

BENOIT FRÉDÉRICQUE

**SAISIE PHOTOGRAMMETRIQUE MULTI-  
REPRESENTATION DE BÂTIMENTS**

Une approche Semi-Automatique Initialisée et Supportée par  
l'Intervention humainE

Thèse présentée  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de doctorat en Sciences Géomatiques  
pour l'obtention du grade de Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

DÉPARTEMENT DES SCIENCES GEOMATIQUES  
FACULTÉ DE FORESTERIE ET DE GÉOMATIQUE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2008

© Benoit Frédéricque, 2008

## Résumé

Le peuplement de BDRM-3D (Bases de Données à Représentation Multiple 3D) est de plus en plus requis pour supporter des applications avancées de cartographie sur demande et d'analyse décisionnelle géospatiale. Cette thèse présente une nouvelle approche de saisie photogrammétrique en représentation multiple visant à peupler une BDRM-3D de bâtiments. L'approche proposée est nommée approche SAISIE car elle est Semi-Automatique, Initialisée et Supportée par l'Intervention humaine. Elle traite simultanément l'extraction des Géométries Détaillées (GD) et des Géométries Simplifiées (GS).

Elle s'appuie notamment sur les nouveaux concepts de Patron d'Acquisition en Représentation Multiple et d'« Instance Driven SASS » (Sélection et Gestion des Algorithmes, des Sources et des Réglages gérée au niveau de l'instance) afin d'améliorer la performance des traitements automatiques mis en œuvre. Ces deux concepts ont été introduits lors de cette recherche. Le concept de PARM résulte du rapprochement des concepts de patron géométrique (introduit pour supporter la généralisation) et de modèle paramétrique (introduit pour supporter la saisie photogrammétrique). Deux nouveaux algorithmes de reconnaissance de forme, l'un traitant de la détermination automatique des paramètres d'implantation de patrons géométriques 3D et l'autre de l'extraction automatique des emprises au sol de bâtiments, ont par ailleurs été introduits lors de la réalisation de cette thèse.

L'approche SAISIE ainsi que les concepts et algorithmes proposés pour la supporter ont été mis en œuvre et expérimentés sur quatre sites de tests couvrant plus de trois cent bâtiments. Les résultats obtenus et l'expérience acquise lors des développements des prototypes nous ont permis d'établir une analyse de l'approche SAISIE ainsi que des recommandations pour les recherches futures.

## **Abstract**

3D MRDB (Multi Representation Data Base) population is more and more required to support advanced cartographical applications and advanced geospatial decisional analysis. This dissertation presents a new photogrammetric approach dedicated to multiple representation acquisition process to populate the buildings of a 3D MRDB. The proposed approach is named SAISIE (this French acronym matches with a semi-automatic acquisition process, initialized and supported by human intervention). The SAISIE approach tackles simultaneously the Detailed Geometries (DG) extraction and the Simplified Geometries (GS) extraction. This uses both the Multi-Representation Acquisition Pattern concept and the Instance Driven SASS concept (SASS : Selection of the Algorithms, Sources and Setting) to improve the process performance. These two new concepts have been introduced during this research. The MRAP concept stems from bridging together the geometric pattern concept (used to support generalisation process) and the parametric model (used to support the photogrammetric building extraction). Two new algorithms have also been introduced. The first one deals with the automatic implantation of 3D geometric pattern and the second one with the automatic extraction of building footprints. The SAISIE approach, the new concepts and the two new algorithms, have been implemented and tested with four test sites. These test sites cover more than three hundred buildings. Results analysis and several recommendations, based on our experimentation and experience, are proposed to conclude this dissertation.

## **Avant-Propos**

Réaliser ce doctorat a été une très belle aventure qui m'a énormément apporté. Les défis ont été nombreux et le soutien de mon entourage a été ma meilleure arme pour les relever.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon épouse, Jessica, dont le soutien inconditionnel et l'aide ont été une source d'énergie constante. Je souhaite aussi remercier mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont toujours encouragé.

J'ai eu la chance de réaliser cette thèse sous la direction du docteur Sylvie Daniel. Le dynamisme et les compétences de Sylvie n'ont d'égal que sa gentillesse. Un grand merci Sylvie. J'ai énormément apprécié nos discussions, tes conseils et ta disponibilité. J'ai beaucoup appris grâce à toi... très très chanceux le thésard...

Réaliser cette thèse a été possible car deux personnes, Yvan Bédard et Rémi Jean, ont suffisamment cru en moi pour me permettre de la commencer. Je souhaite donc remercier mon co-directeur Yvan Bédard qui m'a permis d'intégrer son équipe de recherche en bases de données géodécisionnelles. Le fait de travailler avec toi Yvan et ton équipe, m'a permis d'apprendre beaucoup.

Rémi Jean m'a permis de réaliser cette thèse à incidence industrielle, en partenariat avec la société de DVP-GS dont il était directeur général. Un gros merci, Rémi, d'avoir permis que ce projet se réalise. Une discussion autour d'une bière dans une brasserie parisienne peut décidément amener loin.

Je souhaite aussi remercier le docteur Nicolas Paparoditis, dont les conseils m'ont beaucoup aidés. Nicolas est l'un des professeurs qui m'ont initié à la photogrammétrie et au traitement d'images. Tes cours ainsi que les projets dont tu me parlais lorsque j'étais sur les bancs de l'ESGT ont largement contribué à faire germer cette idée de « thèse » dans mon esprit.

Je voudrais aussi remercier le docteur Jacynthe Pouliot pour avoir effectué la prélecture de cette thèse. J'ai beaucoup apprécié le détail de tes commentaires qui m'ont permis

d'améliorer la qualité de cette thèse. Prendre du recul n'est pas toujours facile. Tes remarques m'ont beaucoup aidé.

J'ai effectué cette thèse au Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval et au sein de l'équipe de recherche et développement de DVP-GS. J'y ai côtoyé de nombreuses personnes, étudiants, professeurs et professionnels, dont l'intérêt et la sympathie m'ont fait aimer ces quatre années. Merci à vous Martin, Suzie, Marie-Jo, Eve, Rodolphe, Lise, Marie, Serge, Christian, Karine, Mélanie et à tous les autres que je ne peux énumérer tant la liste est longue.

Plusieurs d'entre vous ont par ailleurs contribué directement à cette thèse en relisant des articles, des présentations ou d'autres documents où je tentais de formaliser mes idées, parfois même dans la langue de Shakespeare. Un gros merci à Eveline, Sonia, Patrick, Philippe, Louis-Etienne et Fred.

Le prototypage m'a pris plus de 18 mois. Cette phase bien que très stimulante aurait pu être plus longue sans l'aide de Steeve, de Stéphane et de Yvan lorsque des bugs me donnaient du fil à retordre. Merci à vous trois, faire mes armes en C++ à vos cotés a été une chance pour moi.

Je voudrais aussi remercier Emmanuelle pour sa gentillesse et pour nos conversations sur le marché de la photogrammétrie. Je remercie aussi Carmen pour nos discussions sur tout et n'importe quoi et surtout pour avoir toujours sa porte ouverte pour les étudiants.

Je souhaite par ailleurs remercier le docteur Michael Chapman pour avoir accepté d'être examinateur externe sur mon jury de thèse.

*A mon épouse Jessica et à mes parents,  
Bernard et Josette, pour leur soutien  
inconditionnel*

# Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	ii
Avant-Propos.....	iii
Table des matières.....	vi
Liste des figures.....	ix
Préambule.....	1
Chapitre 1 : Introduction.....	3
1.1 Besoins émergents : des représentations cartographiques hautement personnalisables.....	3
1.2 Problématiques associées à la production de représentations cartographiques hautement personnalisables.....	7
1.3 Problématiques associées au peuplement de BDRM.....	9
1.3.1 Peuplement de BDRM par généralisation de géométries détaillées préalablement saisies.....	10
1.3.2 Peuplement de BDRM par appariement des données préalablement saisies.....	10
1.3.3 Peuplement de BDRM par saisie en représentation multiple.....	11
1.3.4 Peuplement de BDRM : synopsis.....	12
1.4 Problématique de la recherche.....	12
1.5 Hypothèse et objectifs de la recherche.....	13
1.6 Méthodologie.....	14
1.7 Synopsis du chapitre 1.....	21
Chapitre 2 : État de l'art.....	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Extraction des géométries détaillées des bâtiments et automatisation.....	22
2.2.1 Introduction.....	22
2.2.2 <i>Saisie photogrammétrique manuelle de bâtiments</i> .....	23
2.2.3 Sources de données utilisées.....	24
2.2.4 Niveau d'automatisation.....	26
2.2.5 Connaissance a priori et saisie de la géométrie.....	27
2.2.6 Automatisation de l'extraction des géométries détaillées des bâtiments : synopsis.....	29
2.3 Acquisition en Représentation Multiple : spécifications et outils.....	29
2.3.1 Introduction.....	29
2.3.2 Spécifications.....	29
2.3.3 Concept de Patron Géométrique et de Patron Multi-Échelles.....	30
2.3.4 Les Objets Auto Généralisant.....	33
2.3.5 Saisie en représentation multiple : synopsis.....	36
2.4 État de l'art : synopsis.....	37
Chapitre 3 : Notre approche de saisie photogrammétrique en RM : <i>Une approche SAISIE</i> .....	38
3.1 Introduction.....	38
3.2 Hypothèse.....	38
3.3 Réduction de l'implication de l'opérateur humain.....	40

3.3.1	Extraction simultanée des géométries détaillées (GD) et des géométries simplifiées (GS) : <i>Intégration des concepts de patron multi-échelles et de modèles paramétriques.</i> .....	40
3.3.2	Connaissances a priori et gestion contextuelle des traitements .....	44
3.3.3	Solliciter l'opérateur pour des tâches simples et rapides d'exécution .....	45
3.4	Architecture du système de saisie photogrammétrique 3D en RM de bâtiments .....	46
3.4.1	La couche DONNÉES .....	48
3.4.2	La couche RAISONNEMENT .....	48
3.4.3	La couche TRAITEMENT .....	49
3.5	Prototype manuel : <i>faisabilité de la saisie photogrammétrique en RM</i> .....	49
3.6	Synopsis .....	54
Chapitre 4 : Mise en œuvre de l'approche SAISIE .....		55
4.1	Introduction .....	55
4.2	Précision sur le vocabulaire utilisé .....	57
4.3	Vers une réduction du rôle de l'opérateur humain : <i>Restriction dans la mise en œuvre de l'approche SAISIE</i> .....	60
4.3.1	<i>Contexte exploré du point de vue de la couche « DONNÉES » : données sources</i> .....	60
4.3.2	<i>Contexte exploré du point de vue de la couche « DONNÉES » : connaissances a priori</i> .....	62
4.3.3	<i>Contexte exploré du point de vue de la couche « RAISONNEMENT »</i> .....	62
4.3.4	<i>Contexte exploré du point de vue de la couche « TRAITEMENT »</i> .....	64
4.4	Saisie semi-automatique en RM à l'aide de PARM orthogonaux .....	65
4.4.1	Stratégie dans la détermination automatique des paramètres d'implantation des PARM orthogonaux .....	65
4.4.2	Expression de la région d'intérêt sous la forme d'une combinaison de rectangles .....	71
4.4.3	Sélections des rectangles optimums pour définir l'ébauche d'emprise .....	76
4.4.4	Extrusion et segmentation .....	77
4.5	Exploitation de connaissances additionnelles .....	85
4.6	Investigation dans des contextes où les PARM ne sont pas orthogonaux ou pas applicables .....	87
4.6.1	Objectifs et principe de fonctionnement .....	87
4.6.2	Principe de la décomposition en rectangles .....	88
4.6.3	Sélection de la meilleure sous-combinaison de rectangles .....	88
4.7	Mise en œuvre de l'approche SAISIE : synopsis .....	90
Chapitre 5 : Résultats et Analyse .....		91
5.1	Introduction .....	91
5.2	Expérimentation des traitements automatiques prototypés .....	91
5.2.1	Sites de test .....	91
5.2.2	Résultats .....	92
5.3	Analyse des résultats et des processus prototypés .....	99
5.3.1	Pertinence des résultats par rapport aux objectifs visés .....	99
5.3.2	Saisie photogrammétrique en RM : point de vue utilisateur .....	99
5.3.3	Performances de la saisie photogrammétrique en RM lorsque les PARM sont pertinents et orthogonaux .....	100



5.3.4	Performance des traitements mis en place pour les cas où les PARM ne sont pas pertinents .....	102
5.3.5	Approche SAISIE et résultats expérimentaux .....	103
Chapitre 6 : Recommandations et Conclusion.....		106
6.1	Recommandations.....	106
6.1.1	Amélioration de la couche « DONNÉES » .....	106
6.1.2	Amélioration de la couche « RAISONNEMENT ».....	107
6.1.3	Amélioration de la couche « TRAITEMENT ».....	109
6.1.4	Utilisation optimale du système de saisie en RM .....	113
6.2	Conclusion .....	115
Bibliographie .....		117
Annexe 1 : Extraction de MNS par recherche de coupe minimale dans un graphe .....		132
Annexe 2 : Extraction de plans selon une approche RANSAC .....		135
Annexe 3 : Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une Base de Données à Représentations Multiples : Vers une approche intégrée.....		138
Annexe 4 : Populating a building Multi Representation Data Base with photogrammetric tools: recent progress. ....		173

# Liste des figures

Figure 1 : Carte combinant différents niveaux de détails utilisée lors du festival d'été de Québec.....	5
Figure 2 : Illustration des trois techniques de peuplement de BDRM.....	10
Figure 3 : Diagramme d'activité UML décrivant la méthodologie de la thèse .....	19
Figure 4 : Exemple de Modèle Paramétrique (XoYoZo : coordonnées du point d'implantation, L : longueur, W : largeur, H1 : hauteur des murs, H2 : hauteur de l'axe de toit).....	28
Figure 5 : Patron géométrique complexe proposé dans Cardenas (2004) pour définir des échangeurs routiers .....	31
Figure 6 : Saisie à l'aide du patron multi-échelles proposé par Cardenas (2004) dans le cas des échangeurs routiers.....	32
Figure 7 : Unique patron géométrique initial proposé par Sabo dans le cas des bâtiments..	35
Figure 8 : Diagramme de classes UML définissant le concept de patron géométrique; extrait de Sabo (2007).....	36
Figure 9 : Diagramme d'activité UML décrivant les étapes du processus de saisie en représentation multiple proposé.....	40
Figure 10 : <i>Différents types de primitives volumétriques élémentaires : a) toit plat, b) toit à 1 pan, c) toit à 2 pans, d) toit à 4 pans</i> .....	42
Figure 11 : <i>Diagramme de classe de patron géométrique 2D/3D</i> .....	43
Figure 12 : Architecture du système proposé .....	47
Figure 13 : Exemple de PARM identifiés pour faciliter la saisie en représentation multiple .....	50
Figure 14 : Exemple de points à mesurer pour définir un PARM.....	51
Figure 15 : Exemple de saisie, extrait d'une des images sources.....	52
Figure 16 : Exemple de saisie, représentations détaillées.....	53
Figure 17 : Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 1.....	53
Figure 18 : Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 2.....	53
Figure 19 : Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 3.....	54
Figure 20 : <i>Exemple de région d'intérêt incluant un bâtiment et un arbre</i> .....	57
Figure 21 : <i>Illustration du vocabulaire utilisé dans le cas de l'exemple référence</i> .....	59
Figure 22 : <i>Exemple de MNS obtenu en combinant appariement photométrique et recherche de surface optimale. a) MNS b) image source</i> .....	61
Figure 23 : Capture d'écran du prototype de saisie semi-automatique en RM .....	63
Figure 24 : Exemple de bâtiment extrait sur le site de Charlesbourg, de PARM orthogonal et de données extraites. a) image source b) MNS normalisé c) Région d'Intérêt d) PARM correspondant .....	68
Figure 25 : Processus de détermination des paramètres d'un PARM.....	70
Figure 26 : Extraction d'une description de la région d'intérêt sous la forme d'un graphe de rectangles .....	73
Figure 27 : Génération d'un rectangle à partir d'un axe approché .....	75
Figure 28 : Processus d'extraction et de sélection de rectangles dans le cas de bâtiment en forme de T.....	77
Figure 29 : Exemple d'extraction de faces .....	80

Figure 30 : Extrusion et segmentation d'une primitive volumétrique à un pan, extrait du site de Beauport. a) image source b) MNS c) région d'intérêt et rectangle initial d) rectangle après segmentation .....	81
Figure 31 : Extrusion d'une primitive volumétrique à deux pans .....	82
Figure 32 : Exemple de 7 primitives contiguës .....	83
Figure 33 : Segmentation basée sur une approche contours. a) face horizontale initiale b-c) arêtes 3D candidates d) face après segmentation.....	83
Figure 34 : Fonction de simplification de graphes de rectangles .....	89
Figure 35 : Exemple de résultats obtenus automatiquement. a) extraction réussie b) échec dans l'extraction de l'orientation du bâtiment. ....	93
Figure 36 : Exemple de résultats obtenus avec le prototype de saisie semi-automatique. a) et b) niveaux abstraits, c) niveau détaillé, d) image source.....	95
Figure 37 : Exemple de personnalisation de la visualisation au niveau de l'instance. a) tous les bâtiments sont simplifiés b) et c) l'exemple référence est plus détaillé que les autres bâtiments d) tous les bâtiments sont détaillés. ....	95
Figure 38 : Extraits d'images sources sur le site d'Amiens.....	97
Figure 39 : Emprises au sol extraites sur quatre groupes de bâtiments de l'agglomération d'Amiens.....	98
Figure 40 : Cube de recherche de surface optimale, figure extraite et adaptée de (Roy et Cox 1998) .....	132

## Préambule

Cette thèse est composée de six chapitres. Le premier chapitre analyse le contexte et la problématique de cette recherche et présente les objectifs de recherche ainsi que la méthodologie suivie. Le deuxième chapitre propose une analyse des travaux existants. Le troisième chapitre présente l'approche théorique, appelée approche *SAISIE*, de saisie photogrammétrique en représentation multiple qui a été introduite dans cette recherche. Le quatrième chapitre présente notre mise en œuvre de l'approche *SAISIE*. La mise en œuvre de l'approche *SAISIE* nous a amenés à proposer de nouveaux algorithmes d'extraction d'emprises au sol et d'extraction de bâtiments. Ceux-ci sont également présentés en détail dans le chapitre 4. Le cinquième chapitre présente les résultats obtenus ainsi qu'une analyse de ceux-ci. Le dernier chapitre conclut cette thèse, propose une analyse rétrospective de l'approche *SAISIE* et établit des recommandations.

Cette thèse est une thèse par articles car certains chapitres sont composés d'extraits de deux articles soumis à des revues à comités de lecture. Le premier article a été accepté pour publication dans la Revue Internationale de Géomatique et correspond à la référence ci-après :

Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Paparoditis, N. 2007a. Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une base de données à représentations multiples – vers une approche intégré. Revue Internationale de Géomatique. In press.

Le deuxième article a été soumis au « Journal of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing », il correspond à la référence suivante :

Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Paparoditis, N. 2007a. Populating a building Multi Representation Data Base with photogrammetric tools: principles, implementation and results. Article soumis

Ces articles ont été amputés de certaines parties lors de leur intégration dans la thèse afin de réduire les redondances et les chevauchements entre les chapitres. Ils ont par ailleurs parfois été complétés de paragraphes (en italique dans les chapitres 2, 3 et 4) par souci de

clarté et certaines phrases ont été reformulées. Les articles originaux sont néanmoins disponibles en annexe de la thèse.

# Chapitre 1 : Introduction

Ce chapitre est un extrait enrichi de Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Paparoditis, N. 2007a. Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une base de données à représentations multiples – vers une approche intégrée. Revue Internationale de Géomatique. Accepté pour publication.

Ce chapitre vise à positionner le sujet de cette thèse. Dans un premier temps, les besoins émergents en cartographie à la demande sont présentés et illustrés avec des exemples concrets. Les problématiques associées à la production de carte sur demande sont ensuite présentées, d'abord selon une stratégie reposant sur de la généralisation automatique à la volée puis selon une stratégie exploitant des **Bases de Données à Représentations Multiples**. La nécessité de peupler des BDRM est ainsi introduite pour supporter les applications émergentes de cartographie sur demande. La problématique de cette thèse, liée au peuplement de BDRM par saisie photogrammétrique, est ensuite explicitée ainsi que ses principales hypothèses et ses objectifs. La méthodologie suivie et les étapes qui la constituent sont par ailleurs présentées.

## 1.1 Besoins émergents : des représentations cartographiques hautement personnalisables

Le développement des technologies de l'information (i.e. technologies de traitement et de diffusion de l'information : matériel informatique/électronique, réseaux de transmission et applications logicielles) au cours des deux dernières décennies a révolutionné l'accessibilité et l'utilisation des données géographiques tant au niveau des domaines d'utilisation que des types de données géographiques utilisées.

D'une part, l'exploitation d'outils géomatiques (ex : systèmes de positionnement GPS, imagerie satellitaire) dépasse aujourd'hui le cadre de la simple production cartographique et touche désormais de nombreux domaines tels que l'urbanisme, l'environnement ou encore le géomarketing. L'arrivée d'Internet, la démocratisation des ordinateurs personnels et le développement d'applications géomatiques dédiées au grand public a permis de démocratiser l'accès à l'information géographique en amenant la cartographie dynamique

(ex : MapQuest), l'imagerie aérienne et satellitaire (ex. GoogleEarth, DVP-web), la modélisation urbaine 3D<sup>1</sup> (ex : GoogleEarth, VirtualEarth) et les bases de données géographiques (ex : utilisation de bases de données de biens immobiliers couplées à GoogleEarth, [www.remax-quebec.com](http://www.remax-quebec.com)) dans les foyers en quelques clics. Le caractère spatial de l'information (80% des systèmes d'information ont une référence spatiale) (Franklin 1992) est de plus en plus pris en compte (Bédard et al. 2006). Ceci se traduit par des besoins plus importants en bases de données géographiques et en outils d'analyse et de visualisation de ces données.

D'autre part, les données géographiques tendent de plus en plus à incorporer la troisième dimension à part entière. Ceci tient du fait que certaines analyses nécessitent une prise en compte des élévations, hauteurs et formes complètes (ex : études d'impact visuel, études phoniques, géologie, hydrogéologie...) et du fait que les représentations 3D de l'espace sont souvent plus faciles à interpréter par les non experts. Si on se réfère par exemple à la célèbre application GoogleEarth, de nombreuses modélisations 3D sont proposées. De plus, Google met à la disposition de ses usagers des outils de saisie en 3D (Google Sketchup3D) pour saisir des bâtiments. La Figure 1 est un autre exemple où les représentations des bâtiments les plus significatifs sont proposées en 3D pour faciliter la compréhension de la carte.

Toutefois, si cette tendance est marquée dans la communauté scientifique de la géomatique (CVSD 2004-2008; Larrivée et al. 2006; Saux et Billen 2006), les données disponibles aujourd'hui auprès des fournisseurs de données (ex : agences nationales) sont majoritairement 2D. En effet, l'information extraite lors de la saisie initiale est généralement 2D. Par exemple, dans le cas des bâtiments, l'information présente dans les bases de données géographiques nationales se limite généralement aux contours des toits. Les géométries extraites ne définissent donc pas des volumes et sont 2D.

---

<sup>1</sup> La notion de 3D est souvent ambiguë dans la littérature. Dans cet article nous nous référons aux dénominations proposées dans (Larrivée, Bédard et al. 2006) et distinguerons les dimensions de l'univers dans lequel est positionné l'objet des dimensions liées à sa forme. Nous considérons un objet comme 3D si celui-ci est volumétrique et nécessite donc trois axes pour être défini.



**Figure 1 :** Carte combinant différents niveaux de détails utilisée lors du festival d'été de Québec.

La qualité fondamentale d'une application de cartographie dynamique est liée à sa capacité à répondre à des intérêts de cartographie variés, évolutifs et pas toujours bien définis à l'avance. En d'autres termes, les applications de cartographie dynamique doivent pouvoir s'adapter facilement aux besoins des utilisateurs. Les spécificités de ces besoins peuvent porter sur les échelles de travail mais aussi sur les objets devant être visualisés et sur les modes de représentations utilisés (ex: 2D vs. 3D). Compte tenu de la variété des utilisateurs et des contextes d'utilisation, il est particulièrement difficile voire impossible d'anticiper tous ces besoins et donc de créer a priori une carte pour chacun d'entre eux. Les solutions de cartographie en ligne actuelles permettent d'accéder à des cartes préétablies à des échelles spécifiques, définies selon des spécifications génériques qui ne peuvent généralement pas être modifiées par l'utilisateur. Les fonctionnalités offertes aux utilisateurs se limitent alors à des fonctionnalités de navigation d'une région d'intérêt à une autre, d'une échelle à une autre et d'ajout ou de suppression des thèmes à afficher (ex : [www.mapquest.com](http://www.mapquest.com), [www.pagesjaunes.ca](http://www.pagesjaunes.ca) ). Ces degrés de liberté peuvent s'avérer insuffisants si l'on souhaite personnaliser l'information géographique proposée en fonction de la demande de l'utilisateur ou du support qu'il utilise. On parle alors de « cartes à la demande ». Par exemple, la taille des écrans disponibles sur les téléphones cellulaires est particulièrement restreinte. Utiliser de tels supports pour visualiser des informations



cartographiques nécessite que le contenu des cartes soit réduit au maximum et donc parfaitement adapté aux besoins des utilisateurs.

Pour améliorer cette réponse aux besoins actuels et émergents, certains travaux suggèrent d'être en mesure d'adapter la création de cartes en temps réel en permettant de personnaliser son contenu en influant sur le choix des représentations (niveau d'abstraction, sémiologie) au niveau de l'instance (Bernier et al. 2003 ; Bernier et al. 2005). Selon ce principe, il devient alors possible de sélectionner les objets géographiques à afficher en fonction des besoins de l'utilisateur. Un utilisateur pourrait ainsi restreindre les informations présentes au réseau routier et aux bâtiments les plus importants pour lui, les cinémas ou encore les restaurants. Dans le même ordre d'idée, un usager qui cherche à définir son itinéraire pourrait souhaiter avoir une description plus détaillée du bâtiment où il doit se rendre et des éléments constituant des repères visuels facilement identifiables sur son trajet.

La Figure 1, qui est une carte réalisée pour le festival d'été de Québec, est un exemple de carte très simplifiée où seuls certains bâtiments sont représentés. Les scènes du festival d'été de Québec sont localisées ainsi que les Caisses Populaires Desjardins, commanditaire de l'événement. Par chance, cette carte correspond à un besoin identifié a priori, commun pour un grand nombre d'utilisateurs, et a pu être réalisée par un expert. Dans le cas d'une carte visualisée sur un téléphone cellulaire, ou plus simplement d'une carte requise par un utilisateur quelconque pour un besoin spécifique, il devient beaucoup plus difficile d'anticiper les besoins de chaque usager. La production en temps réel de cartes paramétrables au niveau de l'instance permettrait de répondre à ce type de besoins pour un éventail plus large d'utilisateurs et d'utilisations.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'outils avancés d'analyse décisionnelle peut aussi requérir de modifier en temps réel des représentations cartographiques au niveau de l'instance afin d'aider l'utilisateur dans son analyse. En effet, dans le cas d'outils d'analyse spatiale en ligne (Spatial On-Line Analytical Processing, SOLAP) (Bédard et al. 2006) on souhaite d'une part adapter en temps réel la représentation cartographique en fonction des requêtes de l'utilisateur et d'autre part permettre à l'utilisateur d'interagir avec les éléments représentés sur la carte en lui permettant de passer d'un niveau de détail à un autre pour une

occurrence donnée (opérations de forage). Pour de telles applications dites analytiques, il est nécessaire de gérer explicitement les différentes géométries au niveau des instances. Le fait de pouvoir personnaliser le contenu de la représentation cartographique contextuellement est d'autant plus important que les représentations cartographiques permettent de supporter le processus de fouille et de découverte de données effectués par l'analyste. On peut ainsi lui permettre de personnaliser le contenu des cartes au fur et à mesure que son analyse évolue, que ses idées cheminent et qu'ainsi ses besoins changent.

La création de « cartes à la demande » en temps réel, en permettant d'en personnaliser le contenu en influant sur le choix des représentations au niveau de l'instance, est donc un enjeu pour les applications de cartographie dynamique mais aussi pour les applications d'analyse décisionnelle.

## **1.2 Problématiques associées à la production de représentations cartographiques hautement personnalisables**

La création de « cartes à la demande » en temps réel, en permettant d'en personnaliser le contenu en influant sur le choix des représentations au niveau de l'instance requiert de **fournir à la demande des représentations géométriques d'objets géographiques à différents niveaux d'abstraction**. Une approche envisageable, et largement explorée en recherche, consiste à **se doter de représentations détaillées et d'être en mesure de les généraliser automatiquement en temps réel**. Cette stratégie pose deux problèmes abordés généralement indépendamment et successivement : (1) la production des géométries détaillées et (2) la généralisation automatique en temps réel.

L'obtention de géométries détaillées (GD) se fait généralement par procédés photogrammétriques pour des considérations de coût et de faisabilité. L'exploitation de plusieurs images décrivant une même scène sous différents points de vue permet en effet d'extraire des informations 3D géolocalisées. L'automatisation de ces processus a motivé de nombreux travaux de recherche afin de réduire l'implication de l'opérateur humain (source de surcoût) dans les traitements. C'est un axe de recherche toujours actif aujourd'hui (Baltsavias 2004 ; Mayer 2005). Selon Brenner (2003), lors de la production de données vectorielles relatives aux bâtiments, la saisie manuelle des géométries des

bâtiments représente 45% des coûts totaux de production incluant les coûts d'acquisitions aériennes des images, les processus de contrôle qualité et les post-traitements (ex : développement, aérotriangulation, archivage). L'automatisation, même partielle des processus de saisie des géométries des bâtiments est donc un enjeu important pour réduire les coûts de production des données géographiques. Une part importante de la recherche effectuée durant cette thèse porte sur la semi-automatisation de l'extraction des géométries de bâtiments à partir d'images aériennes. Les processus manuels actuels de saisie photogrammétrique, les enjeux associés et les travaux relatifs seront introduits dans le chapitre 2.

La généralisation automatique en temps réel a aussi motivé de nombreux travaux de recherche. Comme cela avait déjà été mentionné par Cecconi et al. (2002) et Ruas (2002), il n'existe aujourd'hui aucune solution qui permette une généralisation automatique complète en temps réel. Ainsi, produire des cartes à la demande en se dotant de géométries détaillées et en les généralisant en temps réel est impossible aujourd'hui.

Afin de contourner ce problème plusieurs chercheurs ont proposé d'utiliser des **Bases de Données à Représentations Multiples (BDRM)** (Weibel et Dutton 1999; Cecconi et al. 2002, Bédard 2004; Mackaness et al. 2007; Bernier et Bédard 2007). Une BDRM est une base de données dans laquelle plusieurs représentations d'un même objet géographique, tel qu'un bâtiment ou un lac, sont stockées comme différents objets et sont liées les unes aux autres. Cette définition est une traduction libre de celle proposée par Sarjakoski (2007). Les opérations de généralisation sont alors remplacées par une sélection dans la BDRM de la représentation correspondant au niveau d'abstraction requis.

L'exploitation de BDRM, combinée à l'utilisation efficace de liens explicites entre les différentes géométries d'un même objet géographique, permet alors d'offrir un niveau de personnalisation et de navigation « en temps réel » au niveau de l'instance. (ex : prototype UmapIt) (Bernier et al. 2005). Toutefois, l'utilisation de BDRM, tel que définie précédemment ne permet pas de fournir des représentations géométriques pour des niveaux d'abstraction quelconques, mais uniquement pour les niveaux prédéfinis dans la BDRM.

### 1.3 Problématiques associées au peuplement de BDRM

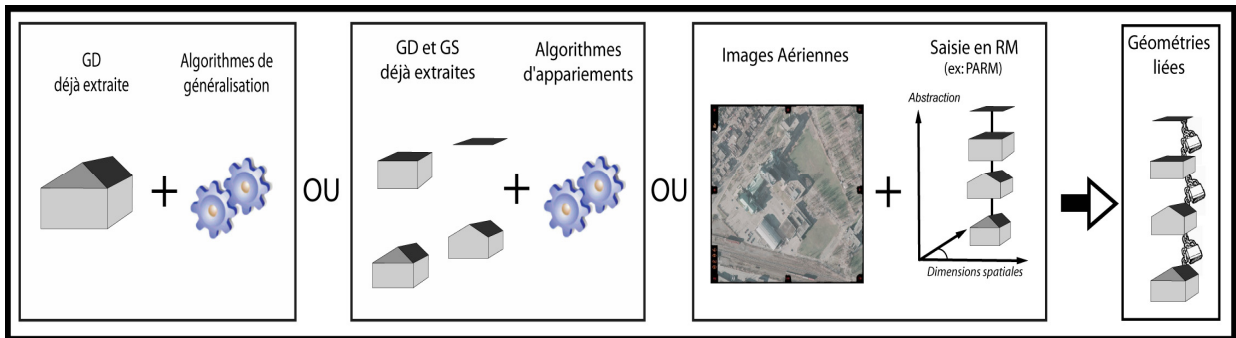
L'utilisation de BDRM permet donc de contourner certaines difficultés liées à la généralisation « temps réel » mais implique d'autres difficultés concernant leur peuplement préalable. En effet, les géométries des différents niveaux d'abstraction doivent être générées et liées.

Il existe trois moyens de peupler une BDRM en liant les géométries de mêmes objets géographiques. Ces trois moyens sont :

- (1) la saisie des géométries détaillées et la généralisation de celles-ci en conservant le lien entre la géométrie détaillée et les géométries généralisées,
- (2) la saisie des données à différentes échelles et l'appariement géométrique et sémantique de celles-ci, ce qui construit le lien entre les représentations à différentes échelles de la même occurrence d'objet,
- (3) la saisie à la source en représentation multiple en saisissant et liant simultanément les différentes géométries (ex. numérisation 2D RM de carte papier, photogrammétrie 3D à RM).

La composante saisie est donc présente dans ces trois approches. Tel que mentionné précédemment les processus actuels de saisie et les travaux relatifs seront introduits dans le chapitre 2.

Les deux premières méthodes demandent beaucoup d'assistance humaine malgré de nombreux efforts de recherche. La troisième méthode, l'acquisition en représentation multiple, a été introduite plus récemment par notre équipe de travail et est à l'origine de cette recherche. La Figure 2 illustre ces trois approches, celles-ci sont par ailleurs présentées ci-après.



**Figure 2 :** Illustration des trois techniques de peuplement de BDRM

### 1.3.1 Peuplement de BDRM par généralisation de géométries détaillées préalablement saisies

L'obtention des représentations multiples par saisie des géométries détaillées et par généralisation automatique de celles-ci (pour obtenir les géométries simplifiées) serait la solution idéale dans la mesure où les conditions requises pour la mettre en œuvre se limiteraient à l'obtention du jeu de données détaillées et qu'elle permettrait de créer automatiquement les liens entre les différents niveaux de détails. La problématique de la saisie serait alors limitée au niveau le plus détaillé. Malheureusement malgré de nombreux travaux et des progrès importants, il n'existe pas aujourd'hui de solution totalement automatisée pour effectuer la généralisation et ce même dans des contextes autre que « temps-réel » (Cecconi et al. 2002; Ruas 2002, Sabo et al. 2005). La généralisation est un processus qui implique aujourd'hui l'opérateur humain dans une large proportion, ce qui implique des problèmes de coûts.

### 1.3.2 Peuplement de BDRM par appariement des données préalablement saisies

L'appariement automatique de données géométriques et sémantiques a motivé de nombreux travaux de recherche (Badard et Lemarié 2002 ; Bernier et Bédard 2007 ; Olteanu et al. 2006), notamment du fait de l'existence de nombreuses bases de données nationales (ex : BNDT au 1/50 000 et BDTQ au 1/20 000 pour la Province de Québec). Les problématiques associées sont nombreuses. L'appariement de données produites par des producteurs de données différents selon des spécifications et des ontologies différentes implique de devoir comparer des données de différents types géométriques (points, lignes

simples, polylignes ...) correspondant à des critères de sélection différents (ex. taille du plus petit élément à saisir, largeur minimale, intermittent/continu) et répondant à des appellations différentes (ex : routes principales vs routes nationales). De plus, ces sources ne sont que rarement à jour de façon synchronisée. Le lecteur pourra se référer à Bernier et Bédard (2007) où la problématique de la constitution de l'entrepôt de données utilisé dans le cadre du projet GEMURE (GEMURE 2002-2005) est décrite dans le détail et illustre parfaitement les difficultés associées au peuplement de BDRM par appariement géométrique et sémantique de différentes sources de données. De plus, la condition préalable de disposer des différentes sources peut constituer un problème de coût ou de faisabilité. Le peuplement de BDRM par intégration de données requiert donc aussi l'intervention d'opérateurs humains dans une large proportion.

### **1.3.3 Peuplement de BDRM par saisie en représentation multiple**

La saisie en représentation multiple a été proposée comme troisième approche de peuplement de BDRM (Cardenas 2004). La saisie en représentation multiple vise à extraire les géométries et à les lier durant un unique processus. Cette approche a été proposée dans Cardenas (2004) afin de produire des données géométriques 2D. Le processus proposé repose sur l'exploitation de Géométries Détaillées (GD) déjà extraites auxquelles on associe a posteriori des patrons multi-échelles. L'exploitation d'autres données de référence 2D (ex : cartes scannées, orthophotographies) pour les cas où des GD ne sont pas disponibles a aussi été proposée. Le concept de patron multi-échelle a été introduit par Cardenas (2004) afin de supprimer certaines tâches lors de la saisie en représentation multiple. Ce concept est présenté dans le chapitre 2.

Tel que mentionné précédemment les BDRM ne permettent pas de fournir des représentations géométriques pour des niveaux d'abstraction quelconques mais uniquement pour les niveaux prédéfinis dans la BDRM. Le concept d'objet auto-généralisant (Self Generalizable Object)(Sabo 2007) a été introduit notamment pour dépasser ces limitations. Les SGO regroupent, au sein de même objet, des patrons géométriques, des algorithmes et des contraintes de généralisation. Contrairement aux patrons multi-échelles, les SGO permettent de définir les géométries des objets géographiques auxquels ils sont associés

pour des niveaux d'abstraction quelconques. Les SGO sont alors créés durant un processus de saisie en représentation multiple. Le concept de SGO a été introduit et développé par un autre étudiant au doctorat de notre équipe de recherche, Nouri Mamane Sabo, dont la thèse a été réalisée parallèlement à celle-ci. Ce concept est présenté dans le chapitre 2.

### 1.3.4 Peuplement de BDRM : synopsis

Le peuplement de BDRM, phase nécessaire pour être en mesure de supporter des applications avancées de cartographie à la demande et d'analyse en ligne de données géographiques, implique donc dans une large proportion l'intervention d'opérateurs humains pour l'obtention des géométries détaillées et simplifiées. La réduction de l'importance du rôle de l'opérateur humain dans le peuplement de BDRM en général et plus particulièrement de BDRM3D (répondant à un éventail plus large d'applications : cf. paragraphe 1.1) est un enjeu majeur émanant des applications les plus récentes exploitant la cartographie. Parmi les trois méthodes de peuplement de BDRM (saisie et généralisation des géométries détaillées, saisie préalable des géométries détaillées et simplifiées suivie de leur appariement et saisie en RM), les deux premières demandent beaucoup d'assistance humaine et ne sont pas totalement automatisables aujourd'hui. La troisième méthode, l'acquisition en représentation multiple, a été introduite par notre équipe de travail et est à l'origine de cette recherche. Plusieurs concepts ont été introduits pour faciliter sa mise en œuvre dans un contexte 2D (patron géométrique, patron multi-échelle, SGO). Elle est applicable durant la saisie photogrammétrique 3D mais n'a jamais été mise en œuvre dans un tel contexte et a bénéficié de peu de travaux visant à l'automatiser.

## 1.4 Problématique de la recherche

Cette thèse constitue une contribution visant à mieux définir la portée de l'approche de peuplement de BDRM par saisie en RM. Elle fait partie d'une action de recherche menée sur la production de cartes à la demande à partir de données saisies en représentation multiple.

Cette thèse porte essentiellement sur **la mise en œuvre et l'automatisation de la saisie en RM à l'aide de patrons géométriques 3D et 2D par procédés photogrammétriques.**

Les travaux menés au sein de notre groupe de recherche par Nouri Mamane Sabo portent principalement sur la production de cartes à la demande à partir de SGO. Les SGO de Sabo sont obtenus par un processus de saisie en RM **totale**ment **manuel** exploitant des patrons géométriques **2D**.

L'intérêt de l'approche par saisie en Représentation Multiple est étroitement lié à sa capacité à être automatisée compte tenu de l'objectif visé : réduire les interventions humaines dans le peuplement de BDRM3D.

Automatiser, au moins en partie, le processus de saisie photogrammétrique 3D en RM est donc un enjeu majeur dans le développement de ce troisième type de technique de peuplement de BDRM3D. Le cas des bâtiments est particulièrement important car ces derniers font partie des principales classes d'objets devant être cartographiées pour des analyses touchant les milieux urbains (ex : études d'impacts en urbanisme, modélisation de la propagation des ondes en télécommunication). De plus, la présence de bâtiments peut varier avec une fréquence élevée, notamment par rapport au terrain, du fait de leurs origines liées à des interventions humaines. Une question en découle et correspond à **la problématique traitée par cette thèse** :

**Comment mettre en œuvre le peuplement de BDRM3D de bâtiments par saisie photogrammétrique dans une perspective d'automatisation?**

## **1.5 Hypothèse et objectifs de la recherche**

L'hypothèse principale de cette thèse est qu'une approche de saisie **Semi-Automatique et Initialisée et Supportée par l'Intervention humaine** (une approche SAISIE) peut d'une part permettre de peupler des BDRM3D de bâtiments et d'autre part permettre d'atteindre un niveau d'automatisation supérieur à une saisie manuelle en RM (i.e. une réduction substantielle du niveau d'intervention de l'opérateur humain).

Afin de démontrer cette hypothèse, l'objectif principal de cette thèse est de proposer un cadre théorique correspondant à l'approche SAISIE et d'évaluer l'approche SAISIE en termes d'automatisation (degré d'automatisation pouvant être atteint) et en termes de capacité à peupler des BDRM3D de bâtiments.



Les principaux objectifs secondaires permettant d'y parvenir sont :

- 1) Définir les spécifications de la saisie en RM en 3D, et identifier les outils de saisie en RM existants
- 2) Identifier les difficultés associées à l'automatisation de la saisie et les éléments décisifs
- 3) Établir les similitudes entre les concepts développés pour supporter la saisie en RM et les concepts existants développés pour supporter la saisie 3D photogrammétrique.
- 4) Démontrer la faisabilité de la saisie photogrammétrique 3D en RM
- 5) Identifier et/ou proposer des algorithmes permettant d'automatiser certaines tâches de saisie photogrammétrique en RM.

## 1.6 Méthodologie

Notre démarche méthodologique a combiné successivement les deux méthodes de recherche suivantes : la méthode exploratoire/conceptuelle et la méthode hypothético-déductive.

La première partie de la recherche fut en effet très exploratoire et a permis de définir la problématique de recherche, de conceptualiser les enjeux liés à la saisie et à la génération de représentation multiple. Cette première phase a notamment permis d'identifier les concepts principaux associés aux deux communautés scientifiques (généralisation et photogrammétrie). Ceux-ci sont présentés dans le chapitre 2. Cette conceptualisation a par ailleurs permis de proposer l'approche SAISIE et les nouveaux concepts de PARM et d'Instance Driven SASS qui sont présentés dans le chapitre 3.

Pour la deuxième phase de notre recherche, nous avons opté pour une approche hypothético-déductive où l'expérimentation était au cœur du processus de recherche. D'une part, elle a permis de sélectionner les traitements parmi ceux identifiés dans la littérature et ceux proposés dans le cadre de cette recherche. Ceci a permis d'implémenter l'approche théorique proposée. Il s'agissait là principalement de traitements d'images de reconnaissance de forme. D'autre part, elle a permis d'évaluer la pertinence de l'approche théorique proposée en la mettant en œuvre sur plusieurs sites de tests. Ceci a permis d'évaluer l'approche SAISIE tant en terme de fiabilité qu'au niveau du degré

d'automatisation obtenu. L'implémentation de l'approche théorique et les nouveaux traitements développés sont présentés dans le chapitre 4.

Ces expérimentations ont été menées sur quatre sites tests, décrit dans le Tableau 1. Les trois premiers sites de tests correspondent à des villes canadiennes particulièrement compatibles avec le concept de PARM introduit par cette recherche. Le quatrième site de test correspond à la ville d'Amiens (France), et a été mis en place par l'EuroSDR (European Spatial Data Research) afin de faciliter la comparaison des méthodes automatiques et semi-automatiques de saisie des bâtiments. Ce site n'est pas compatible avec le concept de PARM. Il est en revanche compatible avec l'approche SAISIE et a été utilisé pour tester l'algorithme d'extraction des emprises au sol des bâtiments introduit dans cette recherche. L'approche SAISIE tient en effet compte de la variabilité des contextes (ex : villes européennes vs. Nord américaines). Ces différents sites de tests ont permis d'envisager différentes configurations. Les résultats obtenus et leurs analyses sont proposés dans le chapitre 5.

	Charlesbourg	Beauport	Montréal	Amiens
Échelle	1/5000	1/8000	1/4000	1/3600
Type de camera	Numérique	Argentique	Argentique	Numérique
Focale (en mm)	120	152	306	50
Superficie (en m <sup>2</sup> )	116300	157400	144100	S/O
Nombre de bâtiments	107	76	130	4
Taille de pixel (en microns)	12	21	14	9

**Tableau 1 :** Tableau décrivant les images sources utilisées sur les sites de test

Le chapitre 6 établit des recommandations et repositionne les réalisations impliquées par cette recherche face aux objectifs identifiés.

Les deux phases de notre méthodologie se sont appuyées en continue sur la recherche bibliographique. Celle-ci fut très générale au début de la recherche, et s'est spécialisée au fur et à mesure de notre avancement. Du fait du caractère multidisciplinaire de cette thèse, la recherche bibliographique a porté sur des disciplines aussi variées que la généralisation cartographique, les bases de données géospatiales décisionnelles, les entrepôts de données, la cartographie sur demande, le traitement d'images, la vision par ordinateur, la photogrammétrie, la télédétection ou encore l'intelligence artificielle.

La problématique de cette thèse a été définie en effectuant une recherche bibliographique, en participant à des ateliers, congrès et séminaires (ex : congrès ISPRS 2004, séminaire du Centre de Recherche en Géomatique) et en dialoguant avec différents acteurs (ex : professionnels de recherches, partenaires industriels). La pertinence de la problématique a été validée par le comité de thèse lors de l'examen doctoral passé en décembre 2004. La méthodologie et les hypothèses principales de recherche ont été identifiées et évaluées de la même manière.

Le prototypage, utilisé de manière itérative, a servi à évaluer et à enrichir les hypothèses en les mettant en œuvre avec des données réelles (i.e. processus hypothético-déductif). Le prototypage a par ailleurs joué un rôle important dans la compréhension des problématiques associées à la reconnaissance de forme automatique par traitement d'images et ce faisant dans l'identification des algorithmes à utiliser. Une visite d'une semaine au laboratoire MATIS de l'IGN (Saint Mandé; France), a permis de tester un de leurs prototypes de saisie semi-automatique et ainsi de bénéficier d'une partie de l'expérience acquise dans ce laboratoire.

Notre méthodologie a été mise en œuvre au travers de cinq étapes représentées dans le diagramme UML Figure 3. Ces étapes sont décrites ci-après.

La première étape, correspond à la recherche préliminaire et a permis d'identifier le peuplement de BDRM3D comme un enjeu important et de positionner la saisie en représentation multiple par rapport aux autres techniques de peuplement de BDRM.

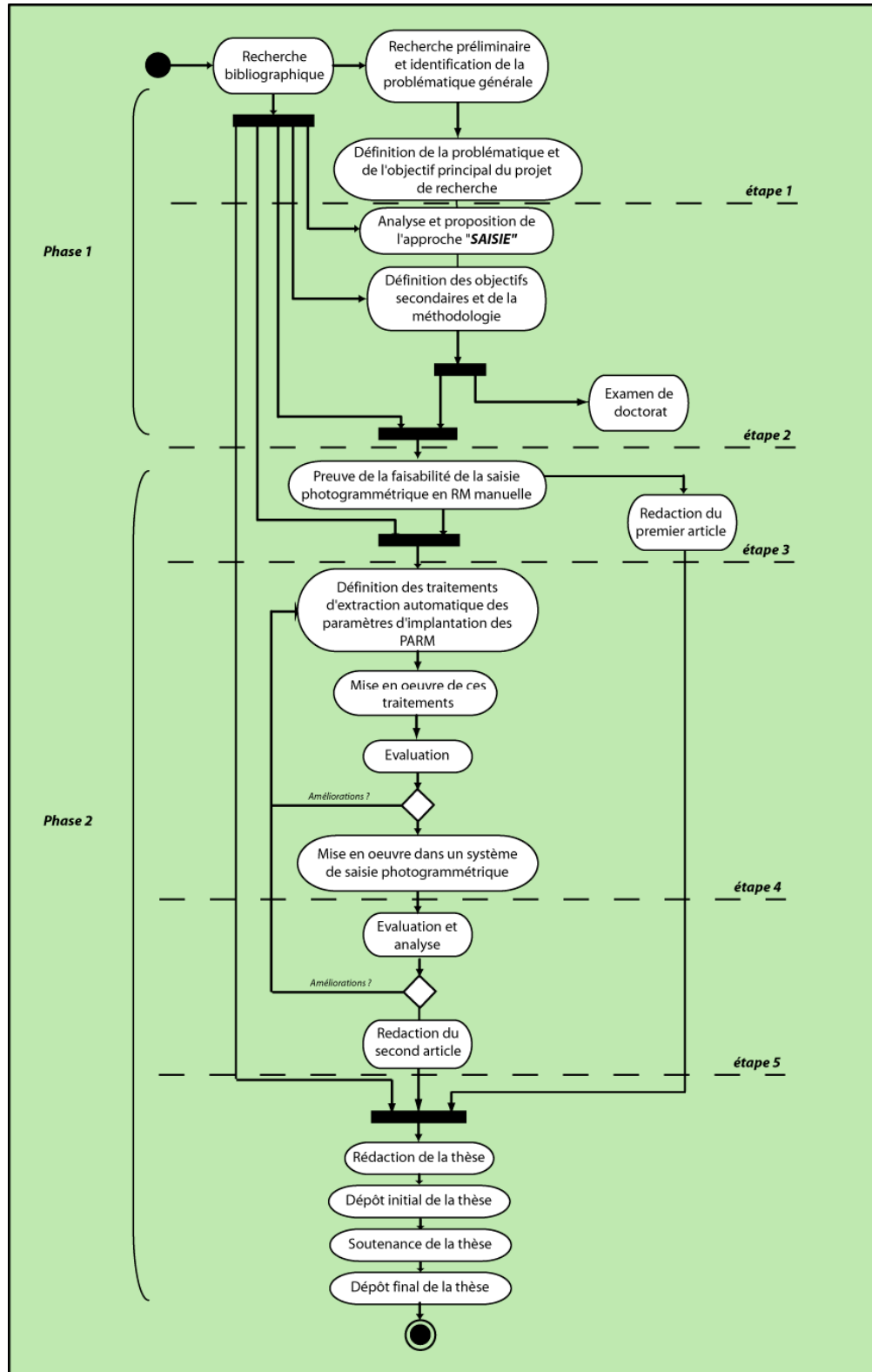
La deuxième étape correspond à la définition précise de notre problématique, à son analyse et à la proposition de l'approche SAISIE (objectifs principal). Elle inclut de plus l'identification de la méthodologie et des objectifs secondaires.

La problématique a été précisée par rapport aux deux composantes de la saisie en RM : la multiplicité géométrique et la saisie. Les spécifications de la saisie en RM et les problématiques associées à l'automatisation de la saisie photogrammétrique ont ainsi été étudiées (objectifs secondaires 1 et 2). De plus, les similarités entre les concepts de patrons géométriques, de patrons multi-échelles, utilisés dans le domaine de la généralisation, et de modèles paramétriques, utilisé en photogrammétrie, ont pu être identifiés (objectif secondaire 3).

L'analyse des concepts et problématiques associés aux deux composantes de la saisie en RM ont permis de proposer et de formaliser l'approche SAISIE. L'approche SAISIE repose sur l'exploitation **explicite** de connaissances a priori. Cette analyse a par ailleurs permis de proposer le concept de Patron d'Acquisition en Représentations Multiple en rapprochant les concepts de patrons géométriques, de patrons multi-échelles et de modèles paramétriques. Les deux premières étapes de notre méthodologie ont été sanctionnées par la réalisation de l'examen de doctorat.

La troisième étape correspond à la mise en œuvre d'un outil manuel de saisie photogrammétrique en RM. Cette étape a permis de démontrer la faisabilité de la saisie photogrammétrique en RM (objectif secondaire 4). Elle a été réalisée en implantant des fonctionnalités de saisie manuelle en RM dans le logiciel de saisie photogrammétrique DVP-GS. Une application indépendante de visualisation 3D en RM a par ailleurs été réalisée. Elle a permis de démontrer que le résultat de la saisie en RM correspondait aux spécifications de saisie. Ces implémentations ont été réalisées en C++. Les fonctionnalités de saisie en RM ont été directement intégrées à la technologie DVP 6.0 (implantation du concept de PARM, création de format de fichiers XML adaptés à la RM).L'application de

visualisation 3D, a été réalisée en utilisant MFC (Microsoft Foundation Class Library) et la technologie « OpenSource » VTK (Visualisation ToolKit). La troisième étape s'est concrétisée par la rédaction d'un article publié dans la Revue Internationale de Géomatique (Frédéricque, B. et al. 2007). Les prototypes opérationnels mis en place y sont décrits et des résultats préliminaires proposés.



**Figure 3 :** Diagramme d'activité UML décrivant la méthodologie de la thèse

La quatrième étape correspond à la mise en œuvre de l'approche SAISIE de manière restreinte. L'approche SAISIE a été conçue afin de tenir compte des différences possibles au niveau des types de sources disponibles, des types d'habitat et des connaissances a priori disponibles. Implémenter des traitements adaptés à toutes ces configurations implique une ampleur qui dépasse le cadre de ce doctorat. Nous avons donc restreint notre implantation de l'approche SAISIE à des contextes urbains correspondant à des zones résidentielles ce qui correspond à la majorité des bâtiments en Amérique du Nord (cas où les PARM sont pertinents et véhiculent des connaissances a priori sur les géométries des bâtiments) et à des contextes où seules des images aériennes sont disponibles. Nous avons par ailleurs exploré les possibilités liées à l'utilisation de connaissances a priori qui seraient spécifiques à l'instance et qui portent sur des informations autres que géométriques (ex : propriétés spectrales).

Des traitements, visant à automatiser certaines tâches de saisie, ont dû être identifiés ou proposés et mis en œuvre (objectif secondaire 5). Ceci a été fait en s'appuyant sur la revue de littérature, en effectuant une revue des technologies utilisables (technologies fournies par le partenaire industriel DVP-GS, technologies « OpenSources »), en expérimentant une partie de ces technologies et en implémentant de nouveaux traitements. Ce processus d'identification et de conception de nouveaux traitements a été itératif. Une fois les traitements identifiés et implantés, un prototype de l'approche SAISIE a été mis en place sous la forme d'un « plug-in » au logiciel de vectorisation photogrammétrique DVP-GS. Ce prototype a permis de combiner traitements manuels et traitements automatiques dans un environnement de saisie en RM.

La cinquième étape porte d'une part sur le test de l'approche SAISIE et d'autre part sur son analyse. Elle a été réalisée sur quatre sites. Trois des sites de tests retenus se situent dans les communautés urbaines de Québec et de Montréal (les spécifications détaillées des ces images sont fournies dans le Tableau 1). Ils ont permis de tester le prototype, reposant sur l'exploitation du concept de PARM, sur plus de 300 bâtiments. Le quatrième site de test, correspond à la ville d'Amiens. Il a permis d'évaluer l'algorithme proposé pour extraire les emprises au sol des bâtiments lorsque ceux-ci sont trop complexes pour utiliser le concept de PARM. L'analyse de l'approche proposée et l'établissement de recommandations ont

ainsi été menés en s'appuyant sur ces résultats. L'analyse de l'approche SAISIE en termes d'automatisation a été effectuée en comparant les résultats obtenus avec les prototypes manuel (cf. étape trois de la méthodologie) et semi-automatique (cf. étape quatre de la méthodologie).

Ces deux étapes (quatre, cinq) ont débouché sur la rédaction d'un article soumis à la revue « Journal of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing » (cf. annexe 4) où les principes de la saisie en RM et les outils semi-automatiques mis en place sont présentés. Enfin, la septième et dernière étape correspond à la rédaction et à la soutenance de cette thèse.

## **1.7 Synopsis du chapitre 1**

Ce premier chapitre a permis de présenter le contexte de ce projet de recherche et d'en définir la problématique : « **Comment mettre œuvre le peuplement de BDRM3D de bâtiments par saisie photogrammétrique dans une perspective d'automatisation?** ». L'intérêt de l'utilisation de BDRM3D, particulièrement dans le cas des bâtiments, pour supporter les applications émergentes dans les domaines de la cartographie sur demande et des systèmes décisionnels a été présenté. Les enjeux et les difficultés liés au peuplement de bases de données à représentation multiple ont été décrits notamment en présentant les différentes techniques permettant d'y parvenir. La saisie photogrammétrique 3D en RM a été identifiée comme une nouvelle méthode susceptible d'améliorer la réponse aux besoins actuels de techniques de peuplement de BDRM3D de bâtiments. Nous avons par ailleurs présenté la méthodologie générale suivie pour réaliser cette thèse.



## **Chapitre 2 : État de l'art**

*Ce chapitre est un extrait de Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Paparoditis, N. 2007a. Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une base de données à représentation multiple – vers une approche intégrée. Revue Internationale de Géomatique. Article accepté.*

*Il a par ailleurs été mis à jour afin de tenir des comptes de publications ayant eu lieu entre la soumission de l'article (avril 2006) et la constitution de cette thèse (avril 2007). Des paragraphes ont été ajoutés et sont en italique.*

### **2.1 Introduction**

*Tel que mentionnée dans la partie méthodologie, l'analyse des travaux existants a eu une incidence sur chacune des étapes de réalisation de cette recherche. La revue présentée ci-après est composée de deux parties correspondant à : l'automatisation de la saisie photogrammétrique et l'obtention des représentations multiples durant la saisie. Elle a permis d'analyser les enjeux associés aux deux composantes de la saisie en RM : le processus même de saisie et la multiplicité géométrique.*

### **2.2 Extraction des géométries détaillées des bâtiments et automatisation**

#### **2.2.1 Introduction**

Les techniques photogrammétriques d'exploitation d'images stéréoscopiques acquises à l'aide de capteurs aéroportés ou satellitaires constituent le moyen le plus utilisé pour extraire les GD relatives aux bâtiments. Ces techniques ont joué un rôle majeur dans le développement de la géomatique en réduisant les coûts d'acquisition des données géospaciales. Toutefois, celles-ci requièrent encore aujourd'hui l'intervention d'opérateurs humains dans une large proportion.

Réduire le rôle de l'opérateur humain dans ces processus a motivé énormément de travaux de recherche durant les dernières décennies et cela continue aujourd'hui (Baltsavias 2004).

