

Relevé 3D et classification de nuages de points du patrimoine bâti

■ Arnadi MURTIYOSO

La documentation du patrimoine bâti a beaucoup évolué ces dernières années grâce au développement de nouveaux capteurs 3D et de nouvelles techniques de relevé 3D. Les données 3D contribuent à la création d'archives fiables et tangibles des sites et des monuments historiques. Vu l'importance des données 3D dans la documentation du patrimoine bâti, le contrôle de qualité est un aspect primordial qui devrait être abordé avant d'entreprendre le traitement du nuage de points. L'étude est ainsi divisée en deux parties. La première partie concerne principalement l'acquisition et le contrôle de qualité des données. Un point important sera l'intégration de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie dans le contexte de la documentation d'un site historique à différentes échelles. La deuxième partie de l'article va aborder le traitement de nuages de points, plus particulièrement la segmentation et la classification de nuages de points. L'aspect échelles de notre approche est importante, car dans beaucoup de cas, un bâtiment remarquable se situe dans un quartier historique qui nécessite une segmentation échelles. En combinant ces deux parties, nous avons considéré l'ensemble du processus allant de l'acquisition de données 3D jusqu'à la segmentation et la classification en entités à plusieurs échelles.

Introduction

La documentation du patrimoine bâti a beaucoup évolué ces dernières années grâce au développement de nouveaux capteurs 3D et de nouvelles techniques de relevé 3D. Les données 3D contribuent à la création d'archives fiables et tangibles des sites et des monuments historiques. Les progrès des algorithmes et des moyens de calculs ont permis de démocratiser la mise en œuvre des relevés 3D. L'usage du terme "modélisation 3D photo-réaliste" s'est généralisé. Aujourd'hui, ce type de modélisation repose sur deux méthodes complémentaires : la méthode passive basée sur le traitement d'images, et la méthode active basée sur la mesure directe de distances par balayage laser. La photogrammétrie, forte de ses 150 ans d'existence, représente la technique la plus courante dans l'approche basée sur l'utilisation d'images. La photogrammétrie s'est enrichie de techniques issues du domaine de la vision par ordinateur comme la structure par

le mouvement (*Structure from Motion* ou SfM) et des algorithmes d'appariement pour le calcul de nuages de points denses. La photogrammétrie est ainsi devenue une solution fiable et à faible coût pour le relevé 3D du patrimoine. Les développements des capteurs photographiques et la généralisation de l'utilisation des drones ont largement contribué à la popularité de la photogrammétrie. Dans l'approche basée sur la mesure de distances, la technologie lidar s'est beaucoup développée.

Le relevé 3D génère un nuage de points obtenu, soit par des mesures lasergrammétriques, soit par une solution d'appariement dense implémentée sur un bloc d'images orientées. Le nuage de points conserve des informations géométriques (c'est-à-dire les coordonnées XYZ de chaque point) qui traduisent la géométrie 3D de l'objet scanné. D'autres informations peuvent être stockées dans le nuage de points telles que les directions des normales, les valeurs de courbure, de linéarité

MOTS-CLÉS

automatisation, photogrammétrie, nuage de points, modélisation 3D, classification, patrimoine

ou encore de planéité (relative à une surface locale). Les couleurs RVB et les valeurs d'intensité (dans le cas de la lasergrammétrie) peuvent également être enregistrées dans le fichier du nuage de points. Cependant, ces informations ont une nature singulière, c'est-à-dire qu'elles sont uniques pour chaque point dans le nuage. Afin de pouvoir effectuer des opérations sur la donnée 3D, une information sémantique (appelée également attribut) doit être rajoutée. Ceci nous permet d'interpréter les nuages de points selon leurs caractéristiques tangibles et non pas seulement géométriques. C'est dans ce contexte que les notions de segmentation et de classification de nuages de points interviennent. Il s'agit du "découpage" du nuage en éléments plus petits, plus gérables et surtout labellisés par des attributs. Un tel nuage de points segmenté et classifié nous permet d'effectuer plusieurs analyses, modélisations, et même des prédictions sur l'objet. Ces informations sont utilisées dans le processus de création de la maquette numérique du bâtiment (BIM ou *Building Information Model*). Dans le domaine du patrimoine, cette maquette est appelée maquette numérique du bâtiment historique ou "HBIM" (*Heritage Building Information Model*).

Vu l'importance des données 3D dans la documentation du patrimoine bâti, le contrôle de qualité est un aspect primordial qui devrait être abordé avant d'entreprendre le traitement du nuage de points. Cet article est ainsi divisé en deux parties. La première partie concerne l'acquisition et le contrôle de qualité des données. Un point important sera l'intégration de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie dans le contexte de la documentation d'un site historique à différentes échelles. La deuxième partie va aborder le traitement de nuages de points, plus particulièrement la segmentation

et la classification de nuages de points. L'aspect échelles de notre approche est important car dans beaucoup de cas, un bâtiment remarquable se situe dans un quartier historique qui nécessite une segmentation multi-échelle. L'algorithme décrit dans cet article permettra la segmentation et la classification automatique du nuage de points d'un quartier historique en autant de nuages de points distincts que de bâtiments. Ces groupes de nuages de points sont ensuite segmentés et classifiés en éléments architecturaux pour extraire automatiquement des objets tels que des piliers et des poutres de charpentes.

Relevé 3D et contrôle de qualité

La première partie abordera tout d'abord les techniques d'acquisitions 3D dans le cadre de la documentation du patrimoine. Nous parlerons ainsi des techniques de base comme la photogrammétrie et la lasergrammétrie, mais aussi de l'approche de relevé échelles. Le contrôle de qualité photogrammétrique est décrit de manière plus détaillée, car la photogrammétrie présente plusieurs étapes exigeant des vérifications rigoureuses. L'utilisation des logiciels commerciaux de type "boîte noire" constitue une raison supplémentaire pour approfondir cette étude sur le contrôle de qualité photogrammétrique. Un second sujet qui sera également abordé dans cette partie est la combinaison des données lasergrammétriques avec des données photogrammétriques. En effet, une telle intégration dans le cadre d'une approche multicateurs est la conséquence logique de l'approche multi-échelle que nous avons développée.

■ Relevé 3D du patrimoine

La documentation du patrimoine est un aspect très important dans le travail de la conservation. Historiquement, l'archivage et la documentation physique des monuments remarquables sont souvent mis en évidence. Avec les différents dangers auxquels un monument historique peut être exposé, qu'ils soient naturel ou anthropologique, la

documentation devient un élément primordial. En effet, la reconstruction physique d'un site en ruines génère souvent des polémiques en absence d'une bonne documentation ; nous pouvons citer par exemple la controverse liée à la reconstruction du Château du Haut-Koenigsbourg par les autorités allemandes pendant le 19^e siècle, ou alors plus récemment le débat sur la restitution du colosse de Ramsès II à Luxor. En fait, il existe des tentatives au niveau international pour régler ce problème, notamment la charte de Venise de 1964 qui mettait en avant l'importance d'une compréhension holistique d'un objet historique avant même qu'une reconstruction physique soit planifiée. La charte exige également une documentation "précise" dans chaque mission qui concerne des opérations autour d'un objet de patrimoine. Le mot "précise" pourrait être interprété comme l'utilisation de données géospatiales.

