

G
70.5
C3A44
2006

G

**Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke**

**Détection et exploitation d'ombre de bâti sur les images de très
haute résolution spatiale (IKONOS) : Application au milieu
urbain (Sherbrooke)**

AMANI Massalabi

**Thèse présentée pour l'obtention du grade
de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en télédétection**

Mai 2006

I-2173

Composition du jury

Détection et exploitation d'ombre de bâti sur les images de très haute résolution spatiale (IKONOS) : Application au milieu urbain (Sherbrooke)

AMANI Massalabi

Cette thèse a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Dr. Goze B. Bénié, directeur de recherche (Département de géomatique appliquée, FLSH)

Dr. Dong-Chen He, codirecteur de recherche (Département de géomatique appliquée, FLSH)

Dr. Ferdinand Bonn (Département de géomatique appliquée, FLSH, Université de Sherbrooke)

Dr. Denis Morin (Département de géomatique appliquée, FLSH, Université de Sherbrooke)

Dr. Jean-Marie Beaulieu (Département d'informatique, Faculté des sciences et de génie, Université Laval)

REMERCIEMENTS

Au terme de cette thèse, je tiens à remercier de tout cœur mes directeurs de recherche les professeurs Goze B. Béné et Dong-Chen He pour leur implication scientifique dans cette recherche, leurs conseils avisés et leur soutien en tout genre.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté de lire cette thèse. Il s'agit des professeurs Denis Morin et Ferdinand Bonn du Département de géomatique appliquée de l'Université de Sherbrooke et du professeur Jean-Marie Beaulieu, professeur au Département d'informatique de l'Université Laval à Québec.

Cette thèse a été rendue possible grâce au financement du Programme canadien de la francophonie (PCBF) et des subventions du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada à travers les appuis financiers de mes directeurs de recherche. Je tiens également à remercier tous les membres de l'équipe Estritel pour les appuis techniques et scientifiques, et particulièrement à Éric Beaudry, Mathieu Voorons et Yves Voirin pour les conseils en informatique. Enfin, mes remerciements vont au corps professoral du Département de géomatique appliquée ainsi qu'aux autres collègues étudiants chercheurs du CARTEL qui ont, de près ou de loin, contribué dans la réalisation de cette thèse.

Je tiens à remercier très particulièrement ma famille (ma conjointe Haoua et mes deux filles Razina et Farida) qui ont enduré tant de sacrifices durant ces années; qu'elles trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance et de ma profonde gratitude.

Enfin mes remerciements vont aux membres de la communauté nigérienne de Sherbrooke et aux amis dont le soutien moral et social envers ma famille n'a jamais fait défaut.

Résumé

Amani Massalabi (2006) Détection et exploitation d'ombre de bâti sur les images de très haute résolution spatiale (IKONOS) : application au milieu urbain (Sherbrooke)

La présence d'ombre sur les images de télédétection est de plus en plus préoccupante, principalement sur les images de très haute résolution spatiale en milieu urbain. Même si les ombres constituent une source d'information sur les objets qui les génèrent, leur présence a un effet négatif sur la qualité visuelle des images et entraîne parfois une perte d'information sur les surfaces qui les reçoivent. Il est donc important de pouvoir bien détecter ces ombres afin de corriger leurs effets ou de les exploiter autrement, et de leur donner ainsi plus de valeur ajoutée. Cette thèse développe une nouvelle technique de détection des ombres, basée sur l'approche orientée objet et sur une intégration hiérarchique des connaissances et attributs issus des propriétés intrinsèques de l'ombre. Il s'agit des attributs spectraux, géométriques liés à la forme et à l'orientation des ombres, et contextuels liés au voisinage de l'ombre.

La méthode commence par une segmentation de l'image pour former les zones homogènes ou segments. Les zones d'ombre potentielles sont détectées par un seuillage pour faire ressortir toutes les zones sombres. La détection proprement dite commence par une analyse d'histogramme des zones potentiellement sombres avec un seuillage automatique et l'utilisation de la variance des segments. La détection est complétée en utilisant les attributs de forme (longueur, largeur et compacité) ainsi que le critère d'orientation des côtés de l'ombre selon l'azimut du soleil, pour différencier ces zones de certaines surfaces sombres. Enfin, le processus s'achève par une confirmation de l'ombre détectée à l'aide d'une analyse du voisinage de l'ombre du côté soleil avec la présence d'un objet susceptible de la générer. La méthode a été appliquée sur des images panchromatiques IKONOS de très haute résolution spatiale (1 m) de deux sites choisis à Sherbrooke. Les résultats obtenus sur le premier site (Campus Ouest de l'Université de Sherbrooke) donnent un pourcentage de détection globale d'environ 97 %, tandis que sur le second site (Centre ville de Sherbrooke), nous avons obtenu un pourcentage de 89 %.

Les principales exploitations des ombres détectées sont : la restitution de l'information sous l'ombre, la correction des effets d'ombre et la détermination de la hauteur des objets à partir de leur ombre. La restitution de l'information sous l'ombre et la correction des effets se basent d'abord sur l'identification de la surface susceptible de recevoir l'ombre par analyse comparative de texture entre la zone d'ombre et toutes les surfaces voisines du côté opposé du soleil. Une fois cette surface identifiée, l'information sous l'ombre est restituée et les effets de l'ombre sont corrigés. Les résultats obtenus sur le campus sont validés par une carte d'occupation du sol. En remplaçant l'ombre par la surface restituée, la précision de la carte d'occupation du sol augmente d'environ 3 %. Cette amélioration prouve l'apport de cette technique de restitution d'information sous ombre en vue de compléter les cartes issues de ce type d'images. La détermination de la hauteur des bâtiments à partir des ombres dépend de la relation entre l'élévation et l'azimut du soleil et du capteur ainsi que de la taille de l'ombre. Plusieurs hauteurs de bâtiments du campus ont été calculées par la méthode et validées par des mesures *in-situ*. L'erreur relative fournie par cette technique est de l'ordre de 6,1 % avec une erreur moyenne de l'ordre de 0,60 m. Ces résultats sont proches de la précision obtenue par stéréoscopie nécessitant un couple d'images.

La détection d'ombre peut être améliorée en introduisant de nouveaux critères de confirmation de l'ombre détectée. Pour ce qui est de la restitution de l'information, l'utilisation de nouveaux descripteurs de texture plus adaptés aux images de très haute limite de résolution spatiale peut être d'un apport certain pour améliorer la précision de cette restitution.

Abstract

The presence of shadow on remote sensing images is increasingly alarming mainly on the images of very high spatial resolution in urban environments. Although shadow is an information source about objects that create it, its presence has a negative effect on visual quality of images. Shadow also involves a loss of information on surfaces receiving it. It is thus significant to well detect these shadows in order to correct their effect on images and to exploit them differently to generate information from them. It is a good way to give shadows an added value in image processing. So, a new technique of shadow detection was developed using an object oriented and knowledge based approach. Knowledge and features are derived from intrinsic properties of shadow. The mainly used are: spectral features (radiometric values, mean, variance, etc), geometrical features describing object form and orientation and finally contextual features describing neighbouring relationship between shadow and its surrounding areas. The method begins with a segmentation of the image to create homogeneous segments. Potential shadow areas are firstly detected by thresholding to highlight all the dark zones. The real shadow are detected using a local analysis of the dark area histogram and the form and orientation attributes analysis. Lastly, the process is completed by a confirmation of the shadow detected using an analysis of shadow-neighbouring objects on the sun side.

The method was applied to IKONOS panchromatic images (1 m resolution)) of Sherbrooke, where two sites were retained. The western campus of the University of Sherbrooke with identifiable and spaced collective buildings and the downtown of Sherbrooke with relatively high building density. Results obtained on the Campus give a percentage of total detection of 97 %, while on the downtown the percentage is 89 %.

After the shadow detection, some kind of shadow exploitation were investigated - restitution of information in the shadow, correction of the effects of shade and height determination from shadow. Information under shadow restitution and shadowing effects correction are carried out by analysing texture features between shadow and its neighbouring surfaces on the opposite side of the sun. Once the surface receiving the

shadow was identified, information under that shadow was quickly restored. Shadow effects are easily corrected by using a local radiometric value transformation. Results from surface restitution on the campus are validated by a land cover map. These results improve the land cover mapping precision by 3 % and indicate that this technique can be used to increase the precision of land use/land cover maps derived from that kind of images. The determination of building height from shadow is based on the relationship between sun, sensor and object position and the size of the shadow. The height of several buildings on the campus were calculated from their shadow and validated by ground-truth measurements. The relative and average error yielded by this technique are respectively 6.1% and 0.60 meter. These results are close to the precision gained by stereoscopy requiring a couple of images.

Although these results, shadow detection can be improved by introducing new criteria for confirming the detected shadow area. Also the restitution of information in the shadow can be improved by using new texture features more adapted to the very high spatial resolution images.

TABLE DES MATIÈRES

MEMBRES DU JURY	i
REMERCIEMENTS	ii
RÉSUMÉ	iii
ABSTRACT	v
TABLES DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES	xiii
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
1. INTRODUCTION	
1.1. Introduction	1
1.2. Problématique	1
1.3. Hypothèses et cadre de recherche	3
1.4. Objectifs	4
1.5. Pertinence du projet	5
1.6. Organisation de la thèse	6
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE	
2.1. Définition et caractéristiques de l'ombre sur les images	7
2.1.1. Définition et causes d'ombres sur les images	7
2.1.2. Caractéristiques géométriques de l'ombre	9
2.1.2.1. L'élévation du soleil	9
2.1.2.2. L'Azimut du soleil	10
2.1.2.3. La hauteur de l'objet	10
2.1.2.4. La position du capteur	10
2.1.3. Caractéristiques physiques de l'ombre	11
2.1.3.1. Rayonnement éclairant une surface à l'ombre	11
	viii

2.1.3.2. Éclairement reçu par une surface à l'ombre en milieu urbain	13
2.1.3.3. Ombre et longueurs d'onde	15
2.1.4. Composantes de l'ombre	16
2.1.4.1. L'ombre portée	17
2.1.4.2. L'ombre projetée au sol	17
2.1.4.3. La pénombre	17
2.1. Détection des zones d'ombres sur les images	18
2.1.1. Particularité de la détection des ombres en télédétection	18
2.1.2. Classification des méthodes de détection d'ombre	19
2.1.3. Les méthodes basées sur l'information spectrale	20
2.2.3.1. Méthodes basées sur le seuillage de niveau de gris	20
2.2.3.2. Méthodes basées sur les modèles physiques de l'ombre	21
2.2.3.3. Méthodes basées sur la colorimétrie	22
2.1.4. Les méthodes prenant en compte l'information spatiale	23
2.2.4.1 Principe des méthodes utilisant l'information spatiale	23
2.2.4.2. Prise en compte de l'information spatiale	24
2.2.4.3. Quelques méthodes utilisant l'information spatiale	25
2.2.5. Les méthodes prenant en compte de l'information temporelle	27
2.3. Exploitation des zones d'ombres	27
2.3.4. Confirmation de la présence d'objets en hauteur	28
2.3.5. Détermination de la hauteur des objets à partir de leur ombre	29
2.3.6. Rehaussement des effets d'ombre sur les images	30
2.3.7. Autres exploitations	31
2.4. Conclusion partielle	33

3. NOUVELLE APPROCHE DE DÉTECTION DES OMBRES DE BÂTI

3.1. Aperçu de la méthodologie globale	34
3.2. L'approche orientée objet en télédétection	36
3.2.1 Définition de l'approche objet	36
3.2.2. Pourquoi une approche objet en télédétection	37

3.2.3. Mise en œuvre de l'approche objet en télédétection	37
3.2.3.1. La segmentation	37
3.2.3.2. La définition et le calcul d'attributs	38
3.2.3.3. L'analyse des attributs	38
3.2.3.4. L'étiquetage de l'information	38
3.2.4. Forces et faiblesses de l'approche orientée objet	39
3.3. L'approche objet et la détection des ombres	39
3.3.1. Connaissances et attributs des zones d'ombre	40
3.3.1.1. Connaissances et attributs spectraux	41
3.3.1.2. Connaissances et attributs de forme et d'orientation	42
3.3.1.3. Connaissances et attributs de texture	43
3.3.1.4. Connaissance et attributs contextuels	43
3.3.2. Connaissances et attributs retenus dans la nouvelle approche	44
3.4. Méthodologie de la nouvelle approche	45
3.4.1. Segmentation et calcul d'attributs	47
3.4.2. Première détection par analyse du contraste et du seuillage	48
3.4.3. Analyse locale et prise en compte des critères de forme	49
3.4.3.1. Analyse locale d'histogramme sur les zones d'ombre	49
3.4.3.2. Apport des attributs de forme	50
3.4.3.3. Apport de l'orientation suivant l'azimut du soleil	53
3.4.4. Confirmation de la présence d'ombre	54
3.5. Conclusion partielle	56

4. SITES ET DONNÉES D'ÉTUDE

4.1. Présentation de la ville de Sherbrooke	57
4.2. Choix des sites d'études	57
4.3. Données d'études	58
4.3.1. Les données images	58
4.3.2. Les données auxiliaires	60
4.4. Pré traitements des données	61

