

Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2)

■ Tania LANDES - Pierre GRUSSENMEYER

Ce premier dossier a pour objectif de présenter les principes fondamentaux régissant l'utilisation des scanners laser terrestres, d'établir des définitions des notions qui s'y rapportent, d'évoquer les erreurs susceptibles d'affecter la qualité des données. Un second dossier, publié dans le prochain numéro, traitera des opérations d'acquisition, de traitements de données acquises par scanner laser 3D, pour finalement présenter quelques applications de la lasergrammétrie terrestre. Les fondamentaux que nous souhaitons présenter dans ces pages ont été rédigés principalement à partir d'une compilation d'ouvrages ou d'articles servant de référence et que le lecteur retrouvera dans le paragraphe "références bibliographiques" spécifique à chaque dossier. Des compléments ont été apportés et des adaptations ont été effectuées sur la base de l'expérience acquise depuis une petite dizaine d'années par la spécialité topographie de l'INSA de Strasbourg. Les deux parties composant ce dossier ne sauraient cependant se substituer aux récents ouvrages de référence sur le sujet (Vosselman & Maas, 2010 ; Reshetyuk, 2009 ; Shan & Toth, 2008 ; Lerma Garcia et al., 2008 ; Li et al., 2008).

Un second objectif visé par la publication de ces dossiers est de susciter l'aide des lecteurs à l'élaboration d'un lexique terminologique sur la lasergrammétrie terrestre. L'AFT souhaite ainsi compléter l'actuel lexique topographique, que vous êtes nombreux à consulter quotidiennement (www.aftopo.org/FR/Lexique-7.html). Une rubrique dédiée à ce chantier vient d'être créée sur le site et listera le nom des personnes contribuant à son élaboration. Nous vous y soumettons une série de définitions, qui serviront de base de discussion. Vos commentaires seront les bienvenus à l'adresse lexique@aftopo.org.

Introduction à la technique du balayage laser terrestre

Si dès la fin des années 60, le laser est employé dans le secteur médical et industriel, il faut attendre les années 80 pour voir se développer les premiers prototypes de scanners laser terrestres 3D. Depuis cette époque, d'énormes progrès ont été réalisés dans le but notamment de populariser la technique. Les appareils deviennent plus conviviaux, les algorithmes plus puissants et les logiciels de traitements plus performants. Un bilan sur les 20 premières années de développement de capteurs lasers pourra être consulté dans (Blais, 2004). Même si l'investissement reste conséquent, le coût de la technique a également beaucoup évolué (à la baisse) ces dernières années.

L'action visant à relever un objet à l'aide de cette technologie sera nommée "scannage" ou "balayage laser" ou "numéri-

sation 3D" (on évitera l'emploi du terme anglais "scan"). L'engouement pour cette technique de balayage laser se ressent dans de nombreux domaines, couvrant le large champ des sciences de l'ingénieur. On peut citer celui de la topographie classique (relevé de terrains, de façades, métrologie, auscultation, suivi d'ouvrages), le domaine du patrimoine (conservation, restauration, archivage du patrimoine architectural et archéologique), le domaine industriel (automobile, pharmaceutique, aéronautique, mécanique...), informatique (vision assistée par ordinateur, réalité virtuelle et augmentée), ou encore celui des sciences judiciaires (scènes de crime et d'accident), etc.

L'appareil concerné – et là se pose déjà la question de la terminologie à employer – sera nommé "scanner laser terrestre". Il s'agit d'un système actif utilisant la lumière laser comme support d'information. Cette technologie a déjà fait et fera encore couler beaucoup d'encre, en raison

■ MOTS-CLÉS

Scanners laser terrestres, balayage laser, résolutions angulaire et spatiale, impulsions, différence de phase, triangulation, qualité des données, spécifications

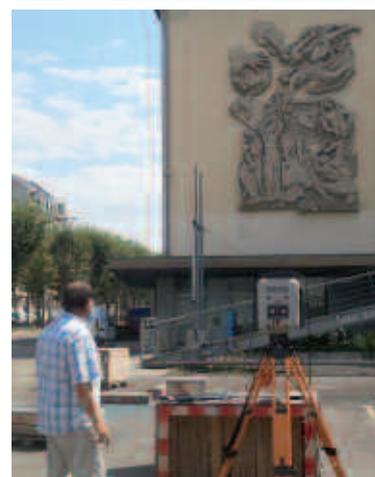


Figure 1. Acquisition d'un nuage de points sur la fresque de l'INSA de Strasbourg.

► du grand nombre d'atouts dont elle dispose : elle permet la saisie rapide et automatique de points en 3D avec une densité très élevée, et tout ceci, sans contact direct avec l'objet d'intérêt. Ainsi, l'accès aux zones dangereuses n'est plus indispensable pour effectuer des relevés. De plus, en saisissant d'énormes quantités de données en un temps réduit, l'emploi de cette technique permet souvent de gagner du temps et d'éviter, par l'exhaustivité des informations acquises, des retours sur le terrain pour compléter certaines parties. En termes de livrables, les nuages de points constituent à eux seuls un rendu intéressant, mais servent aussi de base à l'extraction de divers types de produits 2D (profils, coupes, plans) et 3D (modèles numériques de surface, modèles numériques de terrain, modèles numériques d'élévation).

Malgré l'aspect révolutionnaire que l'on souhaite lui associer, la technique lasergrammétrique ne risque pas de mettre fin à l'emploi des techniques topographiques conventionnelles (levé par stations totales, GPS), car, par exemple, le géoréférencement que ces dernières permettent, reste une problématique à intégrer dans la plupart des acquisitions lasergrammétriques. Le terme de technique "complémentaire" aux techniques plus classiques (tachéométrie, photogrammétrie) est probablement plus adapté et plus rassurant.

- **Techniques et méthodes topographiques conventionnelles (tachéométrie, GPS, nivellement direct)** : elles sont appropriées lorsqu'il s'agit d'acquérir des données avec une grande précision et que seule l'acquisition d'un nombre réduit de points caractéristiques est nécessaire.
- **Techniques et méthodes de télédétection ou de photogrammétrie** : elles sont appropriées pour l'acquisition de scènes larges ou complexes (et de petite taille, par technique photogrammétrique), lorsqu'un nombre plus important de points ou d'objets est requis. Les mesures sont faites sur la base de photographies, d'images satellites, aériennes ou terrestres.
- **Techniques et méthodes lasergrammétriques** : elles sont appropriées pour la collecte d'un nombre conséquent de points en 3D directement, grâce au support d'information que constitue la lumière laser. Contrairement aux méthodes de topographie conventionnelles, l'acquisition signifie le balayage de surfaces entières, au lieu de l'acquisition de points individuels sélectionnés dans l'objectif de décrire un objet.

Le balayage laser terrestre peut être effectué à partir d'une station fixe (scanner laser statique) ou d'une plate-forme mobile (scanner laser dynamique). A bord d'une plate-forme mobile, le scanner laser terrestre exige d'être accompagné des mêmes composantes que celles employées avec un LiDAR aéroporté, à savoir une centrale inertielle, et un système de positionnement par DGPS. Pour plus d'informations, le lecteur pourra consulter les travaux suivants : *Goulette, 2009 ; Alshawa et al., 2007*. Dans le reste de ce dossier, seul le balayage laser terrestre fixe sera considéré.

Quelques définitions

■ Balayage laser terrestre

Le balayage laser terrestre est une technique utilisant la lumière laser pour mesurer directement, selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre (Pfeifer, 2007, traduit en français). Comme évoqué précédemment, non seulement elle permet la saisie rapide et automatique de ces points en 3D avec une densité très élevée, mais en plus elle ne requiert pas de contact direct avec l'objet. On peut alors compléter la définition de la façon suivante :

Le balayage laser terrestre est une technique d'acquisition rapide et automatique de données tridimensionnelles utilisant la lumière laser pour mesurer directement, sans contact avec l'objet et selon une trame régulière, les coordonnées 3D des points sur des surfaces depuis une position terrestre.

L'émission du faisceau laser est effectuée à des fréquences élevées permettant l'acquisition de plusieurs milliers de points dans un laps de temps très court. Les mouvements nécessaires aux déplacements du rayon laser sont mesurés avec précision et permettent de déduire la position dans l'espace de tous les points d'impact du laser.

