

Amélioration d'une base de données d'empreintes de bâtiments pour la reconstruction 3D : une approche par découpe et fusion

Bruno Vallet¹Marc Pierrot-Deseilligny¹Mathieu Brédif¹Didier Boldo^{1*}¹ Laboratoire MATIS / Institut Géographique National2/4 avenue Pasteur - 94165 Saint-Mandé Cedex, France
bruno.vallet@ign.fr

Résumé

Dans le contexte de la reconstruction 3D de vastes zones urbaines, l'utilisation d'empreintes de bâtiments s'est montrée utile pour améliorer à la fois la précision et la robustesse des algorithmes utilisés. Cependant, ces empreintes présentent souvent des contradictions avec les données (plus d'un bâtiment dans l'empreinte, cours intérieures, superstructures...) Cet article présente un algorithme rapide et efficace pour améliorer une base de données d'empreintes de bâtiment afin de rendre les reconstructions 3D l'utilisant plus faciles, plus précises et plus robustes. Il est basé sur une énergie de segmentation qui est minimisée par une méthode de découpe et de fusion. L'algorithme est évalué sur une vaste zone urbaine d'un kilomètre carré.

Mots Clef

Reconstruction 3D, empreinte de bâtiment, découpe et fusion, segmentation

Abstract

In the context of 3D reconstruction of wide urban areas, the use of building footprints has shown to be of great help to achieve both robustness and precision. These footprints however often present inconsistencies with the data (more than one building in the footprint, inner courts, superstructures...) This paper presents a fast and efficient algorithm to enhance the building footprint database in order to make subsequent 3D reconstructions easier, more accurate and more robust. It is based on a segmentation energy that is minimized by a split and merge approach. The algorithm is demonstrated on a wide urban area of one square kilometer.

Keywords

3D reconstruction, building footprint, split and merge, segmentation

*Didier Boldo travaille maintenant à : EDF R & D Département STEP - 6 quai Watier 78401 CHATOU

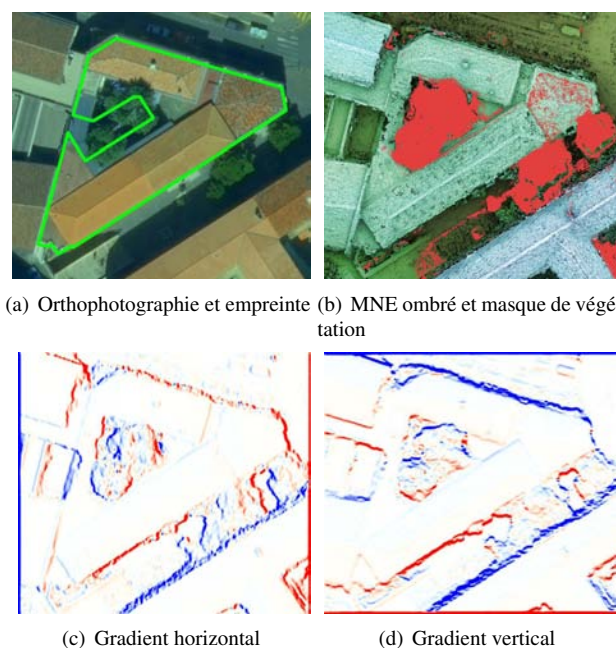


FIG. 1 – Entrées de notre algorithme

1 Introduction

La production de modèles en 3D de zones urbaines a suscité beaucoup d'attention de la part de la communauté scientifique dans la dernière décennie en raison de la large gamme de ses applications et de l'augmentation de la qualité et de la quantité de données disponibles. Dans ce contexte, il devient crucial de concevoir des outils flexibles et efficaces pour aider les opérateurs humains à réaliser des reconstructions précises de vastes zones urbaines.

1.1 Données du problème

Les données disponibles pour cette étude consistent en :
– un ensemble d'images aériennes à 10cm de résolution sol et avec un fort ratio de recouvrement d'environ 60% (intra-bande + inter-bande), ce qui assure que chaque point au sol est vu dans au moins 4 images (sans compter les occultations), et couvrant une zone de test d'une su-

perficie d'un kilomètre carré. Ces images comprennent les trois canaux habituels (rouge, vert, bleu) plus un canal infrarouge (uniquement utilisé pour déterminer un masque de végétation).

- un cadastre donnant les empreintes 2D (administratives) des bâtiments sur la zone de test (figure 1(a), vert). Ce cadastre est vectorisé, c'est à dire qu'il consiste en un ensemble de polygones (sans trous) définis par la liste des coordonnées de leurs sommets.