Le processus de numérisation à partir d'images stéréoscopiques, (processus de reconnaissance de forme et de reconstruction) est un processus de vision extrêmement complexe (Theodoridis et Koutroumbas 2006). Sa mise en œuvre automatique fait appel à des traitements de bas niveaux (extraction d'attributs<sup>2</sup> des données sources, ex : contours, plans) ainsi qu'à des traitements de plus hauts niveaux permettant d'interpréter les attributs extraits.

Nous présentons ci-après un aperçu des travaux réalisés sur l'automatisation de l'extraction des géométries des bâtiments à l'aide de données issues de capteurs aéroportés et satellitaires. Nous avons structuré ces travaux selon trois critères que nous jugeons décisifs face à la problématique de l'automatisation de l'extraction des bâtiments qui sont :

- 1) les données sources utilisées (qui influent directement sur les attributs que l'on peut extraire et leur nature)
- 2) le niveau d'automatisation recherché (aptitude de raisonnement recherché au niveau du système informatique)
- 3) les connaissances a priori (qui servent d'éléments de base au processus de raisonnement ou qui permettent de restreindre l'étendue du problème à résoudre durant la reconstruction)

*La majorité des travaux mentionnés ci-après vise une extraction 3D des bâtiments.*

*Nous présentons aussi préalablement une description simplifiée du processus de saisie manuelle actuellement utilisé en production. Tel que cela a été introduit au chapitre 1 ce processus peut être impliqué pour les trois approches de peuplement de BDRM.*

### **2.2.2 Saisie photogrammétrique manuelle de bâtiments**

*La saisie photogrammétrique se fait généralement manuellement par des opérateurs spécialistes. C'est notamment le cas chez GroupeAlta, partenaire industriel de cette recherche. En effet, la saisie stéréoscopique est généralement abordée comme un traitement très spécialisé (vision stéréoscopique requise, maîtrise des périphériques d'acquisitions spécifiques), réalisé manuellement par des opérateurs humains. Les*

---

<sup>2</sup> Nous sommes conscients que l'utilisation du terme « attribut » utilisé en traitement d'images pour définir les éléments extraits des données sources ne correspond pas à la définition d'attribut utilisée en bases de données. Nous utiliserons néanmoins le terme attribut pour référer aux éléments extraits des données sources par soucis de fluidité lors de l'analyse des traitements d'images.

*opérateurs doivent alors extraire les géométries des objets en saisissant les lignes et les points caractéristiques dans une vue stéréoscopique. La sélection des éléments devant être saisis et des niveaux de détails est réalisée par les opérateurs en fonction des spécifications de saisie. Ces processus de saisie sont relativement longs puisqu'ils requièrent de nombreuses interactions de la part de l'utilisateur. Ces interactions correspondent essentiellement :*

- *à des déplacements de curseurs dans une vue stéréoscopique,*
- *à l'identification de points caractéristiques formant des lignes (cliques de souris, pédales...),*
- *à la définition de relations entre ces lignes (connexions définies avec des fonctions d'accrochages objets)*

*Ainsi, dans un contexte de saisie de géométries 2D (polygones définis dans l'espace 3D du terrain), la saisie d'un bâtiment dont la structure de toit est en forme de L requiert au minimum sept cliques ou raccourcis claviers ( un clique pour sélectionner un outil de saisie de type polygone et 6 cliques pour les différents vertex ). Ce nombre peut augmenter s'il faut classifier l'information saisie en définissant le polygone comme correspondant à un bâtiment (sélection du calque correspondant aux bâtiments).*

*Les données relatives aux bâtiments produites par les agences nationales se limitent généralement à des données 2D car seuls les contours des toits des bâtiments sont définis. Si l'on souhaite définir la géométrie du bâtiment en 3D, donc de manière volumétrique, il devient nécessaire de saisir manuellement d'autres points qui permettent de caractériser la structure intérieure du toit (ex : position de l'axe de toit) et la position du sol au voisinage du bâtiment pour en définir la hauteur. Dans de tels cas, le nombre d'interactions augmente avec la complexité de la structure de toit.*

### **2.2.3 Sources de données utilisées**

Deux principales sources de données sont utilisées pour extraire les GD des bâtiments : (1) des images obtenues à l'aide des capteurs passifs (ex : caméra photogrammétrique), nous parlerons d'imagerie passive dans la suite du document pour faciliter la lecture; et (2) des Modèles Numériques de Surface (MNS). Les MNS peuvent par exemple être obtenus par

traitements stéréoscopiques d'imagerie passive (Pierrot-Deseilligny et Papanoditis 2006) ou encore à l'aide de capteurs actifs de type LIDAR.

Ces deux sources de données permettent en effet d'extraire des informations géométriques à grandes échelles<sup>3</sup> et peuvent être obtenues à l'aide de capteurs aéroportés ou satellitaires. Les capteurs aériens sont généralement privilégiés pour des considérations d'échelles. Des travaux reposant sur des données issues de capteurs satellitaires hautes résolutions tels que les satellites Ikonos ou Pleiades (Shackelford A.K., et al. 2004; Lafarge F. et al. 2006) ont aussi été proposés. L'exploitation directe de MNS, privilégiée par Vosselman et Dijkman (2001), Dash et al. (2004), Forlani, G. et al. (2006), Wang, C. et Zhao, Z. (2006), Lafarge, F. et al. (2006), Ortner M. et al. (2007), facilite l'automatisation de l'interprétation de la scène dans la mesure où l'information décrit directement la surface à reconstruire (Brenner 2000). Contrairement aux processus exploitant de l'imagerie passive, les processus exploitant directement des MNS n'ont pas à transformer les attributs extraits dans les espaces 2D des images vers l'espace terrain 3D. Cependant, l'utilisation seule de MNS peut impliquer certaines limites en termes de précision, ce qui n'est pas le cas de l'imagerie passive. Ce constat a motivé la mise en place d'approches mixtes tirant profit de la précision de l'imagerie passive et des facilités d'interprétation des MNS (Rottensteiner et Jansa 2002, Rottensteiner F. et al. 2006). D'autres approches mixtes ont été proposées combinant données vectorielles et imageries passives (Suveg et Vosselman 2004) ou encore MNS et données vectorielles (Jibrini et al. 2000, Durupt M. et Thaillandier F. 2006, Park J. et al. 2006).

L'utilisation d'approches mixtes, augmentant le nombre d'attributs que l'on peut extraire des sources de données, influe de manière décisive sur la performance des approches mises en œuvre. L'utilisation de données vectorielles additionnelles (ex : données cadastrales caractérisant l'emprise au sol des bâtiments (Jibrini et al. 2000)) qui constituent des attributs déjà extraits est par ailleurs un moyen efficace d'améliorer les performances qui est trop souvent négligé (Mayer 2004).

---

<sup>3</sup> Les données géospatiales sont produites en vue de générer des représentations cartographiques dont le niveau de détail est lié à l'échelle. L'échelle représente le rapport entre une distance sur la carte et la distance réelle sur le terrain. Plus l'échelle est grande et plus les détails du terrain sont représentés dans la carte.

### 2.2.4 Niveau d'automatisation

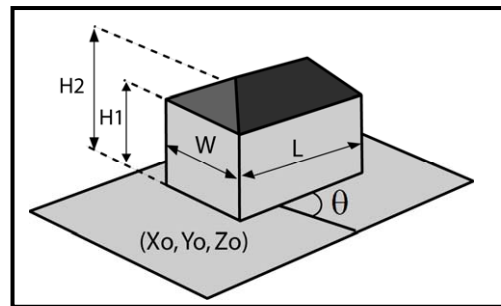
Les approches tant automatiques telles que celles proposées par Baillard et Zisserman (2000), Suveg et Vosselman (2000), Rottensteiner et Jansa (2002), Sohn (2004); Zebedin L. et al. (2006) que semi-automatiques telles que celles proposées par Brenner (1999), Vosselman et Veldhuis (1999), Tseng et Wang (2003), Oriot et Michel (2004), Taillandier et Deriche (2004) ont motivé de nombreux travaux de recherche. Les approches automatiques visent à supprimer totalement l'opérateur humain du processus de reconstruction même si celui-ci peut parfois être sollicité afin de corriger les cas d'échecs. Dans le cas des approches semi-automatiques, l'opérateur humain fait parti du système de saisie et assume certaines tâches, par exemple l'identification d'une zone d'intérêt ou encore la mesure approximative de certains points.

Des résultats encourageants ont été obtenus parmi les approches automatiques développées. Toutefois, la reconnaissance et la reconstruction automatique des géométries des bâtiments par photogrammétrie est un problème de vision par ordinateur extrêmement complexe (i.e. créer un modèle qui vu de l'extérieur possède des propriétés semblables à celles de la vision humaine (Horaud et Monga 1995)). Il nécessite d'être capable de passer automatiquement d'informations mesurables dans les images (i.e. intensité des pixels) à une description de l'espace sous la forme d'objets. Malheureusement il n'existe pas de lien direct entre l'intensité d'énergie provenant d'une zone de l'espace et le type d'objet auquel elle correspond. Le fait que l'espace observé soit tridimensionnel, le modèle géométrique du système optique qui observe cet espace (l'œil ou la caméra) ou encore les connaissances des différents types d'objets qui composent cet espace sont autant d'éléments à prendre en compte dans un système de vision. La difficulté, en terme de vision par ordinateur, que représente la reconstruction des bâtiments amène à penser que, dans la prochaine décennie, seules les approches semi-automatiques, avec une interaction de l'opérateur humain directive plutôt que corrective, peuvent s'avérer plus performantes que les solutions totalement manuelles (Förstner 1999; Baltsavias 2004; Mayer 2004).

### 2.2.5 Connaissance a priori et saisie de la géométrie

La notion de « connaissance a priori » peut porter sur différents aspects dans le processus de saisie. Dans Baltasvias (2004), l'auteur considère que celle-ci peut porter : sur l'objet cible et son contexte, sur les données utilisées en entrée (résolution des images sources, spécification de saisie des données vectorielles disponibles), sur les méthodes de traitement applicables et enfin sur les mécanismes de contrôle utilisables. La grande majorité des approches utilisent des connaissances a priori sur les objets cibles mais à un degré plus ou moins important. Celui-ci peut varier d'une simple localisation approximative par l'opérateur comme c'est le cas dans Oriot et Michel (2004), Taillandier et Deriche (2004), à l'introduction d'informations plus précises sur la géométrie de l'objet.

Dans Fuchs et Le-Men (2000), des connaissances a priori sont introduites en exploitant comme référence une base de connaissances sur les structures topologiques des bâtiments. Les relations topologiques entre les éléments extraits et ceux présents dans la base de connaissances sont comparées pour sélectionner certaines des hypothèses émises lors de l'extraction. Les approches utilisées dans Brenner (1999); Vosselman et Veldhuis (1999); Suveg et Vosselman (2000); Tseng et Wang (2003) vont plus loin en introduisant, au début du processus de saisie, l'identification non ambiguë du modèle paramétrique correspondant au bâtiment à extraire. L'utilisation de modèles paramétriques est un des moyens permettant d'introduire des connaissances sur les géométries des objets que l'on cherche à extraire. Le principe est de définir une librairie de modèles qui sont caractérisés par leurs formes géométriques et une liste de paramètres (origine, orientation, échelle...). Un exemple de modèle paramétrique est proposé à la Figure 4. Les éléments constituant cette librairie peuvent alors être utilisés pour caractériser les géométries d'instances en les utilisant seuls ou en les combinant avec des opérateurs logiques (union, intersection) dans le cas de géométries plus complexes. On parle alors de « Constructive Solid Geometry » CSG (Tseng et Wang 2003). C'est par exemple le cas dans Suveg et Vosselman (2004), Lafarge et al. (2006) où les auteurs supposent que tout bâtiment peut être décrit par une combinaison de modèles paramétriques. *Cette stratégie est utilisée dans des outils CAD 3D tels que 3D StudioMax ou encore GoogleSketchup pour effectuer des saisies manuelles.*



**Figure 4 :** Exemple de Modèle Paramétrique ( $X_o, Y_o, Z_o$  : coordonnées du point d'implantation,  $L$  : longueur,  $W$  : largeur,  $H_1$  : hauteur des murs,  $H_2$  : hauteur de l'axe de toit)

L'introduction des connaissances a priori dans le processus de saisie des bâtiments n'est pas toujours explicite et porte généralement sur des attributs géométriques du bâtiment. Peu d'approches suggèrent d'exploiter des connaissances a priori concernant les algorithmes à utiliser. On retiendra néanmoins que, dans Flamanc et al. (2003), Oriot et Michel (2004) il est suggéré que ce soit l'opérateur qui sélectionne l'algorithme le plus adapté. Dans ce cas, la formalisation des connaissances a priori utilisées n'est pas explicite. Flamanc et al. confèrent d'ailleurs l'apprentissage et l'évaluation des algorithmes à l'opérateur. *Des connaissances a priori sur les propriétés spectrales des bâtiments sont fréquemment utilisées. Dans Zebedin L. et al. (2006), elles sont par exemple utilisées pour classifier l'occupation du sol et ainsi identifier les bâtiments à extraire. Ces connaissances a priori sur les propriétés spectrales des bâtiments sont la plupart du temps introduites pour un site géographique complet et non de manière spécifique à une occurrence.*

L'utilisation de connaissances a priori constitue un élément clé dans la réussite des processus d'extraction. Elle est par ailleurs jugée dans Baltsavias (2004) comme la seule alternative viable vers le développement d'outils d'extraction opérationnels. En revanche, elle peut aussi limiter la portée d'une approche dès lors que les conditions supposées ne sont pas respectées, comme par exemple le fait que les toits soient plats (Oriot et Michel 2004) ou que tous les objets puissent être décrits par les modèles préétablis (Englert 1997; Fuchs et Le-Men 2000).

## 2.2.6 Automatisation de l'extraction des géométries détaillées des bâtiments : synopsis

Une part importante de la communauté scientifique considère que, dans le cas de l'extraction des bâtiments, seules les approches semi-automatiques sont en mesure de déboucher sur des résultats exploitables dans un contexte de production. Bien que l'automatisation complète des processus d'extraction des bâtiments reste un objectif que de nombreux travaux cherchent à atteindre, on notera que seules des approches semi-automatiques ont été jugées suffisamment performantes pour être intégrées dans des logiciels commerciaux (exemple : CC modeler, InJECT). L'exploitation de toutes les sources disponibles (ex : images, MNS, données vectorielles) et de connaissances a priori adaptées et explicites sont des facteurs améliorant les performances des approches.

## 2.3 Acquisition en Représentation Multiple : spécifications et outils

### 2.3.1 Introduction

*L'acquisition en représentation multiple est une approche très récente dont les objectifs vont être définis ci-après. Les concepts de patrons géométriques, de patrons multi-échelles et de SGO développés au sein de notre groupe de travail dans une perspective de peuplement de BDRM sont ensuite présentés.*

### 2.3.2 Spécifications

*Tel que mentionné précédemment, une Base de Données à Représentation Multiple est une base de données géographiques dans laquelle plusieurs géométries sont stockées et liées pour chaque objet géographique. Ainsi contrairement aux bases de données géospatiales "classiques", plusieurs géométries, et non une, doivent être extraites par objet géographique.*

*La saisie en représentation multiple vise à **extraire** et à **lier** les représentations géométriques des objets géographiques présents sur un territoire donné pour un domaine de niveaux d'abstraction donné. Ces représentations géométriques peuvent être décrites en*



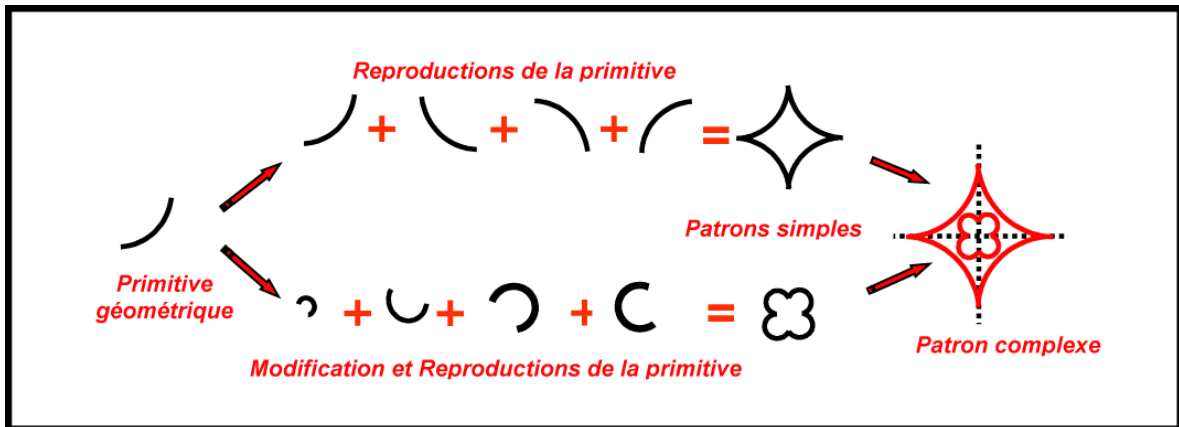
*utilisant des structures CAD<sup>4</sup> traditionnelles telles que les lignes, polygones, points... (ce type de structure est par exemple décrit par la norme ISO TC19125-1) ou encore tel que suggéré par notre groupe de travail (Sabo, N. et al., 2005) en utilisant des patrons géométriques lorsque cela est possible. Les concepts de patrons géométriques, de patrons multi-échelles et de SGO, sont présentés ci-après ainsi que leur utilisation pour peupler une BDRM2D par saisie photogrammétrique.*

### **2.3.3 Concept de Patron Géométrique et de Patron Multi-Échelles**

Un patron géométrique est défini comme : « un objet géométrique avec les caractéristiques géométriques typiques représentatives d'un grand nombre d'occurrences d'un phénomène cartographique ou d'une primitive géométrique. Cet objet peut s'adapter à la géométrie de ces occurrences pour différentes échelles et peut être réutilisé plusieurs fois » (Bédard 2004; Cardenas 2004). *Un patron géométrique est composé de primitives qui correspondent aux éléments atomiques indivisibles qui le constituent.* Cette définition s'appuie sur le constat que, dans les niveaux simplifiés, un grand nombre d'occurrences d'une classe d'objets ont des caractéristiques géométriques communes. *La Figure 5 est un exemple de patron géométrique complexe utilisé pour définir des échangeurs routiers. Cet exemple est extrait de Cardenas (2004). Le patron géométrique complexe (à droite et en rouge dans la figure) est composé de deux patrons géométriques simples (situés directement à gauche du patron géométrique complexe), eux mêmes composés de primitives géométriques (les différents arcs de cercles).*

---

<sup>4</sup> Computer Assisted Design

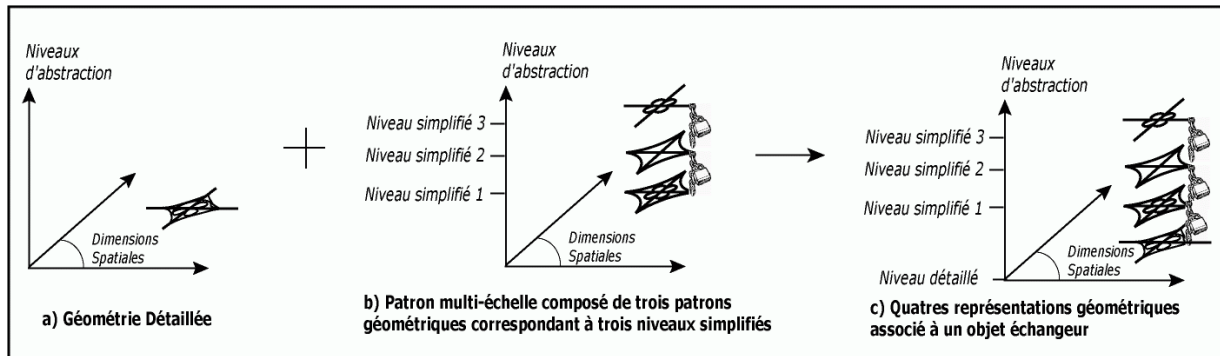


**Figure 5 :** Patron géométrique complexe proposé dans Cardenas (2004) pour définir des échangeurs routiers

Un même patron peut donc servir à définir les représentations géométriques de plusieurs occurrences en adaptant pour chacune d'elles les paramètres d'implantation du patron (ex : point d'ancrage, orientation, longueur, largeur). *L'utilisation de patrons géométriques pour décrire les géométries d'objets géographiques permet d'améliorer l'intégrité d'une BD en réduisant la redondance d'information puisque seuls l'identifiant du patron géométrique et les paramètres spécifiques à chaque instance sont stockés. Définir une géométrie d'un objet géographique à l'aide d'un patron géométrique se fait en associant à l'objet géographique le type de patron géométrique, en définissant par exemple une clé dans une base de données, et en définissant des paramètres d'implantation. Les principaux paramètres d'implantation d'un patron géométrique correspondent à : un point d'implantation, une échelle et une orientation. D'autres paramètres peuvent être présents selon le type de patron géométrique. Il est par ailleurs possible de préciser que certaines primitives composant le patron géométrique doivent être supprimées pour représenter plus fidèlement la géométrie d'un objet géographique spécifique.*

L'obtention de représentations multiples par saisie implique de créer des géométries décrivant l'objet géographique à différents niveaux d'abstraction. Le concept de patron multi-échelles vise entre autres à faciliter cette démarche. Un patron multi-échelles est composé de plusieurs patrons géométriques, correspondant à différents niveaux d'abstraction liés les uns aux autres. *La Figure 6b) représente le patron multi-échelles 2D proposé par Cardenas dans le cas d'échangeurs routiers. Ce patron multi-échelles est*

composé de trois patrons géométriques. Les deux cadenas représentent les liens entre les patrons géométriques qui composent le patron multi-échelles. Ces liens permettent entre autres de définir les paramètres d'implantation d'un patron géométrique à partir des paramètres d'implantation du patron géométrique plus détaillé avec lequel il est lié.



**Figure 6 :** Saisie à l'aide du patron multi-échelles proposé par Cardenas (2004) dans le cas des échangeurs routiers

Les patrons multi-échelles sont définis pour un domaine d'échelles correspondant aux géométries simplifiées qui est compris entre les domaines des géométries détaillées et celui de la symbologie pure.

Tous les patrons géométriques contenus dans un patron multi-échelles sont liés les uns aux autres (cf. cadenas entre les trois patrons géométriques de la Figure 6b). La définition des paramètres d'implantation (ex : orientation, échelle, point d'ancrage), se fait en implantant le patron du niveau le plus détaillé du patron multi-échelles. Donc la saisie en implantant le patron le plus détaillé est suffisante (du fait des liens prédéfinis entre les patrons géométriques) pour obtenir les représentations géométriques des autres échelles définies par le patron multi-échelles.

La saisie en représentation multiple reposant sur l'exploitation de patrons multi-échelles (définis a priori dans un gabarit de patrons multi-échelles) telle que définie par Bédard (2004) et Cardenas (2004) permet donc de définir plusieurs représentations géométriques d'une occurrence en paramétrant simultanément les patrons géométriques contenus dans le patron multi-échelles. Celle-ci implique quatre étapes principales, plus simples qu'une généralisation manuelle :

- 1) identifier le patron multi-échelles dans le gabarit de patrons (pour le glisser sur la carte ou la photographie aérienne) ;
- 2) supprimer ou spécialiser certaines primitives (i.e. composant élémentaire du patron) le cas échéant ;
- 3) ancrer le patron, i.e. définir ses paramètres d'implantation (orientation, taille, points d'ancrage) en manipulant le niveau le plus détaillé du patron multi-échelles ;
- 4) lier par une clé de base de données le patron multi-échelles à la géométrie détaillée de l'objet.

La Figure 6 résume ce processus. Les données initiales correspondent aux géométries détaillées (partie a)). La partie b) représente le patron multi-échelles qui est implanté et lié à la géométrie détaillée en manipulant uniquement le patron le plus détaillé qui le compose. La liaison entre patron multi-échelles et géométrie détaillée est représentée par le cadenas le plus bas dans la partie c).

Suite à ces opérations, un objet possède plusieurs géométries pouvant servir de substitut à la généralisation entièrement automatique qui devrait être effectuée à la volée pour supporter les applications cartographiques les plus récentes. Les algorithmes complexes de généralisation sont alors remplacés par une simple navigation dans la base de données.

### 2.3.4 Les Objets Auto Généralisant

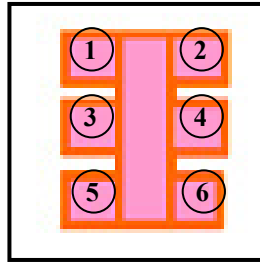
Sabo a enrichi le concept de patron multi-échelles développé par Cardenas et a introduit le concept d'objet auto généralisant (**Self Generalisable Object**) appliqué au cas des bâtiments (Sabo 2004). Les SGO reposent sur l'exploitation conjointe de patrons géométriques, de contraintes d'intégrité spatiale et d'algorithmes « simples » de généralisation. *Le fait d'utiliser les patrons géométriques permet aux SGO d'effectuer certaines opérations de généralisation simplement en modifiant les paramètres d'implantation du patron géométrique. Par exemple, une opération de généralisation comme l'« exagération » peut être simplement réalisée en augmentant certains paramètres d'implantation d'un patron géométrique. Un bâtiment en forme de L peut être simplifié en rectangle simplement en mettant à zéro les paramètres correspondant à l'extension du L et en exagérant les paramètres de longueur et de largeur de la partie principale du L.* Les SGO peuvent être appréhendés comme des objets qui ont l'aptitude de fournir à la demande et très rapidement une représentation géométrique donnée d'un objet géographique pour différents niveaux

d'abstraction. L'utilisation de SGO permet ainsi de fournir des représentations pour n'importe quel niveau d'abstraction (grâce aux algorithmes simples de généralisation appliqués aux patrons) alors que le patron multi-échelles ne couvre que les niveaux d'abstraction définis préalablement. Les SGO sont également plus flexibles car leurs contraintes d'intégrité spatiale peuvent tenir compte des objets voisins (ex : bâtiment près d'une rue) ou de leur contexte (ex : bâtiments alignés).

Le concept de SGO est toujours en cours de développement pour la cartographie 2D et touche d'autres aspects que la seule acquisition en représentation multiple. Par conséquent, la description ci-après, qui vise à définir les spécifications de saisie en représentations multiples à l'aide de SGO, se limite à la partie pertinente compte-tenu du projet.

La construction par saisie en représentation multiple d'une BDRM exploitant le concept de SGO implique alors deux principales phases : la création d'une base de données de SGO et la saisie des SGO pour la base de données du projet. La création d'une BD de SGO implique de définir les patrons géométriques utilisés, leurs algorithmes de généralisation ainsi que leurs contraintes d'intégrité spatiale. Le lecteur pourra se référer à Sabo (2007) pour plus de détails sur la détermination des patrons géométriques. La saisie des SGO est alors similaire à la saisie définie dans le cas des patrons multi-échelles (i.e. choisir le SGO prédéfini et implanter son patron géométrique le plus détaillé). Elle peut en plus impliquer la définition de groupes de SGO qui doivent respecter des contraintes de généralisation.

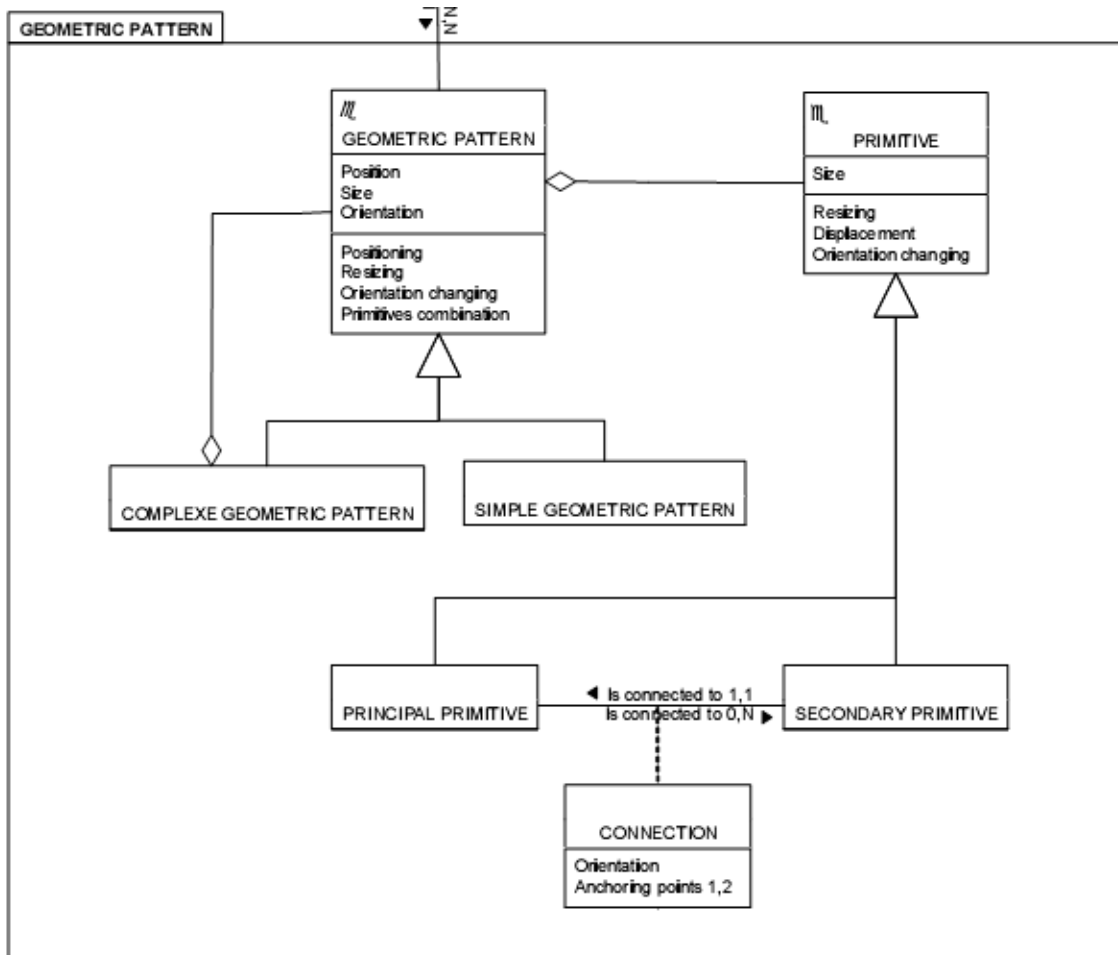
En se basant sur l'étude des géométries des bâtiments sur la zone test du projet GEMURE, Sabo a suggéré l'utilisation de patrons géométriques découlant de la simplification d'un unique patron initial représenté sur la Figure 7. L'auteur propose ainsi de définir chacun des patrons identifiés en supprimant certaines primitives (numérotées de 1 à 6 sur la figure) au patron initial. Un patron géométrique en forme de « T » peut ainsi être défini simplement en supprimant les primitives 1, 2, 3 et 4 à l'unique patron initial.



**Figure 7 :** Unique patron géométrique initial proposé par Sabo dans le cas des bâtiments.

La Figure 8 présente le diagramme UML de classe proposé par Sabo pour définir les patrons géométriques 2D de bâtiment. Un patron géométrique est composé de primitives qui correspondent à des rectangles. L'auteur distingue la primitive principale des primitives secondaires. Les paramètres d'implantation d'un patron géométrique permettent de positionner et de paramétrer la primitive principale par rapport à l'espace cartographique. Les primitives secondaires sont paramétrées par rapport à la primitive principale ce qui permet aussi de les définir par rapport au système cartographique. Un patron géométrique est composé au minimum d'une primitive géométrique. Un patron géométrique est complexe lorsqu'il est composé de plusieurs patrons géométriques simples.

Ce diagramme sera enrichi par la suite pour incorporer la troisième dimension et faire le lien avec les concepts existants de photogrammétrie.



**Figure 8 :** Diagramme de classes UML définissant le concept de patron géométrique; extrait de Sabo (2007)

### 2.3.5 Saisie en représentation multiple : synopsis

*Les concepts récents de patrons géométriques, de patrons multi-échelles et de SGO ont été présentés ainsi que les spécifications de la saisie en représentation multiple. L'intérêt des patrons géométriques en termes d'intégrité de base de données mais aussi du point de vue de leur intégration avec les concepts de patron multi-échelles et de SGO a été explicité. De plus, les principes rattachés aux concepts de patrons multi-échelles et de SGO ainsi que leur utilisation durant la saisie en représentation multiple ont été décrits.*

## 2.4 État de l'art : synopsis

*Les deux composantes associées à la saisie en représentation multiple, la multiplicité géométrique et la saisie, ont été décrites dans ce chapitre en effectuant une revue des travaux existants.*

*Les concepts développés pour générer et gérer des représentations multiples ont été présentés ainsi que les travaux réalisés pour automatiser la saisie des géométries détaillées. Il est intéressant de souligner que les concepts de patrons géométriques (utilisés dans les patrons multi-échelles et les SGO pour gérer la multiplicité géométrique) et le concept de modèle paramétrique (utilisé pour faciliter la saisie photogrammétriques des GD cf. section 2.2.5) ont certaines similitudes. Ce constat et les possibilités qu'il implique seront repris dans le chapitre suivant lors de l'introduction du concept de **Patron d'Acquisition en Représentation Multiple**.*



## **Chapitre 3 : Notre approche de saisie photogrammétrique en RM : *Une approche SAISIE***

*Ce chapitre est un extrait de Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Paparoditis, N. 2007a. Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une base de données à représentation multiple – vers une approche intégrée. Revue Internationale de Géomatique. In press. Des sections ont été ajoutées et sont en italique.*

### **3.1 Introduction**

*Notre analyse des travaux existants nous a permis de proposer une approche de saisie photogrammétrique 3D en RM nommée approche **SAISIE** (une approche Semi-Automatique Initialisée et Supportée par l'Intervention humain**E**) qui correspond à l'objectif principal de cette thèse. Celle-ci s'appuie sur les concepts d'**Instance Driven SASS** et de **PARM**. Nous avons par ailleurs proposé une architecture de système de saisie photogrammétrique 3D en RM de bâtiments selon l'approche **SAISIE**. L'approche **SAISIE**, les concepts qui s'y rattachent et l'architecture conçue vont être présentés ci-après. Les hypothèses associées à l'approche **SAISIE**, visant à automatiser une partie des traitements de la saisie photogrammétrique 3D en RM, sont aussi présentées. Les étapes du processus de saisie et les moyens permettant de réduire le nombre d'intervention de l'opérateur humain sont ensuite introduits. Enfin, des résultats préliminaires prouvant la faisabilité de la saisie en RM par photogrammétrie (objectif spécifique 2) sont présentés. Ils permettent d'illustrer par un exemple le processus de saisie en RM.*

### **3.2 Hypothèse**

Nous proposons de peupler une BDRM3D de bâtiments par saisie photogrammétrique en utilisant une approche semi-automatique qui repose sur l'introduction par un opérateur humain de connaissances au début du processus et qui exploite celles-ci pour extraire automatiquement et simultanément les géométries détaillées et simplifiées. *Nous pensons en effet, qu'il est pertinent d'adapter les traitements (sélection des sources de données, des algorithmes et des paramètres) selon le contexte de chaque instance pour améliorer le*

*niveau d'automatisation durant la saisie en RM. Nous proposons donc de traiter la problématique de cette thèse (Comment mettre œuvre le peuplement de BDRM3D de bâtiments par saisie photogrammétrique dans une perspective d'automatisation) selon une approche que nous résumons comme **Semi-Automatique et Initialisée et Supportée par l'Intervention humaine**. Nous référerons à cette approche en utilisant l'acronyme : **SAISIE**. La stratégie globale proposée est donc descendante puisqu'elle est principalement dirigée par les connaissances a priori (Bruce V. et Green P.R. 1990). Elle repose sur l'exploitation explicite de connaissances a priori.*

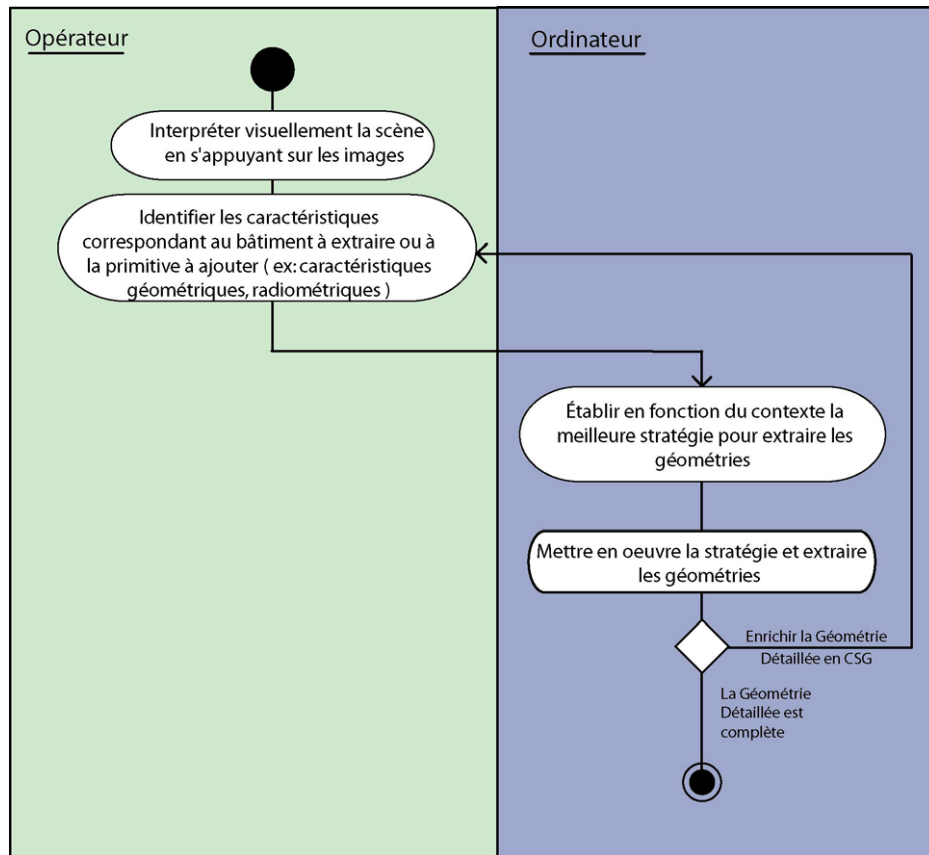
Le diagramme d'activités UML présenté ci-après (cf. Figure 9) décrit les étapes qui composent le processus de saisie en représentation multiple 3D proposé pour un bâtiment. La boucle ne concerne que les géométries détaillées. Dans le cas d'une saisie à très grande échelle, on peut par exemple vouloir ajouter des primitives pour décrire les fenêtres et les cheminées.

Il peut paraître paradoxal de commencer par solliciter l'opérateur humain alors que nous visons à réduire son implication dans le processus global de saisie. Toutefois, si l'on considère que l'intervention d'un opérateur dans les processus de saisie des géométries est nécessaire, il s'agit essentiellement d'un choix sur la manière d'exploiter son interaction. **Il s'agit en effet de préférer opter pour une approche principalement directive plutôt que corrective.** *L'opérateur peut aussi intervenir pour corriger les cas d'échecs mais ses interventions correctives sont plus rares.*

Nous considérons en effet que l'extraction des géométries détaillées (GD) et l'extraction des géométries simplifiées (GS) sont deux tâches extrêmement complexes qui ne peuvent être totalement automatisées. Par conséquent, nous proposons de réduire le rôle de l'opérateur humain de trois manières :

- 1) **en le sollicitant une seule fois pour traiter simultanément l'extraction des GD et l'extraction des GS;**
- 2) **en exploitant des connaissances a priori pour gérer contextuellement les traitements automatiques d'extraction des géométries;**
- 3) **en sollicitant l'opérateur uniquement pour des tâches simples et rapides d'exécution.**

Ces trois moyens vont être précisés ci-après. L'architecture système proposée sera présentée ainsi que des résultats préliminaires.



**Figure 9 :** Diagramme d'activité UML décrivant les étapes du processus de saisie en représentation multiple proposé.

### 3.3 Réduction de l'implication de l'opérateur humain

#### 3.3.1 Extraction simultanée des géométries détaillées (GD) et des géométries simplifiées (GS) : *Intégration des concepts de patron multi-échelles et de modèles paramétriques.*

La saisie semi-automatique des GD et la saisie semi-automatique des GS requièrent toutes deux que l'opérateur interprète la scène avant de pouvoir interagir. Nous proposons donc de solliciter l'opérateur pour interpréter la scène une seule fois et de traiter simultanément la saisie des GD et des GS.

L'analyse de la littérature révèle une proximité entre les concepts de patrons géométriques utilisés dans le cadre de la saisie des GS (i.e. patron multi-échelles et SGO) et les modèles

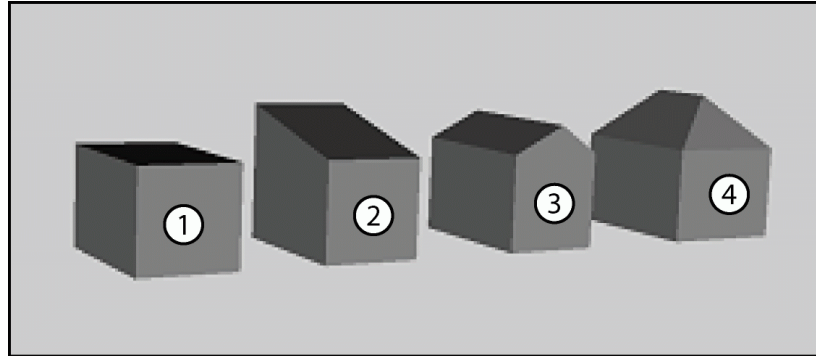
paramétriques définis dans le cas de la saisie des GD. Il s'agit en effet dans les deux cas de définir des formes préétablies dans une librairie et de se servir de celles-ci pour décrire les géométries d'objets géographiques spécifiques en définissant des paramètres d'implantation. Ces deux concepts diffèrent dans l'importance qui est accordée à la précision géométrique par rapport à la facilité d'utilisation dans un contexte de diffusion de données et de généralisation à la volée. Les patrons définis par Sabo privilégient en effet la vitesse de généralisation et la réduction des volumes de données à la fidélité géométrique.

### 3.3.1.1 Notion de Patron d'Acquisition en Représentation Multiple (PARM)

Nous suggérons de rapprocher les deux concepts de patron géométrique et de modèle paramétrique et d'étendre ainsi à la 3D le concept de patron géométrique défini dans Sabo (2004) sur lequel s'appuient les patrons multi-échelles et les SGO. Partant de ce principe, nous proposons d'établir a priori une librairie de Patrons d'Acquisitions en Représentations Multiples (PARM). Les PARM visent à faciliter la saisie en représentation multiple par procédés photogrammétriques. Ils couvrent les domaines des GD et des GS. Le niveau le plus détaillé d'un PARM est défini par un patron géométrique 3D privilégiant la fidélité géométrique à la vitesse de généralisation et à la réduction des volumes de données. Les autres niveaux sont définis à l'aide de SGO et/ou de patrons multi-échelles liés a priori au patron géométrique 3D du niveau détaillé. Les patrons multi-échelles et les SGO inclus dans des PARM peuvent être 3D et 2D. Les PARM peuvent par ailleurs être groupés s'ils doivent respecter une même contrainte de généralisation (i.e. spécification de saisie à l'aide de SGO définie par Sabo cf. 2.1.2).

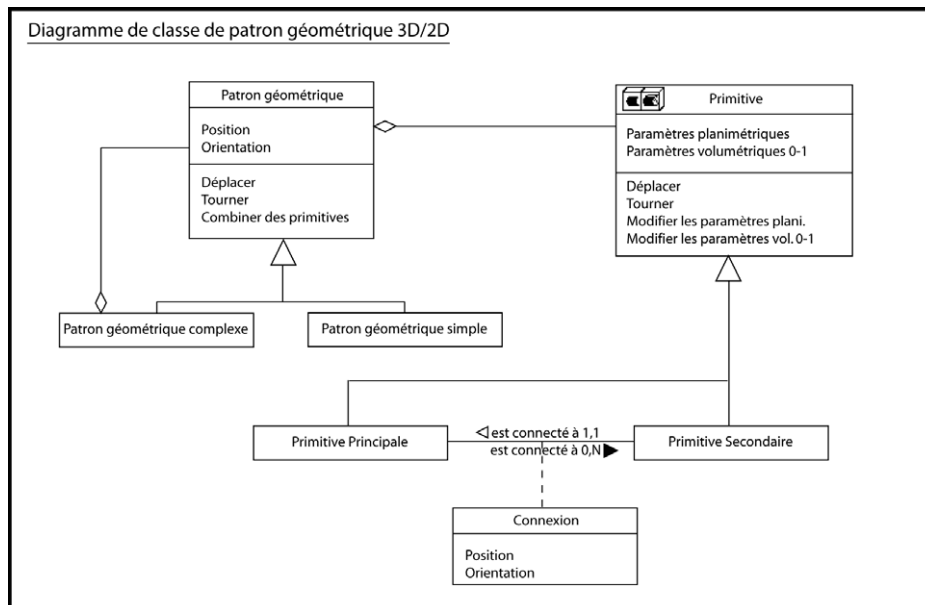
*La Figure 13 illustre quelques uns des PARM que nous avons identifiés pour traiter nos sites tests. Quatre types de primitives (cf. paragraphe 2.3.3) volumétriques élémentaires peuvent être utilisés pour définir un patron géométrique 3D composant un PARM. Elles sont présentées ci-après Figure 10. Ces quatre primitives peuvent être appréhendées comme une spécialisation de la primitive rectangulaire utilisée dans Sabo (2004). Cette spécialisation définit en effet les paramètres d'extrusion en fonction des structures de toit associées aux primitives volumétriques. Ces structures de toit définissent si la primitive correspond à un toit plat, à un pan incliné ou encore à deux ou quatre pans. Le choix des primitives et des PARM a été réalisé en étudiant les formes géométriques des bâtiments sur*

nos sites de test et en se référant aux exemples de modèles paramétriques ( patrons géométriques 3D utilisés en photogrammétrie) proposés dans la littérature, comme par exemple dans Zhang (2003).



**Figure 10 :** Différents types de primitives volumétriques élémentaires : a) toit plat, b) toit à 1 pan, c) toit à 2 pans, d) toit à 4 pans

Un patron géométrique 3D de bâtiment est élémentaire lorsqu'il est composé d'une seule primitive volumétrique. Dans le cas contraire, il s'agit d'un patron géométrique composé. Le diagramme de classe UML Figure 11 décrit le concept de patron géométrique 3D. Celui-ci est un enrichissement de celui proposé dans Sabo, N. et al. (2005). Les primitives comportent désormais des paramètres volumétriques. Le patron géométrique 3D, ainsi défini est donc totalement compatible avec le patron géométrique utilisé dans Sabo, N. et al. (2005). Il suffit d'ignorer les informations volumétriques pour se ramener à la définition de patron géométrique 2D proposée dans Sabo, N. et al. (2005).



**Figure 11 :** Diagramme de classe de patron géométrique 2D/3D

Saisir à l'aide d'un PARM se fait en implantant (déterminer les paramètres : point d'ancrage, orientation, hauteur...) le patron géométrique 3D le plus détaillé qui le compose. Des groupes d'objets géographiques devant respecter une même contrainte de généralisation (ex : ce groupe de bâtiments doit rester aligner durant la généralisation) peuvent par ailleurs être constitués ou encore devant respecter une règle de généralisation (ex : ce groupe de bâtiments doit s'agréger durant la généralisation).

### 3.3.1.2 Limites d'utilisation des PARM

Nous sommes conscients que l'utilisation de PARM ne peut pas couvrir tous les cas de figure et que tous les types de bâtiments ne peuvent pas être décrits a priori à l'aide de PARM. De plus, la définition des PARM sera probablement amenée à évoluer avec les évolutions futures du concept de SGO notamment au niveau de la prise en charge de la 3D. Nous pensons toutefois qu'ils sont pertinents pour un grand nombre d'occurrences et que de ce fait ils peuvent jouer un rôle majeur dans un système de saisie en représentation multiple. Des approches plus flexibles, combinant par exemple patrons géométriques 3D en CSG (cf. 2.2.3) et des SGO durant le processus de saisie (et non préalablement comme dans

le cas des PARM) devront être envisagées dans une phase ultérieure pour traiter les cas plus complexes.

### **3.3.2 Connaissances a priori et gestion contextuelle des traitements**

#### **3.3.2.1 Le concept d'Instance-Driven SASS**

La variabilité des types de sources exploitables (par exemple : images aériennes seules, images aériennes avec des données vectorielles...), des propriétés de ces sources (résolutions géométriques et radiométriques des images, précisions des données vectorielles) ainsi que celles des agglomérations à cartographier rend la mise en place d'approches automatiques génériques très difficile pour extraire les GD et les GS. Nous pensons, comme il l'est suggéré dans Flamanc et al. (2003) dans le cas des GD, qu'il est pertinent de sélectionner les algorithmes en fonction du contexte de l'instance traitée mais qu'en plus, ceci doit être étendu aux choix des sources et aux paramétrages des algorithmes. Nous proposons de gérer au niveau de l'instance, la sélection des algorithmes, des paramètres et des sources afin d'améliorer l'exploitation des traitements automatiques. Cette stratégie de supervision au niveau de l'instance se résume par l'acronyme Instance Driven SASS (Instance-Driven Selection of the Algorithms Setting Sources) et doit s'appuyer sur des connaissances a priori spécifiques à l'instance que nous proposons d'introduire via une intervention de l'opérateur humain au début du processus. L'exploitation de connaissances a priori est en effet un moyen pertinent selon nous de réduire la complexité du problème à résoudre (par exemple : en connaissant la forme de l'objet à extraire) mais aussi l'ampleur des possibilités à envisager (par exemple : réduisant l'espace de recherche).

#### **3.3.2.2 Introduire des connaissances : Quelles connaissances et comment ?**

La mise en œuvre d'une telle approche nécessite de disposer d'informations sur le contexte spécifique de chaque occurrence. Deux questions en découlent : quelles informations et comment les introduire ?

Les connaissances a priori sur les géométries des bâtiments sont probablement les connaissances les plus utilisées dans les approches mises en œuvre dans le passé. Nous

supposons que, de la même manière que pour leurs caractéristiques géométriques (PARM), de grands nombres de bâtiments peuvent être regroupés en classes en fonction de leurs caractéristiques. Celles-ci peuvent porter sur leurs propriétés géométriques, sur leurs propriétés spectrales (couleurs et textures) comme sur leurs propriétés spatiales (relations et contraintes spatiales, corrélation entre les directions des bâtiments et les directions de routes).

Nous proposons d'identifier des caractéristiques récurrentes et de les regrouper préalablement à la saisie. L'identification de ces classes, préalablement au positionnement du PARM, est un moyen simple et efficace d'introduire des connaissances a priori sur l'objet à extraire.

Nous pensons par ailleurs que des informations introduites spécifiquement pour définir les géométries simplifiées d'objets géographiques peuvent être exploitées pour faciliter la saisie à l'aide de PARM. Par exemple, l'introduction d'une contrainte de généralisation d'alignement, commune à un groupe de bâtiments, peut permettre de déterminer la direction d'un bâtiment préalablement à l'extraction de ses géométries et ainsi faciliter son extraction en réduisant l'espace de recherche correspondant à l'orientation (ex : déduire du premier bâtiment saisi une valeur approchée de la direction des autres bâtiments composant le groupe).

### **3.3.3 Solliciter l'opérateur pour des tâches simples et rapides d'exécution**

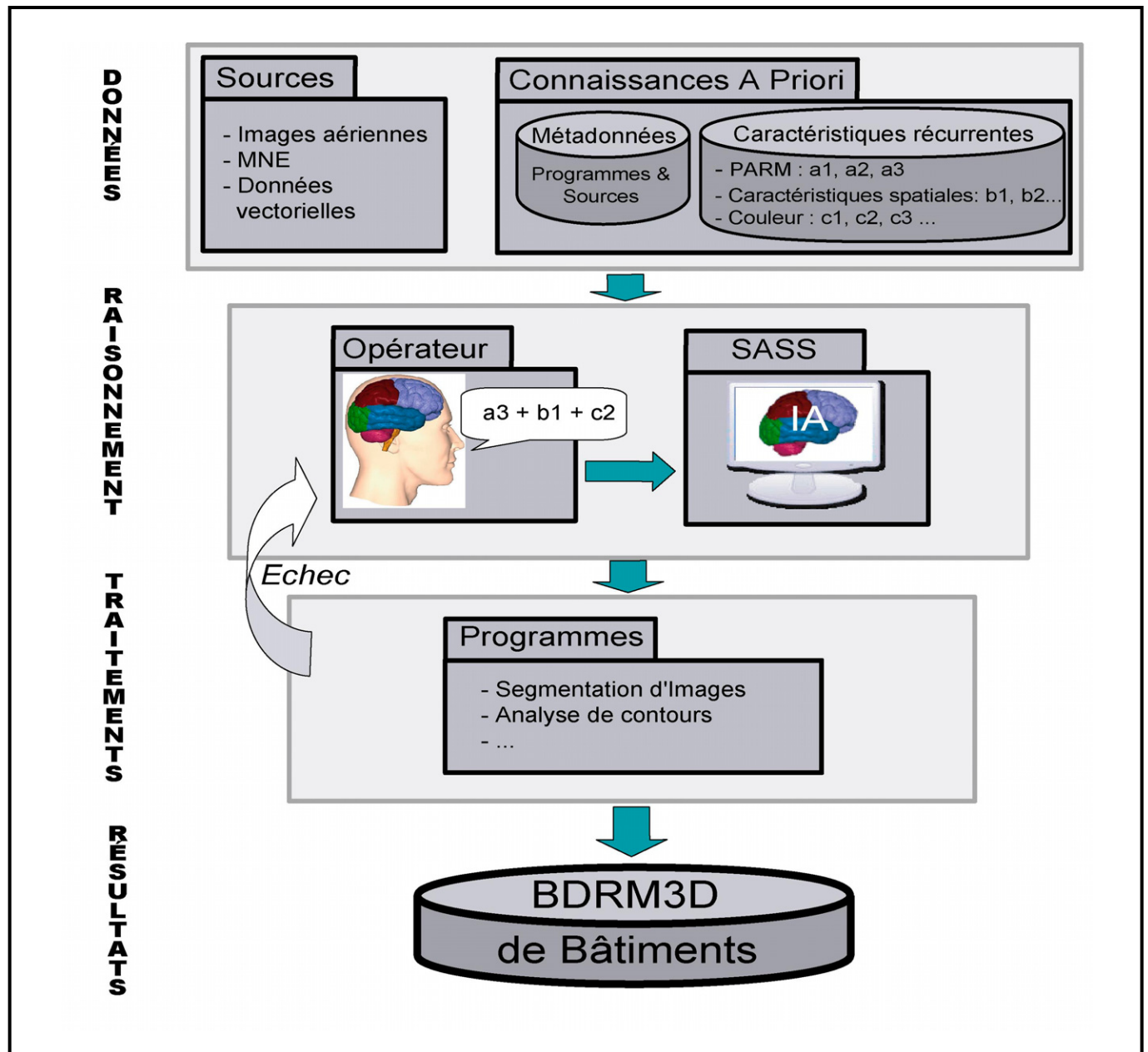
Le fait que l'interprétation d'une scène géographique, à partir d'images à haute résolution, soit une tâche particulièrement complexe à automatiser et qui paradoxalement soit très simple et rapide pour un opérateur humain, est reconnu aujourd'hui. De la même manière, l'analyse multicritères de données numériques et le pilotage de programmes est une tâche qui peut s'avérer difficile et longue dès lors que l'opérateur n'est pas spécialiste du domaine (Thonnat et al. 1999). Dans notre contexte, disposant d'images à haute résolution et souhaitant analyser plusieurs critères pour définir la stratégie optimale d'implantation des PARM, nous pensons qu'il est pertinent de solliciter d'une part l'opérateur humain pour interpréter la scène et d'autre part un opérateur logiciel pour l'analyse du contexte (définition de la stratégie optimale) et la supervision des programmes (mise en œuvre de



cette stratégie). Nous proposons donc de limiter l'intervention de l'opérateur humain à l'introduction d'informations sur l'objet à extraire et sur son contexte.

### **3.4 Architecture du système de saisie photogrammétrique 3D en RM de bâtiments**

L'architecture du système de saisie photogrammétrique 3D en RM de bâtiments, illustrée à la Figure 12, est composée de trois niveaux qui interviennent successivement dans le processus de définition des géométries d'un bâtiment. Les données vont dans un premier temps de la couche DONNÉES à la couche RAISONNEMENT. La scène est alors interprétée par l'opérateur humain (i.e. il reconnaît les principales caractéristiques du bâtiment à extraire) qui introduit des informations sur le bâtiment à saisir (ex. PARM de type 1, toit rouge). L'ensemble des connaissances a priori introduites est ensuite analysé automatiquement par l'opérateur logiciel pour définir la stratégie à mettre en place pour extraire les géométries (ex : déduire la direction de la route des informations vectorielles, effectuer une analyse des gradients selon cette direction puis segmenter en exploitant l'information colorimétrique). Cette stratégie, influant sur le choix des sources, des algorithmes et des paramètres, est ensuite automatiquement appliquée dans la couche TRAITEMENTS. Les géométries obtenues sont alors enregistrées dans la BDRM3D. Les cas d'échec sont traités en sollicitant à nouveau l'opérateur humain.



**Figure 12 :** Architecture du système proposé

### **3.4.1 La couche DONNÉES**

La couche de données contient deux types de données : les données sources et les connaissances a priori.

Les données sources, par exemple des images aériennes et des données vectorielles 2D, permettent à l'opérateur d'interpréter la scène et aux algorithmes d'extraire les géométries (ex : positionnement automatique d'un PARM). Elles doivent donc avoir des résolutions permettant de répondre aux spécifications de saisie des GD (variables d'un projet à un autre, nous considérons que ces résolutions varient de quelques centimètres à un mètre suivant le projet). Des images à hautes résolutions ainsi qu'un modèle numérique de surface (éventuellement déduit automatiquement des images) doivent au minimum figurer parmi les sources de données. Celles-ci peuvent comporter de manière additionnelle des données vectorielles relatives aux bâtiments et aux réseaux routiers.

Deux catégories de connaissances a priori sont disponibles : celles relatives aux caractéristiques récurrentes des bâtiments et celles relatives aux ressources exploitables pour extraire les géométries des bâtiments. Les caractéristiques récurrentes concernent les géométries des bâtiments (ex : PARM cf. 3.1.1) mais aussi leurs propriétés radiométriques (ex : couleurs, textures) ainsi que leurs relations et contraintes spatiales (ex : corrélation entre les directions principales des bâtiments et celles des routes, contraintes d'intégrité spatiale associée à un SGO). Les connaissances relatives aux ressources exploitables correspondent aux métadonnées sur les sources (ex : résolution des images, capteurs utilisés, échelles des données vectorielles) et aux performances des algorithmes qui peuvent être utilisés pour les exploiter (ex : vitesse d'exécution, précisions obtenues, fiabilité).