4.4.1. Types de prétraitement	61
4.4.2. Caractéristiques de certaines surfaces à l'ombre	62
5. DÉTECTION DES OMBRES SUR LES IMAGES IKONOS	
5.1. Segmentation de l'image	65
5.1.1. La segmentation	65
5.1.2. Le calcul des attributs des segments	66
5.2. Détection des zones d'ombre potentielle	68
5.3. Analyse locale d'histogramme et de forme	70
5.3.1. Analyse locale d'histogramme	71
5.3.2. Critères de forme	72
5.4. Confirmation de l'ombre	75
5.4.1. Recherche des segments voisins côté soleil	75
5.4.2. Confirmation des segments d'ombre	76
5.5. Résultats globaux de la détection sur l'image du campus	77
5.6. Évaluation de résultats sur le campus	77
5.7 Détection des zones d'ombres sur l'image du centre ville de Sherbrooke	79
5.7.1. Résultats d'application	80
5.7.2. Évaluation des résultats de détection	81
5.8. Analyse et interprétation des résultats	83
5.8.1. Analyse des résultats globaux sur le campus	83
5.8.2. Analyse des résultats partiels étape par étape	84
5.8.3. Analyse des résultats sur le Centre-ville	85
5.8.4. Forces et faiblesses de la méthode de détection	86
5.9. Conclusion partielle	87
6. EXPLOITATIONS DES OMBRES	
6.1. Restitution de l'information sous ombre	88
6.1.1. Approche méthodologique	88

6.1.1.1. Données et attributs en entrée	89
6.1.1.2. Analyse de texture	92
6.1.1.3. Identification et étiquetage de la surface sous ombre	92
6.1.2. Application aux ombres détectées sur le campus	92
6.1.2.1. Données en entrée	93
6.1.2.2. Recherche de segment voisin de même texture	94
6.1.2.3. Étiquetage des zones d'ombre	94
6.1.2.4. Validation des résultats de la restitution	95
6.1.3. Analyse et interprétation des résultats de la restitution	99
6.2. Correction des effets d'ombre	100
6.2.1. Méthodes de correction	100
6.2.2. Paramètres de correction des images	101
6.2.3. Méthode de correction retenue	102
6.2.4. Application aux images du campus et du centre ville	102
6.2.4.1. Résultats d'application	103
6.2.4.2. Évaluation des résultats par comparaison d'histogramme	104
6.2.5. Analyse et interprétation des résultats de la correction	105
6.3. Détermination des hauteurs de bâtiments à partir de leurs ombres	106
6.3.1. Principe et méthode	106
6.3.1.1. Principe de base	106
6.3.1.2. Prise en compte des facteurs influents	107
6.3.2. Détermination des hauteurs de bâtiments sur le campus	110
6.3.2.1. Mesure de longueur des ombres	110
6.3.2.2. Calculs des hauteurs	110
6.3.2.3. Validation des hauteurs calculées	112
6.3.3. Analyse et interprétation des résultats	113
6.4. Conclusion partielle	114
7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	
7.1. Conclusion générale	116

7.2. Contributions	117
7.3. Limites et améliorations	118
7.4. Perspectives de développement	120
RÉFÉRENCES	121

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Ombre d'un objet vue en perspective et en plan	8
Figure 2.2 : Variation de la longueur de l'ombre selon l'élévation du soleil	9
Figure 2.3 : Variation de la longueur de l'ombre selon la hauteur de l'objet	10
Figure 2.4 : Portion de l'ombre observée selon la position du capteur	11
Figure 2.5 : Éclairement reçu par une surface à l'ombre en milieu urbain	14
Figure 2.6 : Éclairement diffus dans la partie visible du ciel (PVC)	15
Figure 2.7 : Les composantes de l'ombre (ombre portée, projetée et pénombre)	16
Figure 3.1 : Organigramme résumant la méthodologie globale mise en œuvre	35
Figure 3.2 : Ensemble d'attributs d'un segment ombre	41
Figure 3.3 : Attributs et connaissances pris en compte dans la méthode proposée	45
Figure 3.4. : Organigramme méthodologique pour la détection des ombres	46
Figure 3.5 : Histogramme des zones d'ombre potentielle sur le campus	50
Figure 3.6 : Taille de l'ombre et de la pénombre en fonction de la hauteur de l'objet, de la distance terre-soleil et du diamètre du soleil	52
Figure 3.7 : Analyse locale d'histogramme et critères de forme ombres	53
Figure 3.8 : Orientation des côtés de l'ombre selon l'azimut du soleil	54
Figure 3.9 : Segments côté ombre susceptibles de générer l'ombre	55
Figure 4.1 : Image panchromatique du Campus de l'Université de Sherbrooke	59
Figure 4.2 : Image panchromatique du Centre ville de Sherbrooke	59
Figure 4.3 : Comparaison des valeurs à l'ombre et au soleil de certaines surfaces	63
Figure 4.4 : Histogramme des zones d'ombre potentielle ombre sur le campus	64
Figure 4.5 : Histogramme de zones d'ombre potentielle ombre au centre ville	64
Figure 5.1 : Choix du seuil pour la détection des zones d'ombre potentielle ombre	69
Figure 5.2 : Extrait d'une image du campus et des segments d'ombre potentielle	70
Figure 5.3 : Histogramme local sur les zones d'ombre potentielle	71
Figure 5.4 : Résultats de quelques étapes de détection	74
Figure 5.5 : Segments voisins de l'ombre côté soleil	76
Figure 5.6 : Zones d'ombre détectées sur le campus superposées à l'image Ikonos	77
Figure 5.7 : Ombres interprétées visuellement et utilisées comme vérité-terrain	78

Figure 5.8 : Résultat de détection d'ombre sur l'image du Centre-ville	81
Figure 5.9 : Zones d'ombre interprétées sur le site du centre ville de Sherbrooke	82
Figure 6.1 : Méthodologie pour la restitution de l'information sous ombre	89
Figure 6.2 : Les segments voisins de l'ombre	91
Figure 6.3 : Données utilisées pour la restitution de l'information sous l'ombre	93
Figure 6.4 : Segments voisins de même texture que l'ombre	94
Figure 6.5 : Restitution de l'information sous l'ombre sur le campus	95
Figure 6.6 : Évaluation de la restitution de l'information sous l'ombre	96
Figure 6.7 : Résultats de rehaussement des effets d'ombre sur les images	103
Figure 6.8 : Histogramme de l'image du campus après correction	104
Figure 6.9 : Relation entre hauteur H de l'objet et taille L de l'ombre	107
Figure 6.10 : Facteurs influents sur la détermination des hauteurs	108
Figure 6.11 : Amplitudes des erreurs entre les hauteurs calculées et mesurées	113
Figure A1.1 : Exemple d'écran d'entrée de données pour la détection des ombres	130
Figure A2.1 : Erreur commise sur l'estimation de l'azimut du côté AB du polygone ABC	134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1 : Hauteurs de quelques blocs de bâtiments sur le Campus Ouest	60
Tableau 4.2 : Valeurs de certaines surfaces à l'ombre et au soleil relevés sur l'image du campus	63
Tableau 5.1 : Structuration des attributs de segment (moyenne, écart type, surface, longueur, largeur, texture, etc.)	68
Tableau 5.2 : Taux de bonne détection d'ombre en pourcentage	79
Tableau 5.3 : Taux en pourcentage des pixels d'ombre détectés par la méthode	83
Tableau 6.1 : Proportion de pixels des autres surfaces sous ombre	97
Tableau 6.2 : Proportion des pixels après restitution de l'information sous ombre	98
Tableau 6.3 : Correspondance des classes d'occupation de sol	98
Tableau 6.4 : Extrait des hauteurs mesurées et calculées sur le campus	111

Tableau 6.5 : Répartition des erreurs sur les hauteurs

114

LISTE DES ANNEXES

Annexe1 : Fonctionnement étape par étape des outils développés

129

**Annexe2 : Effets de la vectorisation sur le seuil de tolérance angulaire ε
des azimuts calculés**

134

1. INTRODUCTION

1.1. Introduction

Depuis le lancement des premiers satellites d'observation en 1972, la télédétection spatiale a beaucoup évolué. Ces progrès se manifestent de nos jours par le développement de nouvelles techniques d'analyse d'images et surtout de nouveaux capteurs de résolution de plus en plus fine tant au niveau spectral que spatial. S'agissant de la limite de résolution spatiale, le progrès est phénoménal passant de 80 m avec Landsat MSS à un mètre et même moins avec les capteurs tels que IKONOS et QUICKBIRD. Ces capteurs fournissent des données avec une densité de détails impressionnante très proche de la photographie aérienne à moyenne et grande échelle. Avec, le développement de nouveaux outils d'analyse, ces capteurs ouvrent une nouvelle ère à la télédétection des milieux complexes (Tanaka et Sugimura, 2001).

Mais à côté de ces détails, apparaissent des phénomènes perturbateurs. Il s'agit des effets d'ombre présents sur ce type d'images principalement en milieu urbain. Ces ombres ont des conséquences sur l'exploitation de ces images, car elles modifient l'aspect des surfaces sur lesquelles elles se projettent et masquent certains objets qui s'y trouvent. Mais une fois localisée et identifiée, l'ombre peut être exploitée pour connaître la taille de l'objet qui la génère et aussi permettre la reconstitution de l'information masquée. L'objet de notre étude est de bien localiser et détecter les zones d'ombre, d'exploiter ces ombres détectées pour déduire la hauteur des objets qui les génèrent et de corriger les effets d'ombre à partir de la reconstitution de l'information sous ces ombres. Les applications se font sur les images Ikonos en milieu urbain où la présence d'ombre est plus prononcée.

1.2. Problématique

Le phénomène d'ombre sur les images de télédétection optique a toujours été une préoccupation. Pour les images optiques de basse et haute résolution ce sont les ombres

des nuages qui constituent la principale préoccupation, tandis que pour les images de très haute résolution spatiale, ce sont les ombres des objets en hauteur (bâtiments, arbres, etc.) qui constituent le principal casse-tête. Si les ombres des nuages peuvent être évitées par des acquisitions d'images en temps dégagés, celles des objets au sol seront toujours présentes par beau ou mauvais temps.

Le phénomène d'ombre sur les images est dérangeant pour leur commercialisation si la présence d'ombre est assez forte. Pour bien détecter et exploiter les ombres, il faut comprendre la problématique, se fixer des objectifs précis et asseoir des hypothèses adaptées.

Malgré un choix opportun de l'heure de prise de vue visant à minimiser la présence des ombres, ces dernières sont toujours observées sur les images de très haute résolution spatiale, surtout pour les scènes urbaines. La grande richesse des détails sur ce type d'image permet de distinguer visuellement les routes, les bâtiments et même les voitures, mais les effets d'ombre dégradent considérablement la qualité visuelle de ces images. Au niveau de l'extraction de l'information, les ombres ont aussi un effet négatif sur les techniques d'analyse d'images, car elles modifient sérieusement les signatures spectrales des surfaces qu'elles recouvrent. Les objets sous ombre peuvent être confondus à d'autres objets lors de l'analyse; ce qui fausse généralement les résultats de l'analyse ou de l'interprétation (Allan, 2001).

En dépit de tous ces inconvénients, l'ombre a quand même quelques avantages qui peuvent être exploités. En effet, l'ombre peut constituer une source d'information sur la forme et la hauteur de l'objet qui la génère. Cette propriété est d'ailleurs beaucoup exploitée en interprétation des photographies aériennes pour aider à différencier certains objets en hauteur par rapport à d'autres surfaces de mêmes caractéristiques spectrales.

Le phénomène d'ombre a fait l'objet de quelques travaux en analyse d'images vidéographiques pour la reconnaissance d'objets en mouvement, la surveillance par vidéo et le suivi du trafic routier (Prati *et al.*, 2001). En télédétection, ce phénomène n'a suscité que peu d'intérêt avec quelques travaux sur l'utilisation des ombres pour la détection du

bâti (Lin *et al.* (1998), Irvin et McKeown, (1989)) ou pour la détection et la correction des ombres de nuages sur les images (Simpson *et al.*, 2000). Avec l'avènement des nouveaux capteurs à très haute résolution spatiale, le problème d'ombre a un regain d'intérêt et quelques travaux récents lui sont consacrés (Adler-Golden *et al.*, (2003), Rau *et al.*, (2000), Nakajima *et al.*, (2002), Prati *et al.*, (2003), Nadimi et Banu, (2004)). La majorité de ces études utilisent les méthodes basées sur le seuillage de niveau de gris (Gwinner *et al.*, (1997)) ou sur l'invariance à l'ombre de certains paramètres de couleur (saturation et teinte) (Funka-Lea, 1994) avec des résultats plus ou moins probants. D'autres méthodes intègrent des critères géométriques comme la connectivité et la position relative de l'ombre et de l'objet ainsi que la position du soleil pour améliorer le résultat de la détection (Jiang *et al.*, (1994). Ces méthodes ne prennent pas en compte l'orientation en fonction de l'azimut du soleil à l'heure de l'acquisition. C'est ce que nous tenterons d'intégrer dans la méthode de détection qui sera développée. En effet, cette nouvelle méthode intégrera outre l'information spectrale, le contexte de voisinage, des critères de forme (périmètre, surface, compacité, etc.) et l'orientation de certains côtés de l'ombre. Après la détection des zones d'ombre sur les images à très haute résolution spatiale, nos travaux prévoient d'exploiter ces ombres et leur voisinage pour reconstituer l'information masquée et pour estimer la hauteur des objets qui génèrent les ombres.

