

Évaluation de la qualité de modèles 3D issus de nuages de points

■ Tania LANDES

La modélisation 3D répond à la fois à un enjeu économique, mais aussi environnemental, que ce soit à l'échelle du bâtiment ou de la ville. Ces dix dernières années, les techniques d'acquisition ont considérablement évolué du point de vue de leur rapidité, du volume de données à gérer, de l'hétérogénéité des informations acquises par les systèmes multiscanneurs, de même que des méthodes de traitement des données. De nouveaux processus sont nés de ces bouleversements, comme le processus "scan-to-BIM", caractérisant les étapes menant du nuage de points à une maquette numérique intelligente. En adoptant la maquette numérique, intégrée dans un processus collaboratif BIM (Building Information Modeling), les acteurs du bâtiment sont en mesure d'effectuer des simulations et de réduire, en plus des coûts, l'impact environnemental lié aux interventions sur le bâtiment, tout au long de son cycle de vie. En pratique, pour aboutir à une maquette numérique intelligente du bâtiment à partir d'un relevé de l'existant, de nombreux verrous technologiques sont à lever. Dans ce contexte, j'ai eu l'occasion d'encadrer divers travaux de recherches portant sur les thématiques allant de l'acquisition de données 3D (généralement sous forme de nuages de points 3D) à leur traitement, jusqu'à la production de la maquette numérique comme résumé dans le numéro 167 de la revue XYZ [Landes, 2021]. Dans la continuité de ce résumé, et comme l'annonçait la conclusion de ce dernier, cette suite se concentre sur la question de la qualité des livrables 3D détaillés dans [Landes, 2020].

■ MOTS-CLÉS

Qualité, précision, exactitude, modèle 3D, segmentation, reconstruction

Décomposée en évaluation qualitative et quantitative, l'évaluation d'un résultat fait appel à des connaissances techniques pour analyser les erreurs susceptibles d'affecter chaque étape de la chaîne de traitement mise en place dans un processus "scan-to-BIM" et, par voie de conséquence, amène à établir un bilan des erreurs. Nous ne nous attarderons pas sur l'évaluation qualitative, à savoir un contrôle visuel du résultat, réalisé d'office, mais nous concentrerons dans cet article essentiellement sur les méthodes d'évaluations quantitatives mises en œuvre dans nos projets.

Quelques rappels terminologiques

Du fait que la technologie des scanners laser ai rapidement été adoptée par des corps de métier de divers horizons et, qu'au travers de leurs interfaces, les instruments ou logiciels transmettent un vocabulaire souvent inapproprié (provenant parfois d'une traduction peu rigoureuse de la version anglaise), la terminologie relative à la lasergrammétrie est fréquemment employée à

tort. Ainsi, pour ne citer qu'un exemple, les notions de résolutions ou de pas sont souvent confondues avec l'exactitude ou encore la précision. Il nous semble utile de faire un petit rappel ci-dessous.

La résolution : un instrument de type scanner laser terrestre (SLT) est un appareil qui mesure des distances par incréments égaux d'arc et produit une image de distance [Lichti, 2017]. Le balayage laser s'effectue selon une trame spécifique dont les paramètres sont à définir par l'utilisateur, qui fixe le pas angulaire vertical et horizontal de son choix. Le plus petit pas angulaire disponible correspond à la résolution angulaire, et caractérise donc la capacité de l'appareil à mesurer de façon indépendante deux objets situés sur des lignes de visées adjacentes. Si l'on rapporte l'écart angulaire à un déplacement à une certaine portée, on parlera de résolution spatiale d'un scanner laser terrestre. La résolution spatiale représente donc le plus petit espace entre deux points successifs que l'on puisse mesurer à l'aide du scanner laser à une distance objet-scanner fixe. Cette distinction avait déjà été souli-

gnée dans les revues XYZ n^{os} 128 et 129 [Landes et al., 2011a et 2011b].

La précision décrit la dispersion de mesures autour de la valeur la plus probable de l'échantillon. Le critère statistique correspondant est l'écart-type σ (*standard deviation*, en anglais). L'écart-type d'une variable aléatoire l s'écrit :

$$\sigma = \sqrt{E\{l - L\}^2}$$

Il représente la dispersion des mesures l autour de leur espérance et est habituellement utilisé comme critère de précision (*precision* en anglais). Si on note L l'espérance de l ou encore la valeur la plus probable de l , l'écart-type s'écrit aussi :

$$\sigma = \sqrt{E\{l - E(l)\}^2}$$

On considère souvent l'espérance mathématique comme le centre de la variable aléatoire, c'est-à-dire la valeur autour de laquelle se dispersent les autres valeurs. Si la loi de probabilité est symétrique par rapport à la valeur centrale L , alors $E(l) = L$ où L est la moyenne arithmétique dans le cas d'observations directes de même précision (valeur la plus probable).

Si la valeur de L est calculée par moyenne de n observations directes l_i , on dira que les v_i sont des écarts apparents et l'écart-type se calcule alors par la formule de Bessel :

$$\sigma_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}}$$

Cette grandeur, au carré, caractérise la variance et intervient dans la propagation de la variance [Mikhail, 1982], lorsque l'on souhaite par exemple analyser l'effet d'imprécisions de mesures (angles et distances) sur le résultat que sont les coordonnées des points du nuage.

L'exactitude décrit la dispersion de mesures autour de la valeur vraie de la grandeur mesurée et est représentée par l'erreur moyenne quadratique, notée "mq" (ou encore "RMSE", *root mean square error*, en anglais).

L'erreur moyenne quadratique d'une mesure représente la dispersion des mesures l autour de leur valeur vraie et est habituellement utilisée comme critère d'exactitude (*accuracy*, en anglais). Donc, une erreur moyenne quadratique (mq) qualifie l'exactitude d'une série de mesures par rapport à une valeur vraie L . Elle se calcule à partir d'écarts vrais (e_i) et d'un nombre d'observations noté n :

$$mq_l = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n}}$$

Cela veut dire qu'un résultat / instrument peut être précis sans pour autant être exact ! Évidemment, les valeurs vraies ne sont que rarement connues, c'est pourquoi une mesure indépendante, de meilleure qualité, qualifiant la valeur vraie est nécessaire. Des points de contrôle ou des mesures de distances observés par tachéométrie sont couramment utilisés à cette fin. Par exemple, les coordonnées des centres de cibles observées par lasergrammétrie peuvent être comparées aux coordonnées obtenues par tachéométrie (ou encore des mesures de distances entre cibles) pour quantifier l'exactitude de mesure d'un système. L'erreur moyenne quadratique peut comporter une composante systématique ($e_i - v_i = a$). Les écarts individuels

e_i peuvent en effet être composés d'erreurs systématiques et accidentelles $e_i = a + v_i$. On peut donc écrire la relation suivante :

$$emq = \sqrt{\sigma^2 + \beta^2}$$

où β représente un biais à caractère systématique.

En l'absence de systématismes (présence de corrélations entre observations), écart-type et erreur moyenne quadratique peuvent être considérés comme sensiblement identiques à condition de disposer d'un échantillon d'observations de taille significative.

Exactitude et précision appliquées à une droite :

La figure 1 illustre les écarts apparents ou écarts à la valeur la plus probable (v_i) et les écarts vrais (e_i) dans le cas de points ajustés par une droite.

Exactitude et précision appliquées à une maquette numérique :

La figure 2 illustre les notions d'exactitude et de précision rapportées à la numérisation d'un bâtiment. La précision du nuage de points est liée à la dispersion des points autour du plan moyen ("le plus probable") ajusté au nuage. L'exactitude du nuage définit sa fidélité à la réalité, cette réalité étant observée dans un référentiel cartogra-

phique spécifique. Elle caractérise la dispersion des points autour du plan de référence (plan "vrai"). Les critères de qualité que nous allons voir s'appuient sur des comparaisons entre un résultat produit par la chaîne de traitements et un résultat de référence, produit manuellement ou avec une technique plus exacte que celle ayant servi à la production du livrable.