Les deux grandes phases amenant à un livrable sont, comme avec toute autre technique de relevé topographique, la phase d'acquisition et de traitement de données. Or, avec cette nouvelle technique, la phase d'acquisition, tout à fait rentabilisée du point de vue du nombre de points acquis par mètre carré, est en général largement moins chronophage que la phase de traitements. Le rôle de l'opérateur topographe s'en voit bouleversé, car il n'est plus le guide de la mesure. Il ne choisit pas (ou plus) les points caractéristiques des lignes décrivant l'ouvrage qu'il est censé relever. Néanmoins, son expérience est essentielle dans le choix judicieux des stations, des positions des cibles, dans le choix du pas de balayage et dans les méthodes de géoréférencement à mettre en œuvre pour que la phase de traitement soit efficace. La *figure 2*

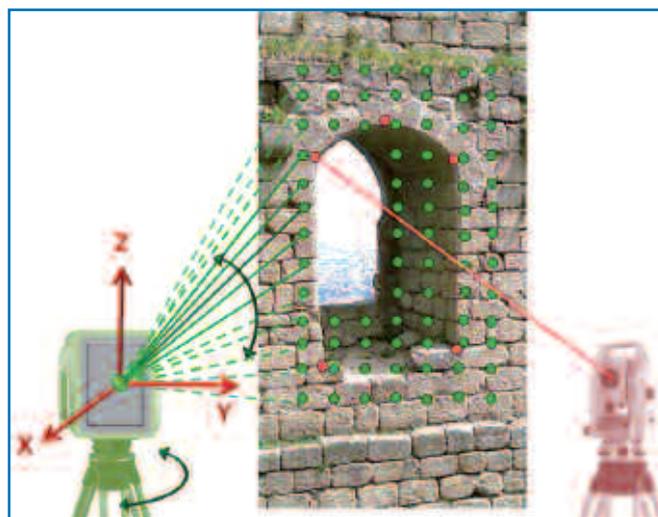


Figure 2. Relevé d'une ouverture à partir d'un scanner laser terrestre (à gauche) et au tachéomètre sans réflecteur (à droite).



illustre cette évolution. Au tachéomètre, l'opérateur lèverait la dizaine de points permettant de tracer assez fidèlement le contour de l'ouverture, tandis qu'au scanner laser, il ne choisit que la densité de points voulue et après traitement du nuage de points, pourra extraire les arêtes décrivant l'ouverture.

■ Laser

Le terme LASER, de l'anglais "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" est une source de lumière cohérente (...) qui produit une amplification de lumière par émission stimulée de rayonnements. Une source laser occupe généralement une bande spectrale très fine (lexique_topographique_AFT).

Le rayonnement émis par un laser est donc sous la forme d'un faisceau de petit diamètre au niveau de sa source (de l'ordre du mm) et de divergence réduite (de l'ordre du mrad). La divergence va déterminer l'augmentation de la taille de l'empreinte laser avec la portée.

Les longueurs d'ondes employées généralement dans le cas des scanners laser terrestres se situent entre le vert visible et l'infrarouge moyen (plus exactement entre 532 à 1535 nm pour les scanners laser à impulsions et entre 690 et 785 nm pour les scanners laser à différence de phase).

■ Nuage de points

Le nuage de points (en anglais "point cloud") est un ensemble tramé de points 3D représentant la surface relevée par l'instrument employé (qu'il s'agisse d'un scanner laser, de caméras ou d'appareils photos).

Le scanner laser mesure la distance entre le système de transmission et l'objet impacté, ainsi que l'angle horizontal et vertical au même titre que le ferait un tachéomètre. Les coordonnées sphériques (d, φ, θ) de chaque point sont ainsi définies dans un repère ayant pour origine le scanner laser (figure 3). L'ensemble des points mesurés constitue le nuage de points (en anglais "point cloud").

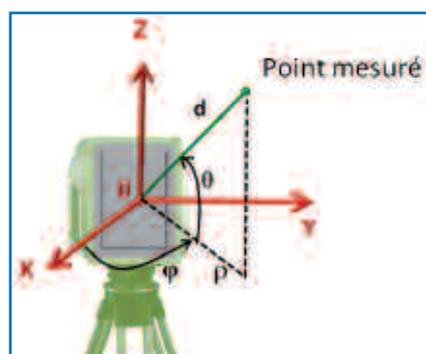


Figure 3. Mesure des coordonnées sphériques (d, φ, θ) des points d'impact, dans un référentiel centré sur le scanner

Les coordonnées tridimensionnelles X, Y, Z des points sont alors fournies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} X = d \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi \\ Y = d \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi \\ Z = d \cdot \sin \theta \end{cases}$$

Où : d : distance mesurée entre la source laser et le point sur l'objet
 φ, θ : les angles d'orientation du rayon laser

■ Résolution angulaire et résolution spatiale

Le balayage laser s'effectue selon une trame spécifique à définir au moment de l'acquisition. L'utilisateur fixe le **pas angulaire** vertical et horizontal de son choix (généralement identique dans les deux plans). Le plus petit pas angulaire disponible est appelé **résolution angulaire**.

La résolution angulaire caractérise la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes.

Par exemple, si un scanner dispose d'une résolution angulaire de 0.01° , soit $\varphi_{i+1} - \varphi_i = 0.01^\circ$ avec $\varphi \in [\varphi_{\min}, \varphi_{\max}]$ et $\theta_{i+1} - \theta_i = 0.01^\circ$ avec $\theta \in [\theta_{\min}, \theta_{\max}]$, à la surface de l'objet, ce pas angulaire se traduira par 100 points par degré.

Dans la pratique, l'utilisateur a plus de facilité à apprécier des écarts en termes de distances qu'en termes d'angles. L'exemple précédent se traduit ainsi par un espacement entre points de 2 mm à 100 m. Cela nous amène à définir la notion de **résolution spatiale**. La résolution spatiale d'un scanner laser terrestre représente le plus petit espacement entre deux points successifs que l'on puisse mesurer à l'aide du scanner laser à une distance objet-scanner fixe (voir le paragraphe Résolution spatiale p.47).

Concrètement, pour acquérir un nuage de points, l'utilisateur fixe un pas de balayage spécifique, soit en termes de pas angulaire, soit en termes d'un nombre de points/cm, à une certaine distance du scanner. Au-delà de cette distance, le pas sera évidemment plus grand et en deçà, plus petit. Par exemple, si l'utilisateur souhaite disposer d'un nuage de points présentant 1 point/cm à une portée de 10 m, le nuage de points sera moins dense sur les objets situés au-delà de 10 m.

Ne pas confondre "haute résolution spatiale" (petite espacement entre deux points successifs) et **"grande résolution spatiale"** (grand espacement entre deux points successifs), de sens opposé !

La distance d séparant le scanner laser de chaque point d'impact est reliée aux angles horizontaux et verticaux observés pour cette visée, soit $d = f(\varphi, \theta)$. Cette valeur est ensuite enregistrée dans une grille régulière 2D (matrice), dont les lignes et colonnes représentent le pas selon θ et φ , appelée aussi "image de profondeur" ou "image de distances" (figure 4).

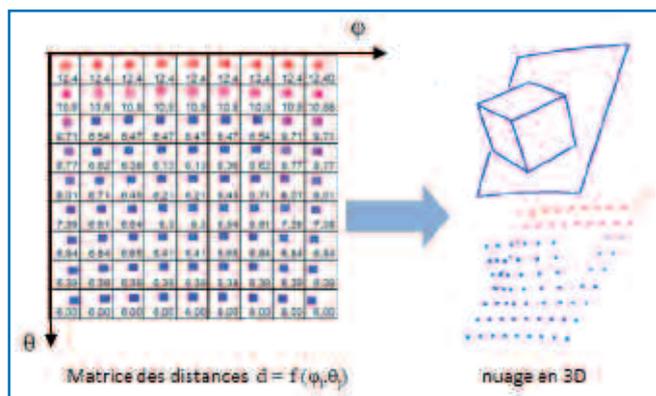


Figure 4. Enregistrement des coordonnées sphériques et nuage associé (Pfeifer, 2007 modifié)

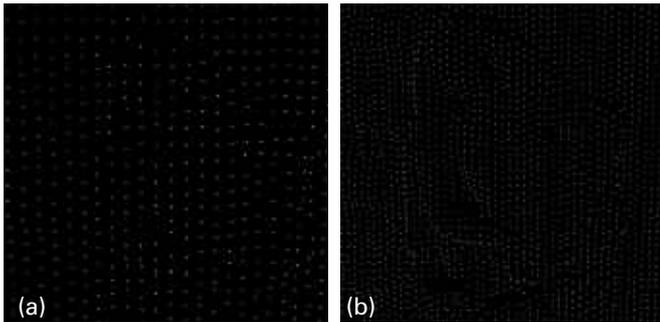


Figure 5. Effet du choix du pas de balayage sur le niveau de détail représenté (nuage de points seul) :

- a) un point tous les 100 mm à 30 m (portée effective) ;
- b) 50 mm à 30 m ;
- c) 10 mm à 30 m

► Généralement, l'utilisateur n'a pas accès aux coordonnées sphériques de chaque point. Les points du nuage lui sont fournis en coordonnées cartésiennes 3D directement.

■ Densité de points

La densité de points se réfère au nombre de points acquis par unité de surface à distance d'objet fixe. Elle est conditionnée par le choix du pas défini pour effectuer le balayage (espacement entre points) et de la distance objet-scanner. La *figure 5* présente le résultat d'un balayage laser effectué sur une portion de la fresque de l'INSA de Strasbourg, dont une photographie est présentée en introduction.

