

Hétérogénéité des distances : quel impact sur la qualité des relevés lidar aériens et terrestres ?

■ Laurent POLIDORI - Tania LANDES - Jérôme VERDUN - Michel KASSER

La spécification de qualité d'un nuage de points laser est plus pertinente si tous les points ont des qualités individuelles similaires. Pourtant, en pratique, des hétérogénéités de qualité sont causées par la présence de différents matériaux et par la géométrie de la scène qui engendre des hétérogénéités de distances. Cet article s'intéresse à l'hétérogénéité des distances et à son impact sur l'hétérogénéité de la qualité dans un nuage de points. Les acquisitions aussi bien terrestres qu'aériennes sont considérées. Un indicateur simple est proposé pour caractériser l'hétérogénéité des distances et ses effets sur différents critères de qualité. L'analyse de levés lidar terrestre et aérien typiques montre que l'impact de l'hétérogénéité des distances est plus critique dans le cas terrestre. Finalement, des stratégies sont évoquées pour limiter l'hétérogénéité des distances dans un levé lidar, ainsi que des recommandations pour la mise en œuvre des levés.

MOTS-CLÉS

Lidar terrestre, lidar aérien, hétérogénéité des distances, qualité

peut avoir du sens pour un point individuel.

L'hétérogénéité des propriétés de l'objet (albédo, rugosité, orientation, etc.) et son impact sur les données ont été étudiés par divers auteurs (par exemple Lichti & Harvey 2002, Voegtli et al. 2008) pour fournir une meilleure compréhension des artefacts et des erreurs produits par différents matériaux. Ils ne sont pas pris en compte dans cet article, où nous nous intéressons à l'hétérogénéité des distances et à son impact sur l'hétérogénéité de la qualité dans un nuage de points. Cette hétérogénéité étant beaucoup plus élevée dans les levés terrestres que dans les levés aériens, ces deux situations seront considérées séparément et illustrées par deux relevés lidar typiques. Des stratégies permettant de limiter l'hétérogénéité des distances dans un levé lidar sont enfin proposées et discutées.

L'hétérogénéité des distances dans un relevé lidar

Le point euclidien mesuré par n'importe quelle technique topographique est un modèle simplifié d'une réalité complexe. Dans le cas de la télémétrie laser, le processus de modélisation qui substitue deux points euclidiens au capteur et à la surface éclairée qui sont de taille non nulle, permet de considérer le rayon laser comme une droite et de définir la distance capteur-cible (figure 1). Tout se ramène alors à des solutions de géométrie classique. La définition de ces deux points s'appuie sur des critères qui sont souvent protégés par le secret industriel, mais si tous les points ont la même définition, alors le nuage de points est

Introduction

Les méthodes lidar sont utilisées depuis longtemps pour une grande variété d'applications topographiques dans lesquelles une description 3D de la géométrie du paysage est requise, comme l'urbanisme (Priestnall et al. 2000), le patrimoine culturel (Grussenmeyer et al. 2008), la gestion forestière (Van Leuwen & Nieuwenhuis 2010), l'auscultation des versants rocheux (Abellán et al. 2009) etc. Malgré des mises en œuvre très différentes, les relevés lidar terrestres et aériens sont basés sur les mêmes principes géométriques et physiques. Dans les deux cas, les nuages de points obtenus à partir de différentes positions du capteur sont fusionnés en un nuage de points qui peut être traité globalement pour donner un modèle de surface 3D.

Le nuage de points et le modèle de surface sont accompagnés d'indicateurs de qualité, généralement des indicateurs d'erreur statistique qui dépendent principalement de la précision de mesure intrinsèque de

l'instrument et de la manière dont le relevé a été réalisé. Cependant, qualifier la qualité globale a peu de sens si la qualité locale de chaque point (ou de chaque partie du modèle de surface 3D) est très hétérogène. En effet, bien que tous les points aient les mêmes caractéristiques en termes d'information (c'est-à-dire des points euclidiens définis par des coordonnées 3D dans un système de référence donné et dans un format numérique donné), chaque point individuel est le résultat d'une interaction physique entre le faisceau laser et un objet matériel, de sorte que l'intensité et la forme de l'écho (et donc la fiabilité du point détecté) dépendent des propriétés de l'objet (albédo, rugosité, orientation, etc.) et de sa distance par rapport au capteur. La conséquence est que la qualité du nuage de points est hétérogène dès lors que les propriétés physiques ou la distance des différentes cibles sont hétérogènes. Pour cette raison, il n'est pas pertinent d'exprimer une spécification de qualité pour l'ensemble d'un nuage de points, même si un critère de qualité donné

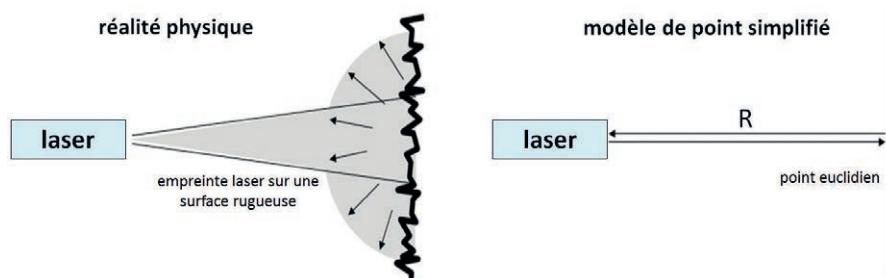


Figure 1. Réalité physique (à gauche) et modèle de point simplifié (à droite)

consistant même sans cette information. Précisons que dans le cas des systèmes terrestres, seule la méthode du temps de vol est considérée ici pour permettre une comparaison avec les systèmes aériens.