1.3 Hypothèses et cadre de recherche

Les hypothèses de recherche découlent des propriétés qui caractérisent le mieux des zones d'ombre sur les images panchromatiques à très haute résolution en milieu urbain. Ce sont les informations de type spectral, morphologique (la forme et orientation), contextuel et textural.

La première hypothèse qui supporte la recherche pour la localisation et l'identification des zones d'ombre est la suivante : l'intégration de l'information spectrale, des critères de forme et d'orientation, ainsi que le voisinage permet de discriminer de manière automatique les zones d'ombre sur des images à très haute résolution en milieu urbain.

Pour restituer l'information sous l'ombre, nous ferons l'hypothèse que la texture d'une surface ne varie pas selon qu'elle soit à l'ombre ou au soleil. Ainsi, l'analyse de texture entre la zone d'ombre et son voisinage immédiat permet de retrouver la surface sous ombre.

Pour ce qui de la correction des effets d'ombre sur l'image nous faisons l'hypothèse qu'une transformation locale permet de corriger les valeurs des pixels sous ombre pour avoir la valeur qu'ils y auraient sans ombre.

Enfin, la détermination de la hauteur des immeubles à partir de leur ombre est basée sur l'hypothèse qu'il existe une forte relation entre la taille de l'ombre, la hauteur de l'objet et les positions (azimut et zénith) du capteur et du soleil à l'heure de l'acquisition de l'image.

Certaines conditions et limites méritent d'être précisées pour la bonne exécution de cette étude: (1) le milieu urbain étudié est de type nord américain (banlieue et villes de taille moyenne); il est caractérisé par des blocs d'immeubles en hauteur (au moins deux niveaux) assez espacés et dont les ombres se projettent bien au sol; (2) le terrain sur lequel l'ombre se projette, a une pente relativement faible et (3) les positions spatiales du soleil et du capteur (hauteur et azimut) sont connues au moment de l'acquisition de l'image.

1.4. Objectifs

Cette étude s'inscrit dans un cadre global de recherche d'informations spécifiques sur les objets dans l'optique d'une détection intelligente des objets à partir des images de télédétection. Les outils développés pour la détection des ombres de bâti s'intégreront facilement dans un système intelligent d'analyse ou d'interprétation d'images de télédétection comme SITI (Système intelligent de traitement d'images) développé par l'Équipe spécialisée en traitement d'images de télédétection (Estritel) du Centre d'applications et de recherches en télédétection (Cartel). Quant à l'exploitation des zones d'ombre, elle permettra de générer des modèles numériques de terrain à partir de la

hauteur des bâtiments ou de la mise à jour des cartes d'occupation du sol en milieu urbain dérivées des images de très haute résolution spatiale.

Ainsi, les objectifs spécifiques de cette étude se présentent comme suit :

Objectif spécifique 1 : développer un outil de détection d'ombre de bâti sur les images à très haute résolution spatiale en milieu urbain.

Objectif spécifique 2 : exploiter les zones d'ombre détectées pour :

- restituer l'information sous l'ombre;
- compenser les effets d'ombre sur la qualité visuelle des images;

Objectif spécifique 3 : déterminer la hauteur des objets à partir de la longueur des ombres détectées suivant l'orientation azimutale.

1.5. Pertinence du projet

Plusieurs raisons pertinentes justifient notre intérêt pour la détection des zones d'ombre dont les plus importantes sont :

- Les zones d'ombre sont d'une part une source de problèmes sur les images à haute résolution (masquage ou perte d'information, perturbation des méthodes d'analyse d'image, etc.) et d'autre part, une source d'information pour l'interprétation de ces images.
- Les zones d'ombre sont toujours présentes sur les images à haute résolution quelle que soit la configuration géométrique d'acquisition (heure et position du capteur et du soleil).
- Les images à haute résolution seront davantage disponibles sur le marché depuis le lancement de nouveaux capteurs (QUICKBIRD, IKONOS, etc. et leur insertion à Google Earth) à résolution de plus en plus fine, d'où l'intérêt de pouvoir détecter aisément les zones d'ombre.
- L'exploitation de l'ombre pour déterminer la hauteur des bâtiments peut être une solution relativement peu coûteuse pour générer un modèle urbain (3D) de certaines petites villes. Une application pour les villes du tiers monde dépourvues

de tout document cartographique de référence et qui n'ont pas les moyens de s'offrir des outils plus performants comme le lidar, peut être envisagée.

La principale contribution est le développement d'un outil spécifiquement dédié à la détection de zones d'ombre et dont l'originalité serait la prise en compte de l'orientation de l'ombre en fonction de l'azimut du soleil et aussi de l'indice de texture pour confirmer la présence de l'ombre et déduire l'information sous cette ombre. La détermination de la hauteur des objets à partir d'une seule image serait également une contribution qui permettrait la génération des modèles urbains en 3D à faibles coûts pour les petites villes.

1.6. Organisation de la thèse

La présente thèse est organisée comme suit : une première partie consacrée à la revue de la littérature sur le phénomène d'ombre, la détection et l'exploitation des zones d'ombres détectées sur les images. Cette revue de littérature résume l'état des connaissances actuelles en matière de techniques de détection d'ombre sur les images et aussi les types d'exploitation possibles de ces ombres comme source d'information.

La seconde partie est consacrée à la détection des zones d'ombre comprenant la méthode développée pour extraire les ombres des bâtiments, ainsi que les résultats obtenus sur les sites retenus pour tester et valider la méthode. Cette partie comprend les chapitres suivants : nouvelle approche de détection d'ombre de bâti, les sites et données d'études, les résultats de détection sur les sites retenus.

La troisième partie traite de l'exploitation des zones d'ombre détectées et trois types d'exploitation sont présentés : la restitution de l'information sous l'ombre, la correction des effets d'ombre et la détermination de la hauteur des objets à partir de leur ombre. Les principes de base, les résultats d'application et leur analyse sont présentés dans un même chapitre. Enfin la thèse se termine par un chapitre consacré au bilan de la recherche et par une conclusion générale.

2. REVUE DE LITTÉRATURE

Le phénomène d'ombre a toujours existé sur les images. En télédétection, ce problème est devenu préoccupant avec l'avènement des images à très haute résolution spatiale et plus particulièrement en milieu urbain ou en milieu montagnard. Plusieurs travaux ont été publiés sur l'ombre dont les plus importants sont axés sur les méthodes de détection des ombres tandis que d'autres traitent de l'exploitation de ces ombres dans l'analyse et l'interprétation des images. Avant de passer en revue ces travaux, il est important de comprendre d'abord comment se forment les ombres sur les images et quelles sont leurs caractéristiques les plus utilisées dans leur détection.

2.1. Définition et caractéristiques de l'ombre sur les images

En télédétection, les ombres apparaissent sombres sur les images. Pourquoi ont-elles cette apparence? Quelles sont leurs principales propriétés et caractéristiques qui permettent de bien les discriminer par rapport aux autres objets présents dans l'image?

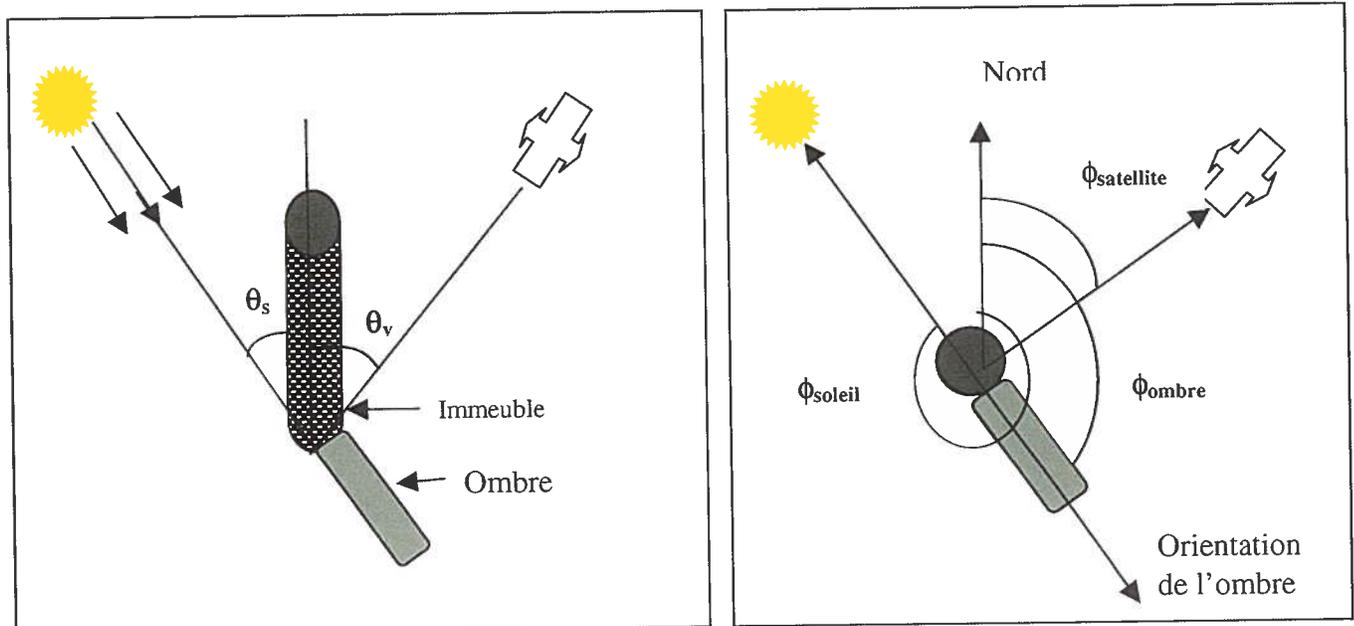
2.1.1. Définition d'ombres sur les images

Une ombre est créée quand il y a obstruction de la source de la lumière. Ainsi, la silhouette de l'objet qui crée l'obstruction est projetée sur le côté opposé à la lumière. La forme et la taille de l'ombre sont fonction de l'objet, de sa position par rapport à la source de la lumière et également à la forme de cette source.

À l'extérieur, une ombre se crée dès qu'il y a obstruction de l'éclairage solaire. C'est le cas des nuages qui projettent leur ombre sur terre ou d'autres objets en hauteur comme les immeubles ou les arbres qui cachent une partie de l'éclairage solaire et projettent leur ombre au sol. L'ombre d'un objet varie essentiellement en fonction des paramètres suivants : la forme et la taille de l'objet, l'élévation du soleil et la position de l'observateur. Ces variations seront plus détaillées au cours de l'analyse des caractéristiques géométriques de l'ombre dans les paragraphes suivants. L'ombre varie

également en fonction de la latitude du lieu; ainsi pour la même position du soleil, la taille de l'ombre augmente avec la latitude.

En télédétection, les ombres s'observent sur les images acquises dans le visible et le proche infrarouge, principalement sur les images de haute et très haute résolution spatiale. Il s'agit des ombres de nuages, des immeubles, des arbres et autres objets en hauteur comme les montagnes, les pylônes, etc. Les ombres se remarquent par leur aspect sombre, car les zones ombragées sont mal éclairées à cause de l'interception de l'éclairage solaire direct par les objets qui les génèrent. En effet, l'éclairage solaire a une composante directe et une composante diffuse. Selon le rapport entre les deux, les ombres sont plus ou moins accentuées. Cela est dû à l'atmosphère qui diffuse la lumière. Le rayonnement diffus permet de « voir » dans l'ombre. Le phénomène d'ombre est plus marqué en milieu urbain où les grands immeubles en hauteur, créent de l'ombre sur les autres surfaces au sol. Il est également mieux observé sur les images à très haute résolution spatiale à cause de la richesse de détails observables.



(a) Vue en perspective

(b) Vue en plan

θ_s : élévation du soleil, θ_v : élévation du capteur, $\phi_{\text{satellite}}$: azimut du capteur, ϕ_{soleil} : azimut du soleil, ϕ_{ombre} : azimut de l'ombre,

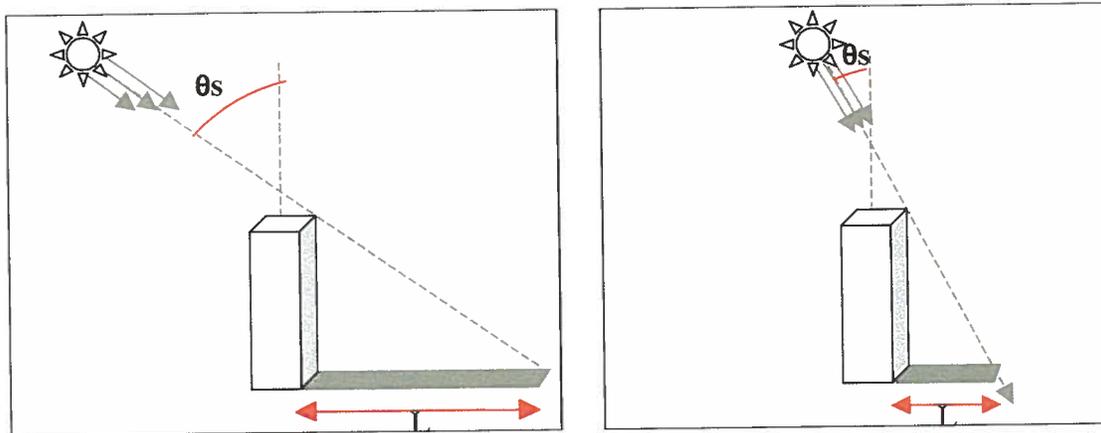
Figure 2.1 : Ombre d'un objet : (a) vue en perspective et (b) vue en plan.