Comme le montre la figure précédente, le niveau de détails visible dans le nuage de points est directement corrélé au pas de balayage choisi et donc à la densité des points. Plus la densité est importante, plus le nuage de points décrit fidèlement l'objet scanné et plus le nombre de points sera important (fichier volumineux). Les arêtes des objets ne peuvent pas directement être scannées, pour des raisons de réflexion non maîtrisée. Elles pourront être déduites par calcul de l'intersection des primitives géométriques composant l'objet. Néanmoins, le nuage de points à haute densité s'en rapprochera a priori davantage que le nuage de points à faible densité.

Ne pas confondre "résolution spatiale" et "pas de balayage". La résolution spatiale est une limite en deçà de laquelle le scanner ne peut plus distinguer 2 objets voisins. Le "pas" est l'espacement entre points successifs choisi par l'utilisateur avant de lancer le balayage laser. La densité moyenne pourra être déduite de cet espacement rapporté à la surface scannée.

Comme l'illustre aussi la *figure 5*, le faisceau ne peut pas atteindre toutes les parties de l'objet d'étude, ce qui génère

des **ombres laser**. Pour compléter le nuage, il faudra envisager une acquisition de la partie concernée, depuis une seconde station.

■ Visualisation d'un nuage de points, intensité et RVB

Le récepteur lié au scanner laser enregistre les coordonnées cartésiennes des points et capte aussi l'intensité laser de l'onde retour. Si le scanner est, en plus, doté d'une caméra numérique, à chaque impulsion laser peuvent être associées des informations de couleur RVB (rouge, vert, bleu). L'intensité et l'information RVB trouvent leur intérêt à la fois pour la visualisation (distinction des objets, repérage), mais aussi pour faciliter les traitements visant à extraire des objets du nuage.

L'intensité laser retournée par l'objet et mesurée au niveau du scanner représente la quantité de lumière reçue après réflexion sur la surface du rayonnement laser incident (codée entre 0 et 255 ou entre 0 et 1). Comme détaillé dans (*Soudarissanane et al., 2007*), cette intensité est fonction de l'angle d'incidence du rayon, de la distance objet-scanner, de la réflectance de l'objet (albédo) – qui est différente suivant la longueur d'onde employée par le laser – et de la puissance émise. L'atténuation du signal par l'atmosphère entre également en ligne de compte. L'intensité de l'onde réfléchie donnera des indications sur la nature des objets imagés. Lors de plusieurs expériences, nous avons pu constater que les valeurs d'intensité obtenues sur un même objet ne soient pas comparables d'un scanner laser à l'autre. Il semblerait que l'intensité ne soit pas étalonnée de façon absolue par les constructeurs. Généralement, ces derniers la calibrent en fonction de la distance et de l'albédo ; de façon à ce qu'une cible d'albédo connue, vue à incidence normale et à une distance fixe du scanner en question, garde la même réponse en intensité. La *figure 6* (a) et (b) présente le nuage de points vu dans la *figure 5*,

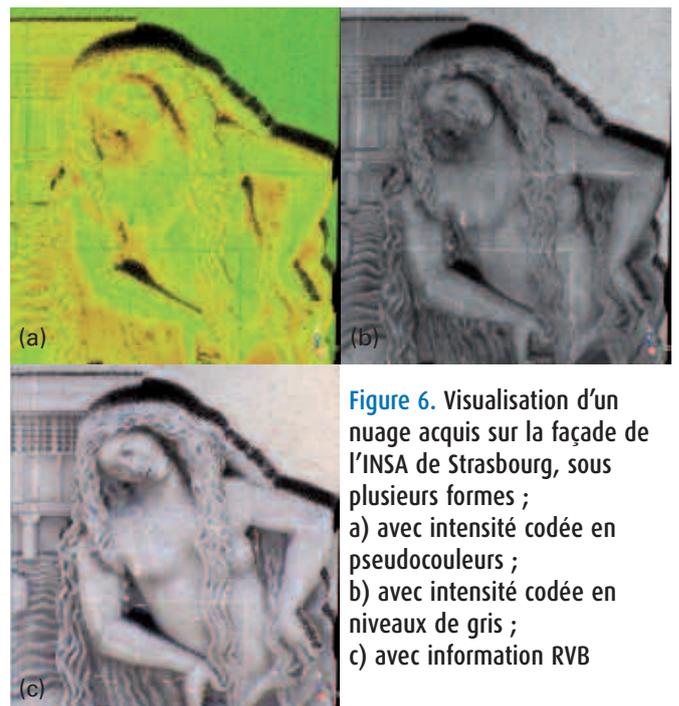


Figure 6. Visualisation d'un nuage acquis sur la façade de l'INSA de Strasbourg, sous plusieurs formes ;
a) avec intensité codée en pseudocouleurs ;
b) avec intensité codée en niveaux de gris ;
c) avec information RVB



auquel a été associée l'information d'intensité, codée en couleurs (a) ou en niveaux de gris (b). On y voit clairement ressortir les joints qui n'étaient pas perceptibles dans le nuage seul.

Les valeurs RVB (Rouge, Vert, Bleu) associées à chaque point du nuage sont, quant à elles, extraites d'une image numérique acquise sur l'objet scanné à partir d'une caméra numérique, le plus souvent intégrée à l'appareil. Le nuage de points reflète alors d'une manière plus réaliste l'objet scanné (figure 5). Pour récupérer les valeurs RVB de la photo et les associer au point correspondant dans le nuage, il faut calculer, pour chaque point laser (X, Y, Z), les coordonnées images (x', y') du pixel correspondant dans l'image numérique. Les transformations à considérer dépendent de la connaissance ou non des éléments d'orientation interne et externe de l'image. Si les données d'orientation interne et externe sont connues, on pourra se reporter à l'expression liant les coordonnées images aux coordonnées objets, lors de l'orientation d'un cliché isolé. Si ces données d'orientation sont inconnues, on pourra appliquer une transformation linéaire directe (DLT), qui nécessite la connaissance de six points d'appui au minimum sur l'objet ou un relèvement spatial sur 3 points d'appui. Les points d'appui seront ici choisis parmi les points du nuage de points.

Classification des scanners

On peut classer les scanners en fonction de leur principe de mesure de distance, classification la plus répandue dans la littérature traitant des scanners laser terrestres. Les trois grandes catégories sont les scanners à impulsions, à mesure de différence de phase et à triangulation.

■ Scanners laser à impulsions

En anglais, cette méthode d'acquisition est appelée "pulse method". Les **scanners laser à impulsions** sont équipés de distancemètres, d'un émetteur laser, d'un récepteur laser, d'une horloge, d'un émetteur et d'un récepteur optiques (Reshetnyuk, 2009). Les dispositifs de mesure sont liés à un système mécanique (miroir actionné par un moteur) permettant le balayage de l'objet étudié.

Cette technologie utilise la mesure du temps de parcours d'un rayon laser entre le scanner et le point d'impact sur l'objet visé. Les scanners laser à impulsions sont, dans le langage courant, également nommés scanners lasers "à

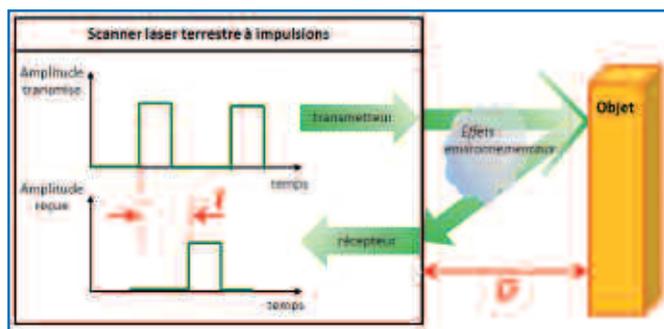


Figure 7. Mesure d'une distance par télémétrie laser à impulsions (inspiré de Wehr et Lohr, 1999).

temps de vol". Nous éviterons toutefois d'employer cette expression, car le terme de "vol" nous semble inadapté à la qualification du déplacement d'une onde dans un milieu. La figure 7 présente sous forme simplifiée, le trajet de l'onde et le temps mesuré entre l'impulsion émise et l'impulsion reçue.

Si on note D la distance station-objet, alors la distance parcourue par le rayon laser sera égale à $2D$ et est liée simplement au temps de parcours émetteur-objet de la façon suivante (Baltsavias, 1999) :

$$2D = v \cdot t$$

Où : D : distance scanner - objet
 v : vitesse de la lumière
 t : temps de parcours

Le transmetteur ne pourra pas émettre une autre impulsion avant que l'écho de la précédente n'ait été retourné, ce qui affecte la vitesse d'acquisition de ce genre de scanners.

