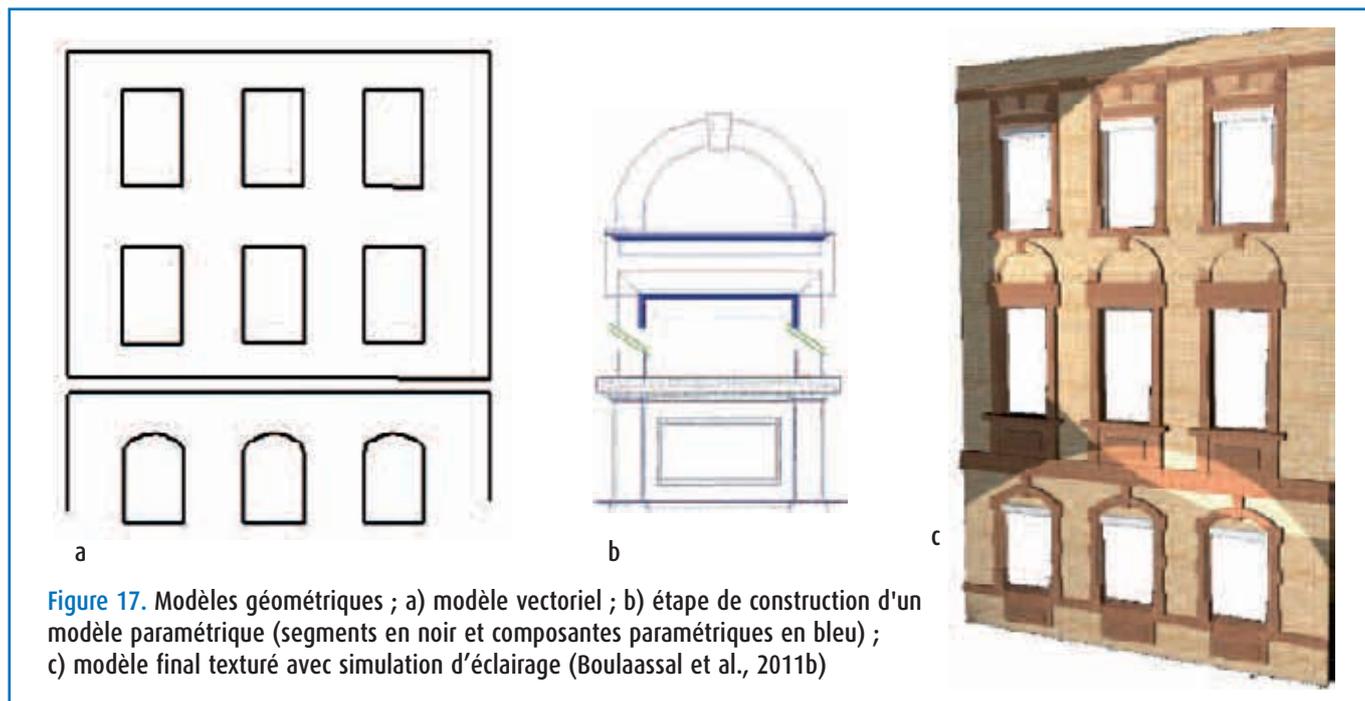


Figure 17. Modèles géométriques ; a) modèle vectoriel ; b) étape de construction d'un modèle paramétrique (segments en noir et composantes paramétriques en bleu) ; c) modèle final texturé avec simulation d'éclairage (Boulaassal et al., 2011b)

consiste à représenter l'objet à l'aide de primitives géométriques (plan, cylindre, sphère...) que l'algorithme développé tente de faire correspondre au nuage de points. L'objet de la figure 16 est modélisé à l'aide de deux primitives géométriques : le plan et le cylindre. L'ensemble du nuage étant réduit à de simples formes géométriques décrites par quelques paramètres, les fichiers ainsi générés sont bien plus légers que dans le cas d'un modèle maillé. Par ailleurs, le modèle résultant de la modélisation géométrique est plus sobre d'un point de vue esthétique. Il représente l'objet sous une forme géométrique "parfaite", sans les dégradations qu'il a pu subir au fil du temps, donc dans l'état dans lequel il était lors de sa construction ou de sa conception. C'est pourquoi ces modèles rentrent dans la catégorie des modèles "tels que construits". Le rendu d'un modèle géométrique peut être sous une forme surfacique (facettes) ou volumique (avec solides). Une modélisation géométrique peut être envisagée à la suite d'une segmentation, telle que celle présentée en figure 14. Le produit généré peut ainsi être un modèle vectoriel simplifié des ouvertures de la façade (figure 17a) extrait de façon semi-automatique. Un autre produit, plus élaboré que le précédent, est également envisageable (figures 17b et c). Ce dernier produit est issu d'une modélisation paramétrique interactive, consistant à mettre à l'échelle, grâce notamment aux intersections de plans et droites détectés à l'issue de la segmentation, chaque composante paramétrique architecturale décrivant la façade (Boulaassal et al., 2011b).