2.1.2 Caractéristiques géométriques de l'ombre

Les caractéristiques géométriques de l'ombre sont des propriétés intrinsèques liées à tous les aspects géométriques comme la forme, la taille et la position. L'élévation du soleil et la hauteur de l'objet déterminent la taille de l'ombre projetée au sol, tandis que la position du capteur par rapport au soleil détermine la proportion d'ombre observée sur l'image.

2.1.2.1. L'élévation du soleil

Elle détermine la longueur de l'ombre projetée au sol. La taille de l'ombre varie en fonction de l'élévation du soleil qui elle-même varie au cours de la journée. Ainsi, les tailles maximales de l'ombre d'un objet sont observées quand l'élévation du soleil est à son minimum, c'est-à-dire peu après le levé ou le coucher du soleil. La taille de l'ombre est à son minimum quand le soleil est au zénith. La figure 2.2 illustre la variation de la taille de l'ombre en fonction de l'élévation θ_s du soleil.



θ_s : Élévation du soleil exprimée comme angle entre le zénith et le soleil.

L : Longueur de l'ombre projetée.

Figure 2.2 : Variation de la longueur de l'ombre selon l'élévation du soleil.

2.1.2.2. L'Azimut du soleil

L'orientation de l'ombre sur l'image est directement fonction de l'azimut du soleil. En effet, l'ombre est toujours projetée du côté opposé du soleil et ses limites sont exactement orientées dans la même direction que l'azimut du soleil. Par exemple, si le soleil se trouve à l'Est d'un objet, son ombre est projetée automatiquement à l'ouest de l'objet et son orientation générale sera dans les sens Est-ouest dans le prolongement de l'azimut du soleil.

2.1.2.3. La hauteur de l'objet

La hauteur de l'objet influence la taille de l'ombre projetée au sol. En effet, dans les mêmes conditions de configuration soleil-objet-observateur, plus un objet est haut, plus la longueur de son ombre projetée est grande; plus il est bas, plus son ombre est petite. Cette variation de la taille de l'ombre en fonction de la hauteur H de l'objet qui la génère est présentée à la figure 2.3 ci-dessous.

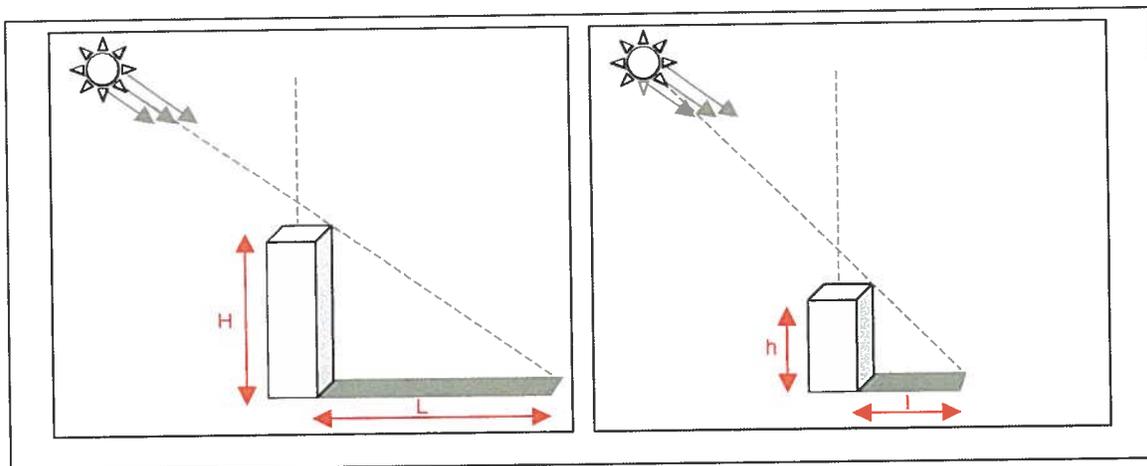
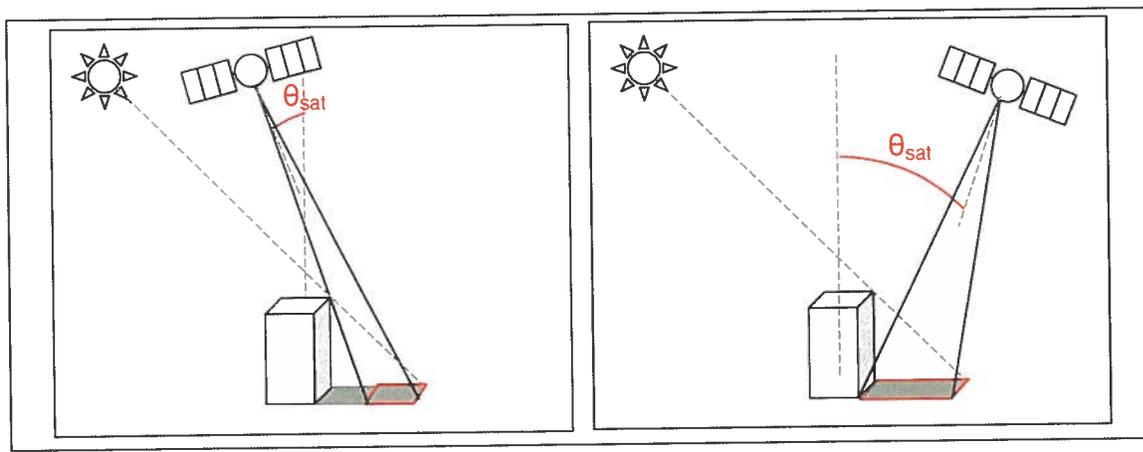


Figure 2.3 : Variation de la longueur de l'ombre en fonction de la hauteur de l'objet.

2.1.2.4. La position du capteur

La position du capteur au moment de l'acquisition de l'image influence beaucoup la portion de l'ombre qui est observée et présente sur l'image, car toute l'ombre ou

seulement une portion est observée en fonction de la position du capteur. Ainsi, si le capteur est du même côté que le soleil, l'ombre observée est en partie cachée par l'objet qui la génère, tandis que si le capteur et le soleil sont opposés, l'ombre projetée au sol est entièrement observée du capteur et on peut observer toutes les composantes de cette ombre. La figure 2.4 présente deux positions du capteur et les parties d'ombre observées dans chaque cas de configuration. À l'échelle d'une scène, la variation de l'ombre en fonction de la latitude est négligeable et n'est donc pas prise en compte.



θ_{sat} : élévation du capteur exprimée par l'angle entre le capteur et le zénith.

Figure 2.4. Portion de l'ombre observée selon la position du capteur.

2.1.3. Caractéristiques physiques de l'ombre

Si l'ombre est créée par l'obstruction du rayonnement solaire par un obstacle, quel est alors le type d'éclairement qui parvient à une surface sous l'ombre et qu'est-ce qui parvient au capteur provenant de l'ombre?

2.1.3.1. Rayonnement éclairant une surface à l'ombre

En télédétection passive, la principale source de l'éclairement est le soleil. En contact avec l'atmosphère une partie de cet éclairement est directement réfléchi et l'autre partie traverse l'atmosphère pour arriver à la surface des objets au sol, c'est le rayonnement direct E_{direct} . Un autre éclairement parvient à une surface au sol, il s'agit du rayonnement

diffus E_{diffus} qui résulte du contact de l'éclairement solaire avec certaines composantes atmosphériques qui le réfléchissent dans toutes les directions. Ces deux éclairagements E_{direct} et E_{diffus} sont respectivement fonction du facteur de transmission directe descendant et du facteur de transmission diffuse descendant de l'atmosphère.

Dans certaines conditions d'hétérogénéité, l'environnement immédiat d'un objet contribue également au signal qui éclaire un objet. Cette contribution est plus sensible quand l'environnement est fort réfléchissant. Ainsi, l'éclairement global qui parvient à une surface au sol est :

$$E_{\text{global}} = E_{\text{direct}} + E_{\text{diffus}} + E_{\text{env}} \quad (1)$$

Avec E_{env} : contribution de l'environnement immédiat de la surface

En présence d'obstacles, l'éclairement direct est intercepté et ne parvient pas à une surface à l'ombre; c'est donc les composantes E_{diffus} et E_{env} qui parviennent à une surface à l'ombre. Notons, E_{ombre} , l'éclairement total reçu par une surface à l'ombre; il serait donc égal à :

$$E_{\text{ombre}} = E_{\text{diffus}} + E_{\text{env}} \quad (2)$$

Dans certaines circonstances où l'environnement n'intervient pas beaucoup (exemple : pour des mesures au sol), l'éclairement sous l'ombre est simplement assimilé au rayonnement diffus. Et il est très souvent mesuré pour déduire l'éclairement direct qui arrive sur une cible. Meister *et al.* (1997) ont mesuré l'éclairement à l'ombre pour justement déduire l'éclairement direct qui parvient à une surface dans le cadre d'une étude sur la réflexion bidirectionnelle de certaines surfaces en milieu urbain.

Cet éclairement est aussi fonction de la topographie de la surface, car en zone de relief, l'éclairement diffus est en partie fonction de la partie visible du ciel à partir de cette surface (Haboudane, 1999). Autrement dit, l'éclairement diffus reçu par une surface sera

fonction de la géométrie de cette surface (pente, taille et orientation) et aussi de la configuration géométrique de son environnement immédiat, ce qui est très important en milieu urbain.

2.1.3.2. Éclairement reçu par une surface à l'ombre en milieu urbain

Le milieu urbain est un milieu très complexe et fort hétérogène. Il se caractérise par différents types d'occupation de sols (bâti, routes, autoroutes, végétation, eau de surface, etc.) dont la densité est fonction des types d'activités et du type d'aménagement. Cette grande hétérogénéité, influence le signal réfléchi par une surface, car ce dernier est affecté par l'environnement immédiat de la surface.

Certaines structures urbaines, caractérisées par des rues étroites et des immeubles hauts influencent beaucoup l'éclairement reçu par les surfaces au sol au pied des immeubles et surtout pour les surfaces à l'ombre, qui ne reçoivent que l'éclairement diffus. En effet, les immeubles en milieu urbain de part leur constitution affectent l'éclairement reçu par les surfaces au sol en réfléchissant une partie de l'éclairement direct. Soit $E_{\text{réfléchi}}$, cet éclairement réfléchi qui s'ajoute à l'éclairement total qui parvient à une surface au sol qu'elle soit à l'ombre ou au soleil; l'éclairement reçu par une surface à l'ombre en milieu urbain est :

$$E_{\text{ombre}} = E_{\text{diffus}} + E_{\text{réfléchi}} + E_{\text{env}} \quad (3)$$

La figure 2.5 illustre les différentes composantes de l'éclairement qui parvient à une surface à l'ombre en milieu urbain.

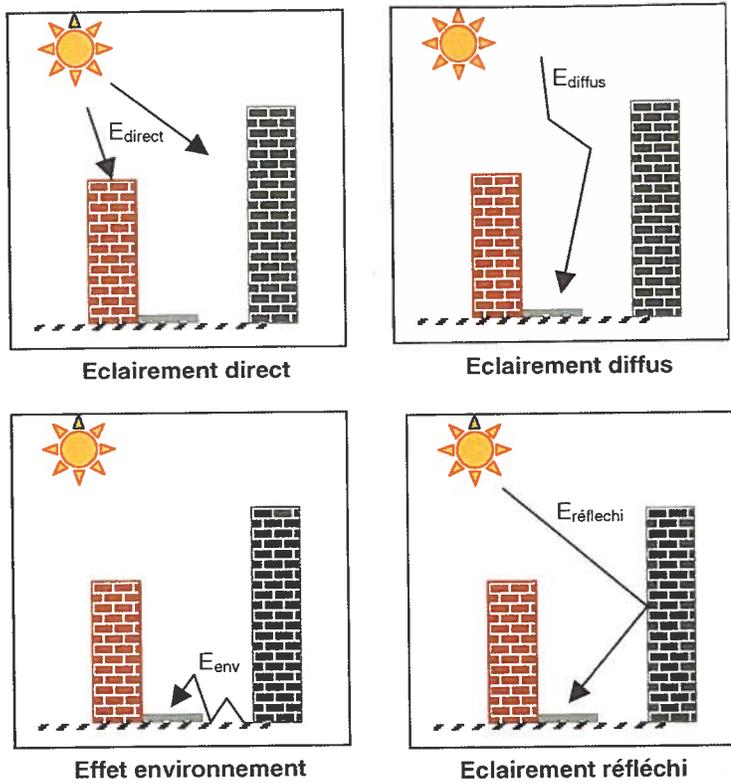


Figure 2.5 : Éclairage reçu par une surface à l'ombre en milieu urbain (D'après Sébari, 2004).