### **3.4.2 La couche RAISONNEMENT**

Le raisonnement est réalisé par deux composants qui interviennent successivement. Le premier, l'opérateur humain, effectue une interprétation de la scène basée sur son observation des images. Il transmet alors son interprétation de la scène au composant de raisonnement automatique, le composant Intelligence Artificielle, en identifiant la classe de l'instance traitée (ex : type de PARM, contrainte de généralisation à respecter, type de

modèle radiométrique). L'analyse du contexte est alors réalisée par le composant d'Intelligence Artificielle (IA) en fonction des sources disponibles et de leurs propriétés ainsi qu'en fonction des connaissances a priori sur l'instance introduite. Le composant IA a pour fonction d'analyser automatiquement le contexte (i.e. problème à résoudre, données disponibles...) et d'élaborer la meilleure stratégie de reconstruction en sélectionnant les algorithmes à mettre en œuvre, les sources à exploiter ainsi que les paramètres (Selection of the Algorithms Sources and Settings - SASS). Par exemple, il pourrait s'agir d'exploiter un algorithme basé sur l'exploitation des propriétés spectrale si le bâtiment est connu (information introduite par l'opérateur humain) comme coloré ou si ce n'est pas le cas d'exploiter un algorithme exploitant le MNS.

### 3.4.3 La couche TRAITEMENT

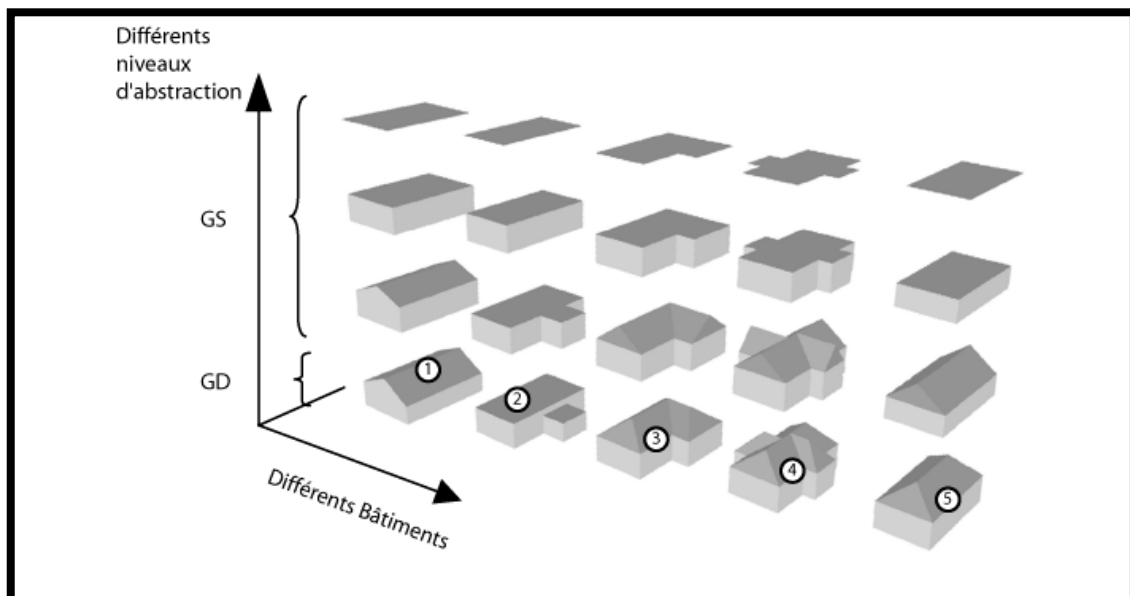
La couche traitement comporte de simples prétraitements des sources pour en faciliter l'exploitation ultérieure (ex : filtres passe bas, filtres passe hauts, opérateurs de segmentation), comme des traitements dédiés au positionnement de PARM (ex : opérateurs exploitant les résultats d'une segmentation pour déduire les paramètres d'implantation des PARM). Ces traitements se caractérisent par leur capacité de paramétrage en fonction du contexte et par leur faible temps d'exécution permettant de minimiser les temps d'attente de l'opérateur.

## 3.5 Prototype manuel : *faisabilité de la saisie photogrammétrique en RM*

*Ce prototype manuel vise à démontrer la faisabilité de la saisie photogrammétrique en RM (objectif secondaire 4). Un deuxième prototype, proposant cette fois une saisie semi-automatique, est présenté dans le chapitre 4.*

Dans la mesure où le concept de SGO est récent et ne traite pas encore de représentations multiples en 3D, nous avons temporairement restreint la définition des PARM à deux niveaux. D'une part, les GS 3D contenues dans les PARM sont définies uniquement à l'aide du concept de patron multi-échelles 3D, et d'autre part les GS 2D sont définies à l'aide des SGO 2D liés aux patrons multi-échelles 3D.

Nous avons pour l'instant défini une librairie composée d'une vingtaine de PARM (Patrons d'Acquisition en Représentation Multiple). La Figure 13 représente cinq PARM (numérotés de un à cinq) parmi ceux que nous avons identifiés en nous basant sur l'étude de zones de test. Chacun des PARM est composé de quatre éléments liés les uns autres : trois patrons géométriques 3D et un SGO 2D représenté dans la figure par son patron géométrique 2D. Les patrons géométriques 3D utilisés pour définir les GS 3D ont été définis par un opérateur humain. La définition formelle de règles et de contraintes de généralisation 3D dépasse le cadre de ce projet. Le lecteur trouvera dans Sarjakoski, T. (2007) une revue des cadres conceptuels associés à la généralisation et aux représentations multiples.

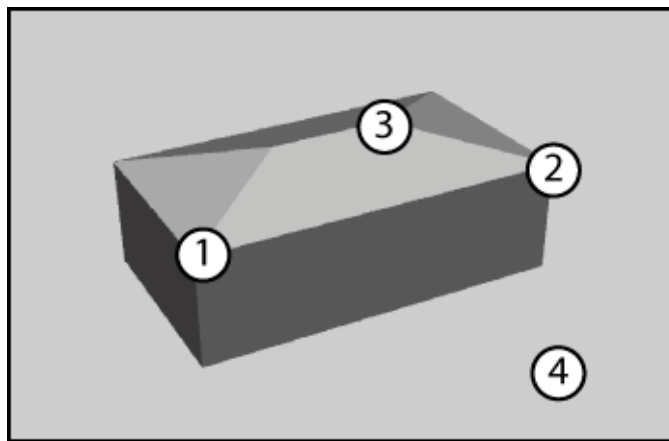


**Figure 13 :** Exemple de PARM identifiés pour faciliter la saisie en représentation multiple

Un processus de saisie manuelle, exploitant des PARM, a été implanté dans le logiciel photogrammétrique de restitution numérique DVP Vectorization© (<http://www.dvp-gs.com/>). La version actuelle permet de déterminer les paramètres d'implantation des PARM en fonction de points mesurés en 3D par un opérateur humain dans une vue stéréoscopique selon un ordre précis. Les points mesurés correspondent à des nœuds spécifiques du niveau le plus détaillé des PARM et à un point au sol. La spécification du type de PARM à saisir est réalisée par l'opérateur humain lorsqu'il sélectionne son outil de saisie. Il existe un outil (icône à sélectionner) par type de PARM. La Figure 14 représente

les points devant être mesurés (i.e. pointés à l'aide du curseur dans la vue stéréoscopique) dans le cas du premier PARM, les numéros correspondent à l'ordre dans lequel ils doivent être mesurés. Le point d'ancrage du PARM correspond au premier point mesuré. Chacun des points permet de déduire des paramètres distincts (ex : le point 2 donne la longueur et l'angle d'orientation du PARM). Seule la valeur Z du point 4 est exploitée, elle permet de déterminer le paramètre hauteur du PARM.

Les PARM peuvent par ailleurs être groupés durant le processus d'acquisition s'ils doivent respecter une même contrainte ou règle de généralisation. Actuellement, seules des règles d'agrégation peuvent être définies. La gestion des règles et contraintes de généralisation sera enrichie avec les développements futurs du concept de SGO développé dans notre groupe de travail. La constitution d'un groupe de bâtiments alignés devant s'agréger lors de généralisation se fait en spécifiant le premier et le dernier PARM saisi appartenant à ce groupe. Le résultat de la saisie en représentations multiples est stocké sous la forme de fichiers au format XML.



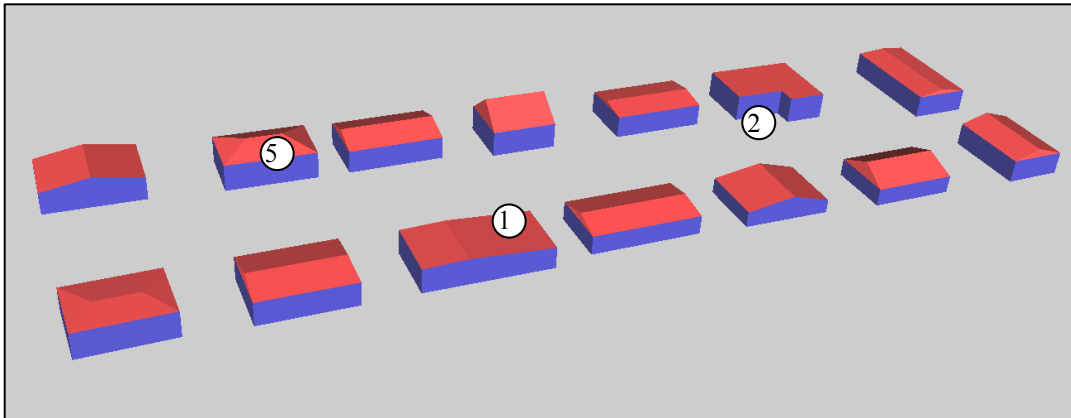
**Figure 14 :** Exemple de points à mesurer pour définir un PARM

Une application permettant de visualiser en 3D les résultats et de naviguer à travers différents niveaux d'abstractions a par ailleurs été développée. Chaque PARM y est géré comme un arbre de patrons 3D et 2D disposant de fonctions permettant de convertir les paramètres des niveaux détaillés vers les paramètres des niveaux simplifiés.

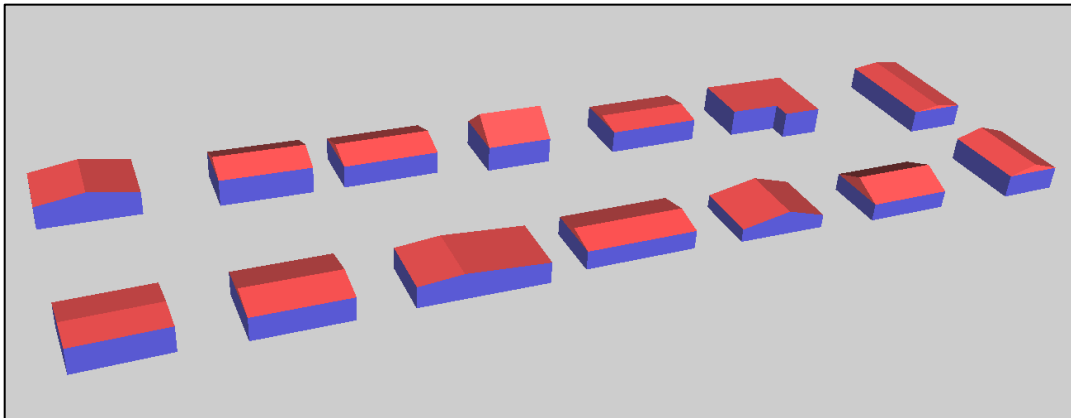
Les figures ci-après illustrent les différentes représentations d'un quartier de l'agglomération de Québec obtenues (dans l'application de visualisation décrite précédemment) par saisie en représentations multiples à l'aide du prototype manuel mis en place et de trois PARM. Les PARM correspondant aux numéros 1, 2 et 5 sur la Figure 13 sont identifiés sur la Figure 16. Dans cet exemple, trois groupes de PARM alignés devant s'agréger lors de la généralisation ont été constitués. La Figure 15 est un extrait d'une des images sources utilisées (cf. Tableau 1). La Figure 16 correspond au niveau le plus détaillé extrait. Les Figure 17 et Figure 18 correspondent à deux niveaux simplifiés pour lesquels chaque bâtiment dispose d'une géométrie pour le représenter. La Figure 19 illustre comment la règle d'agrégation définie durant la saisie peut être utilisée pour définir une représentation géométrique correspondant à plusieurs bâtiments.



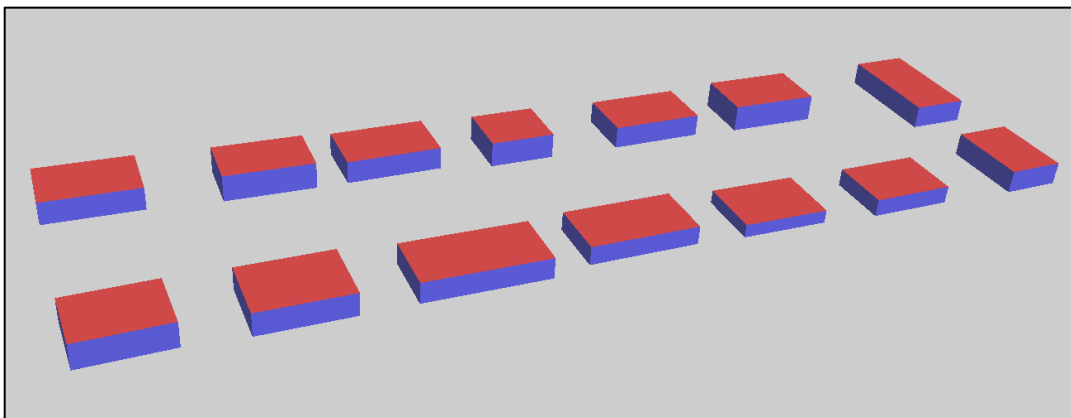
**Figure 15 :** Exemple de saisie, extrait d'une des images sources.



**Figure 16 :** Exemple de saisie, représentations détaillées

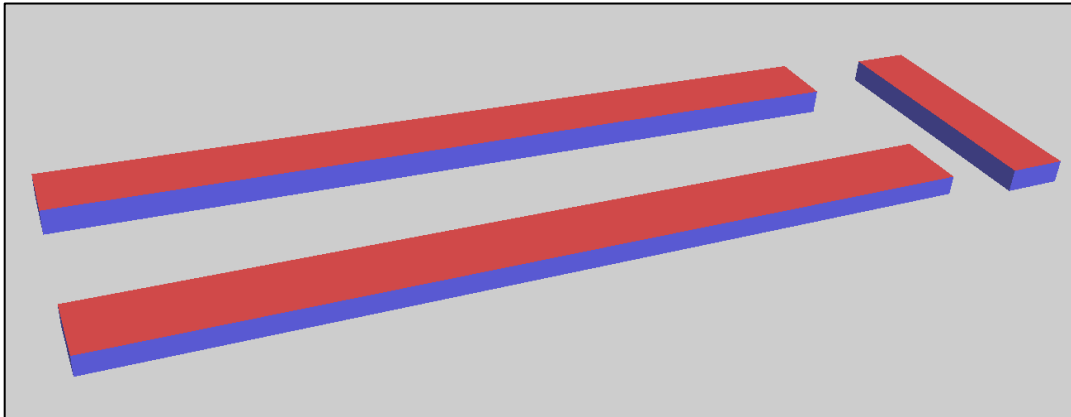


**Figure 17 :** Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 1



**Figure 18 :** Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 2





**Figure 19 :** Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 3.

### 3.6 Synopsis

*Ce chapitre a permis d'introduire l'approche SAISIE ainsi que l'architecture du système de saisie photogrammétrique 3D en RM. Les concepts de PARM, d'Instance Driven SASS ainsi que les différents moyens visant à réduire l'intervention de l'opérateur humain durant la saisie ont été présentés. Le prototype de saisie manuelle en représentation multiple a été présenté et décrit. L'application de visualisation 3D en RM a été présentée au travers d'un exemple de résultats. Ces deux prototypes ont permis de prouver la faisabilité de la saisie photogrammétrique en RM (objectif secondaire 2).*

## **Chapitre 4 : Mise en œuvre de l'approche SAISIE**

*Ce chapitre est un extrait de : Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Paparoditis, N. 2007a. Populating a building Multi Representation Data Base with photogrammetric tools: principles, implementation and results. Article soumis à la revue « ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing ».*

### **4.1 Introduction**

*Ce chapitre décrit la mise en œuvre et l'expérimentation de l'approche **SAISIE** visant à augmenter le niveau d'automatisation de la saisie photogrammétrique 3D en RM. Selon notre méthodologie, ces étapes interviennent après la proposition de l'approche **SAISIE** et la mise en œuvre manuelle qui a prouvé la faisabilité de l'approche de saisie photogrammétrique 3D en RM (chapitre 3).*

*Certains termes, d'usage courant en photogrammétrie, sont présentés dans un premier temps (section 4.2) afin de garantir la compréhension des lecteurs issus d'autres communautés scientifiques.*

*Nous avons proposé l'approche **SAISIE** ainsi qu'une architecture de système de saisie photogrammétrique en RM (cf. chapitre précédent) pour améliorer le niveau d'automatisation durant la saisie en RM. Le système proposé a été conçu afin de tenir compte et d'exploiter les différences possibles dans les contextes de production (ex : types de sources disponibles, type d'habitat). Plusieurs configurations initiales sont possibles au niveau des données sources, des connaissances a priori et par conséquent plusieurs types de traitements automatiques d'extraction des géométries sont envisageables. Ces traitements peuvent exploiter des connaissances a priori plus ou moins spécifiques et portant sur différents aspects (ex : géométrie 3D, propriétés spectrales). Le test de toutes les configurations envisageables n'étant pas possible, nous avons effectué des restrictions dans notre mise en œuvre. Les différentes restrictions utilisées lors de notre mise en œuvre sont présentées dans la section 4.3 en fonction des couches de notre architecture. Le contexte exploré au niveau de la couche « **DONNÉES** » est présenté en deux parties correspondant à ses deux composantes : les données sources et les connaissances a priori.*

*Des traitements automatiques ont été mis en place, en fonction des restrictions faites dans l'implantation, selon trois configurations présentées dans les sections 4.4, 4.5, et 4.6*

## 4.2 Précision sur le vocabulaire utilisé

Les termes ci-après sont d'usage courant en photogrammétrie. Ils sont définis afin d'éviter toute ambiguïté. Les termes correspondant en anglais sont par ailleurs mentionnés.

**Référentiel terrestre / Ground coordinate system :** Par commodité, nous nommons « référentiel terrestre » le système de coordonnées utilisé généralement en photogrammétrie aérienne (axe Z vertical, plan XY horizontal).

**Emprise au sol / footprint :** L'emprise au sol correspond à la projection orthogonale sur un sol horizontal des contours des éléments considérés (ex : primitive volumétrique).

**Région d'intérêt / Region of Interest or focusing area :** Une région d'intérêt correspond à une région dans le plan XY du référentiel terrestre dans lequel se situe le bâtiment à reconstruire. La région d'intérêt inclut donc l'emprise au sol du bâtiment à reconstruire et peut contenir d'autres éléments connectés à celui-ci (ex : arbres). Dans la Figure 20 le polygone représente une région d'intérêt possible pour le bâtiment.



**Figure 20 :** Exemple de région d'intérêt incluant un bâtiment et un arbre

**Direction principale / Principal direction :**

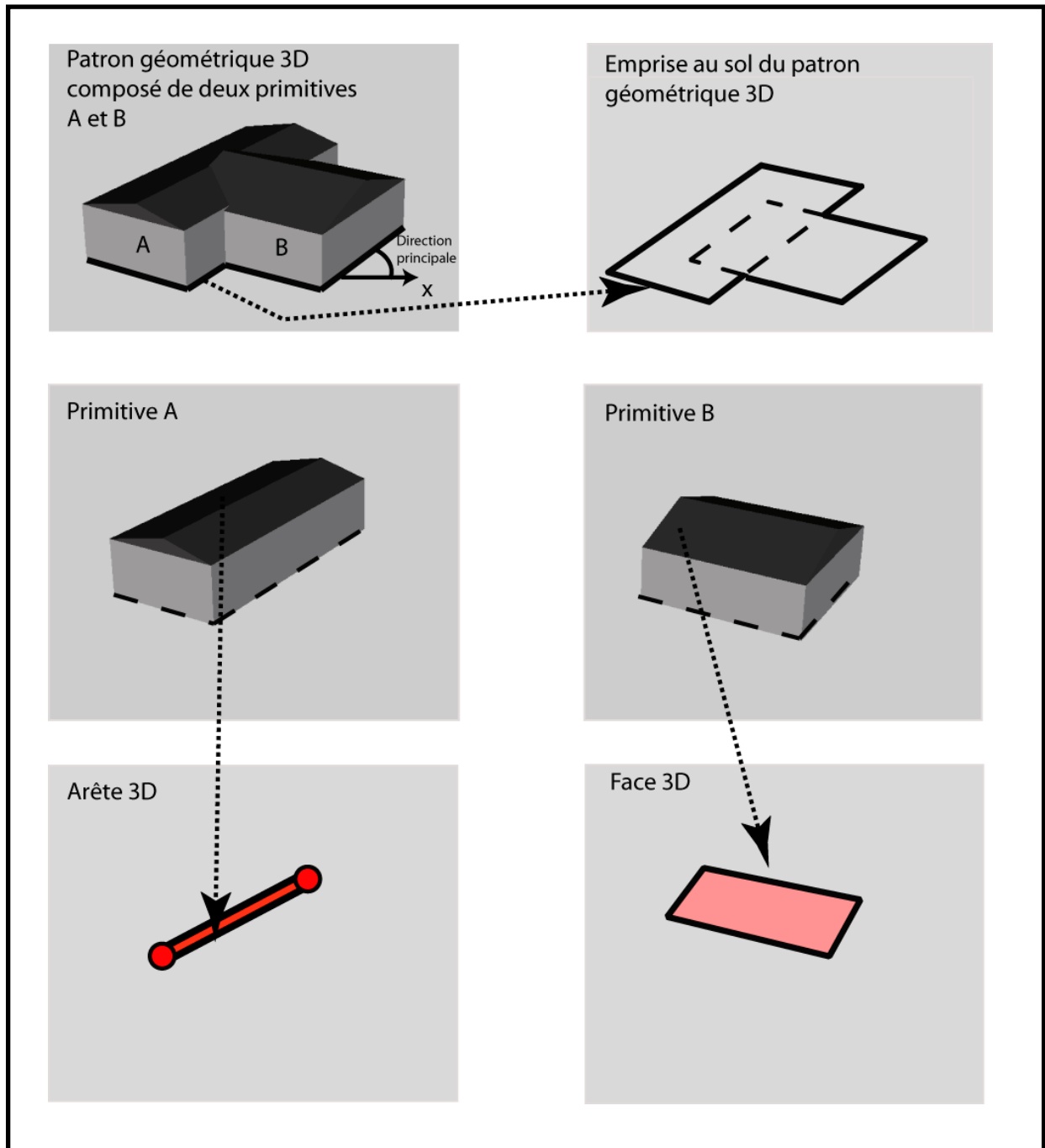
La direction principale d'une primitive volumétrique correspond à l'orientation à  $90^\circ$  près (i.e. modulo  $\pi/2$  radians) de son emprise au sol qui est rectangulaire. Cette orientation est

définie dans le plan  $XY$  du référentiel terrestre. Ainsi, les gisements de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  et  $270^\circ$  correspondent à la même direction principale de  $0^\circ$ . Dans le cas des PARM que nous avons sélectionnés, toutes les primitives sont perpendiculaires les unes aux autres. Elles ont donc la même direction principale qui correspond à la direction à 90 degrés près de n'importe laquelle des lignes qui compose son emprise au sol.

**Arête 3D / 3D Edge** : Une arête 3D est un segment de droite délimitée dans un espace 3D par deux points.

**Faces / Faces** : Une face est un plan délimité par un polygone.

La Figure 21 représente un patron géométrique composé de deux primitives volumétriques. Elles sont agencées en formant une emprise au sol en forme de T. Les notions de faces, de direction principale et d'emprises au sol, utilisées par la suite, sont explicitées sur cette figure. Ce patron géométrique correspond par ailleurs au bâtiment représenté dans la Figure 20. Cet exemple est repris dans la suite de la thèse pour illustrer certains traitements. Nous y référons entant qu'**exemple référence**.



**Figure 21 :** Illustration du vocabulaire utilisé dans le cas de l'exemple référence

### **4.3 Vers une réduction du rôle de l'opérateur humain :** *Restriction dans la mise en œuvre de l'approche SAISIE*

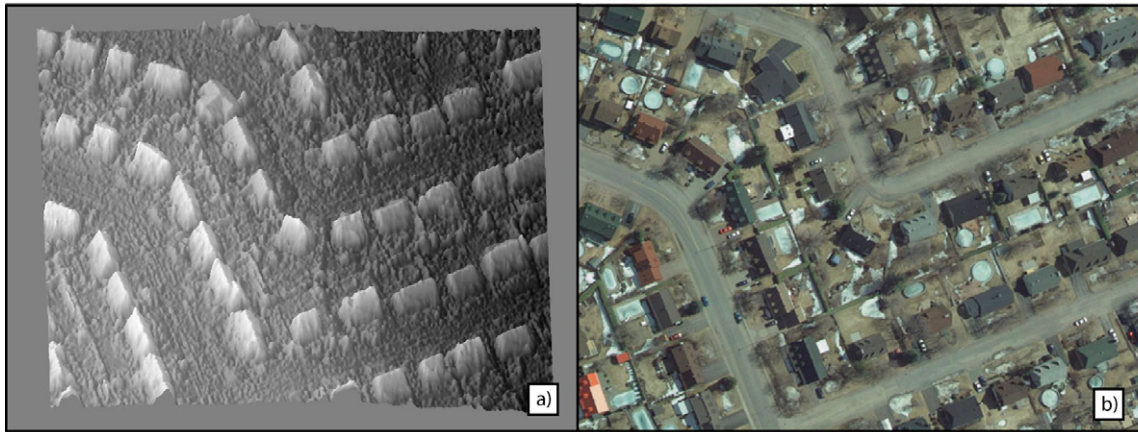
*Les restrictions apportées à l'approche SAISIE lors de son prototypage sont présentées ci-après.*

#### **4.3.1 Contexte exploré du point de vue de la couche « DONNÉES » :** *données sources*

*Le contexte exploré du point de vue des « données sources » correspond au contexte classique de production de données géospatiales par photogrammétrie. Il correspond à une acquisition d'images aériennes avec un recouvrement intra-bande de 60% et inter-bandes de 20%. Les données sources disponibles correspondent à des images aériennes couleurs (Rouge Vert Bleu) issues de caméras argentiques ou de caméras numériques. Un **Modèle Numériques de Surface** est généré automatiquement à partir des images aériennes. Nous n'avons pas considéré que des données vectorielles additionnelles ou que des MNS obtenus avec des capteurs LIDAR étaient disponibles. Les résolutions spatiales des images sont suffisamment détaillées pour permettre une saisie 3D des bâtiments pour des applications de modélisation urbaines (i.e. résolution spatiale supérieure au mètre). Nous générons systématiquement un MNS à partir des images car ces deux types de sources ont des propriétés complémentaires. Les images acquises avec des caméras photogrammétriques permettent une mesure précise des points et des structures. L'information multi-spectrale contenue dans celles-ci, particulièrement lorsque l'on utilise des caméras numériques, permet d'exploiter les propriétés spectrales des éléments cartographiés lors de l'interprétation. L'information 3D des MNS facilite la problématique de la reconstruction automatique (Brenner 2003) dans la mesure où les éléments à interpréter automatiquement sont directement dans l'espace objet, le référentiel terrestre. De plus, l'avènement des caméras numériques et l'amélioration des techniques de génération de MNS automatique impliquent que les MNS générés automatiquement aujourd'hui sont de bien meilleure qualité que dans le passé (Paparoditis et al. 2006).*

*Le MNS est généré automatiquement à partir de couples stéréoscopiques en combinant appariement photométrique (corrélation depuis l'espace objet) et recherche de surface*

optimale dans un graphe (recherche de coupe minimale). Cette approche introduite par Roy dans (Roy 99) permet d'inclure une notion d'homogénéité spatiale lors du calcul du MNS. Elle s'appuie donc sur une connaissance a priori de la continuité de la surface et permet d'améliorer la fiabilité de l'extraction du MNS. Le lecteur pourra se référer à l'annexe 2 pour une description détaillée de cette méthode de génération de MNS. Dans (Chehata, N. et al. 2005) il en trouvera une version plus avancée qui exploite des primitives géométriques 3D pour contraindre la détermination de la surface optimale. La Figure 22 ci-après est un exemple de MNS obtenu sur le site test de Charlesbourg (spécifications du site fournies dans le Tableau 1).



**Figure 22 :** Exemple de MNS obtenu en combinant appariement photométrique et recherche de surface optimale. a) MNS b) image source

Nous n'avons donc pas mis en œuvre notre système de saisie en RM avec toutes les configurations possibles au niveau des données sources disponibles. En revanche, les traitements mis en place qui exploitent des images et des MNS sont envisageables dans la majorité des contextes d'acquisitions aériennes. En effet, combiner MNS et imagerie passive est envisageable d'une part lorsque seules des images sont acquises (en générant automatiquement le MNS) mais aussi lorsque le MNS est acquis avec un capteur LIDAR car les acquisitions de données LIDAR sont généralement accompagnée d'imagerie passive.



### **4.3.2 Contexte exploré du point de vue de la couche « DONNÉES » : connaissances a priori**

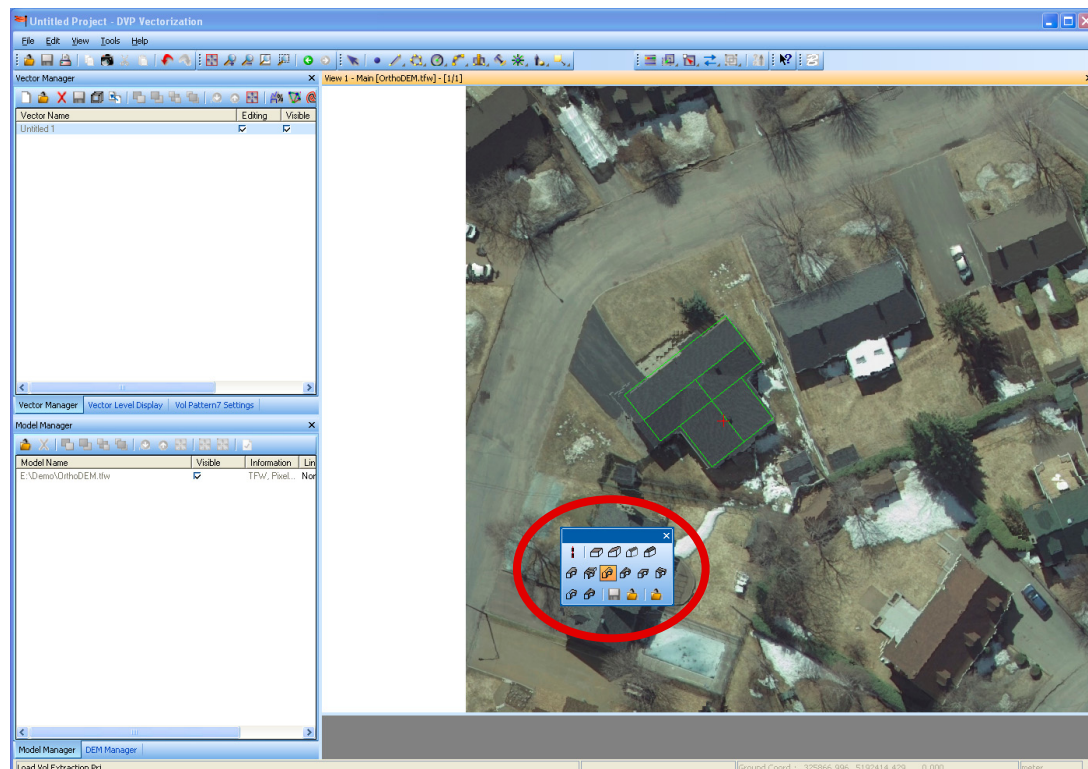
*Nous avons considéré que des connaissances a priori sur le niveau de bruit et sur la résolution des images sources étaient toujours disponibles.*

*Nous nous sommes par ailleurs intéressés à différentes connaissances a priori, relatives aux bâtiments, pouvant varier selon le contexte de chaque instance. Nous nous sommes particulièrement intéressés au cas où les PARM peuvent être utilisés et ainsi véhiculer beaucoup de connaissances a priori sur les géométries des bâtiments (ex : structure de l'emprise au sol). Nous référons à ce type de contexte entant que contexte où les PARM sont pertinents. Tous les PARM que nous avons identifiés sont orthogonaux (i.e. composés de primitives agencées orthogonalement les unes par rapport aux autres). Nous verrons que cette connaissance a priori sur la structure géométrique des bâtiments sera très utile durant la saisie semi-automatique. Nous nous sommes par ailleurs intéressés à l'exploitation de connaissances a priori, complémentaires à celles des PARM orthogonaux, sur les propriétés spectrales et sur les directions. Nous avons de plus envisagé l'utilisation de connaissances sur les géométries qui soient moins spécifiques que les PARM (ex : emprise au sol décomposable en rectangles).*

### **4.3.3 Contexte exploré du point de vue de la couche « RAISONNEMENT »**

*La couche RAISONNEMENT est composée de l'opérateur humain, de la communication homme machine et du composant de raisonnement artificiel. L'ampleur de la problématique liée au raisonnement artificiel dépend du nombre d'éléments pouvant être pris en compte (différentes sources, connaissances a priori disponibles etc.). Du fait des restrictions faites aux niveaux des données sources, des connaissances a priori et des traitements disponibles, la composante RAISONNEMENT (opérateur humain, opérateur IA et communication entre ceux-ci) a été peu explorée. Le choix des traitements a été effectué automatiquement à l'aide d'un arbre de règles. En effet, le contexte était fixe au niveau des données sources, ainsi seul le type de PARM a été pris en compte pour sélectionner les traitements. Le premier test dans l'arbre de règle correspond donc au choix d'une branche en fonction uniquement du type de PARM. Les principaux autres tests correspondent aux*

types d'emprises au sol (rectangulaires ou non) et aux différents types de structures de toits. Les traitements associés à ces différentes configurations sont décrits dans la section 4.4.1. Une « true-orthophotographie » a été utilisée comme interface pour permettre à l'opérateur humain d'interpréter la scène. Une « true-orthophotographie » est une orthophotographie réalisée en utilisant un MNS et non un MNT. L'utilisation de « true-orthophotographie » permet de limiter les erreurs de délocalisation des éléments constituant le sursol comme les bâtiments. Le fait d'utiliser une « true-orthophotographie » permet ainsi d'améliorer la précision de la localisation approximative effectuée par l'opérateur humain. Enfin, les connaissances a priori ont été introduites en enfonçant ou non des boutons de l'interface graphique. L'utilisateur pouvait ainsi interagir avec le système via une barre d'outils.



**Figure 23 :** Capture d'écran du prototype de saisie semi-automatique en RM

La Figure 23 est une capture d'écran du prototype mis en place. On y voit notamment la barre d'outils permettant de sélectionner les PARM à côté du bâtiment saisi (ellipse rouge).

#### **4.3.4 Contexte exploré du point de vue de la couche « TRAITEMENT »**

Plusieurs traitements, visant à se compléter dans le système de saisie photogrammétrique en RM, ont été mis en place. Ces traitements exploitent les différentes connaissances a priori identifiées précédemment (cf. 4.3.2, connaissances sur le bruit dans les images, connaissances sur les géométries des bâtiments formalisées dans les PARM) et peuvent être structurés en fonction de celles-ci. Nous nous sommes intéressés dans un premier temps aux cas où les PARM sont orthogonaux (cf. 4.3.2 tous les PARM qui ont été identifiés pour nos sites de test étaient orthogonaux) et où ils sont pertinents (cf. 4.3.2 contexte urbain de type pavillonnaire, compatible avec la notion de patron géométrique 3D). Nous pensons que les configurations où les PARM orthogonaux sont pertinents sont les plus favorables à l'automatisation de saisie en représentation multiple puisqu'ils permettent de véhiculer beaucoup de connaissances a priori (emprise au sol, structures de toits, agencement relatif des primitives volumétriques). Par conséquent, les possibilités d'automatisation de la saisie en RM avec des PARM orthogonaux devaient être évaluées avant d'envisager des configurations plus complexes pour la saisie en RM (i.e. où moins de connaissances a priori sont disponibles). Les traitements mis en place pour augmenter le niveau d'automatisation lors de la saisie avec les PARM orthogonaux sont présentés dans la section 4.4.

Nous nous sommes par ailleurs intéressés à des traitements exploitant des connaissances a priori, relatives aux propriétés spectrales et aux propriétés spatiales des bâtiments, afin de remplacer certaines sous-étapes, parfois responsables d'échecs, qui n'exploitaient pas de connaissances a priori. L'objectif était alors d'explorer dans quelle mesure ces connaissances additionnelles pouvaient améliorer les performances des traitements de détermination automatique des paramètres d'implantation des PARM. Nous avons notamment mis en place des traitements visant à extraire les régions d'intérêt en exploitant des connaissances a priori sur les propriétés spectrales. Nous avons par ailleurs envisagé l'exploitation d'informations sur la direction des bâtiments pour remplacer la détection automatique de la direction principale des bâtiments. Ces traitements sont présentés dans la section 4.6.

*Tel que cela a été mentionné, nous pensons que les PARM orthogonaux peuvent jouer un rôle important dans un système de saisie photogrammétrique en RM. Cependant, nous sommes conscients qu'ils ne peuvent pas traiter tous les cas de figure. Ainsi, nous avons aussi mis en place des traitements susceptibles d'être utilisés lorsque les PARM ne sont pas pertinents ou lorsqu'ils ne sont pas orthogonaux. Ces traitements, complémentaires à ceux mis en place pour les PARM orthogonaux, visent à extraire les emprises au sol, sous la forme de combinaisons de rectangles, et sont présentés dans la section 4.6.*

## **4.4 Saisie semi-automatique en RM à l'aide de PARM orthogonaux**

La détermination automatique des paramètres d'implantation d'un PARM orthogonal (i.e. paramètres du patron géométrique le plus détaillé qui le compose) intervient après que l'opérateur humain aie identifié le type de PARM et défini une localisation approximative du bâtiment. Celle-ci est utilisable en temps réel et ne requiert qu'un point approché et l'identification du PARM comme initialisation. Ces informations correspondent à des connaissances a priori sur la géométrie et sur la localisation approximative du bâtiment à extraire. Nous nous sommes limités à la détermination de paramètres approximatifs suffisamment précis pour constituer une initialisation préalable à un calcul précis. Le lecteur pourra se référer à Rottensteiner (2001) et Tseng (2003) pour une présentation d'une technique de calcul précis de paramètres d'implantation de primitives volumétriques à partir de positions initiales définies manuellement.

### **4.4.1 Stratégie dans la détermination automatique des paramètres d'implantation des PARM orthogonaux**

#### **4.4.1.1 Problématique et approches possibles**

Déterminer les paramètres du patron géométrique le plus détaillé composant le PARM est un problème d'optimisation. Plusieurs critères d'optimisation peuvent être pris en compte et plusieurs techniques d'optimisation peuvent être envisagées.

Les critères pris en compte permettent d'évaluer la pertinence de la solution (valeur des paramètres d'implantation) notamment en la comparant aux données sources. On peut par

exemple chercher à maximiser le volume occupé par le patron géométrique par rapport au MNS ou encore s'intéresser à la cohérence entre les contours détectés dans les images sources et les contours du patron géométrique. Les techniques d'optimisation pouvant être envisagées sont nombreuses. Dans Ortner et al. (2007) et Lafarge et al. (2006), les auteurs utilisent un processus ponctuel marqué pour optimiser la cohérence entre MNS et patron géométrique 3D élémentaire (i.e. composé d'une seule primitive volumétrique cf. section 3.3.1.1). Dans Jaynes et al. (2001) les auteurs utilisent la technique de descente de gradient pour optimiser la position d'un patron géométrique élémentaire par rapport au MNS. Dans Tseng (2003) les auteurs utilisent les algorithmes génétiques en se basant sur une analyse des images de contours.

Dans Maas (1999), l'auteur propose une approche basée sur l'analyse des moments d'inertie de la région d'intérêt dans un MNS. Cette approche est uniquement applicable pour des patrons géométriques dont l'emprise au sol est rectangulaire (i.e. patron géométrique élémentaire). L'analyse des moments d'inertie offre néanmoins l'avantage d'être rapide d'exécution et a été adaptée dans d'autres travaux tel que Gerke et al. (2001) ou encore Vinson S. et Cohen L. (2001) pour décomposer des emprises au sol de bâtiments en rectangles. Tel que mentionné dans Gerke et al. (2001), où les auteurs cherchent à optimiser la position de rectangles 2D, la détermination de la direction à l'aide des moments d'inertie s'avère instable si l'emprise au sol du bâtiment est proche d'un carré. Selon notre expérience, la présence de bruit dans les contours de la région d'intérêt utilisée affecte aussi la détermination de la direction. Les auteurs de Gerke et al. (2001) proposent alors d'optimiser ce critère dans un deuxième temps après avoir déterminé les autres paramètres du rectangle à partir des moments d'inertie.

La vitesse d'exécution des traitements permettant de déterminer les paramètres d'implantation de patrons géométriques est primordiale dans notre contexte de saisie semi-automatique. Celle-ci ainsi que la fiabilité de ces traitements sont très liées à la qualité des initialisations et au nombre de paramètres devant être optimisés. Plusieurs des PARM orthogonaux identifiés sont composés de patrons géométriques complexes (i.e. composés de plusieurs primitives volumétriques) ce qui implique que les paramètres à optimiser peuvent être nombreux. De plus, la seule initialisation que nous envisageons est un point

approché. Les techniques existantes d'optimisation permettant de déterminer les paramètres de patrons géométriques ne sont donc pas adaptées à nos besoins car elles requièrent soit une initialisation plus complexe qu'un point approché ou encore qu'elles ne sont pas utilisables pour des patrons géométriques composés (plusieurs primitives volumétriques) en respectant notre contrainte de temps d'exécution.

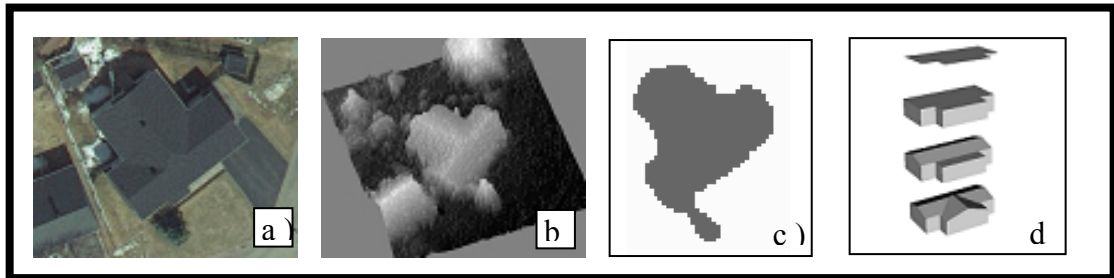
#### 4.4.1.2 Approche proposée

Nous avons proposé une nouvelle approche exploitant imagerie passive et MNS pour déterminer les paramètres d'implantation des patrons géométriques. Les étapes qui composent cette stratégie sont détaillées dans le diagramme d'activité présenté à la Figure 25. La stratégie mise en place pour déterminer les paramètres d'implantation d'un PARM orthogonal est de considérer le patron géométrique le plus détaillé qui le compose comme une combinaison de primitives. La recherche des paramètres d'implantation de ce patron géométrique passe alors par la détermination des paramètres d'implantation de chacune des primitives qui le composent. Ceci permet de décomposer le problème d'optimisation et ainsi de le résoudre rapidement. Cette stratégie repose sur les étapes suivantes : (1) déterminer une région d'intérêt dans l'espace terrain incluant le bâtiment à extraire, (2) extraire la meilleure combinaison de primitives volumétriques connectées entre elles correspondant au patron géométrique (3) déduire les paramètres du patron géométrique 3D à partir des paramètres d'implantation de chacune des primitives et de leurs relations de connectivités.

La délimitation de la région d'intérêt (étape 1) se fait facilement en classifiant l'occupation du sol en deux catégories (sol et sursol) et en retenant la région de sursol dans laquelle se trouve le point approché. La classification de l'occupation du sol est réalisée par seuillage d'un MNS normalisé (Weidner, 1997; Ameri, 2000). Le MNS normalisé est obtenu en soustrayant le Modèle Numérique de Terrain au MNS. Le MNT est déduit du MNS à l'aide d'opérations de morphologie mathématique (Weidner, 1997, Sternberg S.R. 1983).

La région d'intérêt ainsi obtenue est décrite sous forme raster dans la mesure où les MNS sont décrits sous la forme de grille régulière raster. Le seuillage est paramétré en s'appuyant sur une connaissance a priori de la hauteur minimale des bâtiments. Un exemple

d'image source, de MNS normalisé, de PARM orthogonal ainsi que de région d'intérêt obtenue est présenté ci-après Figure 24. Cet exemple est repris par la suite pour illustrer certains traitements. Nous y référons en tant qu'**exemple référence**. La plupart des traitements seront illustrés en s'appuyant sur cet exemple référence.



**Figure 24 :** Exemple de bâtiment extrait sur le site de Charlesbourg, de PARM orthogonal et de données extraites. a) image source b) MNS normalisé c) Région d'Intérêt d) PARM correspondant

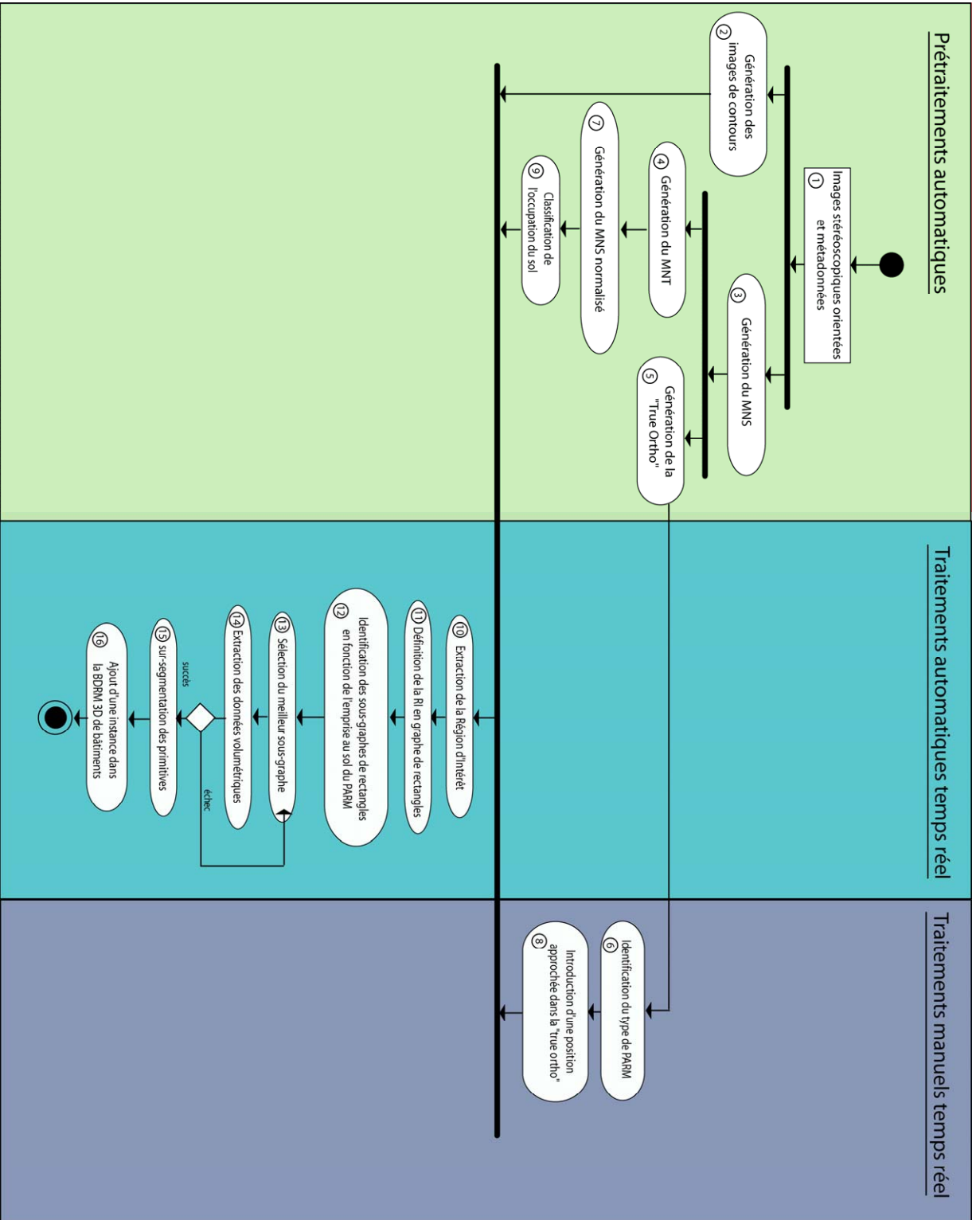
La déduction des paramètres du patron géométrique 3D à partir des paramètres de chacune des primitives qui le compose, (i.e. étape 3) correspond alors à un changement de système de coordonnées dans le référentiel terrestre. On passe alors d'un système cartésien à un système paramétrique associé au patron géométrique 3D.

L'étape 2, la recherche de la meilleure combinaison de primitives volumétriques, correspond à la phase la plus complexe. Elle est réalisée automatiquement en temps réel. Nous avons proposé une approche qui constitue une contribution à ce domaine de recherche. Celle-ci est décomposable en 3 sous-étapes : 2.1) expression de la région d'intérêt sous la forme d'une combinaison de rectangles connectés, 2.2) détection de la meilleure combinaison de rectangles qui correspond à l'emprise au sol du patron géométrique 3D, 2.3) extrusion et segmentation. Les deux sous-étapes 2.2 et 2.3 sont répétées si l'extrusion échoue (sous-étape 2.3) et tant que la sous-étape 2.2 n'échoue pas. L'ensemble du processus est représenté dans le diagramme UML (Figure 25).

L'étape 2 traite donc successivement l'extraction des informations planimétriques d'emprise au sol et l'extrusion. Cette approche permet de réduire la taille des espaces de recherche. Elle s'appuie sur le fait que la détection de régions d'intérêt à l'aide de MNS est

fiable. Par ailleurs, la réduction des espaces de recherche s'inscrit dans une démarche visant à mettre en place des traitements utilisables en temps réel. En effet, le caractère semi-automatique du processus de saisie en RM proposé contraint le choix des traitements automatiques à ceux exécutables en temps réel.





**Figure 25 :** Processus de détermination des paramètres d'un PARM

## **4.4.2 Expression de la région d'intérêt sous la forme d'une combinaison de rectangles**

Cette partie correspond à la sous-étape 2.1 décrite précédemment, elle vise à convertir la représentation raster de la région d'intérêt sous la forme d'une combinaison de rectangles, conservant les propriétés topologiques de la région d'intérêt. Nous présentons ci-après le principe de l'algorithme que nous avons proposé et qui constitue une contribution. Les deux principales étapes impliquées, l'extraction de la direction principale et la génération des rectangles, sont ensuite explicitées.

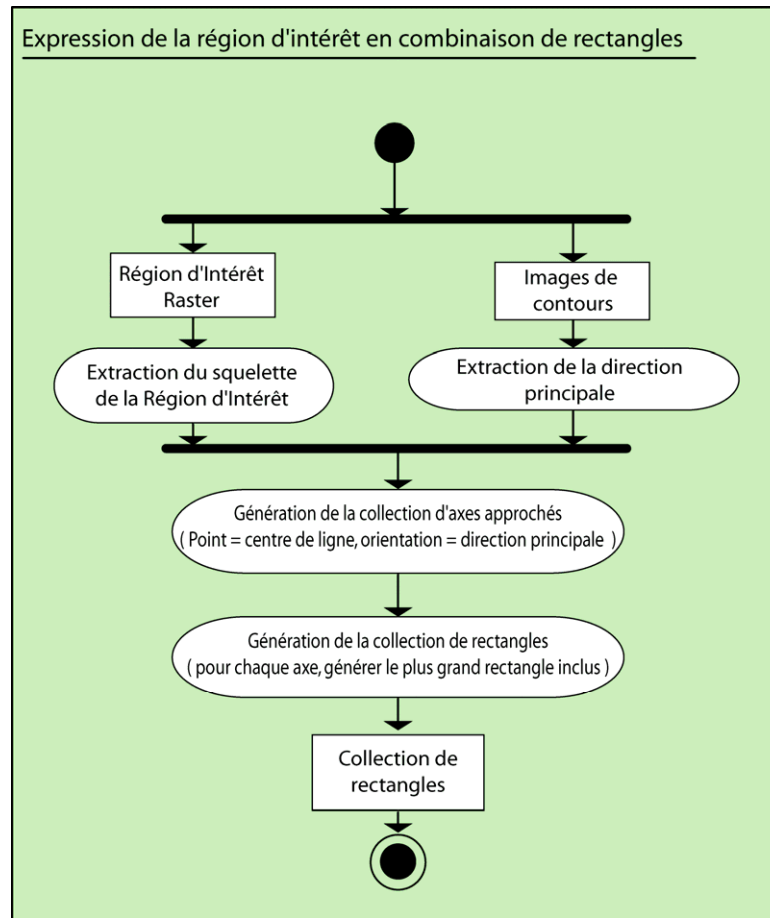
### **4.4.2.1 Principe de la décomposition en rectangles orthogonaux**

L'extraction du squelette d'une forme (la région d'intérêt) dans une image est un traitement qui a motivé énormément de travaux (Parker 1997). Il permet de décrire la topologie d'une forme avec une collection de lignes (définies par deux points) connectées entre elles (Lam et al. 1992). La définition de la notion de squelette varie cependant selon l'application visée. Dans notre contexte, nous nous intéressons à une notion de squelette représentant les axes principaux de la forme et ignorant les faibles perturbations des contours de celle-ci. Le lecteur pourra se référer à Lam et al. (1992) et Parker (1997) pour une comparaison des traitements débouchant sur l'obtention de squelettes.

L'extraction du squelette, d'une forme décomposable en rectangles, permet donc en théorie de décrire celle-ci avec une collection de rectangles. Chaque ligne du squelette correspond à un axe de rectangle et chaque point à une relation de connexion entre deux rectangles. En pratique, les squelettes obtenus sont affectés par la présence de bruit sur les contours de la forme (Parker 1997). Le bruit présent sur les contours des régions d'intérêt se répercute sur la position des axes et principalement au niveau de leur orientation.

Nous avons proposé une stratégie mixte (cf. structuration des approches selon les sources utilisées 2.3.2) pour décrire la région d'intérêt en combinaison de rectangles. Celle-ci s'appuie sur le MNS (utilisé pour générer la région d'intérêt sous forme raster) et sur les images sources. Les images de contours sont déduites des images sources en utilisant le filtre de Canny (Canny 1986) (cf. étape 2 dans le diagramme UML de la Figure 25 : génération des images de contours). Notre approche propose dans un premier temps

d'extraire les axes des rectangles composant le graphe par squelettisation de la région d'intérêt et par analyse des images de contours. Ces axes sont utilisés dans un deuxième temps pour générer des rectangles. Cette stratégie a été motivée par le fait que les directions des contours extraits dans les images sont précises et que la détection de la région d'intérêt correspondant aux bâtiments dans le MNS est fiable. Nous proposons (1) d'extraire les positions approximatives des axes par squelettisation de la région d'intérêt (2) de définir la direction des axes en s'appuyant sur les images de contours (3) de délimiter les rectangles autour des axes approximatifs en s'appuyant sur la description raster de la région d'intérêt. Les images de contours ne peuvent pas être utilisées pour délimiter les rectangles directement. En effet, il serait nécessaire de distinguer les contours correspondant aux limites d'emprise au sol, des contours correspondant aux structures intérieures de toit. Les contours sont en revanche pris en compte lors de la segmentation. A ce stade, les contours correspondant aux structures de toit peuvent être ignorés en se basant sur les résultats de l'extrusion. La stratégie visant à exprimer la région d'intérêt sous la forme d'une combinaison de rectangles est présentée dans le diagramme UML d'activité de la Figure 26.



**Figure 26 :** Extraction d'une description de la région d'intérêt sous la forme d'un graphe de rectangles

#### 4.4.2.2 Détermination de la direction principale du bâtiment courant

La direction principale du bâtiment à extraire peut être déduite des directions d'arêtes 3D horizontales. Il faut alors retenir la direction (dans le plan XY) la plus fréquente parmi les directions des arêtes 3D horizontales qui sont à l'intérieur de la région d'intérêt. Cette stratégie s'appuie sur la connaissance a priori que les arêtes 3D horizontales composant les primitives volumétriques sont dans la direction principale du bâtiment. Cette connaissance a priori est introduite via l'identification du PARM orthogonal. Une telle stratégie requiert de générer des arêtes 3D. Ceci peut être fait à partir des images de contours en utilisant des techniques d'appariement de primitives géométriques (Featured Based Matching).

Une autre stratégie consiste à analyser directement les contours au voisinage et à l'intérieur de la région d'intérêt. Les images de contours doivent alors être ortho-rectifiées au

voisinage et à l'intérieur de la région d'intérêt en utilisant une altitude fixe (pour ne pas affecter la direction des contours). Celle-ci correspond à l'altitude moyenne du MNS dans la région d'intérêt. Cette deuxième stratégie est utilisable si les images exploitées ont été obtenues avec une focale relativement longue ou que les variations de hauteur des structures de toit sont relativement faibles (par rapport aux dimensions planimétriques du bâtiment). En effet, les variations d'altitude à l'intérieur de la région d'intérêt ne doivent pas impliquer de délocalisation des contours dans les orthophotos qui les fassent sortir de la région d'intérêt. Nous avons utilisé cette deuxième stratégie qui est plus simple à mettre en œuvre et plus rapide d'exécution que celle exploitant des techniques d'appariement géométrique. En effet, une approche basée sur l'exploitation d'arêtes 3D nécessiterait aussi d'extraire les contours dans les images sources mais en plus d'apparier ces contours. Le lecteur trouvera dans Baillard et al. (1999) une description d'une approche d'appariement de contours et une illustration des difficultés impliquées.

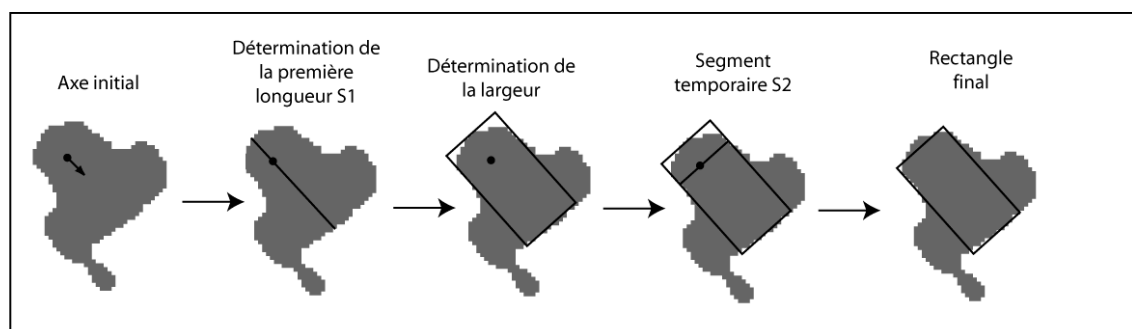
#### **4.4.2.3 Génération des rectangles à partir des axes approchés**

Chaque ligne du squelette est utilisée pour générer deux axes approchés (un axe approché est défini par un point et une orientation). Le point définissant les axes correspond au centre de la ligne du squelette. Les directions correspondent respectivement à la direction principale du bâtiment courant et à la direction principale plus 90 degrés.