Suivant la situation et le niveau de complexité des objets numérisés, il peut être judicieux de combiner les modélisations par maillage et par primitives géométriques.

Pour information, des outils gratuits comme par ex. Meshlab ou Cloudcompare (EDF) permettent aux utilisateurs de nuages de points de manipuler et traiter les données, indépendamment des solutions commerciales.

Texturage du modèle 3D

Après avoir calculé un modèle 3D ou 2D à partir d'un nuage de points laser, il peut être opportun d'associer un rendu aux facettes ou primitives géométriques générées. Ce rendu est envisageable sur la base :

- D'une texture quelconque, décrite soit par une couleur avec un effet d'ombrage associé, soit par un motif choisi dans une bibliothèque de textures (motif de pierres, de tuiles, etc.).
- D'une texture réaliste, obtenue à partir d'images numériques. Les images numériques sont généralement acquises en parallèle au nuage de points, soit via une caméra intégrée au scanner, soit via une acquisition post balayage laser. Le produit résultant est appelé modèle "photo-réaliste" (figures 18 et 19). Ce rendu est généralement fortement apprécié des commanditaires, mais génère des fichiers plus volumineux qu'avec un texturage simple.

La colorisation du nuage de points est automatique si la caméra est intégrée au scanner, car le système connaît la position et l'orientation de chaque image du panorama. La colorisation des pixels peut être effectuée avant ou après l'étape de consolidation.

Des photos réalisées en parallèle au balayage laser ou des photos d'archives peuvent également être utilisées pour la colorisation du nuage de points. Pour associer les photos au nuage de points, le calcul préalable par relèvement spatial des orientations et positions de chaque photo est nécessaire. Une autre solution repose sur le calcul d'un panorama (assemblage de photos en recouvrement) et la projection polynomiale de ce panorama sur le nuage de points.

À l'issue de toute approche de segmentation et/ou de modélisation, une évaluation de l'exactitude et de la précision du modèle créé est indispensable. Plusieurs outils





Figure 18. Modèle 3D texturé à l'aide de photographies, Château d'Andlau, Alsace.



Figure 19. Modèle 3D texturé à l'aide de photographies, Château d'Andlau, Alsace ; aperçu du mur est du logis seigneurial.

► d'évaluation ont été explorés pour estimer qualitativement et quantitativement l'approche de segmentation et de modélisation de façades développée dans notre équipe. Le lecteur pourra consulter les travaux de Landes et al. (2012).

Applications

Dans ce paragraphe, quelques projets illustrant l'intérêt de relevés lasergrammétriques, en plus de ceux évoqués au fil de ce dossier, sont évoqués.

Projet 1 : Grotte omée des Fraux (Dordogne)

Cette grotte est constituée d'un réseau de plus de 1 km de galeries horizontales datant de l'âge du Bronze (Burens et al., 2009). Le relevé topographique 3D de l'ensemble de la volumétrie de la cavité garantissant, outre la visualisation du réseau, le géoréférencement de divers types d'informations (structurelles, archéologiques, archéométriques, relevés des parois ornées...) enregistrées dans les différentes galeries de la grotte a constitué un premier objectif. En matière de topographie, l'équipe de l'INSA a réalisé un maillage de points géoréférencés dans le système Lambert II étendu permettant l'agrégation d'informations acquises aussi bien à l'extérieur qu'à l'intérieur du réseau. L'acquisition des données laser-

grammétriques nécessaires à l'établissement du modèle 3D général de la cavité a été réalisée à l'aide du scanner à balayage Photon 120, par géoréférencement indirect. À ce jour, ce travail de numérisation permet de disposer de données sur environ 300 m de galeries.