Le capteur et la cible ayant été modélisés comme des points, chaque point du nuage peut être associé à une distance capteur-cible. Intuitivement, la qualité d'un point mesuré se dégrade lorsque la distance augmente. L'hétérogénéité de la qualité dépend donc de l'hétérogénéité des distances, que l'on peut caractériser par un indicateur simple comme le ratio ρ entre les distances maximale R_{\max} et minimale R_{\min} :

$$\rho = \frac{R_{\min}}{R_{\max}} \quad (1)$$

Nous devons distinguer les acquisitions terrestres et aériennes. Dans le cas des levés terrestres (pouvant être mis en œuvre par des systèmes fixes ou mobiles), les distances sont courtes, souvent de quelques mètres à 100 m, mais elles sont variables et imprévisibles, et l'indicateur d'hétérogénéité ρ peut atteindre des valeurs élevées (typiquement supérieures à 10). Au contraire, les levés aériens donnent des distances beaucoup plus grandes, souvent de 500 à 5 000 m, mais avec des variations très limitées au sein d'un même levé (ρ est alors proche de 1), à l'exception des régions montagneuses (table 1). De plus ces variations ont un comportement prévisible qui dépend essentiellement de l'ouverture angulaire du balayage. Ainsi, en survolant un terrain horizontal avec un angle de visée extrême θ_{\max} , on obtient :

$$\rho = \frac{1}{\cos \theta_{\max}} \quad (2)$$

On peut résumer ainsi la différence entre les acquisitions terrestres et aériennes :

	distance moyenne	hétérogénéité des distances
terrestre	+	-
aérien	-	+

Table 1. Cas favorables (+) et défavorables (-) en termes de distance moyenne et d'hétérogénéité des distances

Il existe des situations intermédiaires entre les systèmes terrestres et aériens, comme les acquisitions réalisées à basse altitude par drone ou par hélicoptère pour des relevés exigeant haute résolution et agilité. Ces situations intermédiaires ne seront pas détaillées dans cet article bien que les mêmes principes puissent leur être appliqués.

Impact de l'hétérogénéité des distances sur la qualité des données

Il est intuitif que l'augmentation de la distance capteur-cible dégrade la qualité des données lidar. Avant de considérer la qualité d'ensemble d'un nuage de points, nous considérons la qualité du point individuel, qui peut s'apprécier selon différents critères, notamment le bilan d'énergie, la résolution et la précision, qui sont tous dégradés, systématiquement mais de manières différentes, par l'accroissement de la distance. Au-delà de ces effets systématiques nous pouvons considérer la propagation dans l'atmosphère et l'orientation de la surface : les effets ne sont pas systématiques mais lorsqu'ils se produisent, les pires cas correspondent toujours aux distances maximales. Les distances très hétérogènes que l'on trouve dans des paysages complexes, en ville ou en forêt notamment, peuvent aussi conduire à des ambiguïtés entre échos. Enfin le cas des objets cachés est pris en compte : les levés lidar sont

alors incomplets et les pertes sont logiquement plus importantes dans les secteurs les plus éloignés.

Impact de la distance sur le bilan d'énergie, la résolution et la précision

Le bilan d'énergie est un critère de qualité important car la puissance reçue influence le rapport signal sur bruit et donc la fiabilité de la détection de l'écho. Dans le cas d'une surface lambertienne d'albédo A , la puissance reçue varie comme l'inverse du carré de la distance :

$$P_r = \frac{D^2 \eta^2 A P_e}{8R^2} \quad (3)$$

où D est le diamètre d'ouverture du récepteur, P_e est la puissance émise et h est le coefficient d'atténuation de l'atmosphère.