Les données géospatiales concernent souvent des coordonnées et des mesures 2D, mais celles-ci ont récemment évolué vers l'espace 3D. Les techniques de la photogrammétrie et la lasergrammétrie sont parmi les méthodes les plus utilisées dans la documentation 3D. La photogrammétrie, du haut de ses 150 ans, représente

la technique la plus courante dans l'approche basée sur l'utilisation d'images. La photogrammétrie traditionnelle s'appuyait sur des principes proches de la topographie. Elle s'est enrichie de techniques issues du domaine de la vision par ordinateur pour devenir une solution fiable et à faible coût pour le relevé 3D du patrimoine. Les développements des capteurs photographiques et la généralisation des drones ont largement contribué à la popularité de la photogrammétrie.

Dans l'approche basée sur la mesure de distances, la technologie lidar (dès lors appelée la lasergrammétrie ou balayage laser pour la distinguer du lidar aérien) s'est également beaucoup développée. Une comparaison du constructeur Trimble montre la croissance exponentielle du taux d'acquisition ; en 2005, le Trimble GX pouvait générer 5.000 points par seconde alors qu'en 2017, le Trimble SX10 a atteint 25.000 points par seconde, soit une vitesse cinq fois plus rapide. La toute dernière édition du scanner Trimble, le Trimble X7 peut mesurer jusqu'à 500.000 points par seconde en 2020. Les logiciels de traitements ont également évolué vers l'automatisation de la chaîne de traitements.

Tenant compte de la variété des capteurs disponible aujourd'hui sur le marché, une approche multicateurs

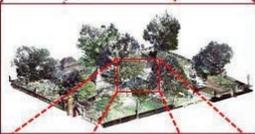
	Capteur	Exemple de livrable
 <p>Niveau d'échelle 0 Quartier et ses environs</p>	Drones, lidar aérien, télédétection	Orthophoto, MNS, MNE
 <p>Niveau d'échelle 1 Quartier historique</p>	Drones, lidar aérien	Orthophoto, réalité virtuelle, visite virtuelle
 <p>Niveau d'échelle 2 Bâtiments historiques</p>	Drones, lasergrammétrie	Modèle 3D, HBIM
 <p>Niveau d'échelle 3 Détails architecturaux</p>	Photogrammétrie rapprochée	Modèle 3D, impression 3D, réalité augmentée

Figure 1. L'approche multicateurs et échelles illustrée, avec des exemples de livrables.



et multi-échelles pour le relevé 3D peut être envisagée. En plus, le développement d'une telle approche est devenu logique face à la variété des bâtiments se trouvant dans un quartier historique. La possibilité d'avoir les données géospatiales à l'échelle d'un quartier nous permet de mieux comprendre l'objet d'intérêt dans son contexte socio-géographique. Dans le cadre de la mission elle-même, une telle approche peut nous aider dans la planification d'autres opérations de relevé telles que les mesures topographiques.

Dans l'approche multi-échelles proposée dans cet article, nous identifions quatre niveaux d'échelle (Figure 1). Le niveau 0 concerne la plus petite échelle dans laquelle nous trouvons le quartier historique étudié et ses environs. Nous pouvons numériser ce niveau en utilisant des techniques de mesures à petite échelle telles que la photogrammétrie aérienne par drone, des images satellites, ou bien la lasergrammétrie aéroportée. Le quartier historique lui-même constitue le niveau 1 de notre approche. Pour ce niveau d'échelle, des techniques terrestres ne sont pas encore pertinentes ; elles interviendront donc dans le niveau 2 qui représente un bâtiment d'intérêt. Des techniques comme la photogrammétrie rapprochée (terrestre ou aérienne par drone) ou la lasergrammétrie peuvent être utilisées dans ce niveau. Finalement, dans le niveau 3, nous trouvons les éléments architecturaux qui nécessitent la résolution la plus fine de nuage de points. Nous privilégions dans ce cas-là la technique de la photogrammétrie rapprochée.

■ Contrôle de qualité photogrammétrique

Pour le contrôle de qualité des données 3D, nous avons décidé de nous intéresser plus particulièrement au contrôle des données photogrammétriques, car la majorité des logiciels commerciaux sont des "boîtes noires". De plus, la photogrammétrie, contrairement à la lasergrammétrie, nécessite plus d'étapes de traitements et donc plus de contrôles. Pour ce faire, nous nous appuyons sur la boîte à outils DBAT (*Damped Bundle Adjustment Toolbox*) développée dans Matlab

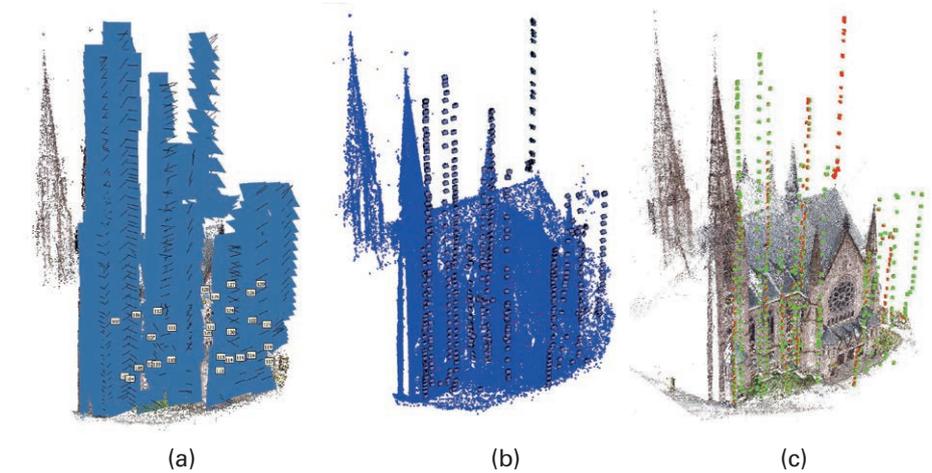


Figure 2. Résultat d'orientation d'images sur (a) PhotoScan, (b) DBAT et (c) Apero pour le jeu de données St-Paul.

(*MathWorks*) en collaboration avec l'Université d'Umea (Suède) (Murtiyoso et al., 2018). Il s'agit d'un ensemble de fonctions permettant de recalculer l'ajustement des faisceaux des projets photogrammétriques issus de logiciels commerciaux. L'orientation externe ou le calcul des poses des caméras constituent une étape majeure dans un projet photogrammétrique. L'outil DBAT (disponible sur GitHub) fournit des statistiques sur les données et les résultats des calculs, permettant le contrôle qualité de données notamment issues de drones et de photogrammétrie terrestre.

Deux jeux de données ont été utilisés dans cette expérience : des images de drones prises sur les façades de l'église St-Pierre-le-Jeune catholique et l'église St-Paul de Strasbourg. Ces jeux de données sont traités avec le logiciel Agisoft PhotoScan (appelé aujourd'hui "*Metashape*"). PhotoScan est un logiciel très répandu pour traiter des données de numérisation 3D, y compris dans le domaine du patrimoine. Cependant, étant un logiciel commercial, le gros inconvénient de PhotoScan est sa nature "boîte noire". Pour certains cas nécessitant de grandes précisions, ceci nous empêche d'effectuer un contrôle robuste sur sa qualité. C'est dans ce cas-là que DBAT intervient en tant que solution libre et ouverte pour le calcul d'ajustement des faisceaux. DBAT a été utilisé pour recalculer les projets PhotoScan des deux jeux de données disponibles. Pour les données de St-Paul (Strasbourg), les images ont été traitées aussi par le logiciel photogrammétrique Apero développé par l'IGN (Figure 2).

