

Modélisation 3D des façades de bâtiments des anciennes Médina

K. AIT ELKADI¹, D. TAHIRI¹, E. SIMONETTO², I. SEBARI¹

(Reçu le 24/04/2013; Accepté le 17/12/2013)

Résumé

Le LIDAR (Light Detecting and Ranging) terrestre statique est un outil de levé présentant actuellement une source de données 3D indispensable dans l'évaluation et la surveillance des bâtiments patrimoniaux. A travers des processus automatiques de modélisation 3D, la manipulation de cette source de données dans des outils de communication devient plus souple. Le processus de modélisation 3D impose des sous missions indispensables dont la segmentation. Une grande partie des approches de segmentation se focalisent sur l'emploi des composantes géométriques en exploitant la représentation mathématique d'une surface plane ou courbée. En raison de la complexité de l'architecture des façades, une segmentation utilisant uniquement l'aspect géométrique reste insuffisante. Ainsi, une nouvelle approche de segmentation est développée équilibrant les résultats de l'extraction des surfaces homogènes. Ceci, en se basant sur l'ensemble des composantes d'un nuage de points coloriés à savoir les composantes géométriques, les valeurs RGB et les intensités laser des détails constituant les façades des bâtiments des anciennes Médina. Le processus s'initialise par l'extraction des segments plans à l'aide de l'algorithme RANSAC. Le résultat fera l'objet d'une deuxième segmentation radiométrique basée sur l'introduction du critère de similarité couleur dans l'algorithme de croissance de région. Enfin une fusion de classes sera effectuée en fonction de la similarité de l'intensité laser.

Mots-clés : IDAR terrestre statique, nuage de points, segmentation, anciennes Médina.

Introduction

L'évolution rapide des techniques de relevé par scanner laser terrestre, amène les ingénieurs à réaliser des projets complexes avec des exigences de plus en plus sévères en matière de précision, d'optimisation de temps d'acquisition et d'extraction des produits dérivés. Au Maroc, l'enjeu principal du Ministère de la Culture est la préservation et la réhabilitation des anciennes Médina, des sites et des constructions historiques. L'avènement de la lasergrammétrie terrestre statique a pu résoudre l'archivage du bâti 3D issu directement du scanner. Toutefois, la taille énorme des données sauvegardées alourdit et même bloque des manipulations des produits et leurs intégrations dans des outils de communication telles que les Systèmes d'Information Géographique SIG. Par ailleurs, l'apparition d'une panoplie d'appareils de plus en plus conviviaux en termes de vitesse de balayage élargit l'étendu temporel entre l'acquisition et l'extraction des produits dérivés. Dans le domaine architectural et patrimonial, cet écart suscite des recherches et des développements de modèles mathématiques et algorithmes. Ces algorithmes permettent l'automatisation des tâches fastidieuses notamment l'extraction des modèles filaires et des modèles 3D de façades. L'établissement des modèles 3D dépend d'une mission de traitement

qui est la segmentation. Le terme de segmentation signifie généralement une partition de l'espace en zones caractéristiques à base d'un critère d'homogénéité. Plusieurs approches de segmentation se basent sur l'aspect géométrique, soit à travers des contraintes de co-normalité et de co-planéité soit par la reconnaissance des formes géométriques. Lorsque nous examinons un bâtiment, nous sommes conscients que l'aspect géométrique nous facilite l'identification des éléments constitutifs. Dans ce cas, au moins les plans de façades caractérisés par des primitives bien définies, peuvent être segmentés en se basant sur des modèles mathématiques de reconnaissance des plans. Toutefois, lorsque des détails remarquables se retrouvent au même plan géométrique de la façade telles que les volets de fenêtres, l'aspect géométrique n'est plus suffisant. La figure 1 présente des exemples des bâtiments de l'ancienne Médina de la ville de Casablanca. Les images de la figure 1. Présentent des exemples concrets de l'incapacité des modèles de segmentation, basés uniquement sur l'information géométrique, dans la séparation des segments plans murs et des segments plans volets de fenêtres. La même architecture caractérise l'ensemble des bâtiments des anciennes Médina et également celles des anciens quartiers.

¹ Département de Photogrammétrie, Cartographie et Télédétection, IAV Hassan II, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, 6202 Rabat, Morocco - (k.aitelkadi, d.tahiri, i.sebari)@iav.ac.mar

² L2G, ESGT, Ecole Supérieure des Géomètres Topographes 72000 Le Mans, France – (elisabeth.simonetto)@esgt.cnam.fr



Figure 1: (a) Ancienne résidence du général Lyautey, (b) Exemple de façades de bâtiments. Les cadres rouges présentent les plans des volets de fenêtres et des murs qui coïncident.