La résolution – capacité à discriminer des cibles proches entre elles – est un critère de qualité important pour les acquisitions lidar. Elle peut se décomposer en résolution radiale (dans le sens du faisceau) et résolution angulaire (transversale au faisceau). La résolution radiale, liée à la fréquence temporelle d'échantillonnage de l'écho, est en principe constante, donc n'est pas impactée par la distance. En revanche, la résolution angulaire dépend du diamètre du faisceau et de l'intervalle d'échantillonnage, deux grandeurs qui augmentent proportionnellement à la distance. Le diamètre du faisceau est $d = \beta R$ où β est l'ouverture angulaire du faisceau laser (typiquement 0.2 mrad). L'intervalle d'échantillonnage (distance entre les centres de deux taches consécutives) a le même comportement. Plusieurs auteurs (Lichti & Jamscho 2006, Pesci et al. 2011) ont étudié la manière dont ces deux paramètres combinent leurs effets pour caractériser une résolution angulaire effective, c'est-à-dire la capacité du nuage de points à séparer deux cibles proches. Ainsi, en termes de résolution, la qualité se dégrade linéairement en fonction de la distance, du moins dans le cas d'un albédo constant (ce n'est pas forcément vrai dans le cas d'une forte variation d'albédo, une cible très réfléchissante pouvant produire un écho



pour un faisceau qui n'est pas centré sur elle).

Quant à l'erreur de localisation, elle résulte de l'accumulation de plusieurs sources d'erreurs, notamment les incertitudes sur la position et l'orientation du capteur. L'incertitude P sur la position de la cible peut s'écrire :

$$\Delta P = \Delta S + \Delta R \cdot u + \Delta \theta \cdot R \cdot v \quad (4)$$

où u et v sont des vecteurs unitaires le long et en travers de la direction de propagation respectivement, et S , R et θ représentent les incertitudes sur la position du capteur, sur la distance mesurée et sur la direction de visée, respectivement. Le troisième terme montre que cet effet augmente linéairement avec la distance.

Pour tous ces critères de qualité (bilan d'énergie, résolution et précision), on observe donc une dégradation de la qualité des données lorsque la distance augmente, avec un effet linéaire à quadratique. C'est pourquoi les systèmes laser à balayage du commerce indiquent une distance maximale au-dessus de laquelle la qualité n'est plus garantie. Notons cependant que ce seuil relève de considérations commerciales plutôt que techniques, visant à limiter la responsabilité du constructeur au-delà du seuil, car pour tous les critères la dégradation est une fonction continue de la distance (ce serait différent dans le cas des systèmes à différence de phase, que nous ne considérons pas dans cet article).

■ Effet de la propagation dans l'atmosphère

Nous avons négligé jusqu'ici les effets de l'atmosphère. Sa prise en compte montrerait que les effets de la distance sont encore pires que ce qui est décrit dans les relations précédentes, pour deux raisons au moins. Tout d'abord, le retard troposphérique engendre une erreur de mesure de distance qui croît linéairement avec la distance :

$$\Delta R = (n - n_0) \cdot R \quad (5)$$

où n est l'indice de réfraction de l'air, fonction de la température, de la pression et de l'humidité, et n_0 est un indice choisi arbitrairement. Mais dans des conditions courantes (portée de

100 m), il faut une anomalie de température de 10° pour créer une erreur de 1 mm. Par ailleurs, la diffusion de la lumière dans l'atmosphère proche du sol réduit l'intensité de l'écho, avec un taux de perte qui dépend essentiellement de la longueur d'onde et de la composition de l'air, et qui croît avec la distance. Cet effet n'affecte pas la précision mais il peut dégrader la fiabilité de la détection de l'écho. Ainsi, la propagation du faisceau laser à travers l'atmosphère détériore légèrement la mesure, avec des effets qui augmentent avec l'éloignement.

■ Effet de l'orientation de la surface

L'influence de la distance sur la qualité des données a été caractérisée jusqu'ici pour une surface orientée face au capteur, donc avec un angle d'incidence local égal à zéro. Dans le cas général d'un angle d'incidence non nul, les effets sont plus importants.

Dans le cas d'une surface plane, l'angle d'incidence local θ augmente avec la distance R :

$$\theta = \arccos \frac{H}{R} \quad (6)$$

où H est la distance entre le capteur et le plan éclairé (hauteur de vol dans le cas d'une acquisition lidar aéroportée). L'incidence nulle correspond donc à la distance minimale ($R = H$). Or, une augmentation de l'angle d'incidence local conduit à une augmentation de la taille de l'empreinte sur la surface éclairée, qui tend à prendre la forme d'une ellipse. L'effet n'est donc pas le même dans les deux dimensions, l'ellipse étant allongée dans la direction du balayage (perpendiculaire à la trajectoire dans le cas d'un levé aérien, ou verticale dans le cas d'un balayage terrestre sur les parties élevées d'une façade verticale). Le plus petit diamètre est proportionnel à $1/\cos\theta$ (donc à R) et le plus grand à $1/\cos^2\theta$ (donc à R^2). Cette dilatation de l'empreinte produit une dégradation de la résolution, ainsi qu'une diminution de la puissance rétrodiffusée (sauf dans le cas d'une surface très rugueuse ayant un comportement lambertien). En revanche, l'orientation de la surface n'affecte pas la précision de localisation, la position du centre de l'empreinte

n'étant pas modifiée dans le cas d'une surface plane d'albédo uniforme.