Une autre particularité du milieu urbain est la présence de grands immeubles qui réduisent fortement le champ de visibilité, c'est-à-dire la partie visible du ciel, et qui influencent ainsi le taux d'éclairage diffus parvenant aux surfaces au sol. Cette interception d'une partie de l'éclairage diffus rend les centres urbains densément bâtis avec de grands immeubles, un peu plus sombres que les zones dégagées. La partie visible du ciel en un point d'une surface au sol notée **PVC** est calculée selon l'angle α comme indiqué à la figure 2.6. Cette partie visible du ciel PVC permet de calculer la proportion de l'éclairage diffus qui parvient à une surface à l'ombre.

$$E_{\text{ombre}} = \text{PVC}_{\text{ombre}} \cdot E_{\text{diffus}} + E_{\text{réfléchi}} + E_{\text{env}} \quad (4)$$

$$\text{Avec } \text{PVC}_{\text{ombre}} = \text{PVC} * \alpha \text{ (rd)} / \pi$$

$\text{PVC}_{\text{ombre}}$ est la partie visible du ciel à partir de l'ombre au sol.

α : angle en radian (rd) intercepté au sol entre deux immeubles

Plus les immeubles qui entourent une surface sont hauts et rapprochés, moins cette surface reçoit de l'éclairement diffus. Une surface sous l'ombre de gratte-ciel peut paraître plus sombre que la même surface sous ombre en terrain dégagé, car les proportions d'éclairement reçu par les deux surfaces ne sont pas égales bien qu'étant à l'ombre.

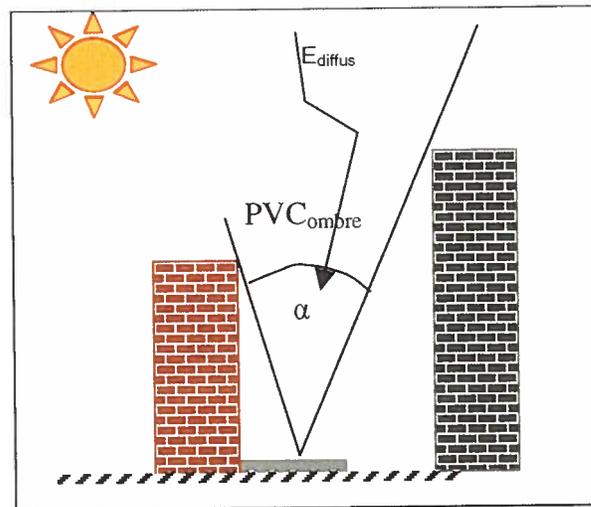


Figure 2.6 : Éclairement diffus dans la partie visible du ciel (PVC)

2.1.3.3 Ombre et longueurs d'onde

Malgré son aspect sombre sur les images, l'ombre n'a pas de signature spectrale propre à elle, car elle se projette sur les autres surfaces au sol et modifie ainsi l'éclairement reçu par ces surfaces. En modifiant l'éclairement reçu par une surface, l'ombre influence fortement le rayonnement réfléchi par cette surface et change son apparence sur les images, car l'intensité du rayonnement réfléchi est directement fonction de l'éclairement reçu par la surface et du pouvoir réfléchissant de la surface. Ainsi, pour tout pixel sous ombre, son contenu en information sera atténué par l'ombre, qui est assimilée à une sorte de bruit résiduel qui modifie le contenu en information de ce pixel. C'est pourquoi, les

effets d'ombre sont justement confondus à du bruit dans certaines techniques d'analyse d'image de télédétection comme le démixage spectral.

L'atténuation du rayonnement sous ombre se traduit par une diminution des valeurs radiométriques enregistrées par le capteur en fonction de la longueur d'onde. Le principal éclairage qui parvient aux surfaces à l'ombre étant l'éclairage diffus de l'atmosphère, créé par la diffusion de Rayleigh (Robin, 1995). Dans les courtes longueurs d'onde, cette diffusion est plus importante que dans les longues longueurs d'onde. Donc, l'ombre dans les courtes longueurs d'onde (Bleu par exemple) est moins sombre, alors que dans les longues longueurs d'onde (Proche Infrarouge) l'ombre est beaucoup plus sombre. Cette variation en fonction des longueurs d'onde de l'éclairage diffus influence la réponse spectrale des zones à l'ombre qui paraissent plus bleues.

2.1.4. Composantes de l'ombre

L'ombre se décompose en trois principales parties qui sont plus ou moins identifiables selon les conditions d'éclairage et d'acquisition des images : l'ombre portée, l'ombre projetée et la pénombre (voir la figure 2.7 ci-dessous).

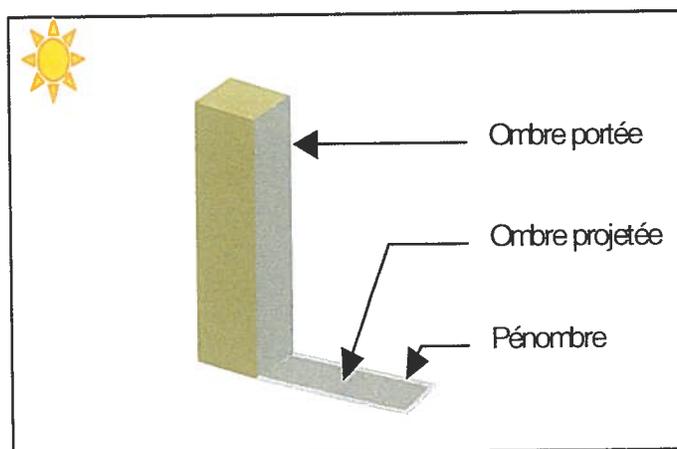


Figure 2.7 : Les composantes de l'ombre (ombre portée, ombre projetée et pénombre).

2.1.4.1. L'ombre portée

L'ombre portée est définie comme la partie de l'ombre qui se projette sur l'objet qui la génère. Il s'agit de la partie sombre de l'objet qui se trouve à l'ombre. L'ombre portée est toujours localisée entre l'objet et l'ombre proprement dite appelée ombre projetée. La taille et la forme de l'ombre portée proviennent des conditions d'acquisition de l'image. Si le capteur se trouve du côté opposé du soleil, l'ombre portée est totalement ou partiellement visible sur les images comme indiqué à la figure où l'ombre représente la partie sombre de l'objet en hauteur. Cependant, elle est difficilement identifiable sur les images, car elle se confond parfois avec l'objet qui génère l'ombre.

2.1.4.2. L'ombre projetée au sol

Cette partie de l'ombre représente l'ombre proprement dite. C'est la silhouette de l'objet qui la génère et elle se projette au sol ou sur un autre objet. Elle est la plus importante partie des différentes composantes et, est toujours située du côté opposé du soleil par rapport à l'objet qui la génère. Sa taille est directement fonction de la hauteur de l'objet, de la position du soleil et de celle du capteur au moment de l'acquisition de l'image. La partie visible de l'ombre projetée est fonction de la position du capteur par rapport au soleil. Elle est entièrement vue sur les images si le capteur se trouve du côté opposé du soleil.

2.1.4.3. La pénombre

La pénombre est définie comme étant la zone de transition entre l'ombre et les surfaces au soleil. Il s'agit des parties de l'ombre qui reçoivent un peu plus d'éclairement que les zones réellement à l'ombre. La pénombre est toujours située en bordure de l'ombre projetée. Elle apparaît moins sombre sur les images que l'ombre projetée ou l'ombre portée parce qu'elle reçoit partiellement l'éclairement solaire direct.

Les zones d'ombre présentes sur les images de télédétection ont donc des caractéristiques propres qui permettent de les distinguer des autres objets dans l'image. Ces principales caractéristiques géométriques et spectrales sont exploitées par les techniques de détection pour discriminer les ombres des autres détails présents sur l'image. Une revue de ces différentes techniques est présentée dans les sections qui suivent.

2.2. Détection des zones d'ombre sur les images

Plusieurs travaux de recherche sur la détection des ombres ont été réalisés ces dernières années principalement sur la détection des ombres des objets en mouvement (Prati *et al.*, (2001), Hsieh *et al.*, (2003), etc.) . En télédétection, quelques méthodes sont également développées pour discriminer les zones d'ombre en milieu montagnard (Gilles, 2001), ou en vue de confirmer l'identification des objets qui les génèrent (Irvin et McKeown, (1989), Lin *et al.*, (1998), etc.).

2.2.1. Particularité de la détection des ombres en télédétection

La détection d'ombre d'objets en mouvement en analyse d'images vidéographiques est principalement basée sur la différence d'images multidates. Cette différence d'images met en évidence les zones de changements dus aux mouvements des objets et de leur ombre. Sur la base de ce principe, plusieurs méthodes ont été développées et une synthèse est présentée dans Prati *et al.* (2003).

En télédétection, la réalité est toute autre, car la détection des ombres se fait généralement sur une seule image, d'où la nécessité de développer des méthodes adaptées et basées sur l'exploitation des caractéristiques des ombres et des objets qui les génèrent. Quelques méthodes ont été développées sur la base des propriétés spectrales, géométriques et contextuelles des ombres. Une excellente revue des méthodes est présentée dans Funka-Lea, (1994) et mise à jour dans Prati *et al.* (2003). Plusieurs classifications de ces méthodes sont suggérées dans la littérature selon les propriétés de l'ombre prises en compte dans l'analyse.

2.2.2. Classification des méthodes de détection d'ombre

Les méthodes de détection des ombres diffèrent les unes des autres selon les propriétés de l'ombre exploitées par les méthodes. C'est le cas des méthodes qui utilisent les propriétés spectrales comme le seuillage de niveau de gris ou les couleurs, des méthodes exploitant la géométrie de l'ombre, etc. Elles peuvent également varier selon les techniques utilisées pour la prise en compte des caractéristiques exploitées. Il s'agit des méthodes paramétriques, déterministes, orientées objet, etc. Pour une meilleure synthèse des méthodes de détection développées, celles-ci sont regroupées en plusieurs sous-ensembles selon leur principe de base.

Prati *et al.*, (2003) proposent un regroupement en deux grands groupes selon le modèle de décision et de l'information prise en compte dans la détection de l'ombre. Ces groupes sont :

- les méthodes de détection déterministes basées sur un modèle de décision,
- les méthodes basées sur des propriétés statistiques quelles soient paramétriques ou non.

Les méthodes de ces deux grands groupes sont également classées selon les critères suivants :

- Méthodes locales selon qu'elles s'appliquent au pixel ou zonales si elles s'appliquent à un segment ou une région.
- Méthodes multi-images selon qu'elles exploitent plusieurs images (multispectrales) ou méthodes mono-image si elles exploitent les images panchromatiques.
- Méthodes dynamiques exploitant des images successives ou statiques quand elles s'appliquent à une seule image.

Enfin, la classification la plus simple et la plus répandue est fonction des propriétés de l'ombre prises en compte pour discriminer les zones d'ombre. Ainsi, trois grands groupes de techniques sont présentés qui sont :

- les méthodes basées sur l'information spectrale (niveau de gris, couleurs et autres indices dérivés),
- les méthodes prenant en compte les informations spatiales et géométriques,
- les méthodes basées principalement sur l'information temporelle.

Sur la base de ce regroupement en trois grands groupes, nous présenterons quelques méthodes pertinentes de détection d'ombre relevées dans la littérature.

2.2.3. Les méthodes basées sur l'information spectrale

Ces méthodes se présentent en deux groupes : celles basées sur l'analyse des valeurs radiométriques des pixels (niveau de gris) et celles utilisant leurs transformées dans le domaine des couleurs. Les techniques d'analyse les plus utilisées sont : différents types de seuillage sur les valeurs des pixels ou leurs transformées et les modèles physiques de l'ombre.

2.2.3.1. Méthodes basées sur le seuillage de niveau de gris

Les méthodes basées sur les valeurs spectrales utilisent principalement le seuillage du niveau de gris pour détecter les zones d'ombre, avec l'hypothèse que ces dernières sont généralement les plus sombres ou les moins éclairées dans l'image. Ces méthodes s'appliquent aux images panchromatiques et multispectrales. Pour les données multispectrales, le seuillage s'applique à toutes les bandes. Le choix du seuil se fait après une analyse de l'histogramme où les zones d'ombre sont caractérisées par de faibles valeurs de niveau de gris. Parmi les méthodes basées sur le seuillage, citons les travaux de Gwinner *et al.* (1997) qui appliquent le seuillage sur un histogramme pour détecter les zones d'ombre sur des données hyperspectrales. La technique de seuillage est également utilisée par Shettigara *et al.* (1998) pour discriminer les ombres de bâtiment en vue de déduire leur hauteur à partir de leur ombre. Le choix d'un seuil optimum pour discriminer

les ombres sur toute l'image est parfois très difficile, d'où l'introduction de seuils locaux (Jiang *et al.*, 1994) selon la position sur l'image. Ainsi, plusieurs seuils sont choisis localement en fonction des caractéristiques de l'image, ce qui nécessite une connaissance *a priori* de l'image pour le choix de ces seuils.