Ce travail exploite l'information géométrique et radiométrique dans le processus de segmentation sans amortissement de l'une des informations par une autre. En effet, Les nuages de points sont segmentés d'abord en utilisant seulement l'information géométrique. Le résultat de la segmentation est ensuite analysé et traité en utilisant l'information couleur. Le résultat final est ajusté par l'introduction de la composante intensité.

L'exploitation des composantes géométriques et radiométriques pour une meilleure segmentation nécessite un choix minutieux des algorithmes appropriés pour chaque type d'information.

Etat de L'art

La littérature décompose les méthodes de segmentation en deux familles. Celles basées sur le principe d'agrégation de points dans des segments en fonction d'un certain nombre de critères d'homogénéité et celles définissant les meilleures primitives pour un nuage de points. Les méthodes de segmentation basées sur le principe d'agrégation présentent des limites par rapport aux nuages de points non-structurés. Ces méthodes dépendent fortement de la validation des identifications des points 3D qui risquent de se présenter comme bruits ou des points aberrants. Par exemple, l'algorithme de croissance de région est un algorithme influencé par la présence des points indésirables au niveau de ces deux stades : l'identification de la surface graine et la phase de croissance (Pu & Vosselman 2006). La méthode appuyée sur le principe de clustering offre une souplesse dans l'identification des éléments homogènes sur la base des attributs des points, pourtant son temps d'implémentation pour le traitement des données multidimensionnelles (3D) est très important. Aussi cette méthode n'échappe pas à la sensibilité aux données bruitées (Filin 2002). Le procédé de segmentation par ligne de balayage basé également sur l'approche de fusion, présente des limitations (Mapurisa & Sithole 2012). La

méthode n'est pas bonne pour la segmentation des données mal-structurées et ayant des densités variables ce qui est le cas de la répartition réelle des données LIDAR. Les méthodes relatives à l'extraction des primitives apportent des réponses aux problèmes des bruits des données Laser 3D. Cependant, les deux algorithmes reconnus par l'importance des résultats de la segmentation des nuages bruités qui sont la transformée de Hough et RANSAC, souffrent également des handicaps. Il s'agit du temps d'implémentation des algorithmes notamment pour la Transformée de Hough (Borrman 2011). Par rapport à RANSAC, la limite de l'algorithme est remarquable lorsque des points qui appartiennent à deux plans adjacents sont trop tôt enlevés avec le premier plan défini (Huang & Brenner 2011) (Boulaassal 2010). La famille des algorithmes hybrides à composante géométrique a fourni des résultats assez importants dans la segmentation des données LIDAR aéroportées. Les domaines industriel et architectural ont également bénéficié du mélange des méthodes de segmentation en se basant sur une composante principale qui est la normale au point. Néanmoins, dans le domaine architectural, l'existant n'est pas toujours aussi simple à concevoir géométriquement. La variété de design et de structuration des composantes des façades de bâtiments n'est pas toujours maniable. En effet, si certaines entités peuvent être caractérisées par des propriétés géométriques, d'autres sont plus faciles à distinguer par leurs contenus couleur (Barnea & Filin 2012). Ainsi, la segmentation des données en utilisant des sources de données multiples notamment l'espace couleur devrait fournir des informations plus riches, descriptifs et présentant des meilleures perspectives pour soutenir les interprétations ultérieures. Promouvoir les approches de segmentation hybrides à composantes géométriques et radiométrique, qui sont actuellement timides (Pu & Vosseleman 2009) et (Strom et al. 2010), exige un choix minutieux de l'espace couleur et son traitement préalable. Dans le cadre de ce travail, une nouvelle approche est adoptée pour la segmentation automatique des bâtiments des anciennes Médina du Maroc. Cette approche fait appel à une corrélation géométrie-radiométrie traitant les défaillances de l'aspect géométrique à travers l'information couleur. La préoccupation du choix et du traitement préalable de l'espace couleur sont résolus à travers un post traitement impliquant l'information d'intensité laser.

Matériels et Méthodes

Site d'étude

Le site d'étude est l'ancienne Médina de Casablanca. La ville de Casablanca a une grande histoire qui remonte à loin et qui a été influencée par diverses cultures : Romaine, Phénicienne, Arabe, Berbère, Européennes voire Américaine.