On utilise ensuite pour chaque axe une heuristique permettant d'estimer le plus grand rectangle orienté, majoritairement inclus dans la région d'intérêt, qui possède le point de l'axe. Pour ce faire, on définit un rectangle avec un point et cinq paramètres : orientation, demi-longueur avant, demi-longueur arrière, demi-largeur droite, demi-largeur gauche.

L'heuristique est décomposée en 3 étapes :

1. Détermination des demi-longueurs avant et arrière. (Figure 27, b)) :
  - a. Intersection de la droite correspondant à l'axe approché avec les limites de la région d'intérêt
  - b. Création d'un segment, S1, à partir des deux points intersections
2. Détermination des demi-largeurs droite et gauche
  - a. Analyse statistiques (premier quartile) des distances des points de contours de la région d'intérêt par rapport à S1 (distance orthogonale).
  - b. Rq : Seuls les points de contours se projetant sur le segment sont pris en compte.
3. Ajustement des longueurs avant et arrière
  - a. Création d'un segment S2, à partir d'un point (point de l'axe), d'une direction (la direction de l'axe plus 90 degrés), d'une demi-longueur avant (la demi-largeur gauche du rectangle) et d'une demi-longueur arrière (la demi-largeur droite du rectangle).
  - b. Analyse statistique (premier quartile) des distances des points de contours de la région d'intérêt par rapport à S2 (distance orthogonale)



**Figure 27 :** Génération d'un rectangle à partir d'un axe approché

### 4.4.3 Sélections des rectangles optimums pour définir l'ébauche d'emprise

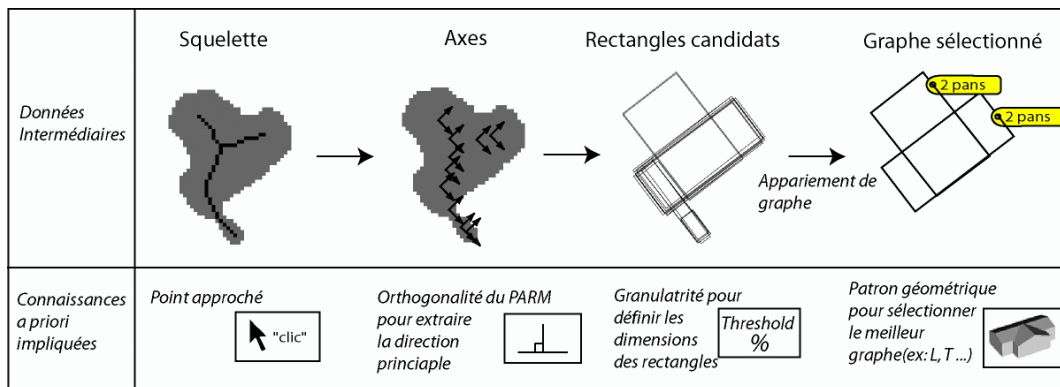
La sélection de la meilleure combinaison de rectangles, qui correspond à l'emprise au sol du patron géométrique le plus détaillé, intervient après que la région d'intérêt aie été exprimée sous la forme d'une combinaison de rectangles. Elle s'appuie sur une connaissance a priori relative à l'emprise au sol du bâtiment (ex : emprise en L ou en T). Cette connaissance a priori, spécifique à l'instance, est introduite via l'identification du PARM et l'introduction du point approché (le point approché permet d'associer le PARM à la région d'intérêt). La détection de la meilleure combinaison de rectangles se fait en comparant la géométrie de la région d'intérêt et la géométrie de l'emprise au sol du patron géométrique.

La comparaison des géométries (région d'intérêt et emprise au sol du patron géométrique) est effectuée en les décrivant sous la forme de graphes. L'utilisation de graphes permet en effet d'avoir des structures propices à l'analyse. Chaque nœud du graphe correspond à un rectangle et chaque connexion du graphe correspond à une relation topologique de connexion entre deux rectangles. La nature des connexions est définie en fonction des positions relatives des axes des rectangles. Par commodité, nous parlerons de « graphe de rectangles » dans la suite de cette thèse pour référer à cette notion.

La sélection des rectangles optimums pour définir l'ébauche d'emprise se fait 1) en exprimant la collection de rectangles sous la forme d'un graphe de rectangles 2) en cherchant, dans le graphe de rectangles, le meilleur sous-graphe dont la structure correspond à celle du patron géométrique et qui possède le point approché introduit par l'opérateur. Ceci est un problème de recherche d'isomorphisme de graphes ou de sous-graphes. Dans le cas de l'exemple référence Figure 28, on cherche le meilleur sous graphes qui se connecte en T et qui recouvre le point approché.

La fonction de score, utilisée pour évaluer un sous-graphe, correspond à l'aire de l'emprise au sol générée par la combinaison des rectangles (OU logique, parfois appelé OU inclusif). On notera que des fonctions intégrant d'autres facteurs pourront être envisagées par la suite. Il serait possible par exemple de prendre en compte les différences entre les structures de

toit théoriques des primitives et la forme de la surface du modèle numérique dans la région d'emprise au sol définie par la primitive. Ce type de critère est par exemple pris en compte dans (Ortner et al. 2007) où les auteurs cherchent à positionner des primitives volumétriques. La Figure 28 représente les deux rectangles sélectionnés dans le cas de l'exemple de bâtiment en forme de T.



**Figure 28 :** Processus d'extraction et de sélection de rectangles dans le cas de bâtiment en forme de T

#### 4.4.4 Extrusion et segmentation

##### 4.4.4.1 Introduction

A ce stade, la combinaison de rectangles retenue décrit uniquement l'emprise au sol du bâtiment et peut inclure des éléments autres que le bâtiment à extraire (ex : autres bâtiments mitoyens, arbres). L'étape d'extrusion et de segmentation permet d'extraire les informations volumétriques et d'exclure les éléments autres que le bâtiment à extraire. L'étape d'extrusion s'appuie sur la connaissance a priori du type de structure de toit de chacune des primitives constituant le PARM. Cette information est introduite via l'identification du PARM par l'opérateur et est associée à chacun des rectangles lors de l'appariement de graphe de rectangles (un rectangle plus une connaissance sur le type de structure de toit donnera une primitive volumétrique). Ainsi, chaque primitive est extrudée et segmentée en sélectionnant le traitement en fonction de son type (ex : 1 pan, deux pans).



L'extrusion vise d'une part à extraire la structure intérieure de toit des primitives volumétriques et d'autre part à déterminer la hauteur de celle-ci.

Les traitements d'extrusion sont spécifiques à chacun des quatre types de primitives volumétriques que nous avons retenus (cf. Figure 10). Ils sont sélectionnés en fonction du type de primitive. Ils exploitent tous des faces 3D extraites préalablement pour déterminer les paramètres volumétriques et pour segmenter la primitive. Chaque rectangle élémentaire, composant le sous-graphe sélectionné préalablement, est extrudé pour générer une primitive volumétrique qui elle-même va être segmentée. Une première segmentation est effectuée en s'appuyant sur l'analyse de la topographie de la surface de la primitive volumétrique, puis dans un deuxième temps, une seconde segmentation est réalisée, en analysant les contours.

La segmentation d'une primitive vise à la délimiter en identifiant des discontinuités topographiques et radiométriques (cf. délimitation d'une primitive volumétrique section 2.3). En effet, l'analyse seule de la région d'intérêt ne permet pas de délimiter une primitive.

La position d'une primitive dans le graphe de rectangle est prise en compte lors de son extrusion et de sa segmentation. On cherche en effet à définir la primitive volumétrique tout en maintenant la cohérence du graphe avec le patron géométrique. Tel que défini à la section 4.4.3, pour qu'un graphe soit cohérent avec le patron géométrique, il faut d'une part que les rectangles qui le constituent forment une emprise au sol similaire à celle du patron géométrique (ex : forme de T) et d'autre part qu'il chevauche le point approché.

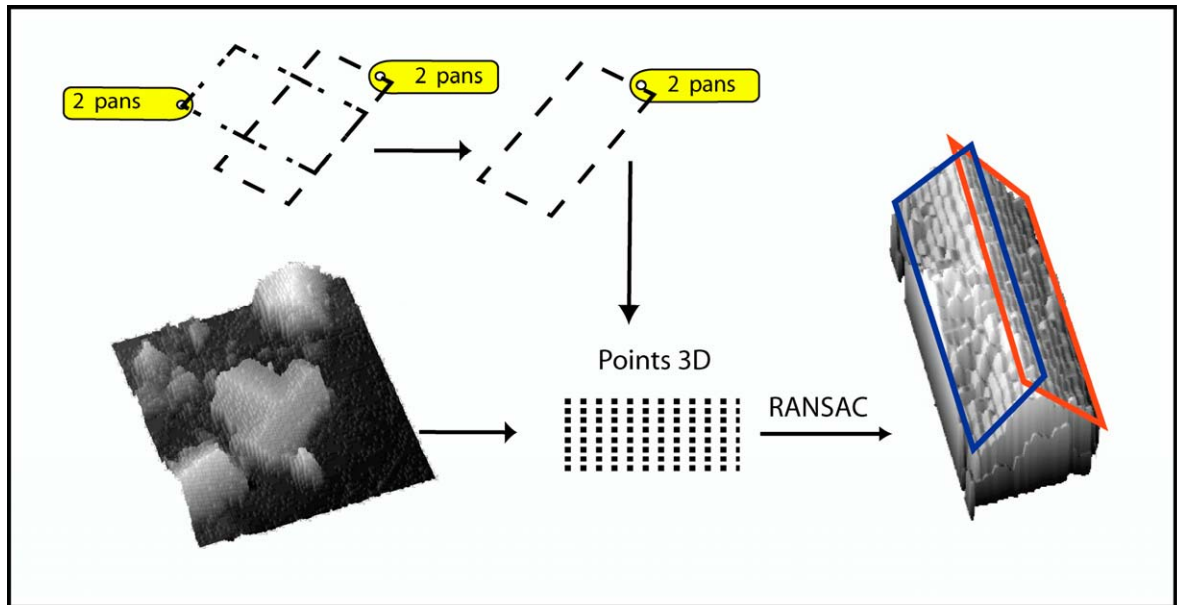
Les traitements d'extrusion et de segmentation sont présentés ci-après pour chacun des types de primitives. La hauteur de chaque bâtiment est déduite en projetant verticalement les contours des toits sur le MNT.

#### **4.4.4.2 Extraction des faces 3D :**

Les faces sont obtenues à partir du MNS. Un nuage de points 3D est créé, à partir du MNS, en générant une grille régulière (les coordonnées XY des points sont définis par la grille, la coordonnée Z est déduite du MNS). Des plans sont extraits, à partir de ces points, selon une

approche RANSAC (Fischler and Bolles 1981), suivie d'une compensation par moindres carrés. L'algorithme de RANSAC est présenté dans l'annexe 1. La délimitation d'une face est effectuée à partir des points qui ont été utilisés pour calculer l'équation du plan. On utilise la boîte englobante orientées (dans la direction principale) de ces points pour délimiter la face. La boîte englobante orientée est par ailleurs élargie en fonction de la précision planimétrique du MNS et de l'échantillonnage des points. La Figure 29 représente en 3D la région du MNS qui correspond à une primitive volumétrique à deux pans extraite de l'exemple référence. Les deux faces extraites y sont représentées. Cette primitive correspond à la barre horizontale de la forme en T de l'exemple référence.

RANSAC est une approche fiable (Fischler and Bolles 1981) qui peut facilement être mise en œuvre pour détecter des plans. Toutefois, des réglages inadaptés ou des configurations de points particulières peuvent conduire à des échecs. En effet, dans notre cas de figure (points générés selon une grille régulière), l'utilisation d'un seuil trop faible, définissant le critère de rejet d'un point (i.e. distance maximale du point au plan pour que le point soit considéré comme valide), conduira à la détection de plans verticaux parallèles aux directions de la grille. L'utilisation d'un seuil trop grand affectera la précision du meilleur plan détecté dans la mesure où des points qui n'appartiennent pas au plan seront pris en compte lors de la compensation par moindres carrés. De plus, ces points ne seront pas utilisés ultérieurement pour déterminer les plans auxquels ils appartiennent réellement. L'extraction efficace des faces s'appuie donc sur une connaissance de la précision du MNS utilisé.

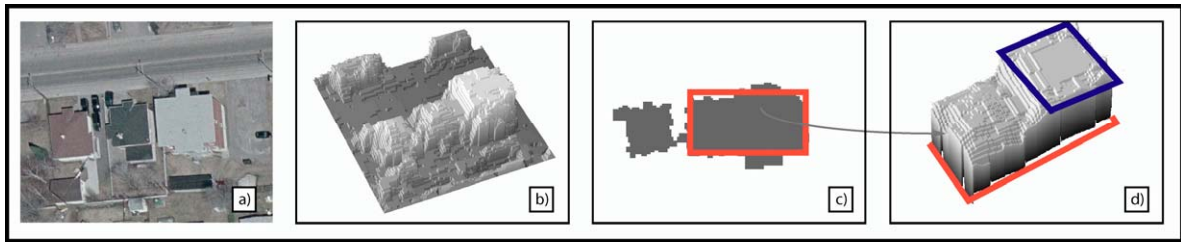


**Figure 29 :** Exemple d'extraction de faces

#### 4.4.4.3 Extrusion et segmentation de primitives à un pan

Pour réaliser l'extrusion de primitives à un pan, on sélectionne, parmi toutes les faces extraites dans la région correspondant à l'emprise au sol de la primitive, la face qui maximise une fonction de score et qui respecte les contraintes de cohérence du graphe (cf. section 4.4.4.1). On peut optionnellement contraindre la sélection aux plans horizontaux dans le cas où le toit doit être horizontal. Nous avons utilisé le nombre de points ayant servi au calcul de l'équation du plan comme fonction de score.

Cette face est utilisée pour segmenter l'emprise au sol (recherche de discontinuité topographique) en conservant uniquement la partie commune au rectangle et à la face (projection orthogonale au sol du polygone délimitant la face). La Figure 30 représente le MNS correspondant à la région d'un rectangle. Les lignes rouges représentent le rectangle initial. Le rectangle bleu représente la face horizontale retenue et servant à la segmentation.

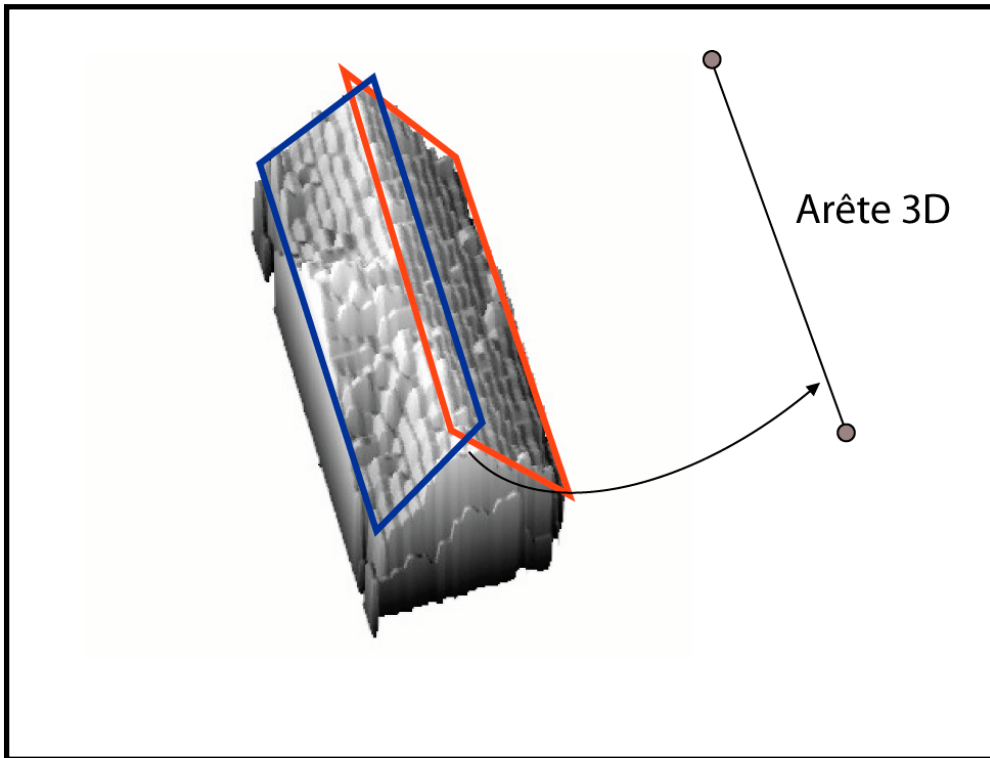


**Figure 30 :** Extrusion et segmentation d'une primitive volumétrique à un pan, extrait du site de Beauport. a) image source b) MNS c) région d'intérêt et rectangle initial d) rectangle après segmentation

#### 4.4.4.4 Extrusion et segmentation de primitives à deux pans

Chaque paire de faces qui s'intersectent génère une arête 3D. Ces arêtes sont ensuite classifiées en deux catégories : crêtes et discontinuités. Une arête est une crête si ses deux points ont une coordonnée Z supérieure à celle des centres des faces. Les arêtes qui ne sont pas de type crête sont de type discontinuité.

La meilleure ligne de crête est ensuite recherchée parmi les arêtes de type crête dont la direction correspond à la direction principale. Elle est ensuite utilisée pour déduire les paramètres de la structure de toit à l'intérieur de la primitive (ex : hauteur de l'axe de toit). La meilleure ligne de crête est sélectionnée en fonction du nombre de points utilisés pour déterminer les faces l'ayant générée. On retient celle qui a été générée avec le plus grand nombre de points.



**Figure 31 :** Extrusion d'une primitive volumétrique à deux pans

L'emprise au sol est segmentée selon le même principe que les primitives à un pan. On retient cette fois la partie commune au rectangle initial et à la boîte englobante orientée des emprises au sol des deux faces qui ont été utilisées pour générer l'arête 3D sélectionnée.

#### 4.4.4.5 Extrusion et segmentation de primitives quatre pans

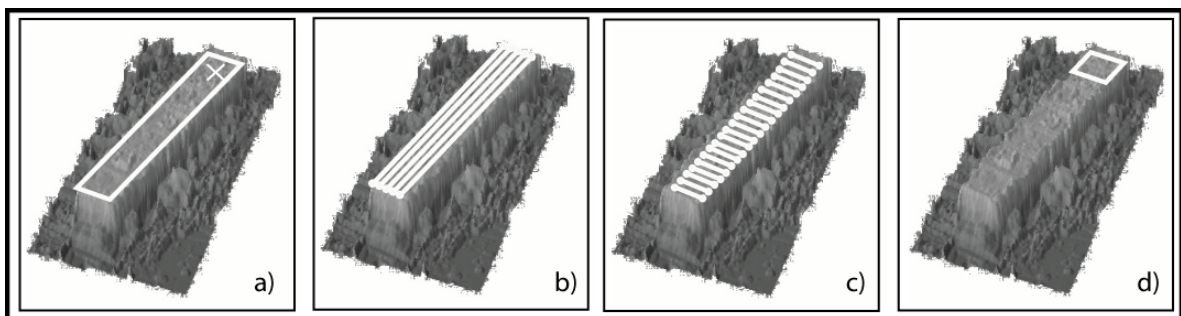
Une primitive à quatre pans est traitée comme une primitive à deux pans particulière. Le paramètre supplémentaire, correspondant au décrochement de la crête, est déterminé en intersectant la ligne de crête obtenue avec des faces normales (faces dont un vecteur normal est coplanaire avec la ligne de crête).

#### 4.4.4.6 Seconde segmentation des emprises au sol : une approche « contours »

Une primitive volumétrique est délimitée par sa forme 3D (discontinuités de sa topographie, par exemple les murs impliquent de fortes variations altimétriques dans le MNS), mais aussi par la présence de certains changements de propriétés spectrales (ex : discontinuité de l'intensité, changement de texture). A titre d'exemple, l'image de la Figure 32 correspond selon notre définition à 7 primitives, de type toit plat (a) dans la Figure 10), côtes à côtes (en ne tenant pas compte des faibles décrochés aux deux extrémités du groupe de bâtiments). Le polygone en pointillé représente les limites de la primitive à toit plat situé au milieu du bloc de bâtiment. Il faut donc considérer les discontinuités topographiques, mais aussi les discontinuités radiométriques pour extraire une primitive volumétrique.



**Figure 32 :** Exemple de 7 primitives contiguës



**Figure 33 :** Segmentation basée sur une approche contours. a) face horizontale initiale b-c) arêtes 3D candidates d) face après segmentation.

Figure 33a) représente la face extraite lors de l'extrusion d'une primitive volumétrique à toit plat sans tenir compte des discontinuités radiométriques. Cet exemple correspond à l'image référence Figure 32.

La segmentation selon une approche contours se fait en cherchant les arêtes 3D (dans l'espace objet) qui délimitent la primitive volumétrique en formant une emprise au sol rectangulaire. Plus précisément, on cherche des arêtes 3D (1) qui sont orientées selon la direction principale du bâtiment (2) qui sont sur les faces sélectionnées lors de l'étape précédente (3) dont les longueurs correspondent aux dimensions initiales du rectangle à extruder. Pour ce faire, on discrétise l'espace de recherche (surface des faces, direction principale..) et on génère ainsi des arêtes candidates. Le pas d'échantillonnage pour discrétiser est défini en fonction des résolutions des images et du MNS. Les Figure 33b) et Figure 33c) représentent les arêtes 3D candidates ainsi générées. La pertinence des arêtes 3D candidates est ensuite évaluée en les projetant dans les images de contours et en les comparant aux contours de celles-ci. Le nombre de pixels détectés comme contours au voisinage de la projection des arêtes 3D est directement utilisé comme fonction de score.

La segmentation basée sur une approche contours revient alors à rechercher les arêtes 3D dont les scores sont supérieurs à un seuil. Cette recherche est effectuée dans les quatre directions (direction principale modulo  $\pi/2$ ) autour du point approché (représenté par la croix sur la Figure 33a)) en allant de l'arête la plus proche à la plus lointaine. Pour chacune des quatre directions, la recherche est interrompue dès qu'une arête avec un score supérieur au seuil est identifiée. Si le point approché n'est pas à l'intérieur de la primitive volumétrique (i.e. ce qui peut arriver si le patron géométrique 3D est composé de plusieurs primitives volumétriques) un point est défini automatiquement contextuellement (ex : si le toit est à deux ou quatre pans, on utilise un point sur l'axe de crête).

## 4.5 Exploitation de connaissances additionnelles

Le prototype de saisie semi-automatique mis en place exploite uniquement des connaissances a priori qui lui sont nécessaires : des connaissances sur les géométries des objets géographiques à extraire (PARM), des connaissances sur les caractéristiques spatiales (positions approchées du bâtiment) et des connaissances sur les sources utilisées (précision du MNS, MNT, granularité des éléments pertinents dans les images sources...). Nous avons par ailleurs exploré l'intérêt lié à l'exploitation d'autres connaissances a priori, spécifiques à l'instance, faciles à introduire ou introduites dans le processus pour améliorer l'automatisation. Plus spécifiquement, nous nous sommes intéressés aux informations relatives à la direction du bâtiment à extraire et à ses propriétés spectrales. Ces deux axes visent à identifier des traitements pouvant être utilisés en fonction de connaissances spécifiques à l'instance selon l'approche théorique proposée (Instance Driven SASS). Ils sont discutés ci-après.

### 4.5.1.1 Informations spectrales : la couleur

Les images aériennes acquises sont généralement des images couleur (bandes Rouge Vert et Bleu). Elles peuvent comporter des bandes additionnelles couvrant par exemple le proche infra-rouge. C'est le cas par exemple des principales caméras numériques grands formats actuelles utilisées en photogrammétrie (ex : Vexcel UltracamX, ZeissIntergraph DMC). Les images disponibles sont donc généralement multi-spectrales. L'utilisation des informations multi-spectrales dans l'automatisation des processus de saisie de bâtiments a déjà été mise en œuvre. Dans Henricson (1998), elles sont par exemple utilisées pour améliorer la robustesse des processus d'appariements géométriques. Dans Zebedin et al. (2006), elles permettent d'exclure la végétation des éléments du sursol (utilisation par exemple du proche infra-rouge pour caractériser la végétation). Dans ces deux exemples, il s'agissait d'une stratégie mise en place pour l'ensemble du jeu de données.

Nous avons aussi voulu évaluer l'intérêt de connaissances a priori sur les propriétés spectrales qui seraient (1) spécifiques à certaines occurrences (2) faciles à introduire. Nous avons en effet envisagé l'utilisation d'information sur la couleur des bâtiments à extraire qui pourrait être facilement introduite (ex : ce bâtiment est rouge, la teinte de ce bâtiment



est différente de son voisinage). Le fait d'exprimer les caractéristiques spectrales sous la forme de couleur, et plus spécifiquement de s'intéresser à la teinte permet de les décrire de manière intuitive pour un opérateur humain. Avant de chercher précisément le type de traitement tirant le plus profit de ce type de connaissance, nous avons voulu évaluer avec quelle fréquence cette information était susceptible de se présenter sur nos sites de tests. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la teinte et avons quantifié le nombre de fois où celle-ci permettait de discriminer le bâtiment à extraire ou une des primitives le composant afin de déterminer avec quelle fréquence cette information était vraie. Nous avons utilisé une distance angulaire sur la teinte comme critère de segmentation afin d'exprimer la différence colorimétrique entre les éléments dans les images et d'obtenir une région correspondant au bâtiment ou à la primitive volumétrique à extraire. La segmentation a été réalisée par agrandissement de région (Horaud et Monga 1995) sur une « true-ortho » (orthophotographie générée avec le MNS). Les cas où cette approche débouchait sur une délimitation valide de l'emprise au sol du bâtiment ont été dénombrés manuellement et sont présentés dans le Tableau 3 du chapitre 5.

#### **4.5.1.2 Information sur la direction**

Le processus de saisie en représentation multiple implique dans certains cas de disposer de connaissances sur la direction principale du bâtiment. En effet, lorsqu'un groupe de  $N$  bâtiments alignés, devant respecter une même règle d'agrégation, est saisi, une information sur la direction est disponible pour les  $N-1$  derniers bâtiments (cf. mode opératoire de saisie proposé). Nous avons envisagé d'exploiter cette information pour remplacer les traitements débouchant sur la détermination automatique de la direction principale décrite au paragraphe 4.4.2.2. L'intérêt de ce remplacement dépend donc essentiellement de la fiabilité des traitements automatiques (utilisés pour obtenir la direction) comparé au nombre de fois où cette information est disponible a priori. Ces deux aspects ont été quantifiés sur nos trois sites tests et sont présentés ci-après (Tableau 3, chapitre 5).

## **4.6 Investigation dans des contextes où les PARM ne sont pas orthogonaux ou pas applicables**

### **4.6.1 Objectifs et principe de fonctionnement**

Dans cette section, nous nous intéressons à l'utilisation de traitements automatiques complémentaires pour supporter la saisie photogrammétrique en représentation multiple dans des contextes où les PARM ne sont pas orthogonaux ou encore lorsqu'ils ne sont pas utilisables. En effet, tel que mentionné au paragraphe 3.3.1.2, nous sommes conscients que les PARM ne peuvent être utilisés pour tous les types de bâtiments et que par ailleurs ils peuvent ne pas toujours être orthogonaux. Par conséquent, d'autres approches doivent être envisagées pour compléter un système de saisie photogrammétrique en représentation multiple.

Dans cette perspective, nous pensons que l'automatisation de l'extraction des emprises au sol des bâtiments, sans supposer que celles-ci sont composées de rectangles orthogonaux, est un enjeu important. Nous avons développé une nouvelle approche d'extraction automatique des emprises au sol. Celle-ci est applicable si les emprises au sol des bâtiments sont décomposables en rectangles connectés les uns aux autres et si les éléments définissant les structures de toits (arêtes, contours) à l'intérieur d'un rectangle sont dans sa direction principale (à 90 degrés près). Elle fait par ailleurs appel à une connaissance sur la granularité des contours de l'emprise au sol. Elle débouche sur une description en graphe de rectangles. En revanche, contrairement aux traitements mis en place pour les PARM orthogonaux sélectionnés et présentés paragraphe 4.4, ces rectangles n'ont pas à être agencés orthogonalement. L'intérêt de cette approche d'extraction d'emprises au sol sous la forme de combinaisons de rectangles est donc double. Elle peut, d'une part, jouer un rôle dans le cadre de l'utilisation de PARM non orthogonaux en remplaçant l'extraction du graphe de rectangles orthogonaux (paragraphe 4.4.2) dans le processus proposé dans la section 4.4. Elle peut, d'autre part, servir de base pour des approches n'utilisant pas de PARM en permettant une extraction automatique d'emprises au sol sous une forme propice à l'analyse.

Cette méthode exploite conjointement images et MNS de manière similaire au cas des PARM orthogonaux. Cette méthode est décomposable en deux étapes successives : (1) description de l'emprise sous la forme d'un graphe de rectangles, (2) sélection, parmi toutes les sous-combinaisons de rectangles possibles, celle qui caractérise le mieux l'emprise au sol.

#### **4.6.2 Principe de la décomposition en rectangles**

L'emprise au sol est décomposée en rectangles de manière analogue à la méthode décrite au paragraphe 4.4 mais cette fois sans supposer que les rectangles sont perpendiculaires les uns aux autres. La direction de chacun des axes de rectangle est déterminée de manière indépendante en restreignant l'analyse statistique des directions des arêtes 3D ou des contours à un voisinage autour du point utilisé pour définir l'axe.

#### **4.6.3 Sélection de la meilleure sous-combinaison de rectangles**

Cette étape vise à réduire le nombre de rectangles utilisés pour définir l'emprise au sol. Cette sélection repose sur une évaluation de la qualité d'une combinaison de rectangles. Celle-ci peut être exprimée de la manière suivante :

$$Qualité = S - R$$

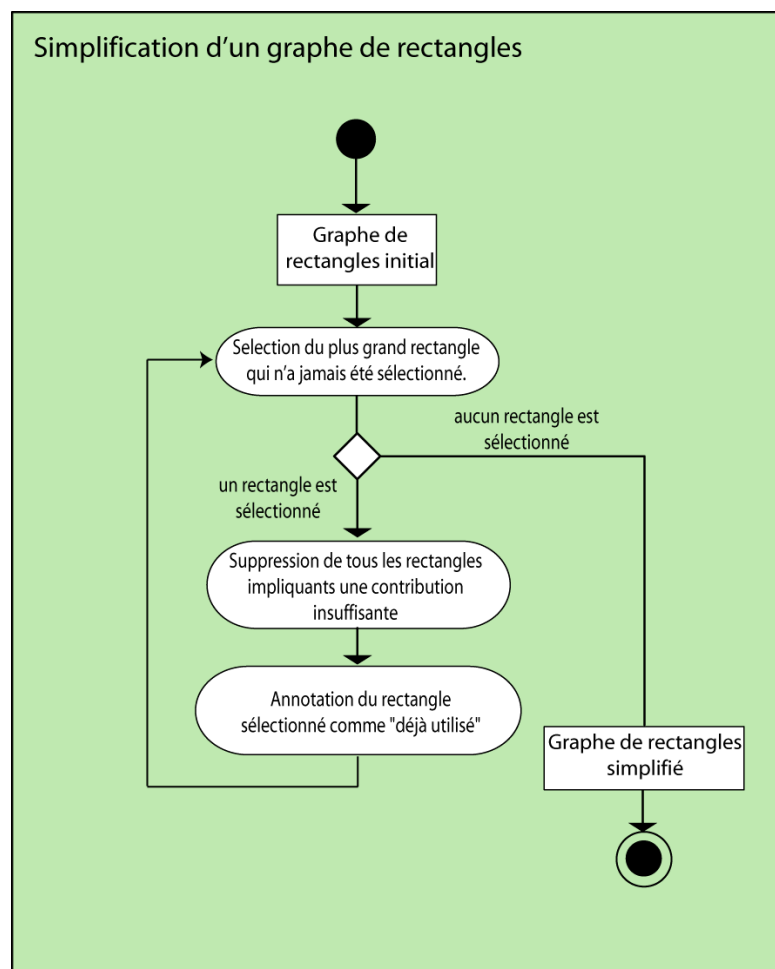
Où - S est un terme attaché aux données qui exprime la similarité entre la combinaison de rectangles et la donnée source référence (la description raster de la région d'intérêt)

- R est un terme de régulation visant à limiter le nombre de rectangles.

On cherche en effet à maximiser la fidélité avec la donnée source et à minimiser le nombre de rectangles utilisés. On peut par exemple considérer la surface qui est couverte par les rectangles et qui appartient à l'emprise au sol comme mesure de similarité. Le nombre de rectangles et le recouvrement entre ceux-ci peuvent être utilisés pour définir le terme de régulation.

Afin de réduire le nombre de combinaisons et donc le temps de traitement, nous avons utilisé une heuristique. Celle-ci permet de réduire le nombre de rectangles au sein du

graphe en supprimant préalablement les rectangles qui n'apportent pas ou peu de description. Le principe est de considérer que la solution optimale s'appuie sur les rectangles les plus grands. Par conséquent les rectangles qui n'apportent rien en termes de couverture surfacique, ou presque rien, par rapport aux plus grands peuvent être supprimés. L'apport d'un rectangle A par rapport à un rectangle B est évalué en fonction de la superficie au sol qu'il décrit et qui n'est pas déjà décrite par B. Il s'agit de l'aire du polygone obtenue après avoir soustrait B à A. L'algorithme est décrit dans l'organigramme UML illustré ci-après à la Figure 34.



**Figure 34 :** Fonction de simplification de graphes de rectangles

## **4.7 Mise en œuvre de l'approche SAISIE : synopsis**

*Ce chapitre a permis de présenter notre mise en œuvre de l'approche SAISIE ainsi que les restrictions opérées pour y parvenir. Le nouvel algorithme de positionnement semi-automatique de patron géométrique 3D et donc de PARM a été présenté. Le nouvel algorithme permettant d'extraire automatiquement les emprises au sol de bâtiments en les décomposant en rectangles a aussi été présenté. Les résultats vont être présentés et analysés dans le chapitre suivant.*

# **Chapitre 5 : Résultats et Analyse**

## **5.1 Introduction**

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de la mise en œuvre de l'approche SAISIE. Une analyse des résultats et des concepts développés dans le cadre de cette thèse est par ailleurs proposée. Cette analyse s'appuie sur les performances obtenues lors des expérimentations des traitements mis en place ainsi que sur notre expérience d'utilisateur du système SAISIE de saisie photogrammétrique en RM. Le chapitre est composé de deux parties correspondant respectivement à la présentation des résultats et à leur analyse.

## **5.2 Expérimentation des traitements automatiques prototypés**

### **5.2.1 Sites de test**

Les traitements permettant de déterminer les paramètres d'implantation des PARM orthogonaux et exploitant des connaissances additionnelles ont été expérimentés sur trois zones de tests situées au Québec, deux dans les environs de Québec (agglomérations de Charlesbourg et de Beauport) et une sur l'île de Montréal. Les trois sites tests correspondent à un habitat de type pavillonnaire ou à des bâtiments de taille moyenne (moins de quatre étages). Ce type d'habitat, assez typique des villes nord-américaines (hors centre ville) est propice à l'utilisation de PARM orthogonaux. Les traitements mis en place dans des contextes où les PARM ne sont pas orthogonaux ou pas pertinents ont été mis en place sur le site d'Amiens, en France. Les caractéristiques de couples utilisés pour ces quatre sites sont décrites dans le tableau ci-après. Tel que mentionné dans le chapitre 1, le site d'Amiens correspond à un site de test mis en place par l'EuroSDR afin de faciliter la comparaison des travaux liés à l'extraction automatique de bâtiments.

	Charlesbourg	Beauport	Montréal	Amiens
Échelle	1/5000	1/8000	1/25000	1/3600
Type de camera	Numérique	Argentique	Argentique	Numérique
Focale (en mm)	120	152	306	50
Superficie (en m <sup>2</sup> )	116300	157400	144100	S/O
Nombre de bâtiments	107	76	130	4
Taille de pixel (en microns)	12	21	14	9

**Tableau 2 :** Tableau décrivant les images sources utilisées sur les quatre sites de test

## 5.2.2 Résultats

### 5.2.2.1 PARM orthogonaux et connaissances additionnelles

La validation de la détermination automatique des paramètres d'implantation des PARM a été réalisée en comparant les patrons géométriques les plus détaillés des PARM à une saisie de référence, réalisée manuellement à partir des couples stéréoscopiques. Nous avons considéré l'extraction automatique valide lorsque : (1) les écarts entre contours de référence et contours extraits semi-automatiquement étaient inférieurs à trois fois la résolution du MNS, (2) lorsque la distance angulaire entre direction extraite et direction de référence était inférieure à 3 degrés. Ces paramètres ont été estimés en s'appuyant sur les travaux de Tseng (2003), Tseng (2001) et Rottensteiner (2001) qui utilisent une saisie manuelle pour initialiser les positions de primitives volumétriques et qui en déduisent les positions précises selon différentes approches d'optimisation. Notre approche s'appuie en grande

partie sur l'exploitation du MNS. Ceci implique que la précision obtenue dépend directement de la précision du MNS. Celle-ci serait donc améliorée en exploitant un MNS avec des contours mieux définis.



**Figure 35 :** Exemple de résultats obtenus automatiquement. a) extraction réussie b) échec dans l'extraction de l'orientation du bâtiment.

Le prototype mis en place implique des temps d'attente de l'ordre d'une seconde par primitive volumétrique (intel centrino 1.7 ghz 512 Mo mémoire vive). Les Figure 36 et Figure 37 sont des exemples de résultats obtenus sur le site de Charlesbourg en utilisant le prototype mettant en œuvre l'approche SAISIE. Plusieurs niveaux d'abstractions sont illustrés. La Figure 37 illustre notamment comment ces niveaux d'abstractions peuvent être personnalisés en influant au niveau de l'instance correspondant au bâtiment en forme de T.

Le tableau ci-après résume les résultats obtenus et est divisé en deux parties principales (séparées par la double barre horizontale). La partie supérieure du tableau correspond aux résultats obtenus en exploitant uniquement les connaissances a priori **nécessaires** à la mise en œuvre des traitements (i.e. type de PARM et point approché). Chaque ligne du tableau dans cette partie correspond à une cause d'erreur potentielle. Celles-ci sont par ailleurs structurées en deux parties qui correspondent aux deux phases des traitements : l'extraction des ébauches d'emprises au sol et l'extrusion/segmentation. Cette structuration permet de bien dissocier la performance dans la détermination des ébauches d'emprises au sol, de celle de l'extrusion. Par ailleurs, certaines erreurs peuvent être évitées si l'on exploite des connaissances additionnelles. Ces configurations sont identifiées dans la deuxième partie



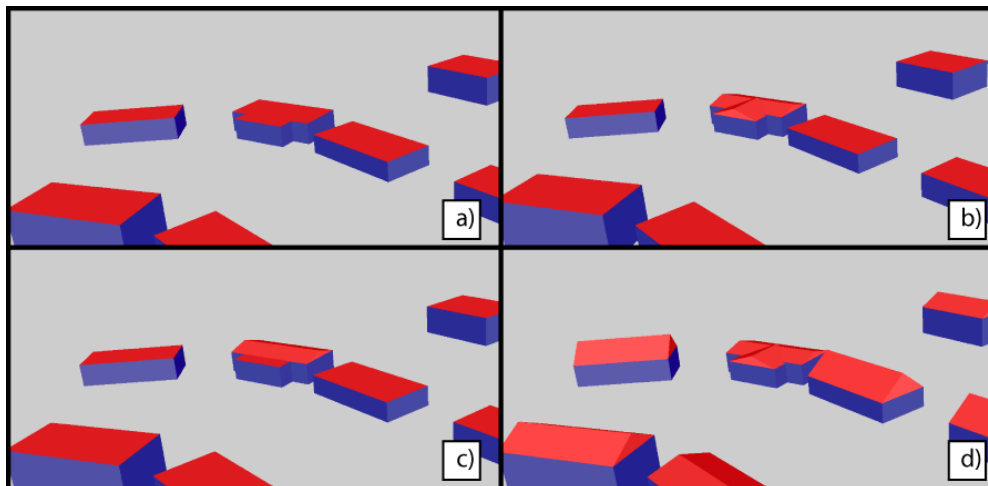
du tableau où par exemple, une information additionnelle sur la direction peut palier l'échec dans son extraction automatique.

**Tableau 3 :** Tableau descriptif des résultats obtenus sur les trois sites tests

			Charlesbourg		Beauport		Montréal		Total
			Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	%
<i>Total de bâtiments testés</i>		<i>Ligne Id.</i>	107	100	76	100	130	100	100
Échecs dans l'extraction des ébauches d'emprises au sol	Détection de la région d'intérêt	1	0	0	4	5.3	0	0	1.3
	Détection de la direction	2	4	3.7	0	0	10	7.7	4.5
	Extraction des rectangles correspondant au patron géométrique (appariement de graphe)	3	2	1.9	3	4	4	1.5	2.9
	Sous total	6	6	5.6	7	9.3	14	9.2	8.6
Échecs dans l'extrusion et la segmentation	Résolution du MNS insuffisante pour extraire les éléments reconnaissables sur les images	4	1	0.9	0	0	0	0	0.3
	Bruit de la définition de surface du MNS	5	0	0	10	13	40	30.7	16.0
	La présence d'éléments de détails (ex : fenêtres) implique l'échec de la reconstruction	6	2	1.9	0	0	2	1.5	1.3
	Détection abusive d'une limite	7	0	0	0	0	2	1.5	0.6
Échecs totaux sans connaissances additionnelles		8	9	8.5	17	22.4	56	43.1	26.2
Connaissances additionnelles	La teinte permet une segmentation valide de l'emprise au sol	9	27	25.2	26	34	12	9	20.7
	L'information sur la direction est présente via la constitution de groupes	10	43	40.2	68	89.5	100	76.9	67.4
	L'information sur la direction peut palier les cas d'échec de la détection automatique de la direction	11	4	3.7	0	0	10	7.7	4.5



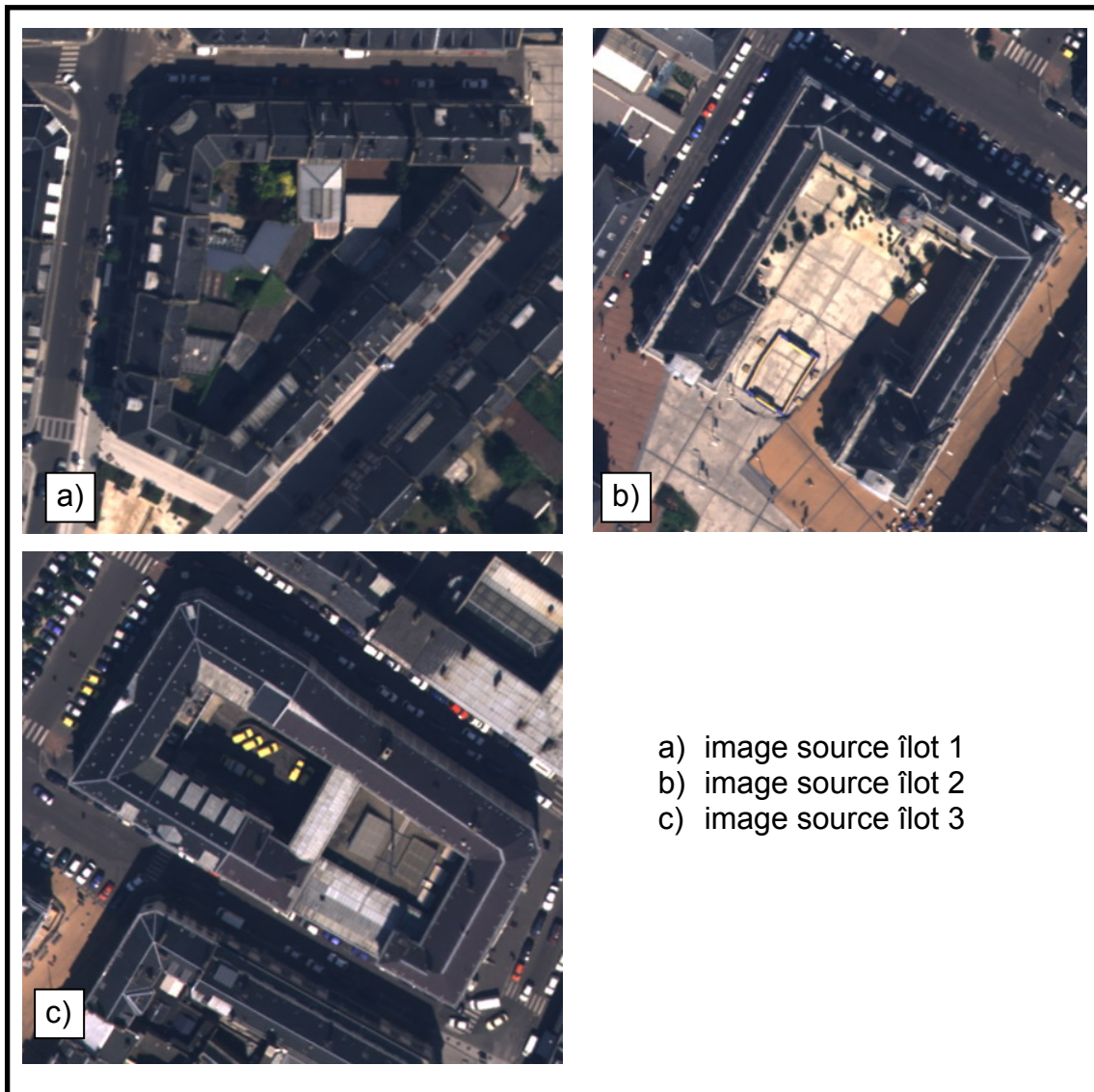
**Figure 36 :** Exemple de résultats obtenus avec le prototype de saisie semi-automatique. a) et b) niveaux abstraits, c) niveau détaillé, d) image source



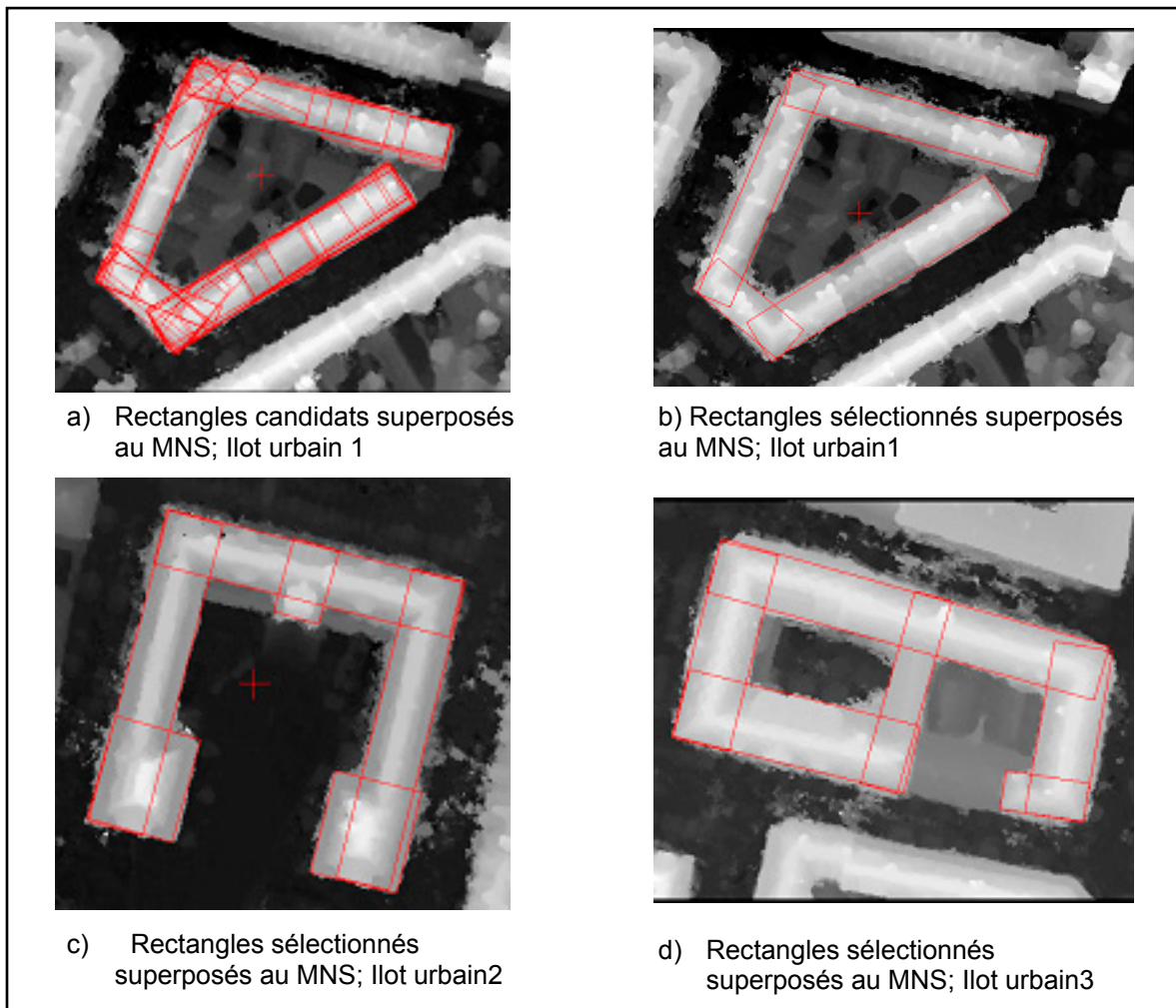
**Figure 37 :** Exemple de personnalisation de la visualisation au niveau de l'instance. a) tous les bâtiments sont simplifiés b) et c) l'exemple référence est plus détaillé que les autres bâtiments d) tous les bâtiments sont détaillés.

### **5.2.2.2 Extraction des emprises au sol lorsque les PARM ne sont pas orthogonaux ou valides**

La Figure 39 présente les résultats obtenus en utilisant les données tests, correspondant à trois îlots, fournies par l'euroSDR sur le site d'Amiens. Des extraits des images sources sont par ailleurs présentés dans la Figure 38. Le temps de traitement est de l'ordre de 20 secondes par îlot. L'image a) de la Figure 39 représente tous les rectangles extraits sur le premier îlot (Figure 38 a)). On constate que le nombre de rectangles extraits est très important (plus d'une centaine) et que de nombreux rectangles sont très similaires. Les images b) c) et d) correspondent aux rectangles sélectionnés automatiquement au sein des graphes de rectangles extraits pour les trois îlots. La comparaison des Figure 39 a) et b) permet entre autre d'appréhender l'impact du traitement de recherche du meilleur sous graphe de rectangles parmi toutes les combinaisons de rectangles possibles. Les critères pris en compte pour sélectionner les rectangles sont : de minimiser le nombre de rectangles et de maximiser la surface couverte.



**Figure 38 :** Extraits d'images sources sur le site d'Amiens



**Figure 39 :** Emprises au sol extraites sur quatre groupes de bâtiments de l'agglomération d'Amiens

En évaluant visuellement les positions des différents rectangles par rapport aux limites des bâtiments (Figure 39) on constate que la localisation des rectangles est bonne. Les écarts entre les positions extraites et une saisie manuelle sont en effet faibles (quelques pixels du MNS). La présence de bruit sur les contours des MNS n'affecte pas la localisation des rectangles. On remarque cependant que les connexions entre les rectangles impliquent parfois des discontinuités sur les contours de l'emprise au sol.

## **5.3 Analyse des résultats et des processus prototypés**

### **5.3.1 Pertinence des résultats par rapport aux objectifs visés**

Tel qu'introduit au 2.3.2, la saisie en représentation multiple vise à saisir et à lier les géométries d'objets géographiques (des bâtiments dans notre cas d'étude). Cette saisie est réalisée pour différents niveaux d'abstraction. Les traitements mis en place ont démontré la faisabilité d'une approche par saisie photogrammétrique en RM pour des niveaux d'abstraction allant de la GD d'un bâtiment à l'obtention de GS communes à plusieurs bâtiments appartenant à un même groupe de bâtiments alignés. Les données ainsi produites répondent aux spécifications identifiées, plusieurs géométries sont extraites et liées pour chaque bâtiment et des groupes de bâtiments alignés sont constitués. Les données obtenues permettent une personnalisation des niveaux d'abstraction en influant au niveau de l'instance (cf. Figure 37).

### **5.3.2 Saisie photogrammétrique en RM : point de vue utilisateur**

Ces tests de saisie ont été réalisés par l'étudiant qui a réalisé cette thèse. Son expérience en saisie photogrammétrique se limite à quelques jours de restitution à l'aide de stations photogrammétriques numériques et analytiques. Bien que cette expérience soit pertinente pour appréhender les difficultés liées à la saisie photogrammétrique, nous considérons l'étudiant comme un opérateur non-expert. Les niveaux de difficulté mentionnés ont été établis par l'étudiant en fonction du délai nécessaire pour effectuer les différentes tâches.

Selon cette approche de saisie en RM, utilisant des PARM, et sollicitant l'opérateur pour reconnaître les types de bâtiments et leurs relations, le traitement simultané des GS et des GD ne pose pas de difficultés particulières pour un opérateur non expert. Reconnaître le type de PARM à partir des images est en effet instantané. L'utilisation d'une true-orthophotographie comme référence s'avère simple et facile à interpréter. Peu de travaux ont été réalisés pour décrire les processus cognitifs impliqués dans la photo-interprétation de zones urbaines, on retiendra néanmoins Lloyd et al. (2002) et Antrop (2000). Selon notre expérience, basée sur l'exploitation de notre prototype sur trois zones de test, percevoir qu'un bâtiment correspond à un type de PARM est instantané et sans effort pour un

opérateur humain dès lors que la vue<sup>5</sup> lui permet d'identifier suffisamment de détails sur le bâtiment (niveau de zoom suffisamment détaillé). Reconnaître les structures urbaines que constituent les groupes de bâtiments (groupes de bâtiments alignés, îlots) est aussi facile et instantané dès lors que la vue offre une description suffisamment étendue de la zone pour percevoir les structures urbaines (niveau de zoom suffisamment simplifié).

Saisir en représentation multiple pour des niveaux d'abstraction allant du niveau détaillé d'un bâtiment à l'identification de groupes de bâtiments alignés se fait donc facilement même si certaines opérations de zoom, ralentissant la saisie, peuvent parfois être requises.

### **5.3.3 Performances de la saisie photogrammétrique en RM lorsque les PARM sont pertinents et orthogonaux**

Nous avons mis en œuvre, sur trois sites tests, des traitements permettant d'automatiser la détermination des paramètres d'implantation des PARM lorsque ceux-ci sont orthogonaux. Ces trois sites correspondent en effet à des habitats similaires et sont de bons candidats pour le concept de PARM. Tous les PARM que nous avons identifiés étaient orthogonaux. Les cas d'échec peuvent intervenir durant : l'extraction des ébauches d'emprises au sol (extraction de la région d'intérêt, de la direction principale et des rectangles), durant la phase d'extrusion et de segmentation.

L'extraction des régions d'intérêt est très fiable (environ 99% des cas, cf. ligne 1 dans le tableau de résultats) et ce même lorsque la qualité des MNS est la plus mauvaise (site de Beauport et de Charlesbourg). Les rares cas d'échec interviennent lorsque la mauvaise qualité de MNS implique l'absence de détection de bâtiments lors de l'identification des zones de sursol. L'approche proposée pour déterminer la direction principale des bâtiments et pour établir les ébauches d'emprises au sol permet d'atteindre une fiabilité assez élevée (9.3% et 9.4% d'échec cas dans les configurations les moins favorables; ligne 6 colonnes de Montréal et de Beauport) et ce malgré l'utilisation d'images argentiques scannées plus bruitées que les images issues de caméras numériques. La cause principale d'erreur est la présence de branchages (images acquises en automne) qui affecte la détection de la

---

<sup>5</sup> La vue correspond à la fenêtre à l'écran utilisée pour visualiser une partie de l'orthophotographie pour un niveau de zoom donné

direction. La Figure 35b) est un exemple de ce type de cas d'échec. Il est probable qu'une implémentation du traitement permettant de déterminer la direction principale qui exploiterait des arêtes 3D horizontales et non directement les contours permettrait de réduire l'impact des branchages. De plus, les informations sur la direction, disponibles grâce au traitement simultané de l'extraction des GS et GD, auraient pu être utilisées dans **tous** ces cas d'échec (cf. ligne 11 et 2). L'extraction des rectangles correspondant au patron géométrique est une cause d'échec dans moins de 3% des cas en moyenne (cf. ligne 3 du tableau). Ces cas d'échec interviennent lorsque le bruit du MNS implique une mauvaise délimitation de la région d'intérêt. Les performances des traitements permettant d'extraire les ébauches d'emprises au sol (première partie du tableau de résultats) sont rapides (moins d'une seconde par primitive), fiables (plus de 90% des bâtiments testés dans les configurations les moins favorables) et peuvent bénéficier de connaissances additionnelles sur la direction. L'extraction d'une primitive prend moins d'une seconde en incluant la phase d'extrusion. Ce temps de réponse est rapide si on se compare par exemple aux temps mentionnés par Tseng et Wang (2001). En effet, dans leur implémentation, visant à déterminer les paramètres d'implantation des primitives volumétriques de manière précise à partir de paramètres approchés, les temps impliqués sont de 20 secondes par primitives. Par ailleurs, selon notre expérience, ces délais sont du même ordre que les opérations consacrées à la navigation (i.e. déplacements dans la vue) ce qui implique que ces performances sont suffisamment bonnes pour être utilisées dans un contexte réel de production.

Les performances de l'étape d'extrusion et de segmentation est étroitement liée au type d'images utilisées. En effet, la supériorité radiométrique (rapport signal sur bruit et dynamique) des images obtenues à l'aide des caméras numériques face aux caméras argentiques implique une différence significative dans les MNS générés (Paparoditis et al. 2006). Dans notre contexte de production, reposant en grande partie sur le MNS, ceci se traduit essentiellement par une définition de la surface des toits et des contours des emprises au sol très bruités. La présence trop importante de bruit conduit à des extractions de faces erronées. Cette différence dans la qualité des MNS générés est la principale cause d'erreur dans le cas des sites couverts avec de l'imagerie argentique, les sites de Beauport et de Montréal.



Nous avons par ailleurs évalué la fréquence avec laquelle une information de type « bâtiment très coloré » pouvait être utilisée pour extraire automatiquement une région d'intérêt correspondant au bâtiment à saisir (20% des bâtiments sur nos sites tests). Toutefois, l'exploitation de celle-ci dans notre contexte, où l'on dispose systématiquement de connaissances sur les géométries véhiculées avec les PARM, n'aurait pas permis d'améliorer les performances dans la définition des emprises au sol. En effet, la segmentation en rectangles est assez fiable et les cas d'échec ne sont pas intervenus sur des bâtiments colorés.

La qualité du MNS exploité est donc l'élément prépondérant dans la performance des traitements mis en place pour positionner automatiquement des PARM. **L'approche semi-automatique mise en place permet d'atteindre un niveau d'automatisation nettement supérieur à la saisie manuelle en RM à l'aide de PARM (4 à 5 fois moins de cliques au minimum)** lorsque les images sources sont issues de caméras numériques. Ces performances sont aussi beaucoup plus rapides qu'une saisie manuelle du niveau détaillé correspondant aux contours de toits (cf. section 2.2.2). En effet, si on se réfère au cas de l'exemple référence (forme en T et structure de toit à deux pans), la saisie manuelle seule du contour de toit requiert au minimum huit cliques (un par point). Dans le cas, d'une saisie manuelle à l'aide d'un PARM, saisir l'exemple référence requiert au minimum 5 cliques. Dans le cas d'une saisie semi-automatique, seulement un clique est nécessaire.