Dans le cas de surface non plane, par exemple un terrain présentant des collines et des bâtiments relevés par un lidar aérien, l'angle d'incidence a des variations locales plus complexes. Ainsi, deux cibles situées à la même distance du capteur mais ayant des pentes très différentes peuvent donner des points de qualités très différentes liées à l'influence de l'orientation de la surface sur la taille de l'empreinte et sur l'intervalle d'échantillonnage. Dans le cas extrême d'une visée rasante (angle local d'incidence tendant vers 90°), la résolution est perdue et l'empreinte du faisceau est devenue si grande qu'elle ne peut être modélisée comme un point. Au-delà de 90° la surface ne recevant pas le faisceau laser n'est pas représentée dans le nuage de points.

Dans un milieu poreux comme la forêt, où le lidar aéroporté est couramment utilisé pour des relevés topographiques, l'augmentation de l'angle d'incidence engendre une augmentation de la distance à parcourir à travers le volume du couvert forestier. La probabilité d'atteindre le sol, et donc la densité au sol du nuage de points, s'en trouve réduite. Une fois de plus, on constate que la qualité du nuage de points est dégradée par une augmentation de la distance.

■ Ambiguïtés

Une ambiguïté est un écho fantôme qui peut théoriquement se produire, même pour les systèmes à temps de vol, lorsque la fin de l'écho de l'impulsion n se superpose au début de l'écho de l'impulsion $n+1$, si la fréquence de répétition des impulsions PRF est trop élevée ou si la scène est trop profonde (grande amplitude de distance entre les objets proches et lointains). Les ambiguïtés sont impossibles si les distances extrêmes respectent la condition suivante :

$$R_{\max} - R_{\min} = \frac{C}{2PRF} \quad (7)$$

où C est la vitesse de propagation de la lumière. Par exemple si $PRF = 100$ kHz alors les distances ne doivent pas excéder $R_{\max} = 1\,500$ m. Ce risque





est en principe pris en compte dans la conception des instruments, l'ambiguïté ne devant apparaître qu'au-delà de la portée maximale de l'appareil. Cependant, la probabilité d'ambiguïtés fausses existe sur de longues distances, lorsque la surface visée est fortement rétro-réfléchissante.

Du point au nuage de points

Nous venons de rappeler que plusieurs phénomènes, dont les effets augmentent avec l'éloignement, s'accumulent pour dégrader la qualité individuelle d'un point lidar. Que dire maintenant sur la qualité d'ensemble d'un nuage de points ? Ce qui précède montre qu'un nuage de points où la distance capteur-cible est variable a nécessairement une intensité variable, une résolution variable, une précision de localisation variable, etc. : ces critères ne sont donc pas pertinents pour caractériser le nuage dans son ensemble, sauf si on fait en sorte de contenir ces variations.

Par ailleurs, le risque de lacune dans le nuage de points augmente avec la distance, car un objet a une plus grande probabilité d'être caché s'il est éloigné que s'il est proche. Cela se produit typiquement dans les relevés terrestres en milieu urbain, où les bâtiments les plus éloignés sont cachés par les plus proches, mais également dans les relevés aériens en milieu forestier, où le sol est en partie caché par les feuillages. La *figure 2* illustre cet effet de l'éloignement sur un paysage urbain simulé, montrant dans un exemple typique que le nombre de

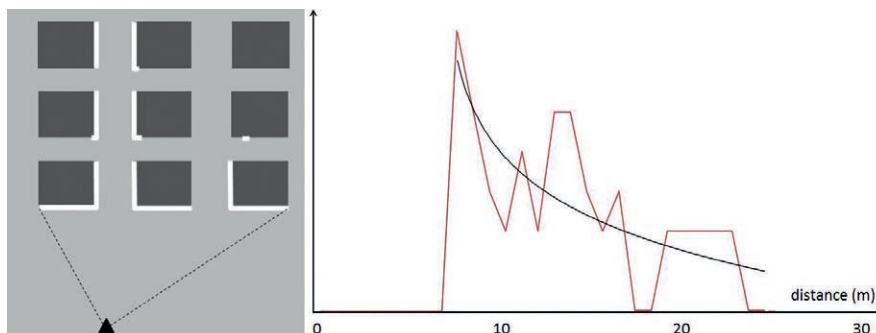


Figure 2. A gauche : simulation d'un levé lidar terrestre sur un paysage urbain où les surfaces éclairées sont représentées par des segments blancs ; à droite, histogramme des distances (courbe de tendance $y = -1.77 \ln x + 6.29$)

points éclairés décroît en fonction de la distance en raison de la présence d'obstacles.

Résultats sur des levés lidar typiques

Deux jeux de données ont été utilisés pour illustrer notre discussion, correspondant à deux levés typiques, l'un terrestre, l'autre aérien.