Bilan des erreurs

Une bonne connaissance des sources d'erreurs et une compréhension des relations qui les lient est nécessaire pour quantifier la qualité d'un résultat. Le besoin de qualifier le résultat se fait d'autant plus ressentir avec l'avènement d'outils de traitements rapides, mais trop souvent opaques. Les erreurs affectant un résultat peuvent être classifiées selon quatre catégories :

- erreurs liées à l'acquisition des données (erreurs instrumentales, erreurs liées au couplage des composants du système, erreurs liées à la géométrie de prise de vue, à la technologie employée, au mode opératoire mis en œuvre, au choix des paramètres de balayage) ;
- erreurs liées à l'objet numérisé (étendue, couleur, géométrie, matériaux) ;
- erreurs environnementales (température ambiante, pression, humidité),

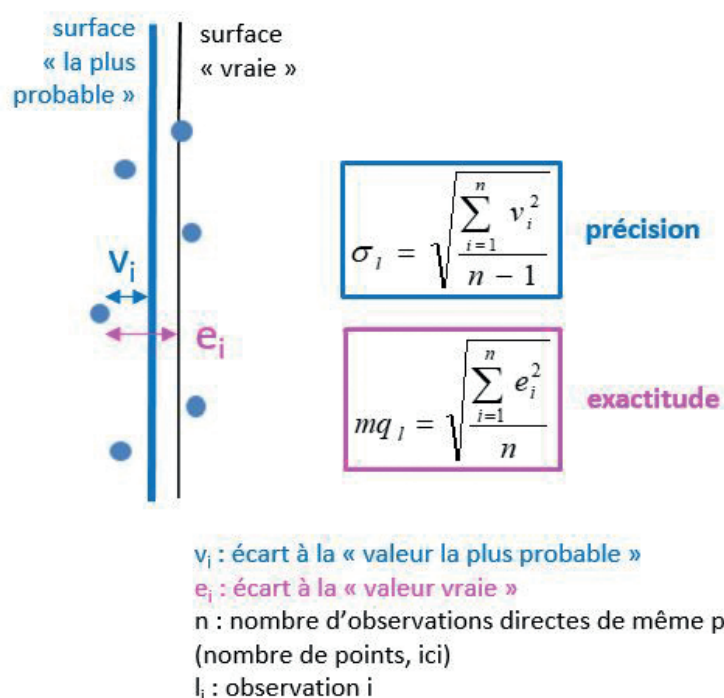


Figure 1. Écarts entrant dans les calculs d'écart-type et d'erreur moyenne quadratique.

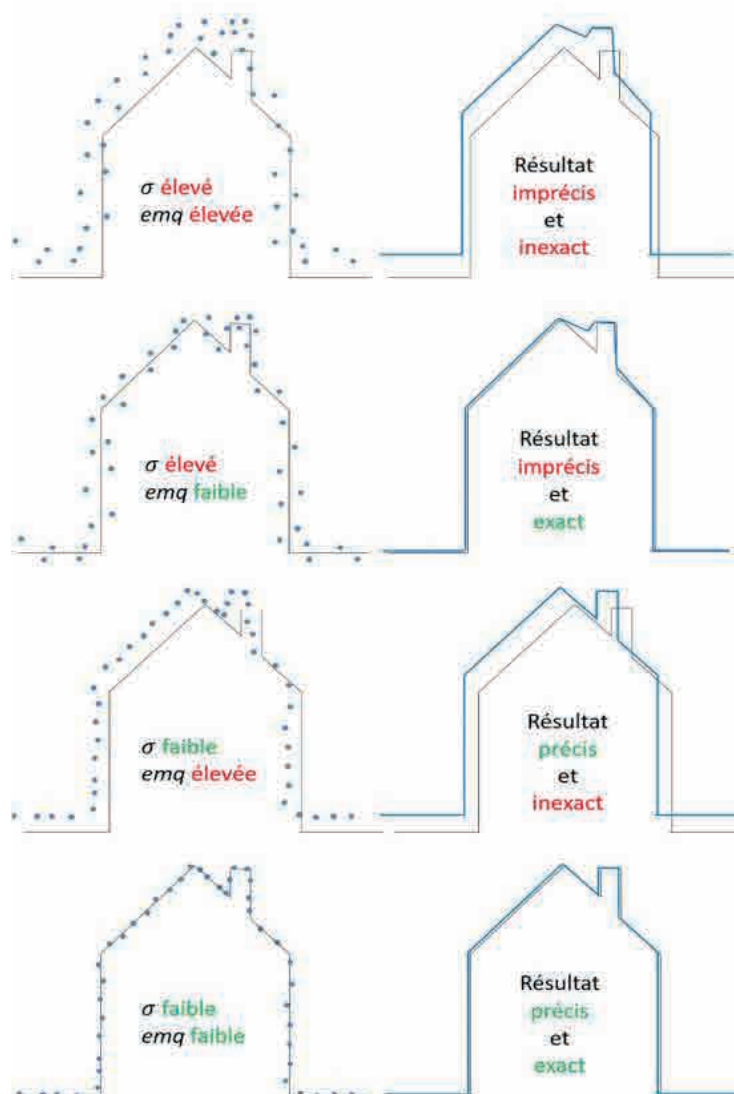


Figure 2. Critères de précision et d'exactitude rapportés à la modélisation de bâtiments à partir de nuages de points (adaptée de YellowScan@2020) ; vérité terrain en gris, points du nuage en bleu et modèle calculé en trait bleu continu.



affectant l'indice de réfraction du milieu traversé par l'onde ;

- erreurs liées à la chaîne de traitements et au degré d'intervention humaine ; en d'autres termes, les erreurs susceptibles d'intervenir dans les étapes nécessaires au passage de la donnée brute au modèle 3D final.

Hormis les erreurs environnementales que nous n'avons pas eu l'occasion d'analyser, chacune de ces catégories d'erreurs est détaillée dans [Landes, 2020]. Le présent article reprend les approches mises en place pour évaluer les étapes de la chaîne de traitements développée par notre équipe.

Au cours de chaque thèse abordant la génération de modèles 2D ou 3D à partir de nuages de points, une approche d'évaluation de la qualité des

résultats a été proposée. Pour cela, il a été nécessaire de considérer l'apport de chaque étape de traitement conduisant à la génération du modèle 3D final, soit à évaluer les résultats de segmentation ainsi que les résultats de reconstruction.

■ Approches mises en place pour évaluer l'étape de segmentation

L'évaluation de la qualité d'une segmentation dépend de la qualité des résultats qu'elle produit, c'est-à-dire en premier lieu des segments (de points) détectés, car ils jouent un rôle crucial dans les processus ultérieurs de reconstruction.

Segmentation "outdoor"

L'approche d'évaluation de l'outil de segmentation de façades développée dans [Boulaassal, 2010] est basée sur la

comparaison de segments plans obtenus automatiquement sur des façades de bâtiments, avec ceux extraits d'une segmentation de référence générée manuellement [Landes et al., 2012a]. Elle s'appuie sur l'analyse d'indices de qualité permettant de déterminer le degré de similitude entre les segments plans calculés et ceux de référence. Le degré de similitude tient compte de deux critères :

- la qualité de détection des segments plans comparée au résultat issu d'une segmentation manuelle, au travers d'opérateurs booléens (énumérés dans la figure 3) ;
- les paramètres mathématiques des plans ajustés (analyse des écarts angulaires entre normales des plans extraits et leurs homologues dans la référence).

La figure 4 présente, en image, un exemple d'application de l'approche d'évaluation mise en place. Le résultat de la segmentation automatique appliquée à un nuage couvrant une façade de l'INSA est comparé à une segmentation de référence issue d'un traitement manuel et le tableau recensant les indices de qualité est reporté en figure 4c.

Une mesure globale de la qualité de la segmentation consiste à diviser le nombre de points extraits correctement par le nombre de points contenus dans l'ensemble des segments de référence (indice TDR(i)). Dans l'exemple précédent, ce taux s'élève à 0.97, ce qui signifie qu'en moyenne 97 % des points ont été extraits conformément à la référence.

Segmentation "indoor"

L'approche d'évaluation de l'outil de segmentation d'intérieurs de bâtiments développée dans la thèse de [Marcher, 2017] s'appuie sur l'analyse de la classification des segments plans. Dans les travaux précédemment cités, la géométrie des segments plans de façade revêtait une importance primordiale puisque les contours des segments plans allaient décrire le contour des objets recherchés (toits, façades). Les indices de qualité basés sur la comparaison de surfaces couvertes par les segments calculés et de référence prenaient donc tout leur sens.