Les résultats montrent qu'en utilisant une solution alternative et ouverte comme DBAT, nous avons mis en évidence des problèmes qui existent dans certains jeux de données photogrammétriques. Il ressort de ces expériences qu'il est primordial d'adopter une procédure d'évaluation pour tout projet de photogrammétrie, afin d'être en mesure de détecter les erreurs dans des jeux de données. En effet, la complexité de la configuration des images dans le cas de la photogrammétrie rapprochée, la nature incohérente de leurs taux de recouvrement et la variation de la taille du pixel-objet au sein d'un même projet cachent souvent des problèmes. Il est d'autant plus important d'avoir un moyen pour contrôler les résultats, y compris les résultats intermédiaires, et détecter ainsi les problèmes avant de continuer l'étape suivante de la chaîne de traitements photogrammétriques.

Dans les expérimentations que nous avons effectuées, PhotoScan a généré des résultats de l'ajustement des faisceaux avec une valeur de précision dans le même ordre de grandeur que la taille théorique du pixel-objet. Ceci a été validé par DBAT et Apero qui ont généré des précisions similaires au vu des résidus sur les points d'appui et les points de contrôle. Ces résultats ont été obtenus en utilisant la même pondération. L'inconvénient de PhotoScan est le manque de valeurs statistiques dans le calcul de l'orientation externe. Ceci pourrait éventuellement cacher des problèmes dans les jeux de données. Les résultats de DBAT montrent que des améliorations peuvent encore être envisagées sur le projet, notam-





ment en ajoutant plus d'images sur les zones ayant une précision faible. Aperomontre quelques indices sur la qualité des images que nous pourrions utiliser dans le même but que DBAT.

Ces expérimentations nous montrent qu'une vérification objective des résultats d'un projet photogrammétrique est importante. Des erreurs peuvent se cacher dans le projet, ce qui pourrait affecter sa qualité. Lorsque la précision obtenue correspond au cahier des charges du projet, cela ne pose pas de soucis. Cependant dans le cas où un problème survient, les valeurs statistiques fournies par DBAT et Aperopourraient être utilisées pour l'identifier. Les solutions libres sont ainsi utiles pour valider les résultats d'un projet et de faire des analyses détaillées. La photogrammétrie d'aujourd'hui avec l'augmentation des moyens de calcul et d'appariement dense génère de plus en plus une demande vers une solution plus métrique, surtout pour des utilisations géospatiales. En effet, la mise à jour récente de PhotoScan (désormais Metashape) qui intègre plus de valeurs statistiques dans son rapport est encourageante pour l'avenir. Nous souhaitons que les logiciels libres puissent ainsi jouer leur rôle de guide pour les logiciels commerciaux pour privilégier des pistes de développement.

■ Intégration de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie

Dans cette section, le contrôle de qualité au niveau de l'intégration des résultats de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie sera présenté (cf. également Murtiyoso et Grussenmeyer (2018)). Puisque la qualité des données provenant des différents capteurs peut être hétérogène, une bonne méthode d'intégration est nécessaire, afin de générer un nuage de points final d'une qualité géométrique acceptable. L'intégration abordée ici concerne le nuage de points de l'extérieur de l'église St-Pierre généré par photogrammétrie et celui de l'intérieur acquis par un scanner laser terrestre (*Figure 3*). Le jeu de données de St-Pierre présente un cas particulier, car chaque mission a été effectuée séparément à des périodes différentes. En conséquence, il n'existe pas beaucoup de zones de recouvrement entre les nuages de points de l'extérieur et de l'intérieur.

Deux méthodes sont ainsi testées : la première consiste en un géoréférencement indépendant de chaque nuage de points, grâce aux points d'appuis qui sont mesurés séparément, mais qui sont dans le même système de coordonnées. La deuxième méthode consiste à consolider les deux nuages

de points en utilisant des points homologues, avant de géoréférencer le nuage consolidé vers un système absolu. La comparaison entre ces deux méthodes est faite en utilisant des solutions libres, afin de pouvoir déduire les avantages et les inconvénients de chaque approche. De plus, nous avons essayé d'automatiser la détection des points homologues à l'aide de la bibliothèque de fonctions PCL (*Point Cloud Library*).

L'analyse des résultats montre qu'il est possible d'obtenir un résultat final similaire en utilisant les deux approches. Cependant, en regardant plus en détail nous verrons qu'il existe différents avantages liés à chaque approche. La méthode du géoréférencement indépendant est la plus rapide. Ceci est par ailleurs l'approche la plus logique puisque la chaîne d'acquisition classique pour les données 3D exige déjà un géoréférencement pour chaque méthode individuelle. Par contre la qualité finale du nuage de points consolidé dépend très fortement de la qualité du géoréférencement individuel de l'extérieur et l'intérieur. L'approche "réseau libre" effectuée quant à elle un calcul en bloc pour minimiser les erreurs. Comme nous pouvons voir sur le *Figure 4*, la première approche montre une présence de systématismes, alors que les erreurs sur la deuxième