■ Levé lidar terrestre

Un levé lidar terrestre a été réalisé dans la ville du Mans devant une muraille romaine dans le cadre d'un projet de recherche en architecture et archéologie visant à actualiser les connaissances sur cette muraille (Meunier & Monteil, 2017a, b). Depuis sa construction à la fin de l'Antiquité, elle a subi de nombreux changements notamment à l'époque médiévale et jusqu'à l'ère moderne. Certaines destructions et restaurations récentes ont aussi altéré les vestiges architecturaux du passé, résultant en une grande variété de bâtiments de tailles et de formes diverses et constitués de différents matériaux. Ces modifi-

cations sont mises en évidence par les données lidar sous la forme de modèles numériques 3D.

La forme générale du mur ressemble à un quadrilatère allongé et irrégulier, orienté du sud-ouest au nord-est, entourant la vieille ville. La plus grande longueur du quadrilatère est de 500 m alors que la largeur varie de 125 m à 190 m, donnant ainsi un périmètre de 1 300 m et une superficie de 80 000 m². Le mur est soutenu par 21 tours uniformément réparties dont 3 sont en partie visibles dans le nuage de points acquis à partir d'une station lidar proche du mur (*figure 3*). Deux d'entre elles sont situées de chaque côté de la station lidar, et la troisième plus loin, à l'extrémité du nuage de points. L'histogramme des distances met en évidence la profondeur de la scène, c'est-à-dire la distance jusqu'à l'objet visible le plus éloigné, nécessairement inférieure à la portée maximale qui peut être atteinte par le lidar, soit 300 m avec l'instrument utilisé dans cette étude.

Le pic le plus important est la réponse du mur et les deux autres pics corres-



Figure 3. Nuage de points de la muraille romaine du Mans (levé lidar terrestre). À gauche : vue perspective du nuage de points avec un code de couleurs pour les distances de 0,10 m à 102,87 m (le repère rouge indique la position du lidar) ; À droite : histogramme des distances.

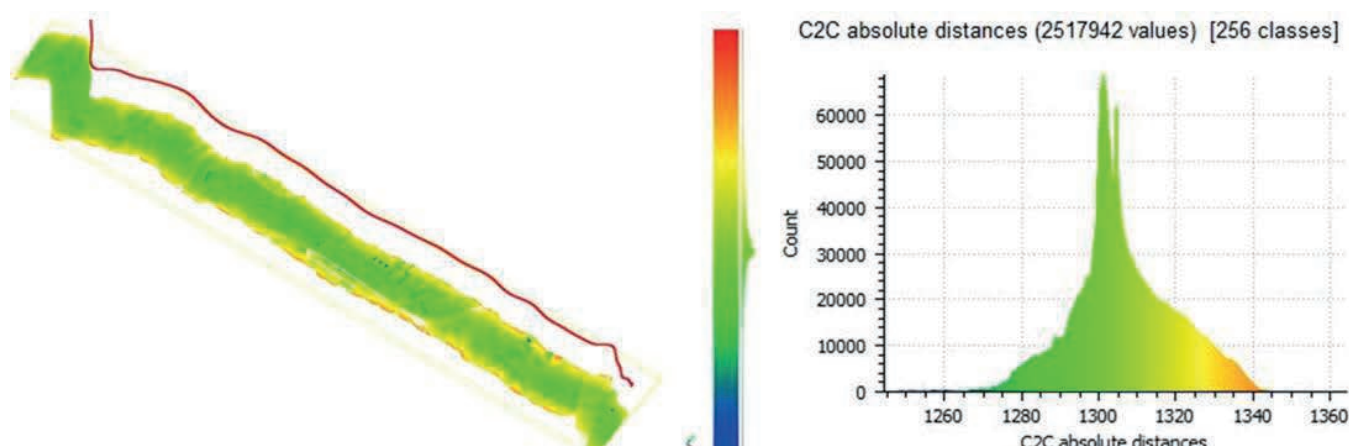


Figure 4. Nuage de points sur un quartier de Strasbourg (levé lidar aérien sur une zone de 4 x 0,640 km). À gauche : vue perspective du nuage de points (les couleurs représentent la gamme des distances, la ligne rouge représente la trajectoire de l'avion). À droite : histogramme des distances

pondent probablement aux tours les plus proches de la station lidar. On note que les parties du mur situées derrière les deux tours les plus proches sont occultées et ne sont donc pas présentes dans le nuage de points. Le pic plus bas qui apparaît à environ 92 m peut être attribué à la dernière tour, qui est toujours dans le champ de vision lidar, mais à cette distance la densité du nuage de points est très faible. Ainsi, le relevé lidar terrestre d'environnements complexes présente souvent des histogrammes de distances discontinus, où divers objets peuvent produire différents pics de tailles distinctes selon l'éloignement. Notons également que les courtes distances sont surreprésentées en raison de la densité plus élevée du nuage de points dans la zone proche.