$A(i)$: segment plan extrait automatiquement
$SR(i)$: segment plan de référence
$Card(A)$: cardinal du segment, c'est-à-dire le nombre de points composant le segment
$I(i) = A(i) \cap SR(i)$: points du segment i correctement extraits; il s'agit du nombre de points communs aux deux segments comparés
$D^-(i) = SR(i) \setminus A(i)$: points affectés de manière erronée à un autre segment que $A(i)$
$D^+(i) = A(i) \setminus SR(i)$: points devant appartenir à un autre segment que $A(i)$
$TDA(i)$: taux de points correctement détectés dans $A(i)$
$TDR(i)$: taux de points correctement détectés par rapport aux $SR(i)$
$TDA(i) = \frac{I(i)}{Card(A(i))} \qquad TDR(i) = \frac{I(i)}{card(SR(i))}$

Figure 3. Indices de qualité pour évaluer la segmentation en plans de façades de bâtiments.

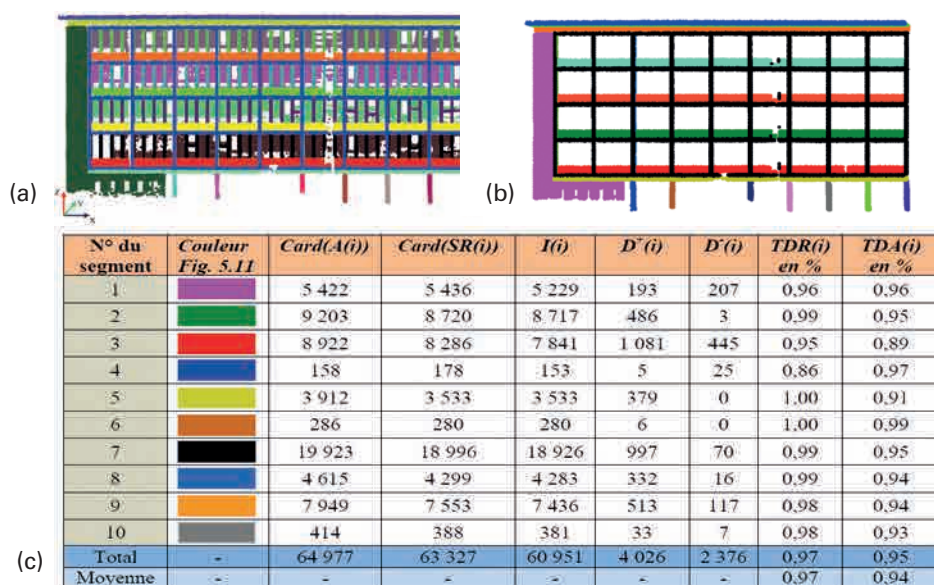


Figure 4. Évaluation de l'étape de segmentation de façades appliquée au nuage de l'INSA ; a) résultat de la segmentation automatique ; b) segmentation de référence ; c) tableau d'évaluation pour un échantillon de 10 segments plans.

En intérieur, les obstacles situés entre le scanner et les objets sont tellement nombreux qu'il est utopique d'en tirer des contours directement exploitables. Les indices de qualité basés sur les surfaces que couvrent les segments plans sont donc inappropriés. En revanche, la capacité à classer les segments en classes d'objets est primordiale ici. C'est pourquoi la précision de la classification des points en sol, mur, plafond a été placée au centre de cette évaluation.

Des métriques semblent s'imposer progressivement comme métriques standards pour évaluer les performances d'approches de segmentations sémantiques. On peut citer notamment la "précision" (*correctness* ou *precision*, en anglais), le "rappel" (*completeness* ou *recall*, en anglais) ou encore le "score F1" qui est une fonction des deux métriques précédentes [Heipke et

al., 1997 ; Roynard et al., 2018]. Elles se calculent à partir de "vrais positifs (VP)", "faux positifs (FP)", "vrais négatifs (VN)", "faux négatifs (FN)", qui supposent l'existence d'une segmentation de référence. Ainsi, une segmentation manuelle effectuée sur un nuage de points d'intérieur de bâtiment et distinguant les classes d'intérêt (plafonds et sols, murs, objets) a été comparée au résultat de la segmentation développée. La comparaison de ces nuages de points a permis

		Plafonds et sols	Murs	Objets
Maison individuelle	VP	99 %	89 %	94 %
	FN	3 %	1 %	21 %
Bâtiment de bureaux	VP	99,5 %	93 %	81 %
	FN	4,5 %	9 %	8 %

VP = vrais positifs ; FN = faux négatifs

Tableau 1. Évaluation de la classification des points en plafonds et sols, murs et autres [Macher, 2017].

de déterminer le pourcentage de vrais positifs et le pourcentage de faux négatifs pour chacune des catégories et pour deux jeux de données (tableau 1).

Nous pouvons conclure, sans grande surprise, que les segments "plafonds et sols" sont mieux extraits (VP élevés et FN faibles) que les murs ou objets de la scène et qu'un contrôle visuel reste de mise.

Les livrables issus des algorithmes de segmentation ont ainsi été évalués. Nous pouvons nous pencher à présent sur les approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation.

■ Approches mises en place pour évaluer l'étape de modélisation

Nous considérerons, dans cette partie, les approches développées en vue d'évaluer la qualité des modèles 3D de bâtiments, de façades et d'intérieurs de bâtiments.

Modélisation de bâtiment entier

Un des volets de la thèse de [Mohamed, 2013] a consisté à proposer une approche multidimensionnelle standard pour évaluer la qualité de modèles 3D simples de bâtiments produits par technique lasergrammétrie [Landes et al., 2012b], photogrammétrie (stéréorestitution) ou par combinaison des deux [Mohamed et al., 2013]. Les modèles 3D de bâtiments considérés ici sont vectoriels, de géométrie très simple (figure 5). L'approche d'évaluation exige toutefois de posséder, pour chaque modèle de bâtiment à évaluer, un modèle de référence.

L'évaluation 1D se base sur l'analyse de l'exactitude des points décrivant la géométrie du bâtiment, selon chaque direction (erreur moyenne quadratique en X, Y et Z), calculée à partir des écarts entre les deux modèles (référence et test). Elle peut également s'appuyer sur



le contrôle du respect d'une classe de précision, suivant le modèle standard proposé dans le Journal officiel du 30 octobre 2003.

L'approche d'évaluation 2D qualifie, au travers de facteurs de qualité, le degré de superposition des faces (contours de façades ou de pans de toits en 2D) du modèle test et du modèle de référence. Ces indices font intervenir des opérations booléennes (figure 6a). Une évaluation 2D satisfaisante ne valide toutefois pas encore le modèle reconstruit, en raison de sa sensibilité à la taille des polygones étudiés et du fait que deux plans parfaitement superposés dans le système d'axes parallèles au plan sont susceptibles d'être décalés en profondeur. Ce défaut ressort au plus tard dans l'étape de l'évaluation 3D.

L'évaluation 3D analyse les bâtiments en tant qu'objets à part entière en estimant le degré de superposition entre volumes à comparer (figures 6b et 6c). Les indices de qualité, déduits de ceux définis en 2D, se rapportent, dans ce cas, au degré de superposition du volume testé et du volume de référence. Ces indices avaient déjà été développés antérieurement à ce projet [Landes et al., 2012a] pour répondre au besoin de reconstruction des façades (nous les verrons dans le tableau 2). Pour évaluer les vecteurs 3D, les critères statistiques classiques (erreur moyenne quadratique et écart-type) étant quelque peu restrictifs, ils ont été complétés par des cartes d'erreurs. Bien entendu, l'inspection visuelle reste indispensable.

Les statistiques sur les indices de qualité 2D et 3D calculées sur plusieurs jeux de données ont révélé que les modèles reconstruits à partir des données LiDAR ou de la combinaison des données LiDAR et d'images aériennes (produites selon [Zhang et al., 2011]) sont moins exacts que les modèles 3D de bâtiments extraits à partir de couples d'images stéréoscopiques.