A partir de la formule précédente et en considérant la vitesse de la lumière comme constante, on peut appliquer une transmission d'erreurs limites et écrire (Baltsavias, 1999) et (Wehr et Lohr, 1999) :

$$\Delta D = v \cdot \frac{\Delta t}{2}$$

Où : ΔD : variation sur la distance (résolution en distance)
 v : vitesse de la lumière
 Δt : variation de temps (résolution en temps)

Cette expression signifie que la capacité à mesurer de faibles intervalles de distances (résolution en distance) est directement dépendante de la capacité à mesurer de petits intervalles de temps (résolution en temps). Cette dépendance représente le grand inconvénient des distancemètres à impulsions. Sans tenir compte de l'indice de réfraction du milieu traversé, pour atteindre une résolution en distance de 1 mm, il faudrait être capable de mesurer des écarts de temps de moins de 10 ps. Cela implique l'emploi d'une horloge de haute précision, donc un investissement non négligeable en termes de coût. On retiendra que la résolution en distance atteint typiquement 3 à 4 mm pour les scanners laser à longue portée (Pesci et al., 2011).

Ne pas confondre "résolution en distance" (plus petite variation de distance mesurable), qui se mesure dans la direction normale au plan de l'objet et "**résolution spatiale**" (qui est fonction de la résolution angulaire), qui se définit dans le plan de l'objet.



Figure 8. Exemples de capteurs lasers terrestres à impulsions : de gauche à droite : LEICA HDS2500, LEICA C10, RIEGL LMS Z90, TRIMBLE GX, OPTECH ILRIS, TOPCON GLS1500 (d'après Leica, Riegl, Trimble, Optech, Topcon).

La figure 8 présente des exemples de scanners lasers à impulsions.

Si les scanners laser terrestres à impulsions sont adaptés aux mesures sur de longues portées, cette portée ne peut pas être infinie. L'incertitude de mesure de distance n'est pas complètement indépendante de la distance mesurée, car elle est tributaire aussi de l'empreinte laser, de la puissance du signal réfléchi (et donc émis), qui dépend à son tour de la réflectivité de l'objet et de son éloignement. Ainsi intervient dans l'expression de l'incertitude sur la mesure de distance, un facteur non négligeable représentant le rapport signal sur bruit (noté S/B), comme précisé dans (Baltsavias, 1999) ou (Wehr et Lohr, 1999) :

$$\sigma_D \cong \frac{v \cdot t}{2 \cdot \sqrt{S/B}}$$

Où : v : vitesse de la lumière
 t : temps de parcours de l'onde
 S/B : rapport signal sur bruit

Ces systèmes sont capables de mesurer sur de longues portées, car, par le biais de l'envoi d'impulsions, toute l'énergie est concentrée sur très peu de temps (une impulsion). Cela permet de disposer d'un rapport signal sur bruit meilleur à longue distance de l'objet et par voie de conséquence d'augmenter la précision de mesure de distance (de diminuer σ_D). On retiendra que les scanners lasers à moyenne et longue portée fournissent une incertitude sur la mesure de distance entre 3 mm et 20 mm sur une portée de 50 m (voir aussi tableau 1). Pour contourner le problème de l'emploi d'horloges de haute précision, d'autres systèmes ont vu le jour, qui eux sont basés sur la mesure de différence de phase.

■ Scanners laser à différence de phase

En anglais, cette méthode d'acquisition par mesure de différence de phase est appelée "phase shift - method". La télémétrie par différence de phase consiste à diriger vers l'objet le faisceau d'un laser (continu, de forte intensité et modulé de façon sinusoïdale), et à comparer les phases des ondes émises avec celle des ondes retour (Baltsavias, 1999). Les scanners laser employant ce principe modulent leur signal en utilisant une modulation sinusoïdale basée généralement sur l'amplitude ou sur la fréquence (Lerma Garcia et al., 2008).

La différence de phase entre le signal émis et le signal reçu est mesurée à l'aide d'un phasemètre numérique. Cette technique est similaire à la mesure de distance électronique au tachéomètre. Elle reste adaptée à la mesure d'objets peu éloignés, car elle nécessite une intensité forte en continu, ce qui n'est pas adapté à une installation à bord de plates-formes aéroportées par exemple. La figure 9 illustre le principe de mesure de distance par comparaison de phase. Les formules qui suivent sont issues d'une compilation des travaux de (Wehr et Lohr, 1999), (Maillet, 1984) et (Lerma Garcia et al., 2008).

La figure 9 montre que le signal sinusoïdal est reçu avec un temps de retard (t). Ce temps (t) est proportionnel à la diffé-

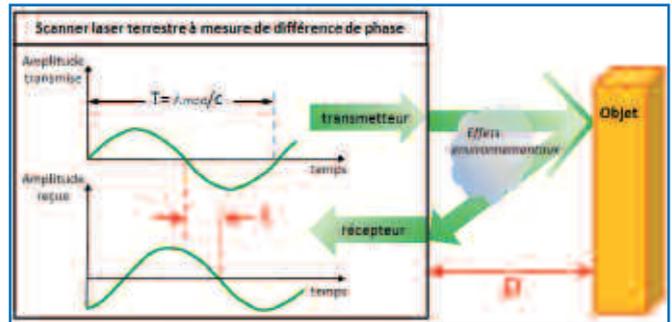


Figure 9. Mesure d'une distance par télémétrie laser à différence de phase (inspiré de Wehr et Lohr, 1999).

rence de phase $\Delta\varphi$ et s'exprime, en faisant intervenir la fréquence (connue) de modulation (f_{mod}), selon la relation suivante :

$$t = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{1}{f_{mod}} + N \cdot \frac{1}{f_{mod}}$$

Où : $\Delta\varphi$: différence de phase entre onde émise et onde reçue
 f_{mod} : fréquence de modulation du signal
 t : intervalle de temps mesuré
 N : nombre de périodes complètes formées sur la trajectoire du faisceau, entre l'émission et la réception.

Si la modulation est réalisée à la fréquence f_{mod} , on peut lui associer une longueur d'onde de modulation λ_{mod} . Lorsque le trajet total parcouru est égal à un nombre exact de longueurs d'onde λ_{mod} , les ondes comparées ont la même phase. Dans le cas contraire, on constate une différence de phase $\Delta\varphi$. On peut écrire alors l'expression de la distance scanner-objet (D) en fonction de la différence de phase :

$$2D = v \cdot t = \frac{\Delta\varphi \cdot v}{2\pi \cdot f_{mod}} + N \cdot \frac{v}{f_{mod}} = N \cdot \lambda_{mod} + \Delta\lambda_{mod}$$

Il ressort de cette formule que la distance totale parcourue $2D$ est égale à un nombre N de longueurs d'ondes plus un excédent $\Delta\lambda_{mod}$ fonction de la différence de phase. Une détermination unique ne permet pas de calculer D , puisque N est inconnu. Pour lever cette indétermination sur N , on peut diminuer la fréquence de modulation (fréquences en progression géométrique) jusqu'à obtenir $N=0$, ou émettre plusieurs fréquences assez proches pour que N ne change pas à chaque fois, ou encore superposer deux ou trois ondes avec différentes longueurs d'ondes. Si les scanners à différence de phase contournent le besoin de mécanismes d'horloges en modulant le signal, le problème consiste, ici, à compter le nombre entier N de longueurs d'ondes nécessaire au parcours aller-retour pour en déduire la distance D .

Si on ignore la contribution des N longueurs d'ondes (soit $N=0$), et que l'on divise l'expression précédente par 2, la résolution en distance devient dépendante de la fréquence de modulation du signal et de la résolution de phase ($\Delta\Phi$) :

$$\Delta D = \frac{v}{4 \cdot \pi \cdot f_{mod}} \Delta\Phi$$

Ainsi, si on augmente la fréquence, une meilleure résolution de distance (faible valeur de ΔD) peut être atteinte pour une



résolution de phase donnée (ex. : avec une fréquence de 10 MHz et une résolution de phase de 0.01 degré, on obtient une résolution en distance d'environ 0.5 mm).

La différence de phase maximale que l'on puisse mesurer est 360° , soit 2π radians. Par conséquent, si l'on considère le cas où $\Delta\varphi_{max}=2\pi$, on arrive à l'expression de la distance maximale de non-ambiguïté :

$$D_{max} = \frac{v \Delta\varphi}{4 \cdot \pi f_{mod}} = \frac{\Delta\varphi}{4 \cdot \pi} \lambda_{mod} = \frac{\lambda_{mod}}{2}$$

Pour un système employant deux fréquences, l'une de 1 MHz (longueur d'onde de 300 m) et l'autre de 10 MHz, la distance maximale de non-ambiguïté sera de 150 m (Baltasvias, 1999). Ce résultat signifie que si l'on observe des objets au-delà de cette portée, le système risque de se tromper d'un modulo 2π . Il ne sera pas capable de dire si ces objets se trouvent à la distance $\frac{\lambda_{mod}}{2}$ ou à $(150 \text{ m} + \frac{\lambda_{mod}}{2})$.



Figure 10. Scanners laser à différence de phase ; de gauche à droite : FARO LS, Focus3D (FARO) ; LEICA HDS 7000 (Leica), Z+F IMAGER® 5006i (Z+F Imager), Trimble FX (Trimble).

La figure 10 présente des exemples de scanners lasers à différence de phase.