Dans ce relevé, le rapport $\rho = R_{\max}/R_{\min}$ est d'environ 15. Ce ratio dépend évidemment de l'amplitude angulaire du balayage, limité dans sa partie inférieure à une élévation de 45° par rapport à la verticale. Cela revient à imposer sur la distance un seuil $R_{\min} = h/\cos 45^\circ$. Pour une hauteur du scanner égale à 1,5 m on trouve $R_{\min} = 2,5$ m. Acquérir des points plus proches de l'instrument augmenterait le ratio ρ et entraînerait localement une densité inutile du nuage de points. Ce seuillage permet de limiter la valeur de ρ , qui reste néanmoins très élevée comme dans beaucoup de levés terrestres. Un ratio aussi élevé ne pourrait pas se produire dans le cas de relevés lidar aériens.

■ Levé lidar aérien

Un levé lidar aérien a été réalisé en 2004 au-dessus de la ville de Strasbourg par les autorités municipales qui souhaitaient mettre à jour leur base de données altimétrique. Les données ont été utilisées pour tester une méthode de détection automatique de bâtiments (Tarsha-Kurdi et al., 2007). La zone couvrant le centre historique et le campus universitaire a été survolée à 1440 m au-dessus du sol avec un instrument Optech ALTM 1225 (25 kHz) d'ouverture 26° (angle de balayage de $\pm 13^\circ$ par rapport au nadir). Le nuage de points étudié ici (figure 4) représente un passage sur un couloir de 4 km de long et 640 m de large. La densité du nuage de points est d'environ un point pour $1,7 \text{ m}^2$.

L'histogramme des distances ne présente pas de discontinuités comme le cas du levé terrestre. Les distances les plus courtes correspondent au sommet des arbres et des bâtiments au nadir. Le pic central correspond au sol au nadir (où la densité est maximale ce qui accroît l'effectif) ainsi qu'à des objets élevés sur les côtés. Les distances les plus grandes correspondent aux points du sol sur les bords du couloir survolé. Contrairement au cas du levé terrestre, les distances courtes ne sont pas surreprésentées de manière significative dans l'histogramme.

Dans le cas d'un terrain plat, l'indicateur d'hétérogénéité des distances serait $\rho = 1/\cos \theta_{\max}$ comme l'indique l'équation (3). Les données

ayant été acquises avec $\theta_{\max} = 13^\circ$, la valeur théorique de l'indicateur est $\rho = 1.102$. Or la valeur réelle obtenue est $\rho = 1.096$. Ainsi, dans le cas des levés lidar aériens, l'hétérogénéité des distances est non seulement très limitée (i.e. proche de 1), mais aussi facile à prédire.

Ces deux exemples illustrent le fait que l'hétérogénéité de la qualité d'un nuage de points est beaucoup plus facile à contrôler pour des levés aériens que pour des levés terrestres.

Comment limiter l'hétérogénéité des distances ?

Pour spécifier la qualité d'un nuage de points avec un indicateur global, la qualité individuelle des points doit être la plus homogène possible. Les variations dues aux caractéristiques de la cible (albédo, rugosité, orientation, etc.) ne peuvent être évitées et elles contribuent nécessairement à l'hétérogénéité de la qualité. En revanche, les variations dues à des distances laser-cible hétérogènes peuvent être prédites et contrôlées dans une certaine mesure.

■ Acquisitions terrestres

L'amplitude des distances est difficile à prédire dans un levé terrestre, car elle dépend de l'organisation spatiale de la zone (positions relatives des bâtiments, des arbres et autres objets topographiques), qui n'est évidemment pas



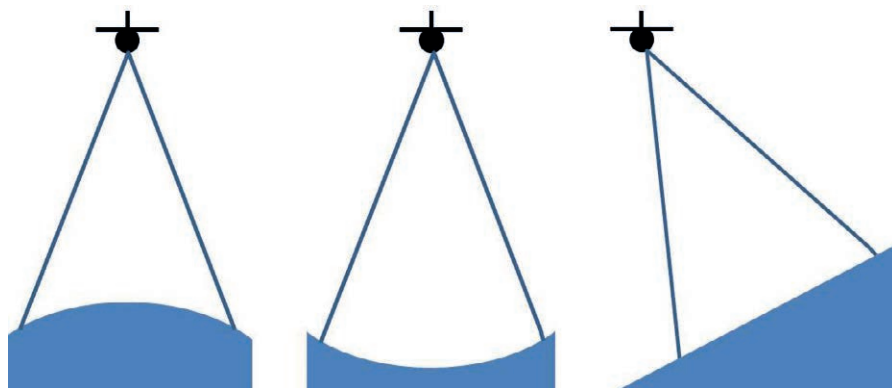


Figure 5. Cas le moins favorable (terrain convexe, à gauche) et le plus favorable (terrain concave, au centre) en termes d'hétérogénéité des distances ; adaptation de l'angle d'incidence à l'orientation des versants (à droite).



censée être connue avant le levé. Afin d'éviter ce cercle vicieux, deux seuils R_{\min} and R_{\max} peuvent être définis de manière à ce que le rapport R_{\max}/R_{\min} ne dépasse jamais une limite spécifiée, et le relevé peut être organisé de manière à ce que cette limite soit toujours respectée :

- le topographe peut respecter pour chaque station une distance minimale par rapport à l'objet le plus proche pour que les distances mesurées soient toujours supérieures au seuil R_{\min} spécifié ;
- les différentes stations peuvent être placées de telle sorte que chaque nuage de points puisse être coupé au-delà de R_{\max} spécifié (pouvant correspondre au seuil fixé dans les instruments, ainsi dans l'exemple cité précédemment la distance maximale est de 300 m pour un albédo de 90 %, et elle est réduite à 134 m pour un albédo de 18 %) mais on doit s'assurer qu'aucune zone n'est perdue en raison de cette coupure dans le nuage de points global.