Etant déjà calculés dans le processus de production qui nous intéresse, on considèrera aussi comme étant donnés :

- un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) couvrant la zone de test (figure 1(b)). Celui-ci est obtenu par corrélation dense [Roy et Cox, 1998] en utilisant l'implémentation multi-échelle décrite dans [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006].
- une image de gradient du MNE (figures 1(c) et 1(d)) calculée par le filtre de Canny-Deriche [Deriche, 1987].
- une orthophotographie de la zone de test (figure 1(a)).
- un masque de végétation (figure 1(b), rouge) obtenu par une méthode de classification supervisée [Iovan et al., 2008].

1.2 Enoncé du problème

Le problème de la reconstruction urbaine consiste à trouver un modèle 3D de bâtiment (en général une surface polyédrale) qui est aussi cohérente que possible avec des données acquises sur un bâtiment réel. Etant donné que nous disposons du cadastre et de vues aériennes, nous pouvons employer l'approche robuste et efficace proposée dans [Durupt et Taillandier, 2006]. Cependant, cette approche est fortement dépendante de la qualité de l'empreinte de bâtiment utilisée, et échoue si le bâtiment à reconstruire contient des discontinuités altimétriques qui ne sont pas présentes dans son empreinte. Ceci se produit souvent en pratique, et particulièrement quand :

- plusieurs structures de toit différentes partagent la même empreinte.
- la véritable empreinte n'est qu'un sous ensemble de l'empreinte donnée (jardins, cours intérieures,...)
- le bâtiment a des superstructures (cheminées, chiens assis,...) dont les tailles et les hauteurs ne sont pas négligeables par rapport à la précision attendue de la reconstruction. Ce problème est de plus en plus présent au fur et à mesure que les reconstructions gagnent en précision. Il a déjà été partiellement traité dans [Brédif et al., 2007] et [Dornaika et Brédif, 2008].

Dans les cas plus difficiles, nous sommes souvent confrontés à une combinaison des trois cas citée ci-dessus, ce qui requiert une intervention manuelle avant de lancer une reconstruction automatique. Généralement cette intervention consiste à subdiviser l'empreinte en sous-empreintes bordant les différentes structures de toit. En particulier ces bordures doivent passer par la plupart des discontinuités altimétriques du bâtiment. Dans le cadre d'une production à large échelle, il s'avère que cette étape d'amé-

lioration de la base de données d'empreintes de bâtiment est la plus coûteuse en temps opérateur. Par conséquent, le problème que nous abordons dans cet article est celui de l'automatisation de ce processus en tant qu'étape de pré-traitement indispensable à la reconstruction 3D elle-même. Plus précisément, notre problème est de segmenter une empreinte polygonale en un ensemble de sous-empreintes polygonales disjointes, de sorte que l'interface entre les sous-empreintes corresponde aux discontinuités altimétriques. C'est un problème de segmentation des données vecteur (base de données d'empreintes de bâtiment) guidé par des données raster (photos, MNE,...)

1.3 Travaux antérieurs

L'idée d'utiliser une empreinte 2D de bâtiment pour faciliter sa reconstruction 3D apparaît pour la première fois (à notre connaissance) dans [Pasko et Gruber, 1996]. Elle est ensuite développée dans [Roux et Maître, 1997], [Brenner, 2000] et [Jibrini et al., 2000]. Cette idée est au coeur de la méthode de reconstruction [Durupt et Taillandier, 2006] pour laquelle notre amélioration d'empreinte est conçue, et de la méthode plus générale [Taillandier, 2005] dont elle dérive. Enfin, elle apparaît aussi dans le contexte de la reconstruction à partir de données laser aéroportées [Suveg et Vosselman, 2004]. Si la plupart des méthodes de reconstruction de bâtiments incluent une étape de segmentation en régions planaires, la segmentation d'empreintes de bâtiments n'a (à notre connaissance) jamais été découplée de la reconstruction elle-même comme nous le faisons dans cet article.

1.4 Approche proposée

Dans cet article, nous appelons \mathcal{P} l'empreinte polygonale à segmenter, \mathcal{P}_i les sous empreintes résultant de la segmentation et $I_i^j = \mathcal{P}_i \cap \mathcal{P}_j$ l'interface entre deux sous-empreintes (cela peut être un segment ou un ensemble de segments dans certains cas). Le résultat de notre algorithme est une *segmentation* de \mathcal{P} donnée indifféremment par un ensemble de sous-empreintes \mathcal{P}_i ou par l'interface (ensemble de segments) $\mathcal{I} = \cup_{i < j} I_i^j$ entre les \mathcal{P}_i .