De nouvelles techniques de seuillage adaptatif (Papamarkos *et al.*, 1994) utilisées pour la classification des images de télédétection sont testées pour la détection des ombres. Tsai *et al.* (2003) et Rosin *et al.* (1995) ont utilisé cette technique de seuillage pour identifier des zones d'ombre sur des images. Il s'agit de seuils locaux choisis d'une manière automatique après analyse d'histogramme de l'image entière ou de portions d'image. Le seuil adaptatif est aussi appliqué à certains indices spectraux dérivés de l'image comme le rapport de bandes, des indices de couleurs ou autres.

Les méthodes basées sur le seuillage ont montré certaines limites comme le choix des seuils locaux qui nécessite une connaissance *a priori* des caractéristiques de l'image. C'est pourquoi, d'autres méthodes toujours basées sur l'information spectrale ont été proposées. Il s'agit des méthodes basées sur la modélisation physique de l'éclairement reçu par l'ombre et présentées dans la section qui suit.

2.2.3.2. Méthodes basées sur les modèles physiques de l'ombre

Ces méthodes intègrent l'information spectrale à travers des modèles qui décrivent le signal reçu et réfléchi par les surfaces à l'ombre. Elles sont basées sur le modèle de la physique de l'ombre à travers les deux approches suivantes : les techniques de démixage spectral qui sont basées sur l'hypothèse qu'un pixel est formé par la contribution proportionnelle de tous les éléments qui le composent (Settle *et al.* 1993) et les modèles qui décrivent les propriétés réfléchissantes des surfaces.

a) La technique basée sur le démixage spectral : la proportion de chaque objet contenu dans le pixel est calculée à partir de l'inversion du modèle linéaire qui intègre les différentes composantes du pixel (Adams *et al.* 1995). L'ombre étant un phénomène qui

modifie la valeur d'un pixel, est assimilée à un bruit résiduel qui affecte la valeur du pixel. Sa proportion est calculée dans tous les pixels qui sont entachés. Ainsi, la présence d'ombre est déterminée sur les pixels qui en contiennent. Sur la base de ce principe, Adler-Glden *et al.*, (2001) ont proposé un algorithme de correction des effets d'ombre sur les images spectrales, qui utilise d'abord le démixage spectral pour détecter les zones d'ombre présentes sur l'image et qui leur applique une méthode d'inversion pour calculer la valeur spectrale corrigée des effets d'ombre. Une application sur des images AVIRIS donne d'excellents résultats; cependant cette méthode ne s'applique qu'aux images multi ou hyperspectrales.

b) Les techniques basées sur le modèle physique : l'approche physique est basée sur la propriété réfléchissante des surfaces, propriété intrinsèque d'une surface donnée pour une longueur d'onde précise indépendamment de la quantité de l'éclairement reçu. Ce pouvoir réfléchissant d'une surface est invariant selon que la surface soit à l'ombre ou au soleil, car indépendamment de l'éclairement reçu par la surface. Sur la base de ce principe, Nadimi et Banu (2004) ont introduit une nouvelle approche de détection et correction des effets d'ombre utilisant la modélisation physique de la réflexion des surfaces. La principale hypothèse de cette méthode est basée sur un rapport d'albédo, supposant qu'une surface conserve le même albédo à l'ombre ou au soleil.

2.2.3.3. Méthodes basées sur la colorimétrie

Les méthodes de détection d'ombre basées sur la colorimétrie (saturation, intensité et teinte) sont les plus développées dans la littérature. Elles exploitent le postulat que, pour une surface donnée, plusieurs paramètres descriptifs de la couleur sont invariants de l'ombre, c'est-à-dire que ces paramètres de couleur ne changent pas indépendamment que la surface soit à l'ombre ou au soleil. Les paramètres de couleur invariants de l'ombre sont : la saturation et la teinte issues de la transformation des bandes Vert, Bleu et Rouge (RGB) ou des ratios entre les bandes. Utilisant l'invariance de la saturation, Salvador *et al.*, (2004) ont développé une méthode de détection des ombres portées et projetées au sol à partir de l'analyse des paramètres dérivés de la transformation de la couleur. Il s'agit de

l'intensité qui est sensible à l'ombre pour détecter les zones potentiellement ombre ainsi que l'analyse de la saturation et de la teinte qui sont invariantes de l'ombre pour confirmer la présence de l'ombre. Barnard et Finlayson (2000) ont utilisé le ratio entre les bandes de couleur pour évaluer les changements d'illumination entre les contours des segments préalablement calculés. Une importante variation d'illumination issue du rapport de bandes confirme la présence d'ombre sur des zones déjà identifiées comme tel. Il faut signaler la limitation due à la différence de distribution spectrale entre l'éclairage diffus de la zone d'ombre et l'éclairage direct de la zone au soleil. Il y a plus de bleu dans les zones à l'ombre et moins de rouge.

Une autre limitation des méthodes basées sur la colorimétrie est que ces dernières exigent au minimum trois bandes spectrales pour permettre la transformation en saturation teinte et intensité. Pour les données panchromatiques ces méthodes ne sont d'aucun apport.

Malgré plusieurs avancées dans la détection des ombres à partir des propriétés spectrales (niveau de gris, couleurs, indices et ratios, etc.), les résultats peuvent encore être améliorés par la prise en compte des informations spatiales ou géométriques.

2.2.4. Les méthodes prenant en compte l'information spatiale

L'information spatiale prise en compte dans la détection des zones d'ombre se présente sous plusieurs formes dont les plus utilisées à travers la littérature sont les relations géométriques entre l'ombre et son entourage immédiat. Les descripteurs de ces relations géométriques sont : le voisinage, la position relative, la connexion, le parallélisme, l'orientation et la distance.

2.2.4.1 Principe des méthodes utilisant l'information spatiale

L'information spatiale exploitée dans la détection des ombres est constituée des propriétés et relations géométriques de l'ombre qui décrivent bien l'ombre par rapport aux autres objets de l'image. Parmi ces relations géométriques, les plus utilisées dans la

littérature sont : le voisinage spatial, la position relative ombre-objet-soleil, la connectivité de l'ombre avec les objets voisins, les positions relatives des composantes de l'ombre (ombre portée, pénombre et ombre projetée). Quant aux propriétés géométriques de l'ombre, les plus exploitées sont l'orientation de l'ombre, quelques descripteurs de forme comme le parallélisme, la présence d'angle droit, etc. D'autres paramètres comme la configuration géométrique (azimut et élévation) de la source de l'éclairage en occurrence le soleil et la position du capteur au moment de l'acquisition sont également pris en compte dans la détection des zones d'ombre.

La différence entre les méthodes réside dans la manière d'utiliser ces propriétés géométriques, mais la procédure générale est la suivante :

- a) Segmentation de l'image pour regrouper les pixels en zones homogènes;
- b) Première détection des zones d'ombres potentielles à partir des valeurs spectrales ou de la couleur des segments;
- c) Calcul de certains descripteurs de forme sur les segments supposés ombre et description des relations géométriques entre ces segments supposés ombre et leur voisinage immédiat (voisinage, position relative, connectivité, etc.);
- d) Confirmation des zones d'ombre détectées à partir de l'analyse des descripteurs et relations géométriques.

2.2.4.2. Prise en compte de l'information spatiale

La première utilisation de l'information spatiale se retrouve déjà à l'étape de la segmentation de l'image pour regrouper les pixels voisins en zones homogènes plus significatives. À ce stade, c'est le contexte du voisinage du pixel qui est exploité, car le principe de la segmentation repose sur le regroupement de pixels voisins pour former des segments. Les techniques de segmentation les plus utilisées sont les techniques de propagation, la segmentation par détection des contours et enfin une segmentation hybride utilisant la détection des contours et les régions homogènes. Parmi les méthodes de détection des zones d'ombre basées sur la segmentation, citons celle développée par

Funka-Lea, (1994), qui utilise les paramètres de couleur et celle de Salvador *et al.* (2001) qui utilise d'abord l'extraction des contours pour segmenter l'image.

Après cette phase de segmentation, les méthodes de détection d'ombre exploitent les propriétés et relations géométriques pour mieux discriminer les zones d'ombre. Ces méthodes varient les unes des autres dans la manière dont ces informations spatiales sont prises en compte pour faire la détection. Elles sont classées en deux grands groupes : Celles qui utilisent une ou plusieurs propriétés géométriques de l'ombre et basées sur une hypothèse à vérifier et celles qui exploitent une base de connaissances en vue de détecter l'ombre.

a) Détection sur la base d'hypothèses : les techniques de détection d'ombre basées sur les hypothèses exploitent des hypothèses pour chaque propriété ou relation géométrique de l'ombre avec son voisinage. Exemple : il y a ombre quand le segment voisin côté soleil est un bâtiment; il y a ombre quand il y a présence de pénombre parmi les segments voisins côté soleil; il y a ombre quand il y a une superposition entre le segment supposé ombre et l'ombre simulée calculée à partir de la configuration géométrique objet-soleil (hauteur, azimut, élévation, position au sol); etc.

b) Détection à partir d'une base de connaissances : parfois, une seule hypothèse ne suffit pas pour confirmer la présence de l'ombre; c'est pourquoi, plusieurs connaissances sur l'ombre sont exploitées pour la détecter. Le concept de base de ces méthodes est la modélisation et l'intégration des connaissances dans un système de décision. Après segmentation, chaque objet est caractérisé par plusieurs attributs : attributs intrinsèques (forme, orientation, longueur, couleur, etc.) et attributs contextuels (relation avec le voisinage). Ces données sont intégrées dans un système de décision à base de règles pour identifier les zones d'ombre.

2.2.4.3. Quelques méthodes utilisant l'information spatiale

Trois approches de discrimination de l'ombre sont présentées et analysées.

Hambrick *et al.* (1987) proposent une méthode de détection des zones d'ombre basée sur l'identification et l'analyse des différents segments de droite qui composent les limites des zones supposées ombre. Après la recherche des objets voisins de l'ombre situés du côté de la source de l'éclairage, les segments de droite définissant le début et la fin de l'ombre sont identifiés. Une analyse en perspective entre la hauteur de l'objet et la taille de l'ombre projetée est ensuite réalisée. Si la taille de la zone d'ombre correspond à la projection au sol de l'objet suivant l'élévation du soleil, alors cette zone d'ombre est confirmée comme de l'ombre. La principale difficulté de cette méthode réside dans l'identification des segments définissant le début et la fin de l'ombre.

Jiang et Ward, (1994) présentent une approche de détection des zones d'ombre basée sur l'utilisation de la pénombre et de sa relation géométrique avec l'ombre. Le principe de base commence par une segmentation de l'image et une première détection des zones sombres supposées ombre. Sur ces zones sombres, une détection de pénombre est réalisée en faisant varier le seuil de niveau de gris. La différence de limites entre les zones sombres dérivées de deux seuils différents donne les segments supposés pénombre. L'analyse de forme et de relation géométrique entre une zone sombre et la pénombre qui lui est associée, ainsi que la présence d'objet susceptible de générer cette ombre, permet de confirmer si la zone sombre analysée est réellement de l'ombre. La faiblesse de la méthode réside dans la détection de la pénombre qui se fait à travers le choix d'un seuil. La taille et la forme de la pénombre dépendent beaucoup de ce seuil, alors que la présence de la pénombre est importante dans l'hypothèse de la présence d'ombre.

Li *et al.* (2004), Nakajima *et al.* (2002) présentent des méthodes de détection des zones basées sur l'utilisation d'un modèle numérique de surface (MNS) pour générer les ombres des objets en hauteur en fonction de l'élévation du soleil. Ces ombres générées sont comparées aux zones d'ombre détectées sur les images par seuillage de niveau de gris (Nakajima *et al.* 2003) ou par analyse de couleurs (Li *et al.*, 2002). Les zones

d'ombres qui se superposent avec les ombres calculées sont confirmées comme étant réellement de l'ombre. La méthode Nakajima a été appliquée à des images IKONOS panchromatiques en milieu urbain tandis que la technique développée par Li est appliquée à des images couleurs aéroportées d'une zone urbaine. Ces méthodes donnent d'excellents résultats, car les zones d'ombres détectées sont bien confirmées par les ombres générées par le modèle numérique de surface. Leur principale faiblesse est qu'il faut donc disposer d'un modèle numérique de surface des zones d'étude pour être sûr des résultats, ce qui n'est pas toujours possible.

2.2.5. Les méthodes prenant en compte de l'information temporelle

L'analyse des images vidéographiques pour le suivi des objets en mouvement est relativement facilitée par l'information temporelle. En effet, la différence entre deux images prises à des temps t_0 et t_1 est une véritable source d'information pour l'analyse du contenu de ces images. Cette possibilité est utilisée pour la détection des ombres, elles-mêmes exploitées pour discriminer certains objets en mouvement. Le principe de détection commence par une différence d'images des temps t_1 et t_0 ; les objets en mouvement seront représentés comme des zones de changement. L'analyse de forme et des relations géométriques entre les objets détectés permet d'identifier les zones d'ombre des objets en mouvement. Plusieurs applications en surveillance vidéo exploitent ce principe pour détecter les ombres des objets en mouvement. Stauder *et al.*, (1998) utilisent cette technique pour détecter des ombres pour mieux discriminer certains objets en mouvement. Prati *et al.* (2001) exploitent la détection des ombres pour mieux identifier les voitures à des postes de contrôle pour le suivi du trafic routier.