Le travail de traitement post-acquisition des nuages de points (rééchantillonnage, consolidation, segmentation, etc.) ont été réalisés par des élèves ingénieurs à l'INSA dans le cadre de leur PFE (Grussenmeyer et al, 2010 a, 2010b).



Figure 20. A gauche, photo d'une galerie ; A droite, modèle maillé et filaire ombré (PDF-3D).

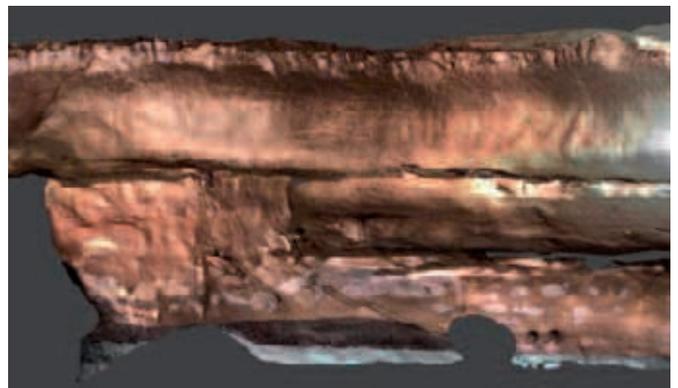


Figure 21. Modèle 3D texturé d'une paroi.

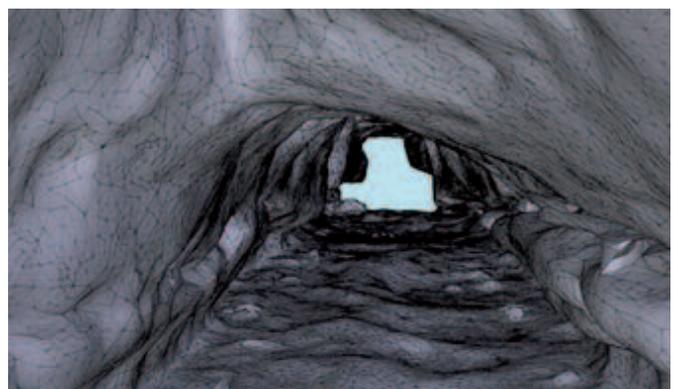
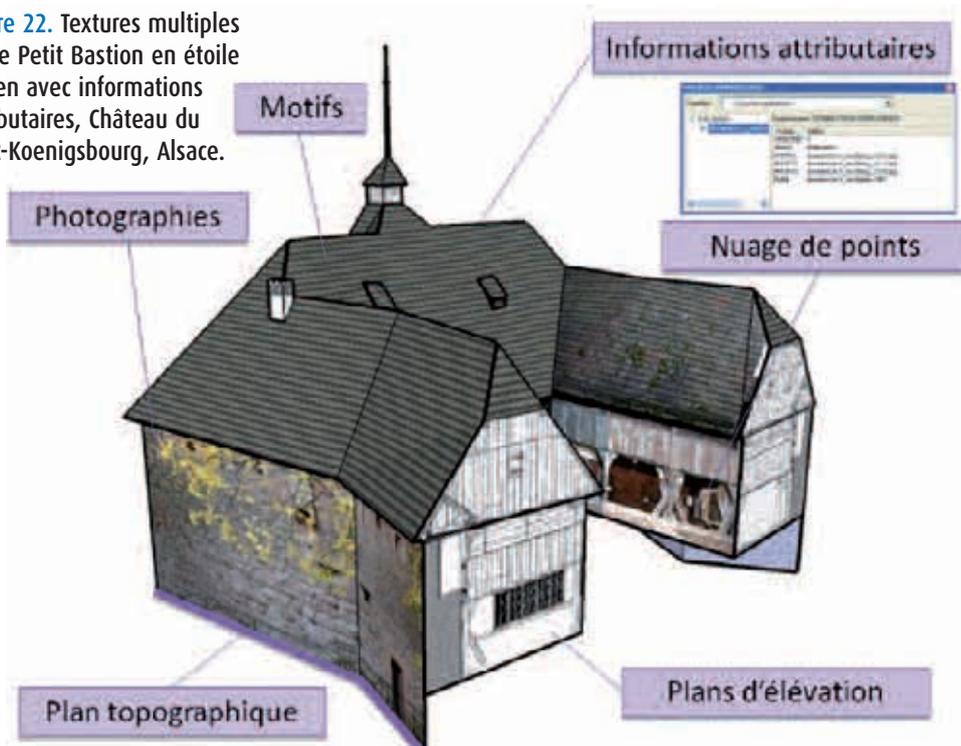




Figure 22. Textures multiples sur le Petit Bastion en étoile et lien avec informations attributaires, Château du Haut-Koenigsbourg, Alsace.