L'originalité de cette approche d'évaluation réside dans le fait qu'elle est applicable aussi bien à des modèles vectoriels qu'à des modèles sous forme de voxels. Elle mérite toutefois d'être approfondie et étendue à des modèles 3D plus complexes de bâtiments.

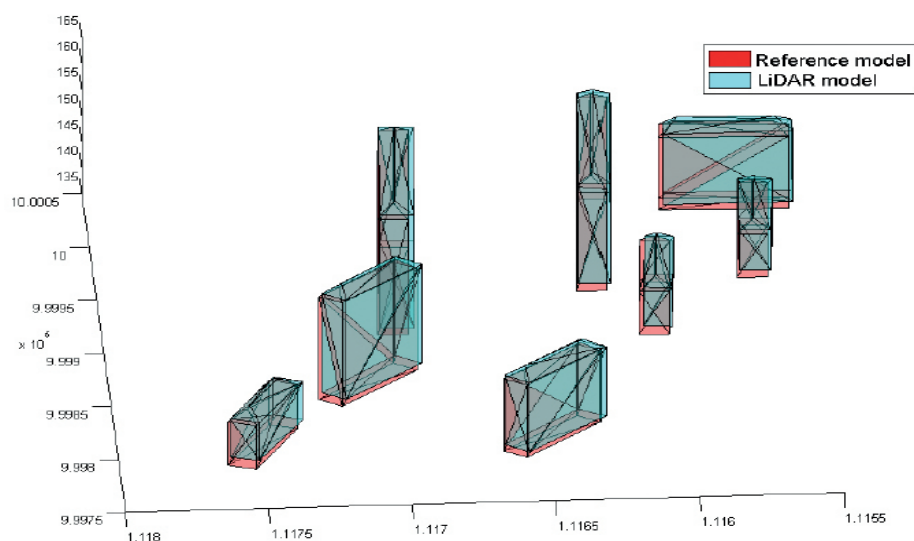


Figure 5. Modèles 3D obtenus sur la base de données LiDAR exclusivement et comparés à leur référence [Mohamed et al., 2013].

Dans la continuité de l'évaluation 3D, lorsque le bâtiment à évaluer a été construit par ajustement de primitives géométriques, comme mis en œuvre dans Tarsha-Kurdi, 2008], il est intéressant de confronter le modèle calculé au nuage brut ayant servi à le produire. Ainsi, l'évaluation portant sur la qualité de reconstruction de plans décrivant les toits scannés par LiDAR aéroporté couvre deux volets :

- l'analyse de la précision des plans composant les toits, par analyse de critères statistiques tels que l'écart-type en distance (dispersion des points couvrant le toit autour du plan moyen calculé à partir de ces points) ;
- l'analyse des erreurs de modélisation au travers d'une "carte des erreurs", dans laquelle sont reportés les écarts entre chaque point et son plan moyen (figure 7).

Globalement, les résultats obtenus à l'issue de la longue chaîne de traite-

ments semi-automatique menant du nuage de points LiDAR aéroporté au modèle 3D reconstruit du bâtiment sont très satisfaisants au regard de tous les facteurs d'influence que sont, entre autres, le bruit de mesure, les détails non modélisables ou encore la densité de points. Ces facteurs sont susceptibles de fausser l'équation mathématique de chaque plan composant le bâtiment et de générer par voie de conséquence des déformations dans sa géométrie.

Modélisation de façades

Dans le processus de reconstruction de façades à partir de nuages de points, les segments plans évalués préalablement servent de base à la création de contours d'ouvertures. Pour évaluer de façon quantitative les résultats de la reconstruction géométrique, des indices de qualité 2D ont été proposés pour comparer le contour calculé et sa référence, non pas à l'échelle des

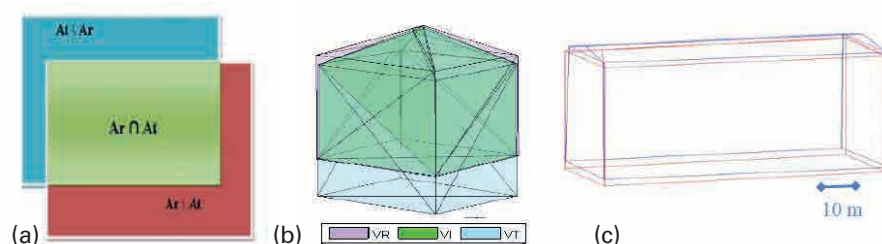


Figure 6. Comparaison du modèle testé à sa référence ; a) en 2D par analyse de surfaces ; b) en 3D par analyse de volumes entre modèles de référence (VR) et testé (VT) et volume d'intersection désigné par $VI = VR \cap VT$; c) superposition d'un modèle 3D du modèle extrait (en bleu) et de référence (rouge) [Landes et al., 2012b et Mohamed et al., 2013].

points constituant le contour, mais en termes de surfaces de polygones (figure 8).

Une question importante dans l'évaluation des résultats est le choix du modèle de référence, qui sera généré différemment suivant le critère statistique que nous souhaitons analyser. Ainsi, pour évaluer la précision du résultat, les polygones de référence sont digitalisés sur la base du nuage de points. Pour évaluer l'exactitude du résultat, les polygones de référence sont obtenus par mesures tachéométriques. En comparant les coins levés à ceux détectés par traitement automatique des données laser, l'effet de toutes les erreurs intervenant depuis l'acquisition jusqu'à la modélisation de la façade peut être mis en évidence. Les indices de qualité employés sont en grande partie inspirés de la littérature et s'appuient sur des opérations booléennes d'analyses spatiales basées sur des ensembles constitués par les surfaces des polygones étudiés (tableau 2). Si la comparaison des surfaces couvertes par les polygones calculés et de référence est un premier indicateur, il reste toutefois insuffisant, car la surface commune ne garantit pas l'exactitude de la géométrie des polygones. Par conséquent, cette évaluation quantitative a été complétée par des calculs d'écarts 3D entre polygones homologues [Landes et al., 2012a]. L'écart moyen en distance s'élevait à 4 cm avec un écart-type de 2 cm, ce qui est satisfaisant vu l'état de la façade, et bien sûr, les erreurs potentielles attribuables à la chaîne de

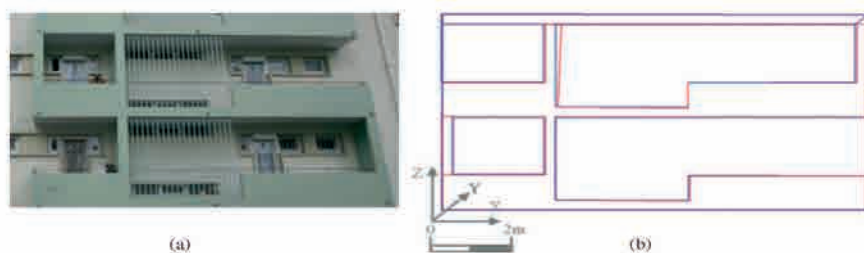


Figure 8. Évaluation de la qualité de détection de contours sur une façade d'un immeuble à Strasbourg ; a) photographie ; b) superposition de polygones modélisés (en rouge) et de référence (en bleu) [Landes et al., 2012a].

Indice	Formule	Signification
Taux de détection	$\rho d = \frac{ SR \cap SA }{ SR }$	ρd exprime le rapport entre la surface d'intersection des deux modèles et la surface de référence. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρd est proche de 1, plus le modèle est proche du modèle de référence.
Indice de qualité	$\rho q = \frac{ SR \cap SA }{ SR \cup SA }$	ρq exprime le rapport entre les parties communes aux deux modèles et l'union des deux modèles. Sa valeur est située entre 0 et 1. Plus ρq est proche de 1, plus le modèle obtenu sera de bonne qualité.
Facteur d'excédent	$\rho b = \frac{ SR \setminus SA }{ SR \cap SA }$	ρb exprime le rapport entre la partie du modèle qui n'appartient pas au modèle de référence et l'intersection des deux modèles. Sa valeur peut être supérieure à 1, mais elle est toujours positive. Si ρb est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Facteur de déficit	$\rho m = \frac{ SA \setminus SR }{ SR \cap SA }$	ρm exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et l'intersection des deux modèles. Il peut avoir une valeur supérieure à 1 mais il est toujours supérieur à 0. Si ρm est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.
Indice d'échec	$\rho f = \frac{ SA \setminus SR }{ SR }$	ρf exprime le rapport entre la partie du modèle de référence, qui n'appartient pas au modèle calculé, et la superficie du modèle de référence. ρf est compris entre 0 et 1. Si ρf est proche de 0, le modèle obtenu est de bonne qualité.