L'incertitude sur la mesure de distance dépend de la longueur d'onde de modulation et du rapport signal sur bruit, par la relation suivante (Wehr et Lohr, 1999) :

$$\sigma_D \cong \frac{\lambda_{mod}}{4\pi \cdot \sqrt{S/B}}$$

Où : λ_{mod} : longueur d'onde de modulation
 S/B : rapport signal sur bruit

L'emploi de ce type de scanner laser est limité en termes de portée, pour les raisons citées précédemment. Il est adapté aux mesures de courtes à moyennes distances (portées inférieures à 100 m). D'après les spécifications des constructeurs, il atteint une exactitude sur la mesure de distance située entre 3 et 7 mm sur une portée de 50 m. Il est bien plus rapide (au moins d'un facteur 3) que les scanners laser à impulsions, en effectuant jusqu'à 1 000 000 pts/seconde (voir tableau 1).

Enfin, la mesure de distances par scanner laser peut également être effectuée par triangulation, comme le présente le paragraphe suivant.

■ Scanner laser à triangulation

Ces scanners laser sont adaptés pour numériser des objets à courte portée, donc des objets de petite taille généralement. Ils calculent la distance sur la base d'une résolution de triangle, d'où son appellation. La technique repose sur l'observation d'un point émis par une diode laser, à l'aide d'un

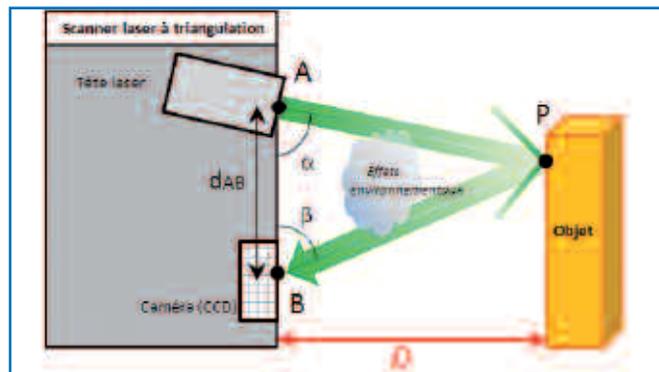


Figure 11. Principe de mesure de distance par triangulation (inspiré de mensi).

système optique récepteur, décalé par rapport à l'émetteur d'une distance d_{AB} (Maillet, 1984). Comme l'indique la figure 11, une caméra avec dispositif à transfert de charge CCD (Charge-Coupled Device) acquiert l'image du point sur l'objet. Les trois éléments (le point d'impact P, l'émetteur A et la caméra B) forment un triangle dont suffisamment de grandeurs sont connues pour en déduire les inconnues. En effet, les caractéristiques géométriques du faisceau émis ainsi que les positions respectives de l'émetteur A et du récepteur B sont connues (donc la distance d_{AB} aussi). Si l'on ajoute à ces données, la connaissance des angles α et β , le triangle (A, P, B) peut être résolu simplement, par trigonométrie.

Le scanner mesure les deux angles de déflexion α et β et calcule la distance D à un point P de l'objet, à l'aide de la relation suivante (Maillet, 1984) :

$$D = d_{AB} * \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}$$

Où : D : distance inclinée entre la source laser et le point P situé à la surface d'objet
 d_{AB} : longueur de la base séparant l'émetteur du récepteur
 α : angle entre le rayon émis et l'axe vertical
 β : angle entre le rayon réfléchi et l'axe vertical

Le défaut principal de cette technique est que l'incertitude de mesure de D augmente avec le carré de la distance. D'après (Lerma Garcia et al., 2008),

$$\sigma_D \cong \frac{D^2}{foc \cdot d_{AB}} \sigma_P$$

Où : D : Distance scanner – objet
 d_{AB} : longueur de la base séparant l'émetteur du récepteur
 σ_P : incertitude sur la position laser (dépend du type de capteur laser, l'algorithme de détection de pic, le rapport signal sur bruit et la forme de l'empreinte laser.
 foc : position effective de l'empreinte laser (longueur de la focale effective)

On retrouve dans cette expression le rapport bien connu en photogrammétrie de la base sur l'éloignement, ici D/d_{AB} . Pour diminuer l'incertitude sur D, il faudrait ainsi réduire la distance scanner-objet ou augmenter la base d_{AB} mais cela ne ferait qu'augmenter l'effet des ombres laser. Une autre piste consiste à augmenter la focale, mais cela réduirait le champ de vision de la caméra (Lerma Garcia et al., 2008). Les scanners laser à triangulation se destinent essentielle-



Figure 12. Scanner laser Soisic de Mensi (Trimble) utilisant la triangulation pour déterminer la distance.

ment à la mesure des courtes distances (jusqu'à 40 m pour le scanner laser Soisic de Mensi par exemple *figure 12*).

■ Scanners laser à bras ou à main

Les scanners laser à bras fonctionnent sur un principe très proche des scanners à triangulation, mais permettent un déplacement plus flexible autour de l'objet. Ce sont des scanners "mobiles" qui se repèrent dans l'espace selon deux méthodes principales : soit un bras mécanique, soit un système électromagnétique, tel que l'utilise le système FastSCAN (*figure 13*). De plus, ce capteur fonctionne avec deux caméras pour la mesure du signal retour.

Les scanners laser à main, sont capables de calculer "sans bras", leur position dans l'espace, à condition de disposer une série de pastilles réfléchissantes sur ou autour de l'objet à numériser. C'est le cas du Handyscan de l'entreprise Creafom (*figure 14*). La particularité de ce système est qu'il effectue directement un maillage du modèle numérisé. On ne peut donc plus parler de nuage de points dans le sens strict du terme.

Un bel exemple d'application employant ce type de scanner à main a fait l'objet d'un article dans le précédent numéro d'XYZ (*Varéa et al., 2011*).

D'après (*Heritage3D, 2007*), les scanners laser basés sur le principe de triangulation peuvent atteindre une exactitude ("accuracy") sur la mesure de distance de 50 microns pour des portées entre 10 cm et 25 m suivant le type de scanner. Il existe d'autres techniques permettant de générer des



Figure 13. Scanners laser à bras. De gauche à droite : scanner FastSCAN (Polhemus); bras FARO (ScanArm) avec tête palpeuse ou laser (FARO) ; Romer Absolue Arm avec scanner intégré (Hexagon)

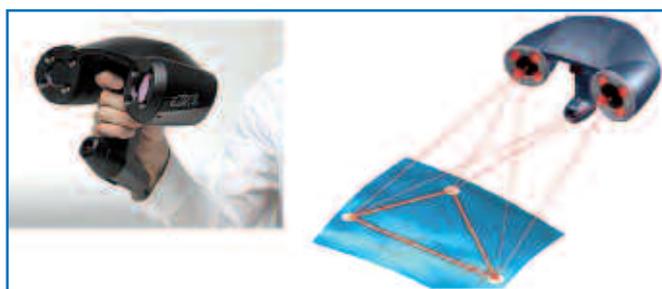


Figure 14. Scanner laser à main, exemple du Handyscan (Creafom)

nuages de points, comme le scanner laser interférométrique, ou encore des techniques dépourvues de scanner laser, parmi lesquelles on peut citer l'emploi de caméras 3D (*Kolb et al., 2009*), de lumière structurée ou moirée (*Guhring, 2001*), (*Salvi et al., 2004*), de techniques photogrammétriques par corrélation épipolaire dense (*Hullo, 2009*), (*Alby et al., 2011*).

Dans le domaine de la topographie, les trois premiers types de scanners cités (à impulsions, à différence de phase et à triangulation) sont les plus couramment utilisés. Certains fabricants combinent les approches de mesure de temps de parcours d'une onde et de mesure de différence de phase dans un seul et unique instrument de façon à exploiter pleinement les avantages des deux méthodes (exemple Trimble CX, Callidus Precision Systems CPW 8000). D'autres recherches combinent les scanners laser à impulsions et à triangulation (*Blais et al., 2003*). Chaque type de scanner laser a ses avantages et ses inconvénients et selon l'objectif escompté, il est judicieux de faire appel à un type plutôt qu'à un autre. Toutefois, un ensemble de caractéristiques doit être pris en considération avant de faire un choix. Les plus importantes sont évoquées dans le paragraphe suivant.

Caractéristiques techniques d'un scanner laser terrestre

Les feuilles de spécifications transmises par les constructeurs de scanners laser n'expriment jamais les caractéristiques techniques de la même manière. Une normalisation sur la terminologie est nécessaire et est en cours d'élaboration (voir les travaux de l'*American Society for Testing and Materials* sur la terminologie standard de capteurs imageurs 3D, www.astm.org).

La question primordiale que tout utilisateur est en droit de se poser lors de la lecture des spécifications est celle de la précision de mesure et de l'exactitude des données acquises. Pourtant, ces notions ne semblent pas claires d'un constructeur à l'autre et sont employées différemment suivant les pays. On pourra retrouver les définitions principales relatives à ces grandeurs en consultant les travaux du Comité commun pour les guides en métrologie, qui a élaboré le "*Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*" (*JCGM, 2008*), téléchargeable sur le site du Bureau International des Poids et Mesures.