Ces règles simples sont empiriques et peuvent être appliquées dans des situations simples. Cependant, la réalité est souvent plus complexe et la présence d'obstacles (bâtiments, arbres...) peut nécessiter des stratégies adaptées pour organiser le relevé.

■ Acquisitions aériennes

Il est plus facile de prédire l'amplitude des distances dans un levé aérien que dans un levé terrestre, car elle dépend essentiellement de l'ouverture angulaire du balayage. Nous avons montré

(équation 2) que sur terrain plat l'indicateur d'hétérogénéité des distances est $\rho = 1/\theta_{\max}$. La qualité peut donc être rendue plus homogène en utilisant une ouverture plus petite. Cela présente toutefois des inconvénients, car une ouverture plus petite est compensée soit par une hauteur de vol plus élevée (mais la distance accrue dégrade alors la qualité des données pour les raisons déjà évoquées), soit par un plus grand nombre de passages.

Dans le cas d'une acquisition à plusieurs passages, l'exigence d'une petite ouverture de balayage oblige à limiter la valeur de la base (distance entre deux trajectoires consécutives). Dans le cas d'un terrain plat la base maximale dépend de la hauteur de vol et de la valeur limite de ρ :

$$B = 2H\sqrt{\rho^2 - 1} \quad (8)$$

En présence de relief, d'arbres ou de bâtiments, la base à ne pas dépasser est encore plus petite, le cas le plus contraignant se produisant lorsque les objets les plus élevés sont au nadir. De même, dans les zones montagneuses, le pire cas se produit lorsque l'avion survole une crête (hétérogénéité maximale des distances sur une surface convexe). Au contraire, le cas le plus favorable se produit lorsqu'il survole une vallée (hétérogénéité minimale des distances sur une surface concave). L'angle d'incidence est alors minimal (Figure 5). De même, le survol d'un versant incliné augmente l'hétérogénéité des distances, sauf si l'instrument est orienté latéralement de manière à viser perpendiculairement la surface (Vallet 2009).

Discussion

On peut donc concevoir des stratégies basées sur des considérations géométriques simples et sur l'expérience de l'opérateur, pour concevoir au mieux la disposition des stations (acquisitions terrestres) ou le plan de vol (acquisitions aéroportées) de manière à limiter l'hétérogénéité des distances et donc de la qualité du nuage de points. Analyser ou prédire la qualité d'un nuage de points suppose toutefois que pour chaque point, la distance laser-cible soit enregistrée dans le fichier délivré à l'utilisateur.

Plusieurs aspects du problème n'ont pas été considérés dans cet article et mériteraient des études complémentaires :

- Nous avons considéré seulement les variations de la distance laser-cible et négligé les variations des propriétés de l'objet illuminé (albédo, rugosité, orientation, etc.). Ces variations ne pouvant pas être prises en compte par des équations analytiques, elles ne peuvent être étudiées qu'à partir de nombreux jeux de données sur des terrains variés, ou à partir de simulations de nuages de points lidar sur des scènes 3D complexes (Gastellu-Etchegorry et al. 2015) qui permettent de comprendre de manière méthodique l'influence relative de la distance et des caractéristiques sur la surface sur l'hétérogénéité de la qualité des données.
- Nous n'avons considéré que les données disponibles sous la forme de nuages de points, où chaque point peut être associé à une distance, tandis que les modèles 3D surfaciques, susceptibles d'être interpolés à partir de points voisins acquis à des distances variables, impliquent une difficulté supplémentaire.
- Enfin le cas des drones n'a pas été considéré dans cet article. Comme il constitue une configuration intermédiaire entre les acquisitions terrestres mobiles et aériennes, des stratégies spécifiques pourraient être proposées pour limiter l'hétérogénéité des distances, inspirées de celles que nous venons de suggérer dans le cas des acquisitions terrestres et aériennes.



Conclusion

L'impact de l'hétérogénéité des distances sur la qualité d'un nuage de points a été étudié dans cet article, où nous nous sommes interrogés sur la possibilité de limiter l'amplitude des distances laser-cible pour rendre les spécifications de qualité plus pertinentes. Nous avons considéré aussi bien les acquisitions terrestres qu'aériennes, et l'analyse des données expérimentales montre que le problème est plus critique dans le cas des acquisitions terrestres, où les distances sont à la fois très hétérogènes et difficiles à prédire. Nous n'avons pas considéré l'hétérogénéité des propriétés locales du milieu (albédo, rugosité, orientation, etc.), qui ont aussi un impact sur la qualité globale des données, ni le cas des modèles surfaciques interpolés à partir des nuages de points. Les principes exposés dans cet article peuvent donc alimenter des études plus approfondies, devant conduire à des recommandations, aussi bien pour les utilisateurs que pour les constructeurs de matériel, pour limiter l'hétérogénéité des distances dans des levés lidar.