Tableau 2. Indices de qualité utilisés pour quantifier la qualité de polygones produits par l'approche de modélisation de façade, avec SR : Surface du modèle de référence ; SA : Surface du modèle obtenu automatiquement ; |X| : surface du polygone X [Boulaassal, 2010].

traitements (calcul de points d'intersection de contours construits sur la base d'un nuage de points, utilisation de seuils, etc.).

L'analyse des indices de qualité et des écarts 3D a montré que la précision des polygones est systématiquement supérieure à leur exactitude. Ce constat permet de valider le fonctionnement de

l'algorithme et de rappeler l'influence de la qualité des données brutes sur la qualité des modèles 3D finaux de façades.

Modélisation de murs intérieurs de bâtiments

Nous nous intéressons ici à la qualité géométrique des résultats de la reconstruction 3D des murs. L'approche d'évaluation, qui a porté sur plusieurs jeux de données, s'attache à procéder en deux temps [Macher et al., 2017] :

- inspecter les murs reconstruits, puis
- analyser la précision de leur reconstruction.

Inspection des murs reconstruits

Les plans d'intérieurs en 2D réalisés par digitalisation sur les nuages de points constituent une référence intéressante pour évaluer la performance de l'algorithme de reconstruction. La superposition des fichiers .obj produits par l'algorithme (en rouge sur la figure 9) avec les plans 2D des bâtiments permet d'inspecter les murs

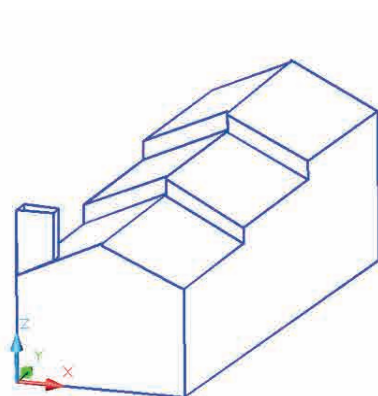
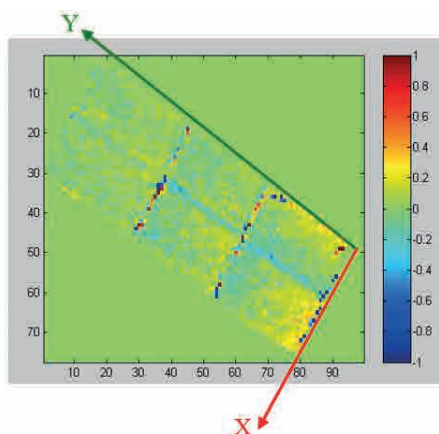


Figure 7. Modèle 3D d'un bâtiment et carte des erreurs de modélisation du toit associé [Tarsha-Kurdi, 2008].



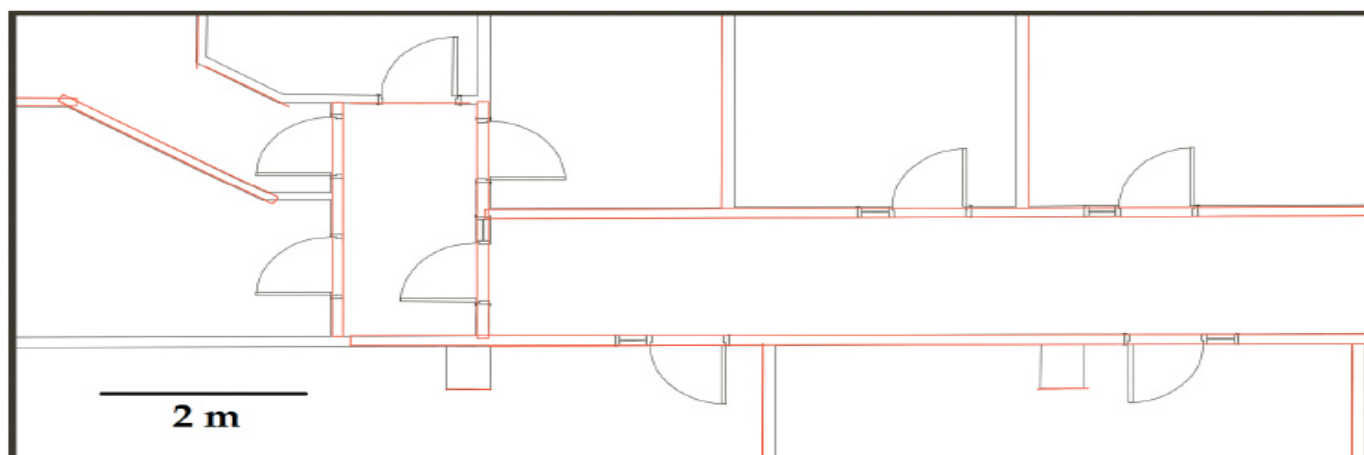


Figure 9. Superposition du modèle créé (en rouge) avec le modèle de référence (plan 2D, en noir), sur un étage de bâtiment composé de bureaux [Macher et al., 2017].



reconstruits et de repérer les erreurs de reconstruction.

Sur les jeux de données employés, plus de 88 % des objets sont correctement positionnés ; les éléments mal positionnés ou orientés sont majoritairement des portions de murs de façades. Pour les éléments correctement positionnés, des écarts en distance de 2 cm maximum ont été constatés, ce qui nous autorise à valider la reconstruction.

Analyse de la précision de reconstruction des murs

Pour estimer la qualité de reconstruction de chaque mur constituant le modèle 3D de l'intérieur du bâtiment, un écart-type a été affecté à chacun d'eux. Cet écart-type est calculé à partir des distances non signées qui séparent les points composant le

segment "mur" de son modèle (figure 10). La visualisation des écarts-types à l'aide d'une palette de couleurs permet de repérer rapidement les murs ou portions de murs qui ont été définis de façon imprécise sur un étage.

L'analyse seule de l'écart-type associé à un mur reste néanmoins insuffisante pour juger de la qualité de reconstruction, car un mur peut présenter un écart-type important tout en étant correctement reconstruit (objets situés de part et d'autre du mur, par exemple). C'est pourquoi il est intéressant de compléter l'étude par l'analyse des écarts entre points de nuage et mur reconstruit (figure 11). Cette analyse met clairement en évidence les éléments trop proches du mur pour pouvoir être écartés au moment de la segmentation (stores, radiateurs, tableaux, coffres de volets).

Cette approche d'évaluation de reconstruction a été intégrée sous forme de plug-in, dans un logiciel commercial (Revit d'Autodesk), comme expliqué dans [Marcher et al., 2019].

La question de la qualité à présent abordée, il nous semble intéressant de nous pencher sur la notion de niveau de détail et de mettre en lumière celui ou ceux que nous avons réussi à atteindre en sortie de nos chaînes de traitements pour les bâtiments.