De là, nous trouvons une grande diversité dans l'architecture de la ville. Parmi les styles architecturaux les plus répandus, nous trouvons le style de l'Art Déco qui est l'un des particularités de l'architecture de Casablanca. Parmi ces bâtiments d'Art Déco, nous trouvons l'ancienne

résidence de la Médina de Casablanca, datant de plus que 100 ans et qui a servi comme résidence au général Lyautey dans les années du protectorat Français sur le Maroc.

Equipements

Le bâtiment qui a fait objet des tests a été relevé par un scanner laser terrestre FARO Focus 3D de différence de phase. La portée du scanner atteint 120m dans de bonnes conditions d'éclairage sur une surface réfléchissante à 90%. Sa précision est de 2mm pour une portée de 10m et sa vitesse d'acquisition atteint les 976 000 points par seconde.

L'intervalle de couleur RGB est codifié sur 8bits [0 255] et celui d'intensité sur 11bits [-2047 2048]

Méthodes

La stratégie de segmentation adoptée pour la segmentation des bâtiments ayant une architecture similaire à celle de l'ancienne résidence du général Lyautey, traite l'information géométrique et radiométrique. Afin d'explicitier l'hypothèse du travail, supposant que nous disposons d'un nuage de points $PTS = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ et qu'à travers une première segmentation géométrique basée sur les potentialités de l'algorithme RANSAC dans la détection des plans, nous obtenons un ensemble de segments plans $\sum SP_i = \{SP_1, SP_2, \dots, SP_n\}$. Chaque segment plan est soigné par une deuxième segmentation passant par l'algorithme de croissance de région et employant d'autres critères d'homogénéité notamment la similarité couleur. Les variations de luminosité sont moins influentes puisque le résultat est ajusté par la similarité d'intensité. Nous aurons à la fin du processus, des surfaces homogènes en matière de coplanarité et de similarité radiométrique $\sum SP_{ij} = \{SP_{i1}, SP_{i2}, \dots, SP_{ik}\}$.

RANSAC (Random Sample Consensus)

L'algorithme RANSAC est un outil de segmentation caractérisé par son efficacité de détecter les formes géométriques malgré la présence de bruit et des points aberrants. Le principe de l'algorithme est itératif. Le processus débute par un échantillonnage aléatoire d'un nombre de points permettant la détermination initiale des paramètres d'une forme géométrique (plan, sphère, cylindre). Après l'estimation de la forme géométrique, l'ensemble des points qui se présentent à une certaine distance seuil sont nommés points valables (inliers). Le reste des points, dépassant le seuil, sont des points aberrants (outliers). Dans le cas des façades, la forme géométrique caractéristique est le plan avec un nombre minimum de trois points pour son estimation. L'algorithme RANSAC traite les composantes géométriques (X, Y, Z). Le sous-ensemble ESS désigne l'échantillonnage de départ formé de trois points aléatoires coplanaires et non colinéaires $ESS = \{p_1, p_2, p_3\}$. Les trois points sélectionnés aléatoirement servent à initier les paramètres (pr) du modèle mathématique M définit comme suit :

$$M(a) = \{a \in pr : F_M(p, a) = 0\} \quad (1)$$

Où $pr = \{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ vecteur des paramètres du modèle à estimer.

$[a_1, a_2, a_3]$ = composantes de la normale du plan.

a_4 = distance du plan à l'origine du repère.

$p \in ESS$ = ensemble des points du nuage permettant le calcul des paramètres pr .

F_M = fonction décrivant le modèle mathématique.

$$M(a) = \{a \in pr : F_M(p, a) = a_1x + a_2y + a_3z + a_4 = 0\} \quad (2)$$

Une autre variable qui présente une grande importance dans la validation de l'algorithme RANSAC, est l'écart entre le modèle initialisé et le reste des points du nuage. Cet écart est souvent exprimé comme une distance de projection.

$$\varepsilon_M(p, a) = \min \text{dist}(p, p') \quad (3)$$

Avec $p' \in M(a)$.

En utilisant cet écart métrique, nous pouvons définir l'Ensemble Consensus (EC). L'Ensemble Consensus présente l'ensemble des points qui ajustent au mieux le modèle mathématique préalablement initialisé par l'échantillon aléatoire d'un Ensemble d'Echantillon Minimal (ESS). Autrement dit, c'est l'ensemble des points qui sont inférieurs à une distance seuil ds par rapport au modèle mathématique. Le Cardinal de l'Ensemble Consensus $\text{Card}(EC)$ est le nombre de points composant le meilleur plan.

$$S(a) = \{p \in PTS : \varepsilon_M(p, a) \leq ds\} \quad (4)$$

Le temps d'implémentation de l'algorithme dépend de l'optimisation du nombre N d'itération. Le but est de sélectionner le bon ESS qui forme le meilleur plan théorique (Harley & Zisseman 2003).

$$N = \log((1-P)/\log(1-q^3)) \quad (5)$$

Où

q = nombre des points valables (inliers)/nombre total des points

q = la probabilité de choisir un point valable à chaque itération.