2.3. Exploitation des zones d'ombre

En général, les zones d'ombre sur les images sont détectées pour être exploitées dans diverses applications. En photo-interprétation, l'ombre est utilisée pour différencier des objets en hauteur par rapport à des surfaces planes de même propriété. En analyse d'images, l'utilisation des ombres se fait sous diverses formes, soit pour confirmer

certaines hypothèses de présence d'objets en hauteur, soit pour déterminer la hauteur de ces objets ou pour rehausser localement les images entachées d'ombre

2.3.1. Confirmation de la présence d'objets en hauteur

En télédétection, les ombres sont beaucoup exploitées pour confirmer la présence de certains objets suite à l'analyse des relations géométriques entre ces objets et leurs ombres. Ces relations sont la similitude de forme entre l'ombre et l'objet et la position relative entre l'objet, l'ombre, le soleil et l'observateur.

La confirmation de la présence d'un objet en hauteur à partir de son ombre est très utilisée dans les méthodes de détection du bâti à partir des images aéroportées ou satellitaires en milieu urbain. Plusieurs techniques de détection de bâti sont basées sur des séries d'hypothèses incluant la présence d'ombre, la forme de l'ombre et la position relative de cette ombre par rapport à l'objet à identifier. Irvin et McKeown, (1989) ont exploité la relation entre les bâtiments et leurs ombres pour développer une méthode de détection des constructions en milieu urbain, qui procède comme suit : 1) la détection des zones d'ombre et des segments voisins de l'ombre côté soleil; 2) un regroupement des segments voisins qui sont inclus dans une région d'intérêt définie à partir de la limite de l'ombre côté soleil; 3) une analyse de forme entre le segment résultant et l'ombre permet d'établir une relation de similitude entre la forme de l'ombre et celle de l'objet du côté soleil. S'il y a similitude, l'objet est considéré comme un bâtiment. Dans cette méthode, l'ombre est utilisée comme principale hypothèse pour confirmer la présence d'un bâtiment à travers l'analyse de forme et la position relative entre l'ombre et le bâti.

Lin et Nevatia (1998) utilisent aussi la présence d'ombre dans leur méthode de détection de bâtiment à partir d'une seule image. La méthode est basée sur une série d'hypothèses à vérifier pour confirmer la détection d'un bâtiment. La présence d'ombre figure en bonne place dans ces hypothèses. En effet, l'objet considéré comme un bâtiment et son ombre doivent avoir un ou plusieurs côtés communs selon la forme du bâti, la position du soleil et celle de l'observateur. En plus de la similitude de forme entre l'ombre et l'objet qui la

génère, une correspondance entre les coins de l'ombre et ceux de l'objet est évaluée. Si cette correspondance est bien établie entre les principaux coins de l'ombre et leurs correspondants sur l'objet, un score est alloué à cette hypothèse. Ce score détermine la contribution de l'hypothèse dans la confirmation de l'identification du bâtiment. La correspondance entre les coins a permis d'améliorer la certitude de détection du bâti à partir d'une seule image.

Dans le domaine de la surveillance vidéographique, les ombres d'objets en mouvement sont détectées pour confirmer la nature ou la forme des objets en présence. Dans le suivi du trafic routier, les ombres sont utilisées pour améliorer la détection des véhicules à partir de la forme et de la taille de leur ombre (Mikic *et al.*, 2000). Après segmentation et identification des zones d'ombre sur les images du trafic routier, les zones d'ombre sont utilisées pour corriger et compléter les résultats de la détection des véhicules en mouvement sur la chaussée. En effet, la mise en relation entre les ombres et les véhicules permet d'améliorer l'identification des véhicules; la taille et la forme des ombres permettent de catégoriser les véhicules en présence. Prati *et al.* (2003) ont évalué deux techniques de suivi du trafic routier (le SAKBOT : «Statistical And Knowledge-Based Object Traker» et le ATON : «Autonomous Transportation agents for On-scene Networked incident management»). Les deux techniques utilisent les ombres détectées sur les images pour améliorer l'identification des véhicules et la gestion du trafic. L'apport des ombres détectées dans l'identification des véhicules est considérable.

2.3.2. Détermination de la hauteur des objets à partir de leur ombre

Une autre importante utilisation de l'ombre en télédétection est la détermination de la hauteur des objets qui génèrent ces ombres (Toutin, 2001). En effet, une relation univoque existe entre la taille de l'objet et celle de son ombre; ainsi connaissant la taille de l'ombre et l'élévation du soleil, il est possible de déduire la taille de l'objet qui génère cette ombre. Cette relation est utilisée dans plusieurs applications où la hauteur des objets est déterminée à partir de leur ombre (Cheng et Thiel, (1995), Shettigara et Sumerling, (1998)).

Cheng et Thiel, (1995) ont utilisé la taille de l'ombre de bâtiments pour calculer leur hauteur en tenant compte de la position du soleil au moment de l'acquisition de l'image, et de la pente du terrain. L'application a été réalisée sur des images panchromatiques Spot en milieu urbain. Les zones d'ombres sont localisées et identifiées par interprétation d'images par l'utilisateur. Les résultats généralisés sur une ville moyenne permettent de déterminer la hauteur de plusieurs bâtiments dont l'ombre est localisable et bien identifiable. Cependant, la méthode ne tient pas compte de la position du capteur au moment de l'acquisition, ce qui permet d'améliorer la qualité des résultats malgré la résolution du capteur.

Shettigara et Sumerling, (1998) ont essayé de détecter automatiquement les zones d'ombre avant de les utiliser pour déterminer la hauteur des bâtiments. Ils ont également essayé de tenir compte de la position du capteur au moment de l'acquisition de l'image ainsi que de la taille de l'ombre et de la position du soleil, pour améliorer les résultats. La faiblesse de leur méthode réside dans l'utilisation du seuillage pour identifier les zones d'ombres. L'application a été faite sur les images panchromatiques SPOT; le petit nombre (3) de hauteurs calculées ne permet pas d'apprécier efficacement la méthode.

2.3.3 Rehaussement des effets d'ombre sur les images

La présence d'ombre sur les images altère considérablement leur qualité visuelle. L'une des utilisations de la détection des ombres est d'améliorer l'aspect de ces images. Après leur localisation, les ombres sont facilement corrigées pour redonner à l'image un meilleur aspect. Plusieurs techniques sont développées pour minimiser, voire supprimer les effets d'ombre sur les images (Rau *et al.*, (2000), Li *et al.*, (2003), Hsieh *et al.*, (2003), Yoon *et al.* (2002)).

La technique couramment utilisée pour corriger ou compenser les effets d'ombre est le rehaussement des valeurs des pixels dans l'ombre par différents procédés parmi lesquels on peut citer l'étalement ou autres transformations locales d'histogramme sur les zones

d'ombre. Rau *et al.* (2000) ont appliqué l'étalement d'histogramme pour rehausser les valeurs de niveau de gris des pixels sous ombre. Connaissant les valeurs minimale et maximale des pixels de l'image à l'extérieur des ombres, une transformation linéaire est appliquée aux pixels à l'ombre pour obtenir des valeurs corrigées des effets d'ombre comprises entre le minimum et le maximum. C'est une méthode simple, mais qui ne tient pas compte de la variabilité locale propre à la surface sous l'ombre.

Pour préserver la variabilité locale de chaque surface, d'autres méthodes essaient d'abord d'identifier la surface directement adjacente à l'ombre du côté opposé au soleil. Cette surface qui peut être la même que la surface sous ombre est utilisée pour compenser les valeurs des pixels sous ombre. Une fois la surface voisine identifiée, des paramètres locaux de transformation sont calculés et utilisés pour corriger les effets d'ombre sur la surface ombragée. Li *et al.*, (2003) ont utilisé une transformation de type gamma pour rehausser les pixels à l'ombre sur une image de très haute résolution spatiale en milieu urbain en imposant le maximum et le minimum de la surface adjacente. La recherche de la surface adjacente se fait parmi les voisins côté ombre et dont la taille est plus représentative, sans vérifier la texture entre l'ombre et cette surface.

Hsieh *et al.*, (2003) ont modélisé d'abord la distribution des pixels sous l'ombre suivant la distribution gaussienne avant de lui appliquer la transformation qui conserve les mêmes caractéristiques gaussiennes de la distribution. La méthode est utilisée pour détecter les zones d'ombre des personnes qui se promènent dans un parc avant de corriger les effets d'ombre.

2.3.4. Autres exploitations

Il existe d'autres types d'exploitation de l'ombre moins développés que ceux présentés plus haut. Il s'agit de la détermination de la source d'éclairage et de la restitution de l'information sous l'ombre. La détermination de la source de l'éclairage à partir de l'ombre des objets est utilisée dans certaines applications en robotique surtout dans des environnements clos. Il s'agit pour certains robots de localiser la source de la lumière qui

éclaire certains objets à partir des ombres projetées au sol. La localisation de la source de l'éclairement permet de s'orienter et de détecter certains objets en mouvement dans le cadre d'une surveillance. La localisation de la source de l'éclairement se fait indirectement à partir de la taille des objets et de leurs ombres projetées (Fuka-Lea, 1994).

Une autre exploitation de l'ombre très présente en synthèse d'images est l'ajout des effets d'ombre pour créer des images de synthèse proches de la réalité. Les effets d'ombre ajoutent de la profondeur aux objets présents sur l'image. Les propriétés géométriques de l'ombre sont utilisées pour calculer la localisation et la taille des ombres en fonction de la taille des objets présents dans l'image, et de la source de l'éclairement. Les propriétés physiques de l'ombre sont utilisées pour déterminer la densité de l'ombre en tenant compte de l'intensité des éclairements en présence. Une revue de quelques algorithmes de génération d'ombre sur les images est présentée par Hasenfratz *et al.* (2003).

Une exploitation de l'ombre non développée dans la littérature est la restitution de l'information sous l'ombre. Dans la littérature, la compensation des effets d'ombre sur les images est assimilée à tort à la restitution de l'information sous ombre (Nakajima *et al.* 2002). En effet, la restitution de l'information sous ombre consiste à identifier le type de surface qu'il y a sous une ombre, afin de compléter une carte d'occupation de sols ou un plan issu de l'interprétation de l'analyse d'une image de très haute résolution, où les zones d'ombre sont considérées comme une classe à part occasionnant une perte d'information pour la carte. La connaissance de l'information sous l'ombre à travers la restitution permet de compléter les cartes et d'éliminer les classes ombre qui n'ont aucune signification thématique.

L'ombre est également utilisée pour calculer les paramètres d'orientation de l'image dans une application photogrammétrique (Yamada, 2002).

2.4. Conclusion partielle

L'étude du phénomène d'ombre sur les images de télédétection est une préoccupation récente. Plusieurs techniques sont proposées pour détecter et même exploiter ces ombres. Celles basées sur la seule exploitation de l'information spectrale ont montré beaucoup de limites, d'où le développement de méthodes intégrant l'information géométrique qui ont un apport pertinent dans la détection des zones d'ombre en milieu urbain. Cependant, parmi la multitude d'informations géométriques disponibles, les relations géométriques entre l'ombre et son environnement sont les plus utilisées. Les descripteurs de forme et d'orientation ne sont pas très exploités malgré leur probable apport en information qui permettrait de mieux discriminer les zones d'ombre des autres surfaces. C'est ce que nous envisageons de faire à travers la nouvelle méthode de détection des zones d'ombre que nous proposons; elle prend en compte les descripteurs de forme et d'orientation et d'autres caractéristiques des ombres pour mieux les discriminer par rapport aux autres surfaces sombres qui ressemblent fortement aux ombres.

L'ombre constitue une source d'information sur l'objet qui la génère. Elle est utilisée pour différents types d'exploitation comme la détermination de la hauteur des objets, le rehaussement des effets d'ombre et la restitution de l'information sous l'ombre. En télédétection, la restitution de l'information sous l'ombre n'est pas encore étudiée; c'est pourquoi, nous la retenons comme principale exploitation des zones d'ombre détectées par la nouvelle approche proposée.

3. NOUVELLE APPROCHE DE DÉTECTION D'OMBRE DE BÂTI

La nouvelle approche proposée est basée sur l'intégration hiérarchique de plusieurs informations caractéristiques de l'ombre pour mieux discriminer les objets. Le processus d'intégration de ces informations s'inspire de l'analyse orientée objet qui permet de prendre en compte les connaissances et informations caractérisant les objets. Mais avant, un aperçu général de la méthodologie globale mise en œuvre dans la thèse sera présentée.

3.1. Aperçu de la méthodologie globale

Pour atteindre les objectifs essentiels de cette thèse qui sont la détection et l'exploitation des zones d'ombre, la méthodologie globale présentée à la figure 3.1 a été mise de l'avant. Elle se résume comme suit :

- a. Collecte des données nécessaires tant pour les traitements et les analyses que pour la validation des résultats obtenus. Il s'agit principalement d'images Ikonos de la ville de Sherbrooke, des données sur la position du soleil et du capteur, d'une carte d'occupation du sol du site d'étude pour valider les résultats et enfin une série de hauteurs de bâtiments pour valider les hauteurs calculées à partir des ombres.
- b. Mise au point d'une méthode de détection des zones d'ombre : elle est basée sur une analyse orientée objet autour de chaque région homogène (segment) à travers une analyse hiérarchique des différents attributs caractéristiques de la région pour déduire les ombres. Elle prend en compte les attributs qui caractérisent le mieux les zones d'ombre : les attributs radiométriques (les valeurs moyennes de niveau de gris, les écarts types), les critères de forme et d'orientation selon l'azimut du soleil, ainsi que la position relative entre le segment supposé ombre et son voisinage. Les résultats obtenus sont validés par une image-interprétation des zones d'ombre.