Qualité et niveau de détail

La qualité d'un modèle est parfois et à tort confondue avec le niveau de détail d'un modèle, comme on peut le constater sur un site de référence dans la transition numérique du bâtiment. On peut y lire, à tort, que "Le niveau

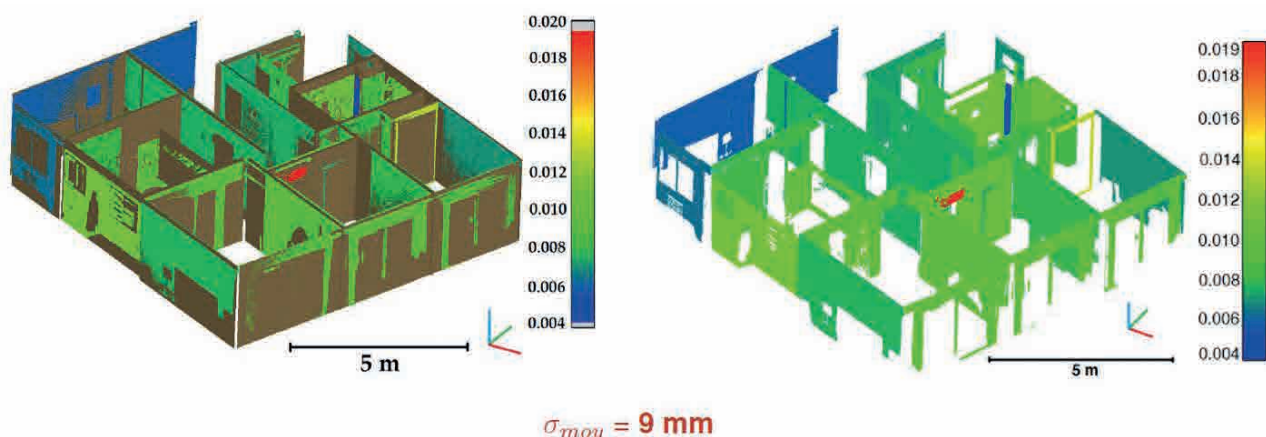


Figure 10. Résultats de la reconstruction des murs et dalles et visualisation des écarts-types associés aux murs ; a) superposition des murs reconstruits et des points ayant servi à les construire ; b) nuage de points seul, avec représentation en pseudocouleurs des imprécisions associées [Macher, 2017].

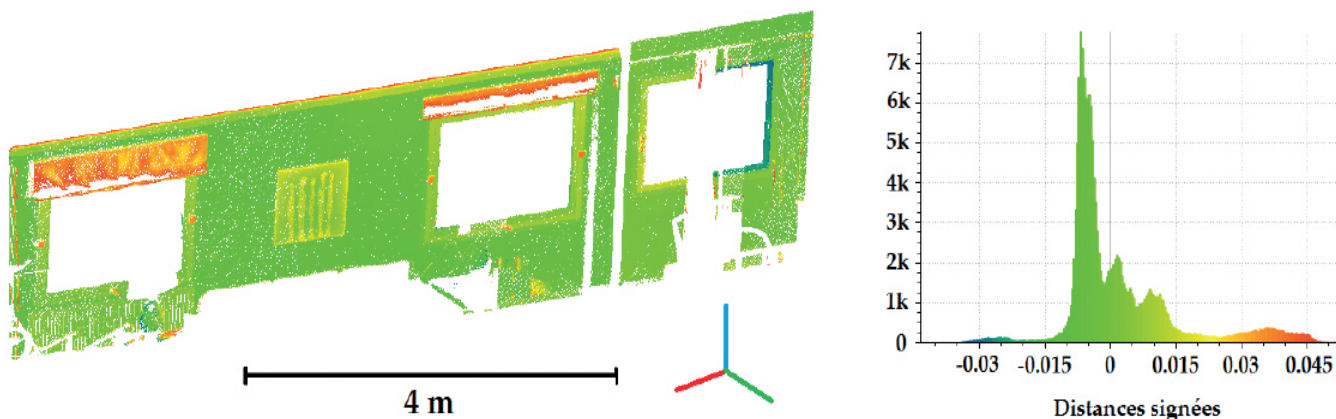


Figure 11. Nuages de points colorisés en fonction des distances signées entre points et modèle pour une face de mur.

de détail (...) correspond à la précision géométrique d'une maquette numérique, caractérisée par la précision des objets 3D qui la constituent".

Comme le soulignent [Oude Elberink & Vosselman, 2011], le fait de spécifier le niveau de détail associé à un modèle ne signifie pas que la précision géométrique du modèle ait été déterminée. Le niveau de détail est un critère visant à quantifier l'information minimale nécessaire pour un certain usage, ce qui ne détermine aucunement le niveau de précision associé au modèle. Bien qu'il existe un lien entre les deux (les représentations à des échelles plus fines ont tendance à être de meilleure qualité), il s'agit de deux concepts indépendants [Chrisman, 1991]. Par exemple, deux objets géographiques peuvent avoir le même niveau de détail, mais une précision spatiale (précision de positionnement) différente. En outre, dans certains cas, des bâtiments peuvent être caractérisés par un niveau de détail élevé, tandis que leur géométrie peut considérablement s'écarter de la réalité.

Le niveau de détail appelé communément LOD, de l'anglais "Level of Detail", est un concept employé dans diverses disciplines. Intimement lié au concept d'échelle en cartographie et très étudié en infographie, il s'est fortement développé avec l'avènement des SIG et plus précisément la modélisation 3D des villes. Le standard CityGML (*Open Geospatial Consortium*, 2012) fournit un mécanisme standard pour décrire les objets 3D du point de vue de leur géométrie, leur topologie, leur sémantique et leur apparence, selon cinq niveaux de détail différents.

Le niveau de détail associé au modèle à produire dépend évidemment du cahier des charges, car il influence la façon d'approcher l'objet à étudier. Lorsque le niveau de détail concerne la géométrie du livrable, il influencera d'une part le protocole d'acquisition (choix des technologies et méthodes, de la densité des données, de la précision de mesure), mais aussi le processus de traitement des données (nuages ou autres). Évidemment, ce choix impactera le budget à allouer au projet.

Dans la littérature, sont souvent mentionnées les normes britannique et américaine qui toutefois se rejoignent. Elles subdivisent les LOD en niveaux de développement des attributs graphiques (géométriques, LOG) et non graphiques (informationnels, LOI). D'après Objectif BIM1, les niveaux de détails américains (LOD 100 à LOD 500) se sont imposés en France. Au stade de reconstruction que nous avons atteint au travers de nos recherches, aucun de ces LOD ne convient à la description de nos modèles 3D, mis à part si nous envisageons une combinaison de plusieurs LOD. Nos modèles sont fiables géométriquement, mais ne fournissent pas le niveau de détail requis, tant à l'extérieur qu'à l'intérieur, ni du point de vue sémantique, pour être validé en LOD 500 [Yang, 2018]. Même si un objet peut être décrit par des LOD distincts (bâtiments en LOD 2 et intérieur en LOD 4), cette nomenclature manque de flexibilité. En effet, les éléments graphiques et sémantiques associés à nos modèles sont hétérogènes au niveau de leur présence (ouvertures de

type fenêtres, mais sans portes), de leur complexité géométrique (bâtiments cubiques ou avec toits à deux pans) et de leur dimensionnalité (fenêtres sous forme de contours simples 2D ou de modèles 3D issus d'une bibliothèque de symboles).

À l'ère du numérique, où les modèles produits sont amenés à être fusionnés avec des bases de données existantes, la question du niveau de détail de nos modèles mérite d'être approfondie dans un futur proche, en particulier lorsque se pose la question de la mise à jour de la maquette HBIM (*Heritage Building Information Modeling*), équivalent du BIM appliqué au patrimoine culturel [Fai et Rafeiro, 2014].

La question de la qualité d'un algorithme ou du niveau de détail le plus approprié devient secondaire lorsque l'existence même de l'objet d'étude est hypothétique. Nous nous sommes penchés sur cette question de l'évaluation de la qualité de modèles virtuels construits sur la base d'hypothèses archéologiques dans la partie suivante.