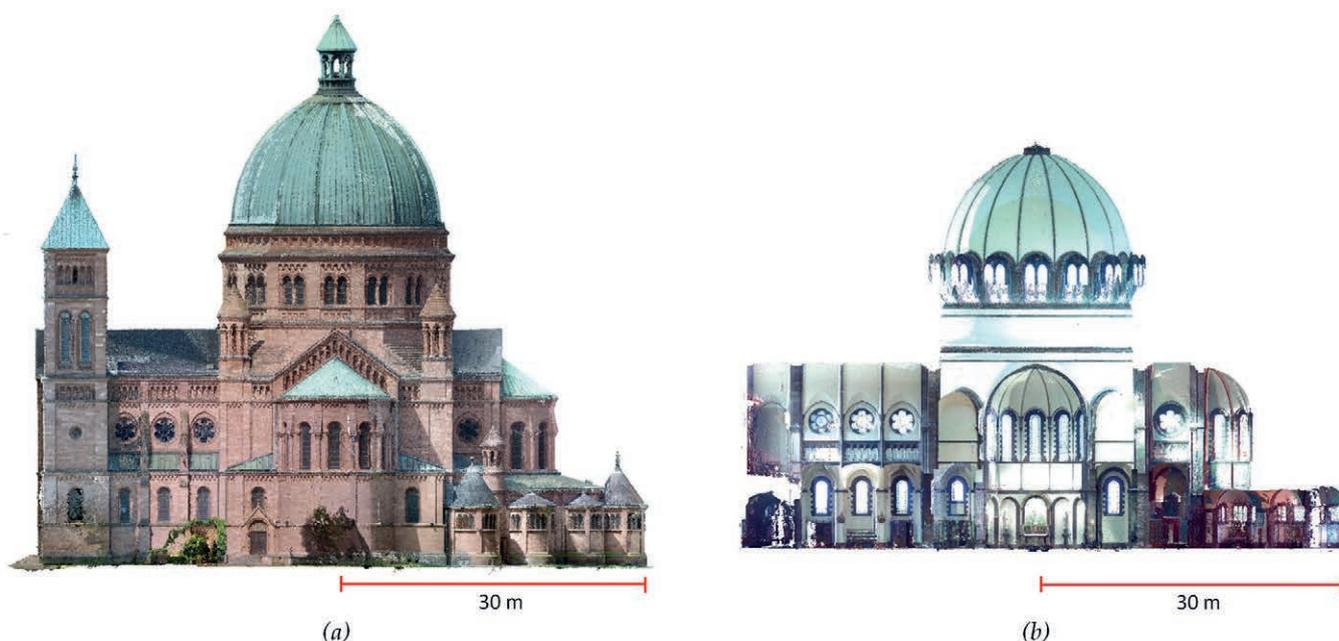


Figure 3. Les nuages de points de l'église Saint-Pierre-le-Jeune (catholique) de Strasbourg : (a) l'extérieur généré par photogrammétrie par drone et (b) l'intérieur scanné par un scanner laser terrestre.

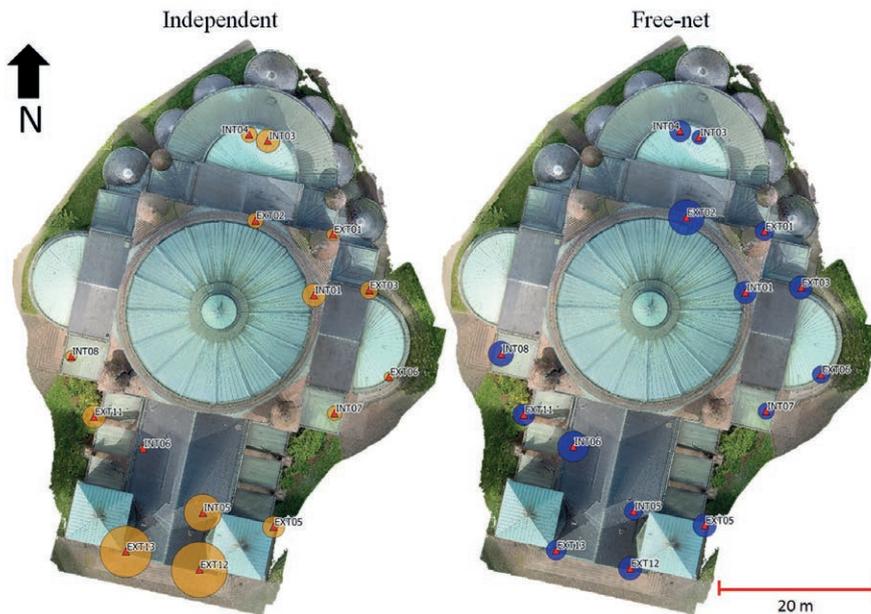


Figure 4. Distribution des points de contrôle superposée avec leurs erreurs résiduelles, représentées en rayons de cercles. Les erreurs sont multipliées par un facteur de 500 afin de mieux illustrer les effets du systématisme.

approche sont bien mieux réparties. Alors que l'approche réseau libre nous donne un meilleur résultat géométrique, son inconvénient principal est lié à l'identification des points homologues fait jusqu'ici de manière manuelle. Ceci représente la partie la plus chronophage de l'approche réseau libre.

Une chaîne d'automatisation simplifiée a été développée en utilisant la bibliothèque PCL afin de résoudre ce problème. Les fonctions permettent d'automatiser une partie de la détection de points homologues 3D et leur appariement. Nous réduisons ainsi le temps nécessaire pour identifier les points homologues manuels. Cependant, cette problématique ne constitue pas le point central de cette étude et nous ne poursuivons pas son développement plus loin. Les fonctions d'automatisation qui ont été développées sont toutefois utilisées comme base pour d'autres travaux de notre équipe de recherche. Le travail d'Assi et al. (2019) utilise notamment ces fonctions pour faciliter la consolidation automatique des nuages de points d'intérieur et d'extérieur. Les codes ont été également utilisés dans deux projets de recherche technologique à l'INSA de Strasbourg : Pegossoff (2018) travaillait sur la consolidation des nuages issus de deux différents types de scanner laser (scanner terrestre et

scanner à main), tandis que le travail d'Amzil (2020) fait partie de la suite de la recherche d'Assi et al. (2019).

Les expérimentations menées dans cette partie ont comme objectif de tester les deux approches de consolidation et de géoréférencement de nuages de points de l'intérieur et de l'extérieur. Ceci est effectué surtout afin de pouvoir vérifier la qualité du nuage de points final dit "hybride". Le nuage de points hybride sert en effet pour les données d'entrée des étapes suivantes : la segmentation et la classification. Un tel contrôle est devenu de plus en plus important afin de garantir une représentation fiable de la réalité.

Algorithmes de traitements de nuages de points

La seconde partie concerne le développement d'une chaîne de traitements de nuages de points. Dans cette étude, nous avons essayé d'aborder la problématique particulière du relevé 3D multi-échelles. L'algorithme développé nous permet de segmenter progressivement le nuage de points d'un quartier ; tout d'abord en unités individuelles de bâtiments, puis en éléments architecturaux. Les fonctions sont développées dans Matlab afin de

profiter de la continuité avec DBAT, mais aussi avec d'autres recherches menées auparavant dans le laboratoire. L'ensemble des fonctions sont rassemblées dans une boîte à outils Matlab appelée M_HERACLES (*HERitAge by point Cloud procESSing for Matlab*) qui est à la fois ouverte et libre (et disponible sur GitHub).

La boîte à outils M_HERACLES

Dans la plupart des projets de documentation 3D du patrimoine, un bâtiment historique se situe dans un quartier ayant un intérêt particulier au niveau historique. Une documentation complète du site peut être envisagée afin de comprendre l'objet d'intérêt dans le contexte plus large de son quartier. Dans ce cas particulier, une approche multicateurs et multi-échelles est la réponse logique, car chaque niveau d'échelle a besoin d'une résolution différente. Chaque technique d'acquisition est normalement adaptée pour une échelle donnée, par exemple la photogrammétrie rapprochée pour des statues ou le scanner laser terrestre pour l'intérieur des bâtiments. En fonction de la taille de l'objet, la résolution de son nuage de points correspondant peut être variée. Comme nous l'avons déjà expliqué, dans cette section nous proposons une chaîne de traitement multi-échelles, y compris dans le traitement de nuages de points. Cette approche vise à segmenter et à classifier le nuage de points de manière progressive ; tout d'abord de l'échelle d'un quartier vers celle d'un bâtiment et puis de l'échelle d'un bâtiment vers celle des éléments architecturaux. Concrètement, les fonctions que nous avons développées en ce sens sont rassemblées dans la boîte à outils M_HERACLES. M_HERACLES a une nature modulaire inspirée de DBAT. Des fonctions indépendantes sont créées dans des buts spécifiques, avec la possibilité de les lancer successivement. M_HERACLES s'intéresse de plus à la question de la classification, c'est-à-dire l'ajout de l'information sémantique aux résultats.