P = la probabilité de tirer l'échantillon initialisant le bon plan recherché.

L'optimisation du nombre N consiste à adapter la fausse estimation de q au fur et à mesure que les différents EC sont déterminés.

L'algorithme RANSAC permet de récupérer le segment plan de la façade principale. Le segment plan principal est la référence de l'extraction des segments secondaires. Chaque segment principal ou secondaire fera l'objet d'une deuxième étape de segmentation à aspect radiométrique basé sur la souplesse d'implémentation de l'algorithme de croissance de région.

Croissance de région

Le processus commence par l'identification d'un point et évolue autour de son voisinage pour former une surface homogène vérifiant les arguments du prédicat P_r . Le prédicat de base de

la segmentation par croissance de région est : la région R_i est homogène. La validation du prédicat se base sur la vérification des contraintes d'ordre radiométrique. Ces contraintes sont la similarité couleur de l'espace RVB et la variance des couleurs des points de la surface graine. L'opération de segmentation ΘP d'un nuage de point P produit un ensemble de zones homogènes (s) défini par les propriétés suivantes :

$$S = \{s \mid s \subset P\}$$

$$\Theta P \Rightarrow S$$

$$\cup s_i = P \quad \text{où} \quad |s_i| > 0$$

$$s_i \cap s_j = \emptyset \quad \text{où} \quad i \neq j$$

L'algorithme retrouve une faiblesse dans la segmentation du nuage de points non-structurés notamment au niveau de l'identification du point grain. En effet, le passage par RANSAC réduit la crainte de fausser le choix du point grain. Une première mission consiste à sélectionner aléatoirement un point grain du segment plan. Une deuxième étape traite la croissance du point grain en surface graine. Enfin, une troisième mission comprend la phase de croissance de la surface graine en zone homogène. En effet, la surface graine se développe à partir d'un point aléatoire doté de propriétés radiométriques qui doivent être similaires à celles du voisinage. Le plus proche voisin est l'approche de voisinage adoptée pour le passage du point grain à la surface graine. La validation de la surface graine dépend de la vérification des critères suivants :

a- Le critère géométrique : la distance du point grain par rapport à son voisinage est inférieure à un seuil (r). Cette distance correspond à un rayon de cercle dont le centre est le point grain.

b- La similarité couleur (sim_{cou})

Afin d'identifier une surface graine homogène, il faut respecter les grandeurs suivantes :

- i. La distance couleur du point grain par rapport au voisinage.
- ii. La variance (var) des couleurs des points de la surface graine.

Similarité couleur

$$\begin{cases} \text{Vrai si } \text{sim}_{\text{cou}} < \text{tr} \text{ et } \text{Var} < \text{Vr} \\ \text{sinon faux} \end{cases}$$

Sim_{cou} est la distance couleur par rapport à la couleur moyenne d'une région. tr et Vr sont respectivement les seuils de la distance couleur et de la variance.

$$\phi_{\text{Euc}}(C_i, \bar{C}) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 (C_{ik} - \mu_k)^2} \quad (6)$$

\bar{C} représente la moyenne de la couleur d'une région qui est défini par le triplet des moyennes calculées pour chaque canal ($k = 1, 2, 3$). La moyenne du $k^{\text{ième}}$ canal de couleur d'une région ayant N point est :

$$\mu_k = 1/N \sum_{i=1}^N C_{ik} \quad (7)$$

La variance du $k^{\text{ième}}$ canal de couleur est calculée comme suit:

$$V_{kk} = (1/N) \sum_{i=1}^N (C_{ik} - \mu_k)^2 \quad (8)$$

$$\text{Var} = V_{rr} + V_{vv} + V_{bb} \quad (9)$$

Le critère d'homogénéité utilisé dans la croissance de la surface est la similarité de l'espace couleur RVB. L'ajout de la contrainte de proximité n'est pas significatif puisque nous ne pouvons pas estimer la répartition d'une région homogène. Le Produit obtenu après l'implémentation de l'algorithme est une nouvelle matrice « Container ». Les dimensions de la matrice sont [Card(EC) x 8]. Les huit colonnes correspondent aux données suivantes : X, Y, Z, Intensité laser, R, V, B, Indice région.