#### **5.3.4 Performance des traitements mis en place pour les cas où les PARM ne sont pas pertinents**

Conscients que les PARM ne sont pas toujours orthogonaux, ni toujours pertinents, nous avons exploré d'autres types de traitements. Ces traitements sont envisageables pour réaliser une partie de l'extraction des GD et nécessitent moins de connaissances a priori.

Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'extraction automatique des emprises au sol et avons proposé une approche (décrite au paragraphe 4.6) basée sur l'exploitation de deux connaissances a priori :

- 1) l'emprise au sol du bâtiment à extraire est décomposable en rectangles

- 2) les éléments définissant les structures de toits (arrêtes, contours) à l'intérieur d'un rectangle sont dans sa direction principale (à 90 degrés près) (cf. 4.4.2.1)

L'approche proposée a été mise en œuvre sur quatre îlots de la ville d'Amiens. Ces tests ne sont pas suffisants pour en permettre une évaluation approfondie comparable à ce qui a été réalisé dans le cas où les PARM orthogonaux sont pertinents. Toutefois, nous pensons que cette zone de test constitue une très bonne référence du fait de son origine (site de test fourni par l'EuroSDR, utilisé régulièrement par le laboratoire MATIS de l'IGN Français comme site référence). La qualité des résultats, évaluée visuellement en comparant MNS et rectangles extraits, est très bonne et les temps de traitement nous semblent rapides si on se compare aux travaux existants tels que ceux décrits dans Tseng et Weng (2001).

La qualité des connexions entre les rectangles est parfois critiquable. Ce type de problème a aussi été rencontré dans Lafarge et al. (2006). L'auteur y présente une approche d'extraction des emprises au sol, exprimées sous la forme de combinaisons de rectangles, basée sur les processus ponctuels marqués. Un processus de régularisation est par ailleurs proposé. Il permet de corriger les emprises au sol de ces artefacts liés aux connexions des rectangles.

Cette approche pourrait être mise en œuvre automatiquement préalablement à la saisie en RM ce qui la rendrait facilement utilisable dans notre approche *SAISIE*. En effet, le niveau de connaissances a priori relativement faible requis pour la mettre en œuvre autorise son utilisation sur l'ensemble d'un jeu de données pour extraire des descriptions sous la forme de graphe de rectangles de toutes les régions d'intérêt potentielles (régions connectées obtenues par seuillage du MNS normalisé, cf. 4.4.1) Ces graphes de rectangles peuvent être exploités, en temps réel, par la suite durant la saisie en fonction des spécificités de chaque instance.

### **5.3.5 Approche SAISIE et résultats expérimentaux**

#### **5.3.5.1 Automatisation, connaissances a priori et Instance Driven SASS**

Notre approche *SAISIE* introduite au chapitre 3 propose d'opter pour une approche semi-automatique qui repose sur l'introduction par un opérateur humain de connaissances,

spécifiques à l'instance, au début du processus et qui exploite (Instance Driven SASS) celles-ci pour extraire automatiquement et simultanément les géométries détaillées et simplifiées. Les résultats obtenus avec notre expérimentation ont permis de prouver que dans des contextes où les PARM sont pertinents, les performances obtenues selon l'approche SAISIE sont meilleures qu'une saisie manuelle exploitant des PARM telle que décrit dans le chapitre 3. Ces résultats sont par ailleurs supérieurs à une saisie manuelle des contours de toit au niveau détaillé.

L'implantation des traitements a été réalisée en accordant une attention particulière à la gestion **explicite** des connaissances a priori, qu'elles soient communes à l'ensemble du jeu de données ou spécifiques à l'instance. Nous avons par ailleurs illustré comment celles-ci étaient prépondérantes dans la mise en œuvre efficace des traitements communs à toutes les instances; par exemple lors de la génération du MNS, des images de contours ou encore lors de l'extraction des faces durant l'étape d'extrusion.

Les traitements, spécifiques à l'instance, mis en place exploitent systématiquement des connaissances sur la géométrie des objets et de manière additionnelle des connaissances sur leur direction et éventuellement sur leurs propriétés colorimétriques. Nous avons illustré l'avantage de l'exploitation de connaissances sur la géométrie des objets d'une part car les PARM permettent de réduire la saisie en RM à la saisie du niveau le plus détaillé et, d'autre part, car les connaissances sur le niveau détaillé permettent de contourner certains problèmes de reconstruction. Dans l'exemple de la Figure 28 celles-ci permettent d'exclure l'arbre lors de la reconstruction.

L'exploitation de connaissances a priori sur la direction a aussi été introduit comme une alternative aux cas d'échec dans la détection automatique de la direction. Nous avons par ailleurs suggéré de déduire cette information des groupes constitués obligatoirement lors de la saisie pour définir les GS et ainsi de tirer profit du traitement simultané des GD et des GS.

Notre mise en œuvre a été restreinte à une configuration minimale d'un point de vue des sources de données en se limitant à des images aériennes. Nous n'avons pas mis en place de traitements différents selon les propriétés de ces sources (ex : images issues de caméras

argentiques vs. images issues de caméras numériques) pour des considérations de temps. Ainsi, notre preuve de la pertinence de l'approche Instance Driven SASS s'est limitée à la sélection des algorithmes et des paramètres en fonction de l'instance. Elle n'a pas permis de valider la pertinence d'une sélection des sources.

### **5.3.5.2 Succès de l'automatisation de la saisie : une fonction à trois paramètres**

Notre expérience de la mise en œuvre de traitements visant à automatiser la saisie en RM nous amène à proposer une formulation du succès de l'automatisation comme une fonction à trois paramètres : les attributs disponibles décrivant la scène, les connaissances a priori disponibles, la complexité du problème. Nous pensons en effet que le succès des traitements automatiques dépend de ces trois critères. Par exemple, si l'on souhaite implanter une primitive volumétrique de type parallélépipède rectangle et qu'en plus des données vectorielles définissent l'emprise au sol, le problème pourra être facilement résolu, même avec un MNS de mauvaise qualité (ex : emprise au sol = données vectorielles fournies, altitude = valeur médiane à l'intérieure de l'emprise au sol). De la même manière, nous avons démontré que l'utilisation de la connaissance du type de primitives avec un MNS de relativement bonne qualité permet de résoudre ce type de problème sans requérir à des données vectorielles additionnelles.

Un autre exemple est l'utilisation de la couleur dans l'extraction des emprises au sol. En effet, dans le cas de l'exemple référence de la Figure 27, un traitement basé sur la couleur aurait pu permettre d'exclure l'arbre. Cependant cette possibilité n'apportait rien car l'arbre avait déjà été rejeté en s'appuyant sur la connaissance de la forme en T de l'emprise au sol.

Une telle formulation du succès de l'automatisation de la saisie présente un intérêt si l'on considère que lorsqu'on met en place un système de production, on cherche à mettre en place la configuration la moins coûteuse qui permette de déboucher sur un succès dans la saisie. Les enjeux liés à cette formulation sont discutés lors de l'établissement des recommandations au paragraphe 6.1.4.

## **Chapitre 6 : Recommandations et Conclusion**

### **6.1 Recommandations**

Notre analyse des résultats obtenus nous amène à conclure que ceux-ci sont intéressants et encouragent la poursuite de travaux sur la saisie semi-automatique en RM. Plusieurs pistes d'amélioration peuvent être explorées.

Les restrictions nécessaires à la mise en œuvre de l'approche SAISIE n'ont pas permis d'évaluer chacun des aspects théoriques proposés (i.e. variabilité des contextes au niveau des données sources et des contextes urbains). Nous proposons ci-après une description des aspects théoriques proposés devant être évalués ainsi que des améliorations pouvant être apportées essentiellement dans le cas des bâtiments. Cette description est structurée selon les couches de l'architecture proposée à la Figure 12 pour mettre en place l'approche SAISIE. La diversification des classes d'objets pouvant être saisis en RM est aussi un enjeu important. Les concepts de PARM et de patrons géométriques sont à évaluer pour d'autres classes d'objets géographiques.

#### **6.1.1 Amélioration de la couche « DONNÉES »**

Tel que cela a déjà été mentionné, le processus de saisie en RM implique d'extraire des attributs (ex : éléments de contours dans les images, faces extraites à partir du MNS). La qualité de ces attributs est un élément prépondérant dans le succès des phases automatiques. L'amélioration des propriétés de ces attributs ainsi que leur diversification est donc un enjeu important. Un des moyens pour y parvenir est d'intégrer d'autres sources de données, tel que proposé dans notre approche SAISIE.

La qualité du MNS a été identifiée comme un des éléments prépondérants dans la performance du processus de saisie semi-automatique. L'intégration de MNS issus de capteurs LIDAR permettrait probablement d'augmenter la qualité des attributs exploités (ex : fiabilité, précision). Nous recommandons donc de l'évaluer. De la même manière, l'exploitation de données vectorielles additionnelles a été identifiée lors de notre analyse comme un facteur améliorant la performance des traitements. Nous avons fait le choix de

ne pas en exploiter lors de notre prototypage pour ne pas trop restreindre la portée de nos travaux. L'intégration de sources additionnelles ainsi que la mise en place de traitements les exploitant est aussi un axe à développer afin d'enrichir l'analyse de l'approche SAISIE.

### **6.1.2 Amélioration de la couche « RAISONNEMENT »**

La couche « RAISONNEMENT » de notre architecture (cf. Figure 12) est constituée de l'opérateur humain, qui identifie les connaissances spécifiques à l'instance, et d'un composant de raisonnement artificiel. Dans notre implantation la supervision des traitements est réalisée sous la forme d'un arbre de règles qui adapte les traitements selon de type de PARM (choix des graphes à apparier, choix des approches d'extrusion en fonction des primitives). Cette supervision correspond à la mise en œuvre du concept d'Instance Driven SASS.

La problématique de supervision s'est avérée relativement simple dans le contexte restreint de notre prototypage dans la mesure où (1) les données sources disponibles étaient toujours des images aériennes acquises avec un recouvrement intra-bande de 60% (2) que du point de vue tu type d'habitant, nous nous sommes principalement intéressé à des zones urbaines où le concept de PARM pouvait être utilisé. Par conséquent, seule une mise en œuvre de l'approche SAISIE élargie (i.e. avec d'autres sources de données et de nouveaux traitements) permettra de délimiter la portée du concept d'Instance Driven SASS et de déterminer si la composante Intelligence Artificielle doit être améliorée.

La principale composante de la couche « RAISONNEMENT » devant être améliorée est probablement la communication entre l'opérateur humain et l'opérateur IA. En effet, le temps consacré à l'introduction de connaissances et à l'interprétation des informations fournies par le système est un élément crucial. La réduction du temps de traitement par l'opérateur humain dans le peuplement de BDRM est en effet l'objectif visé par l'approche SAISIE. Les aspects liés à la communication Homme-Machine vont être discutés ci-après (Homme à Machine puis Machine à Homme).

### **6.1.2.1 Communication Homme à Machine**

Un moyen de réduire le temps dédié à l'introduction de connaissances est d'optimiser les modes de communication de l'homme vers la machine. Ces aspects ont été peu explorés dans le cadre de cette recherche. Nous avons basé l'introduction d'informations par l'opérateur humain sur des cliques effectués sur des icônes correspondant à chaque type de connaissances. Nous pensons que ceci peut être amélioré.

Opter pour d'autres approches limitant l'utilisation du curseur à l'introduction du point approché est une avenue à explorer. Ceci permettrait en effet à l'opérateur de toujours visualiser l'orthophotographie supportant son interprétation au lieu d'identifier régulièrement l'icône correspondant au bâtiment à extraire. Le type de PARM pourrait par exemple être introduit en utilisant le clavier (une main sur le clavier, une main sur la souris et les yeux sur l'écran). Il pourrait aussi être introduit en utilisant des techniques de reconnaissance vocale. On peut facilement imaginer un opérateur parlant pour identifier le type de PARM (ex : emprise au sol en L, toit à 2 pans) et cliquant pour introduire un point approché.

Une autre approche pourrait être de combiner l'utilisation du clavier et le suivi du mouvement des yeux (« Eyes tracking »). Il pourrait par exemple s'agir d'une approche où les positions approchées seraient déduites par analyse des mouvements des yeux et où l'introduction des connaissances a priori et le déclenchement des traitements seraient effectués via le clavier.

D'autres scénarios que ces deux exemples peuvent être envisagés. L'optimisation des modes d'introduction d'informations par un opérateur est sans nul doute un axe majeur à explorer.

### **6.1.2.2 Communication Machine à Homme**

L'interprétation de la scène par l'opérateur humain est basée sur l'observation d'une « true-ortho » dans une vue monoscopique. Ce choix a permis entre autres de rendre le système utilisable par des opérateurs sans que ceux-ci voient en stéréoscopie, sans qu'ils soient experts en saisie photogrammétrique.

Ce choix nuit parfois à l'interprétation. En effet, il peut arriver que l'interprétation du type de structure de toits soit difficile sans perception du relief. De plus le contrôle qualité effectué au fur et à mesure de la saisie ne peut pas permettre de détecter des erreurs relatives à l'altimétrie.

Par ailleurs, le fait de disposer d'une seule vue peut requérir des opérations de zoom pour que l'opérateur obtienne une perception de la zone suffisamment large pour identifier les structures urbaines.

Les possibilités de mise en place d'une interface de saisie multi-vues permettant de visualiser la zone à saisir à différents niveaux de zoom et éventuellement selon différents modes de représentations (ex : vue en perspective utilisant MNS et texture pour permettre une perception du relief sans stéréoscopie) gagneraient à être explorées.

### **6.1.3 Amélioration de la couche « TRAITEMENT »**

#### **6.1.3.1 Connaissances et traitement simultané des GD et des GS**

Le traitement simultané de la saisie des GD et des GS peut permettre de partager des connaissances a priori pour le traitement de ces deux problèmes. Nous avons notamment illustré comment la constitution de groupes alignés devant s'agréger durant la généralisation peut permettre d'introduire une information sur la direction des bâtiments.

Nous avons par ailleurs suggéré d'utiliser cette information pour établir la direction principale du bâtiment à extraire si celui-ci est orthogonal (i.e. emprise au sol composée de rectangles perpendiculaires les uns aux autres). Dans le cas des trois sites de test, les bâtiments devant être groupés étaient alignés avec une précision (de l'ordre de 1 degré) qui autorisait la déduction directe de la direction d'un bâtiment à partir du moment où il était aligné au précédent. Cependant, le fait de décider de constituer un groupe de bâtiments pour les agréger car ils sont relativement alignés ne signifie pas forcément que ceux-ci soient alignés au niveau détaillé. Le fait de constituer un tel groupe signifie qu'à un niveau plus abstrait, ces bâtiments sont alignés. Cette nuance est importante et signifie que les connaissances qui peuvent être partagées entre les niveaux détaillés et les niveaux simplifiés le sont à différents niveaux d'abstraction près. Le fait de disposer d'une



information sur les directions relatives de bâtiments ne suffit donc pas, il faut être en mesure d'en définir la précision. Dans le cas de la direction, une solution pourrait être de se servir de la connaissance sur la direction à un niveau abstrait (à quelques degrés près) lors de l'extraction automatique de la direction au niveau détaillée (à un degré près). Ceci pourrait être fait lors de l'analyse statistique des directions des arêtes en retenant uniquement les arêtes dont la direction est compatible avec la direction abstraite, la direction approximative.

Cet exemple, illustre l'intérêt du partage des connaissances relatives aux GD et aux GS lors de la saisie ainsi que la complexité qui en découle. L'identification des connaissances pouvant être partagées lors de la saisie et des difficultés impliquées est un aspect à explorer dans les travaux futurs.

### **6.1.3.2 Cas où les PARM sont pertinents**

Les traitements qui ont été mis en place et décrits dans la section 4.4 permettent de déterminer les paramètres d'implantation de PARM orthogonaux. L'exploitation de la connaissance a priori de la structure orthogonale du PARM est un élément important dans la détermination automatique des paramètres. Elle est en effet utilisée pour déterminer la direction principale du bâtiment. Nous avons par ailleurs exploré les possibilités d'extraction automatique d'emprise au sol de bâtiment sous la forme de graphe de rectangles sans contrainte quant aux orientations relatives des rectangles qui composent l'emprise au sol. Envisager l'utilisation de ce type d'approche dans le cas de PARM non orthogonaux est une avenue intéressante à explorer.

La majorité des cas d'échec rencontrés lors de l'évaluation est apparue en exploitant des images issues de caméras photogrammétriques argentiques. En effet, le fort niveau de bruit implique un MNS de qualité moindre ce qui se traduit par des échecs dans l'extrusion. Deux axes principaux peuvent être envisagés pour améliorer les performances de la reconstruction lorsque le MNS est généré à partir d'images argentiques. Le premier correspond à la réduction du rôle du MNS en déterminant les paramètres d'extrusion en utilisant une approche contour au lieu d'exploiter des faces extraites du MNS. En effet, l'infériorité radiométrique des images argentiques scannées par rapport aux images issues

de caméras numériques a un impact nettement moins important dans la détection de contours. Le deuxième axe correspond à l'amélioration de l'approche utilisée pour générer le MNS.

Par ailleurs, certains des traitements impliqués en temps réel lors de la détermination des paramètres d'implantation des PARM gagneraient à être effectués préalablement pour améliorer le temps de réponse du système. En effet, lors de l'extraction de faces et de l'analyse de la direction des contours, les traitements impliqués sont les mêmes quelque soit le PARM. Ils peuvent être mis en œuvre sans connaissances spécifiques à l'instance. Selon les tests mis en œuvre, réaliser ces traitements durant une étape préalable pourrait réduire les temps de traitement « temps réel » de moitié.

### **6.1.3.3 Cas où les PARM ne sont pas pertinents**

Tel que cela a été mentionné lors de leur introduction, les PARM ne peuvent pas couvrir tous les cas de figures. Leur pertinence dans des contextes favorables a été démontrée. La mise en place de chaînes de production reposant sur la saisie en représentation multiple nécessite d'être en mesure de traiter tous les cas de figure pour obtenir des BDRM exhaustives.

Des solutions utilisables dans des contextes où les PARM ne sont pas utilisables doivent être mises en place. Des outils de saisie totalement manuels, requérant une saisie manuelle de chacune des géométries ainsi que l'établissement de lien entre celles-ci constitue la solution minimale à mettre en œuvre pour obtenir des BDRM3D exhaustives répondant aux spécifications (cf. section 2.3.2). Le fait que les PARM ne soient pas pertinents dans certains cas, ne veut pas dire que des patrons multi-échelles ne soient pas utilisables pour des niveaux simplifiés et pourquoi pas en 3D. En effet, le PARM résulte du rapprochement entre les concepts de modèles paramétriques et de patron multi-échelles. Contrairement au patron multi-échelles il couvre le niveau détaillé. Une première alternative à une saisie en RM totalement manuelle pourrait être de saisir manuellement les niveaux détaillés qui le nécessitent puis d'utiliser des patrons multi-échelles.

La mise en place d'alternatives semi-automatiques facilitant le processus de saisie constitue un enjeu majeur pour l'avancement de solution de saisie photogrammétrique en RM. Plusieurs autres pistes nous semblent pertinentes à explorer. Elles sont présentées ci-après.

#### *6.1.3.3.1 Géométrie Solide Constructive Enrichie*

Nous suggérons d'explorer les possibilités liées à la mise en place d'outils de saisie semi-automatique en RM reposant sur le concept de « CSG enrichie ». Le principe serait alors de permettre à l'opérateur de décrire la GD d'un bâtiment en combinant en temps réel des primitives volumétriques. L'opérateur pourrait alors définir les géométries simplifiées du bâtiment en enrichissant la structure en CSG d'informations dédiées à la généralisation. Ces informations permettraient de spécifier des opérations à appliquer aux primitives qui sont utilisées pour décrire la géométrie détaillée. Il pourrait par exemple s'agir d'information du type : rendre la primitive A perpendiculaire à la primitive B ou encore remplacer les primitives A et B par leur boîte englobante orientée.

Une telle approche offre trois principaux avantages. (1) L'identification de la primitive volumétrique à implanter au début du processus de saisie permet d'introduire des connaissances a priori susceptibles d'aider l'automatisation de la détermination des paramètres d'implantation. (2) Décrire les géométries à l'aide de primitives volumétriques permet par ailleurs de réduire les volumes de données générées. (3) Enfin, ce type de structure formalisant les relations entre les primitives qui le compose est proche conceptuellement des SGO puisque les géométries sont exprimées sous forme paramétrique de la même manière que les patrons géométriques.

#### 6.1.3.3.2 *PARM incomplets*

L'absence de patron géométrique 3D adapté pour décrire les GD en 3D ne signifie pas nécessairement qu'il n'existe pas de patron géométrique 2D qui soit adapté pour décrire l'emprise au sol du bâtiment. Nous pensons qu'il est pertinent d'explorer des approches qui exploitent des connaissances a priori relatives aux emprises au sol et qui disposent de peu de connaissances sur les structures de toits. En effet, nos contributions présentées à la section 4.6 ont démontré l'intérêt des connaissances sur l'emprise au sol pour l'extraire (ex : cela permet d'exclure certains éléments comme des arbres durant la reconstruction cf. exemple de la Figure 28) combinée à une faible connaissance des structure des toits (i.e. éléments principaux dans la direction principale de la primitive).

Il est pertinent selon nous d'explorer des approches utilisant des PARM incomplets, composés de patrons géométriques 2D et de règles de généralisation qui permettraient de faciliter la saisie en représentation multiple. Ces PARM incomplets permettraient ainsi de limiter les efforts de saisie pour définir les niveaux simplifiés. Le processus de saisie serait alors basé sur l'introduction par l'opérateur au début du processus du type de PARM incomplets et exploiteraient des techniques d'extrusion requérant peu de connaissances sur la structure de toits, comme par exemple dans Jibrini et al. (2000). Les règles de généralisation relatives à l'emprise au sol n'auraient alors pas à être introduites. La généralisation en 3D devrait en revanche être définie par l'opérateur.

### 6.1.4 Utilisation optimale du système de saisie en RM

Nous avons proposé de nombreux axes de recherche visant à améliorer la performance du système de saisie en représentation multiple proposé. Un autre aspect que nous jugeons très important dans une perspective d'utilisation en production est d'optimiser l'utilisation du système en permettant aux utilisateurs d'en anticiper les performances. Fournir de tels outils permettrait par exemple d'adapter les campagnes d'acquisition aériennes, ou encore d'envisager l'acquisition de données vectorielles susceptibles de faciliter le peuplement de BDRM3D.

En effet, le fait d'opter pour des campagnes de vol à fort recouvrement permet d'améliorer la qualité des MNS ce qui améliore la qualité des attributs pouvant être extraits. En revanche, ceci a un impact important sur les coûts. Selon l'auteur dans (Brenner 2001), les étapes préalables à la saisie (acquisition et orientation des images) correspondent à 30% du coût total de production dans le cas de saisie à un seul niveau d'abstraction. Catégoriser la performance du système selon des contextes urbain dense vs. zone pavillonnaire permettrait par exemple de définir les spécifications minimales d'acquisition des images par zone pour garantir le succès de la saisie semi-automatique en RM. L'analyse et la formulation des éléments influant sur le succès des traitements sont donc des enjeux importants.

## 6.2 Conclusion

Nous avons proposé et évalué l'approche SAISIE afin de répondre à la problématique identifiée pour cette thèse qui était : « **Comment mettre œuvre le peuplement de BDRM3D de bâtiments par saisie photogrammétrique dans une perspective d'automatisation?** ».

Nous avons effectué et formalisé une analyse des concepts associés à la saisie en représentation multiple et une analyse des travaux consacrés à l'automatisation de la saisie par procédés photogrammétriques. Ces deux études, menées parallèlement ont permis de définir les spécifications de la saisie en RM, d'appréhender les difficultés liées à l'automatisation de la saisie et d'établir les liens entre les concepts de patron géométrique et de modèle paramétrique, ce qui correspond aux objectifs secondaires 1, 2 et 3. Les nouveaux concepts de PARM et d'Instance Driven SASS ont ainsi été introduits.

La mise en œuvre du premier système de saisie en RM nous a permis de démontrer la faisabilité de la saisie en RM (objectif secondaire 4). Cette contribution a part ailleurs fait l'objet d'une publication dans la Revue Internationale de Géomatique.

Nous avons mis en œuvre l'approche SAISIE et les concepts associés afin d'évaluer leurs performances et les facteurs influant sur leurs performances. Pour ce faire, nous avons introduit deux nouveaux algorithmes, constituant deux contributions, qui permettent d'automatiser une partie du processus de saisie des bâtiments. Ces algorithmes, exploitant conjointement MNS et imagerie passive, sont utilisables avec des degrés différents de connaissances a priori. Le premier permet de déterminer automatiquement et en temps réel les paramètres d'implantation d'un patron géométrique 3D, et ce faisant, les paramètres d'implantation d'un PARM orthogonal. Le second permet d'extraire les emprises au sol des bâtiments et requiert peu de connaissances a priori.

Nous nous sommes par ailleurs appuyés sur cette mise en œuvre pour évaluer la pertinence de l'approche SAISIE en termes d'automatisation. Notre mise en œuvre a permis de conclure que dans des contextes où le concept de PARM orthogonal est pertinent, la saisie photogrammétrique en RM peut ne requérir que très peu d'intervention de la part un opérateur humain (i.e. identification du PARM, introduction du point approché,

constitution de groupes). Elle nous a par ailleurs permis de conclure que l'approche SAISIE permet d'obtenir des performances supérieures à une saisie manuelle. En revanche, notre mise en œuvre ne nous a pas permis d'évaluer la portée du concept d'Instance Driven SASS dans la mesure où la variabilité des configurations a dû être restreinte durant le prototypage. La personnalisation des traitements en fonction du type de géométrie semble pertinente puisque les performances obtenues sont supérieures à une saisie manuelle. Cependant nous n'avons pas été en mesure de quantifier le gain effectif associé à ce type de connaissance, notamment par rapport aux approches existantes en recherche.

Enfin, nous avons établi plusieurs recommandations quant à la poursuite des travaux sur la saisie en représentation multiple et identifié les éléments clés à prendre en considération. La majorité de ces contributions (l'évaluation des concepts proposés pour supporter la saisie photogrammétrique en RM, et les deux nouveaux algorithmes) a par ailleurs été communiqué à la communauté scientifique de la géomatique par le biais d'un article soumis à la revue « International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing » (Frédéricque, B. et al. 2007b).

Tel que mentionné au chapitre 1, cette thèse a combiné successivement deux approches méthodologiques : la méthode exploratoire/conceptuelle et la méthode hypothético-déductive. Selon notre expérience, combiner ces deux approches était un bon choix, voire une nécessité. En effet, d'une part la méthode exploratoire nous a permis de prendre du recul par rapport aux outils de production de données, à leur utilisation et aux besoins en données géospatiales. Cette approche nous a par ailleurs permis d'établir les liens entre deux corpus théoriques (la saisie et la généralisation) et de proposer l'approche SAISIE. D'autre part, l'utilisation du prototypage (méthode hypothético-déductive) pour tester et évaluer les traitements d'images bas et moyens niveaux fut aussi très enrichissante. La littérature est en effet très riche en publications liées à la saisie automatique des bâtiments. Hiérarchiser ces différentes contributions en fonction de leurs performances s'est avéré difficile. Mettre en œuvre certains de ces traitements et se construire sa propre expérience nous apparaît nécessaire bien que difficile en début de recherche.

# Bibliographie

Cette section contient la majorité des références consultées, ayant contribué à cette thèse (Les références citées dans les chapitres de la thèse sont identifiées par un astérisque : \*).

Elaksher, A., Bethel, J. et Mikhail E.(2002) Reconstructing 3D Building Wireframes from Multiple Images, in Proceedings of the ISPRS Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision.

\*Ameri, B. (2000) Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery, doctoral dissertation, DGK-C 526, Inst. Photogrammetry, Stuttgart Univ., 2000.

\*Antrop M. et Eetvelde W., (2000) Holistic aspects of suburban landscapes : visual image. Interpretation and landscape metrics.

Asbury, S. (2003) Industry Trends – Industry Outlook 2004. Making Waves in the Mainstream. GeoWorld, December 2003.<http://www.geoplace.com/gw/2003/0312/0312io04.asp> -consulté en janvier 2004.

\*Badard, T. et C. Lemarié, (2002) Associer des données: l'appariement, Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT). H. sciences. Paris, Lavoisier, p. 163-183.

\*Baillard,C., Schmid, C., Zisserman, A. et Fitzgibbon A. (1999) Automatic line matching and 3D reconstruction of buildings from multiple views. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 32,Part3-2W5, p. 69–80.

\*Baillard, C. et A. Zisserman, (2000) A Plane-Sweep Strategy for the 3D Reconstruction of Buildings from Multiple Images, 19th ISPRS Congress and Exhibition, vol. 32.

\*Baltsavias, E., (2004) Object Extraction and Revision by Image Analysis Using Existing Geodata and Knowledge: Current Status and Steps Towards Operational Systems », ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 58, Issues 3-4, p. 129-151.

\*Bédard, Y. (2004) Combining Automatic Generalization and Multiple Representations for Highly Interactive Web-based Mapping, GeoSpatial Word.

\*Bédard, Y., Rivest, S. et Proulx, M-J. (2007), Spatial On-Line Analytical Processing (SOLAP): Concepts, Architectures and Solutions from a Geomatics Engineering Perspective., Data Warehouses and OLAP: Concepts, Architectures and Solutions. R. Wrembel and C. Koncilia, Idea Group Publishing, Chapter 13.



- Bellman, C.J. et Shortis M.R., A classification approach to finding buildings in large scale aerial photographs. ISPRS XXth Congress 2004, Istanbul, July 12-23. Commission III, WG III/4.
- \*Bernier, E. et Bédard Y. (2007) Data Warehouse Strategy for On-Demand Multiscale Geo-Information, Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications. W. Mackaness, A. Ruas, T. Sarjakoski
- \* Bernier E., Bédard Y., et Hubert F. (2005) UMapIT: An On-Demand Web Mapping Application Based on a Multiple Representation Database, 8th ICA Workshop on generalization and multiple representation.
- \*Bernier, E., Bédard, Y. et Lambert, M. (2003) Cartographie sur demande sur le Web et bases de données multidimensionnelles. De la personnalisation par couche cartographique à la personnalisation par occurrences. *Revue Internationale de Géomatique*, numéro spécial. "Les SIG sur le Web", Vol. 13, p. 339-359.
- Boudet, L., Paparoditis, N., Jung, F., Martinoty, G., et Pierrot-Deseilligny, M., (2006) A supervised classification approach towards quality self-diagnosis of 3D building models using digital aerial imagery. PCV'06, Photogrammetric Computer Vision. Symposium of Commission III ISPRS
- Brassel, K.E. et Weibel, R. (1988). A Review and Framework of Automated Map Generalization. *Int. Journal of Geographical Information Systems*, 2(3): p. 229-244.
- Braun, C., Kolbe, T. H., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Cremers, A. B., Förstner, W. et Plümer L. (1995) On the Models for Photogrammetric Building Reconstruction. *Computer & Graphics*, Vol. 19, No. 1.
- \*Brenner, C., (1999) Interactive modeling tools for 3D building reconstruction, Photogrammetric Week '99'. D. Fritsch and R. Spiller. Stuttgart (Germany), Wichmann Verlag, 1999, p. 23-24.
- \*Brenner, C.,(2000) « Towards fully automatic generation of city models », XIX ISPRS Congress, Commission III, WGIII/1, Vol. 33(B3).
- \*Brenner C. (2001) City Models - Automation in Research and Practice, in: D. Fritsch & R. Spiller, eds, 'Photogrammetric Week '01', Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, p. 149–158.
- \*Brenner, C. (2003) Building Reconstruction from Laser Scanning and Images, Proc. ITC Workshop on Data Quality in Earth Observation Techniques, Enschede, The Netherlands.
- Brenner, C. (2004). Modelling 3D Objects Using Weak CSG Primitives. *IAPRS Vol. 35*

- \*Bruce V. et Green P.R. (1990) Visual perception, Physiology, Psychology and Ecology. Lawrence Erlbaum Associates Ltd. Publishers, 1990
- Brunn, A., Lang, F. , Gülch, E. et Förstner, W. (1998) A Hybrid concept for 3D Building Acquisition, in Journal for Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.53, No.2, April 1998, p.119-129
- \*Canny, J., (1986) A Computational Approach To Edge Detection, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8: p.679-714,.
- \*Cardenas, A. (2004). Utilisation de Patrons Géométriques comme support à la Généralisation Automatique. Département des Sciences Géomatiques. Québec, Laval: 110.
- \*Cecconi, A., Weibel, R. et Barrault, M (2002) Improving automated generalisation for on-demand Web mapping by multiscale Database, Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications.
- \*Chehata, N., Pierrot-Deseilligny, M. et Stamon, G. (2005) Hybrid digital elevation model production guided by 3D-primitives: a global optimization algorithm using graph cuts. Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on Vol 2, 11-14 Sept. 2005 p. 117-20
- Cross A.D.J. et Hancock E.R. (1998) Recognising building patterns using matched filters and genetic search. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 53, Number 2, April 1998, p. 95-107(13)
- Cord, M. et Declercq, D.(1999) Bayesian Model Identification: Application to Building Reconstruction in Aerial Imagery, ICIP 99, Kobe, Japan.
- Crystal, S.(2004) Trends in Photogrammetry. GIS development. <http://www.gisdevelopment.net>-consulté en janvier 2004.
- Csatho, B. et Schenk, T. (1999) INCLUSION OF MULTISPECTRAL DATA INTO OBJECT RECOGNITION. EARSeL/ISPRS Workshop 3-4 June 1999, Valladolid, Spain
- \*CVSD. (2004-2008). Communication and Visualization of Spatial Data. ISPRS- Working Group II / 5 Retrieved 28/01/06, from [http://www.isprs.org/technical\\_commissions/wgic\\_2.html](http://www.isprs.org/technical_commissions/wgic_2.html).
- Dargentou, P., Vincent, N., et Emptoz, H. (1994). Appariement de deux graphes structurels quelconques pour la reconnaissance de lettres manuscrites. Actes du 9e congrès AFCET-RFIA, Paris, Jan. 1994, p. 461-471;

- \* Dash, J., E. Steinle, E., Singh, R.P. et Bahr, H.P. (2004) Automatic building extraction from laser scanning data: an input tool for disaster management, *Advances in Space Research*, Vol. 33, 2004, p. 317-322.
- Dean, T. et Kambhampati, S. (1996). *Planning and Scheduling*. In *CRC Handbook of Computer Science and Engineering*.
- Deng, F., Zhang, Z., Zhang, J. et Zhang, D. (2005) Building Extraction From Multiple Images And LIDAR Data. *MIPPR 2005 : SAR and Multispectral image processing*. Proc. Of SPIE Vol. 6043.
- \*Durupt M. et Thaillandier F. (2006) Automatic building reconstruction from digital elevation model and cadastral data : an operational approach. *Proceedings of PCV'06, Symposium of ISPRS commission III, Bonn*
- Eckert, M., et Joerrg, W. On the Nature of Maps and Map Logic. *Bulletin of the American Geographical Society*, Vol. 40, No 6. p 344-351.
- Englert, R., 1997. Systematic acquisition of generic 3D building model knowledge. In: Foerstner, W., Pluemer, L. (Eds.), *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*. Birkhauser, Basel, p.181–195.
- \*Englert, R. (1997) Systematic acquisition of generic 3D building model knowledge, *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*. Birkhauser, Basel. W. Foerstner and L. Pluemer, p. 181-195.
- Ermes, J.P., Van Den Heuvel, F. et Vosselman, G. (1999) *A Photogrammetric Measurement Method using CSG Models*
- Faugeras, O., Robert, L., Laveau, S., Csurka, G., Zeller, C., Gauclin, C., et Zoghiami I. (1998) 3-D reconstruction of urban scenes from image sequences *Source Computer Vision and Image Understanding archive Vol 69 , Issue 3 (March 1998) table of contents Special issue on CAD-based computer vision*.
- Fischer, A., Kolbe, T. et Lang, G.: (1997) Integration of 2D and 3D Reasoning for Building Reconstruction using a Generic Hierarchical Model (*Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps SMATI '97, Bonn 5/97*).
- Fischer, A., Kolbe, T., Lang, F., Cremers, A.B., Förstner, W., Plümer, L., et Steinhage V. (1998). Extracting buildings from aerial images using hierarchical aggregation in 2D and 3D. *Computer Vision and Image Understanding* 72 (2),p. 20–185.
- Fischer, A., Kolbe, T. et Lang, F. (1999) On the Use of Geometric and Semantic Models for Component-Based Building Reconstruction. in: *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps SMATI '99, Ed.:*

W. Förstner, C.-E. Liedtke, J. Bückner, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn.

- \*Fischler M. A. et Bolles R. C. (1981) Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Comm. of the ACM*, Vol 24, p 381-395.
- \*Flamanc, D. et al. (2003) 3D City Models: An Operational Approach using Aerial Images and Cadastral Maps, *ISPRS Workshop on "Photogrammetric Image Analysis"*, vol. 34 (3/W8).
- Forberg (2007) Generalization of 3D building data based on a scale-space approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. In press.
- Forlani, G. et al. (2006) Complete classification of raw LIDAR data and 3D reconstruction of buildings. *Pattern Analysis Application* : p. 357-374.
- \*Forsyth D. et Ponce J.(2002) *Computer Vision: A Modern Approach*, Prentice Hall
- Förstner, W. (1995) Mid-Level Vision Processes for Automatic Building Extraction. in Gruen A., Kuebler O., Agouris P. (Eds.): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhaeuser, 1995, p. 179-188
- \*Förstner, W. (1999) 3D-city Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods, *Photogrammetric Week '99'*. D. Fritsch and R. Spiller. Stuttgart (Germany), Wichmann Verlag, Heidelberg, p. 291-303.
- \*Franklin, C. (1992) *An Introduction to Geographic Information Systems: Linking Maps to Databases*, Database, 1992, p. 13-21.
- Fraser, C.S., Baltsavias E. et Gruen A. (2002) Processing of Ikonos imagery for submetre 3D positioning and building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 56, Number 3.
- \*Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Papanoditis, N. (2005). Knowledge-based process management to populate databases with 3D multi representation of buildings. In: *ISPRS Hannover Workshop 2005 - High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*
- \*Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Papanoditis, N. (2007a). Saisie semi automatique de bâtiments 3D dans une base de données à représentations multiples – vers une approche intégré. *Revue Internationale de Géomatique*. Vol 17 n1/ 2008.
- \*Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y. et Papanoditis, N. (2007b). Populating a building Multi Representation Data Base with photogrammetric tools: principles, implementation and results. *Soumis à Journal of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*.

- \*Fuchs, F. et Le-Men, H. (2000) Efficient subgraph isomorphism with 'a priori' knowledge-application to 3D reconstruction of buildings for cartography. *Advances in Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1876.
- \*GEMURE. (2002-2005). Generalisation and Multiple Representations for On-Demand Map Production and Delivery. A project financed by GEOIDE from april 2002 to march 2005. Retrieved 2 April 2005, from <http://sirs.scg.ulaval.ca/gemure/en/home.asp>.
- Gerke, M., Butenuth, M., Heipke, C. et Willrich, F. (2003) Graph supported automated verification of road databases using aerial imagery, in: Shi W., Goodchild M., Fisher P. (Eds.), *Proceedings, 2nd International Symposium on Spatial Data Quality*, The Hongkong Polytechnic University, p. 412-430.
- Gilbert D. (2000) *Cours de traitement de l'information – Problèmes Inverses. Cours de Licence et Maitrise de géophysique*. Equipe de Géophysique Interne, Géosciences Rennes, Université Rennes
- Gruen, A. et Wang, X., (1998) CC-modeler : a topology generator for 3-D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53 Vol. 5, p. 286–295.
- Gruen, A., et Wang, X., (2001). News from cyber City-modeler. In: Baltsavias , E. , Gruen , A. , VanGool , L. (Eds.), *Automatic Extraction of Man Made Objects From Aerial And Space Images. (III)*. Balkema, Lisse, p.93–101.
- Gulch, E. et Mueller, H. , (2001) New applications of semi-automatic building acquisition. In: Baltsavias, E. , Gruen, A., VanGool, L. (Eds.), *Automatic Extraction of Man-Made Objects From Aerial And Space Images (III)*. Balkema, Lisse, p.103–114.
- Haala, N. et Anders, K.-H. (1996) Fusion of 2D-GIS and Image Data for 3D Building Reconstruction, in: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 31/3, ISPRS, Vienna, Austria, p. 285-290.
- Haala, N. et Brenner, C. (1999) Extraction of buildings and trees in urban environments, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54(2-3), 130–137.
- Haala, N. et Brenner, C. (1999) Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65(7), 787–795.
- Haala, N., Böhm, J. et Klinec, D. (2002) An integrated approach for the orientation of terrestrial outdoor scenes. *International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS, Vol. XXXIV, Com. II*, p.157-162, ISPRS Commission II Symposium, Xian.
- Haala, N., Böhm, J. et Kada, M. (2002) Processing of 3D Building Models for Location Aware Applications. *International Archives on Photogrammetry and Remote*

Sensing IAPRS, Vol. XXXIV, Com. III, Part A, p. 138-143, ISPRS Commission III Symposium, Graz.

- Haala, N., Becker, S. et Kada, M. (2006) Cell Decomposition for the Generation of Building Models at Multiple Scales. IAPRS Vol. XXXVI Part III, Symposium Photogrammetric Computer Vision, p. 19-24. Bonn.
- Haala, N., Kada, M., Becker, S., Böhm, J. et Alshawabkeh, Y. (2006) Graphics Tools for the Generation of Large Scale Urban Scenes. IAPRS Vol. XXXVI Part 4, "Geospatial Databases for Sustainable Development" on CD.
- \*Heath, M., Sarkar, S., Sanocki, T., et Bowyer, K. (1998) Comparison of Edge Detectors, Computer Vision and Image Understanding, vol. 69, p. 38–54.
- Heipke, C., Pakzad, K. et Straub, B.-M. (2000): Image analysis for GIS data acquisition, Photogrammetric Record, 16 (96),p. 963-985.
- Heipke, C., Pakzad, K., Willrich, F., Peled, A. (2004) Integration of Geodata and Imagery for Automated Refinement and Update of Spatial Databases, Theme Issue. In: JPRS 58, Nr. 3/4, S.p. 127-128
- Heipke C. (2004) Some requirements for geographic information systems : A photogrammetric Point of view. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. Vol. 7-, No2, p. 185-195.
- Heipke, C., Jacobsen, K., et Mills, J.. (2006) Digital aerial cameras, Foreword for Theme Issue. In: JPRS 60, Nr. 6, S. p. 361-362.
- Henricsson, O., Streilein, A. et Gruen, A. (1996) Automated 3-D Reconstruction of Buildings and Visualization of City Models OEEPE Workshop on 3D-City Models
- Henricsson, O. et Baltsavias E., (1997), 3-D building reconstruction with ARUBA: a qualitative and quantitative evaluation, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II) (A. Gruen, E.P. Baltsavias, and O. Henricsson, editors), Birkhauser Verlag, p 65-76
- \*Henricson (1998) The role of color attributes and similarity grouping in 3-D building reconstruction Source Computer Vision and Image Understanding. Vol. 72 , Issue 2 p. 163-184
- Heuvel, F.A. (2000) Trends in CAD-based photogrammetric measurement. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part 5/2, p. 852-863
- Hofmann, D., Maas, H., Streilein, A. (2002) Knowledge-based building detection based on laser scanner data and topographic map information, IAPRS.

- \*Horaud R. et Monga O. (1995) *Vision par ordinateur : Outils fondamentaux*. Editions Hermès, 1995 - deuxième édition revue et augmentée
- Huguet, A.B., Carceroni, R.L. et Araujo, A.A. (2003) Towards automatic 3D reconstruction of urban scenes from low-altitude aerial images. in: *Image Analysis and Processing, 2003.Proceedings. 12th International. Conference on*
- \* Jaynes, C., Riseman, E. et Hanson, A. (2003) Recognition and reconstruction of buildings from multiple aerial images. *Computer Vision and Image Understanding*.
- \* Jibrini, H., Paparoditis, N., Pierrot-Deseilligny, M. and Maître, H., (2000) Automatic building reconstruction from very high resolution aerial stereopairs using cadastral ground plans , XIX ISPRS Congress, Commission III, WGIII/1, vol. 33 (B3).
- Jung, F. (2004) Detecting building changes from multitemporal aerial stereopairs. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing* 58 (2004) p. 187-201.
- Kada, M. (2005) 3D Building Generalisation. In: *Proceedings of the 22th International Cartographic Conference, La Coruna, Spain*.
- Klir G.J. et Yuan Bo (1995) *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Keating T. et a (2003) *Photogrammetry Goes. Digital GIS Development*. <http://www.gisdevelopment.net>-consulté en janvier 2004.
- Kim, T. et Muller, J.P. (1996) Automated Urban Area Building Extraction from High Resolution Stereo Imagery, *Image and Vision Computing*,14(2).
- Kim T., et Muller, J.-P. (1999) Development of a graph-based approach for building detection. *Image and Vision Computing*, Vol. 17, Number 1, January 1999, p. 3-14(12)
- Knudsen, T., Hamid, H., et Pilemann, B. (2002) A Comparison of Neuro-Fuzzy and Traditional Image Segmentation Methods for Automated Detection of Buildings in Aerial Photos. *Proc. PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION 2002 (PCV'02)*, Graz, Austria.
- Koch, A. et Heipke, C.: (2004) Semantically Correct 2.5D GIS Data - the Integration of a DTM and Topographic Vector Data. In: Fisher, P. (Hrsg.): *Developments in Spatial Data Handling, 11. Symposium on Spatial Data Handling*. Berlin-Heidelberg-New York : Springer-Verlag, S. p. 509-526
- \* Lafarge, F., Trontin, P., Descombes, X., Zerubia, J., Pierrot-Deseilligny, M. (2006) An automatic building extraction method : Application to the 3D-city modeling, *Research Report, INRIA, France, France, May 2006, no 5925*,

<http://hal.inria.fr/inria-00077117>.

- \* Lafarge, F., Descombes, X. , Zerubia, J. et Pierrot-Deseilligny, M. (2006) Automatic 3D Building Reconstruction form DEMS : an application to pleiades simulations. Proceedings of PCV'06, Symposium of ISPRS commission III, Bonn
- \* Lam, L., Lee, S-W., Suen, Y. (1992) Thinning Methodologies-A Comprehensive Survey IEEE Transactions on Pattenr Analysis and Machine Intelligence September 1992 (Vol. 14, No. 9) p. 869-885
- \* Larrivée, S., Bédard, Y. et Pouliot, J. (2006) Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D, Revue Internationale de Géomatique, vol. 16/1.
- Lee, S.C., et Nevatia, R. (2003) Interactive 3D building modeling using a hierarchical representation. In: Higher-Level Knowledge in 3D Modeling and Motion Analysis, 2003. HLK 2003. First IEEE International Workshop on
- Liu, Z.J., Wang, J. et Liu, W.P. (2005) Building Extraction from High Resolution Imagery based on Multi-scale Object Oriented Classification and Probabilistic Hough Transform. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS apos;05. Proceedings. 2005 IEEE International. Vol. 4.
- \* Lloyd, R., Hodgson, M. et Stokes, A. (2002) Visual. Categorization with Aerial Photographs. Annals of the Association of American Geographers 92 (2), p. 241–266.
- Lohmann, P. (2002) Segmentation and filtering of laser scanner digital surface models, IAPRS, Vol. XXXIV, Part 2,, Xi'an, p. 20-23.
- Mackaness, W. , Ruas, A., Sarjakoski, T. (2007) Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications. Published on behalf of the international cartographic association.
- Madani, M. (2001) Importance of Digital Photogrammetry for a complete GIS 5th Global Spatial Data Infrastructure Conference. Cartagena, Columbia May 21-25, [codazzi4.igac.gov.co/gsdi5/documentos/M\\_Madani.pdf](http://codazzi4.igac.gov.co/gsdi5/documentos/M_Madani.pdf)
- \*Maître, H. (2003). Le traitement des images, Traitement du signal et de l'image, Hermès Sciences Publications.
- Maillot N., Thonnat, M. et Boucher, A. (2004) Towards ontology-based cognitive vision. Machine Vision and Applications MVA, 16(1),p. 33-40, Springer-Verlag Heidelberg, December, 2004.
- Mayer, H. (1999) Automatic object extraction from aerial imagery—a survey focusing on buildings. Computer Vision and Image Understanding 74 (2),p. 138–149.



- \*Mayer, H., (2004) Object Extraction for Digital Photogrammetric Workstations, XXth ISPRS Congress - Geo-Imagery Bridging Continents - Commission II, vol. 35(B2).
- Mindru, F., Moons, T. et Van Gool, L. (1999) Recognizing color patterns irrespective of viewpoint and illumination. in: Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on. Vol. 1.
- Moisan S., Vincent, R. et Thonnat, M. (1997) Program Supervision: from Knowledge Modeling to Dedicated Engines. Rapport de recherche INRIA n°3324. <ftp://ftp.inria.fr/INRIA/tech-reports/publi-pdf/RR/RR-3324.pdf>. - disponible le 18 mai 2007.
- Nevatia, R. et Price, K.E., (2002) Automatic and Interactive Modeling of Buildings in Urban Environments from Aerial Images, ICIP02(III: 525-528).
- Nevatia, R., Lin, C. et Huertas, A. (1997) A System for Building Detection from Aerial Images, Ascona97, p. 77-86.
- Niederöst, M., (2002) Detection and reconstruction of buildings for automated map updating. Thesis Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zurich, Nr. 14909
- Olteanu, A., Mustière S. et Ruas, A.. (2006) Matching imperfect spatial data. 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. Edited by M. Caetano and M. Painho.
- \*Oriot, H. et A. Michel (2004) Building Extraction from Stereoscopic Aerial Images, Applied optics (Optical Society of America), vol. 43, p. 218-226.
- Ortner, M. et Descombes, X. (2004) A discontinuity detector for building extraction from digital elevation models by stochastic geometry. Congrès EUSIPCO 2004 (XII. European Signal Processing Conference) (September 6-10, 2004, Vienna, Austria). EUSIPCO. Conference No12, Vienna , AUTRICHE (06/09/2004)
- \* Ortner, M., Descombes, X. et Zerubia, J. (2007) Building outline extraction from Digital Elevation Models using marked point processes. International Journal of Computer Vision. Vol 72 , Issue 2 p.107 – 132
- Papadoditis, N., Cord, M., Jordan, M. et Cocquerez, J-P (1998) Building detection and reconstruction from mid- and high-resolution aerial imagery. Computer vision and image understanding, 72(2): p. 122-142.
- \* Papadoditis, N., Souchon, J-P., Martinoty, G. et Pierrot-Deseilligny, M. (2006) High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 60, Issue 6, September 2006, p. 400-412

- \* Park. J., Impyeong, L., Yunsoo C. et Young J.L.. (2006) Automatic extraction of Large Complex Buildings using LIDAR data and digital maps. Proceedings of PCV'06, Symposium of ISPRS commission III, Bonn
- \*Parker J.R. (1997); Algorithms for image processing and computer vision, Wiley Computer Publishers, New York, 1997, ISBN 0471140562.
- \*Pierrot-Deseilligny, M. et N. Paparoditis (2006) A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from Spot5-HRS stereo imagery, ISPRS Ankara Workshop 2006. Topographic Mapping from Space.
- Rau, J. Y., et Chen, L. C., (2003) Robust reconstruction of building models from three-dimensional line segments, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 69.
- \*Rottensteiner F., Trinder, J., Clode, S. et Kubik, K. (2006) Fusing airborne laser scanner data and aerial imagery for the automatic extraction of buildings in densely built-up areas. Proceedings of PCV'06, Symposium of ISPRS commission III, Bonn
- \*Rottensteiner F. (2001) Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Phd thesis, Inst. Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna Univ. of Technology, 2001.
- \*Rottensteiner, F. et J. Jansa, (2002) Automatic Extraction of Buildings from Lidar Data and Aerial Images, Commission IV Symposium "Geospatial Theory, Processing and Applications" - WG3, Vol. 34(3).
- Rottensteiner F., Trinder, J., Clode, S. et Kubik, K (2004) Fusing Airborne Laser Scanner Data and Aerial Imagery for the Automatic Extraction of Buildings in Densely Built-up Areas. In: Proceedings of the XXth ISPRS Congress in Istanbul, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV- B3, p. 512-517.
- Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. et Kubik, K. (2006) Using the Dempster-Shafer Method for the Fusion of LIDAR Data and Multi-spectral Images for Building Detection. In: Information Fusion 6(4), p. 283-300.
- \*Roy, S. (1999) Stereo Without Epipolar Lines : A Maximum-Flow Formulation, Int. Journal of Computer Vision, Vol. 34, No. 2/3, Août 1999, p. 147-162.
- \*Ruas, A. (2002). Généralisation et représentation multiple, Information géographique et Aménagement du Territoire, Paris, Hermès Sciences Publications.
- \*Sabo, N. (2004). Intégration des Algorithmes de Généralisation et des Patrons Géométriques pour la Création d'Objets Auto-Généralisants afin d'Améliorer la

Généralisation Cartographique Automatique. Québec, Département des Sciences Géomatiques. Proposé de recherche.

- \* Sabo, M.,N., Cardenas, A., Bernier, E. et Bédard, Y. (2005) Introduction du concept de patrons géométriques et application aux bâtiments afin de faciliter leur généralisation cartographique à la volée. *Geomatica, the journal of the Canadian Institute of Geomatics*, Vol. 59, 2005, p. 295-313.
  
- Salvador, E., Cavallaro, A. et Ebrahimi, T. (2001) Shadow identification and classification using invariant colormodels. *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2001. Proceedings. (ICASSP '01). 2001 IEEE International Conference on Vol.: 3.
  
- \*Sarjakoski, T. (2007) Conceptual Models of generalisation and Multiple Representation. *Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications*. W. Mackaness, A. Ruas, T. Sarjakoski
  
- \*Saux, E. et R. Billen. (2006). *Information géographique tridimensionnelle: théories, systèmes et applications*, Revue Internationale de Géomatique, numéro spécial, Paris, Hermes Sciences Publications.
  
- Schindler, K. et Bauer, J. (2003) Detailed building reconstruction with shape templates. Proc. 27th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition, Laxenburg, Austria.
  
- Schindler, K. et Bauer, J. (2003) A model-based method for building reconstruction. Proc. ICCV workshop on Higher-Level Knowledge in 3D Modeling and Motion (HLK'03), Nice, France.
  
- Anders, K-H. et Walter V. (1998) Linking objects of different spatial data sets by integration and aggregation. *Geoinformatica* 2(4).
  
- \* Shackelford, A.K., Davis, C.H. et Wang, X. (2004) Automated 2-D Building Footprint extraction from High-Resolution satellite Multispectral Imagery. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International Vol. 3*
  
- Sohn, G. et Dowman, J. (2003) Building Extraction. Using LIDAR DEMs and IKONOS Images. *ISPRS*, Vol. XXXIV, PART 3/W13. Dresden,. Germany.
  
- \*Sohn, G., (2004) Extraction of Building from High-Resolution Satellite Data and LIDAR, XXth ISPRS Congress, Commission III - WGIII/4, Vol. 34 (B3).
  
- Stilla, U., et Jurkiewicz, K., (1999) Automatic reconstruction of roofs from maps and elevation data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 32, Part7-4-3W6, p. 139–143.

- \*Sternberg S.R., (1983), Biomedical image processing. Computer. IEEE Computer Society, 6:p. 22-34.
- Stojic, M., (2004) Growing Importance of Smooth, Integrated Geospatial Information Workflows. [www.directionsmag.com/article.php?article\\_id=525](http://www.directionsmag.com/article.php?article_id=525). Consultable en mai 2007
- \*Suveg, I. et G. Vosselman, (2000) 3D Reconstruction of Building Models, XIX ISPRS Congress - Commission III - WGIII/1, vol. 33(B3).
- \*Suveg, I. et G. Vosselman, (2004) Reconstruction of 3D Building Models from Aerial Images and Maps, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, vol. 58, p. 202-224.
- \*Taillandier, F. et R. Deriche, (2004) Automatic Building Reconstruction from Aerial Images: A Generic Bayesian Framework, XXth ISPRS Congress - Geo-Imagery Bridging Continents - Commission III - WGIII/4, vol. 35(B3).
- Taejung, K., Lee, T-y, Lim Y-L, Kim K-O. (2005) The use of voting strategy for building extraction from high resolution satellite images. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS apos;05. Proceedings. 2005 IEEE International Vol. 2.
- Tangelder, J.W.H., Vosselman, G et van den Heuvel, F. (2000) Object Oriented measurement of Pipe Systems Using Edge Matching and CSG Models with Constrains. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 33, part B5/2, Amsterdam, the Netherlands, p. 132-139.
- Tao, CV., (2002), Digital Photogrammetry- The Future of Spatial Data Collection, GeoWorld, May, 2002. <http://www.geoplance.com/gw/2002/0205/0205dp.asp>. -
- Thonnat, M. (2003) Intelligent Environments for Problem Solving by Autonomous Systems. Rapport de recherche INRIA. - disponible le 18 mai 2007. [www.inria.fr/rapportsactivite/RA2003/orion2003/orion.ps.gz](http://www.inria.fr/rapportsactivite/RA2003/orion2003/orion.ps.gz).
- \*Theodoridis, S. et K. Koutroumbas. (2006). Pattern Recognition, Third Edition, Academic Press.
- \* Thonnat, M., Moisan, S. et Crubézy, M. (1999) Experience in Integrating Image Processing Programs », 1st International. Conference on Vision Systems (ICVS'99).
- \*Tseng, Y.-H. et S. Wang, (2003) Semiautomated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 69, p. 171-180.
- \*Tseng, Y-H et Wang S. (2001) Experiments on CSG Model-based Building Extraction from Aerial Images. 22nd Asian Conference on Rremote Sensing. Singapore

- Vidakovic, B. et Mueller P. (2007) Wavelets for kids : a tutorial introduction. Disponible le 18 mai 2007 <http://www.isye.gatech.edu/~brani/wp/kidsA.pdf>
- Vincent, R. et Thonnat, M. (1997) Planning, Executing, Controlling and Replanning for IP program library. Proc. of 8th Artificial intelligence and Soft computing ASC'97. Banff, Canada.
- \*Vinson, S. et Cohen, L.D. (2002) Multiple rectangle model for buildings segmentation and 3D scene reconstruction. Proceedings. 16th International Conference on Pattern Recognition.
- Vinson, S., Cohen, L.D et Perlant, F. (2001) Extraction of rectangular buildings using DEM and orthoimage. In SCIA, Bergen, Norway.
- \*Vosselman, G. et S. Dijkman, (2001) 3D Building Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans, ISPRS WGIII/3-6 Workshop on "Land Surface Mapping en Characterization Using Laser Altimetry", vol. 34 (3/W4).
- \*Vosselman, G. et H. Veldhuis, (1999) Mapping by Dragging and Fitting of Wire-Frame Models, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 65, p. 769-776.
- Wang, C. et Zhao, Z. (2006) Automatic Building extraction from LIDAR Point Data in Urban Areas. Proceedings of SPIE -- Vol. 6419. Geoinformatics 2006: Remotely Sensed Data and Information, Liangpei Zhang, Xiaoling Chen, Editors, 64190Q (Oct. 28, 2006).
- Weibel, R. et Jones C.B., (1998) computational perspectives on map generalization, *GeoInformatica*, 2(4)
- Weibel R. et Brassel E.K. (2006) Map Generalization: What a difference two decades make. In. *Classics from IJGIS Twenty Years of the International Journal of Geographical Information Science and Systems*. Edited by Peter Fisher.
- \*Weibel, R. et G. Dutton, (1999) Generalising spatial data and dealing with multiple representations, *Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire and D. W. Rhind. Cambridge, John Wiley & Sons, p. 125-155.
- \*Weidner U. (1997) Digital Surface Models for Building Extraction, in: A. Grün (Ed.): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*.
- Willuhn, W. et Ade, F. (1996) A Rule-Based System for House Reconstruction from Aerial Images. International Conference on Pattern Recognition.
- Yao JF. (2007) Analyse d'images par champs de Markov. [perso.univ-rennes1.fr/jian-feng.yao/pedago/apmepTexte.pdf](http://perso.univ-rennes1.fr/jian-feng.yao/pedago/apmepTexte.pdf) - disponible le 18 mai 2007.