Il existe plusieurs approches permettant d'automatiser le traitement de nuages de points. Une méthode beaucoup utilisée dans les dernières années



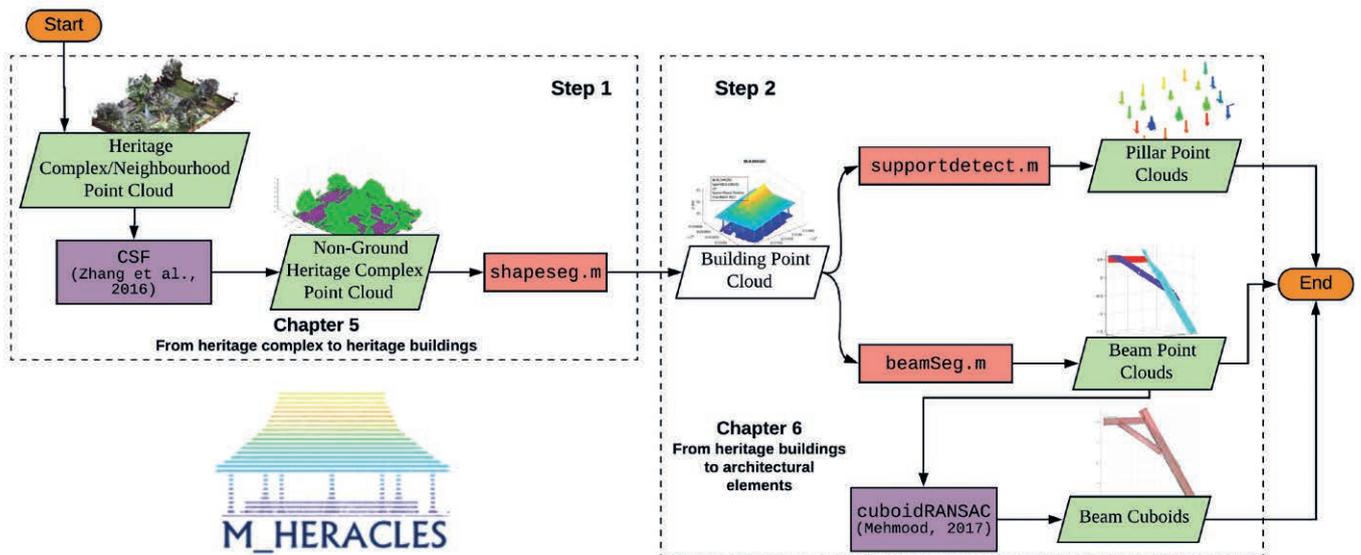


Figure 5. La chaîne de traitement de nuages de points sur M_HERACLES avec l'approche de la segmentation progressive.

s'appuie sur les techniques d'apprentissage profond. Une autre possibilité d'automatisation utilise plutôt des règles géométriques pour identifier et classifier les objets, qui correspond à l'approche dite algorithmique. Cette étude étant la continuité des travaux de notre équipe sur l'utilisation de la méthode algorithmique, M_HERACLES a été conçu pour classifier les nuages de points à l'aide de connaissances préliminaires (par exemple, un pilier a la forme d'un cylindre). Néanmoins, le but n'est pas de confronter notre approche algorithmique à celle de l'apprentissage profond, mais plutôt de la supporter. En effet, l'un de nos travaux en cours concerne l'utilisation de M_HERACLES pour générer des données d'entraînement pour un algorithme d'apprentissage profond.

Une revue de la littérature existante nous montre que la plupart des solutions disponibles à ce jour n'abordent qu'un seul niveau d'échelle de la scène. Il existe des algorithmes de classification pour des nuages de points à petite échelle (par exemple l'échelle d'un quartier ou alors d'une ville) et pour de plus grandes échelles (par exemple au niveau de l'intérieur d'un bâtiment), mais ces algorithmes concernent très rarement un scénario multi-échelles. M_HERACLES propose une solution holistique pour un tel cas avec son approche de classification progressive. Tous les calculs se font en utilisant une seule boîte à outils pour faciliter sa mise en œuvre. La nature modulaire

de la boîte à outils est conçue pour être flexible en fonction des cas rencontrés et des niveaux d'échelles souhaités.

La figure 5 montre la chaîne générale du traitement de nuages de points sous M_HERACLES. La première "étape" concerne la segmentation du nuage de points d'un quartier vers des sous-nuages des objets d'intérêt. Ce processus s'appuie sur des fichiers SIG en 2D, qui permettent d'annoter directement les résultats avec une information sémantique issue de l'attribut du SIG. La seconde "étape" permet la détection des éléments architecturaux en se basant sur le nuage de points généré préalablement. Deux classes d'éléments architecturaux sont actuellement disponibles dans M_HERACLES : les piliers (c'est-à-dire les supports structuraux) et les poutres de charpentes.

Tous les jeux de données sont traités par M_HERACLES. Les jeux de données de Kasepuhan et St-Pierre sont utilisés pour la première étape de segmentation. Les résultats de cette opération sont ensuite utilisés en tant que données d'entrée pour l'étape suivante. En plus, trois autres jeux de données ont également été traités pour illustrer la deuxième étape : Paestum et Valentino sont utilisés pour la détection des piliers, alors qu'un troisième nuage de points de la charpente du Château du Haut-Koenigsbourg est utilisé pour la détection des poutres. Tous les traitements sont effectués en utilisant un seul ordinateur avec un processeur Intel® Xeon® E5645 2.4 GHz.

■ Segmentation d'un quartier historique vers des bâtiments remarquables

La segmentation de nuage de points est un sujet très répandu dans le domaine de la 3D. Ceci est dû au besoin de la communauté de la télédétection de classifier des données lidar aériennes. Des développements dans le domaine de la photogrammétrie et notamment l'appariement dense ont révolutionné la recherche sur ce sujet en ouvrant la possibilité d'acquérir des nuages de points très détaillés à plus grande échelle grâce notamment à l'utilisation des drones. Dans le cas de la documentation d'un site historique à l'échelle d'un quartier, cette opération est plus souvent effectuée en utilisant à la fois des techniques aériennes et terrestres. Ceci nous donne un nuage de points complet du site avec la résolution fine de la technique terrestre et enrichi par un point de vue aérien. Alors que cette combinaison est une solution pertinente pour répondre aux enjeux de la documentation 3D du patrimoine, elle ajoute de la complexité au nuage de points final. Une automatisation est d'autant plus importante afin de nous aider à traiter ces données complexes (Murtiyoso et Grussenmeyer, 2019).

Il existe plusieurs études sur la segmentation et la classification d'un nuage de points aérien vers des classes génériques comme le sol, les bâtiments, la végétation, etc. Cependant, le domaine du patrimoine a souvent besoin d'informations sémantiques (par exemple



l'information historique, le style d'architecture, la date de construction, etc.). Dans beaucoup de cas, ces données sémantiques sont déjà stockées sous forme d'un Système d'information géographique (SIG), souvent en 2D. L'idée principale de l'algorithme développé est de profiter de ces SIG déjà existants pour aider le processus de la segmentation 3D du nuage de points. Puisque le SIG contient aussi les attributs pour chaque objet, nous pouvons ensuite annoter directement les sous-nuages segmentés avec l'information sémantique liée à sa géométrie. La segmentation et l'annotation peuvent de cette manière être utiles dans la création éventuelle d'un SIG 3D ou un HBIM.