L'approche que nous proposons consiste à définir une énergie qui est négative (resp. positive) sur les arêtes qui sont susceptibles (resp. peu probables) d'être des discontinuités altimétriques. Il s'agit alors de trouver la segmentation pour laquelle la somme de ces énergies d'arêtes sur l'interface \mathcal{I} est minimale. Nous commençons par choisir un seuil de gradient T_{∇} de sorte que nous considérons qu'un point où la valeur du gradient est supérieure (resp. inférieure) à T_{∇} est susceptible (resp. peu probable) d'être sur une discontinuité altimétrique. L'énergie sur une arête e peut alors être définie comme :

$$E(e) = \int_{P \in e} T_{\nabla} - |\nabla z(P) \cdot \vec{n}(e)| dP \quad (1)$$

où z désigne l'élévation d'un point P donnée par le MNE et $\vec{n}(e)$ est un vecteur unitaire normal à e . Comme annoncé,

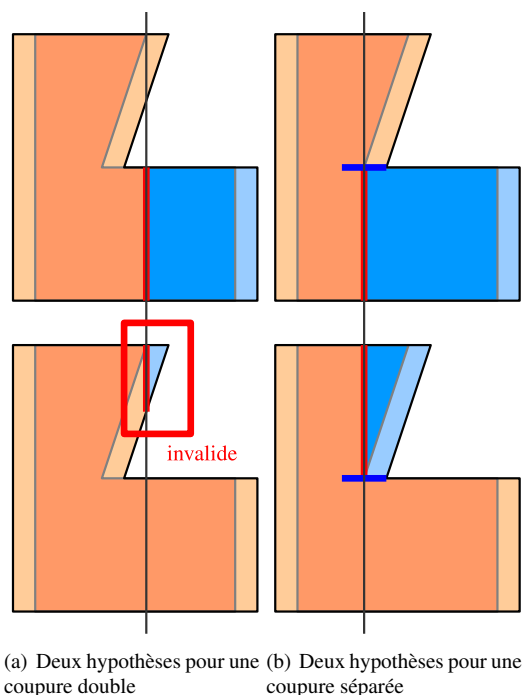


FIG. 2 – Hypothèses de découpe. L’empreinte érodée est en couleur sombre.

$E(e)$ est bien négative quand la moyenne du gradient à travers e est supérieure à T_{∇} .

Pour simplifier ce problème, et gagner en robustesse et en qualité, nous limiterons les directions des bords d’interface à suivre des directions présentes dans l’empreinte initiale, ce qui n’est pas une hypothèse forte : elle s’est avérée vraie sur la plupart des exemples que nous avons examinés. Afin de résoudre ce problème simplifié, nous proposons une approche de découpe et fusion basée sur les directions principales détectées sur l’empreinte de bâtiment initiale \mathcal{P} :

1. Regrouper les directions des arêtes de l’empreinte en quelques *directions principales*.
2. Découper récursivement l’empreinte le long de droites d’énergie minimale.
3. Fusionner les empreintes résultant de la découpe de sorte à minimiser $E(\mathcal{T})$.

La première étape est un simple groupement dans l’espace des angles (modulo π), et n’exige pas un soin particulier. Notez simplement que nous devons maintenir le nombre de groupes de direction aussi petit que possible, par exemple en éliminant les groupes dont la somme des longueurs d’arêtes est inférieure à un seuil donné, ou à un pourcentage donné du “plus grand” groupe. Dans notre algorithme, nous devons souvent calculer des énergies de la forme donnée par (1), et donc accéder très fréquemment au gradient à travers des arêtes qui ne peuvent être que dans un nombre limité de directions. Ainsi pour des raisons d’efficacité, nous précalculons le gradient dans chaque direction sur une grille régulière alignée dans cette direction et avec

la même résolution que le MNE. Ces grilles serviront un double objectif car elles seront également employées pour discrétiser nos lignes de découpe.

2 Découpe récursive

2.1 Hypothèses de découpe

Pour chaque direction, nous discrétiserons l’ensemble des droites de découpe possibles C_i comme les droites passant par le centre des rangées de pixels de nos grilles pour chaque direction. Ainsi l’intégrale du gradient sur une arête dans cette direction sera simplement calculée comme une simple somme sur les pixels d’une même ligne dans la grille. Comme notre empreinte initiale peut être concave, une coupe peut produire plus de 2 sous-empreintes. Dans ce cas, la même droite de découpe C_i peut produire plusieurs hypothèses de découpage, une pour chaque arête de $\mathcal{P} \cap C_i$ (voir la figure 2(a)). De plus, lorsqu’une droite de découpe passe à proximité d’un sommet concave de l’empreinte, nous séparons aussi deux hypothèses comme illustré sur la figure 2(b).

Chaque hypothèse de découpe est donc définie par les deux empreintes produites par la découpe, et leur interface I qui est une arête unique. Ce processus peut cependant produire des empreintes de formes très dégénérées ainsi que de petites empreintes qui ne sont pas adaptées à la reconstruction. Pour empêcher l’apparition de telles formes, nous imposons aux empreintes résultant de la découpe d’avoir une largeur d’au moins d sur au moins la moitié de leur longueur. Ce paramètre d indique ainsi la taille minimum attendue des sous-empreintes, et donc des détails à l’issue de la reconstruction. Ce critère est implémenté en calculant une érosion \mathcal{P}_d de l’empreinte \mathcal{P} par un segment centré de la longueur d orthogonal à la direction courante (voir la figure 3) et en ne conservant que les hypothèses de découpe pour lesquelles :

$$|I \cap \mathcal{P}_d| > |I|/2 \quad (2)$$

Ainsi, l’hypothèse présentée en haut de la figure 2(a) est rejetée car la découpe passe entièrement hors de la parcelle érodée (et vérifie donc $|I \cap \mathcal{P}_d| = 0$).