La fusion

L'influence du changement de luminosité et de l'effet de l'ombre rencontrés souvent lors du balayage d'un bâtiment par des caméras intégrés ou externes, provoquent des imperfections des espaces couleurs RVB, HSV, CIEL*a*b, xyz et CIEL*u*v. Aucun espace n'échappe à une phase préalable du traitement. Dans le cadre de ce travail, les imperfections sont traitées après la récupération des résultats issus de la similarité couleur. Ce traitement consiste à fusionner les régions ayant une similarité d'intensité laser inférieure à un seuil. L'intensité laser présente un paramètre opérant dans l'identification des matériaux qui constituent une façade à travers les réponses de réflectivité du laser. Ces réponses varient en fonction du type des matériaux (béton, bois, fer, sable...) et en fonction de la clarté de la couleur des détails (blanc, couleur clair, sombre, noir). La fusion dépend de la validation du prédicat de la similarité d'intensité laser entre les régions résultantes de la croissance de région.

$$P_r(I) = \text{Vrai} \iff I_i - I_j < \sigma \quad (10)$$

L'algorithme de fusion est généralisé sous forme de boucle. Il se base sur les valeurs des intensités moyennes liées à chaque région obtenu par croissance de région.

Boucle fusion :

Pour j allant de 1 à (nombre de régions)

Pour i allant de 1 à (nombre de régions - j)

Dif = ;

si (Dif < f)

indice = find(container(:,8)) = $I_{\text{moy}}(i+j,2)$;

Container(indice,8) = $I_{\text{moy}}(j,2)$;

$I_{\text{moy}}(i+j,2) = I_{\text{moy}}(j,2)$;

Fin si

Fin pour

Fin pour

RESULTATS

L'approche adoptée dans la segmentation des façades des bâtiments patrimoniaux ayant une architecture similaire à celle de l'ancienne résidence du général Lyautey, se base principalement sur la matrice d'entrée relative aux points du nuage $M(NPTS \times 7)$ et sur les seuils qui conditionnent le résultat de l'extraction des surfaces homogènes. La première étape de l'algorithme repose sur l'extraction du segment plan principal en se basant sur la reconnaissance du plan par la méthode RANSAC. La méthode impose l'identification et le calcul ou l'estimation de la grandeur du seuil ds .

Deux cas de figure se présentent :

- ♦ Si $dist < ds$: points à l'intérieur de la zone tampon \leftrightarrow Inliers
- ♦ Si $dist \geq ds$: points hors tolérance \leftrightarrow Outliers.

La définition de ds dépend du niveau d'ajustement des formes à segmenter. Par exemple dans le cas des façades, nous pouvons avoir une variété des valeurs de ds qui sont souvent fonction de la planéité des murs (le niveau de perfection de la phase de construction). Ce seuil est également un paramètre de déduction de l'objectif de la phase de modélisation. En effet, un besoin de reconstitution du design architectural d'un bâtiment mettra moins l'accent sur la finesse de la valeur du seuil. Par contre, si le but est le contrôle de verticalité, le choix sera plus minutieux et parfois variable d'une zone à l'autre. L'objectif de ce travail est limité à la reconnaissance de l'architecture initiale du bâtiment. Toutefois, un mauvais choix de la valeur de ds engendre soit une sous-segmentation si la valeur est élevée ou une sur-segmentation si la valeur est réduite (Figure 2).

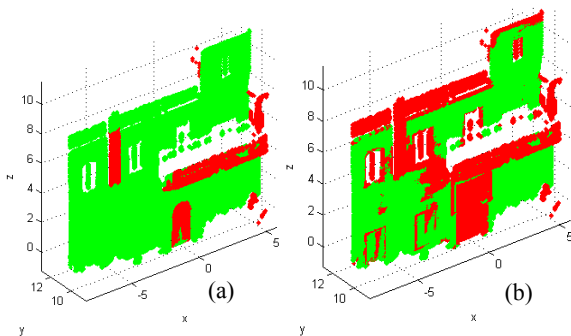


Figure 2: Influence du seuil ds sur le résultat de la segmentation.
 (a) sous-segmentation avec $ds = 0.15m$,
 (b) sur-segmentation avec $ds = 0.03m$.