L'équipe a aussi expérimenté diverses alternatives au problème d'acquisition et de corrélation de photographies numériques de très haute résolution des panneaux ornés au modèle 3D de la volumétrie du réseau (prises de vues numériques géoréférencées par la station totale Trimble VX équipée d'une caméra interne, acquisition automatique de photographies des parois ornées par le laser scanner Photon 120 (FARO) équipé d'un kit couleur, série de prises de vues numériques à très haute résolution d'un grand panneau orné). Ce travail a été effectué à l'aide d'un boîtier Canon EOS 5D et d'objectifs 85 et 20 mm sur rotule panoramique, permettant la réalisation de vues panoramiques. Parallèlement, l'équipe a expérimenté en 2010, pour la première fois en milieu souterrain et en contexte archéologique, la dernière génération des scanners laser à bras : le Scan Arm FARO équipé de la tête laser V3, permettant de placer la tête laser à quelques centimètres de la paroi, et ce quelles que soient les conditions d'accès.

La nécessité de faciliter les échanges et la diffusion des données au sein de l'équipe, comme l'obligation de permettre une manipulation aisée des données 3D par chaque intervenant, a conduit à exporter le modèle 3D global de la grotte au format PDF-3D. Ce format présente l'avantage d'être visualisable avec le logiciel Adobe Reader. Un modèle maillé avec une densité de 1 point/cm a été volontairement généré pour présenter la géométrie de la grotte (sans les détails). Le rendu visuel est tout à fait acceptable et présente l'avantage de ne pas nécessiter l'usage d'un ordinateur ultra performant pour afficher le modèle 3D. Chaque partenaire de l'équipe peut donc disposer d'un fichier permettant une visualisation et une manipulation aisées (mesures, sections, annotations), sans matériel spécifique. Plus d'informations sur ce projet sont fournies sur le blog de la grotte des Fraux :

<http://champslibres.hypotheses.org/>

Projet 2 : Modèle 3D du château du Haut-Koenigsbourg (Alsace) - Etude d'opportunités.

Le château du Haut-Koenigsbourg a été édifié à partir du XII^e siècle et propose une vision remarquable de ce qu'était une forteresse de montagne au XV^e siècle en Alsace. Une étude d'opportunité visant à présenter les potentialités d'un modèle 3D de château a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche technologique (PRT) avec les étudiants de 5^e année de l'INSA Strasbourg.

Dans ce contexte, la modélisation d'une partie du

château, le Petit Bastion en étoile, a été effectuée en combinant différentes techniques de relevés. Pour illustrer les différentes textures envisageables, une partie de l'édifice a été habillée de plans d'élévation, de motifs issus d'une bibliothèque de symboles (tuiles, pierre...), nuage de points, orthophotoplans (figure 22). Ce modèle hybride est consultable au format PDF 3D sur le site Internet du château du Haut-Koenigsbourg (www.haut-koenigsbourg.fr/fr/chateau-alsace/decouverte).

Projet 3 : Etude et simulation d'un local à basse consommation énergétique sur le site du château d'Andlau, Alsace.

Le château d'Andlau a été édifié au XIII^e siècle et est aujourd'hui la propriété de la famille d'Andlau. Depuis fin 2006, notre équipe travaille sur la modélisation 3D de ce monument, comme le reflètent les nombreuses figures de cet article (voir aussi Landes et al., 2007 ; Landes, 2008). "



L'association des Amis du château d'Andlau ci-contre envisageait d'investir le logis principal du château d'Andlau pour y construire un local à objectifs multiples (exposition, rangement de matériel, buvette) et devant répondre à des contraintes énergétiques particulières (ni eau, ni électricité sur le site aujourd'hui). Les étudiants impliqués dans ce projet de recherche technologique se sont appuyés sur le modèle 3D du château obtenu par traitement de données laser-