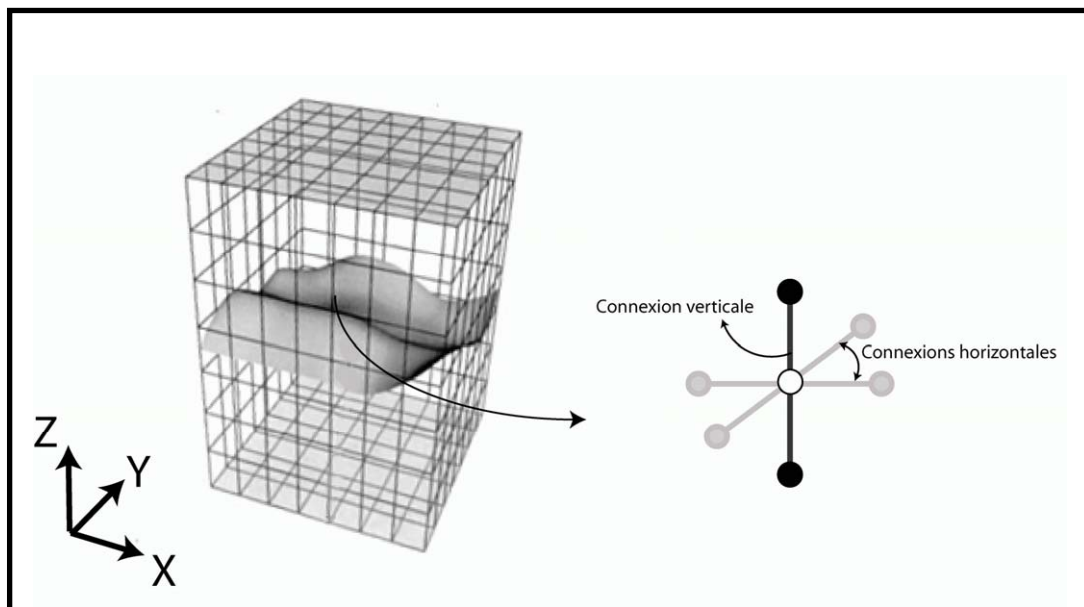
\* Zebedin, L., Klaus, A., Gruber-Geymayer, B., Karner, K. (2006) Towards 3D map generation from digital aerial images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 60, Issue 6, September 2006, p. 413-427

Zhang, Y. (1999). Optimisation of building detection in satellite images by combining multispectral classification and texture filtering, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.54, p.50-60.

Zhang, C. (2002) Updating of Cartographic Road Databases by Images Analysis. Thesis dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zurich, Nr. 14934

## Annexe 1 : Extraction de MNS par recherche de coupe minimale dans un graphe

Cette approche a été introduite par Roy et Cox (1998) et permet d'introduire une contrainte d'homogénéité spatiale lors de la détermination du MNS. Le principe est de rechercher le MNS qui est optimal face à deux critères : (1) l'homogénéité de la surface et (2) la cohérence entre les MNS et les images. La contrainte d'homogénéité spatiale correspond à une connaissance sur l'homogénéité du relief de la scène observée. Le MNS est généré automatiquement en combinant appariement photométrique et recherche de coupe optimale dans un graphe 3D.



**Figure 40** : Cube de recherche de surface optimale, figure extraite et adaptée de (Roy et Cox 1998)

Pour ce faire, on crée un graphe 3D en discrétisant l'espace terrain, l'espace de recherche, selon les directions du référentiel terrestre. L'espace de recherche, défini dans le référentiel terrestre, est délimité par la zone à couvrir avec le MNS dans le plan XY et par les valeurs possibles selon l'axe Z. L'espace de recherche est représenté par le cube dans la Figure 40. Chacun des points obtenus lors de la discrétisation de l'espace de recherche est connecté à ses quatre voisins dans le plan horizontal et à ses deux voisins selon l'axe des Z. La partie droite de la figure illustre ces connexions. Chacune des positions discrètes de l'espace de recherche est associée à un nœud du graphe et chaque connexion du graphe correspond à

une relation de proximité spatiale (ex : au dessus de). Dans la mesure où les points sont générés avec un pas d'échantillonnage constant, le nombre de connexions est directement lié à la distance terrain séparant deux points. Ainsi les connexions dans le graphe permettent de gérer la notion de proximité entre les différents points du terrain. Chaque coupe du graphe (i.e. surface séparant le graphe en deux parties supérieures et inférieures) correspond à une solution possible de MNS. Toute la question est donc de déterminer parmi tous les MNS possibles (i.e. parmi toutes les coupes du graphe possibles), lequel correspond le mieux à la réalité terrain.

Roy et Cox (1998) ont proposé d'associer à chaque arrête un coût qui traduit la vraisemblance entre la position de l'espace qu'elle représente et les données sources (les images). On peut par exemple associer un coût très élevé lorsque la corrélation (projection du point terrain dans les images sources selon l'équation de colinéarité, puis comparaison des voisinages des deux points dans les deux images) est faible et réciproquement. La recherche du MNS revient alors à chercher parmi tous les MNS possibles celui qui est le plus cohérent avec les données sources c'est-à-dire celui qui correspond à la coupe minimale dans le graphe.

On attribut donc un coût à chaque connexion correspondant à la moyenne des coûts calculés pour les nœuds qu'il connecte. S'il s'agit d'une connexion horizontale (représentées en gris clair dans la figure) le coût de la connexion est multiplié par un coefficient. Celui-ci permet d'influer sur le niveau de lissage de la surface. Le calcul des coûts est décrit ci-après. a et b représentent les deux nœuds,  $CoutVz$  représente le coût pour une connexion verticale et  $CoutHz$  pour une connexion horizontale.  $Cout(x)$  représente la fonction qui pour une position de l'espace terrain évalue la similarité avec les données (ex : inverse de la corrélation) :

$$CoutVz = \frac{Cout(a) + Cout(b)}{2} \quad CoutHz = CoutVz \cdot \alpha$$



Un coefficient élevé fera tendre la surface vers un plan horizontal et à l'inverse un coefficient faible réduira l'importance de la contrainte d'homogénéité spatiale. Le MNS, représenté par la surface grise dans le cube Figure 40, est ensuite obtenue en recherchant la coupe minimum, au sein du graphe 3D.

## Annexe 2 : Extraction de plans selon une approche RANSAC

**RANSAC** est l'abréviation de "RANdom SAmple Consensus". Il s'agit d'un algorithme, introduit dans Fischler and Bolles (1981), qui permet d'estimer les paramètres d'un modèle mathématique à partir de mesures (justes et fausses) et d'un critère d'optimisation. RANSAC est une méthode dite « robuste » car elle permet de trouver des solutions justes en présence de grand nombre de mesures fausses ce qui la rend particulièrement intéressante pour traiter des mesures générées automatiquement.

Le principe de fonctionnement est d'estimer les paramètres d'un modèle en utilisant pour son calcul un échantillon valide, i.e. composé uniquement de mesures justes. La taille de l'échantillon correspond au nombre de mesures minimum requis.

Toute la question est donc de savoir si un échantillon est uniquement composé de mesures justes. Plutôt que de répondre strictement à cette question l'auteur propose de considérer un échantillon comme valide lorsque sa probabilité de l'être est supérieure à un seuil. La recherche d'un échantillon valide se fait alors de manière aléatoire parmi les échantillons possibles et est interrompue dès que la probabilité d'avoir un bon échantillon est supérieure au seuil imposé. Le pseudo code ci-après illustre l'utilisation de RANSAC pour extraire des plans à partir de points 3D.

Soient les variables d'entrée :

- Collections de points correspondant aux mesures : *Pts*
- Distance d'un point au plan pour que le point soit juste : *D*
- Probabilité recherchée : *Seuil*

Soit la variable de sortie :

- Le meilleur plan trouvé : *MeilleurPlan*

Soient les variables locales :

- Les points identifiés comme justes : *PtsJustes*

- Les points identifiés comme faux : *PtsFaux*
- La probabilité associée à l'échantillon courant : *ProbaCourante*
- Le plan correspondant à l'échantillon courant : *PlanCourant*
- L'échantillon courant : *PtsSelectionnés*
- Le point courant : *Pt*
- La distance courante : *d*
- Nombre maximum de points valides trouvés : *NbMax*

### **Initialisation :**

*ProbaCourante* = 0

*NbIterations* = 0

*NbMax* = 0

*MeilleurPlan* = invalide

### **Execution :**

**Tant que** *ProbaCourante* < *Seuil*

Vider *PtsFaux* et *PtsJustes*

*NbIterations* = *NbIterations* + 1 ;

Sélectionner de manière aléatoire un échantillon de 3 points parmi *Pts* et l'assigner à *PtsSelectionnés*

Calculer l'équation de *PlanCourant* à partir de *PtsSelectionnés*

**Pour chaque** point *Pt* de *Pts* calculer la distance *d* du point au plan

Si  $d > D$  alors ajouter *Pt* à *PtsFaux*

Si  $d < D$  alors ajouter *Pt* à *PtsJustes*

**Si** le nombre de *PtsJustes* > *NbMax*

*NbMax* = *PtsJustes*

*MeilleurPlan* = *PlanCourant*

Calculer *ProbaCourante* en fonction de *NbMax*, nombre de points dans *Pts* et

*NbIterations*

Fin

La probabilité courante est calculée comme suit :

Proportion de points faux =  $1.0 - NbMax / \text{Nombre de points total}$

$$currentProba = 1.0 - ((1.0 - (1.0 - \text{Proportion de points faux})^3)^{NbIterations})$$

### **Annexe 3 : Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une Base de Données à Représentations Multiples : Vers une approche intégrée**

*Article (Frédéricque et al. 2008) publié dans la Revue Internationale de Géomatique*

Benoit Frédéricque, Sylvie Daniel, Yvan Bédard, Nicolas Paparoditis

**RÉSUMÉ :** Le peuplement de BDRM-3D (Bases de Données à Représentation Multiple 3D) est de plus en plus requis pour supporter des applications avancées de cartographie sur demande et d'analyse décisionnelle géospatiales. Cet article présente une nouvelle approche de saisie photogrammétrique en représentation multiple visant à peupler les bâtiments d'une BDRM3D. Le processus proposé traite simultanément l'extraction des Géométries Détaillées (GD) et des Géométries Simplifiées (GS). Il est semi-automatique et tire profit d'une intervention rapide de l'opérateur au début du processus pour améliorer les performances des traitements automatiques. Cet article présente les motivations de ce projet, le situe par rapports aux travaux existants, propose une architecture de système adaptée aux besoins ainsi que les résultats préliminaires.

**ABSTRACT :** 3D MRDB (Multi Representation Data Base) population is more and more required to support advanced cartographical applications and advanced geospatial decisional analysis. This paper presents a new photogrammetric approach regarding multiple representation acquisition process to populate the buildings of a 3D MRDB. The suggested process tackles simultaneously the Detailed Geometries (DG) extraction and the Simplified Geometries (GS) extraction. The semi-automatic process takes benefits of a quick operator intervention, at the process beginning, to improve the automatic process performances. This paper describes the project motivation, situates it regarding existing work, proposes a system architecture adapted to the needs and introduces preliminary results.

Mots clés: Bases de données Geospaciales, représentations multiples, photogrammétrie, bâtiments, connaissances a priori.

KEYWORDS : Geospatial databases, multiple representations, photogrammetry, buildings, a priori knowledge.

## 1. Introduction

Le développement des technologies de l'information au cours des deux dernières décennies a révolutionné l'accessibilité et l'utilisation des données géographiques tant au niveau des domaines d'utilisation que des types de données géographiques utilisées.

D'une part, l'exploitation d'outils géomatiques a permis de dépasser le cadre de la simple production cartographique et touche désormais des applications de bases de données géographiques dans de nombreux domaines tels que l'urbanisme, l'environnement ou encore le géomarketing. L'arrivée d'internet quant à elle a permis de démocratiser l'accès à l'information géographique en amenant la cartographie dynamique (ex : MapQuest), l'imagerie aérienne et satellitaire (ex. GoogleEarth), la modélisation urbaine 3D<sup>6</sup> (ex : GoogleEarth, VirtualMap) et les bases de données géographiques (ex : utilisation de bases de données de bien immobiliers couplée à GoogleEarth, [www.remax-quebec.com](http://www.remax-quebec.com)) dans les foyers en quelques clics. Le caractère spatial de l'information (80% des systèmes d'information ont une référence spatiale) (Franklin 1992) est de plus en plus pris en compte (Bédard, Rivest et al. 2006), ce qui se traduit par des besoins plus importants en bases de données géographiques et en outils d'analyse et de visualisation de données géographiques.

D'autre part, les données géographiques tendent de plus en plus à incorporer la troisième dimension à part entière. Ceci tient du fait que certaines analyses nécessitent une prise en compte des élévations, hauteurs et formes complètes (ex : études d'impact visuel, études phoniques, géologie, hydrogéologie...) et du fait que les représentations 3D de l'espace sont souvent plus faciles à interpréter par les non experts. Toutefois, si cette tendance est

---

<sup>6</sup> La notion de 3D est souvent ambiguë dans la littérature. Dans cet article nous nous référons aux dénominations proposées dans (Larrivée, Bédard et al. 2006) et distinguerons les dimensions de l'univers dans lequel est positionné l'objet des dimensions liées à sa forme. Nous considérons un objet comme 3D si celui-ci est volumétrique et nécessite donc trois axes pour être défini.

marquée dans la communauté scientifique de la géomatique (CVSD 2004-2008; Larrivée, Bédard et al. 2006; Saux et Billen 2006), les données disponibles aujourd'hui sont majoritairement 2D.

En plus de se limiter majoritairement à des représentations 2D, les applications de cartographie dynamique disponibles aujourd'hui comportent des limitations notamment en termes de personnalisation et d'interaction. Les solutions de cartographies en ligne actuelles permettent d'accéder à des cartes préétablies à des échelles spécifiques, définies selon des spécifications génériques qui ne peuvent être modifiées par l'utilisateur. Les fonctionnalités offertes aux utilisateurs se limitent alors à des fonctionnalités de navigation (d'une zone d'intérêt à une autre et d'une échelle à une autre) et d'ajout ou de suppression des thèmes à afficher. Ces degrés de liberté peuvent s'avérer insuffisants si l'on souhaite personnaliser l'information géographique proposée en fonction de la demande de l'utilisateur ou du support qu'il utilise (ex : son ordinateur ou son téléphone cellulaire). On parle alors de « cartes à la demande ». Pour améliorer cette réponse aux besoins actuels et émergents, plusieurs travaux suggèrent d'être en mesure de personnaliser la création de cartes en temps réel en permettant de personnaliser son contenu en influant sur le choix des représentations (niveau d'abstraction, sémiologie) au niveau de l'instance<sup>7</sup> (Bernier, Bédard et al. 2003). Il pourrait par exemple s'agir de proposer une représentation plus détaillée pour certaines occurrences<sup>8</sup> que pour d'autres selon l'application. Un usager qui cherche à définir son itinéraire pourrait souhaiter avoir une description plus détaillée du bâtiment où il doit se rendre et des éléments constituant des repères visuels facilement identifiables sur son trajet (de telles stratégies sont d'ailleurs fréquentes sur les cartes touristiques identifiant les principales attractions d'une ville, et ceci fréquemment en 3D). Par ailleurs, la mise en œuvre d'outils avancés d'analyse décisionnelle peut aussi requérir de modifier en temps réel des représentations cartographiques au niveau de l'instance afin d'aider l'utilisateur dans son analyse. En effet, dans le cas d'outils d'analyse spatiale en ligne (Spatial On-Line Analytical Processing, SOLAP) (Bédard, Rivest et al. 2006) on souhaite d'une part adapter en temps réel la représentation cartographique en fonction des requêtes de l'utilisateur et

---

<sup>7</sup> Objet unique appartenant à une classe d'objets. Par exemple, l'édifice sis « au 143 rue St Jean » est une instance de la classe « bâtiment »

<sup>8</sup> Synonyme d'instance.

d'autre part permettre à l'utilisateur d'interagir avec les éléments représentés sur la carte en lui permettant de passer d'un niveau de détail à un autre pour une occurrence donnée (opérations de forage). Pour de telles applications dites analytiques, il est nécessaire de gérer explicitement les différentes géométries au niveau des instances. La création de « cartes à la demande » en temps réel, en permettant de personnaliser son contenu en influant sur le choix des représentations au niveau de l'instance, est donc un enjeu pour les applications de cartographie dynamique mais aussi pour les applications d'analyse décisionnelles.

La mise en œuvre de telles solutions requiert de fournir à la demande des représentations géométriques d'objets géographiques à différents niveaux d'abstraction. Il faut donc disposer de représentations détaillées et être en mesure de les généraliser automatiquement en temps réel. L'obtention de géométries détaillées (GD) de bâtiments se fait généralement par procédés photogrammétriques pour des considérations de coût et de faisabilité. L'automatisation de ces processus a motivé de nombreux travaux de recherche afin de réduire l'implication de l'opérateur humain (source de surcoût) dans les traitements et est un axe de recherche toujours actif aujourd'hui (Baltsavias 2004).

La généralisation automatique a aussi motivé de nombreux travaux de recherche. Comme l'avaient déjà mentionné (Ceconi, Weibel et al. 2002; Ruas 2002), il n'existe aujourd'hui aucune solution qui permette une généralisation automatique complète en temps réel. Afin de contourner ce problème plusieurs chercheurs ont proposé d'utiliser des **Bases de Données à Représentations Multiples (BDRM)** (Weibel et Dutton 1999; Bédard 2004; Bernier et Bédard 2005). Il s'agit alors de stocker plusieurs représentations de mêmes objets géographiques à différents niveaux d'abstractions (ou, en de plus rares cas, pour un même niveau d'abstraction mais à des fins différentes). L'exploitation de BDRM, combinée à l'utilisation efficace de liens explicites entre les différentes géométries d'un même objet géographique, permet alors d'offrir un niveau de personnalisation et de navigation au niveau de l'instance. (ex : prototype UmapIt) (Bernier, Bédard et al. 2005).

L'utilisation de BDRM permet donc de contourner certaines difficultés liées à la généralisation à la volée mais implique d'autres difficultés concernant leur peuplement. Il existe trois moyens de peupler une BDRM en liant les géométries de mêmes objets



géographiques : (1) la généralisation de géométries détaillées complétée par la conservation du lien entre la géométrie détaillée et les géométries généralisées, (2) l'appariement géométrique et sémantique de différentes sources à différentes échelles, ce qui construit le lien entre les représentations à différentes échelles de la même occurrence d'objet, (3) l'acquisition à la source en représentation multiple (ex. numérisation 2D RM de carte papier, photogrammétrie 3D à RM). Puisque les deux premières méthodes demandent beaucoup d'assistance humaine et semblent encore faire face à des limites insurmontables depuis quelques années, nous avons également introduit l'acquisition à la source en représentation multiple et c'est celle-ci qui est à l'origine de cet article. Ces trois approches de peuplement de BDRM vont être précisées ci-après.

L'obtention des géométries simplifiées par généralisation automatique serait la solution idéale dans la mesure où les conditions requises pour la mettre en œuvre se limiteraient à l'obtention du jeu de données détaillées et qu'elle permettrait de créer automatiquement les liens entre les différents niveaux de détails. Malheureusement malgré de nombreux travaux et des progrès importants, il n'existe pas aujourd'hui de solution totalement automatisée pour effectuer la généralisation (Sabo, Cardenas et al. 2005). La généralisation est un processus qui implique aujourd'hui l'opérateur humain dans une large proportion, ce qui implique des problèmes de coûts.

L'appariement de données géométriques et sémantiques a motivé de nombreux travaux de recherche (Badard et Lemarié 2002). Les problématiques associées sont nombreuses. L'appariement de données produites par des producteurs de données différents selon des spécifications et des ontologies différentes implique de devoir comparer des données de différents types géométriques (points, lignes simples, polygones...) correspondant à des critères de sélection différents (ex. taille du plus petit élément à saisir, largeur minimale, intermittent/continu) et répondant à des appellations différentes (ex : routes principales vs route nationales). De plus, ces sources ne sont que rarement à jour de façon synchronisée. Le lecteur pourra se référer à (Bernier et Bédard 2005) où la problématique de la constitution de l'entrepôt de données utilisé dans le cadre du projet GEMURE (GEMURE 2002-2005) est décrite dans le détail et illustre parfaitement les difficultés associées au peuplement de BDRM par appariement géométrique et sémantique de différentes sources

de données. De plus, la condition préalable de disposer des différentes sources peut constituer un problème de coût ou de faisabilité. Le peuplement de BDRM par intégration de données requiert donc aussi l'intervention d'opérateur humain dans une large proportion et présente d'importants problèmes non-techniques pratiquement impossibles à résoudre.

L'acquisition en représentation multiple a été proposée comme troisième approche de peuplement de BDRM en traitant notamment de la saisie des **Géométries Simplifiées (GS)** en 2D à l'aide de patrons géométriques multi-échelles (Cardenas 2004). Le processus proposé repose sur l'exploitation de **Géométries Détaillées (GD)** déjà extraites auxquelles on associe a posteriori des patrons multi-échelles. L'exploitation d'autres données de référence 2D (ex : cartes scannées, orthophotographies) pour les cas où des GD ne sont pas disponibles a aussi été proposée. Le concept d'objet auto-généralisant a par ailleurs été développé pour dépasser certaines limitations liées à l'utilisation de patrons multi-échelles (Sabo 2004). Cette troisième approche est encore en voie de développement à notre centre de recherche pour les objets 2D et n'a jusqu'à présent pas été mise en œuvre dans un contexte de production.

Le peuplement de BDRM, phase nécessaire pour être en mesure de supporter des applications avancées de cartographie à la demande et d'analyse en ligne de données géographiques, implique donc dans une large proportion l'intervention d'opérateurs humains pour l'obtention des géométries détaillées et simplifiées. La réduction de l'importance du rôle de l'opérateur humain dans le peuplement de BDRM en général et plus particulièrement de BDRM3D (répondant à un éventail plus large d'applications : cf paragraphe 3) est donc un enjeu majeur émanant des applications les plus récentes exploitant la cartographie.

Cet article présente une nouvelle approche de saisie photogrammétrique en représentation multiple visant à peupler une BDRM3D de bâtiments. Le processus proposé traite simultanément de l'extraction des **Géométries Détaillées (GD)** et de l'extraction des **Géométries Simplifiées (GS)**. Il est semi-automatique et tire profit d'une intervention rapide de l'opérateur au début du processus pour améliorer les performances des traitements automatiques. Il traite ainsi du processus de peuplement de BDRM3D dans sa globalité tout en visant à réduire le niveau d'intervention humaine.

L'article est organisé de la façon suivante. La partie « Travaux Relatifs » présentera dans un premier temps les concepts de patrons multi-échelles, d'objets auto généralisants, ainsi qu'un état de l'art des techniques d'extraction des géométries détaillées des bâtiments. Nous présenterons ensuite notre approche et illustrerons les avantages, du point de vue de l'automatisation, du traitement simultané des problématiques d'extraction des GD et des GS. L'architecture du système proposé pour la saisie en représentations multiples de bâtiments sera alors décrite et des résultats préliminaires seront présentés.

## **2. Travaux relatifs**

### **2.1. Acquisition en Représentation Multiple : Spécifications et outils**

#### **2.1.1. Concept de Patron Géométrique et de Patron Multi-Echelles**

Un patron géométrique est défini comme : « un objet géométrique avec les caractéristiques géométriques typiques représentatives d'un grand nombre d'occurrences d'un phénomène cartographique ou d'une primitive géométrique. Cet objet peut s'adapter à la géométrie de ces occurrences pour différentes échelles et peut être réutilisé plusieurs fois » (Bédard 2004; Cardenas 2004). Cette définition s'appuie sur le constat que, dans les niveaux simplifiés, un grand nombre d'occurrences d'une classe d'objets ont des caractéristiques géométriques communes. Un même patron peut donc servir à définir les représentations géométriques de plusieurs occurrences en adaptant pour chacune d'elles les paramètres d'implantation du patron (ex : point d'encrage, orientation, longueur, largeur).

L'obtention de représentations multiples par acquisition implique de créer des géométries décrivant l'objet géographique à différents niveaux d'abstraction. Le concept de patron multi-échelles vise entre autre à faciliter cette démarche. Un patron multi-échelles est composé de plusieurs patrons géométriques, correspondant à différents niveaux d'abstraction liés les uns aux autres. Les patrons multi-échelles sont définis pour un domaine d'échelles correspondant aux géométries simplifiées qui est compris entre les domaines des géométries détaillées et celui de la symbologie pure. La représente le patron

multi-échelles 2D proposé par Cardenas dans le cas d'échangeurs autoroutiers. Ce patron multi-échelles est composé de deux patrons géométriques. La partie gauche de la figure représente quatre niveaux d'abstractions. Les deux patrons géométriques du centre correspondent au patron multi-échelles. Les cinq lignes verticales représentent le lien constitué par le patron multi-échelles entre les deux patrons géométriques. La partie droite illustre à l'aide de quatre représentations à quatre échelles différentes le résultat obtenu lors d'une saisie en représentation multiple à l'aide de ce patron.

Tous les patrons géométriques contenus dans un patron multi-échelles sont liés les uns aux autres (cf. lignes verticales entre les deux patrons géométriques de la figure 1). La définition des paramètres d'implantation, communs à tous les patrons géométriques composant le patron multi-échelles (ex. orientation), se fait en implantant le patron du niveau le plus détaillé du patron multi-échelles.

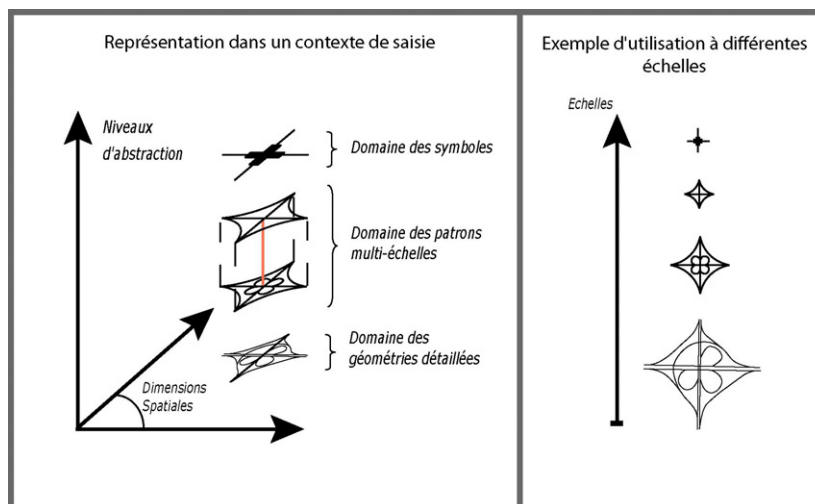


Figure 1 : Patron multi-échelles défini dans le cas d'échangeurs routiers par Cardenas

La saisie en représentation multiple reposant sur l'exploitation de patron multi-échelles telle que définie par (Bédard 2004; Cardenas 2004) permet donc de définir plusieurs représentations géométriques d'une occurrence en paramétrant simultanément les patrons géométriques contenus dans le patron multi-échelles. Celle-ci implique quatre principales étapes, plus simples qu'une généralisation manuelle :

- identifier le patron multi-échelles dans le gabarit de patrons (pour le glisser sur la carte ou photographie aérienne) ;

- supprimer ou spécialiser certaines primitives (i.e composant élémentaire du patron) le cas échéant ;
- ancrer le patron, i.e. définir ses paramètres d'implantation (orientation, taille, points d'ancrage) en manipulant le niveau le plus détaillé du patron multi-échelles ;
- lier par une clé de base de données le patron multi-échelles à la géométrie détaillée de l'objet.

Suite à ces opérations, un objet possède plusieurs géométries pouvant servir de substitut à la généralisation entièrement automatique qui devrait être effectuée à la volée pour supporter les applications cartographiques les plus récentes. Les algorithmes complexes de généralisation sont alors remplacés par une simple navigation dans la base de données.

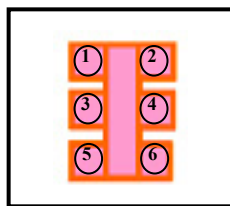
### **2.1.2. Les Objets Auto Généralisant**

Sabo a enrichi le concept de patron multi-échelles développé par Cardenas et a introduit le concept d'objet auto généralisant (**Self Generalisable Object**) appliqué au cas des bâtiments (Sabo 2004). Les SGO reposent sur l'exploitation conjointe de patrons géométriques, de contraintes d'intégrité spatiale et d'algorithmes « simples » de généralisation. Les SGO peuvent être appréhendés comme des objets qui ont l'aptitude de fournir à la demande et très rapidement une représentation géométrique donnée d'un objet géographique pour différents niveaux d'abstraction. L'utilisation de SGO permet ainsi de fournir des représentations pour n'importe quel niveau d'abstraction (grâce aux algorithmes simples de généralisation appliqués aux patrons) alors que le patron multi-échelles ne couvrent que les niveaux d'abstractions définis préalablement. Les SGO sont également plus flexibles car leurs contraintes d'intégrité spatiale peuvent tenir compte des objets voisins (ex. bâtiment près d'une rue) ou de leur contexte (ex. bâtiments alignés).

Au moment d'écrire cet article, le concept de SGO est en cours de développement pour la cartographie 2D et il touche d'autres aspects que la seule acquisition en représentations multiples. Par conséquent, la description ci-après, qui vise à définir les spécifications de saisie en représentations multiples à l'aide de SGO, se limite à la partie pertinente compte tenu du projet.

La construction par saisie en représentation multiple d'une BDRM exploitant le concept de SGO implique alors deux principales phases : la création d'une base de données de SGO et la saisie des SGO pour la base de données du projet. La création d'une BD de SGO implique de définir les patrons géométriques utilisés, leurs algorithmes de généralisation ainsi que leurs contraintes d'intégrité spatiale. Le lecteur pourra se référer à Sabo pour plus de détails sur la détermination des patrons géométriques. La saisie des SGO est alors similaire à la saisie définie dans le cas des patrons multi-échelles (i.e. choisir le SGO prédéfini et implanter son patron géométrique le plus détaillé). Elle peut en plus impliquer la définition de groupes de SGO qui doivent respecter des contraintes de généralisation.

En se basant sur l'étude des géométries des bâtiments sur la zone test du projet GEMURE, Sabo a suggéré l'utilisation de patrons géométriques découlant de la simplification d'un unique patron initial représenté sur la [Figure 2](#). L'auteur propose ainsi de définir chacun des patrons identifiés en supprimant certaines primitives (numérotées de 1 à 6 sur la figure) au patron initial. Un patron géométrique en forme de « T » peut ainsi être défini simplement en supprimant les primitives 1,2,3 et 4 à l'unique patron initial.



[Figure 2](#) : Unique patron géométrique initial proposé par Sabo dans le cas des bâtiments.

## 2.2. Automatisation de l'extraction des géométries détaillées des bâtiments

Les techniques photogrammétriques d'exploitation d'images stéréoscopiques acquises à l'aide de capteurs aéroportés ou satellitaires constituent le moyen le plus utilisé pour extraire les GD relatives aux bâtiments. Ces techniques ont joué un rôle majeur dans le développement de la géomatique en réduisant les coûts d'acquisition des données géospaciales. Toutefois, celles-ci requièrent encore aujourd'hui l'intervention d'opérateurs humains dans une large proportion.

Réduire le rôle de l'opérateur humain dans ces processus a motivé énormément de travaux de recherche durant les dernières décennies et cela continue aujourd'hui. Le processus de numérisation à partir d'images stéréoscopiques, (processus de reconnaissance de forme et de reconstruction) est un processus de vision extrêmement complexe (Theodoridis et Koutroumbas 2006). Sa mise en œuvre automatique fait appel à des traitements de bas niveaux (extraction de caractéristiques des images, par exemple des contours) ainsi qu'à des traitements de plus hauts niveaux permettant d'interpréter les caractéristiques extraites.

Nous présentons ci-après un aperçu des travaux réalisés sur l'extraction des géométries des bâtiments à l'aide de données issues de capteurs aéroportés et satellitaires. Nous avons structuré ces travaux selon trois critères que nous jugeons décisifs face à la problématique d'extraction des bâtiments qui sont :

- les données sources utilisées (qui influent directement sur les caractéristiques que l'on peut extraire et leur nature)
- le niveau d'automatisation recherché (aptitude de raisonnement recherché au niveau du système informatique)
- les connaissances a priori (qui servent d'élément de base au processus de raisonnement ou qui permettent de restreindre l'étendue du problème à résoudre durant la reconstruction)

### **2.2.1. Sources de données utilisées**

Deux principales sources de données sont utilisées pour extraire les GD des bâtiments : (1) des images obtenues à l'aide des capteurs passifs ( ex : caméra photogrammétrique ), nous parlerons d'imagerie passive dans la suite du document pour faciliter la lecture; (2) des Modèles Numériques de Surface. Les MNS peuvent être obtenus par traitements stéréoscopiques d'imagerie passive (Pierrot-Deseilligny et Paparoditis 2006) ou encore à l'aide de capteurs actifs de type LIDAR.

Ces sources de données permettent en effet toutes deux d'extraire des informations géométriques à grandes échelles et peuvent être obtenues à l'aide de capteurs aéroportés ou satellitaires. L'exploitation directe de MNS, privilégiée dans (Vosselman et Dijkman 2001; Dash, Steinle et al. 2004) facilite l'automatisation de l'interprétation de la scène dans la

mesure où l'information décrit directement la surface à reconstruire (Brenner 2000). Contrairement aux processus exploitant directement de l'imagerie passive, les processus exploitant directement des MNS n'ont pas à transformer les caractéristiques extraites dans les espaces 2D des images vers l'espace terrain 3D. Cependant, l'utilisation seule de MNS semble impliquer certaines limites en terme de précisions ce qui n'est pas le cas de l'imagerie passive. Ce constat a motivé la mise en place d'approches mixtes tirant profit de la précision de l'imagerie passive et des facilités d'interprétation des MNS (Rottensteiner et Jansa 2002). D'autres approches mixtes ont été proposées combinant données vectorielles et imageries passives (Jibrini, Paparoditis et al. 2000) ou encore MNS et données vectorielles (Suveg et Vosselman 2004).

L'utilisation d'approches mixtes, augmentant le nombre de caractéristiques que l'on peut extraire des sources de données, influe de manière décisive sur la performance des approches mises en œuvre. L'utilisation de données vectorielles additionnelles (ex : données cadastrales caractérisant l'emprise au sol des bâtiments (Jibrini, Paparoditis et al. 2000)) qui constituent des caractéristiques déjà extraites est par ailleurs un moyen efficace d'améliorer les performances qui est trop souvent négligé (Mayer 2004).

### **2.2.2. Niveau d'automatisation**

Les approches automatiques proposées dans (Baillard et Zisserman 2000; Suveg et Vosselman 2000; Rottensteiner et Jansa 2002; Sohn 2004) comme semi-automatiques proposées dans (Brenner 1999; Vosselman et Veldhuis 1999; Tseng et Wang 2003; Oriot et Michel 2004; Taillandier et Deriche 2004) ont motivé de nombreux travaux de recherche. Des résultats encourageants ont été obtenus parmi les approches automatiques développées. Toutefois, la difficulté que représente la reconstruction des bâtiments amène à penser que, dans la prochaine décennie, seules les approches semi-automatiques, avec une interaction de l'opérateur humain directive plutôt que corrective, peuvent s'avérer plus performantes que les solutions totalement manuelles (Förstner 1999; Baltsavias 2004; Mayer 2004).



### 2.2.3. Connaissance a priori et saisie de la géométrie

La notion de « connaissance a priori » peut porter sur différents aspects dans le processus de saisie. Dans (Baltsavias 2004), l'auteur considère que celle-ci peut porter : sur l'objet cible et son contexte, sur les données utilisées en entrée (résolution des images sources, spécification de saisie des données vectorielles disponibles), sur les méthodes de traitement applicables et enfin sur les mécanismes de contrôle utilisables. La grande majorité des approches utilisent des connaissances a priori sur les objets cibles mais à un degré plus ou moins important. Celui-ci peut varier d'une simple localisation approximative par l'opérateur comme c'est le cas dans (Oriot et Michel 2004; Taillandier et Deriche 2004), à l'introduction d'informations plus précises sur la géométrie de l'objet.

Dans (Fuchs et Le-Men 2000), des connaissances a priori sont introduites en exploitant comme référence une base de connaissances sur les structures topologiques des bâtiments. Les relations topologiques entre les éléments extraits et ceux présents dans la base de connaissances sont comparées pour sélectionner certaines des hypothèses émises lors de l'extraction. Les approches utilisées dans (Brenner 1999; Vosselman et Veldhuis 1999; Suveg et Vosselman 2000; Tseng et Wang 2003) vont plus loin en introduisant, au début du processus de saisie, l'identification non ambiguë du modèle paramétrique correspondant au bâtiment à extraire. L'utilisation de modèles paramétriques est un des moyens permettant d'introduire des connaissances sur les géométries des objets que l'on cherche à extraire. Le principe est de définir une librairie de modèles qui sont caractérisés par leurs formes géométriques et une liste de paramètres (origine, orientation, échelle...). Un exemple de modèle paramétrique est proposé [Figure 3](#). Les éléments constituant cette librairie peuvent alors être utilisés pour caractériser les géométries d'instances en les utilisant seuls ou en les combinant avec des opérateurs logiques (union, intersection) dans le cas de géométries plus complexes. On parle alors de CSG (i.e **C**onstructive **S**olid **G**eometry) (Tseng et Wang 2003). C'est par exemple le cas dans (Suveg et Vosselman 2004) où les auteurs supposent que tout bâtiment peut être décrit par combinaison de modèles paramétriques.

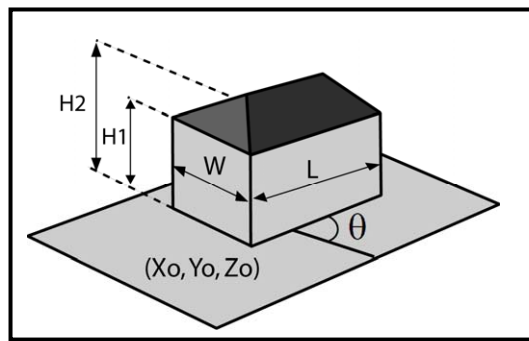


Figure 3 : Exemple de Modèle Paramétrique

L'introduction des connaissances a priori dans le processus de saisie des bâtiments n'est pas toujours explicite et porte généralement sur des caractéristiques géométriques du bâtiment. Peu d'approches suggèrent d'exploiter des connaissances a priori concernant les algorithmes à utiliser. On retiendra néanmoins que dans (Flamanc, Maillet et al. 2003; Oriot et Michel 2004) il est suggéré que ce soit l'opérateur qui sélectionne l'algorithme le plus adapté. Dans ce cas, la formalisation des connaissances a priori utilisées n'est pas explicite. Flamanc et al confèrent d'ailleurs l'apprentissage et l'évaluation des algorithmes à l'opérateur.

L'utilisation de connaissances a priori constitue un élément clé dans la réussite des processus d'extraction. Elle est par ailleurs jugée dans (Baltsavias 2004) comme la seule alternative viable vers le développement d'outils d'extraction opérationnels. En revanche, elle peut aussi limiter la portée d'une approche dès lors que les conditions supposées ne sont pas respectées, comme par exemple le fait que les toits soient plats (Oriot et Michel 2004) ou que tous les objets puissent être décrits par les modèles préétablis (Englert 1997; Fuchs et Le-Men 2000).

#### **2.2.4. Conclusion**

Une part importante de la communauté scientifique considère que, dans le cas de l'extraction des bâtiments, seule les approches semi-automatiques sont en mesure de déboucher sur des résultats exploitables dans un contexte de production. Bien que l'automatisation complète des processus d'extraction des bâtiments reste un objectif que de

nombreux travaux cherchent à atteindre, on notera que seules des approches semi-automatiques ont été jugées suffisamment performantes pour être intégrées dans des logiciels commerciaux (exemple : CC modeler, InJECT). L'exploitation de toutes les sources disponibles (ex : images, MNS, données vectorielles) et de connaissances a priori adaptées sont des facteurs améliorant les performances des approches.

### **2.3. Notre Approche**

Nous proposons de peupler une BDRM3D de bâtiments en utilisant une approche semi-automatique qui repose sur l'introduction par un opérateur humain de connaissances au début du processus et qui exploite celles-ci pour extraire automatiquement et simultanément les géométries détaillées et simplifiées.

Le diagramme d'activités UML présenté ci-après (cf. [Figure 4](#)) décrit les étapes qui composent le processus de saisie en représentation multiple 3D proposé pour un bâtiment. La boucle ne concerne que les géométries détaillées. Dans le cas d'une saisie à très grande échelle, on peut par exemple vouloir ajouter des primitives pour décrire les fenêtres et les cheminées.

Il peut paraître paradoxal de commencer par solliciter l'opérateur humain alors que nous visons à réduire son implication dans le processus global de saisie. Toutefois, si l'on considère que l'intervention d'un opérateur dans les processus de saisie des géométries est nécessaire, il s'agit essentiellement d'un choix sur la manière d'exploiter son interaction. Il s'agit en effet de préférer opter pour une approche directive plutôt que corrective.

Nous considérons en effet que l'extraction des géométries détaillées (GD) et l'extraction des géométries simplifiées (GS) sont deux tâches extrêmement complexes qui ne peuvent être totalement automatisées. Par conséquent, nous proposons de réduire le rôle de l'opérateur humain de trois manières :

- en le sollicitant une seule fois pour traiter simultanément l'extraction des GD et l'extraction des GS;
- en exploitant des connaissances a priori pour gérer contextuellement les traitements automatiques d'extraction des géométries;

- en sollicitant l'opérateur uniquement pour des tâches simples et rapides d'exécution.

Ces trois moyens vont être précisés ci-après. L'architecture système proposée sera présentée ainsi que des résultats préliminaires.

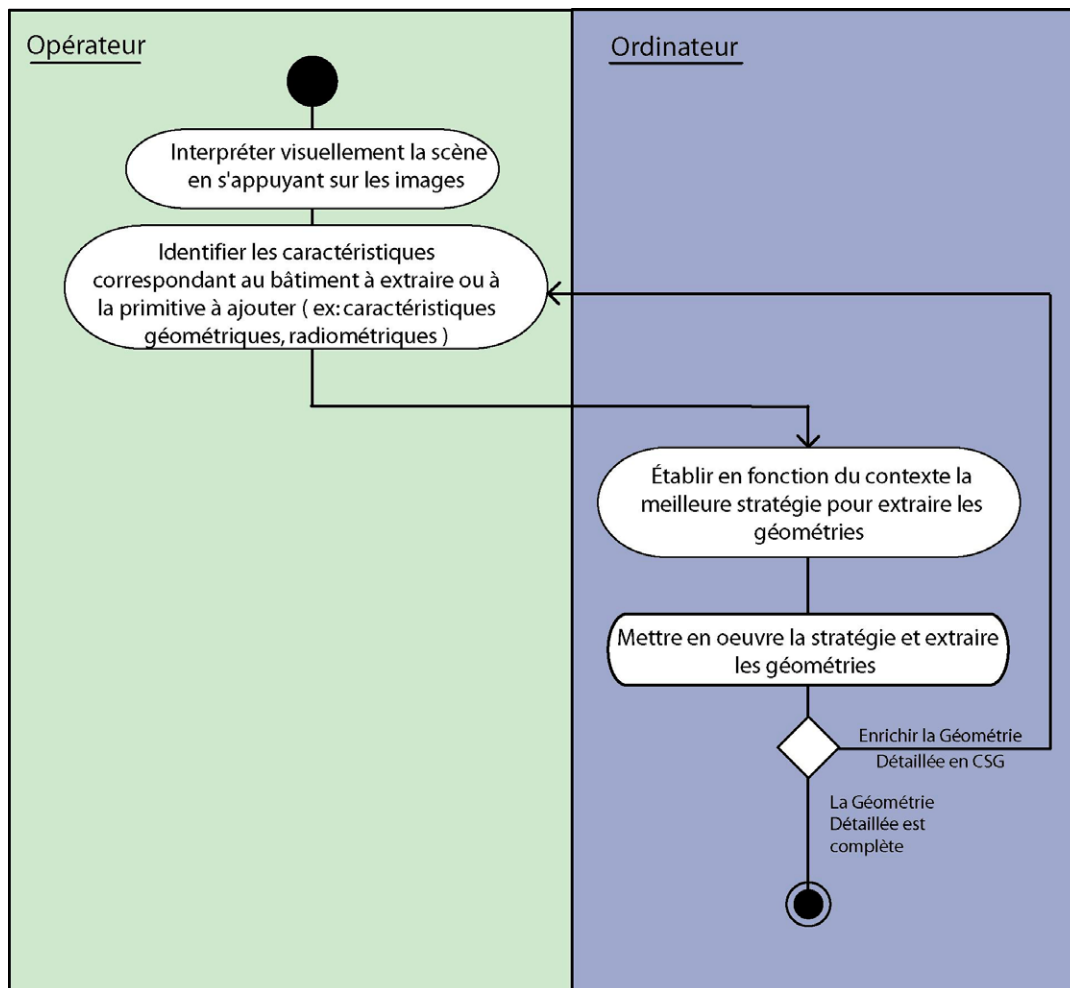


Figure 4 : Diagramme d'activité UML décrivant les étapes du processus de saisie en représentation multiple proposé.

## 2.4. Réduction de l'implication de l'opérateur humain

### 2.4.1. Extraction simultanée des géométries détaillées (GD) et des géométries simplifiées (GS) : Intégration des concepts de patron multi-échelles et de modèles paramétriques.

La saisie semi-automatique des GD et la saisie semi-automatique des GS, requièrent toutes deux que l'opérateur interprète la scène avant de pouvoir interagir. Nous proposons donc de solliciter l'opérateur pour interpréter la scène une seule fois et de traiter simultanément la saisie des GD et des GS.

L'analyse de la littérature révèle une proximité entre les concepts de patrons géométriques utilisés dans le cadre de la saisie des GS (i.e patron multi-échelles et SGO) et les modèles paramétriques définis dans le cas de la saisie des GD. Il s'agit en effet dans les deux cas de définir des formes préétablies dans une librairie et de se servir de celles-ci pour décrire les géométries d'objets géographiques spécifiques en définissant des paramètres d'implantation. Ces deux concepts diffèrent dans l'importance qui est accordée à la précision géométrique par rapport à la facilité d'utilisation dans un contexte de diffusion de données et de généralisation à la volée. Les patrons définis par Sabo privilégient en effet la vitesse de généralisation et la réduction des volumes de données à la fidélité géométrique.

#### **2.4.1.1. Notion de Patron d'Acquisition en Représentations Multiples**

Nous suggérons de rapprocher ces deux concepts et d'étendre ainsi à la 3D le concept de patron géométrique défini dans (Sabo 2004) sur lequel s'appuient les patrons multi-échelles et les SGO. Partant de ce principe, nous proposons d'établir a priori une librairie de **Patrons d'Acquisitions en Représentations Multiples (PARM)**. Les PARM visent à faciliter la saisie en représentation multiple par procédés photogrammétriques. Ils couvrent les domaines des GD et des GS. Le niveau le plus détaillé d'un PARM est défini par un patron géométrique 3D privilégiant la fidélité géométrique à la vitesse de généralisation et à la réduction des volumes de données<sup>9</sup>. Les autres niveaux sont définis à l'aide de SGO et/ou de patrons multi-échelles liés a priori au patron géométrique 3D du niveau détaillé. Les patrons multi-échelles et les SGO inclus dans des PARM peuvent être 3D et 2D. Les PARM peuvent par ailleurs être groupés s'ils doivent respecter une même contrainte de généralisation (i.e. spécification de saisie à l'aide de SGO définie par Sabo cf. 0).

#### **2.4.1.2. Limites d'utilisation des PARM**

Nous sommes conscients que l'utilisation de PARM ne peut pas couvrir tous les cas de figures et que tous les types de bâtiments ne peuvent pas être décrits a priori à l'aide de PARM. De plus, la définition des PARM sera probablement amenée à évoluer avec les évolutions futures du concept de SGO notamment au niveau de la prise en charge de la 3D.

Nous pensons toutefois qu'ils sont pertinents pour un grand nombre d'occurrences et que de ce fait ils peuvent jouer un rôle majeur dans un système de saisie en représentation multiple. Des approches plus flexibles, combinant par exemple patrons géométriques 3D en CSG (cf. 0) et des SGO durant le processus (et non préalablement) devront être envisagées dans une phase ultérieure pour traiter les cas plus complexes.

## **2.4.2. Connaissances a priori et gestion contextuelle des traitements**

### **2.4.2.1. Le concept d'Instance-Driven SASS**

La variabilité des types de sources exploitables (par exemple : images aériennes seules, images aériennes avec des données vectorielles...), des propriétés de ces sources (résolutions géométriques et radiométriques des images, précisions des données vectorielles) ainsi que celles des agglomérations à cartographier rend la mise en place d'approches automatiques génériques très difficile pour extraire les GD et les GS. Nous pensons, comme il l'est suggéré dans (Flamanc, Maillet et al. 2003) dans le cas des GD, qu'il est pertinent de sélectionner les algorithmes en fonction du contexte de l'instance traitée mais qu'en plus ceci doit être étendu aux choix des sources et aux paramétrages des algorithmes.

Nous suggérons de nous appuyer sur des informations introduites par l'opérateur humain au début du processus pour améliorer l'exploitation des traitements automatiques en sélectionnant automatiquement les sources, les traitements et les paramètres au cas par cas en fonction de l'objet géographique traité (Instance-Driven Selection of the Algorithms Setting Sources). L'exploitation de connaissances a priori est en effet un moyen pertinent selon nous de réduire la complexité du problème à résoudre (par exemple : en connaissant la forme de l'objet à extraire) mais aussi l'ampleur des possibilités à envisager (par exemple : réduisant l'espace de recherche).

---

<sup>9</sup> Un patron géométrique 3D privilégiant la fidélité géométrique à la vitesse de généralisation et à la réduction des volumes de données est similaire à un modèle paramétrique. Nous utiliserons dans la suite du document le terme patron géométrique 3D par souci de simplification.

#### **2.4.2.2. Introduire des connaissances ? Quelles connaissances et comment ?**

La mise en œuvre d'une telle approche nécessite de disposer d'informations sur le contexte spécifique de chaque occurrence. Deux questions en découlent : quelles informations et comment les introduire?

Les connaissances a priori sur les géométries des bâtiments sont probablement les connaissances les plus utilisées dans les approches mises en œuvre dans le passé. Nous supposons que, de la même manière que pour leurs caractéristiques géométriques (PARM), de grands nombres de bâtiments peuvent être regroupés en classes en fonction de leurs caractéristiques. Celles-ci peuvent porter sur leurs propriétés géométriques, sur leurs propriétés spectrales (couleurs et textures) comme sur leurs propriétés spatiales (relations et contraintes spatiales, corrélation entre les directions des bâtiments et les directions de routes).

Nous proposons d'identifier des caractéristiques récurrentes et de les regrouper préalablement à la saisie. L'identification de ces classes, préalablement au positionnement du PARM est un moyen simple et efficace, d'introduire des connaissances a priori sur l'objet à extraire.

Nous pensons par ailleurs que des informations introduites spécifiquement pour définir les géométries simplifiées d'objets géographiques peuvent être exploitées pour faciliter la saisie à l'aide de PARM. Par exemple, l'introduction d'une contrainte de généralisation d'alignement, commune à un groupe de bâtiments, peut permettre de déterminer la direction d'un bâtiment préalablement à l'extraction de ses géométries et ainsi faciliter son extraction en réduisant l'espace de recherche correspondant à l'orientation (ex : déduire du premier bâtiment saisi une valeur approchée de la direction des autres bâtiments composant le groupe).

#### **2.4.3. Solliciter l'opérateur pour des tâches simples et rapides d'exécution**

Le fait que l'interprétation d'une scène géographique, à partir d'images à hautes résolutions, soit une tâche particulièrement complexe à automatiser et qui paradoxalement



soit très simple et rapide pour un opérateur humain, est reconnu aujourd'hui. De la même manière, l'analyse multicritères de données numériques et le pilotage de programmes est une tâche qui peut s'avérer difficile et longue dès lors que l'opérateur n'est pas spécialiste du domaine (Thonnat, Moisan et al. 1999). Dans notre contexte, disposant d'images à haute résolution et souhaitant analyser plusieurs critères pour définir la stratégie optimale d'implantation des PARM, nous pensons qu'il est pertinent de solliciter d'une part l'opérateur humain pour interpréter la scène et d'autre part un opérateur logiciel pour l'analyse du contexte (définition de la stratégie optimale) et la supervision des programmes (mise en œuvre de cette stratégie). Nous proposons donc de limiter l'intervention de l'opérateur humain à l'introduction d'informations sur l'objet à extraire et sur son contexte.

## **2.5. Architecture du système proposé**

L'architecture du système de saisie de bâtiments en Représentations Multiples 3D proposé, illustré [Figure 5](#), est composée de trois niveaux qui interviennent successivement dans le processus de définition des géométries d'un bâtiment. Les données vont dans un premier temps de la couche DONNÉES à la couche RAISONNEMENT. La scène est alors interprétée par l'opérateur humain (i.e. il reconnaît les principales caractéristiques du bâtiment à extraire) qui introduit des informations sur le bâtiment à saisir (ex. PARM de type 1, toit rouge). L'ensemble des connaissances a priori introduites est ensuite analysé automatiquement par l'opérateur logiciel pour définir la stratégie à mettre en place pour extraire les géométries (ex : déduire la direction de la route des informations vectorielles, effectuer une analyse des gradients selon cette direction puis segmenter en exploitant l'information colorimétrique). Cette stratégie, influant sur le choix des sources, des algorithmes et des paramètres, est ensuite automatiquement appliquée dans la couche TRAITEMENTS. Les géométries obtenues sont alors enregistrées dans la BDRM3D. Les cas d'échec sont traités en sollicitant à nouveau l'opérateur humain.

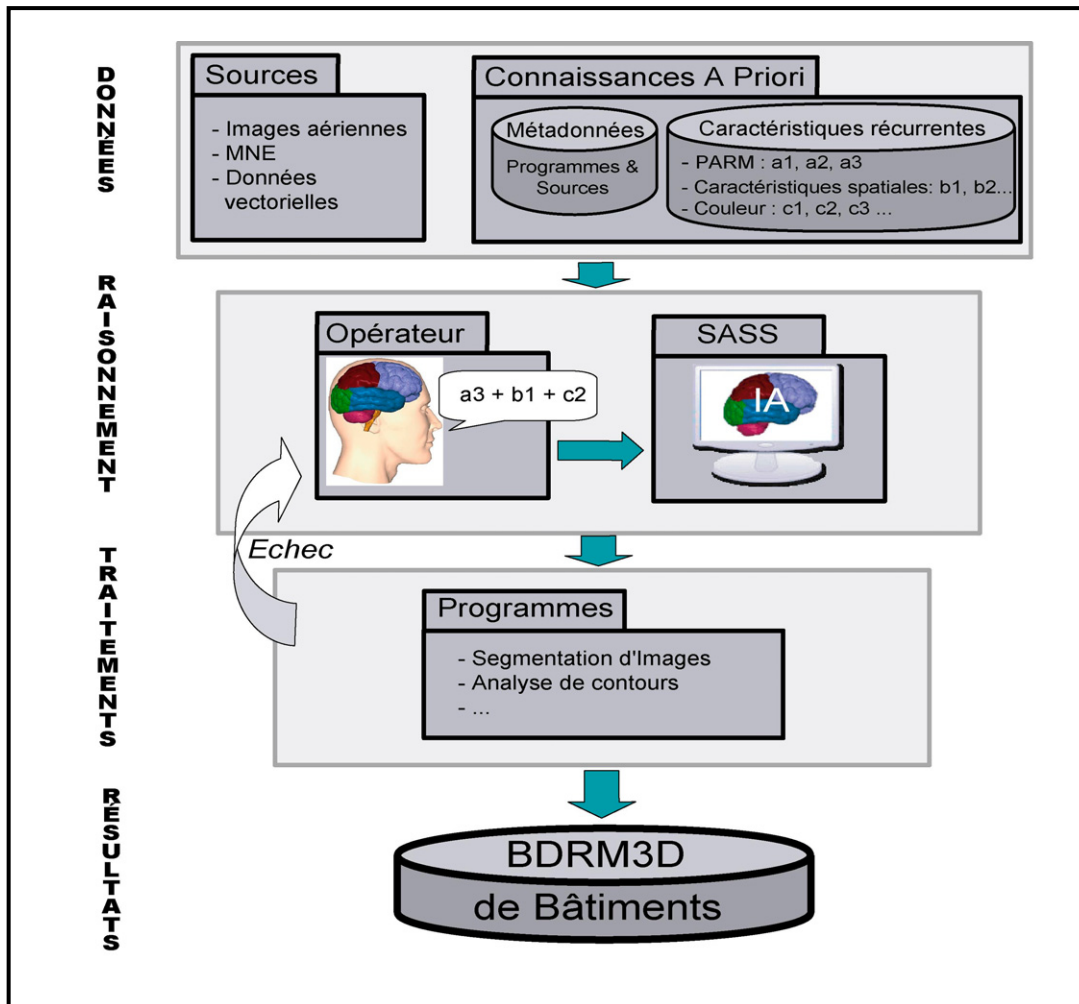


Figure 5 : Architecture du système proposé

### 2.5.1. La couche DONNÉE

La couche de données contient deux types de données : les données sources et les connaissances a priori.

Les données sources, par exemple des images aériennes et des données vectorielles 2D, permettent à l'opérateur d'interpréter la scène et aux algorithmes de positionner les PARM. Elles doivent donc avoir des résolutions permettant de répondre aux spécifications de saisie des GS (variables d'un projet à un autre, nous considérons que ces résolutions varient de quelques centimètres à un mètre suivant le projet). Des images à hautes résolutions ainsi qu'un modèle numérique de surface (éventuellement déduit automatiquement des images)

doivent au minimum figurer parmi les sources de données. Celles-ci peuvent comporter de manière additionnelle des données vectorielles relatives aux bâtiments et aux réseaux routiers.