Pour la segmentation et la classification de nuages de points des quartiers vers des bâtiments individuels, l'algorithme développé s'appuie sur des fichiers de type SIG, souvent existants pour les quartiers ou les sites historiques, bien qu'ils soient en 2D. L'idée est d'utiliser la géométrie 2D enregistrée dans les fichiers SIG pour guider la segmentation des nuages de points. La géométrie 2D est exploitée en tant que segmenteur 2.5D à l'image d'un emporte-pièce : tous les points du nuage de points se trouvant dans les limites 2D (XY) de l'objet sont considérés comme appartenant à l'entité SIG. Le résultat est ensuite affiné avec l'implémentation de deux algorithmes principaux : la détection (et suppression) du sol et le débruitage du nuage de points par le biais de la méthode du plus proche voisin.

Cette approche a été testée sur deux jeux de données avec des résultats plutôt satisfaisants. Les sous-nuages générés par l'algorithme sont corrects même dans le cas de la présence de végétation dense à Kasepuhan. En utilisant cette approche, chaque objet est segmenté individuellement en gardant la classe attribuée par le fichier shapefile d'entrée. L'autre avantage de notre approche est que les attributs d'une instance de la classe sont directement annotés sur les sous-nuages du résultat. L'annotation se fait automatiquement et individuellement pour chaque sous-nuage afin de pouvoir éventuellement faciliter les travaux de management du

site sous forme d'un SIG 3D et/ou un HBIM. La comparaison avec la fonction de classification automatique du logiciel Metashape a également montré des résultats prometteurs ; à savoir que Metashape utilise une approche d'apprentissage profond. Metashape obtient une valeur moyenne de l'indice F1 de 66.09 % pour les deux jeux de données testés, contre 89.32 % pour M_HERACLES.

La valeur médiane de l'indice statistique (score) F1 caractérisant la qualité de la segmentation est de 91.99 % pour Kasepuhan et 93.90 % pour St-Pierre. Ces valeurs sont très prometteuses pour cette tâche. En plus de la segmentation géométrique du nuage de points, l'utilisation des fichiers SIG nous permet d'annoter les nuages de points segmentés avec l'attribut contenant l'information sémantique, ce qui présente un autre atout de notre approche.

Néanmoins, il reste encore quelques défauts dans notre approche. La nature algorithmique se traduit par le besoin d'identifier quelques paramètres principaux. C'est le cas par exemple dans la détermination des seuils de tolérance pour l'algorithme de croissance de région. L'ordre d'itérations est aussi important afin de bien distinguer les classes qui sont superposées verticalement (par exemple la couronne d'un arbre au-dessus du toit d'un bâtiment).

Nous avons observé que l'algorithme doit être appliqué tout d'abord sur les classes ayant une altitude plus basse et puis itéré progressivement vers les classes plus hautes (Figure 6). Le choix sur l'ordre d'itérations à prendre reste une intervention manuelle.

L'algorithme d'extraction du sol lancé au début de la segmentation est aussi un élément très important qui influe sur le résultat. L'effet de cette partie de la fonction est plus évident pour la classe de végétation, où la présence des herbes ou des racines empêche une extraction propre du sol. Par conséquent, le sous-nuage segmenté est erroné. Pour le moment seul l'algorithme CSF de (Zhang et al., 2016) a été testé. Des tests avec d'autres algorithmes d'extraction du sol peuvent être envisagés pour améliorer les résultats. D'autres idées ont également été explorées afin d'améliorer l'algorithme développé. Une extension de notre algorithme qui utilise des fichiers de DAO (Dessin assisté par ordinateur) peut être envisagée surtout pour le prochain niveau d'échelle d'un bâtiment. Un fichier DAO est souvent disponible pour les bâtiments historiques et servira comme un fichier de SIG dans ce cas-là. En effet, cette idée a été mise en œuvre dans une publication de notre équipe de recherche (Semler et al., 2019).

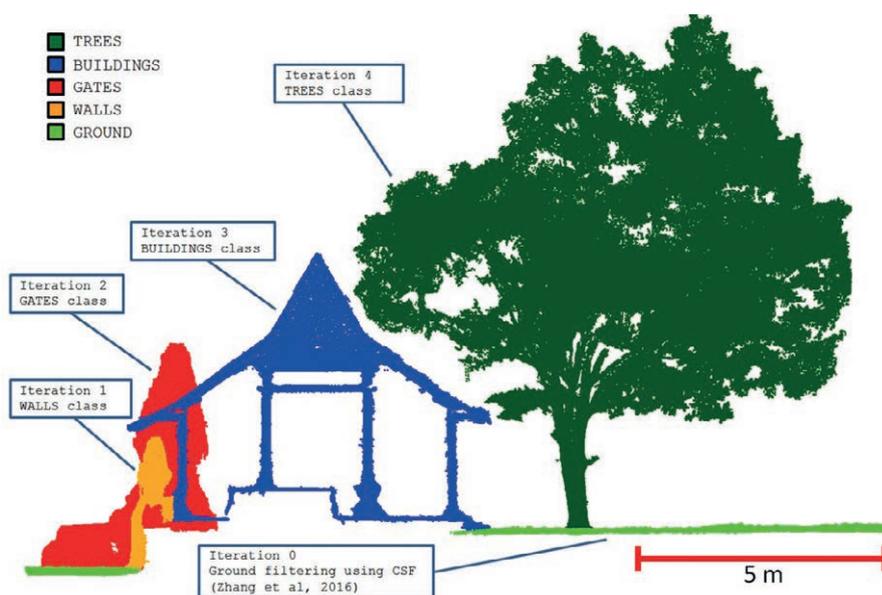


Figure 6. Résultat de la segmentation de l'étape 1 sur les données de Kasepuhan. Cette figure illustre également l'approche itérative implémentée dans l'algorithme.



■ **Segmentation d'un bâtiment remarquable vers des éléments architecturaux**

En ce qui concerne l'étape de segmentation des bâtiments vers les éléments architecturaux, nous nous limitons à ce stade à deux classes qui ont beaucoup d'intérêt dans le domaine de la documentation du patrimoine : les piliers (Murtiyoso et Grussenmeyer, 2019) et les charpentes (Murtiyoso et Grussenmeyer, 2020). Les piliers sont très intéressants, car ils représentent l'architecture alors que les charpentes montrent le savoir-faire des bâtisseurs. Ces éléments sont parmi les plus complexes à segmenter et à classer, car la forme des différents objets est fonction du style d'architecture. Quelques travaux de recherches existent déjà sur la même thématique, avec une tendance récente vers l'utilisation des algorithmes d'apprentissage automatique et l'application de l'apprentissage profond. Le problème souvent rencontré dans ce genre d'approche est la génération des données d'entraînement, jusque-là largement manuelle. Dans cette étude, nous privilégions l'utilisation des règles géométriques et des contraintes sémantiques pour automatiser la segmentation et la classification de ces éléments architecturaux. L'idée est de ne pas confronter cette approche à celle de l'apprentissage profond. Au contraire, nous présentons un moyen pour faciliter la création des données d'entraînement et ainsi créer une approche complémentaire.