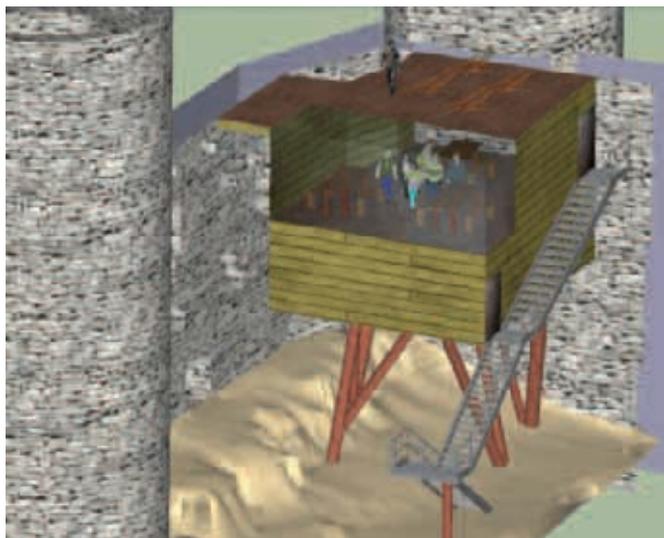


Figure 23. Intégration d'un projet de bâtiment basse consommation dans le logis seigneurial du château d'Andlau.

► grammétriques, pour y intégrer le fruit de leur étude et simuler ainsi le projet dans son environnement. Un modèle 3D simplifié du château et texturé par motifs a été privilégié afin de faciliter la navigation dans le modèle (figure 23). Site du château d'Andlau : <http://www.chateau-dandlau.com/>

Projet 4 : Cartographie mobile

De nombreux constructeurs investissent aujourd'hui dans les techniques de cartographie mobile (voir le compte rendu sur le congrès INTERGEO, page 13) en choisissant des capteurs et des processeurs embarqués de haute qualité. Les principes et systèmes existants ont été présentés dans la revue XYZ n°119 (Goulette, 2009). Contrairement aux systèmes à balayage terrestre dont la mise en station permet de décrire l'ensemble de l'espace, les systèmes embarqués décrivent des plans verticaux ou obliques et l'espacement entre les profils est généré par le déplacement du véhicule. L'INSA de Strasbourg avait développé un prototype embarquant un scanner laser terrestre 3D (prévu pour des applications statiques) pour une utilisation en mode mobile à faible vitesse. Le système intégrait des données de multiples capteurs : un GPS géodésique, une centrale d'attitude AHRS

(Attitude and Heading Reference System) de gamme moyenne, un GPS à "haute sensibilité" et un appareil photo numérique. La combinaison des différents capteurs permet d'améliorer la navigation et les calculs de trajectométrie. L'équation du géoréférencement direct a été adaptée aux particularités du scanner 3D. Le prototype développé a permis de fournir des nuages de points d'une précision de l'ordre de 10 à 15 cm à une distance moyenne de 20 m et peut fonctionner en continu à une vitesse de 2 km/h. La faible vitesse de déplacement est liée aux caractéristiques du scanner Trimble GX, initialement dédié aux applications statiques. Pour plus d'informations, consulter (Alshawa, 2010) et (Alshawa et al., 2010).

Les résultats issus des systèmes commerciaux sont impressionnants et offrent de nombreuses perspectives. Les nuages de points obtenus avec un système Optech LYNX Mobile Mapper (figures 25 et 26) ont été intégrés dans la chaîne de traitement mentionnée plus haut et visant à modéliser les façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres (figure 14).



Figure 25. Système Optech LYNX Mobile Mapper (novembre 2010).



Figure 26. Vue de dessus d'un nuage de points issu d'un relevé mobile sur 1,5 km avec système Optech LYNX Mobile Mapper (bd de la victoire, Strasbourg) ; 280 points/m² soit 1 point/10 cm (Boulaassal et al., 2011c).