Deux catégories de connaissances a priori sont disponibles : celles relatives aux caractéristiques récurrentes des bâtiments et celles relatives aux ressources exploitables pour extraire les géométries des bâtiments. Les caractéristiques récurrentes concernent les géométries des bâtiments (PARM cf. 0) mais aussi leurs propriétés radiométriques (ex : couleurs, textures) ainsi que leurs relations et contraintes spatiales (ex : corrélation entre les directions principales des bâtiments et celles des routes, contraintes d'intégrité spatiale associée à un SGO). Les connaissances relatives aux ressources exploitables correspondent aux métadonnées sur les sources (ex : résolution des images, capteurs utilisés, échelles des données vectorielles) et aux performances des algorithmes qui peuvent être utilisés pour les exploiter (ex : vitesse d'exécution, précisions obtenues, fiabilité).

### **2.5.2. La couche RAISONNEMENT**

Le raisonnement est réalisé par deux composants qui interviennent successivement. Le premier, l'opérateur humain, effectue une interprétation de la scène basée sur son observation des images. Il transmet alors son interprétation de la scène au composant de raisonnement automatique, le composant Intelligence Artificielle, en identifiant la classe de l'instance traitée (ex : type de PARM, contrainte de généralisation à respecter, type de modèle radiométrique). L'analyse du contexte est alors réalisée par le composant IA en fonction des sources disponibles et de leurs propriétés ainsi qu'en fonction des connaissances a priori sur l'instance introduite. Cette analyse automatique débouche sur l'élaboration d'une stratégie d'exploitation des ressources (ex : sources, algorithmes et paramètres de réglages) afin de déterminer les paramètres d'implantation des PARM.

### **2.5.3. La couche TRAITEMENT**

La couche traitement comporte de simples prétraitements des sources pour en faciliter l'exploitation ultérieure (ex : filtres passe bas, filtres passe hauts, opérateurs de segmentation), comme des traitements dédiés au positionnement de PARM (ex : opérateurs

exploitant les résultats d'une segmentation pour déduire les paramètres d'implantation des PARM). Ces traitements se caractérisent par leur capacité de paramétrage en fonction du contexte et par leur faible temps d'exécution permettant de minimiser les temps d'attente de l'opérateur.

## **2.6. Résultats préliminaires et avancement du projet**

### **2.6.1. Prototype manuel**

Le projet est en cours de développement. Dans la mesure où le concept de SGO est récent et ne traite pas encore de représentations multiples en 3D, nous avons temporairement restreint la définition des PARM à deux niveaux. D'une part, les GS 3D contenues dans les PARM sont définies uniquement à l'aide du concept de patron multi-échelles 3D et d'autre part les GS 2D sont définies à l'aide des SGO 2D liés aux patrons multi-échelles 3D.

Nous avons pour l'instant défini une librairie composée d'une vingtaine de PARM (Patrons d'Acquisition en Représentation Multiple). La [Figure 6](#) représente cinq PARM ( numérotés de un à cinq) parmi ceux que nous avons identifiés en nous basant sur l'étude de zones test. Chacun des PARM est composé de quatre éléments liés les uns autres : trois patrons géométriques 3D et un SGO 2D représenté dans la figure par son patron géométrique 2D. Les patrons géométriques 3D utilisés pour définir les GS 3D ont été définis par un opérateur humain. La définition formelle de règles et de contraintes de généralisation 3D dépasse le cadre de ce projet.

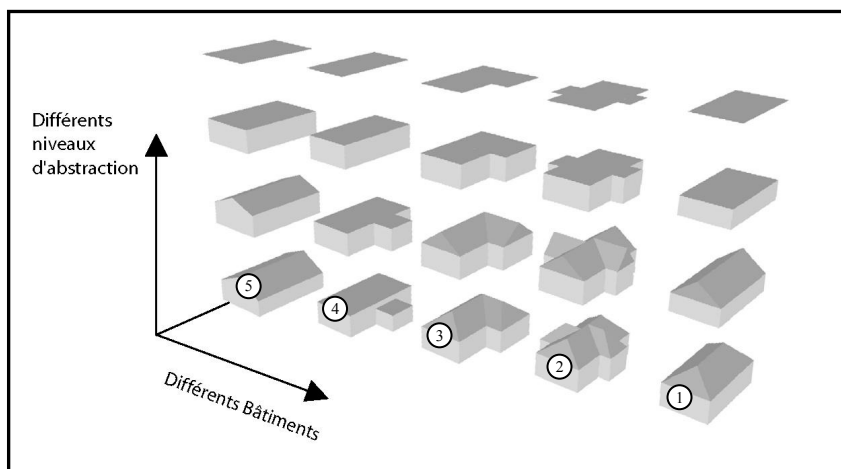


Figure 6 : Exemple de PARM identifiés pour faciliter la saisie en représentation multiple

Un processus de saisie manuelle, exploitant des PARM, a été implanté dans le logiciel photogrammétrique de restitution numérique DVP Vectorization® (<http://www.dvp-gs.com/>). La version actuelle permet de déterminer les paramètres d'implantation des PARM en fonction de points mesurés en 3D par un opérateur humain dans une vue stéréoscopique selon un ordre précis. Les points mesurés correspondent à des vertex spécifiques du niveau le plus détaillé des PARM et à un point au sol. La spécification du type de PARM à saisir est réalisée par l'opérateur humain lorsqu'il sélectionne son outil de saisie. Il existe un outil (icône à sélectionner) par type de PARM. La Figure 7 représente les points devant être mesuré (i.e. pointés à l'aide du curseur dans la vue stéréoscopique) dans le cas du premier PARM, les numéros correspondent à l'ordre dans lequel ils doivent être mesurés. Le point d'ancrage du PARM correspond au premier point mesuré. Chacun des points permet de déduire des paramètres distincts (ex : le point 2 donne la longueur et l'angle d'orientation du PARM). Seule la valeur Z du point 4 est exploitée, elle permet de déterminer le paramètre hauteur du PARM.

Les PARM peuvent par ailleurs être groupés durant le processus d'acquisition s'ils doivent respecter une même contrainte de généralisation. Actuellement, seules des contraintes d'alignement et d'agrégation peuvent être définies. Celles-ci seront enrichies avec les développements futurs du concept de SGO développé dans notre groupe de travail. La constitution d'un groupe devant respecter la même contrainte de généralisation se fait en

spécifiant le premier et le dernier PARM saisi appartenant à ce groupe. Le résultat de la saisie en représentations multiples est stocké sous la forme de fichiers au format XML.

Il est important de noter que la solution de saisie manuelle mise en place est une solution temporaire visant à valider la faisabilité de l'approche. Nous travaillons actuellement à la réduction du nombre des interventions requises par l'opérateur humain.

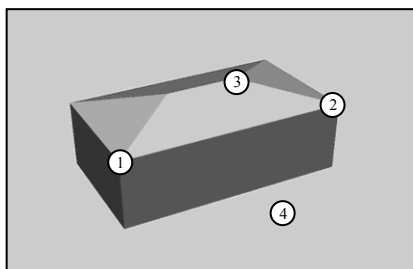


Figure 7 : Exemple de points à mesurer pour définir un PARM

Une application permettant de visualiser en 3D les résultats et de naviguer à travers différents niveaux d'abstractions a par ailleurs été développée. Chaque PARM y est géré comme un arbre de patrons 3D et 2D disposants de fonctions permettant de convertir les paramètres des niveaux détaillés vers les paramètres des niveaux simplifiés.

Les figures ci-après illustrent les différentes représentations d'un quartier de l'agglomération de Québec obtenues (dans l'application de visualisation décrite précédemment) par saisie en représentations multiples à l'aide du prototype manuel mis en place et de trois PARM. Les PARM correspondant aux numéros 1, 4 et 5 sur la Figure 6 sont identifiés sur la Figure 9. Dans cet exemple, trois groupes de PARM devant respecter une même contrainte d'agrégation ont été constitués. La Figure 8 est un extrait d'une des images sources utilisées. La Figure 9 correspond au niveau le plus détaillé extrait. Les Figure 10 et Figure 11 correspondent à deux niveaux simplifiés pour lesquels chaque bâtiment dispose d'une géométrie pour le représenter. La Figure 12 illustre comment la contrainte d'agrégation définie durant la saisie peut être utilisée pour définir une représentation géométrique correspondant à plusieurs bâtiments.



Figure 8 : Exemple de saisie, extrait d'une des images sources.

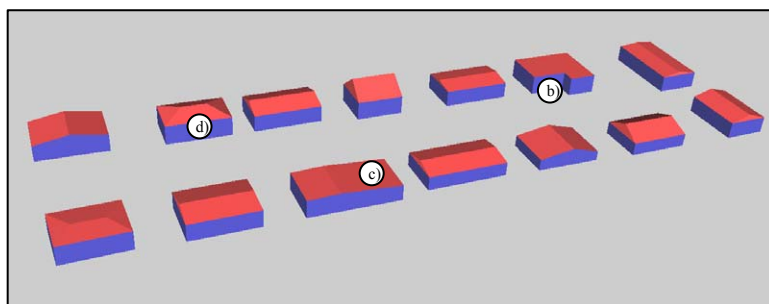


Figure 9 : Exemple de saisie, représentations détaillées.

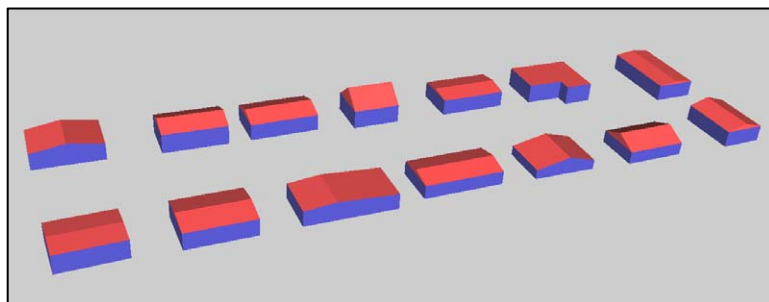


Figure 10 : Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 1.

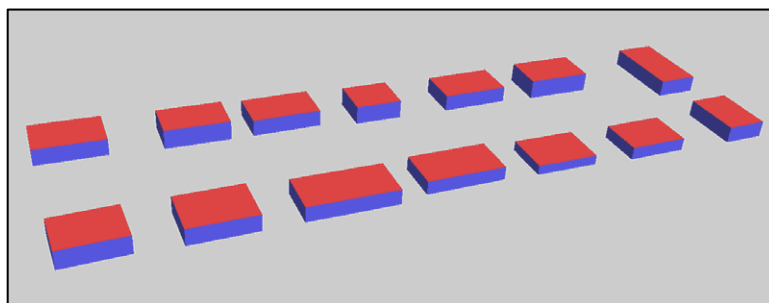


Figure 11 : Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 2.

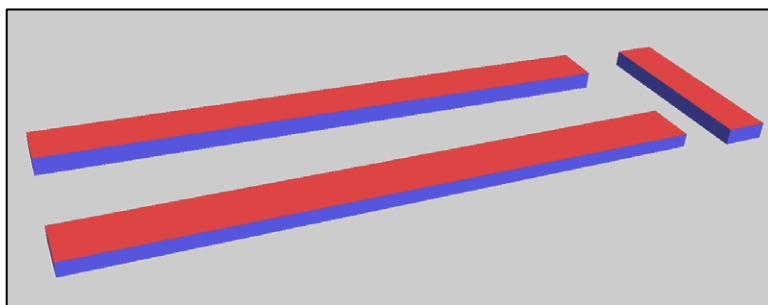


Figure 12 : Exemple de saisie, représentations simplifiées niveau 3.

### 2.6.2. Connaissance et traitement d'image

Nous travaillons actuellement à la mise en œuvre de traitements permettant de positionner automatiquement les PARM après identification et introduction de connaissances a priori. Nous basant sur notre étude des travaux existant relatifs à la reconstruction automatique de bâtiments (cf 2.2.4), nous envisageons d'exploiter des connaissances a priori pour réduire la taille des espaces de recherche et pour améliorer la performance des traitements bas niveaux. L'extraction de contours des images est un traitement de bas niveau fréquemment utilisé dans les approches identifiées dans la partie 2. Nous nous sommes intéressés à l'apport de connaissances a priori lors de l'utilisation de ce type de traitement dans une perspective d'automatisation de la saisie à l'aide de PARM.

Selon ce principe et afin de réduire l'influence de contours correspondant à d'autres objets géographiques que le bâtiment à extraire, nous avons comparé les contours détectés à l'aide du filtre passe haut de Canny (filtre d'extraction de contours) à ceux détectés avec ce même filtre de Canny et respectant en plus une contrainte directionnelle (i.e. direction du contour détectée proche de la direction spécifiée). Le filtre de Canny est en effet un des filtres d'extraction de contours les plus performants (Maître 2003), particulièrement dans un contexte où l'on peut adapter ses paramètres à l'image et à l'objet à extraire (Heath, Sarkar et al. 1998). Ces tests préliminaires ont été effectués sur une seule image au 1/5000 de la zone de Québec et ont été mis en œuvre sur 178 bâtiments.

Nous avons retenu uniquement les pixels détectés par le filtre de Canny dont la direction était égale à celle spécifiée par la contrainte directionnelle modulo  $\pi/2$ . Nous avons ensuite comparé les éléments de contours extraits dans les deux cas avec des contours de référence



saisis manuellement. Pour chacun des bâtiments testés, la zone d'intérêt était centrée sur le bâtiment et faisait une superficie quatre fois supérieure à celle du bâtiment. Les paramètres du filtre de Canny (paramètres de lissage et de seuillage) ont été définis empiriquement selon une analyse visuelle des résultats. L'analyse des performances obtenues a révélé que l'ajout d'une contrainte directionnelle permettrait de réduire en moyenne de plus de 45% le nombre total des pixels détectés comme éléments de contours dans toute la zone d'intérêt. Le nombre de pixels détectés comme éléments de contours et situés à une distance inférieure à trois pixels des contours références a diminué en moyenne de 22%. Cette baisse est liée d'une part à la présence d'éléments de détails autres que les contours recherchés du bâtiment (ex : cheminée, branchage) qui ne sont pas dans les directions principales spécifiées et d'autre part au fait que les éléments de contours des toits ne respectaient pas toujours notre hypothèse selon laquelle ils sont rectilignes. Les figures 12, 13 et 14 illustrent ces phénomènes. On peut par exemple constater que les contours d'une des cheminées sont rejetés par la contrainte directionnelle alors qu'ils sont situés sur le contour du toit du bâtiment. On remarque aussi qu'aux coins du bâtiment, les angles des contours détectés ne sont pas parfaitement orthogonaux et sont donc rejetés. La distance de trois pixels a été déterminée en fonction des discontinuités des contours détectés par rapport au contour référence. Elle résulte du fait que les éléments détectés sont surdétaillés par rapport aux lignes que l'on aurait souhaité détecter. Dans notre cas d'utilisation (paramètre de lissage et résolution de numérisation des images) ces discontinuités impliquaient un écart-type d'environ un pixel autour de la ligne référence ce qui a permis de fixer la tolérance à trois pixels (trois fois l'écart type en faisant l'hypothèse d'une distribution normale). Le fait de réduire cette tolérance aurait impliqué un rejet abusif de points détectés et aurait donc baissé le ratio nombre de pixels détectés sur le nombre de pixels théoriques devant être détectés. L'utilisation d'une valeur trop grande aurait quant à elle impliqué une prise en compte erronée de pixels ne correspondant pas au contour à détecter et aurait biaisé l'évaluation de l'impact du filtrage directionnel.



Figure 13 : Illustration de l'exploitation de la contrainte directionnelle, Image Source.

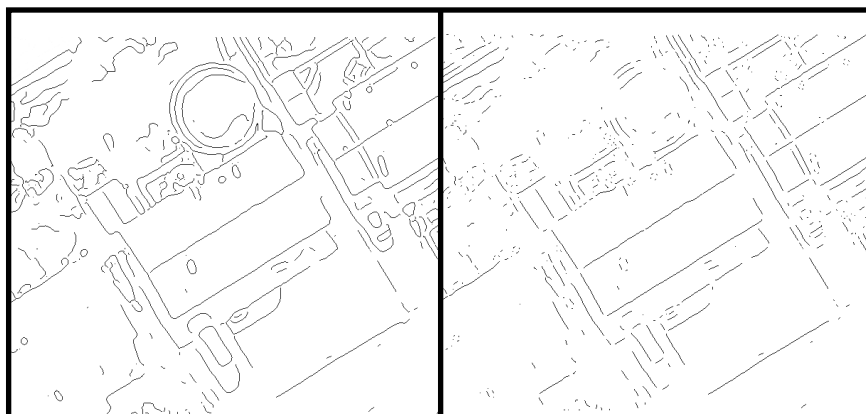


Figure 14 : a) Partie gauche, image des contours extraits, b) partie droite, image des contours extraits et filtrés selon la contrainte directionnelle

L'application de la contrainte directionnelle a permis d'améliorer d'un facteur 2 le rapport entre le nombre de pixels détectés correspondant aux contours du bâtiment et le nombre total de pixels détectés comme éléments de contours (incluant les éléments que nous ne cherchons pas à extraire).

Ces résultats mettent en évidence que l'introduction de contraintes, déduites de connaissances a priori, peut permettre de réduire l'influence des éléments environnants du bâtiment à extraire sur un processus d'extraction de contours. Seule une analyse de l'impact de l'exploitation d'une telle contrainte sur la détermination des paramètres d'implantation des PARM permettra d'en évaluer l'intérêt effectif. Ces résultats préliminaires sont néanmoins encourageants.

### 3. Conclusion

Nous avons proposé une approche originale traitant le problème du peuplement de BDRM 3D dans le cas des bâtiments. Partant du principe que la suppression totale de l'opérateur humain dans le processus n'était pas envisageable dans un avenir proche, nous avons proposé un moyen simple de tirer profit au maximum de son intervention. Nous avons développé une architecture de système mettant en œuvre les concepts proposés pour réduire l'implication globale de l'opérateur humain dans le processus de peuplement de BDRM3D de bâtiments. Une analyse de la problématique de peuplement des BDRM3D de bâtiments a été proposée. Les concepts théoriques de PARM et de gestion contextuelle des traitements utilisés par notre approche ont été présentés ainsi que des résultats préliminaires encourageants.

Cette approche pourrait par ailleurs constituer une alternative intéressante pour les producteurs de données qui doivent peupler et maintenir à jour plusieurs bases de données géographiques correspondant à leurs différents produits. En effet, l'exploitation d'un entrepôt de données<sup>10</sup> à représentations multiples, correspondant à l'unique base de données à maintenir, combinée à une architecture multi-tiers (Bernier et Bédard 2005), permet de générer automatiquement des marchés de données<sup>11</sup> correspondant aux différents produits des producteurs de données. L'utilisation d'une telle approche permettrait alors de limiter les efforts de peuplement et de mise à jour à une seule BDRM3D.

### 4. Remerciements

Les auteurs tiennent à souligner le support de la Chaire de recherche industrielle en bases de données géospatiales décisionnelles financée par le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, l'Université Laval, Hydro-Québec, Recherche et Développement Défense Canada, Ressources Naturelles Canada, Transport Québec, KHEOPS Technologies, Intelec Géomatique, Syntell, Holonics et Alta-Innovation.

---

<sup>10</sup> Un entrepôt de données est un dépôt unique, complet et cohérent de données obtenues d'une variété de sources et accessibles aux usagers d'une manière leur permettant de comprendre ces données et de les utiliser dans un contexte d'entreprise

<sup>11</sup> Le marché de données est une implantation localisée d'un entrepôt de données à usage unique.

Les auteurs souhaitent par ailleurs souligner le support du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada et de DVP-GS dans le cadre du programme de bourses de doctorat d'études supérieures à incidence industrielle.

## 5. Bibliographie

- Badard, T. and C. Lemarié, *Associer des données: l'appariement*, Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT). H. sciences. Paris, Lavoisier, 2002, p. 163-183.
- Baillard, C. and A. Zisserman, « A Plane-Sweep Strategy for the 3D Reconstruction of Buildings from Multiple Images », *19th ISPRS Congress and Exhibition*, vol. 32, 2000.
- Baltsavias, E., « Object Extraction and Revision by Image Analysis Using Existing Geodata and Knowledge: Current Status and Steps Towards Operational Systems », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 58, 2004, p. 129-151.
- Bédard, Y., « Combining Automatic Generalization and Multiple Representations for Highly Interactive Web-based Mapping », *GeoSpatial Word*, 2004.
- Bédard, Y., S. Rivest, et al., *Spatial On-Line Analytical Processing (SOLAP): Concepts, Architectures and Solutions from a Geomatics Engineering Perspective.*, Data Warehouses and OLAP: Concepts, Architectures and Solutions. R. Wrembel and C. Koncilia, Idea Group Publishing, In Press, 2006, p.
- Bernier, E. and Y. Bédard, *Data Warehouse Strategy for On-Demand Multiscale Geo-Information*, Challenges in the Portrayal of Geographic Information: Issues of Generalisation and Multi Scale Representation *in press*. A. Ruas, W. Mackaness, T. Kilpelainen and D. Richardson, 2005, p.
- Bernier, E., Y. Bédard, et al., « UMapIT: An On-Demand Web Mapping Application Based on a Multiple Representation Database », *8th ICA Workshop on generalization and multiple representation*, 2005.
- Bernier, E., Y. Bédard, et al., « Cartographie sur demande sur le Web et bases de données multidimensionnelles. De la personnalisation par couche cartographique à la personnalisation par occurrences. », *Revue Internationale de Géomatique, numéro spécial "Les SIG sur le Web"*, vol. 13, 2003, p. 339-359.
- Brenner, C., *Interactive modeling tools for 3D building reconstruction*, Photogrammetric Week '99'. D. Fritsch and R. Spiller. Stuttgart (Germany), Wichmann Verlag, 1999, p. 23-24.

- Brenner, C., « Towards fully automatic generation of city models », *XIX ISPRS Congress, Commission III, WGIII/1*, vol. 33(B3), 2000.
- Cardenas, A. (2004). Utilisation de Patrons Géométriques comme support à la Généralisation Automatique. Département des Sciences Géomatiques. Québec, Laval: 110.
- Cecconi, A., R. Weibel, et al., « Improving automated generalisation for on-demand Web mapping by multiscale Database », *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, 2002.
- CVSD. (2004-2008). "Communication and Visualization of Spatial Data." ISPRS- Working Group II / 5 Retrieved 28/01/06, from [http://www.isprs.org/technical\\_commissions/wgtc\\_2.html](http://www.isprs.org/technical_commissions/wgtc_2.html).
- Dash, J., E. Steinle, et al., « Automatic building extraction from laser scanning data: an input tool for disaster management », *Advances in Space Research*, vol. 33, 2004, p. 317-322.
- Englert, R., *Systematic acquisition of generic 3D building model knowledge*, Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps. Birkhäuser, Basel. W. Foerstner and L. Pluemer, 1997, p. 181-195.
- Flamanc, D., G. Maillet, et al., « 3D City Models: An Operational Approach using Aerial Images and Cadastral Maps », *ISPRS Workshop on "Photogrammetric Image Analysis"*, vol. 34 (3/W8), 2003.
- Förstner, W., *3D-city Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods*, Photogrammetric Week '99'. D. Fritsch and R. Spiller. Stuttgart (Germany), Wichmann Verlag, Heidelberg, 1999, p. 291-303.
- Franklin, C., « An Introduction to Geographic Information Systems: Linking Maps to Databases », *Database*, 1992, p. 13-21.
- Fuchs, F. and H. Le-Men, « Efficient subgraph isomorphism with 'a priori' knowledge-application to 3D reconstruction of buildings for cartography. Advances in Pattern Recognition », *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1876, 2000.
- GEMURE. (2002-2005). "Generalisation and Multiple Representations for On-Demand Map Production and Delivery. A project financed by GEOIDE from april 2002 to march 2005." Retrieved 2 April 2005, from <http://sirs.scg.ulaval.ca/gemure/en/home.asp>.
- Heath, M., S. Sarkar, et al., « Comparison of Edge Detectors », *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 69, 1998, p. 38–54.

- Jibrini, H., N. Paparoditis, et al., « Automatic building reconstruction from very high resolution aerial stereopairs using cadastral ground plans », *XIX ISPRS Congress, Commission III, WGIII/1*, vol. 33 (B3), 2000.
- Larrivée, S., Y. Bédard, et al., « Fondement de la modélisation conceptuelle des bases de données géospatiales 3D », *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 16/1, 2006.
- Maître, H. 2003. *Le traitement des images*, Traitement du signal et de l'image, Hermès Sciences Publications.
- Mayer, H., « Object Extraction for Digital Photogrammetric Workstations », *XXth ISPRS Congress - Geo-Imagery Bridging Continents - Commission II*, vol. 35(B2), 2004.
- Oriot, H. and A. Michel, « Building Extraction from Stereoscopic Aerial Images », *Applied optics (Optical Society of America)*, vol. 43, 2004, p. 218-226.
- Pierrot-Deseilligny, M. and N. Paparoditis, « A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from Spot5-HRS stereo imagery », *ISPRS Ankara Workshop 2006. Topographic Mapping from Space.*, 2006.
- Rottensteiner, F. and J. Jansa, « Automatic Extraction of Buildings from Lidar Data and Aerial Images », *Commission IV Symposium "Geospatial Theory, Processing and Applications" - WG3*, vol. 34(3), 2002.
- Ruas, A. 2002. *Généralisation et représentation multiple*, Information géographique et Aménagement du Territoire, Paris, Hermès Sciences Publications.
- Sabo, N. (2004). Intégration des Algorithmes de Généralisation et des Patrons Géométriques pour la Création d'Objets Auto-Généralisants afin d'Améliorer la Généralisation Cartographique Automatique. Québec, Département des Sciences Géomatiques: 67.
- Sabo, N., A. Cardenas, et al., « Introduction du concept de patrons géométriques et application aux bâtiments afin de faciliter leur généralisation cartographique à la volée. », *Geomatica, the journal of the Canadian Institute of Geomatics*, vol. 59, 2005, p. 295-313.
- Saux, E. and R. Billen. 2006. *Information géographique tridimensionnelle: théories, systèmes et applications*, Revue Internationale de Géomatique, numéro spécial, Paris, Hermes Sciences Publications.
- Sohn, G., « Extraction of Building from High-Resolution Satellite Data and LIDAR », *XXth ISPRS Congress, Commission III - WGIII/4*, vol. 34 (B3), 2004.
- Suveg, I. and G. Vosselman, « 3D Reconstruction of Building Models », *XIX ISPRS Congress - Commission III - WGIII/1*, vol. 33(B3), 2000.

- Suveg, I. and G. Vosselman, « Reconstruction of 3D Building Models from Aerial Images and Maps », *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 58, 2004, p. 202-224.
- Taillandier, F. and R. Deriche, « Automatic Building Reconstruction from Aerial Images: A Generic Bayesian Framework », *XXth ISPRS Congress - Geo-Imagery Bridging Continents - Commission III - WGIII/4*, vol. 35(B3), 2004.
- Theodoridis, S. and K. Koutroubas. 2006. *Pattern Recognition, Third Edition*, Academic Press.
- Thonnat, M., S. Moisan, et al., « Experience in Integrating Image Processing Programs », *1st International Conference on Vision Systems (ICVS'99)*, 1999.
- Tseng, Y.-H. and S. Wang, « Semiautomated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 69, 2003, p. 171-180.
- Vosselman, G. and S. Dijkman, « 3D Building Reconstruction from Point Clouds and Ground Plans », *ISPRS WGIII/3-6 Workshop on "Land Surface Mapping en Characterization Using Laser Altimetry"*, vol. 34 (3/W4), 2001.
- Vosselman, G. and H. Veldhuis, « Mapping by Dragging and Fitting of Wire-Frame Models », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 65, 1999, p. 769-776.
- Weibel, R. and G. Dutton, *Generalising spatial data and dealing with multiple representations*, Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications. P. A. Longley, M. F. Goodchild, D. J. Maguire and D. W. Rhind. Cambridge, John Wiley & Sons, 1999, p. 125-155.

## **Annexe 4 : Populating a building Multi Representation Data Base with photogrammetric tools: recent progress.**

*Article soumis au Journal of International. Society of Photogrammetry and Remote Sensing :*

Benoit Frédéricque, Sylvie Daniel, Yvan Bédard, Nicolas Paparoditis

Keywords : Multi Representation Data Base, Multi Representation Acquisition Pattern, Graph Matching, a priori Knowledge.

Abstract : More and more frequently, the populating of 3D MRDB's (Multi Representations Data Base) is required to support advanced cartographic applications and advanced geospatial decision analysis. We previously proposed a manual photogrammetric process based on the Multi Representation Acquisition Pattern (MRAP) concept to tackle simultaneously Fine Level Geometries (FLG) extraction and Coarse Level Geometries (CLG) extraction. This paper presents our progress, from an automation standpoint, regarding our approach to populate MRDBs containing building geometries through a photogrammetric multiple representations acquisition process. Two new algorithms dedicated to Multi Representation (MR) acquisition are introduced and constitute two contributions. These combine passive imagery and Digital Surface Model analysis in order to address automation issues. The first algorithm allows for the automatic determination of the MRAP parameters from a single click initialization. The second algorithm aims at supporting part of the MR acquisition when MRAP are not relevant and allows the automatic building footprints extraction. This paper describes the project motivation and its actual progress. It is divided into four parts. The first part concerns the MR data acquisition specifications. A description of the manual prototype is provided and the MRAP concept is described. In the second part, the first algorithm allowing the automatic determination of the MRAP parameters is introduced. The third part is dedicated to the review of the automation performances through the study of three test sites. Finally, our second



algorithm, allowing the automatic building footprints extraction is introduced with preliminary results.

## 1. Introduction

Emerging web-mapping applications and SOLAP (Spatial On-Line Analytical Processing) applications (Bédard et al. 2007) have become increasingly demanding from a map production standpoint. On-demand map production with highly customizable capabilities is needed. In fact, these web-mapping and SOLAP applications need to manage the map contents at the instance level (Bernier et al. 2003; Bernier et al. 2005). Instead of having the abstraction levels provided in the maps stored by dataset layers, each geographical object should manage its own abstraction levels. The map user interface should also support navigation operations through the different abstraction levels, like drilling-up, drilling-down or drilling across. Producing this kind of drillable map is a complex task. This has motivated a lot of research work, particularly in the field of cartographic generalization (Cecconi et al. 2002; Ruas 2002). In fact, using a unique detailed data source (preliminarily extracted) to generate on-the-fly (using generalization) simplified geometric representations of geographic objects would fulfill these needs. Despite a lot of research work, generalization is still time consuming and involves a large amount of human intervention. An alternative to on-the-fly generalization is using Multi Representations Data Bases (MRDB), that store an explicit link between various geometries of geographical objects. Storing and linking several geometric representations of each geographical object in a geospatial database allows fulfilling the needs described previously. It is worth noticing that CityGML<sup>12</sup> defines and manages the most relevant topographic objects in cities at several abstraction levels. In this information model, the links between the geometries corresponding to the different abstraction levels, the Levels Of Details (LODs), are also explicit. The use of MRDB to generate maps-on-demand has motivated a lot of research (Weibel and Dutton 1999; Cecconi et al. 2002, Bédard 2004; Mackaness et al. 2007; Bernier and Bédard 2007).

---

<sup>12</sup> CityGML is an OGC adopted best practice paper providing a common semantic information model for the representation of 3D urban objects, <http://www.citygml.org/>

When populating a MRDB, three approaches can be used to extract and link fine and coarse geometries: (1) Fine Level Geometry (FLG) extraction and generalization (the Coarse Level Geometries (CLG) are deduced from FLG using the generalization process) (Cecconi et al. 2002; Ruas 2002; Mackaness et al. 2007), (2) geometric and semantic matching of different sources at different scales (FLG and CLG are already available, the link is built through a matching process) (Badard, Lemarié 2002 ; Bernier and Bédard 2007 ; Olteanu et al. 2006), (3) multi representations (MR) data acquisition (simultaneous acquisition and link of CLG and FLG). Obtaining multiple geometric representations to populate MRDBs implies several difficulties from the automation standpoint and is therefore a cost issue. Despite important research work to automate them, a large amount of human interventions are still needed for the first two approaches. More detailed information on the above topics and related work reviews can be found in Frédéricque et al. (2005) and Frédéricque, B. et al. (2007). The third approach, which consists in defining several abstraction levels during the acquisition step (Fine and Coarse), is very recent. We are, to our knowledge, the only research group to work on such an approach. Although FLG and CLG extractions are both extremely complex tasks that, today, cannot be entirely automated, we think these two major stages of populating MRDBs present some similarities. Tackling them simultaneously using a photogrammetric data acquisition approach could be advantageous. In Frédéricque et al. (2005) and Frédéricque et al. (2007), we proposed a multi representation data acquisition framework and a manual photogrammetric tool to perform MR acquisition. The proposed framework was designed based on our review of existing works addressing (1) MRDB population and (2) buildings extraction through photogrammetric process. We proposed a semi-automatic strategy involving human interventions at the beginning of the acquisition process. The purpose of the human interventions is to introduce a priori knowledge useful for both FLG and CLG extraction. The MRAP concept, formalizing a priori knowledge about building geometries, was introduced to support MR acquisition. This links two existing concepts, parametric models and geometric patterns, introduced respectively in the photogrammetric and generalization communities. The MRAP concept was implemented in our manual photogrammetric tool. Since MRAP relies on parametric models, this approach is not relevant in all configurations. In other words, all the buildings cannot be described a priori with MRAP.

However, we think that they are relevant in most cases, particularly in a North American context, and that they can consequently play a major role in a MR acquisition system. More flexible approaches have to be considered to complete a MR acquisition system.

This paper describes our recent progress from an automation standpoint. We are addressing contexts where MRAP are relevant and not. Two new algorithms, using aerial imagery and Digital Surface Models (computed from aerial imagery), are introduced. They represent two innovative contributions to the automatic building extraction field of work. The first can be applied when the MRAP concept is relevant and allows for the automatic determination of the MRAP parameters from a single click initialization. The second algorithm aims at supporting part of the MR acquisition when MRAP are not relevant to tackle FLG and CLG extraction. This second algorithm allows for automatic building footprint extraction and representation as a combination of rectangles.

This paper is divided in four sections. The first section concerns the MR data acquisition specifications and our precedent works. This section is proposed in order to better understand the approach insofar, as some results have only been published in French (i.e. the manual MR acquisition prototype). In this section, the manual prototype and the MRAP concept are described. In the second part, the first algorithm allowing enhancement of the level of automation of the MR acquisition using MRAP is proposed. A brief review of related works is also provided. The third part is dedicated to the assessment of the automation performances using MRAP and three sites have been used to test the algorithm. Finally, our second algorithm as well as preliminary results are introduced. This second algorithm aims at supporting part of the MR acquisition when MRAP are not relevant through the automatic building footprint extraction.

## **2. Multi-representation data acquisition**

### **2.1. Goals**

Given a territory and a range of abstraction levels, the photogrammetric MR data acquisition process aims at extracting and linking geometric representations of geographic objects. These geometric representations can be described by traditional CAD structures, such as line, polyline, point, etc. or by more expressive topological GIS structures, such as surfaces, multi-surfaces, and so on (a more detailed description of this structure can be found in the ISO-TC19125-1 standard). As suggested by our research group (Sabo 2007), it can also be described using geometric patterns whenever possible.

The geometric pattern concept as well as its use to populate MRDB with a photogrammetric approach using MRAP is introduced below. More detailed information on these concepts can be found in Sabo et al. (2005a,b), Cardenas (2004) and Frédéricque et al. (2007).Geometric pattern concept

#### **2.1.1. Definition**

A geometric pattern is defined as “a geometric object with basic geometric characteristics that are typical and representative of a large number of occurrences of a mapping feature-type or of a geometric primitive and that is able to adapt itself to the geometry of these occurrences of object at different scales and that can be reused several times” (Bédard 2004; Cardenas 2004). A geometric pattern consists of primitives that correspond to the indivisible atomic elements it is made of.

#### **2.1.2. Purpose**

Geometric patterns can be used to describe the geometries of an object stored in a database (DB). The use of geometric patterns enhances the integrity of a DB by reducing information redundancy. Moreover, the use of geometric patterns provides several advantages from the generalization standpoint. In Sabo (2007), the author suggests the combination of geometric patterns with simple generalization algorithms and generalization constraints to obtain Self-Generalizing Objects (SGO). SGO can be abstracted as software

agents that perform generalization operations through the manipulation of the geometric pattern implantation parameters. For example, an exaggeration operation, applied on a rectangular building that is defined with a geometric pattern, is simply performed by increasing the building width and length parameters. A SGO can produce geometric representations at several arbitrary abstraction levels (which is impossible when using only MR stored in DB). It can also take into account the relations between different geographic objects. The reader should refer to Sabo (2007) for more details about SGO, their use and the quality of the resulting cartographic representations.

### **2.1.3. Links with the notion of a parametric model**

The literature review we conducted reveals proximity between the 2D13 geometric pattern concept used to define CLG and the parametric models concept defined to capture FLG. Geometric patterns have been introduced by cartographers and database specialists for generalization purposes while parametric model have been introduced to support photogrammetric data capture. Despite these two different origins, these concepts display strong similarities. In fact, both concepts use a library of a priori defined shapes to describe the geometries of geographical objects. The geometry description is carried out by defining specific implementation settings for these shapes. Like geometric patterns, parametric models can be used to reduce redundancy in a geospatial database and to ensure MRDB integrity. Several differences still remain between these two concepts. The differences can be categorized according to the three following aspects: (1) their dimensions (2D for the geometric patterns and 3D for the parametric models), (2) the addressed levels of abstraction (geometric patterns address CLG definition while parametric models address FLG), (3) the priority given to the geometric precision (the geometric patterns defined by Sabo (2007) voluntarily favor the generalization speed and data volume reduction while the parametric models favor the geometric fidelity).

---

<sup>13</sup> We consider a geometric object as 3D as soon as its geometry defines a volume and as 2D when its geometry is only defined in a plane.

## 2.2. MRAP concept

As mentioned before, our goal consists in populating MRDB using, when possible, geometric patterns and parametric models. Following such an approach, populating MRDBs requires, for each level of abstraction, to identify, implement, and link geometric patterns and parametric models corresponding to geographical objects. Eventually, generalization algorithms and generalization constraints can be defined to manage relations between spatial objects. This can be long and monotonous if done manually. To facilitate this process, we introduced the concepts of Multi Representation Acquisition Pattern (MRAP).

The principle of MRAP is to define a library of objects consisting of several 3D parametric models and 2D geometric patterns, and eventually consisting of generalization algorithms and constraints. Each parametric model and geometric pattern of the MRAP corresponds to a single predefined abstraction level. All the parametric models and geometric patterns included in a MRAP are linked to each other. Knowing the parameters of the more detailed parametric model of the MRAP allows for inferring the implementation parameters of the other parametric models and geometric patterns included in the MRAP. When creating a new MRAP, the computation method of the coarse levels parameters using the fine level parameters must be specified by a cartographer during an a priori step. Fig. 2 represents some MRAPs identified in our test sites (defined in Table 1, section 4.1).

Four types of basic volumetric primitives can be used to create a 3D parametric model. They are illustrated in Fig. 1. When defining a geometry with such volumetric primitives (combined in a parametric model), we need to define its global parameters (i.e. implementation point and orientation in the horizontal plane) and its shape parameters. Shape parameters of the volumetric primitive number two are also represented (w: width, l: length,  $\alpha$ : roof slope, h: building height).

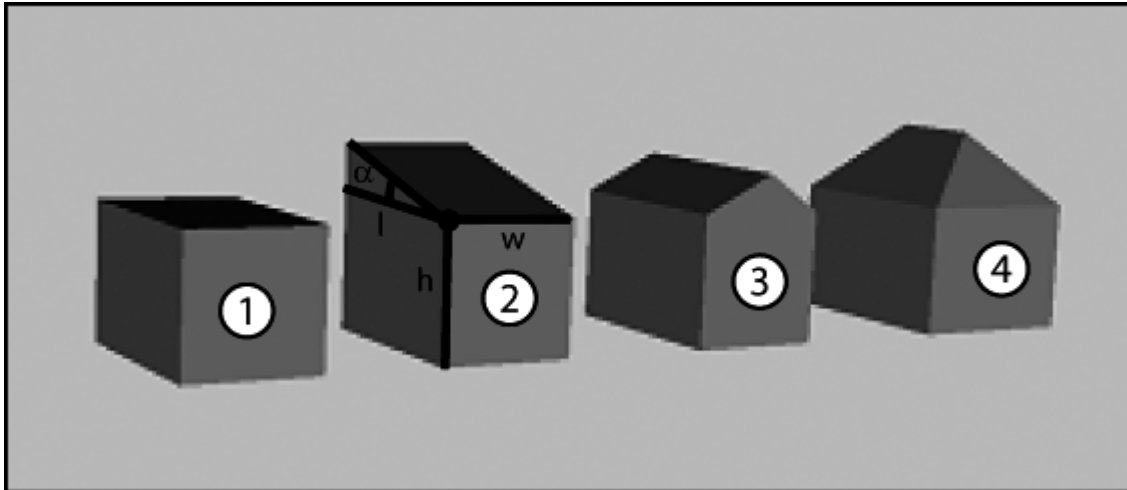


Figure 1: Basic volumetric primitive types: a) flat roof, b) pent roof, c) gable roof, d) hip roof.

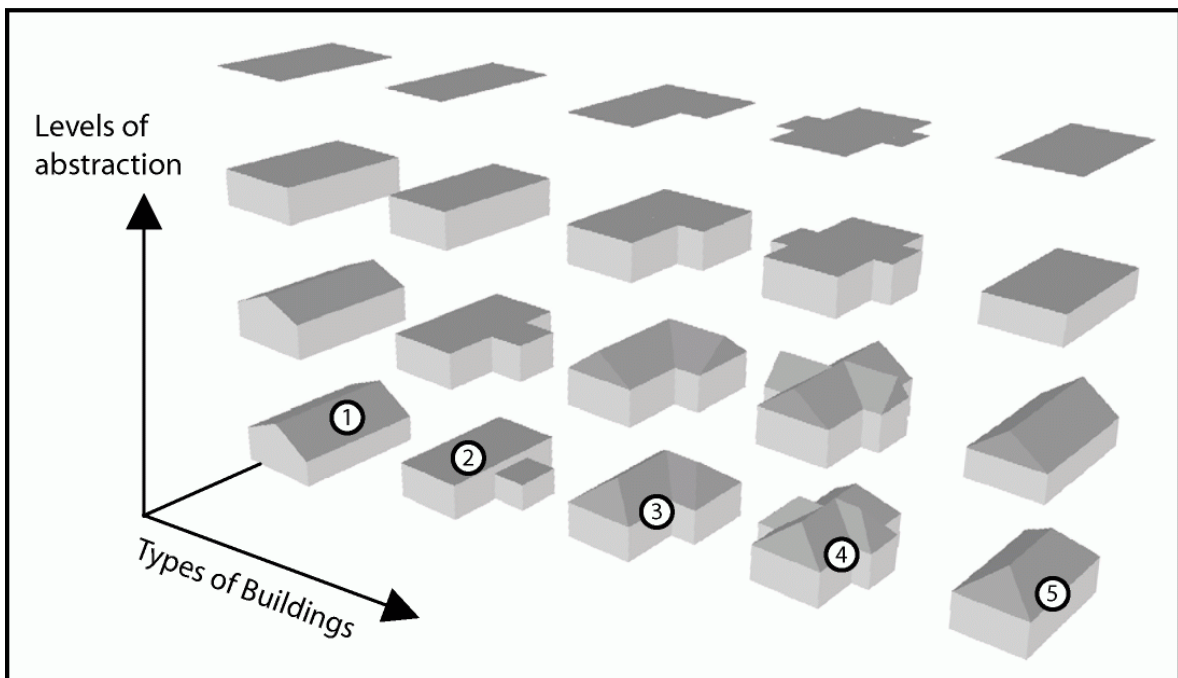


Figure 2: MRAPs examples.

MRAP is an extension of the Multi-Scale Pattern concept, proposed in Cardenas (2004). The latter is restricted to 2D and tackles only CLG geometry extraction. Moreover, it involves neither constraints nor generalization algorithms. Adding those constraints and algorithms to the MRAP allows for supporting the SGO concept (currently under

development in our research group) (Sabo 2007). Linking the multi-scale pattern concept with the parametric model makes the MRAP usable in the FLG photogrammetric acquisition context.

Data acquisition with MRAP consists in implementing (i.e. setting the following parameters: anchor point, rotation, height, ...) the most detailed 3D parametric model of the MRAP. It is also possible to define groups of geographic objects that must fulfill the same generalization constraints (e.g.: the buildings belonging to the group must all be lined up during the generalization) or the same generalization rule (e.g.: the buildings belonging to the group must all be aggregated up during the generalization) .

The example displayed in Fig. 3 shows how the MR acquisition procedure provides several abstraction levels. They range from a fine geometry per building to a coarse geometry for a group of aligned buildings. In this example, three building groups fulfilling the same aggregation rule have been built. More specifically, Fig. 3-d illustrates how an aggregation rule, introduced during the capture, can be used to aggregate objects and then produce more abstract levels. If we refer to the CityGML initiative, Fig. 3-b corresponds to LOD2 and Fig. 3-c,d correspond to LOD1.

Acquisition results, involving the use of MRAPs 1, 4 and 5 (cf. Fig. 2), have been obtained using our manual prototype (Frédéricque et al. 2007) on the Beauport test site (test site description is provided at the end of the paper, Table 1; section 4.1). The human operator can select the relevant MRAP model using the corresponding tool selection designed in the prototype. MRAPs can be grouped during the acquisition process if they have to fulfill the same generalization constraint or rule. The manual MR acquisition prototype allows for determining the MRAP parameters from the selection of specific points in the 3D ground space (e.g. the two first points provide the length and the rotation angle of the MRAP). A human operator performs this selection in a stereoscopic view. One of the points must be located at the ground level. The other points must refer to specific vertices of the MRAP's finest level. For example manual MR acquisition with MRAP number five (cf. Fig. 2) requires the selection of five points. This can involve up to seven mouse clicks if the corresponding tool must be selected and a building group must be defined. This number of clicks increases rapidly with the number of MRAP parameters. The first algorithm



proposed in the next section aims to reduce the number of required points for the MRAP acquisition.

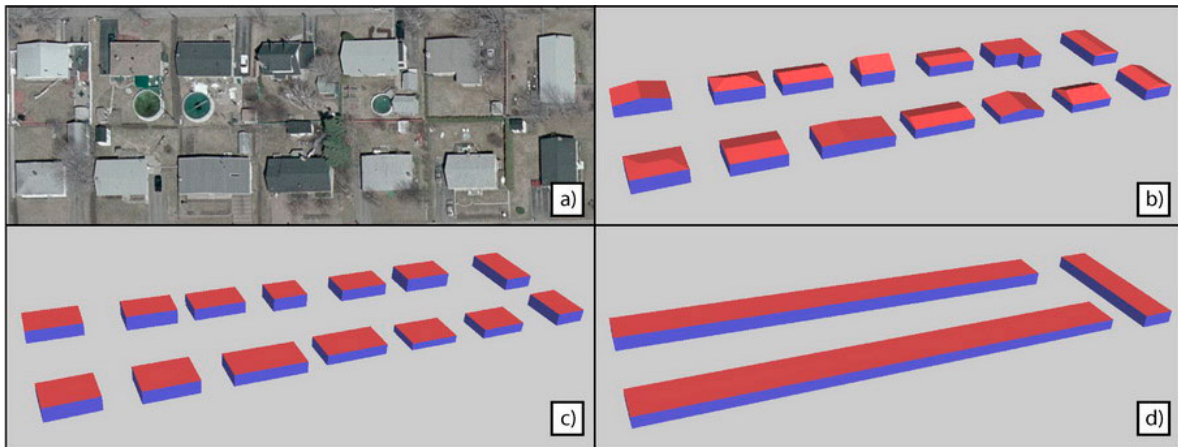


Figure 3: Examples of results obtained with the photogrammetric multi-representations acquisition system manual prototype. a) image sources b) c) and d) different levels of abstraction.

### 2.3. The limits of MRAP use

As mentioned before, we are aware that MRAPs are not relevant to all building geometries and that more flexible approaches must be considered to tackle complex building representations. Some building elements (e.g. roof window) are not always included at the finest level of the MRAP. It does not mean the MRAP cannot be used to extract the other building abstraction levels. More specifically the fact that there is no parametric model to describe the finest level does not imply that parametric models and geometric patterns cannot be used for coarse levels. The coarser the abstraction levels, the more relevant parametric models and geometric patterns are. Practically, it would consist in extracting a detailed geometry through an independent process (manual or semi-automatic) and then linking this detailed geometry to a MRAP. The link between the different coarse levels and the parameters would be automatically computed through the MRAP. Regarding the finest level geometries, they could be defined using different geometric structures like Brep or volumetric primitives combined in CSG. Ideally, the CSG structures should be favored for database integrity optimization and to facilitate generalization operations (cf. 2.2.2).

To summarize, acquiring complex buildings in MR would involve two major components (1) the detailed geometry extraction, and (2) linking the detailed geometry and the MRAP and then inferring the MRAP parameters. The second algorithm proposed hereafter aims at supporting detailed geometries extraction and to facilitate the matching between detailed geometries and MRAPs.

### **3. Semi-automatic MR acquisition with orthogonal MRAPs**

The following section deals with contexts where MRAPs are detailed enough to represent the finest geometry level of the buildings. The automatic definition of MRAP parameters (i.e. implantation parameters of the most detailed parametric model) follows the selection of the MRAP type and the building's approximate location by the human operator. This issue corresponds to the determination of the parameters of the finest parametric model encapsulated in the MRAP. All identified MRAPs are orthogonal (i.e. they consist of primitives that are orthogonal to each other). This a priori knowledge about the volumetric primitives' spatial relations will be useful for the extraction of their implementation parameters.

#### **3.1. Works related to the parametric model parameters determination**

Several research works have been dedicated to the determination of the parametric model parameters. Some of them are described hereafter. In fact, a priori knowledge regarding building geometries can easily be formalized and introduced using parametric models. A priori knowledge is a key element in the performance of building extraction algorithms (Baltsavias 2004). Our global strategy, involving a top-down approach and the use of a priori knowledge, relies on this statement.

Approaches using parametric models can be classified in two categories. The first consists in automatically identifying the parametric model type as proposed in Haala and Brenner (1999); Suveg and Vosselman (2004); Lafarge et al. (2006); and Ortner et al. (2007). The second requires a human intervention in order to specify the parametric model such as in

Gülch et al. (1999); Vosselman and Veldhuis (1999); Rottensteiner and Schulze (2003) and in Tseng and Wang (2003).

Works of the first category look for a full automation even if some authors also provide semi-automatic tools to post-process failure cases. Parametric models are then used to generate and evaluate hypotheses about the building geometries. Hypotheses are evaluated by comparing the hypothetical geometries with reference data sources consisting mostly of aerial images and DSM. DSM are more and more used since, as mentioned in Brenner (2003), information extracted from DSM simplifies automatic reconstruction issues as soon as this information is already in the object space. Furthermore, the recent progresses of LIDAR sensor and aerial digital camera this last decade have improved the quality of the available DSM. Vector data can be used in addition to aerial images and DSM. In Haala and Brenner (1999) and Suveg and Vosselman (2004), building footprints are used jointly with a DSM. The proposed algorithms, using volumetric primitive combinations, rely on the segmentation of the building footprints. Gerke et al. (2001) and Vinson and Cohen (2002) proposed two automatic approaches to extract building footprints. Both strategies assume that building footprints can be described as rectangle combinations. Rectangles can be considered as parametric models restricted to the horizontal plane. These two strategies correspond to a generalization of the inertial moments based on the Maas (1999) method.

Semi-automatic approaches using parametric models, as proposed in Gülch et al. (1999); Vosselman and Veldhuis (1999); Rottensteiner and Schulze (2003) and in Tseng and Wang (2003), require a human to intervene at the beginning of the process. The purpose of this intervention is to identify the parametric model type and to define approximate parameters for the model. Accurate parameters are then computed automatically. The human operator can also combine parametric models to deal with buildings having a complex geometry. Parametric models are restricted to those having quadrilateral footprints, generally rectangles. Approximated parameters definition requires several clicks. For example, in Rottensteiner and Schulze (2003) three specific points are needed. Fine parameters are computed through optimization procedures that consider consistency between parametric model position and reference data. For example, in Rottensteiner and Schulze (2003) and in Tseng and Wang (2003) aerial image data is used as reference data and parametric model

wireframes are projected to edge images. Maas (1999) proposed a strategy quickly providing approximate parameters from a DSM region, a parametric model type and a unique approximated point. This strategy is based on inertial moments and can only be used with elementary parametric models (composed of a single volumetric primitive). Those cannot be used to combine primitives in CSG unless the regions of interest in the DSM, corresponding to each primitive, are specified earlier. Furthermore, as mentioned in Gerke et al. (2001), inertial moments are unstable if the shape of a building footprint is very similar to a square. The strategy proposed in Maas (1999) still has the major advantage to be quick and not demanding from the human intervention standpoint. These two aspects are particularly relevant in a semi-automatic context where response times must be short to keep the human operator from waiting, and where human intervention should be reduced as much as possible.

Most of the existing approaches, fully or semi automatic, use elementary parametric models (composed of only one volumetric primitive). They combine these elementary parametric models to describe complex geometries. Therefore, few algorithms are available to determine the approximate parameters of complex parametric models (composed of several volumetric primitives combined in a specific way) from a restricted number of approximated points. Strategies such as clustering or RANSAC (Fischler and Bolles 1981) used for elementary parametric model (Gülch et al. 1998) can hardly be used for complex parametric models as soon as the number of unknown parameters is increasing. This is particularly true in a semi-automatic context (i.e. needing real time processing). Existing algorithms computing accurate parameters from approximated values are still relevant insofar as each primitive optimization can be addressed independently.

### **3.2. Proposed algorithm for the orthogonal MRAP parameters determination**

The speed of the automatic process is of great importance in our semi-automatic context. In fact, implementation parameters must be established on-the-fly. Several of the MRAP involve complex parametric models (involving several volumetric primitives). This complexity may imply many parameters to optimize and increase the automation

problematic. Moreover, to limit human intervention, we look for an initialization stage consisting in only introducing an approximate point. We restricted the spectrum of our investigation to the estimation of approximated parameters of complex MRAP from an approximated point. In fact, as mentioned before, several contributions already tackled the accurate parameters determination from approximated initialization.

### **3.2.1. Strategy for the determination of parameters: extraction and selection of primitives**

We have introduced a new approach using passive imagery and DSM to extract the parameters of orthogonal parametric models (the more detailed parametric model included in an orthogonal MRAP).

A DSM is automatically produced from stereoscopic couples by combining area-based matching techniques (correlation from object space) and optimal surface research in a graph (minimum cut research). Introduced by Roy (1999), this approach allows for a spatial homogeneity notion to be included during the DSM computation process. Thus, it uses a priori knowledge regarding the area continuity and allows for enhancing the robustness of the DSM extraction. The reader can refer to Pierrot-Deseilligny and Paparoditis (2006) to get a detailed description of this DSM production method. Fig. 4 is an example of an image source and its corresponding DSM generated using the proposed strategy. This example refers to our second test site (Charlesbourg) described in Table 1, section 4.1.

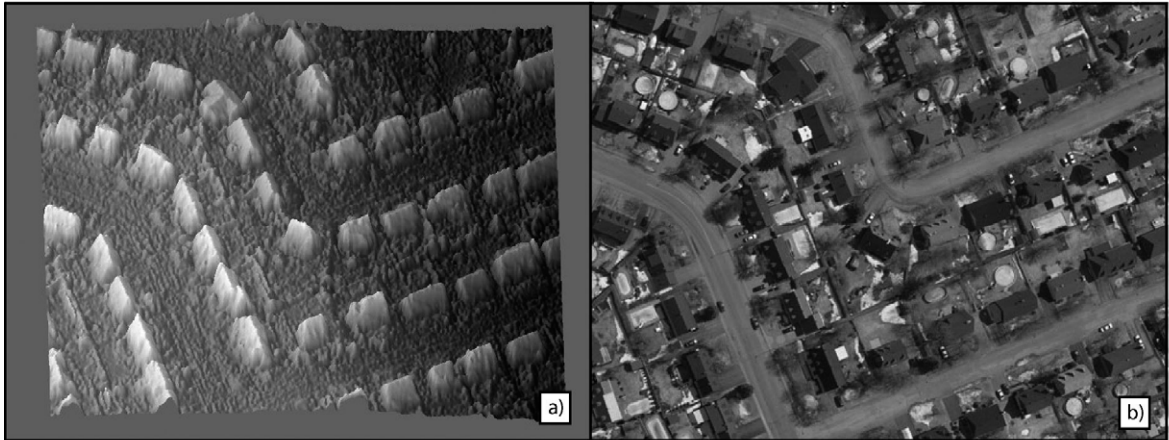


Figure 4: DSM generation with a max flow strategy. a) DSM b) Source image.

Our strategy to automatically extract the parametric model parameters from a single approximated point divides the optimization problem into several sub-problems to solve it quickly. This strategy considers a parametric model as a particular volumetric primitive combination. The parametric model parameters' research is then addressed by extracting the parameters of each volumetric primitive. This strategy involves three successive steps: (1) determining a Region Of Interest (ROI) in the ground space including the building to be extracted, (2) extracting the best volumetric primitives combination according to the parametric model, and (3) deducing the parametric model parameters from the parameters of each primitive and the connectivity relations between these primitives.

The ROI is extracted using a normalized DSM (nDSM). The nDSM is computed by subtracting the Digital Terrain Model from the DSM). The nDSM is segmented using a region-growing algorithm based on the height analysis (Weidner, 1997; Ameri, 2000). The height threshold is defined according to the a priori knowledge regarding the minimum height of the building. The DTM is deduced from the DSM through the application of a morphological filter (Weidner, 1997; Sternberg, 1983). The DSM, nDSM and ROI are described using a raster format. Examples of source image, nDSM, ROI and corresponding MRAP are shown in Fig. 5. Fig. 5 will be reused in this paper as a running example to illustrate several processes.

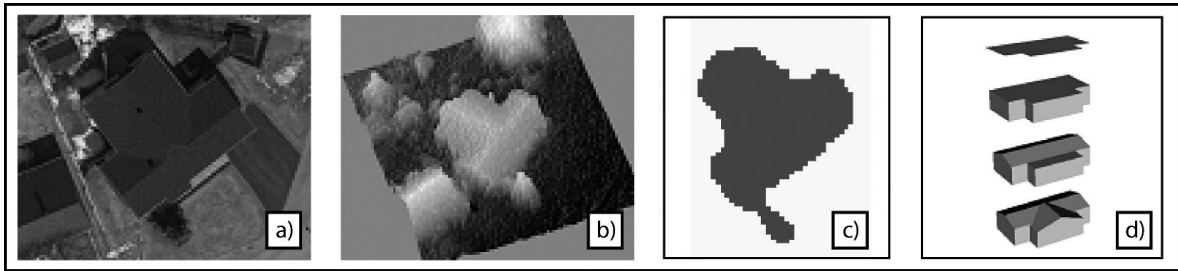


Figure 5: running example, a) Source Image b) nDSM c) ROI d) corresponding MRAP.

Step 3 (i.e. deduction of parametric model parameters from each primitive parameters and their connectivity relations) is a coordinate system transformation from a Cartesian system to a parametric system in the terrestrial reference system. This is easily performed as soon as extracted primitives are matched with parametric model primitives. This matching process is performed during step 2.