Évaluation de modèles restitués à partir de connaissances

Dans le domaine du patrimoine culturel, nombreux spécialistes comme les archéologues, les architectes, les géomaticiens, les historiens sont amenés à collaborer sur un même site ou vestige, ce qui justifie l'intérêt de travailler sur une maquette numérique commune. Il va de soi que le modèle 3D ne peut pas être réduit à un simple moule reproduisant la forme de

1 Objectif BIM, www.objectif-BIM.com

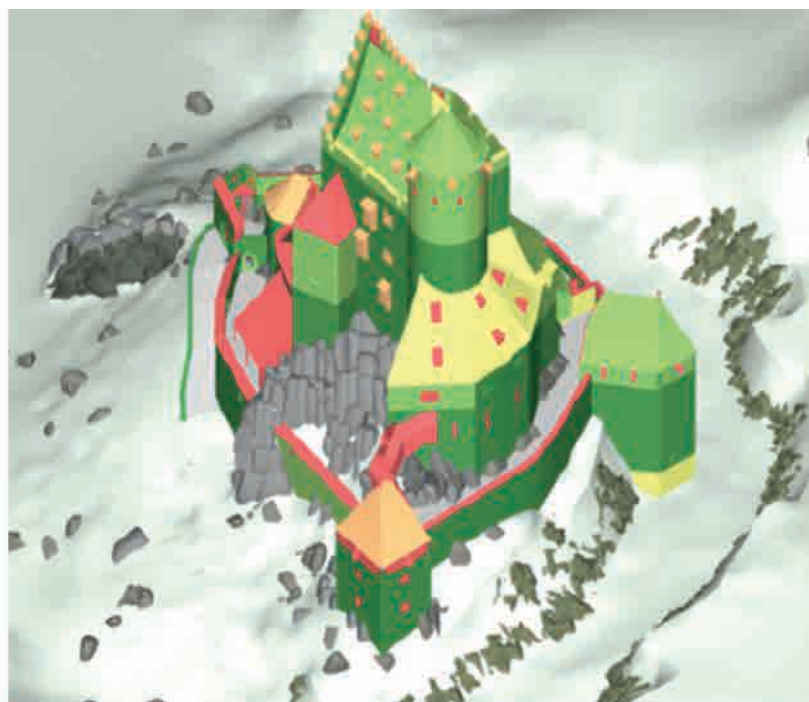


l'objet étudié, c'est-à-dire en se limitant à sa géométrie, que cette dernière soit sous forme de volume ou de surface. Il devrait être, au travers de l'analyse de l'objet, le reflet de sa complexité suivant différents aspects, dont les aspects géométriques, les caractéristiques historiques, esthétiques et architecturales du bâtiment. L'intégration d'informations dans le HBIM provenant de sources diverses a été analysée dans [Yang et al., 2020].

La fidélité du modèle virtuel à sa réalité est une question de première importance dans la modélisation du patrimoine culturel. Afin de maîtriser la fiabilité du modèle 3D reconstruit à partir de données souvent hétérogènes (relevés précis, fouilles, informations tangibles et intangibles, hypothèses archéologiques), il est d'une importance cruciale d'intégrer le niveau d'incertitude associé au modèle 3D reconstruit. Une approche permettant non seulement de quantifier, mais aussi de visualiser les incertitudes issues d'hypothèses archéologiques a été abordée dans le cadre de travaux de fin d'études [Benazzi, 2018 et Nivola, 2018] et a donné lieu à une publication [Landes et al., 2019]. D'un point de vue géométrique, l'incertitude est souvent définie, quantifiée et exprimée à l'aide de mesures statistiques. Cependant, pour les objets reconstruits sur la base d'hypothèses archéologiques et aboutissant à un modèle "restitué", les critères de qualité du type mesures statistiques ne sont pas appropriés.

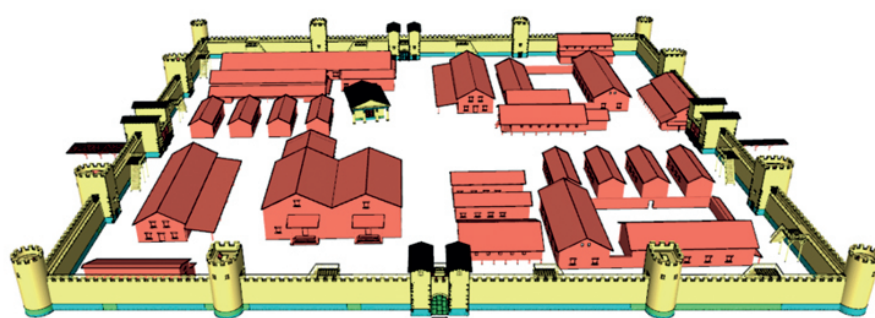
Nous avons mené une réflexion sur l'idée de décomposer les modèles 3D en niveaux d'incertitude (LoU pour *Level of Uncertainty*) et sur la meilleure façon de les visualiser à travers deux études de cas situées en Alsace : le Château de Kagenfels (XIII^e siècle) et le Castellum d'Horbourg-Wihr (XVI^e siècle). Tandis que le premier site est très bien documenté au travers de relevés et de fouilles toujours en cours, le second site a disparu avec l'urbanisation de la ville et n'a laissé que peu de traces tangibles. Concernant le Château du Kagenfels, pour évaluer le degré d'incertitude des éléments restitués, nous avons réalisé un tableau à double entrée confrontant la nature de

a



		Level of knowledge				
		Pure assumption (LoU5)	Weak knowledge (LoU4)	Moderate knowledge (LoU3)	High knowledge (LoU2)	Very high knowledge (LoU1)
Wall		No remain, nor iconography or document. But supposed to exist for defensive, structural or formal necessities	Remain of low height (<1m). But no data about initial height nor shape or function of the wall	Remain of more than 1m. But no data about initial height, nor shape or function of the wall	Proven existence with uncertainties: uncertain height, but shape / function known	Proven existence with known height (or assessable) and shape / function known

b



		Level of knowledge			
		Pure assumption (LoU4)	Moderate level of knowledge (LoU3)	High level of knowledge (LoU2)	Very high level of knowledge (LoU1)
		Restituted by hypotheses (buildings inside the camp)	Modeled by analogy (towers and doors)	Restored by logical deduction (without excavation results)	Confirmed by excavations and survey (foundations, passage slabs)

Figure 12. Décomposition du modèle 3D reconstruit en niveaux d'incertitude (LoU pour *Level of Uncertainty*) ; a) Château du Kagenfels ; b) Castellum d'Horbourg-Wihr [Landes et al., 2019].

l'élément évalué (mur, toiture, encadrement, etc.) au niveau de connaissance qui lui est associé.

Nous avons fait le choix de fusionner les incertitudes géométriques et les incertitudes de positionnement, du fait de leur forte corrélation, en proposant une classification hiérarchique permettant d'organiser les données en fonction de leur niveau d'incertitude (LoU). Il prend en compte cinq niveaux d'incertitude allant de simples suppositions (LoU le plus élevé) à un niveau de connaissance très élevé (LoU le plus bas). Afin de visualiser ces LoU, nous avons appliqué au modèle 3D dénué de texture, une palette de couleurs allant du vert pour les éléments mesurés sur le terrain (LoU bas) au rouge pour les éléments les plus incertains (LoU élevé), comme suggéré par [Dell'Unto et al., 2013] et illustré dans la figure 12.

Concernant le Castellum, les données disponibles se limitent à quelques rares plans et croquis réalisés au XIX^e siècle, de rapports de fouilles, d'un travail de restitution en 2016 et des nuages de points issus de l'acquisition de quelques blocs récupérés. La décomposition en niveaux d'incertitude n'a pas pu utiliser les mêmes échelles de connaissances que celles employées pour le Kagenfels. Pour ce dernier, les éléments représentés en 3D ont tous effectivement existé. Le niveau d'incertitude le plus élevé pour le Kagenfels concernait la forme de l'objet, mais en aucun cas son existence (figure 12a). Tandis que le niveau d'incertitude le plus élevé du modèle du Castellum concernait l'existence même des éléments, comme les bâtiments du camp militaire (figure 12b).

Si la décomposition en niveaux d'incertitude reste dépendante du site, la visualisation de l'incertitude dans un gradient de LoU coloré est une solution efficace que nous retiendrons à l'avenir. Les modèles 3D ainsi colorisés peuvent être considérés comme un outil de synthèse archéologique permettant d'identifier directement la fiabilité des éléments reconstruits. Cette approche peut être appliquée à chaque château ou monument historique à condition que le tableau décrivant le niveau de connaissance ou d'incertitude (LoU) soit clairement explicite. Un travail similaire

traite de la transparence (déclaration des sources d'information) et de la fiabilité (déviations du modèle par rapport à la réalité) de la représentation numérique de modèles tels que construits [Maiezza, 2019].