Par ailleurs, les spécifications techniques transmises par les constructeurs de scanners laser sont généralement établies dans des conditions idéales de mesures. Les expériences montrent que ces précisions surestiment souvent celles atteintes dans des conditions réelles.

Pour pouvoir estimer l'exactitude de chaque point d'un levé effectué à l'aide d'un capteur laser, il faut considérer l'ensemble des caractéristiques qui peuvent influencer la qualité des données produites par les appareils utilisés. Cette partie a été rédigée notamment grâce aux travaux de (*Boehler et al., 2003*). Les principales caractéristiques des scanners laser actuels sont synthétisées dans le *tableau 1*.



■ **Précision de mesure angulaire**

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

■ **Exactitude/précision de mesure de distances**

Comme évoqué plus haut, suivant le système de mesure de distance considéré, la précision sur la mesure de distance dépend de multiples paramètres. On se reportera aux formules de σ_D vues précédemment pour chaque système. Un paramètre non négligeable influençant la qualité des données est le bruit de la mesure (valeur du rapport signal-sur-bruit). Le bruit affecte le nuage de points en lui donnant une certaine épaisseur. Certains utilisateurs conseillent d'effectuer une auto-calibration des mesures. Un test très facile à mettre en œuvre consiste à positionner une cible plane perpendiculairement à la direction d'observation du scanner et à la numériser.

La dispersion des points autour du plan moyen (épaisseur du nuage) peut ainsi être déterminée et caractérisée par un écart-type en distance, formule dans laquelle les écarts sont les distances de chaque point au plan moyen (précision de mesure). L'exactitude sur la mesure de distance pourrait également être déduite de cette expérience, en connaissant la valeur vraie de la distance séparant cette cible du scanner. Cette valeur vraie sera relevée au préalable avec des instruments et des méthodes plus précises que ce que le scanner laser est susceptible d'atteindre.

■ **Résolution spatiale**

Comme évoquée plus haut, la résolution spatiale d'un scanner laser terrestre est en théorie fonction de la résolution angulaire à une distance fixe. Si la résolution angulaire représente la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes, la résolution spatiale représente, théoriquement, l'espace entre ces deux objets. Il faut toutefois noter qu'en pratique, la résolution spatiale du scanner laser est non seulement dépendante de la résolution angulaire, mais aussi du diamètre de l'empreinte laser sur l'objet. Par exemple, si l'on choisit un pas angulaire de $10\mu\text{rad}$ (0.0006°) et si la taille de l'empreinte laser est de $600\mu\text{rad}$ (0.034°), cela représente un espacement entre points de 1 mm à 100 m pour une empreinte laser de 6 cm de diamètre... soit presque dix fois plus grand que le pas choisi ! Par expérience, Pesci et al. (2011) situent la valeur de la résolution spatiale effective entre celle du plus petit intervalle d'échantillonnage et celle du diamètre de l'empreinte laser. Nous proposons donc de parler de résolution spatiale théorique et effective.

On peut synthétiser ces informations dans la définition suivante :

La résolution spatiale théorique d'un scanner laser terrestre représente le pas le plus fin que le scanner laser est capable de mesurer, à une distance objet-scanner fixe (produit de la résolution angulaire (rad) et de la portée). La résolution spatiale effective est liée à la résolution angulaire du scanner et à la taille de l'empreinte laser sur l'objet*.

Ainsi, il faut veiller à choisir un pas angulaire cohérent par rapport à la taille de l'empreinte laser afin d'éviter le phénomène de sur-échantillonnage du nuage.

Ne pas confondre "résolution spatiale" et "précision de mesure" de distance, dont les formules ont été vues dans la partie 3. De même que le "pas" ne définit pas la "précision" du nuage de points !

Certains scanners laser terrestres sont capables de fournir un pas régulier sur le plan de l'objet, quelle que soit la distance qui sépare ce dernier du scanner, mais il faut compter avec un temps d'acquisition chronophage.

■ **Taille de l'empreinte laser**

Le terme d'empreinte laser (en anglais "spot") représente la taille du faisceau laser au niveau de la surface de l'objet à numériser. Finalement, lorsque l'on parle d'un point d'impact, il faudrait parler d'un disque dont le diamètre est déterminé par l'angle de divergence du rayon (Reshetyuk, 2009). La taille de l'empreinte laser dépend de l'ouverture du dispositif (diamètre du faisceau en sortie de scanner), de la divergence du faisceau laser et de l'éloignement de l'objet scanné. De plus, la forme de l'empreinte laser diffèrera suivant l'angle d'incidence du faisceau. On privilégiera donc, comme tout bon topographe, les intersections visée/surface favorables aux visées rasantes.

Evidemment, la taille de l'empreinte laser déterminera la taille des objets susceptibles d'être distingués dans le nuage de points. Pesci et al. (2011) ont établi que dans le cas du scanner Iris 3D (Optech), la limite inférieure de détection possible de détails est de 1/3 du diamètre de l'empreinte laser, en supposant que la taille de l'empreinte augmente linéairement avec la portée. Ils proposent également un rapport entre le pas angulaire à sélectionner et le niveau de détail souhaité, en fonction de la portée. On peut ainsi optimiser le choix du pas du balayage pour ne pas sous-échantillonner (perte de détails) ni sur-échantillonner (points en surplus) le nuage de points.

■ **Portée**

La portée représente la distance minimale (et maximale) à laquelle le scanner doit (ou peut) se situer par rapport à l'objet, pour fournir des observations fiables. Elle dépend du type de scanner utilisé (à impulsions, à différence de phase,

*La notion de "résolution spatiale" est employée différemment suivant les auteurs. Nous reviendrons plus particulièrement sur cette définition dans le glossaire du site de l'AFT.



triangulation ou autres). Comme évoqué plus haut, les scanners déduisant la mesure de distance par triangulation ou par différence de phase sont plus appropriés pour travailler à courte portée, tandis que les scanners à impulsions sont plus adaptés pour fonctionner à longue portée.

■ Cadence de mesure

La cadence de mesure se définit par une fréquence (kHz ou MHz) et se traduit par un nombre de mesures de distances effectuées en une seconde. On parle plus couramment du nombre de points par seconde. Comme évoqué plus haut, les scanners à différence de phase permettent d'atteindre des cadences de mesure plus élevées que les scanners à impulsions.

■ Sécurité

La lumière produite par les lasers est en général monochromatique, directionnelle et cohérente. Ces avantages sont aussi des inconvénients, puisque les lasers risquent alors d'endommager les tissus humains (yeux et peau). Dès les années 70, une classification a été établie en fonction de la dangerosité des scanners lasers (classe I, II, IIA, IIIA, IIIB et IV). Depuis 2002, elle compte sept classes (1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4), les chiffres augmentant avec la dangerosité du système. La plupart des scanners laser terrestres sont affectés à la classe de sécurité 3R (correspond à IIIA dans l'ancien système), ce qui signifie "sans danger s'il est manipulé avec soin". La sécurité dépend de la puissance maximale du signal en sortie, du type d'émission laser (impulsionnel, continu modulé, ...) et de la longueur d'onde (voir GIM International).

■ Champ de vision

Le champ de vision global d'un scanner est l'intervalle angulaire dans le plan horizontal et/ou vertical dans lequel un scanner laser terrestre est capable de scanner. Le scanner "panoramique" permet de relever l'environnement complet autour de la station, tandis que le scanner "caméra" est limité à des champs de vision plus restreints. Entre les deux se situe le scanner panoramique à champ vertical limité (voir figure 15). Dans la littérature (Staiger, 2003), le scanner panoramique à champ vertical limité est également appelé "hybride", mais ce terme risque de prêter à confusion avec les scanners "hybrides", combinant la technique de mesure à impulsions et à différence de phase.

Scanner panoramique : ce type de scanners effectue des mesures de distances et d'angles dans un champ de vision

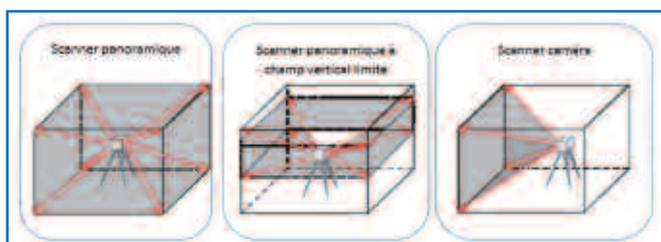


Figure 15. Classification des scanners laser selon leur champ de vision (Staiger, 2003 modifié).

de 360° dans le plan horizontal et d'au moins 180° dans le plan vertical. Cette caractéristique lui donne la possibilité de lever l'environnement direct englobant la station, excepté la partie située directement en dessous de l'appareil. Ce type de scanner est non seulement utile aux levés topographiques classiques, mais aussi et surtout aux levés d'équipements industriels complexes (en intérieur).