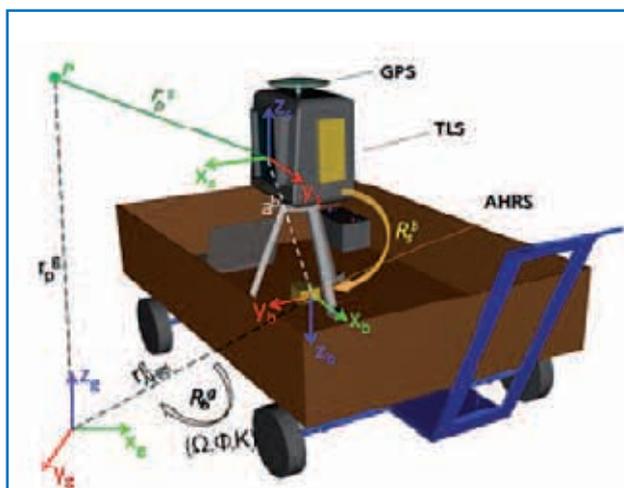


Figure 24. Prototype de système de cartographie mobile développé à l'INSA de Strasbourg et nuage de points scanné le long d'un boulevard (Alshawa, 2010).



D'autres projets dans le domaine de la numérisation du patrimoine ont été menés au sein de notre équipe et pourront être consultés dans les références (Alby et al., 2010), (Grussenmeyer et al., 2010c) ; (Koehl et Viale, 2010) ; (Landes et al., 2011).

Ces applications, étant donné le profil des auteurs, ont évidemment une connotation topographique. Il ne faut toutefois pas négliger la part de marché qu'occupe actuellement la lasergrammétrie terrestre dans les autres domaines tels que le génie civil, l'industrie, l'archéologie, l'inforsienique, etc.

Conclusion

Dans cette seconde partie sur les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre, nous avons présenté les approches de géoréférencement et les étapes principales du traitement des nuages de points à travers quelques exemples. Les nuages de points 3D constituent aujourd'hui la source de données majeure pour les travaux de numérisation. La photogrammétrie, avec le développement des techniques de corrélation épipolaire dense est souvent associée au balayage laser. Cette tendance à fusionner les sources de données issues de différents instruments montre que le métier de topographe évolue vers l'intégration de différents capteurs dans son activité de relevé.

Le traitement et la diffusion des nuages de points est un vaste sujet. Trop souvent le traitement des données se limite (à la demande de l'utilisateur) à extraire de la 2D à partir de la 3D pour revenir à des présentations conventionnelles en plans et coupes. En plus du temps de traitement qu'elles suscitent, les étapes de segmentation et de modélisation impliquent une phase d'interprétation de la donnée et qui dit interprétation, dit perte d'information brute. Pourtant, dans sa forme brute, le nuage de points dispose déjà d'atouts considérables, que des visualiseurs Web, en pleine évolution, sont en mesure de valoriser. Le format PDF-3D constitue aussi une solution intéressante pour la diffusion des modèles 3D, tout en offrant des possibilités d'édition (options de rendus, coupes, mesures). Il est important de repenser les produits au regard des technologies (un nuage de points 3D contient plus d'informations qu'un plan topographique ou une orthophoto) et inversement, d'adapter la technique au besoin. Pour un simple levé d'intérieur, il n'est sûrement pas pertinent d'utiliser un scanner !

La lasergrammétrie est aujourd'hui en forte croissance, comme en témoigne l'explosion des ventes d'instruments depuis quelques mois, avec des applications dans de nombreux domaines bien que le volume de données qui peut très rapidement atteindre des dizaines de Giga-octets constitue encore un verrou technologique.

Nous encourageons nos fidèles lecteurs à partager leurs expériences dans de futures éditions de la revue XYZ. ●

Remerciements

Les auteurs remercient les financeurs des projets (Région Alsace, Conseil général du Bas-Rhin, Association des Amis du Château d'Andlau, Ministère de la Culture et de la Communication SRA-DRAC Aquitaine).

Leurs remerciements s'adressent également aux étudiants topographes de l'INSA de Strasbourg impliqués dans les projets de modélisation évoqués : Jérôme Baert, Benoit Cazalet, Marine Degrain, Aurélien Delbecq, Rémi Gianno, Emmanuel Gouraud, Vincent Leglise, Julien Maccagnan, Nicolas Paireau, Anne-Charlotte Paul, Mathieu Petitjean, Alexandre Toubois, Julie Duchatelle (Génie climatique et énergétique) et Eva Kucerova (doctorante).

Nous tenons également à remercier les personnes ayant contribué à la relecture et à la correction de ce dossier et dont les commentaires constructifs ont permis de clarifier plusieurs points : Benjamin Outrey (Responsable des ventes et du développement de marchés - Scanner laser 3D chez Leica Geosystems), Stéphane Riolland (Ingénieur recherche et développement en optoélectronique chez Trimble).