Ce critère géométrique s’est montré le plus satisfaisant dans nos expériences, et a été implémenté en utilisant les sommes de Minkowsky de la librairie CGAL [CGAL], en remplaçant le segment centré par un losange plat pour éviter les dégénérescences.

2.2 Scores de découpe

Pour chaque hypothèse de découpe, nous allons maintenant calculer l’énergie $E(\mathcal{T})$ correspondante. Pour améliorer l’estimation, nous allons prendre en compte les faits suivants :

- une arête de l’empreinte initiale correspond à une discontinuité altimétrique. Par conséquent le gradient à proximité ne doit pas être pris en considération pour l’énergie d’une nouvelle découpe. La zone significative

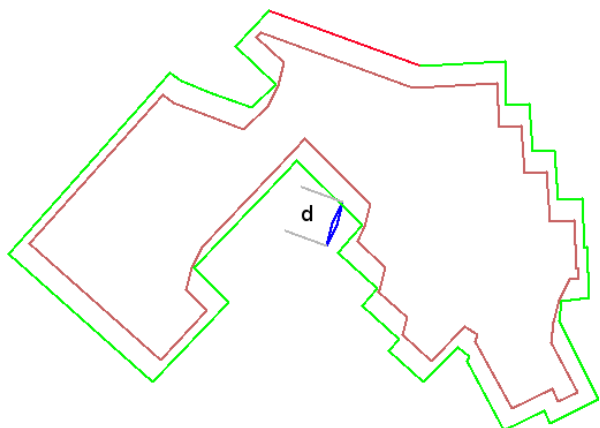


FIG. 3 – Erosion d’une empreinte (vert) par un losange aplati (bleu) de longueur d orthogonal à une direction principale (rouge).

du gradient est donc restreinte à l’érosion de l’empreinte par un segment centré. Idéalement, la longueur de ce segment devrait être égale à celle du noyau employé pour calculer le gradient. En fait, elle devrait être choisie encore plus grande car les bords de l’empreinte ne sont pas exactement ajustés aux discontinuités. En pratique, nous avons choisi la même longueur d qu’auparavant, de sorte que nous devons seulement calculer une érosion par empreinte et par direction. Nous avons choisi de calculer l’érosion avec l’arithmétique exacte de CGAL car comme nous avons parfois rencontré des erreurs en utilisant les calculs approchés. Les calculs en arithmétique exacte étant assez coûteux, le choix de prendre le même paramètre apporte un gain de temps non négligeable.

- la végétation cache la géométrie du bâtiment. Ainsi, le MNE doit être considéré comme erroné dans les zones indiquées par le masque de végétation.
- le MNE est plus imprécis dans des secteurs ombragés.

Ces trois faits sont intégrés au calcul de $E(\mathcal{T})$ en pondérant l’intégrale par un *indice de confiance* qui est nul en dehors de l’empreinte érodée ainsi que dans la végétation, et qui est proportionnel à la luminosité ailleurs.

2.3 Récursion

Pour l’empreinte initiale \mathcal{P} , nous construisons les hypothèses de découpes (Section 2.1) et calculons leurs scores (Section 2.2). Nous appliquons l’hypothèse avec le score le plus bas à l’empreinte \mathcal{P} , ce qui la sépare en deux sous-empreintes \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 . Nous appliquons ce procédé à nouveau à \mathcal{P}_1 et \mathcal{P}_2 , et ainsi de suite de façon récursive tant que le score le plus bas est négatif pour assurer que notre énergie $E(\mathcal{T})$ décroît à chaque nouvelle découpe. Si le score le plus bas est positif, on dit que l’empreinte est finale et elle ne sera plus découpée. Notre critère de forme (2) nous assure que la largeur des sous empreintes est supérieure à d dans chaque direction, et donc que la récurrence s’achève.

2.4 Résultats

Comme le montre la figure 4, l’interface de la segmentation résultant de la découpe récursive passe bien par la plupart des discontinuités altimétriques. Cependant, cette interface présente beaucoup d’arêtes non voulues car chaque découpe traverse nécessairement toute l’empreinte courante alors que les discontinuités altimétriques peuvent être beaucoup plus localisées. Pour réaliser une meilleure segmentation, et réduire encore plus notre énergie, nous devons éliminer ces arêtes superflues. Pour cela, nous fusionnerons les sous-empreintes à chaque fois que cela réduit l’énergie $E(B)$.