La détection, la segmentation, et la classification des piliers commencent par la découpe verticale du bâtiment. La coupe centrale est sélectionnée, puis un algorithme de croissance de région nous permet d'isoler les "îlots" correspondant à chacun des candidats. Une règle géométrique est appliquée : un "îlot" de nuage de points est labellisé en tant que pilier si la forme de sa coupe est circulaire. Ensuite, un algorithme similaire à celui appliqué sur la segmentation d'un quartier vers un bâtiment est utilisé pour récupérer le nuage de points de l'objet. Le sol est supprimé en appliquant l'algorithme de RANSAC. Pour la détection des piliers, un score F1 moyen de 88.97 % a été obtenu avec un temps de calcul inférieur à 5 minutes pour les trois jeux de données.

Nous avons effectué une comparaison entre les résultats de notre approche et les résultats de l'approche développée par (Malinverni et al., 2019). Dans leur étude, les auteurs utilisent une approche d'apprentissage profond (algorithme PointNet++) pour effectuer la classification automatique de quelques classes dont les piliers. Une comparaison a pu être faite seulement sur le jeu de données de Valentino, car les auteurs l'utilisent également dans leur article. Cette étude montre que l'approche de l'apprentissage profond nécessite une classification simultanée de toutes les classes souhaitées confondues ; nous interrogeons seulement le résultat de sa classe "pilier". Pour Valentino, M_HERACLES a obtenu une valeur F1 de 75.92 %. Pour la classe de pilier, l'approche de Malinverni et al. (2019) obtient une valeur F1 de 57.60 % pour Valentino en utilisant un autre jeu de données comme données d'apprentissage.

Alors que notre approche donne un résultat nettement meilleur que celui de l'apprentissage profond, quelques remarques importantes doivent néanmoins être prises en compte. Premièrement, M_HERACLES a été utilisé pour détecter seulement les piliers autoportants en laissant quelques piliers engagés dans la scène de Valentino. Au contraire, l'apprentissage profond tente toujours de détecter tous les objets de la même classe dans la scène. Deuxièmement, l'approche de l'apprentissage profond est par nature améliorable en ajoutant plus de données d'entraînement. À l'avenir, nous pouvons donc nous attendre à une amélioration importante des résultats de l'apprentissage profond.

Pour la détection de poutres individuelles de la charpente, l'approche utilise un algorithme de croissance de région modifié qui permet de détecter les faces des poutres. Une détection des axes principaux des poutres est réalisée grâce à une transformation de Hough et deux règles géométriques liées au voisinage et au parallélisme de chaque face. Les résultats pour ces deux algorithmes sont aussi prometteurs. Pour la détection des poutres, le score F1 obtenu est de 86.09 %.

L'objectif principal du développement de cette partie est donc de considérer la nature multicapteurs et multi-échelles de la documentation du patrimoine. Les fonctions pour la détection des piliers et des poutres nous permettent d'automatiser le processus de la segmentation et la classification du nuage de points jusque-là largement manuel. L'automatisation sert à réduire l'intervention humaine et donc l'erreur liée aux opérateurs.

Alors que les résultats sont globalement prometteurs, nous pouvons identifier les limites de l'algorithme développé. L'algorithme développé a du mal à gérer les cas où les caractéristiques de données d'entrée sont différentes des règles géométriques définies dans les fonctions. Par exemple, Valentino donne une valeur de précision plus basse à cause de la présence des piliers engagés (c'est-à-dire des demi-colonnes collées contre un mur). Les résultats de St-Pierre mettent en évidence la sensibilité de l'algorithme en présence du bruit (présence des objets divers dans la scène), alors que Paestum nous montre le risque du systématisme. L'algorithme fonctionne bien pour Kasepuhan certes, mais il s'agit d'un cas avec uniquement des piliers autoportants (voir Figure 7). Ceci dit le temps de traitement reste faible et les résultats sont acceptables dans la plupart des cas, surtout si l'objectif principal est de générer une "valeur approchée" pour une classification subséquente par l'apprentissage profond. La rapidité et la simplicité de cette approche algorithmique sont même plus avantageuses dans des cas simples.

L'algorithme de détection des poutres est toujours en cours de développement et d'autres tests devront être effectués afin de pouvoir considérer son efficacité. Le test effectué sur un petit échantillon des données de Haut-Koenigsbourg est prometteur donnant une valeur du score F1 médiane de 86.09 %. Néanmoins, le temps de calcul reste élevé et le taux d'exactitude est plutôt faible bien que ceci ne pose pas trop de problèmes pour la création automatique des primitives géométriques. La majorité du temps nécessaire est liée au calcul des directions de normales et des valeurs de courbures ; une stratégie doit donc



être implémentée afin d'accélérer cette étape.

Conclusions et perspectives

Nous avons montré que les algorithmes développés sont pratiques, rapides et dans beaucoup de cas ne nécessitent pas l'utilisation d'une approche plus complexe. En combi-

nant le contrôle de qualité développé dans la première partie avec ces fonctions, nous avons considéré l'ensemble du processus allant de l'acquisition de données 3D jusqu'à la segmentation et la classification en entités à plusieurs échelles.

Dans cet article, deux questions de recherche ont été formulées. Premièrement, nous nous interrogeons

sur la problématique de la génération du nuage de points de haute qualité dans le cadre de la documentation du patrimoine. À partir de nos expériences décrites dans cet article, nous pouvons considérer que la chaîne de traitements 3D, quelle que soit la technique utilisée (photogrammétrie, lasergrammétrie, ou autres), est aujourd'hui très directe et relativement facile à apprendre. La