Références bibliographiques

- AKKA D., GRUEN A., 2007.** *Generalized least squares multiple 3D surface matching*. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, Part 3 / W52, 2007
- ALBY E., ASSALI P., SMIGIEL E., 2010.** *Valorisation numérique du théâtre gallo-romain de Mandeure, dans Photogrammétrie au service des archéologues et des architectes*, Avignon, France, septembre 2010.
- ALSHAWA M., 2010.** *Contribution à la cartographie mobile : développement et caractérisation d'un système basé sur un scanner laser terrestre*. Thèse de l'Université de Strasbourg, 227 pages, <http://scd-theses.u-strasbg.fr/1746/>
- ALSHAWA M., GRUSSENMEYER P., SMIGIEL E., 2010.** *L'aspect mobile d'un scanner laser terrestre*. Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection n°192, ISSN 1768-9791. Numéro spécial "Techniques Laser pour l'étude des environnements naturels et urbains", septembre 2010, pp. 2-10.
- BEGRICHE R., 2003.** *PROFIL - du nuage de points au modèle 3D*, Mémoire de DEA, Modélisation et Simulation des Espaces Bâti, MAP-CRAI, Nancy, 2003.
- BESL P.J., MCKAY N.D., 1992.** *A method for registration of 3D shapes*. IEEE PAMI, 14(2), 239-256.
- BOULAASSAL H., 2010.** *Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres*. Thèse doctorat de l'Université de Strasbourg, <http://scd-theses.u-strasbg.fr/1785/>
- BOULAASSAL H., LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2011a.** *Reconstruction of 3D Vector Models of Buildings by Combination of ALS, TLS and VLS Data*, dans 4th 3D-ARCH International Conference on "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Trento, Italie, mars 2011.
- BOULAASSAL H., CHEVRIER C., LANDES T., 2011b.** *From laser data to parametric models: towards an automatic method for building facade modelling*, dans EuroMed 2010, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6436:42--55, 2011.
- BOULAASSAL H., LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2011c.** *Segmentation and Reconstruction of facade elements on large sites using laser mobile mapping data*. Symposium on Mobile Mapping Technology (MMT), 13 au 16 June 2011, Cracow, Pologne, 6 pages.



- BOULAASSAL H., LANDES T., GRUSSENMEYER P., TARSHA-KURDI F., 2007.** *Automatic segmentation of building facades using terrestrial laser data.* ISPRS Proceedings. Workshop Laser scanning. Espoo, Finland, September 12-14, 2007.
- BURENS A., GRUSSENMEYER P., GUILLEMIN S., CAROZZA L., BOURRILLON R., PETROGNAGNI S., 2011.** *Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux Saint Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France : approche multiscalaire.* Ecole thématique "Images et modèles 3D en milieux naturels", Collection EDYTEM, n° 12, année 2011, ISSN 1762-4304, ISBN : 978-2-918435-04-4, EAN : 9782918435044, pp.183-190.
- CHEN C., HUNG Y., CHENG J., 1999.** *RANSAC-based DARCES: A New Approach to Fast Automatic Registration of Partially Overlapping Range Images (1999)*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol 21 n 11 (1999) p1229-1234.
- FISCHLER M. A., BOLLES R. C., 1981.** *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model fitting with application to Image Analysis and Automated Cartography.* Communications of the ACM, vol. 24 n°6, pp. 381-395.
- GEORGE P-L., BOROUCHAKI H., 1997.** *Triangulation de Delaunay et maillage, application aux éléments finis.* Edition HERMES, Paris. ISBN 2-86601-625-4. 432 p.
- GOULETTE F., 2009.** *Lasergrammétrie : relevés laser urbains par systèmes mobiles de cartographie.* Revue XYZ n°119, p. 21-26.
- GRUSSENMEYER P., CAZALET B., BURENS A., CAROZZA L., 2010a.** *Close range terrestrial laser scanning and photogrammetry for the 3D documentatin of the Bronze age cave "les Fraux" Périgord, France.* Mining in European History, Special Conference of the SFB HiMAT, Innsbruck 2010, Innsbruck university press, p. 411-421.
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., ALBY E., CAROZZA L., 2010b.** *High Resolution 3D Recording and Modelling of the Bronze Age Cave "les Fraux" in Périgord (France).* ISPRS Comm. V Symposium, Newcastle upon Tyne, June 22-24, UK. Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5, pp. 262-267.
- GRUSSENMEYER P., LANDES T., ALBY E., KOEHL M., LEDIG J., SMIGIEL E., 2010c.** *La recherche en Topographie à l'INSA de Strasbourg, la 3D plus que jamais.* Revue Arts et Industries, n°263, mars 2010, pages 12 à 15.
- KOEHL M., VIALE A., 2010.** *Du relevé à la modélisation de la charpente de la Seigneurie d'Andlau et son intégration dans un système d'information historique,* dans Photogrammétrie au service des archéologues et des architectes, Avignon, France, septembre 2010.
- LANDES T., GRUSSENMEYER P., VOEGTLE T., RINGLE K., 2007.** *Combination of Terrestrial Recording Techniques for 3D Object Modelling regarding topographic constraints. Example of the Castle of Haut-Andlau, Alsace, France.* In: XXIIth CIPA International Symposium, Athens, Greece, Vol. XXI-2007 ISSN 0256-1840, pp. 435-440.
- LANDES T., 2008.** *Le château d'Andlau passé au scanner 3D.* Revue Arts et Industries n°261, août 2008, pp. 21-23.
- LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2011.** *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2).* REVUE XYZ N°128, P.39-51.
- LANDES T., BOULAASSAL H., GRUSSENMEYER P., 2012.** *Quality assessment of geometric façade models reconstructed from TLS Data.,* The Photogrammetric Record, à paraître.