3 Fusion

Dans cette section, nous commençons par expliquer comment réaliser la fusion géométrique de deux empreintes, puis décrivons l’algorithme glouton que nous avons choisi pour déterminer l’ordre des fusions.

3.1 Fusion géométrique de polygones

La fusion des sous-empreintes résultant du processus de découpe peut être délicate puisque la précision numérique nous oblige à employer des seuils pour déterminer si deux arêtes se touchent. Pour rendre le processus de fusion indépendant de la précision et éviter l’utilisation de seuils numériques, nous marquons toutes les arêtes produites lors de la découpe par (un pointeur vers) la droite de découpe qui l’a produite et à laquelle elle appartient. De cette façon, la fusion géométrique est robuste et simple :

1. Pour chaque paire d’arêtes $e_k^i \in P_i$ et $e_l^j \in P_j$ appartenant à la même droite de découpe :
 - Calculer l’arête d’intersection $e_{k,l} = e_k^i \cap e_l^j$
 - Si $e_{k,l} \neq \emptyset$, ajouter $e_{k,l}$ à $I_{i,j}$.
2. Si il n’y a pas d’arête dans $I_{i,j}$, les empreintes ne se touchent pas et ne peuvent donc pas être fusionnées.
3. Si il y a plus d’une arête dans $I_{i,j}$ cela signifie que l’empreinte fusionnée a au moins un trou. Nous devons empêcher ces trous d’apparaître puisque la plupart des méthodes de reconstruction (dont celle que nous utilisons) ne gèrent pas les trous dans l’empreinte 2D. Ainsi, nous ne gardons qu’une arête dans $I_{i,j}$ (celle dont l’énergie est la plus haute).
4. Si il y a une arête dans $I_{i,j}$, construire l’empreinte fusionnée $P_{i,j}$:
 - Construire les lignes brisées C_i et C_j en supprimant e_k^i et e_l^j dans P_i et P_j .
 - Connecter les extrémités de C_i et C_j (ce n’est pas ambigu car P_i et P_j sont orientés).

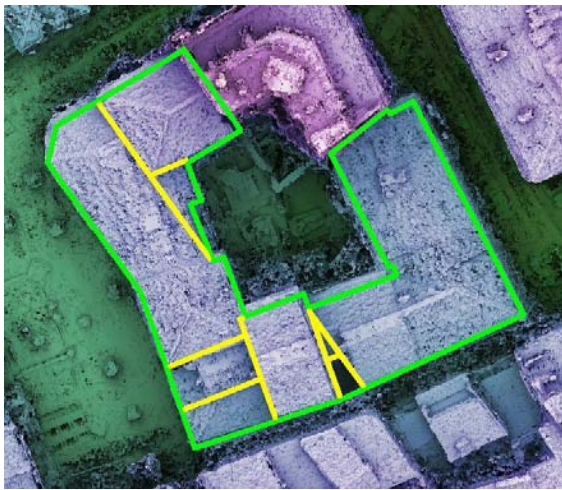
Maintenant que nous savons fusionner des empreintes, nous allons déterminer l’ordre de fusion.

3.2 Fusion gloutonne

Le but de la fusion est d’éliminer les arêtes de score positif, c’est à dire les arêtes résultant de la découpe qui ne correspondent pas à des discontinuités. Nous avons choisi



(a)



(b)

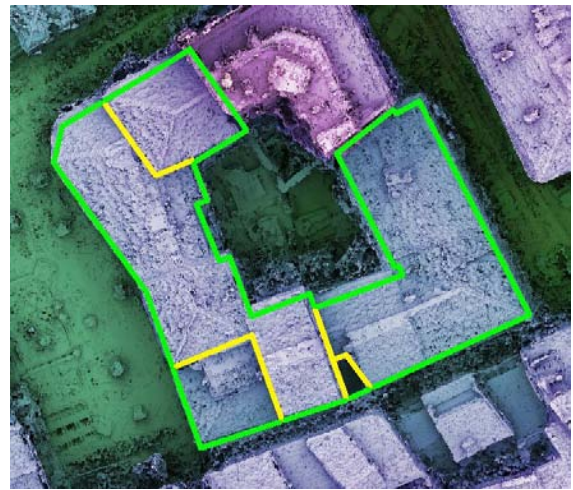


(c)

FIG. 4 – Résultats de la découpe récursive



(a)



(b)



(c)

FIG. 5 – Résultats de la fusion gloutonne

une simple approche gloutonne qui consiste à toujours appliquer la fusion de score maximal tout en gardant à jour la liste des fusions possibles :

1. Calculer toutes les fusions possibles, leurs interfaces $I_{i,j}$ et leurs scores $S_{i,j} = E(I_{i,j})$.
2. Construire une file de priorité de ces fusions, où la priorité est donnée par le score $S_{i,j}$. Un score élevé signifie qu'il est probable que l'interface éliminée par la fusion ne soit pas une discontinuité, et donc que la fusion doit être favorisée.
3. Tant que le score maximal de fusion est positif :
 - Appliquer la fusion de score maximal $S_{i,j}$ entre les empreintes P_i et P_j en remplaçant P_i et P_j par leur union $P_{i,j} = P_i \cup P_j$.
 - Supprimer toutes les fusions faisant intervenir P_i et P_j de la file de priorité.
 - Calculer toutes les fusions possibles faisant intervenir $P_{i,j}$, leurs interfaces, leurs scores, et les ajouter à la file de priorité.