La possibilité de déterminer un seuil optimal est difficile. Pour cela, le choix de la valeur de ds a été pondéré de telle sorte à ne pas risquer des sur-segmentations et de ne pas vulgariser la sous-segmentation. Aussi, puisqu'une deuxième étape du processus de segmentation corrigera les imperfections de RANSAC à base des composantes radiométriques, le seuil tolérable adopté pour la segmentation de la résidence est $ds = 0.06 m$ (Figure 3)

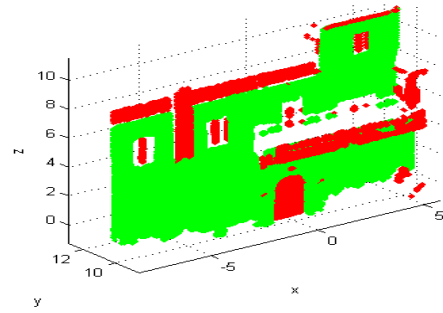


Figure 3: Résultat de RANSAC pour $ds = 0.06m$

Similairement à l'algorithme RANSAC, l'identification des seuils est fonction des données à traiter. Pour perfectionner les résultats de la segmentation couleur, les seuils de similarité adoptés peuvent être amplifiés. Par exemple, les grandeurs suivantes ont permis de bons résultats lors de l'ajout de la composante couleur : seuil de similarité couleur de la surface graine de ($tr = 30$), seuil de croissance ($tr2 = 60$), seuil de variance ($Vr = 900$) et valeur du rayon de voisinage de la surface graine ($r = 0.20m$) (Figure 4).

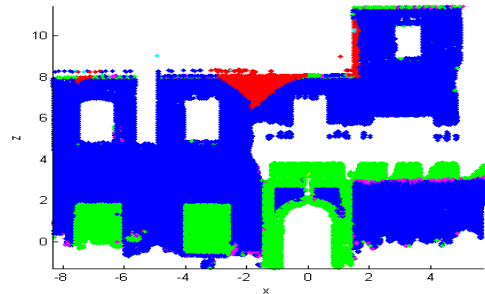


Figure 4: Résultat de la segmentation par croissance de région adoptant avec $tr = 20$, $tr2 = 60$.

Parfois l'identification de la variation des couleurs est difficile notamment en présence des effets indésirables d'ombre et de variation de luminosité. Cet effet cause souvent des sur-segmentations de la même région visuellement homogènes mais ayant des valeurs RVB différentes. Suite à ces variations des valeurs, la diminution des seuils produit des défauts de segmentation remarquables (Figure 5).

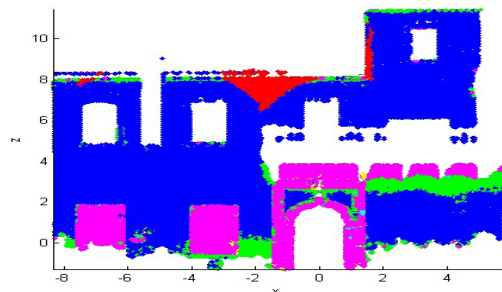


Figure 5: Effet de la variation de luminosité sur les résultats de la segmentation : $tr = 10$ et $tr2 = 30$

Ce défaut de segmentation est soigné par la fusion des régions ayant une intensité laser similaire. La mission de fusion dépend de l'analyse d'une matrice récapitulative. Cette matrice comprend l'intensité moyenne de chaque région indexée, l'index de la région et le nombre de points dans cette région (Tableau 1). Si nous comparons les

valeurs des intensités moyennes, nous allons remarquer que l'intensité du mur (béton blanc) est similaire au niveau de plusieurs régions représentant concrètement la même entité. La même remarque se répercute sur les volets fenêtres (bois marron) et le cadre de la porte.

Tableau 1. Régions résultantes de la phase de croissance de région avec les seuils de la figure 5.

Region index	Average laser intensity	Number of points
1	2032	26390
2	1834	1167
3	1990	3207
4	200	6729
5	1844	112
6	-1236	46
7	1932	39
8	2032	4
9	2032	2
10	2032	3

La validation de la phase de fusion dépend de la capacité de la variable intensité à différencier les types de matériaux. Après la vérification de cette condition, le processus passe à la phase de fusion en fonction du seuil de similarité d'intensité (f). Le choix du seuil est estimatif en fonction du degré de variation de l'intensité laser. Dans cet exemple de données, le seuil adopté est $f=200$. Le résultat présente un ajustement des imperfections de l'espace couleur. Nous passons ainsi de 10 à 3 régions (Tableau 2) et (Figure 6).

Tableau 2. Fusion des régions couleurs à partir du critère de similarité d'intensité.