LANDES T., SCHWIEN J.-J., BERGER S., PETER N., ALBY E., GRUSSENMEYER P., 2011. *Finding a suitable model for archaeologists. Application to the documentation of a compound wall of Ribeauvillé (Alsace).* In: XXIIIrd International CIPA Symposium, Prague, Czech Republic, September 12 - 16.

LERMA GARCIA J. L., VAN GENECHTEN B., HEINE E., QUINTERO M. S., 2008. *3D RiskMapping - Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning.* Editor: Universidad Politecnica De Valencia, 261 pages.

MIAN A. S., BENNAMOUN M., OWENS R. A., 2006. *A Novel Representation and Feature Matching Algorithm for Automatic Pairwise Registration of Range Images,* International Journal of Computer Vision, vol. 66, n°1, pp. 19 - 40.

QUESTE D., 2006. *Vers un processus automatique de modélisation du patrimoine architectural au moyen de données lasergrammétiques. Le savoir architectural comme principale source d'information, application au lycée des Pontonniers de Strasbourg.* Projet de fin d'études INSA de Strasbourg et Master 2 de l'Université Henri Poincaré, 88 pages.

RESHETYUK Y., 2009. *Terrestrial laser scanning: error sources, self-calibration and direct georeferencing.* VDM publishing house ltd, 161 pages.

SAPPA A., RESTREPO-SPECHT A., DEVY M., 2001. *Range Image Registration by using an Edge-based Representation.* In Proceedings of the 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems, (SIRS '01), 10 pages.

SMIGIEL E., ALBY E., GRUSSENMEYER P., 2011. *Terrestrial Laser Scanning (TLS) data denoising by range image processing.* The Photogrammetric Record, an International Journal of Photogrammetry. Volume 26 (134) : 171-189, DOI: 10.1111/j.1477-9730.2011.00631.x

TARSHA-KURDI F., LANDES T., GRUSSENMEYER P., 2007. *Hough-transform and extended RANSAC algorithms for automatic detection of 3d building roof planes from Lidar data.* ISPRS Proceedings. Workshop Laser scanning. Espoo, Finland, September 12-14, 2007.

Sites Internet

Faro : www.faro.com
 Imag'ing : www.imag-ing.com
 Leica : hds.leica-geosystems.com
 Tplm3D : www.tplm-3d.fr
 Trimble : www.trimble.com

Contacts

Tania LANDES tania.landes@insa-strasbourg.fr
Pierre GRUSSENMEYER pierre.grussenmeyer@insa-strasbourg.fr
Hakim BOULAASSAL hakim.boulaassal@insa-strasbourg.fr

ABSTRACT

In the previous edition of this journal, an article was covering the fundamentals of terrestrial laser scanning systems. The types of terrestrial laser scanners, their characteristics and errors that might affect the measurements were discussed. In this second part, we present the data processing steps, like registration, georeferencing, segmentation and modeling. Several examples of modeling projects illustrate the paper.