L'algorithme est gloton au sens où la fusion valide de score maximal sera toujours appliquée en premier. Il est donc théoriquement possible que cet algorithme produise des résultats sous optimaux. Cependant, la fusion gloutonne a produit le résultat optimal (que l'on peut calculer par force brute) dans toutes les expériences que nous avons menées, ce qui la valide expérimentalement. Cela doit être modéré cependant par le fait que nous sommes limités à 20 sous-empreintes environ pour la force brute (le temps de calcul étant exponentiel) de sorte que l'expérience n'a pas pu être menée dans les cas les plus difficiles. Des résultats de cette approche sont présentés sur la figure 5.

4 Discussion

4.1 Résultats

En regardant les résultats de reconstruction sur des empreintes découpées par notre algorithme, on voit que ceux-ci sont bien meilleurs sur les empreintes qui contiennent des discontinuités altimétriques comme le montrent les figures 6 et 7. Notre découpe est particulièrement bien adaptée à la reconstruction parce que

- la fusion assure que le résultat est une segmentation cohérente de l'empreinte, et en particulier sans points de rebroussement.
- l'algorithme est assez général pour permettre un large éventail de formes possibles.
- la contrainte géométrique (2) empêche les formes trop dégénérées d'apparaître.
- la méthode empêche l'apparition de trous. Ceux-ci restent en effet connectés à la frontière extérieure (il y a deux exemples de ce comportement en bas de la figure 5). Ceci est requis par la plupart des méthodes de reconstruction qui se basent sur une empreinte 2D (et en particulier par celle que nous utilisons)

En termes de temps de calcul, l'algorithme est extrêmement rapide (cf Table 1). Le principal facteur d'augmenta-

Etape	(a)	(b)	(c)
Chargement données	0.27	0.4	0.27
Précalculs	0.24	0.44	0.12
Erosions	0.2	0.19	0.36
Scores	0.15	0.2	0.1
Découpes	0.23	0.17	0.15
Fusions	0.01	0.01	0.04
Total	1.1	1.41	1.04

TAB. 1 – Temps de calcul (en secondes sur un processeur Pentium 4 2.8 GHz) de différentes étapes de l'algorithme sur les exemples de la figure 5.

tion du temps de calcul sera l'augmentation de l'aire d'une boîte englobante de l'empreinte. Cela permet de traiter des très grandes zones très rapidement, ou de régler les paramètres de façon interactive. Sur notre zone de test de 1km² la découpe a pris de l'ordre de 30 minutes pour environ 2800 empreintes.

Pour une reconstruction sur des empreintes découpées par notre méthode, nous avons constaté une erreur supérieure à 1m (notre niveau de détail attendu) sur environ 20% de la surface reconstruite par rapport à une référence manuelle. C'est un net progrès par rapport à une reconstruction sur du cadastre non découpé qui présente plus de 40% d'erreur, mais encore loin de permettre une reconstruction complètement automatisée. Nous allons maintenant expliquer les limites de notre approche qui justifient cet erreur résiduelle.

4.2 Limites

Les erreurs résiduelles ont plusieurs causes :

Erreurs dans le MNE : La segmentation dépend forte-

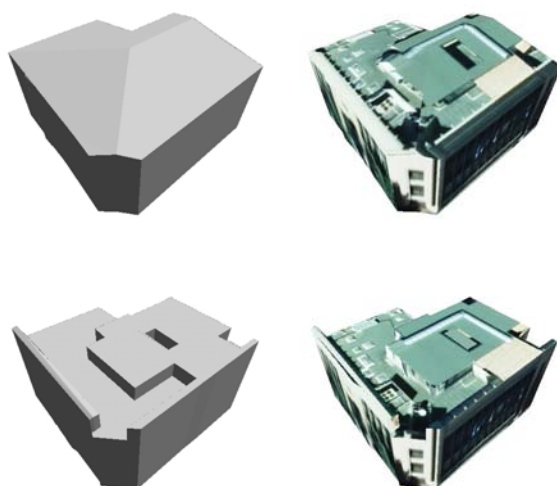


FIG. 6 – Reconstructions 3D non texturées et texturées sur l'exemple des figures 4(c) et 5(c). Haut : reconstruction sans segmentation. Bas : avec segmentation