Region index	Average laser intensity	Number of points
1	2032	26390
1	1834	1167
1	1990	3207
1	1844	112
1	1932	39
1	2032	4
1	2032	2
1	2032	3
2	200	6729
3	-1236	46

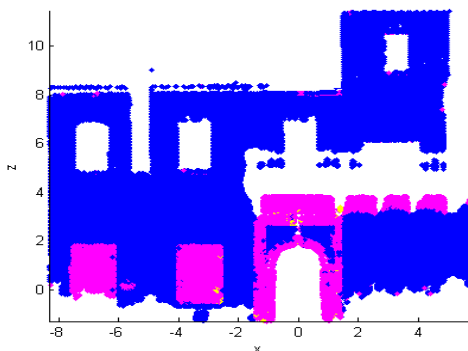


Figure 6: Résultat de la fusion.

Les trois régions homogènes obtenues sont : une région pour le mur de la façade principale, une deuxième région constituée de volets de fenêtres et de cadre de porte et une

troisième région composée de points aberrants (46 points). La région d'indice 3 est supprimée puisque ces points n'influencent pas la constitution de la façade (Figure 7).

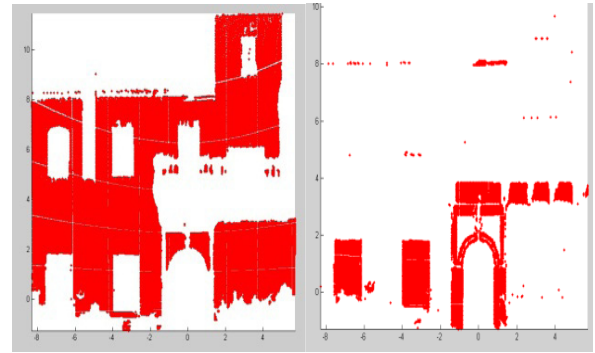


Figure 7: Segments plans homogènes résultat de l'approche de segmentation adoptée.

Discussion

Le choix des seuils adéquats dans les processus de segmentation demeure une limitation de plusieurs solutions proposées (Boulaassal 2010). Ces seuils varient d'une donnée à l'autre (en fonction du type de bâtiment et de la variété des détails). Dans le cadre de ce travail, l'évaluation du choix des seuils optimaux dépend de la validation de facteurs à aspect géométriques et radiométriques. Les facteurs géométriques se présentent comme suit :

- ♦ Le nombre de segments homogènes obtenu : le nombre dépend de la planéité des plans composant les façades de bâtiments et de l'objectif de la modélisation 3D (restructuration ou auscultation).
- ♦ Pour chaque segment, le nombre des composantes connexes : un segment plan peut être constitué d'un ou plusieurs composantes connexes en fonction de l'appartenance des détails au même plan
- ♦ Le nombre des composantes connexes de petites tailles : les composantes connexes de petites tailles présentent souvent des détails aberrants et exigent une suppression ou une réduction afin de conserver les modèles précis des façades de bâtiments.
- ♦ Les contraintes radiométriques sont associées à la vérification de l'homogénéité colorimétrique et l'intensité laser des points du nuage.

L'évaluation quantitative des résultats de cette nouvelle approche de segmentation est réalisée à travers une comparaison entre des mesures automatiques et d'autres manuelles sur des détails de façades (portes et cadre de fenêtres). Pour un échantillonnage de 19 mesures, nous obtenons une différence moyenne de l'ordre de 2mm et une variance de l'ordre de 3mm (Tableau 3).

L'approche est testée sur d'autres façades de l'ancienne Médina ayant une forme architecturale similaire à celle de la résidence (Figure 8).

Tableau 3. Les valeurs de différence entre une segmentation manuelle et l'approche automatique proposée.

Seg. Man. (m)	Seg. Auto. (m)	Diff (m)	Carré des écarts	ABS(Carré des écarts)
1.483	1.48	0.003	0.00001	0.00001
1.478	1.478	0	0.00000	0.00000
2.324	2.328	-0.004	-0.00400	0.00400
2.331	2.331	0	0.00000	0.00000
1.42	1.416	0.004	0.00400	0.00400
1.603	1.61	-0.007	-0.00700	0.00700
1.602	1.604	-0.002	-0.00200	0.00200
0.304	0.302	0.002	0.00200	0.00200
0.301	0.301	0	0.00000	0.00000
2.232	2.232	0	0.00000	0.00000
2.1	2.1	0	0.00000	0.00000
2.1	2.13	-0.03	-0.03000	0.03000
1.491	1.487	0.004	0.00400	0.00400
1.496	1.496	0	0.00000	0.00000
0.578	0.578	0	0.00000	0.00000
0.537	0.537	0	0.00000	0.00000
0.58	0.58	0	0.00000	0.00000
0.579	0.58	-0.001	-0.00100	0.00100
0.579	0.579	0	0.00000	0.00000
Somme des carrés des écarts				0.05401
Variance				0.00284
Moyenne de différence				-0.00163