Scanner panoramique à champ vertical limité : le balayage s'effectue grâce à la rotation illimitée du scanner autour de l'axe vertical de l'instrument. Le champ de vision dans le plan vertical est limité à 50° ou 60°. Ce genre de scanners est communément utilisé pour scanner à longue ou à moyenne portée de l'objet et est adapté aux travaux topographiques courants (en extérieur).

Scanner caméra : Les scanners caméras effectuent les mesures de distances et d'angles dans un champ de vision particulièrement étroit aussi bien dans le plan horizontal que dans le plan vertical. Le champ angulaire couvert est de l'ordre de 40°x40°. Le nom "scanner caméra" provient du champ de vision comparable à celui d'une chambre de prise de vues.

■ Logiciels de post-traitement

Lors du choix d'un scanner laser, les caractéristiques du scanner laser évoquées dans cette partie 3 sont évidemment primordiales. Mais elles ne sont pas suffisantes pour garantir l'aboutissement d'un projet dans de bonnes conditions. En effet, il ne faudrait pas négliger l'importance du rôle joué par les logiciels d'acquisition et de traitement fournis avec l'appareil. Si l'acquisition d'un nuage de points par scanner laser s'effectue avec un niveau d'automatisation très élevé, ce n'est pas (encore) le cas pour les procédures de traitements de nuages de points. Donc un logiciel efficace de traitement pourra être considéré comme un atout supplémentaire au scanner laser terrestre (voir une sélection sur simple3D).

D'autres facteurs importants d'un système scanner laser sont la facilité d'utilisation (au regard du poids par exemple, du câblage nécessaire, du pilotage) et la solution d'alimentation électrique. D'autres critères sont parfois déterminants dans le choix, tels que la température d'utilisation, le pilotage à distance, la protection IP, car ils peuvent conditionner la faisabilité de certains chantiers. La rubrique "Product Survey" du site GIM International permet de comparer de façon interactive les caractéristiques d'une sélection de scanners laser terrestres (août 2010).

Le tableau 1 présente une comparaison des scanners laser à impulsions avec ceux à différence de phase. Il a été réalisé sur la base des références suivantes : (GIM International), (Heritage3D, 2007), (Lerma Garcia et al., 2008), (Mechelke et al., 2007).

Sources d'erreurs sur des mesures au scanner laser terrestre

Une bonne connaissance des sources d'erreurs et une compréhension des relations qui les lient est nécessaire



	Scanner laser à impulsions	Scanner laser à différence de phase
Résolution angulaire, plan H et V (degrés)	0.0002° à 0.25° (soit une résolution spatiale théorique entre 0.2 mm et 200 mm, à 50 m)	0.00067° à 0.02° (soit une résolution spatiale théorique entre 0.6 mm et 20 mm, à 50 m)
Exactitude* de mesure angulaire (<i>scan angle accuracy</i>) H/V (degrés) à 1 σ	0.001° à 0.04°	0.002° à 0.03°
Exactitude* de mesure de D à 1 σ (<i>range accuracy</i>) à 50 m de portée	Entre 3 et 20 mm	Entre 3 et 7 mm
Taille de l’empreinte laser à 50 m de portée	Entre 6 et 70 mm	Entre 8 et 50 mm
Portée mini / maxi	2 m** / 2000 m	0.3 m / 100 m
Cadence de mesure (kHz) (nbre de points / seconde)	2 à 50 kHz (soit 2000 à 50 000 pts / sec.)	20 à 1000 kHz (soit 20000 à 1 000 000 pts / sec.)
Sécurité	1 à 3R	1 à 3R
Champ de vision	Panoramique + hybride	Panoramique
Utilisation	travaux topographiques, relevés en extérieur	Relevés en intérieur, chantiers à courte portée

*On traduira “accuracy” par “exactitude” en attendant que les feuilles de spécifications techniques emploient rigoureusement les mêmes critères statistiques de qualité de mesures.

**Certains systèmes impulsionnels peuvent descendre à 0.1m de portée.

Tableau 1. Comparaison des scanners laser terrestres, selon les caractéristiques évoquées dans cette partie

pour quantifier la précision des données. Il convient suivant les cas, d’effectuer une calibration de l’appareil afin de modéliser le phénomène perturbateur et de réduire son effet sur les mesures. Les erreurs affectant la mesure au scanner laser terrestre peuvent être classifiées selon quatre groupes (Staiger, 2005) :

- Erreurs instrumentales
- Erreurs liées à l’objet numérisé
- Erreurs environnementales
- Erreurs méthodologiques

Les travaux traitant du sujet dans la littérature ont montré que le modèle des erreurs associé à des mesures effectuées à l’aide d’une station totale peut être transposé à celles faites par le biais de scanners laser terrestres. Néanmoins, le bilan des erreurs devra être complété, puisque la technologie du scanner employé ou la nature de l’objet numérisé jouent également un rôle dans ce bilan.

■ Erreurs instrumentales

Les erreurs instrumentales rencontrées avec les scanners laser terrestres sont comparables à celles que l’on connaît pour les tachéomètres et affectent les mesures angulaires et de distances. Elles peuvent être de type systématique (effets thermiques) et aléatoire et sont liées à la conception du scanner. Dans la mesure du possible, le scanner est calibré régulièrement par l’entreprise (tous les 200 jours ou tous les 2 ans suivant les systèmes), pour corriger les erreurs systématiques inhérentes au système.

Selon (Hébert et Krotkov, 1992), on peut distinguer les erreurs fondamentales inhérentes aux composantes de l’instrument utilisé (par exemple le type de laser) et celles causées par l’état mécanique du scanner (par exemple les erreurs d’axes). Tandis que les premières ne peuvent pas être corrigées par des modes opératoires, les secondes peuvent éventuellement être supprimées ou minimisées

par l’amélioration de la conception du système ou par son étalonnage, d’où l’importance de la révision des appareils. (Lerma et Garcia, 2008) rangent dans la catégorie des erreurs instrumentales, celles liées à la taille de l’empreinte laser (divergence du faisceau), celles liées à la rencontre par le faisceau d’une arête (échos moyennés), l’incertitude de mesure de distance et d’angles et enfin celles liées aux erreurs d’axes. Des études sont menées dans le but de réduire l’importance relative des erreurs de calibration dans le bilan des erreurs global (Lichti, 2010, Reshetyuk, 2009).

■ Erreurs liées à l’objet numérisé

La première source d’erreurs provenant des caractéristiques des objets est sa réflectance, puisque les scanners effectuent des mesures sans réflecteur. D’après (Lichti et Harvey, 2002, Vögtle et al., 2008, Landes et al., 2009 ; Soudarissanane et al., 2011 ; Thiel et Wehr, 2004), elle dépend des facteurs suivants :

- Les propriétés des matériaux composant l’objet, telles que sa permittivité, sa perméabilité et sa conductivité de surface
- La couleur de la surface (l’objet réfléchira plus ou moins dans le domaine de longueur d’onde du laser employé)
- L’angle d’incidence du faisceau laser
- La rugosité de surface, dont l’effet dépend de la longueur d’onde et de l’angle d’incidence local du faisceau ; une surface lisse et brillante risque de provoquer une réflexion spéculaire
- La température de la surface, notamment dans un environnement industriel : les radiations émises par la surface chaude diminuent la qualité du rapport signal-sur-bruit et par conséquent la précision de la mesure de distance
- L’humidité de la surface

■ Erreurs environnementales

Les facteurs environnementaux affectent la propagation du signal dans l’atmosphère. On peut citer la température



► ambiante, la pression, l'humidité relative, qui affectent l'indice de réfraction du milieu traversé par l'onde. On peut citer également l'éclairage des lieux, les vibrations du sol accueillant le scanner. L'effet de ces facteurs n'est pas toujours négligeable. Par exemple, les mesures de distances effectuées la nuit sont moins bruitées que celles de jour, en raison du rôle perturbateur que joue la lumière ambiante (composante spectrale identique à celle de l'onde laser).

■ Erreurs méthodologiques

L'opération de balayage laser terrestre est dotée d'un niveau d'automatisme assez élevé comparé aux mesures tachéométriques, où l'opérateur est définitivement le guide de la mesure. Une fois le scanner en place et calé, son intervention peut se résumer au choix de paramètres de résolution du scannage, qui devront toutefois être cohérents par rapport à la précision de mesure d'un point (éviter le sur-échantillonnage tout comme le sous-échantillonnage). Par conséquent, l'erreur provenant des manipulations de l'opérateur est réduite au niveau de l'acquisition. Des erreurs peuvent davantage surgir lors de la phase de géoréférencement des nuages de points et bien entendu dans la phase d'extraction de l'information. Ces problèmes seront abordés dans le prochain chapitre.

La suite dans le prochain numéro !

Conclusion

Si les vitesses d'acquisition des scanners laser terrestres ont considérablement augmenté depuis 5 ans (d'un facteur 10 à 20 selon les systèmes), le volume des données générées par les relevés lasergrammétriques pose le problème de la gestion et du traitement des masses de données, de l'archivage des nuages de points et des moyens informatiques associés. Comme l'a vécu le Lidar aéroporté, l'avènement du laser à retour d'onde complet va également ouvrir de nouveaux horizons aux utilisateurs de scanners laser terrestres. Simultanément se posera le problème d'un volume de données en croissance exponentielle... Le plus gros verrou technologique à lever est probablement celui de la visualisation et de la gestion des données dans le futur.