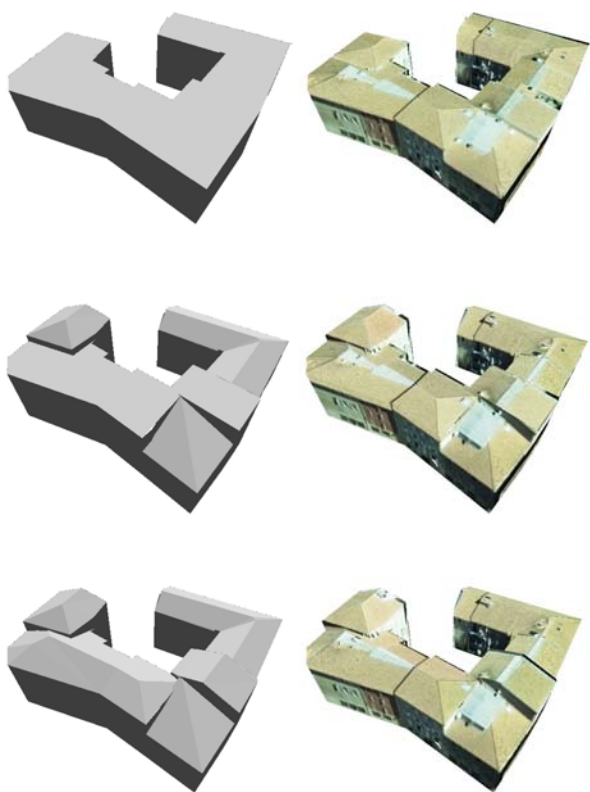


FIG. 7 – Reconstructions 3D non texturées et texturées l'exemple des figures 4(b) et 5(b). Haut : reconstruction sans segmentation. Milieu : avec segmentation. Bas : avec segmentation et une seule découpe manuelle.

ment de la qualité du MNE. Même si la méthode d'extraction de MNE que nous avons employée est proche de l'état de l'art, elle présente quelques erreurs (voir la figure 8). Celles-ci viennent principalement de la faible luminosité (ombres), de la faible texturation et des obstructions. Malheureusement, les bas des discontinuités altimétriques souffrent souvent de ces trois limitations simultanément :

1. **faible luminosité** : en moyenne la moitié des discontinuités sont orientés dos au soleil, et donc le bas de la discontinuité est dans son ombre.
2. **faible texturation** : le sol est souvent fait de matériaux uniformes à notre résolution de 10cm (bitume, béton, sable, herbe..)
3. **occultations** : le bas de la discontinuité est souvent occulté par les objets environnants, et en particulier par la discontinuité elle-même.

Ce problème est critique dans notre application où nous cherchons à détecter ces discontinuités. Une solution serait de détecter les hauts de façades par corrélation dans des plans verticaux, ou de s'aider de données laser, mais cela est hors du propos de cet article

Manque de cohérence globale : comme notre découpe se



(a) MNE et régions erronées en- (b) Orthophotographie et résultat de tourées en vert correspondant aux notre algorithme zones d'ombre

FIG. 8 – Les erreurs du MNE dans les zones d'ombre en-tretien de mauvaises découpes.

fait sans a priori sur la façon dont la surface sera reconstruite à l'intérieur de l'empreinte nous manquons parfois de cohérence globale. Ainsi, notre algorithme manquera parfois une découpe évidente à l'oeil et qui améliorerait grandement la reconstruction si elle ne correspond pas à une discontinuité du MNE. Par exemple la figure 7 montre qu'une seule petite découpe basée sur la perception globale de la structure des toits permet une amélioration significative de la reconstruction.

Erreurs d'alignement : si l'empreinte contient une discontinuité altimétrique importante qui n'est pas alignée avec une direction principale, elle va perturber la découpe en donnant un poids important à toutes les découpes qui ne lui sont pas parfaitement perpendiculaires. Nous limitons cet effet en pénalisant les mauvaises directions de gradient en le multipliant (pour une direction principale donnée) par un facteur $\max(0, \cos(2(\vec{n}, \vec{\nabla}z)))$ qui décroît de 1 pour une direction parfaite à 0 pour les angles supérieurs à $\pi/4$. Cependant, les discontinuités avec des directions proches d'une direction principale sont peu pénalisées, ce qui peut mener à dupliquer des découpes (cf figure 9).

Superstructures : elles causent des discontinuités altimétriques qui peuvent être proches ou même plus importantes que les discontinuités entre structures de toit. Elles gé-

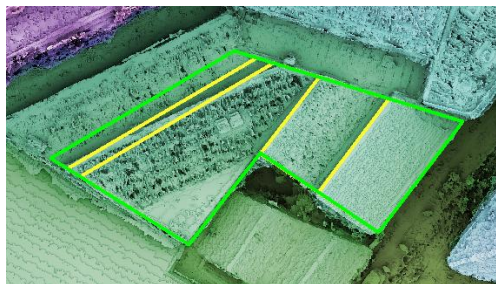


FIG. 9 – Découpe dupliquée dues à une mauvaise direction de parcelle.