Remerciements

Nous remercions les professeurs et les étudiants qui ont traité les deux jeux de données lidar aériennes et terrestres dans le cadre de leurs travaux académiques à l'INSA (Strasbourg) et à l'ESGT (Le Mans), respectivement. Nous tenons également à remercier les autorités locales de la ville de Strasbourg pour la mise à disposition des données lidar sur Strasbourg.

Bibliographie

- Abellán, A., Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Vilaplana, J.M. (2009) *Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: experiment and application to a rockfall event*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 9, pp. 365-372.
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Yin, T., Lauret, N., Cajgfinger, T., Grégoire, T., Grau, E., Feret, J.B., Lopes, M., Guilleux, J., Dedieu, G., Malenovsky Z., Cook, B.D., Morton, D., Rubio, J., Durrieu S., Cazanave, G., Martin, E., Ristorcelli, T. (2015) *Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes*. Remote Sensing, 7, 1667-1701, doi:10.3390/rs70201667.
- Grussenmeyer, P., Landes, T., Voegtli, T., Ringle, K. (2008) *Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5): 213-218.
- Lichti, D., Harvey, B. (2002) *The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of-Flight Laser Scanner Measurements*. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa.
- Lichti, D., Jamtsho, S. (2006) *Angular Resolution of Terrestrial Laser Scanners*. The Photogrammetric Record, 21. 10.1111/j.1477-9730.2006.00367.x.
- Meunier, H., Monteil, M. (dir.) (2017a) : *Projet collectif de recherche, L'enceinte romaine du Mans (Sarthe, Pays de la Loire)*. Bilan des connaissances, Demande formulée pour une année probatoire - 2017, Nantes, DRAC des Pays de la Loire.
- Meunier, H., Monteil, M. (dir.) (2017b) : *Projet collectif de recherche, L'enceinte romaine du Mans (Sarthe, Pays de la Loire)*. Bilan des connaissances, Rapport d'activités 2017 et demande formulée pour 2018 - 2020, Nantes, DRAC des Pays de la Loire.
- Pesci, A., Teza, G., Bonali, E. (2011) *Terrestrial Laser Scanner Resolution: Numerical Simulations and Experiments on Spatial Sampling Optimization*, Remote Sensing, 3: 167-184.
- Priestnall, G., Jaafara, J., Duncan, A. (2000) *Extracting urban features from LiDAR digital surface models*. Computers, Environment and Urban Systems, 24 (2000): 65-78.
- Tarsha-Kurdi, F., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2007) *Joint combination of point cloud and DSM for 3D building reconstruction using airborne laser scanner data*. Urban Remote Sensing Joint Event, 11-13 April 2007, Paris, France.
- Vallet, J. (2009) *Cartographie héliportée avec un système LiDAR-Photogramétrique portable à la main : Expérience pratique en montagne, Analyse des performances et de la phase de calibration*. Colloque SFPT Technique laser pour l'étude des environnements naturels et urbains, Le Mans, Février 2009.
- Van Leeuwen, M., Nieuwenhuis, M. (2010) *Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing*, European Journal of Forest Research, 129(4): 749-770, https://doi.org/10.1007/s10342-010-0381-4.
- Voegtli T., Schwab, I., Landes, T. (2008) *Influences of different materials on the materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS)*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5): 1061-1066.

Contact

Laurent POLIDORI CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRA/IRD/UPS, Toulouse, France

laurent.polidori@cesbio.cnes.fr

Tania LANDES, Photogrammetry and Geomatics Group, ICube Laboratory UMR 7357, INSA Strasbourg, France
tania.landes@insa-strasbourg.fr

Jérôme VERDUN, Laboratoire Géomatique et Foncier, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Cnam/HESAM Université/GRGS, Le Mans, France
jerome.verdun@lecnam.net

Michel KASSER Laboratoire INSIT, HEIG-VD, Suisse - michel.kasser@gmail.com

ABSTRACT

Keywords: terrestrial lidar, airborne lidar, range heterogeneity, quality. *The quality specification of a laser point cloud is more relevant if all points have similar individual qualities. In practice however, quality heterogeneities are caused by the presence of different materials and by the geometry of the scene which produces range heterogeneities. This article focuses on range heterogeneity and its impact on the quality heterogeneity in a point cloud. The analysis of typical terrestrial and aerial lidar surveys shows that the impact of range heterogeneity is more critical in the terrestrial case. Finally, some strategies to limit range heterogeneity in a lidar survey are proposed, as well as recommendations for survey implementation.*