Nous aborderons, dans le second dossier, les notions en rapport avec le traitement des données, de l'acquisition jusqu'au modèle texturé, en passant par la segmentation et la modélisation sous toutes ses formes. Dans l'optique d'une comparaison ou d'assemblage de nuages, nous parlerons des étapes de consolidation et de géoréférencement. Pour finir, des exemples de projets réalisés au sein du laboratoire et avec nos partenaires viendront agrémente le propos.

Un petit clin d'œil aux éternels insatisfaits, qui pourront toujours construire leur propre scanner laser 3D avec simplement un pointeur laser, un verre à vin, un tabouret et un appareil photo ("know how show" www.instructables.com/id/3-D-Laser-Scanner/)

Remerciements

Ce dossier a été élaboré en collaboration avec Hakim Boulaassal (*Boulaassal, 2010*), doctorant au sein du Groupe "Photogrammétrie Architecturale et Géomatique" à l'INSA de Strasbourg de 2007 à 2010.

Nous tenons également à remercier les personnes ayant contribué à la lecture et à la correction de ce dossier et dont les commentaires constructifs ont permis de clarifier plusieurs points :

- Stéphane Rialland (Ingénieur recherche et développement en optoélectronique chez Trimble),
- Benjamin Outrey (Responsable des ventes et du développement de marchés - Scanner laser 3D chez Leica Geosystems)

Références bibliographiques

- ALBY, E. GRUSSENMEYER, P. SMIGIEL, E., ASSALI, P. (2011). *Comparaison de PhotoModeler Scanner et David Laserscanner pour l'obtention de nuages de points denses*. Revue XYZ n°126, pages 37-42.
- ALSHAWA, M., SMIGIEL, E., GRUSSENMEYER, P., LANDES, T., 2007. *Integration of a terrestrial Lidar on a mobile mapping platform: first experiences*. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology MMT'07, 29-31 mai 2007, Padua, Italy. 6p.
- BALSAVIAS, E.P., 1999. *Airborne laser scanning: basic relations and formulas*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (54) : 199-214.
- BLAIS F., BERARDIN J.-A., EL-HAKIM, S., GODIN, G., 2003. *New developments in 3D Laser Scanners: from static to dynamic multimodal systems*, Optical 3D-Measurement techniques, 22-25 septembre 2003, Zürich, Suisse, 8p.
- BLAIS, F., 2004. *Review of 20 Years of Range Sensor Development*. Journal of Electronic Imaging 13, 231 (2004); doi:10.1117/1.1631921.
- BOEHLER, W., BORDAS VICENT, M., MARBS, A., 2003. *Investigating Laser Scanner Accuracy*, CIPA International archives for Documentation of Cultural Heritage, Antalya (Turkey), Vol XIX : 696-701.
- BOULAASSAL, 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/>
- GOULETTE, F., 2009. *Lasergrammétrie : relevés laser urbains par systèmes mobiles de cartographie*. Revue XYZ n°119, p. 21-26.
- HERITAGE 3D, 2007. *3D Laser Scanning for Heritage: advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture*. English Heritage. Product code 51326.
- KOLB, A., BARTH, E., KOCH, R., LARSEN, R. (2009). *Time-of-Flight Sensors in Computer Graphics* ; Eurographics State of the Art Reports, M. Pauly and G. Greiner, Edition The Eurographics Association, p. 119-134.
- HULLO, J.-F. (2010). *Acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre. Application à la mission d'archéologie de Kilwa, Arabie Saoudite*. Revue XYZ n°122, pages 19-26.
- JCGM, 2008. *Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* document téléchargeable sur le site du Bureau International des Poids et Mesures (www.bipm.fr)



LANDES, T., VÖGTLE, T. (2009). *Diagnostic du patrimoine culturel et architectural - Influence de différents matériaux sur des mesures effectuées par scanner laser terrestre.* Revue Contrôles Essais Mesures, 4 pages.

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.

LI, Z., CHEN, J., BALSAVIAS, E., (EDS), 2008. *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: 2008.* ISPRS congress book, isprs book series, volume 7, taylor & francis group, london, 527 pages

LICHTI, D. D. ET HARVEY, B., 2002. *The effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements.* International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, volume XXXIV, Tome 4, 9-12 Juillet 2002, Ottawa, Canada, 9 PAGES.

LICHTI, D. D., 2010. *Terrestrial laser scanner self-calibration: Correlation sources and their mitigation.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(1):93-102

MAILLET, H., 1984. *Le laser, principe et techniques d'application.* Technique et documentation (Lavoisier), 550 pages.

MECHELKE, K., KERSTEN, T. P., LINDSTAEDT, M., 2007. *Comparative investigations into accuracy behavior of the new generation of terrestrial laser scanning systems.* 8th conf. on Optical 3D Measurement techniques VIII. Zurich, 2007.

PESCI, A., TEZA, G., BONALI, E., 2011. *Terrestrial Laser Scanner Resolution: Numerical Simulations and Experiments on Spatial Sampling Optimization,* Remote Sensing, 3, p.167-184.

PFEIFER, N., 2007. *Overview of TLS systems, overall processing and applications, theory and application of Laser Scanning.* ISPRS summer school 2007. Ljubljana, Solvenia.

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

SALVI J., PAGES J., BATLLE J., 2004. *Pattern codification strategies in structured light systems,* Pattern Recognition, Volume 37, Issue 4, Agent Based Computer Vision, April 2004, pages 827-849.

SHAN, J., TOTH, C.K., 2008. *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing.* crc press taylor & francis, london, 590 p.

SOUDARISSANANE, S., VAN REE, J., BUCKSCH, A. ET LINDENBERGH, R., 2007. *Error budget of terrestrial laser scanning: influence of the incidence angle on the scan quality.* Proceedings 3D-NordOst, 10. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung, und Auswertung von 3D-Daten, 6-7 décembre 2007, Berlin, Allemagne, 8 pages.

SOUDARISSANANE, S., LINDENBERGH, R., MENENTI, M. ET TEUNISSEN, P., 2011. *Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 11 pages.

STAIGER, R., 2003. *Terrestrial laser scanning: Technology, systems and applications.* Second FIG Regional Conference, Marrakech, Morocco, December 2-5, 2003.

STAIGER, R., 2005. *The geometrical quality of Terrestrial Laser Scanner.* FIG Working Week, Cairo, Egypt, April 16-21, 2005.

THIEL, K.-H. UND WEHR, A., 2004. *Performance capabilities of laser scanners: an overview and measurement principle analysis.* In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 36 (Part 8): S. 14-18.

VARÉA, S., LARSON, C., MINCHIN, S., 2011. *La fabuleuse histoire de la Tête de Maori de Rouen et sa numérisation.* Revue XYZ n°127, p. 29-32.

VÖGTLE, T., SCHWAB, I., LANDES, T., 2008. *Influences of Different Materials on the Measurements of a Terrestrial Laser Scanner (TLS),* The XXith ISPRS Congress, Beijing, China, 3-11 July 2008, Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Comm. V, ISSN 1682-1750, Vol. XXXVII, part B5, p.1061-1066

VOSSelman, G. & MAAS, H.G., (EDS), 2010. *Airborne and terrestrial laser scanning.* whittles publishing, 318 pages.

WEHR, A. ET LOHR, U., 1999. *Airborne laser scanning—an introduction and overview,* ISPRS journal of photogrammetry & remote sensing 54 (1999) 68-82

Sites Internet

Lexique topographique AFT : www.aftopo.org/FR/lexique-7.html

Creaform : www.creaform3D.com

FARO : www.faro.com

GIM International : www.gim-international.com/

granddictionnaire : www.granddictionnaire.com

Hexagon : www.hexagonmetrology.fr

I3mainz : www.i3mainz.fh-mainz.de

Leica : hds.leica-geosystems.com

Mensi : www.mensi.fr

Optech : www.optech.ca

Riegl : www.riegl.com

Simple3D : www.simple3D.com

Topcon : www.topconpositioning.com

Trimble : www.trimble.com

zf-laser : www.zf-laser.com

ABSTRACT

This paper aims to introduce the basic principles of terrestrial laser scanning techniques. Definitions of laser scanning concepts are proposed in French. Three types of laser scanners are frequently used in the field of surveying: pulsed, phase-shift and triangulation laser scanners. The way these instruments measure distances is detailed and illustrated. Errors that might affect the data quality are enumerated. The fundamentals were written mainly based on a compilation of books or articles used as reference. The lack of a French terminology leads the authors to construct a glossary for the AFT with reader's help. A second part of the tutorial will be published in the next issue. It will address topics related to the acquisition step and to the main processing steps leading to 3D models based on 3D laser scanner data. Finally, some applications based on the use of terrestrial laser scanners will be presented.