(a) MNE et résultat de la découpe (b) Orthophotographie et résultat de la fusion

FIG. 10 – Segmentation perturbée par des superstructures.

nèrent donc des coupures même en réglant T_{∇} précisément (cf figure 10). Une solution possible serait d’implémenter une détection de superstructure comme celle proposée dans [Brédif et al., 2007] avant de découper.

La végétation : elle peut cacher des discontinuités importantes du bâtiment et en générer d’autres. Notre solution d’avoir une confiance nulle sur un masque de végétation aide à limiter l’impact de ces nouvelles discontinuités, mais ne permet pas de retrouver l’information manquante.

5 Conclusion

Nous avons présenté un algorithme qui permet d’améliorer une base de données d’empreintes 2D de bâtiments afin d’aider la reconstruction automatique de bâtiments en 3D. L’algorithme est simple et rapide, et il permet une amélioration sensible des reconstructions. Il reste maintenant à le tester dans un contexte de production pour valider son efficacité à large échelle.

Notre discussion montre que le principal facteur limitant la qualité de découpe est la qualité du MNE. Ainsi, nous pensons que pour atteindre l’automatisation totale du processus de reconstruction 3D de villes entières, il faudra améliorer le MNE pour mieux prendre en compte la luminosité, la texture et les occlusions, et que le couplage des données photométriques avec les données laser sera un axe de recherche important à l’avenir.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du projet Cap Digital Business Cluster TerraNumerica.

De plus, les auteurs souhaitent remercier Grégoire Maillet pour avoir partagé sa connaissance des processus de production de bâtiments en 3D, ainsi que Mélanie Durupt pour son aide précieuse sur la manipulation des données.

Références

[Brédif et al., 2007] Brédif, M., Boldo, D., Pierrot-Deseilligny, M. et Maître, H., 2007. 3D building reconstruction with parametric roof superstructures. In : Proc. of the IEEE International Conference on Image Processing.

- [Brenner, 2000] Brenner, C., 2000. Towards fully automatic generation of city models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33(B3), Commission III, pp. 85–92.
- [Deriche, 1987] Deriche, R., 1987. Using canny’s criteria to derive a recursively implemented optimal edge detector. *International Journal of Computer Vision* 1(2), pp. 167–187.
- [Dornaika et Brédif, 2008] Dornaika, F. et Brédif, M., 2008. An efficient approach to building superstructure reconstruction using digital elevation maps. In : *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 37 (Part 3A)*.
- [Durupt et Taillandier, 2006] Durupt, M. et Taillandier, F., 2006. Automatic building reconstruction from a digital elevation model and cadastral data : an operational approach. In : *Proc. of the ISPRS Commission III Symposium on Photogrammetric and Computer Vision, Bonn, Germany*.
- [Iovan et al., 2008] Iovan, C., Boldo, D. et Cord, M., 2008. Detection, characterization and modeling vegetation in urban areas from high resolution aerial imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 1(3), pp. 206–213.
- [Jibrini et al., 2000] Jibrini, H., Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N. et Maître, H., 2000. Automatic building reconstruction from very high resolution aerial stereopairs using cadastral ground plans. In : *Proc. of the XIXth ISPRS Congress, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, Amsterdam, The Netherlands*.
- [Pasko et Gruber, 1996] Pasko, M. et Gruber, M., 1996. Fusion of 2d gis data and aerial images for 3D building reconstruction. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXI, Part B 3, Vienna*.
- [Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006] Pierrot-Deseilligny, M. et Paparoditis, N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach : An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In : *Proc. of the ISPRS Conference Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites), Ankara, Turkey*.
- [Roux et Maître, 1997] Roux, M. et Maître, H., 1997. Three-dimensional description of dense urban areas using maps and aerial images. *Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, II* pp. 311–322.
- [Roy et Cox, 1998] Roy, S. et Cox, I., 1998. A maximum-flow formulation of the n-camera stereo correspondence problem. In : *Proc. of the IEEE International Conference on Computer Vision, Bombay, India, pp. 492–499*.
- [Suveg et Vosselman, 2004] Suveg, I. et Vosselman, G., 2004. Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58(3-4), pp. 202–224.
- [Taillandier, 2005] Taillandier, F., 2005. Automatic building reconstruction from cadastral maps and aerial images. In : *Proc. of the ISPRS Workshop CMRT 2005 : Object Extraction for 3D City Models, Road Databases and Traffic Monitoring, Vienna, Austria, pp. 105–110*.
- [CGAL] Computational Geometry Algorithms Library. <http://www.cgal.org>