Conclusion

Le thème de l'évaluation de la qualité des résultats issus de nos algorithmes de segmentation et de modélisation nous a amenés à réaliser un bilan des erreurs liées à l'acquisition, à l'objet numérisé et à la chaîne de traitements. Pour évaluer les résultats issus de nos chaînes de traitements, nous avons proposé des critères de qualité adaptés à notre problématique suivant que nous souhaitions comparer des segments, des surfaces, des volumes ou des points.

Ces critères de qualité s'appuient sur des comparaisons entre une entité détectée et une entité de référence, cette dernière jouant un rôle crucial de "vérité terrain" qu'il n'est pourtant pas intéressant de produire.

Dans le cas de la modélisation de sites archéologiques en partie détériorés ou disparus, cette vérité terrain est dans certains cas perdue à jamais. C'est pourquoi l'idée de quantifier les incertitudes issues d'hypothèses archéologiques au travers de modèles 3D décomposés en niveaux d'incertitude nous semble être une piste intéressante à explorer. ●

Références citées

Benazzi, T. (2018) *Restitution 4D du Château du Kagenfels par combinaison de l'existant et d'hypothèses archéologiques pour une visite virtuelle du site*. Projet de fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg
Boulaassal, H. (2010). *Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg
Chrisman, NR. (1991). *The error component in spatial data*. PA Longley, MF Goodchild, DJ Maguire, DW Rhind, eds., Geographical Information Systems, John Wiley & Sons, New-York, pp. 165-174

Dell'Unto, N., Leander, A. M., Dellepiane, M., Callieri, M., Ferdani, D. and Lindgren, S. (2013). *Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project*, 2013 Digital Heritage International Congress, pp. 621-628, doi: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743804
Fai, S., Rafeiro, J. (2014). *Establishing an appropriate level of detail (LoD) for a building information Model (BIM): West Block, Parliament Hill, Ottawa, Canada*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sensing Spat. Inf. Sci. II-5, 123-130. Doi:10.5194/isprsannals-II-5-123-2014
Heipke, C., Mayer, H., Wiedemann, C., Jamet, O. (1997). *Evaluation of automatic road extraction*. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32, pp. 47-56
Landes, T., Grussenmeyer, P. (2011a). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques (partie 1/2)*. Revue XYZ de l'Association française de topographie (AFT), n° 128, p. 37-49
Landes, T., Grussenmeyer, P., Boulaassal, H. (2011b). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : acquisition, traitement des données et applications (partie 2/2)*. Revue XYZ de l'Association française de topographie (AFT), n° 129, p. 25-38
Landes, T., Boulaassal, H., Grussenmeyer, P. (2012a) *Quality assessment of geometric façade models reconstructed from TLS Data*. The Photogrammetric Record, 27(138): 137-154 (June 2012): 10.1111/j.1477-9730.2012.00674.x, 18 pages
Landes, T., Boulaassal, H., Grussenmeyer, P., Mohamed, M. (2012b). *Assessment of three-dimensional models derived from LiDAR and TLS data*. In: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIX-B2, 2012 XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia
Landes, T., Heissler, M., Koehl, M., Benazzi, T., Nivola, T. (2019). *Uncertainty visualization approaches for 3d models of castles restituted from archeological knowledge*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W9, 409-416, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-409-2019, 2019



Landes, T. (2020). *Contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points. Habilitation à diriger la recherche en Sciences de l'Ingénieur – Spécialité : Topographie, Géomatique*. École doctorale n° 269 (Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03210034/document>

Landes, T. (2021). *HDR : contribution à la segmentation et à la modélisation 3D du milieu urbain à partir de nuages de points*. Revue XYZ de l'Association francophone de topographie (AFT), XYZ n° 167, ISSN 0290-9057, 2^e trimestre 2021, pp. 21-25

Lichti, D. (2017). *Ray-Tracing Method for Deriving Terrestrial Laser Scanner Systematic Errors*. J. Surv. Eng., 2017, 143(2): 06016005

Macher, H., Landes, T., Grussenmeyer, P. (2017). *From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings*. Applied Sciences 2017, 7(10), 1030; doi:10.3390/app7101030

Macher, H. (2017). *Du nuage de points à la maquette numérique de bâtiment : reconstruction 3D semi-automatique de bâtiments existants*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Macher, H., Chow, L., Fai, S. (2019). *Automating the verification of heritage building information models created from point cloud data*. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W9, 2019 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6-8 February 2019, Bergamo, Italy

Maiezza, P. (2019). *As-built reliability in architectural HBIM Modeling*. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLII-2/W9, 2019 8th Intl. Workshop 3D-ARCH "3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures", 6-8 February 2019, Bergamo, Italy, pp. 461-466

Mikhail, E.M., 1982. *Observations And Least Squares*, University Press of America, ISBN 10 0819123978

Mohamed, M., Landes, T., Grussenmeyer, P., Zhang, W. (2013). *Multi-dimensional quality assessment of photogrammetric and LiDAR datasets based on a vector*

approach, In: 8th International Symposium on Spatial Data Quality, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, B. Wu, E. Guilbert, and J. Shi (Eds.), Hong-Kong, China, Vol. XL-2/W1, pp. 93-98
doi:10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-93-2013

Mohamed, M. (2013). *Quality Assessment of 3D building models in airborne digital photogrammetry*. Évaluation de la qualité des modèles 3D de bâtiments en photogrammétrie numérique aérienne. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Nivola, T. (2018). *Modélisation 3D du castellum et du château disparus de Hurbourg-Wihr et exploitation de la réalité augmentée pour une mise en valeur dans la trame urbaine contemporaine*. Projet de fin d'études, Spécialité Topographie, INSA Strasbourg

Oude Elberink, S., Vosselman G. (2011). *Quality analysis on 3D building models reconstructed from airborne laser scanning data*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(2): 157-165

Roynard, X., Deschaud, J.-E., Goulette, F. (2018). *Paris-Lille-3D: a large and high-quality ground truth urban point cloud dataset for automatic segmentation and classification*. The International Journal of Robotics Research, 37(6):545-557, 2018. <http://nrm3d.fr>

Tarsha-Kurdi, F. (2008). *Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés LiDAR aéroportés*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Yang, X. (2018). *3D modeling of built heritage: from geometric models to HBIM*. Thèse de l'école doctorale "Mathématiques, Sciences de l'Information et de l'Ingénieur" (ED 269) de l'Université de Strasbourg

Yang, X., Grussenmeyer, P., Koehl, M., Macher, H., Murtiyoso, A., Landes, T. (2020). *Review of built heritage modelling: Integration of HBIM and other information Techniques*. Journal of Cultural Heritage, 11 pages, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.05.008>

YellowScan@2020 : Pourquoi parle-t-on de précision et d'exactitude avec le LiDAR, quelle est la différence. <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/knowledge/wait-accuracy-vs-precision-isnt-rocket-science/>

Zhang, W., Grussenmeyer, P., Yan, G. and Mohamed, M., 2011. *Primitive-based building reconstruction by integration of LiDAR data and optical imagery*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Calgary, Canada. Vol. 38(5/W12), 6 pages

Contact

Tania Landes

tania.landés@insa-strasbourg.fr

INSA Strasbourg – Spécialité Topographie

ABSTRACT

3D modelling responds to both economic and environmental challenges, whether on a building or city scale. Over the last ten years, acquisition techniques have evolved considerably in terms of their speed, the volume of data to be managed, the heterogeneity of information acquired by multi-sensor systems, as well as data processing methods. New processes have emerged such as the "scan-to-BIM" process that characterizes the steps leading from the point cloud to an intelligent digital model. By adopting the digital model, integrated into a collaborative BIM (Building Information Modelling) process, building stakeholders are able to perform simulations and reduce, in addition to costs, the environmental impact of interventions on the building, throughout its life cycle. In practice, to achieve an intelligent digital model of an existing building from a survey, various research works are carried out in the field of 3D data acquisition, registration, modelling until the production of the digital model, as summarized in the issue 167 of XYZ. This paper focuses on the question of the quality of 3D deliverables as detailed in Landes (2020). Assessment results aim to analyse the errors that may affect each step of the processing chain set up in a "scan-to-BIM" process. In addition to qualitative evaluation, i.e. a visual check of the result, quantitative evaluation methods are crucial to develop. This article focuses on the quantitative evaluation methods implemented in the research projects of our lab.