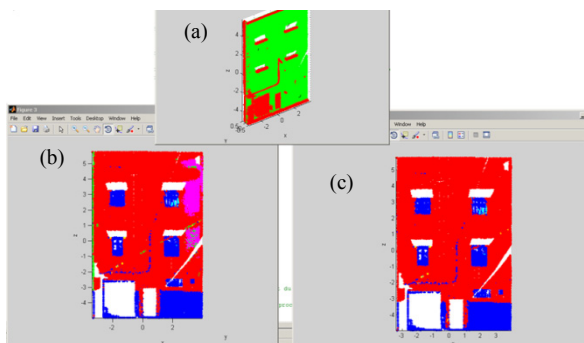


Figure 8. Résultat de l'approche de segmentation testée sur d'autres façades de bâtiments. (a) résultat de l'extraction géométrique, (b) résultat après l'insertion de l'information couleur et (c) ajustement suite à l'emploi de l'intensité laser.

Les résultats obtenus sur les données traitées permettent de valider la fiabilité de l'approche de segmentation qui intègre l'ensemble des composantes du nuage de points. La grandeur millimétrique des écarts de distance permet de valider l'efficacité du traitement des données du scanner laser terrestre dans un but de restructuration 3D des bâtiments ayant une architecture spécifique.

Conclusion

La richesse de l'information contenue dans un nuage de points présente des grandes opportunités dans le processus de segmentation des façades des bâtiments historiques des anciennes Médina. Ces bâtiments sont dotés d'une architecture

qui confond les plans géométriques des détails ou des motifs. L'approche de segmentation proposée dans ce travail dévoile une relation de complémentarité entre les différentes composantes du nuage de points. L'information géométrique est indispensable dans l'identification des segments plans des façades. Ces segments forment des plates-formes d'initiation et de développement des approches orientées couleur ou intensité laser. La couleur débloque la classification des éléments ayant la même forme géométrique. Enfin, l'intensité résout les imperfections des variations des couleurs. Les résultats obtenus feront l'objet d'une modélisation filaire et surfacique permettant l'archivage des modèles architecturaux des bâtiments patrimoniaux des anciennes Médina du Maroc. L'archivage des différentes architectures des anciennes Médina facilitera au ministère de la culture et aux agences urbaines la réhabilitation des sites patrimoniaux en conservant la touche artistique du concepteur. Les résultats de la phase de segmentation feront objet d'une modélisation filaire et surfacique.

Références

Barnea S. & Filin S. (2013) Segmentation of terrestrial laser scanning data using geometry and image information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, February 2013, pp. 33-48.

Borrman D. and al. (2011) *The 3D Hough Transform for Plane Detection in Point Clouds: A Review and a new Accumulator Design*. Springer.

Boulaassal H. and al. (2009) Automatic Extraction of Planar Clusters and their Contours on Building Facades Recorded by Terrestrial Laser Scanner. *International Journal of Architectural Computing*, 7 (1), January 2009, pp. 1-20.

Boulaassal H. (2010) *Segmentation et modélisation géométriques de façades de bâtiments à partir de relevés laser terrestres*. PhD. INSA Strasbourg.

Filin S. (2002) Surface clustering from airborne laser scanning data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXIV, part 3A/B, Graz, Austria, pp. 119-124.

Hartley R. & Zisserman A. (2003) *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press. Second Edition 2003. pp 170-178.

Huang H. & Brenner C. (2011) Rule-based roof plane detection and segmentation from Laser point clouds. *IEEE Joint Urban Remote Sensing Event*, Munich, Germany. 2011.

Lay DC. (2004) *Algèbre linéaire, théorie, exercices et applications*. Translation of the 3rd édition américaine par Citta-Vanthemschen M., Larcier 2004. ISBN 2-8041-4408-9, 560 pages.

Mapurisa W.T. & Sithole G. (2012) 3D Object Segmentation of point clouds using profiling techniques. *South African Journal of Geomatics*, 1 (1), January 2012, pp. XX.

Pu S. & Vosselman G. (2006) Automatic extraction of building features from terrestrial laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVI, part 5, Dresden, Germany.

Pu S. & Vosselman G. (2009) Building facade reconstruction by fusing terrestrial laser points and images. *Sensors*, 9(6), pp. 4525-4542.

Strom J. et al. (2010) Graph-based segmentation for colored 3D laser point clouds. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 2010, Taipei, Taiwan.