Step 2, (i.e. extraction of the best volumetric primitive combination according to the parametric model) is the more complex step and is carried out on-the-fly. The new approach we propose is a contribution to this research field. It consists of three sub-steps: 2.1) expression of the ROI as an orthogonal combination of rectangles, 2.2) selection of the best orthogonal combination of rectangles according to the parametric model footprint, 2.3) extrusion and segmentation. Sub-steps 2.2 and 2.3 are iterated if sub-step 2.3 failed and if sub-step 2.2 succeeded.

Therefore, step 2 successively addresses the planimetric data extraction and the altimetric data extraction. This choice is based on the fact that ROI extraction from nDSM is robust. Moreover, this strategy aims at decreasing the size of the research space in order to reduce the processing time. In fact, a short computation time is needed to support semi-automatic data capture. The processes involved during step 2 and its sub-steps are detailed hereafter. The global process is also synthesized in the UML activity diagram proposed in Fig. 6.

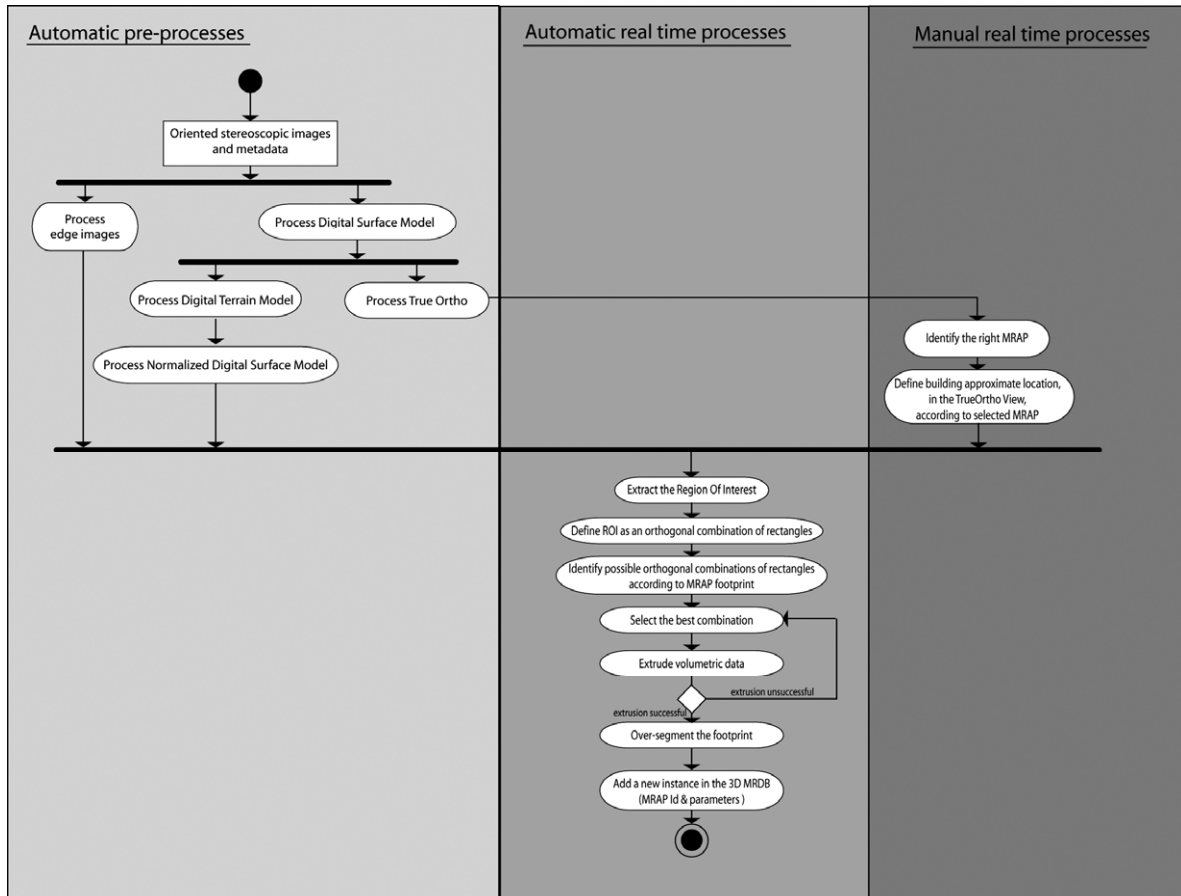


Figure 6: UML activity diagram of the global process.

Sub-step 2.1 consists of converting the ROI from a raster form to an orthogonal combination of rectangles. Again, the developed approach is considered as a contribution to this research field. The principle of the approach and its two main tasks are described in the following section.

### 3.2.2. ROI conversion strategy

The principle of the ROI conversion strategy is to generate a collection of axes that are subsequently used to generate rectangles through a dilatation process. An axis is defined by a point and a direction, and the dilatation process aims at defining the rectangle dimension around this point. Starting from the fact that thinning methods generate axes with directions that are strongly affected by the noise of the shape boundaries (Parker, 1997) and that the positions of the axes are relatively robust, we have proposed a mixed strategy to express the



ROI as a rectangle combination. This strategy uses both the raster ROI and the edge images to express the ROI as an orthogonal combination of rectangles. The well-known Canny filter (Canny J. 1986) is used to compute the edge images from the source images. We first extract rectangle axes (defined with a point and an orientation) and then rectangle dimensions around these axes (Half Forward Length (HFL), Half Backward Length (HBL), Half Right Width (HRW), and Half Left Width (HLW)). We use the edge images to extract the axes direction and the ROI skeleton to define the approximate location of the axes. The Zhang-Suen (Zhang and Fu, 1984) thinning algorithm is used to compute the skeleton from the raster ROI.

Rectangles are then defined using these axes (to initialize the rectangles) and the raster ROI (to delineate the rectangles around the axis). Such a strategy is relevant since the building direction is accurate in the edge images while the ROI boundaries are noisy. The edge images cannot be used to improve the rectangle boundaries. In fact, it would be necessary to distinguish edges near the building boundaries from the edges belonging to the inner roof structure. Edge images will be used during the extrusion process to improve the boundary locations of the volumetric primitives. In fact, at the extrusion step, roof structure knowledge is available and it can be used to select relevant edges. The ROI conversion strategy is synthesized in the UML activity diagram of Fig. 7. Both the extraction of direction and the rectangle definition from the axis are described hereafter.

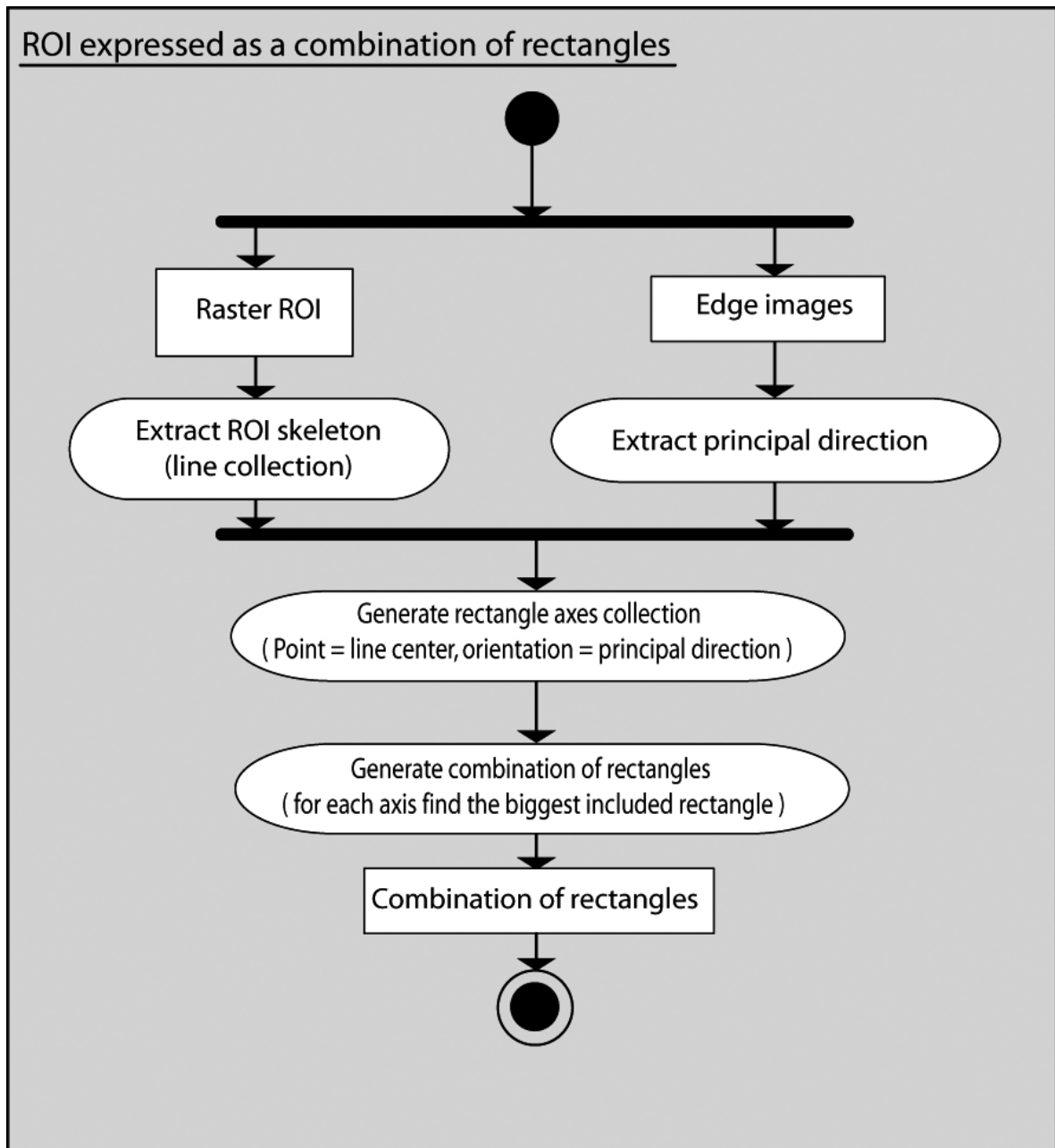


Figure 7: UML diagram activity describing ROI conversion algorithm.

### 3.2.2.1. Determination of the principal direction

The principal direction is defined between 0 and 90 degrees and corresponds to volumetric primitive directions (primitives are orthogonal). The principal direction is deduced from the edge images using the statistical analysis of the edge directions included in an analysis area. The analysis area is deduced from the ROI through its dilation according to the DSM

accuracy. In the analysis area, edge images are orthorectified using the average altitude in the ROI. This strategy is usable if the camera focal that is used for image acquisition is short enough to confine edges inside the analysis area. In fact, the Z-variation of the roof structure edges should not involve a delocalization of the building edges outside the analysis area. This strategy is not only very simple to implement but it is also very fast. It is based on the a priori knowledge that most of the edges are in the principal direction of the building (i.e. the building roof structures yielding to edges in the images are horizontal) and that the determination of the edge direction is robust.

### **3.2.2.2. Generation of the rectangles from the approximate axes**

The axes are generated from both the skeleton and the orthogonal MRAP principal direction. For each line of the skeleton we create two axes defined by a point and an orientation. We use the middle point of the skeleton line to define the axes. The orientations of the two axes refer to the building principal direction and to the building principal direction plus 90 degrees, respectively.

For each axis, a heuristic, illustrated in Fig. 8, which allows for the estimation of the largest oriented rectangle included mainly in the ROI, is used. The rectangle should include the axis point. A rectangle is defined by a point and five other parameters: orientation, Half Forward Length (HFL), Half Backward Length (HBL), Half Right Width (HRW), and Half Left Width (HLW).

The heuristic involves three main steps described hereafter and is illustrated in Fig. 8:

- 1) First estimation of HFL and HBL
  - Intersection of the axis and the ROI boundaries
  - Creation of segment S1 with the two shortest points in the forward and backward directions
- 2) Determination of HRW and HLW

- Statistical analysis (first quartile) of the distances between the points belonging to the ROI boundaries and their orthogonal projection on segment S1
- Note: only orthogonal projections inside segment S1 are used

### 3) Final adjustment of HLF and HBL

- Creation of segment S2 from a point (axis point), a direction (perpendicular to S1), an Half Forward Length (corresponding to the previous HRW) and an Half Backward Length (corresponding to the previous HLW)
- Statistical analysis (first quartile) of distances between the points belonging to the ROI boundaries and their orthogonal projection on segment S2

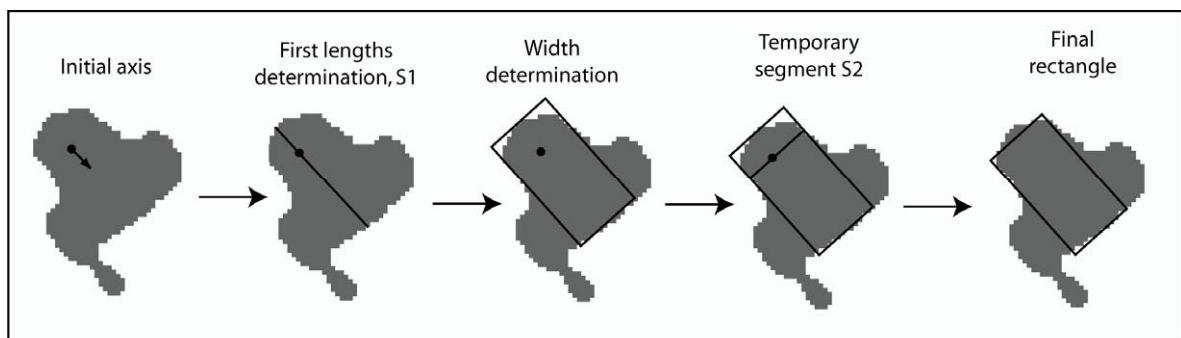


Figure 8: Rectangle generation from axis.

#### 3.2.2.3. Selection of the best orthogonal combination of rectangles

Finding the best orthogonal combination of rectangles comes after the expression of the ROI as an orthogonal combination of rectangles. This research is based on an a priori knowledge about the building footprint (e.g. L shape or T shape). This a priori knowledge, specific to the instance, is input through the identification of the MRAP type and through the approximated point input. The approximated point links the MRAP type to the ROI.

The best orthogonal combination of rectangles results from matching and evaluating the combination of rectangles with the parametric model footprint. Since graph structures are relevant when performing topological comparisons, the matching process is performed according to a graph-based strategy (research of the graph and subgraph isomorphism). Each rectangle is a graph node and each overlap between two rectangles is a graph edge. This definition of the graph edge depends on the relative positions of the axes of the two overlapped rectangles. The best subgraph maximizes a score function and must overlap the approximated point introduced by the human operator.

We have used the area generated by the rectangle's graph footprint (logical OR) as the score function. Other score functions could be used. For example, in Ortner, et al. (2007), authors check the consistency between the theoretical roof structure (defined as a volumetric primitive) and the DSM in order to evaluate the relevance of the solution. To identify the best sub-graph we use a heuristic assuming that the best sub-graph likely includes the biggest rectangle overlapping the approximate point. All the possible sub-graphs including this node are evaluated. If no solution is found, the second best rectangle using the approximate point is then used. The same principle is iterated until a solution is found. Fig. 9 illustrates the graph matching process used to compute the best combination of rectangles

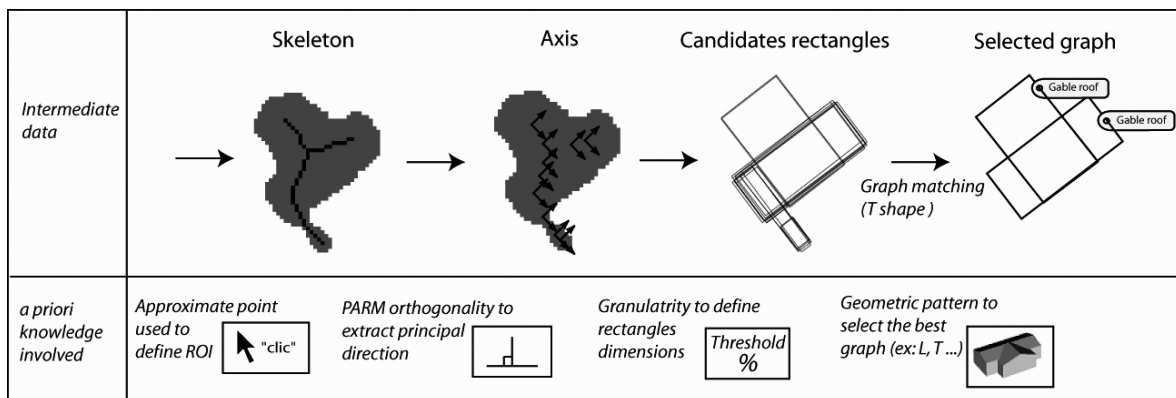


Figure 9: Illustration of selecting the best orthogonal combination of rectangles.

### **3.2.3. Extrusion and segmentation**

The selected combination of rectangles describes the initial building footprint. The volumetric data is extracted during the extrusion step. It uses both preliminary extracted rectangles and knowledge about the volumetric type. This knowledge is attached to the rectangles during the graph-matching process (knowledge example regarding the roof structure: gable roof). On the one hand, extrusion aims at extracting inner roof structure. On the other hand, it aims at extracting building height. Additional elements, such as trees and neighboring buildings, can be included in the footprint. They are excluded during the segmentation steps.

Thus, each rectangle included in the selected sub-graph is extruded and segmented in order to generate a volumetric primitive. Extrusion and segmentation processes are specific to the volumetric type. Rectangles are extruded according to the volumetric primitive types. For each type of volumetric primitive, extrusion and segmentation processes exploit faces, defined in the 3D object space, that have been preliminary extracted. The faces extraction is performed in the same way for each volumetric primitive type. A score is attached to each face during its extraction.

Segmentation relies on topographic and radiometric discontinuities. In fact, the ROI analysis is not sufficient to delineate a volumetric primitive. A first segmentation, based on topographic discontinuities, is performed during the extrusion step. Then, a second segmentation, based on the image's edges analysis, is carried out. Rectangle position in the best sub-graph is considered during the segmentation in order to maintain the selected graph consistent with the parametric model footprint. As mentioned before, the selected graph must display the same topological structure as the parametric model footprint (e.g. T shape) and must overlap the approximate point.

The extrusion and segmentation processes are described hereafter. Extruded roof boundaries are projected to the ground in order to compute the volumetric primitive height.

### 3.2.3.1. Extraction of faces

All the faces are extracted for each rectangle used to generate a volumetric primitive. A 3D-point cloud is computed from the DSM. For this purpose, we define a regular grid inside the rectangle to be extruded. The XY coordinates of the points are computed through the rectangle discretization and the Z coordinate is deduced from the DSM. The planes are computed from this point cloud using a RANSAC strategy followed by a least square compensation. The face creation consists in delimiting each plane with a polygon. The polygon is deduced from the oriented bounding box of the selected cloud points. The initial bounding box is enlarged using a buffer defined according to the DSM accuracy and the grid-sampling step. All the extracted planes through the RANSAC strategy are kept but a score is attached to each face depending on the face area and the amount of points used to extract the plane. Fig. 10 illustrates the extrusion process for a gable roof volumetric primitive. This primitive refers to the horizontal part of the running example T shape.

RANSAC is a reliable approach that can be easily implemented to extract planes. However, inadequate settings or particular configurations can lead to method failure. The threshold criterion used to accept or reject a point according to its distance to the current plane must be set carefully. In fact, a threshold that is too small will lead to the extraction of a lot of vertical planes parallel to the sampling direction of the grid. A threshold that is too high will affect the accuracy of the extracted plane because outlier points will be used for the least square adjustment of the plane equation. Moreover, these points will be rejected during the next computation and they will not be involved in other plane computations. Consequently, an efficient extraction of the faces relies on the knowledge of the DSM accuracy.

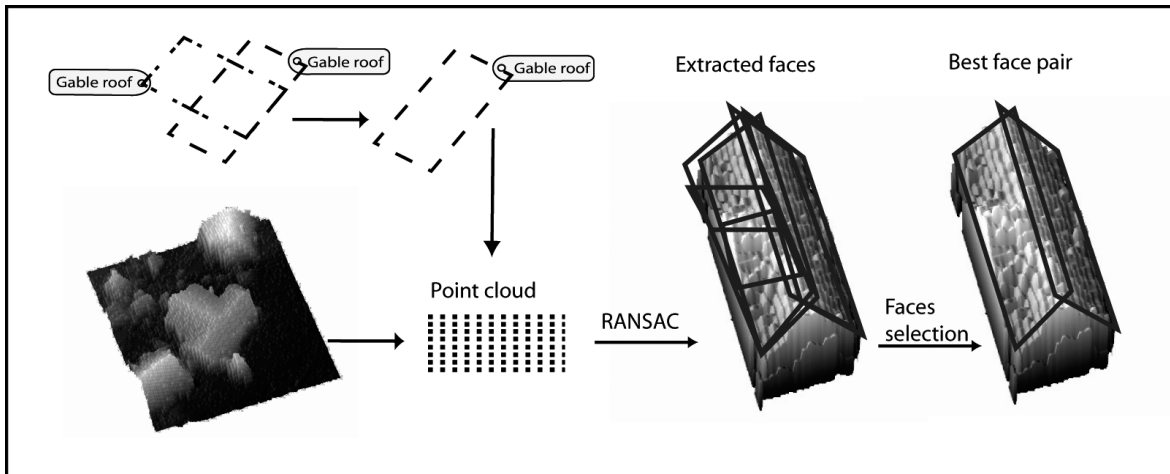


Figure 10: Extraction of faces for a rectangle included in ROI.

### 3.2.3.2. Extrusion of flat roof and pent roof primitive and segmentation from a topographic standpoint

Extrusion of flat roof and pent roof primitives (primitives 1 and 2, Fig. 1) needs to select the best face among all the extracted faces. This face selection depends on both the graph topological constraint (consistency between the parametric model and the overlap with the approximate point) and the score attached to the face. If the volumetric primitive to be extruded is a flat roof primitive (primitive 1, Fig. 1), the selection is restricted to horizontal faces.

The selected face is used to segment the primitive footprint by keeping only the overlapped area between the face footprint and the initial rectangle. This segmentation is performed according a topographic discontinuity criterion. A DSM section corresponding to several flat roof primitives is shown in Fig. 11. The rectangle displayed on Fig.11-c represents the initial rectangle. Rectangle produced by the segmentation is shown on Fig.11-e. This example is extracted from our Beauport test site.



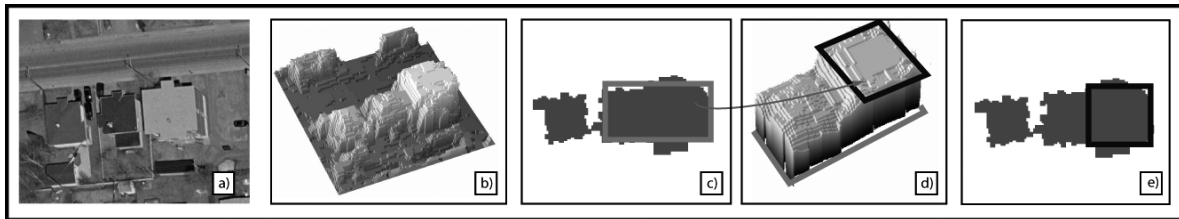


Figure 11: Extrusion of a flat roof primitive.

Volumetric primitive parameters are then deduced. Implementation point, orientation, width and length are deduced from the rectangle. The selected face is then used to define building height (vertical distance between face and DSM at the implementation point) and roof slope (face slope).

### 3.2.3.3. Extrusion of a gable roof primitive and segmentation from a topographic standpoint

Extrusion of a gable roof primitive (primitive 3 Fig. 1) needs to select the best two faces that intersect each other in a consistent way according to the volumetric primitive shape. In fact, the intersection of the two faces must correspond to a peak and not to a thalweg or a simple slope discontinuity. This face selection depends also on both the graph topological constraint (consistency between the parametric model and the overlap with the approximate point) and the score attached to the faces. The face selection is performed through the identification of the best peak 3D edge<sup>14</sup>. A 3D edge is computed for each intersecting faces pair. These 3D edges are then classified into two categories: peak and discontinuity. A 3D edge is a peak if the Z values of its two end points are higher than the Z values of the two faces' centroids. All other edges belong to the discontinuity class.

A score function, using the score attached to the two faces and the 3D edge length is then used to select the best peak edge. Only peak edges displaying the same direction as the principal direction of the rectangle are considered. The segmentation of the footprint, based on topographic considerations, follows the same principle as the flat roof case, where we

<sup>14</sup> For the sake of simplicity, we refer to 3D edge when the edge is defined in a 3D object space and to 2D edge when this is defined in a 2D space like an image.

keep only the overlap area between the oriented bounding box of the two faces footprint and the initial rectangle.

The selected peak edge and the segmented footprint are then used to deduce the volumetric primitive parameters. The rectangle is used in a similar way as for flat roof primitive. The 3D edge is used to define roof structure parameters. The peak height is deduced from the 3D edge middle point height and the peak eccentricity is deduced from 3D edge distance to rectangle boundaries.

#### **3.2.3.4. Extrusion of a hip roof primitive and segmentation from a topographic standpoint**

A hip roof primitive is processed as a particular gable roof primitive with an additional parameter. This parameter defines the shift between the beginning of the peak and the primitive footprint. It is computed by adjusting the peak edge with the normal faces (the orientation of the normal vector of the face in the XY plane is the same as the peak edge).

#### **3.2.3.5. Radiometric based segmentation**

A volumetric primitive is delimited not only by its 3D shape (topography discontinuity in the DSM), but also by edges and/or changes in the spectral properties. According to this definition, there are seven volumetric primitives in Fig. 12 (considering small details in the roof boundaries as negligible). In order to acquire one of these seven connected buildings, we need to consider not only the topographic discontinuities but also the radiometric discontinuities.



Figure 12: Volumetric primitive boundaries examples.

Fig. 13 a) illustrates the face extracted in the context of Fig. 12 image when the radiometric discontinuity is not considered. In order to extract the volumetric boundaries, additional processing is required after the extrusion and topographical segmentation. This processing consists in segmenting the volumetric boundaries using the edge images. For this purpose, we look for 3D edges in the object space that delineate the primitive footprint as a rectangle. More specifically we look for 3D edges that are (1) oriented according to the principal direction, (2) on the roof 3D faces (i.e. on the extracted and selected faces when defining the primitive roof structure at the previous step).

Using knowledge about the roof structure type, we generate 3D edge candidates (oriented in the principal direction and on the roof 3D faces) by setting their length to the initial rectangle dimensions and by discretizing the candidate space according to the DSM ground resolution. Fig.13-b) and c) illustrate the 3D edge candidates generated in the context of Fig. 12 image. The relevance of the 3D edge candidates is then assessed using the edge image. The 3D edge is projected on the edge image. The discrepancy between its position and the position of the detected 2D edges in its vicinity provides a measure of the 3D edge relevance. The number of edge pixel in this neighborhood is directly used as a measure

function. The neighborhood is defined according to the DSM accuracy and the edge image resolution.

The radiometric based segmentation then consists in finding the 3D edges with a measure higher than a fixed threshold. The research is performed according to four directions (principal direction modulo  $\pi$ ) around the approximate point, starting from the nearest 3D edge to the furthest. For each direction, the search stops as soon as a measure value higher than the threshold is found. If the approximated point is not inside the volumetric primitive (when the parametric model consists of several primitives), a point defined contextually is used. If the roof type is gable or hip we use a point on the peak axis (the peak was selected during the previous step). If the roof type is flat or pent and if the footprint is a Tshape we use a point on the medial axis of the initial rectangle, etc...

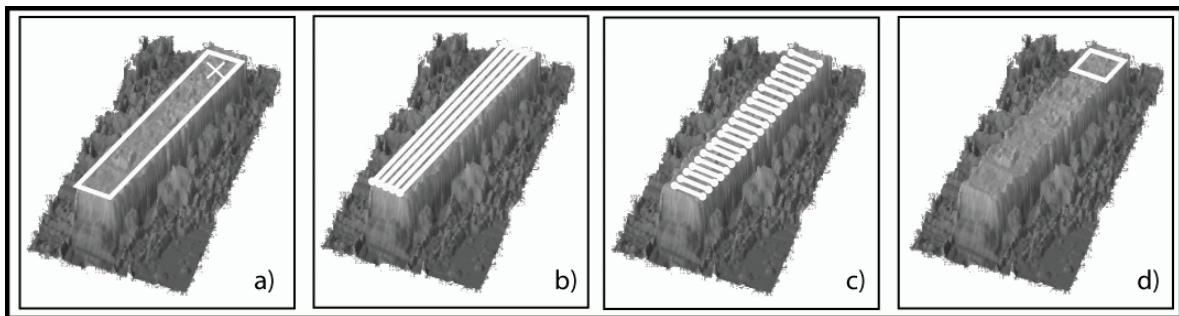


Figure 13: Edge image based segmentation. a) DSM with initial face, b and c) DSM with 3D edge candidates, d) adjusted face.

## 4. Experimentation

### 4.1. Test sites

The processes used to automate the determination of orthogonal MRAP parameters have been carried out on three test sites in the province of Quebec. The first two sites are near Quebec City (Beauport and Charlesbourg) and the third is on the Island of Montreal. These three test sites consist of medium-density residential areas (relatively small buildings, less than 4 floors). This kind of urbanization is a typical North-America suburb configuration. The orthogonal MRAPs are relevant in such a context. The characteristics of the aerial

images we used are described in Table 1. DSMs were generated with a 25 cm ground resolution because we were only looking for approximate determination of the MRAP parameters. Furthermore, having the same ground resolution for all the DSMs will facilitate the comparison of the various results.

	Charlesbourg	Beauport	Montréal
Scale	1/5000	1/8000	1/4000
Camera type	Digital	Film	Film
Focale	120mm	152mm	306mm
Pixel size	12 microns	21 microns	14 microns

Table 1: Source images characteristics.

## 4.2. Results

We compared the parametric models that were automatically implemented with the manual implementation (using stereoscopic images) in order to validate the automatic determination of parameters. Results are considered valid when: 1) the difference between the automatically and the manually positioned edges are smaller than three times the DSM resolution, and 2) the angular difference between the two principal directions (i.e. automatically and manually extracted) is smaller than 3 degrees. These criteria were based on our review of works related to fine parameters determination from the manual introduction of approximated parameters (ex. results in Gülch et al. 1999).

Our extraction strategy of the initial MRAP's parameters relies essentially on the DSM. Thus, the resulting accuracy is intrinsically dependent on the DSM accuracy. The resulting accuracy could be improved with a better DSM. The implemented prototype involves computation times smaller than 1 second per volumetric primitive using a laptop with the following characteristics: Intel Centrino 1.7 GHZ, 512 Mo RAM. Some of the processes

(e.g. face extraction, edge direction computation) should be computed during a preliminary step in order to decrease the on-the-fly time processing. The table below synthesizes the obtained results. Fig. 14 illustrates the result obtained on the Charlesbourg test site.

			Charlesbourg		Beauport		Montréal		Total
			Number	%	Number	%	Number	%	%
<i>Total number of tested buildings</i>		<i>Line Id.</i>	107	100	76	100	130	100	100
Failure during initial footprint extraction	ROI detection	1	0	0	4	5.3	0	0	1.3
	Principal direction detection	2	4	3.7	0	0	10	7.7	4.5
	Rectangle extraction according to parametric model (graph matching)	3	2	1.9	3	4	4	1.5	2.9
Failure during extrusion and segmentation	DSM resolution is not enough to extract element that are differentiable in images	4	1	0.9	0	0	0	0	0.3
	Noise in the DSM surfaces	5	0	0	10	13	40	30.7	16.0
	Details elements (ex : windows) incoherent with MRAP	6	2	1.9	0	0	2	1.5	1.3
	Abusive segmentation	7	0	0	0	0	2	1.5	0.6
Total failure cases without additional knowledge		8	9	8.5	17	22.4	56	43.1	26.2
Additional knowledge about principal direction	Information about principal direction is available through groups constitution	10	43	40.2	68	89.5	100	76.9	67.4
	Information about principal direction can be used to bypass failure in principal direction extraction	11	4	3.7	0	0	10	7.7	4.5

Table 2: Results for the three test sites.

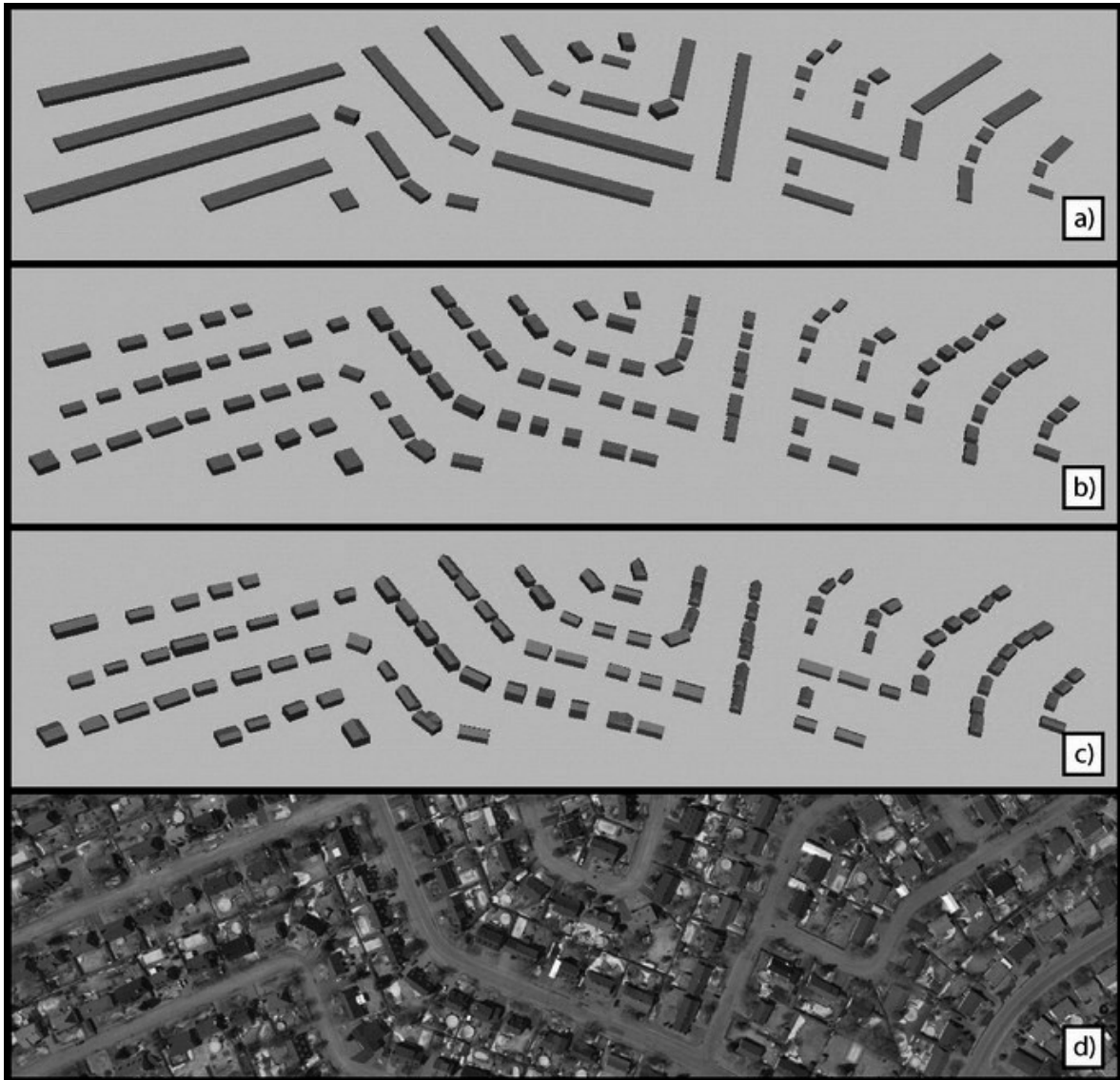


Figure 14: Results example. a) coarser level with building groups, b) a coarse level, c) fine level, d) source image.

### 4.3. Analysis

The implemented processes dedicated to the extraction of MRAPs' parameters have been assessed on three test sites. Only orthogonal MRAPs have been used. Some failures can arise during the initial footprint extraction (ROI extraction, conversion to a rectangle graph structure...) and during the extrusion and segmentation step. The ROI extraction is very robust (a 99% success rate) even if the DSM quality is relatively poor. The principal errors

arise when the nDSM quality does not allow for building detection during the ROI extraction. The suggested strategy, which is dedicated to the extraction of the building principal directions and the description of the ROI as a rectangle graph, leads to a failure rate of less than 10% for the three test sites. The principal cause of failure during the direction extraction is tree branches. Using edge ortho-images, the automatic determination of the principal direction could be improved through a 3D edges analysis instead of a 2D edges analysis. The improvement would consist in extracting the 3D edges with a feature-based matching strategy and then in analyzing only the horizontal 3D edge directions. Furthermore, it should be underlined that a priori knowledge about the principal direction of the building to be extracted was available in all the failure cases (lines 10 and 11 in Table 2). We indeed counted the number of occurrences when this kind of a priori knowledge was available. The purpose was to evaluate whether this available information could be useful from an automation standpoint. This information has been provided through the CLG specification when group of aligned buildings were built. Taking advantage of this information when available is a prospect that should be investigated (e.g. cancellation of the edge analysis or exploitation of this information during the statistical analysis of the edge directions). The matching process between the available rectangles and the geometric pattern footprint displays a rough 3% failure rate. These failure cases occur when the DSM is too noisy and, consequently, when the ROI boundaries are too poor. The footprint extraction, particularly the rectangle graph computation, is still very efficient.

The initial footprint extraction processes are fast (first part of the Table 2), relatively robust and can take advantage of the available a priori knowledge about the building directions. The extrusion and topographical based segmentation are only based on the DSM exploitation. Our test sites are similar from an architectural standpoint (simple building structure compatible with parametric model concept). Therefore the performance differences between these test sites are attributable to DSM quality differences. In fact, noisy surface definition in DSM leads to extracting wrong faces and then leads to extrusion failure. Fig. 15 represents the shaded view of the three DSM and illustrates how the Beauport DSM and the Montreal DSM are noisier than Charlesbourg DSM. Several factors have an impact on DSM quality ( image resolution, b/h ratio..) but we think the most deterministic factor in our case is likely the type of camera used (film vs. digital) that, as



described in Paparoditis et al. (2006), changes drastically the signal to noise ratio and then the correlation success .

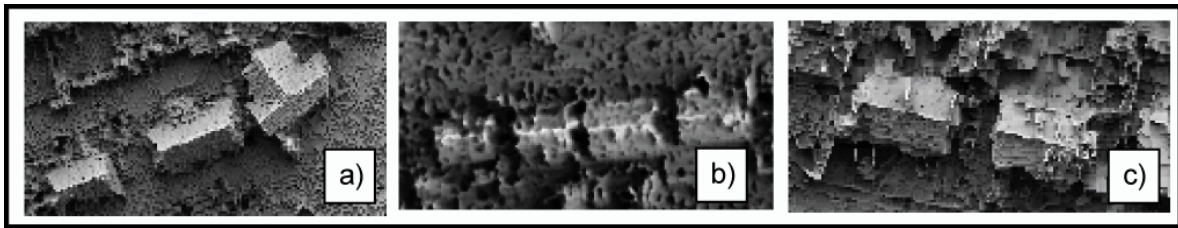


Figure 15: Shaded sample of the DSM of the test sites. a) Charlesbourg b) Beauport and c) Montreal.

The semi-automated approach implemented with MRAP decreases up to 5 times the human intervention required when performing a manual MRAP implantation. The proposed algorithm could be easily combined with other strategy used to determine accurate parameters like those proposed in Tseng and Wang (2003) or in Rottensteiner (2001).

## 5. Outlook on buildings footprint extraction

### 5.1. Goal and strategy

This section presents some preliminary results regarding the extraction of complex detailed geometries based on the strategy described in section 2.3. We used the Amiens city dataset provided by IGN and the workgroup 8 of the ISPRS commission III (<http://isprs.ign.fr/>) to facilitate the comparison of our results with other approaches.

The algorithm we developed consists in extracting the building footprints while expressing them as an unconstrained combination of rectangles (rectangles are not necessary orthogonal to each other). The purpose of such an approach is (1) to support MR acquisition when MRAPs are not orthogonal, and (2) to extract the fine geometries and link them with a MRAP when MRAPs are not detailed enough to extract the finest level geometries. In fact, preliminary footprint extraction could be combined with other algorithms requiring geometric footprint description. It could, for example, be combined either with the strategies proposed in Haala and Brenner (1999) or in Suveg and Vosselman (2004), which provide a CSG description of the building, or with the strategy proposed in Jibrini et al. (2000), which is more generic from the roof structures standpoint.

## 5.2. Building footprints algorithm

The proposed algorithm uses aerial imagery and DSM and consists of two successive steps: the footprint expression as a graph of rectangles and the simplification of this graph. This algorithm assumes that the roof structure consists mainly of 3D edges aligned in accordance with the rectangle principal direction.

The initial graph extraction is similar to the orthogonal MRAP extraction. However, we do not consider that rectangles must be orthogonal to each other anymore. Indeed, a ROI is extracted from nDSM and lines corresponding to the ROI skeleton are used to create rectangle axes. The directions are computed independently for each axis. Only the edges inside the ROI and close to the axis point are used for the statistical analysis whereas, in the orthogonal MRAPs configuration, all the edges in the ROI were used.

The final building footprint is then inferred by simplifying the graph to decrease the number of rectangles while preserving satisfying geometry fidelity. We developed an algorithm to perform this simplification. The basic idea is to delete the rectangles that do not contribute enough to the footprint description. We used the covered area as a contributing criterion. The algorithm first selects the rectangle providing the best contribution and deletes all the rectangles that do not contribute enough. The second best rectangle is then searched following the same principle and irrelevant rectangles are deleted according to the two first selected rectangles. This procedure is iterated while the number of remaining rectangles keeps on decreasing. This algorithm is summarized in the UML activity diagram presented in Fig. 16. Fig. 17 illustrates the results obtained for the two main steps of the algorithm. The images consist of a group of connected buildings.

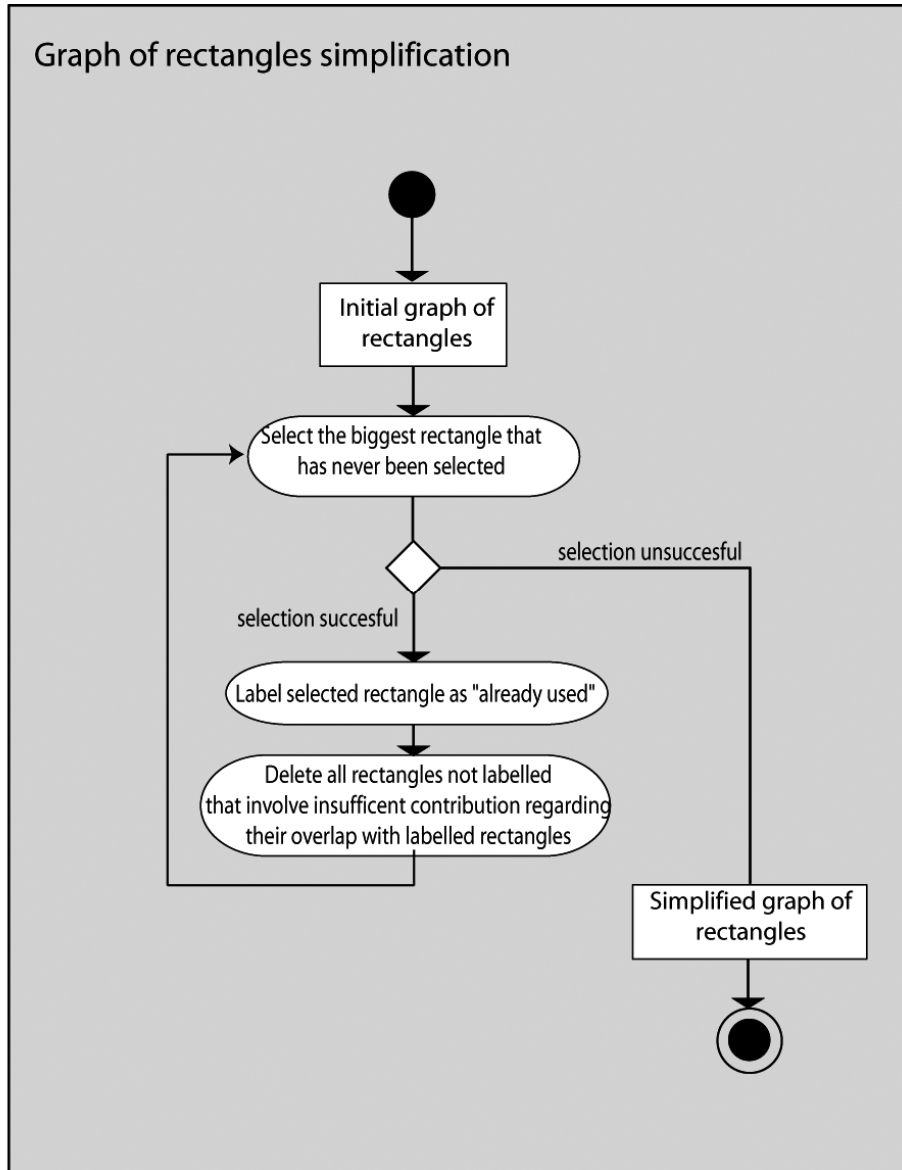


Figure 16: Algorithm to simplify a graph of rectangles.

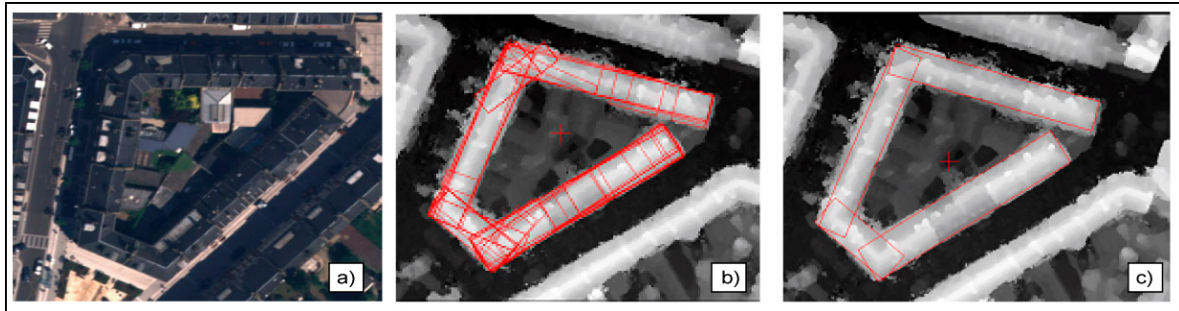


Figure 17: Building footprint extraction process example.

Fig. 18 corresponds to the results obtained for two other groups of buildings. The processing time per building group was about twenty seconds. We can visually notice that results are really close to a manual acquisition based on DSM even if some rectangle connections are not perfect. Lafarge et al. (2006) observed similar problems on the same test site when they used parametric models to automatically extract buildings geometries with a marked point process. The authors also proposed an algorithm to correct these artifacts.

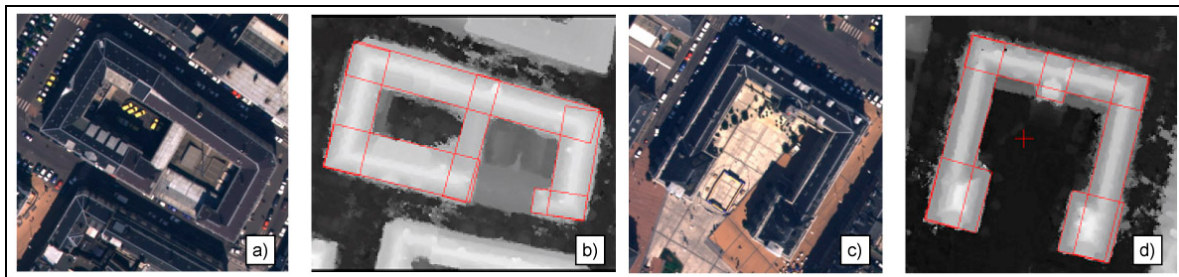


Figure 18: Results of the footprint extraction process.

## 6. Conclusion

The multi-representation acquisition specifications have been described in this paper. The results obtained using our prototypes have been presented in order to illustrate the MR acquisition process and results. We have introduced two new algorithms. The first one can be used to extract the parametric model parameters with a simple one-click initialization. This new approach is relevant to elementary parametric model (with only one volumetric primitive) and to more complex parametric models (ex: T or L shapes) and then can be used

to support MR acquisition with MRAP. The comparison of manual MR acquisition using MRAP with the acquisition using the proposed new algorithm has shown a 5 times reduction of the human intervention in the process. The current performances are encouraging since the human intervention is lessened to a single click per building and a response time around one second per building. The short response time is particularly relevant in our semi-automatic context. The analysis of the results has allowed us to underline the limitations of our approach and to propose some recommendations. In addition, we proposed a second new algorithm aiming to extract the building footprints and to express them as an unconstrained combination of rectangles. The preliminary results are also very promising as this second algorithm also offers very quick response times.

## **7. Acknowledgment**

The authors wish to thank for its support the Industrial research chair in geospatial database for decision support financed by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), the Université Laval, Hydro-Québec, Research and Development Defense Canada, Natural Resources Canada, Ministère des Transports du Québec, KHEOPS Technologies, Intélec Géomatique, Syntell, Holonics and DVP-GS.

The authors wish to thank for its NSERC Industrial Postgraduate Scholarship the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). The authors would also like to thank DVP-GS's technological and financial support, as well as for providing high resolution images and vector data.

## **8. References:**

- Ameri, B., 2000. Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from digital Imagery, doctor thesis, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 52, Institute for Photogrammetry, University of Stuttgart.
- Badard, T.; Lemarié C., 2002. Associer des données : l'appariement. Information Géographique et Aménagement du Territoire (IGAT), Traité de Géomatique, Généralisation et représentation multiple, Chapitre 9, Hermès sciences, Lavoisier, Paris, pp. 163-183.

- Baltsavias, E., 2004. Object Extraction and Revision by Image Analysis Using Existing Geodata and Knowledge: Current Status and Steps Towards Operational Systems, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58 (3-4), 129-151.
- Bédard, Y., 2004. Combining Automatic Generalization and Multiple Representations for Highly Interactive Web-based Mapping . *GeoSpatial Word*. Miami, Florida (USA). [http://sirs.scg.ulaval.ca/YvanBedard/slideshow/publication/362/357\\_files/frame.htm](http://sirs.scg.ulaval.ca/YvanBedard/slideshow/publication/362/357_files/frame.htm) (Accessed December 2, 2007).
- Bédard, Y., Rivest, S., Proulx, M-J., 2007. Spatial on-line analytical processing (SOLAP): concepts, architectures and solutions from a geomatics engineering perspective. In: Wrembel R, Koncillia C (eds) *Data warehouses and OLAP: concepts, architectures and solutions*, IRM Press (Idea Group), pp. 298-319.
- Bernier, E., Bédard, Y., Lambert, M., 2003. Cartographie sur demande sur le Web et bases de données multidimensionnelles. De la personnalisation par couche cartographique à la personnalisation par occurrences. *Revue Internationale de Géomatique*, numéro spécial. "Les SIG sur le Web", 13 (3), 339-359.
- Bernier E., Bédard Y., Hubert F., 2005. UMapIT: An On-Demand Web Mapping Application Based on a Multiple Representation Database, 8th ICA Workshop on generalization and multiple representation. Coruna, Spain, July 8-9th, (On CD-ROM). [http://sirs.scg.ulaval.ca/Yvanbedard/article\\_nonprotege/401.pdf](http://sirs.scg.ulaval.ca/Yvanbedard/article_nonprotege/401.pdf) (Accessed December 2, 2007).
- Bernier, E., Bédard Y., 2007. Data Warehouse Strategy for On-Demand Multiscale Geo-Information, *Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications*. In: W. Mackaness, A. Ruas, and Sarjakoski, T. (Eds) *Generalisation of Geographic Information: Cartographic Modelling and Applications*, Chap. 9, pp. 177-198.
- Brenner, C., 1999. Interactive modelling tools for 3D building reconstruction. In: Fritsch, D. and Spiller, R. (Eds.). *Photogrammetric Week'99*, pp. 23-34, Wichmann Verlag.
- Brenner, C., 2003. Building Reconstruction from Laser Scanning and Images, *Proc. ITC Workshop on Data Quality in Earth Observation Techniques*, Enschede, The Netherlands. [www.ikg.uni-hannover.de/publikationen/publikationen/2003/brenner\\_itc2003.pdf](http://www.ikg.uni-hannover.de/publikationen/publikationen/2003/brenner_itc2003.pdf) (Accessed December 2, 2007).
- Canny, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8 (6), pp 679-714.
- Cardenas, A., 2004. Utilisation de Patrons Géométriques comme support à la Généralisation Automatique. Département des Sciences Géomatiques. Msc Thesis. Université Laval.

- Cecconi, A., Weibel, R., Barrault, M., 2002. Improvement of Automated Generalization for On-demand Mapping by Multiscale Databases. In: Richardson, D, and van Oosterom, P. (Eds), *Advances in Spatial Data Handling*, Berlin: Springer-Verlag, pp. 515-532.
- Fischler M. A., Bolles R. C., 1981. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Comm. of the ACM*, 24 (6), pp 381-395.
- Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y., Paparoditis, N., 2005. Knowledge-based process management to populate databases with 3D multi representation of buildings. In: *ISPRS Hannover Workshop 2005 - High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, (On CD-ROM).  
<http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/087-fredericque.pdf> (Accessed December 2, 2007).
- Frédéricque, B., Daniel, S., Bédard, Y., Paparoditis, N., 2007. Saisie semi-automatique de bâtiments 3D dans une base de données à représentations multiples – vers une approche intégrée. *Revue Internationale de Géomatique*. In press.
- Gerke, M., Heipke, C., Straub, B.-M., 2001. Building extraction from Aerial Imagery Using a Generic Scene Model and Invariant Geometric Moments.. *Proceedings of the IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, IEEE Piscataway, ISBN 0-7803-7059-7, pp.85-89.
- Gülch, E., Müller, H., Läbe, T., Ragia, L., 1998. On the performance of semi-automatic building extraction. In: *Proceedings ISPRS Symposium, Comm. III, Columbus, Ohio, USA*. IAPR, 32 (3/1).
- Gülch, E., Müller, H., Läbe, T., 1999. Integration of automatic processes onto semiautomatic building extraction. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 32 (Part 4), 188-196.
- Haala, N., Brenner, C., 1999. Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65 (7), 787–795.
- Jibrini, H., Paparoditis, N., Pierrot-Desseilligny, M., Maître, H., 2000. Automatic building reconstruction from very high resolution aerial stereopairs using cadastral ground plans, XIX ISPRS Congress, Commission III, WGIII/1, 33 (B3).  
<http://www.tsi.enst.fr/maitre/HM:ISPRS-00.ps.gz> (Accessed January 10, 2004).
- Lafarge, F., Trontin, P., Descombes, X., Zerubia, J., Pierrot-Desseilligny, M., 2006. An automatic building extraction method: Application to the 3D-city modeling, Research Report, INRIA, France, France, May 2006, no 5925,  
<http://hal.inria.fr/inria-00077117> (Accessed December 2, 2007).

- Maas, H-G., 1999. Closed solutions for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 ( Part B3), 193-199.
- Mackaness, W., Ruas, A., Sarjakoski, T., 2007. *Generalisation of geographic information: cartographic modelling and applications*. Published on behalf of the international cartographic association by Elsevier.
- Olteanu, A., Mustière S., Ruas, A., 2006. Matching imperfect spatial data. In Caetano, M., Painho, M. (Eds): *Proceedings of 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Lisbon 7-9 July, pp 694-704.
- Ortner, M., Descombes, X., Zerubia, J., 2007. Building outline extraction from Digital Elevation Models using marked point processes. *International Journal of Computer Vision*. 72 (2), 107–132.
- Paparoditis, N., Souchon, J-P., Martinoty, G., Pierrot-Deseilligny, M., 2006. High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (6), 400-412.
- Parker J.R., 1997. *Algorithms for image processing and computer vision*, Wiley Computer Publishers, New York, ISBN 0471140562.
- Pierrot-Deseilligny M., Paparoditis N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach: an application to surface reconstruction from Spot5-HRS stereo imagery, *ISPRS Ankara Workshop 2006. Topographic Mapping from Space*, 36 (1/W41).  
[www.isprs.org/commission1/ankara06/makaleler/Pierrot\\_multiresolution\\_matching.doc](http://www.isprs.org/commission1/ankara06/makaleler/Pierrot_multiresolution_matching.doc)  
 (Accessed December 2, 2007).
- Rottensteiner F., 2001. *Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS*. Phd thesis, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Rottensteiner, F., Schulze, M., 2003. Performance evaluation of a system for semi-automatic building extraction using adaptable primitives. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (3/W8), 47-52.
- Roy, S., 1999. Stereo Without Epipolar Lines : A Maximum-Flow Formulation, *International Journal of Computer Vision*, 34 (2/3), 147-162.
- Ruas, A., 2002. *Généralisation et représentation multiple, Information géographique et Aménagement du Territoire*, Paris, Hermès Sciences Publications.



- Sabo, M.,N., Cardenas, A., Bernier, E., Bédard, Y., 2005a. Introduction du concept de patrons géométriques et application aux bâtiments afin de faciliter leur généralisation cartographique à la volée. *Geomatica, the journal of the Canadian Institute of Geomatics*, 59 (3), 295-313.
- Sabo, M.,N., Bédard, Y., Bernier, E., Cardenas, A., 2005b. Methodology for developing a database of geometric patterns to better support on-the-fly map generalization. In *Proceedings of International Cartographic Conference*, 9-16 July, Coruna, Spain. <http://www.cartesia.org/geodoc/icc2005/pdf/oral/TEMA9/Session%201/MAMANE%20NOURI%20SABO.pdf> (Accessed December 2, 2007).
- Sabo, M.N., 2007. Intégration des algorithmes de généralisation et des patrons géométriques pour la création des objets auto-généralisants (SGO) afin d'améliorer la généralisation cartographique à la vole. Phd thesis. Université Laval.
- Sternberg, S.R., 1983. Biomedical image processing. *IEEE Computer*, 6 (1), 22-34.
- Suveg, I., Vosselman, G., 2004. Reconstruction of 3D Building Models from Aerial Images and Maps, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (3-4), 202-224.
- Tseng, Y.-H., Wang, S., 2003. Semi-automated Building Extraction Based on CSG Model-Image Fitting, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69 (2), 171-180.
- Vinson, S., Cohen, L.D., 2002. Multiple rectangle model for buildings segmentation and 3D scene reconstruction. *Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition*, 3, pp. 623-626.
- Vosselman, G., Veldhuis, H., 1999. Mapping by Dragging and Fitting of Wire-Frame Models, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65 (7), 769-776.
- Weibel, R., Dutton, G., 1999. Generalising spatial data and dealing with multiple representations. In: Longley, P. A., Goodchild, M.F, Maguire D. J., Rhind D. W (Eds). *Geographic Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*. Cambridge, John Wiley & Sons, pp. 125-155.
- Weidner U., 1997. Digital Surface Models for Building Extraction, in: A. Grün (Ed.): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, II, pp. 193-202.
- Zhang, S., Fu, K.S., 1984. A Thinning Algorithm for Discrete Binary Images. *Proceedings of the International Conference on Computers and Applications*. Beijing, China. pp 879-886.
- Weidner U. 1997 Digital Surface Models for Building Extraction, in: A. Grün (Ed.): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images* (II).