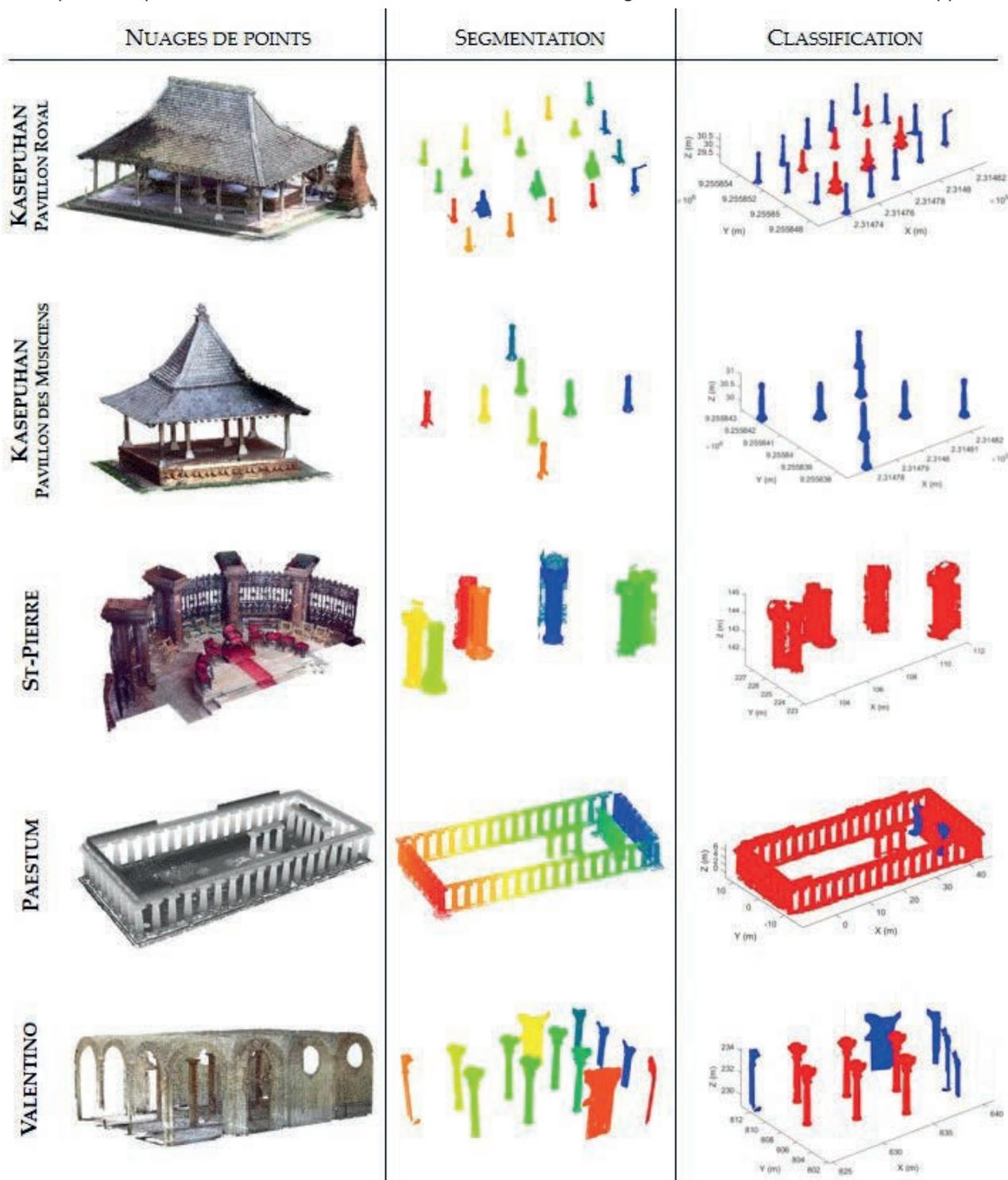


Figure 7. Résultat de la segmentation et la classification des piliers.



création d'un nuage de points 3D n'a jamais été aussi facile. Néanmoins, pour créer un nuage de points de haute qualité, il est indispensable de comprendre le fonctionnement de chaque technique en détail.

La deuxième question à laquelle nous essayons de répondre concerne l'exploitation du nuage de points de haute qualité. En effet, un nuage de points, même d'une haute qualité, reste un ensemble de points géométriques sans classification. Nous avons montré par le biais de la boîte à outils M_HERACLES et les tests effectués que la segmentation et la classification du nuage de points nous permettent de répondre à cette question.

Dans les travaux futurs, il sera intéressant d'intégrer les résultats de nos algorithmes dans d'autres solutions comme l'apprentissage profond, car ceux-ci constituent un apport sur la nature présumée des objets. Au cours de cette étude, nous avons constaté un manque de jeu de données 3D en libre accès dans le domaine du patrimoine. La création d'un portail de partage des données 3D patrimoniales pourra être considérée dans le futur. ●

Remerciements

Cette étude fait partie d'une thèse financée par le fond d'éducation de la République d'Indonésie (LPDP).

Contact

Arnadi MURTIYOSO
arnadi.murtiyoso@insa-strasbourg.fr

Liens externes

Les boîtes à outils utilisées dans les expérimentations sont disponibles en ligne sur le site de GitHub :

- DBAT : <https://github.com/niclasborlin/dbat>
- M_HERACLES : https://github.com/murtiad/M_HERACLES

Références

Amzil, S., 2020. *Détecteurs et descripteurs de points d'intérêt 3D*.

Assi, R., Landes, T., Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2019. *Assessment of a Keypoints Detector for the Registration of Indoor and Outdoor Heritage Point Clouds*, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 133-138. doi:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w15-133-2019

Malinverni, E.S., Pierdicca, R., Paolanti, M., Martini, M., Morbidoni, C., Matrone, F., Lingua, A., 2019. *Deep learning for semantic segmentation of point cloud*, in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 735-742.

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2020. *Virtual disassembling of historical edifices: Experiments and assessments of an automatic approach for classifying multi-scalar point clouds into architectural elements*. *Sensors (Switzerland)* 20. doi:10.3390/s20082161

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2019. *Point cloud segmentation and semantic annotation aided by GIS data for heritage complexes*, in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 523-528.

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2019. *Automatic Heritage Building Point Cloud Segmentation and Classification Using Geometrical Rules*, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 821-827. doi:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w15-821-2019

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., 2018. *Comparison and assessment of 3D registration and georeferencing approaches of point clouds in the case of exterior and interior heritage building recording*, in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 745-751. doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-745-2018

Murtiyoso, A., Grussenmeyer, P., Börlin, N., Vandermeersch, J., Freville, T., 2018. *Open Source and Independent Methods for Bundle Adjustment Assessment in Close-Range UAV Photogrammetry*. *Drones* 2, 3. doi:10.3390/drones2010003

Pegossoff, P., 2018. *Comparaison de méthodes de recalage de données lasergrammétriques : utilisation combinée d'un scanner laser terrestre et d'un scanner à main*.

Semler, Q., Suwardhi, D., Alby, E., Murtiyoso, A., Macher, H., 2019. *Registration of 2D Drawings on a 3D Point Cloud As a Support for the Modeling of Complex Architectures*, in: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. pp. 1083-1087. doi:10.5194/isprs-archives-xlii-2-w15-1083-2019

Zhang, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G., 2016. *An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation*. *Remote Sens.* 8, 1-22.

ABSTRACT

Keywords: automation, photogrammetry, point cloud, 3D modelling, classification, heritage. *The documentation of built heritage has seen a significant development these past few decades due to advancements in new 3D sensors and 3D recording techniques. 3D data serve as reliable and tangible archive for historical sites and monuments. Since 3D data have such importance in the field of heritage documentation, quality control is paramount and must be performed before any point cloud processing is even planned to be conducted. The study is therefore divided into two parts. The first part concerned mainly the data acquisition and quality control of the point cloud data using the two techniques most commonly used, i.e. photogrammetry and laser scanning. A particular emphasis was also put on the integration of photogrammetry and laser scanning within the context of a multi-scalar documentation of a heritage site. The second part will address the processing of the resulting point cloud, particularly its segmentation and classification. The multi-scalar approach proposed in this article is an important point to note, as in many cases a historical building of interest is located in a historical neighbourhood; thus the requirement for a multi-scalar segmentation. By combining these two parts, the research had attempted to address the 3D workflow of heritage sites in a holistic manner, from the 3D data acquisition up to the resulting point clouds' segmentation and classification into individual entities in various scale steps.*