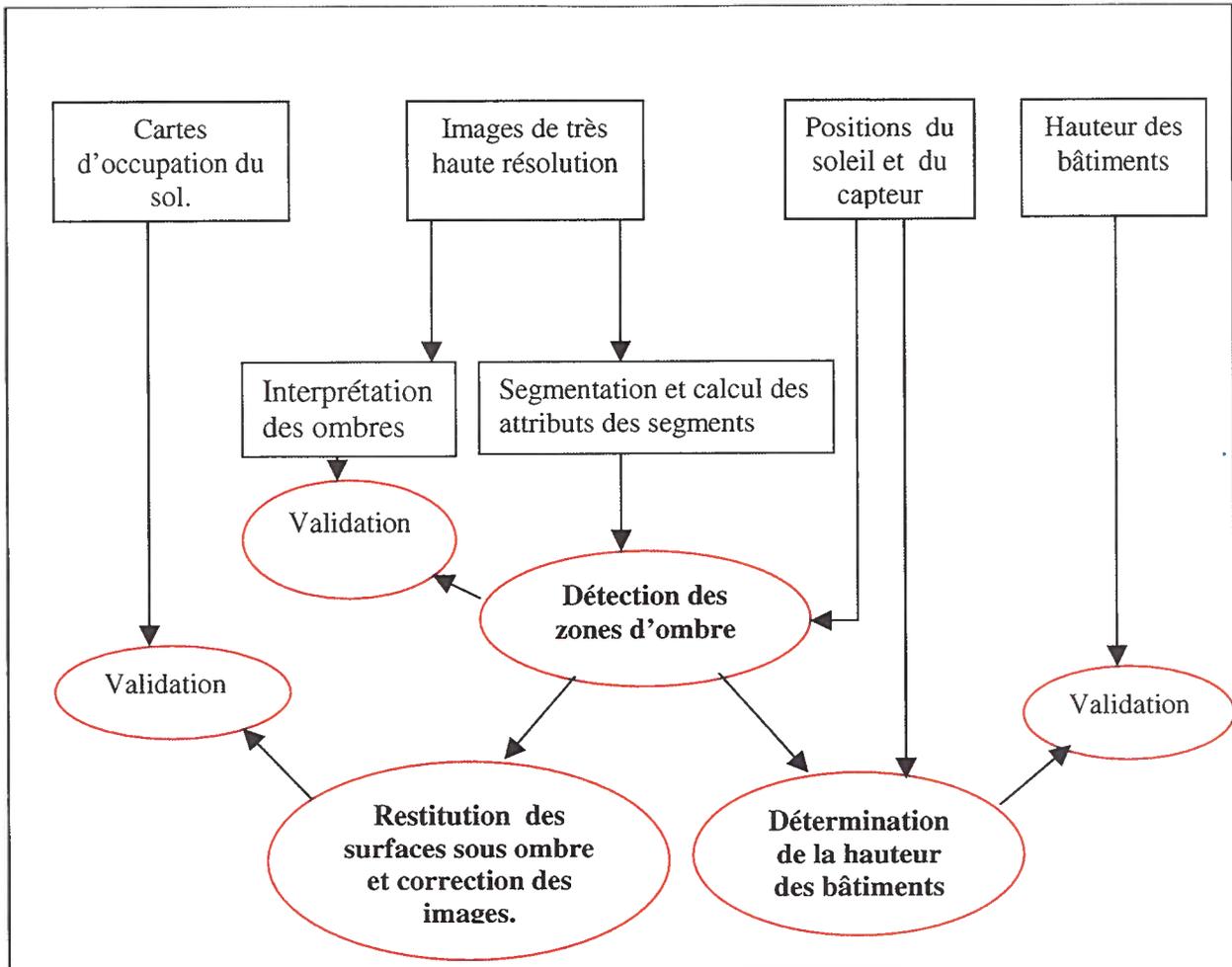


Figure 3.1 : Organigramme résumant la méthodologie globale

- c. Mise au point des méthodes d'exploitation des zones d'ombre détectées : elles permettent de restituer l'information sous l'ombre à partir de l'analyse de son voisinage. Le résultat permet de compenser les effets d'ombre sur l'image d'origine pour lui donner un aspect sans ombre. Les ombres détectées sont utilisées pour déterminer la hauteur des bâtiments qui les génèrent.
- d. Validation des résultats de l'exploitation des zones d'ombre : il s'agit de valider les hauteurs calculées et les surfaces sous ombre restituées en utilisant les données *in-situ*.

La méthode de détection d'ombre développée est présentée en détail dans ce chapitre en commençant par la définition de l'approche orientée objet appelée approche par entité en télédétection, tandis que les méthodes d'exploitation seront détaillées ultérieurement dans le chapitre consacré à l'exploitation des zones où les différents types d'exploitation développés seront présentés.

3.2. L'approche orientée objet en télédétection

Pour mieux de définir l'approche orientée, il faut d'abord comprendre pourquoi et comment cette approche est nécessaire en télédétection.

3.2.1. Définition de l'approche objet

L'approche orientée objet est un concept plus connu en informatique où un objet est défini par une classe qui fonctionne comme une entité autonome. Ainsi, chaque objet dispose de ses propres variables, de ses propres fonctions et aussi de ses sous-objets. Les variables constituent des attributs qui caractérisent l'objet. Ces variables décrivent certaines caractéristiques ou propriétés de l'objet.

Par analogie, ce concept d'objet peut s'adapter à l'analyse d'image où l'objet est représenté par un segment qui est une entité obtenue après un regroupement de pixels voisins et homogènes pour former des zones distinctes mais homogènes (Voirin, 2005). À l'image de l'objet défini en informatique, chaque segment possède des attributs qui le caractérisent. Une analyse de ces attributs permet de discriminer les segments les uns par rapport aux autres en utilisant les connaissances qu'on a sur les objets à identifier. Les connaissances sont définies comme des faits ou des états connus d'un objet avec certitude à partir d'une expérience ou d'une autre source (Sowmya et Trinder, 2000). Ainsi, on peut extraire certains objets ou segments dont les attributs répondent à des critères bien définis issus des connaissances. Comme exemple d'attributs et de connaissances décrivant un segment, on peut citer les attributs de forme, de position, de texture, etc. Et comme exemple de connaissances sur un objet on peut citer la régularité de la forme et la compacité pour un bâtiment.

3.2.2. Pourquoi une approche objet en télédétection?

Contrairement à l'approche classique d'analyse d'images essentiellement basée sur le pixel et parfois son voisinage, l'approche objet s'inspire de la perception humaine des phénomènes présents sur une image de télédétection. Pour améliorer les résultats de la classification, plusieurs techniques ont été développées dont certaines prennent l'information contextuelle du voisinage du pixel et d'autres basées sur la logique floue. Malgré ces avancées, les techniques d'analyse basées sur le pixel restent limitées dans la classification des images de très haute résolution spatiale. Les résultats restent en dessous des espérances, à cause de la grande variabilité des pixels au sein d'un même objet. Pour pallier à ces difficultés, de nouvelles approches comme les systèmes experts ont été introduites, mais ces dernières sont lourdes et ont tendance à vouloir couvrir tous les types d'occupation de sol. Cette tendance à vouloir couvrir le maximum de thèmes possibles rend les systèmes experts lourds, complexes et finalement peu efficaces pour une application précise. C'est pourquoi, l'approche objet semble bien adaptée pour l'analyse des images de télédétection en vue d'extraire une information thématique précise en prenant en compte toutes les connaissances et informations connues sur le thème à analyser (Crevier et Lepage, (1997).

3.2.3. Mise en œuvre de l'approche objet en télédétection

En fonction de l'information à extraire de l'image, les segments sont analysés selon leurs attributs, étiquetés et regroupés pour représenter l'information recherchée. Ainsi, l'approche orientée objet en analyse d'image comprend les principales étapes suivantes : la segmentation, la définition et le calcul des attributs, l'analyse des attributs pour extraire l'information recherchée et enfin l'étiquetage de cette information.

3.2.3.1. La segmentation

Plusieurs techniques de segmentation sont disponibles et les plus connues sont la segmentation conjonctive, par détection des contours et les techniques de segmentation

hybrides combinant les deux premières (Pal et Pal., (1993). De nombreuses techniques sont hiérarchiques, permettant de contrôler le niveau de regroupement des pixels et la taille des segments (Definiens, 2002).

3.2.3.2 Définition et calcul des attributs

Plusieurs types d'attributs caractérisent un segment. En fonction du type d'analyse ou de l'information recherchée, il est important de définir des attributs très discriminants pour l'information recherchée. Certains attributs décrivent la taille et la forme géométrique (superficie, longueur, largeur, périmètre, etc.); d'autres décrivent la texture, la couleur, les relations du segment avec ses voisins (distances, côtés communs, etc.) (Martri *et al.* (2001))

3.2.3.3. Analyse des attributs

Cette analyse se fait sur la base des connaissances disponibles sur l'information à extraire. À partir d'hypothèses à vérifier, les attributs des segments sont analysés sur la base de certaines règles générées à partir d'hypothèses. Si les règles sont vérifiées, l'information recherchée est confirmée. Dans la pratique, plusieurs hypothèses sont nécessaires pour extraire une information à partir des attributs. L'analyse se fait alors d'une manière hiérarchique. Les connaissances sur les objets à extraire sont modélisées à partir des caractéristiques intrinsèques aux objets.

3.2.3.4. Étiquetage de l'information

Une fois que l'information recherchée est validée, elle est étiquetée, c'est-à-dire qu'elle est codifiée pour être mieux restituée. Cette codification est nécessaire pour permettre de la distinguer parmi d'autres informations présentes sur la carte ou l'image.

L'approche orientée objet convient parfaitement aux objets présents dans les images de télédétection. Elle offre beaucoup d'avantages, mais également des désavantages.

3.2.4. Forces et faiblesses de l'approche orientée objet

L'approche orientée objet présente les principaux avantages suivants :

- elle s'apparente à la démarche du photo-interprète qui commence par identifier les objets et les relations spatiales qui existent entre ces derniers pour déduire leur fonction;
- elle prend en compte le contexte du voisinage pour regrouper les pixels voisins afin de former les objets;
- plusieurs attributs et caractéristiques des objets peuvent être utilisés au cours des analyses comme par exemple des attributs spectraux, géométriques (formes et dimensions), contextuels (voisinage, distance, orientation, etc.);
- elle permet la réduction de la taille des images (en terme de nombre de pixels) en regroupant les pixels pour former des zones homogènes; le segment devient l'élément de base de l'image.

Malgré ces avantages, l'approche objet présente quelques faiblesses qui sont résumées comme suit :

- les objets ou segments formés par regroupement de pixels homogènes ne reflètent pas nécessairement les objets réellement présents sur les images, c'est-à-dire les segments ne représentent pas fidèlement des objets physiquement présents sur l'image; par exemple, un bâtiment peut être représenté par plusieurs segments après le regroupement des pixels en zones homogènes;
- le niveau d'abstraction est difficile à trouver dans le cas d'un regroupement hiérarchique pour éviter de former des segments regroupant plusieurs objets dans la réalité, ce qui serait sans intérêt pour la suite de l'analyse. Il faut donc créer des petits segments.

3.3. Approche objet et détection des ombres

L'application de l'approche objet à la détection des zones d'ombre nécessite la définition des attributs et connaissances qui caractérisent le mieux les zones d'ombre sur les images.

3.3.1. Connaissances et attributs des zones d'ombre

Les connaissances sont dérivées de certaines propriétés immuables d'un objet ou de ses relations avec son voisinage. Ces propriétés sont traduites en connaissances et utilisées pour analyser les objets ou les discriminer par rapport à d'autres objets présents dans une image. Les connaissances à définir en vue de la discrimination des ombres sont dérivées des propriétés et caractéristiques connues de l'ombre comme par exemple : leur état sombre caractéristique de la faiblesse des valeurs du niveau de gris des pixels à l'ombre, l'orientation de l'ombre selon l'azimut du soleil, la régularité de la forme pour les ombres de bâtiments, les relations contextuelles ombre-objet-soleil, etc.

Les attributs sont définis comme des descripteurs quantifiables qui décrivent mieux les connaissances et autres propriétés d'un objet. Pour le cas des ombres, les attributs à définir seront identifiés parmi les descripteurs qui permettent de quantifier ou d'évaluer les connaissances et autres propriétés intrinsèques de l'ombre. Ils serviront ainsi à mieux discriminer les zones d'ombres des autres surfaces présentes sur l'image. Parmi ces attributs, les plus utilisés sont :

- les attributs spectraux qui permettent de décrire l'état des valeurs spectrales des pixels;
- les attributs de forme et d'orientation qui décrivent la forme et l'orientation des ombres;
- les attributs de texture qui décrivent la texture des surfaces;
- enfin les attributs contextuels qui permettent de décrire les relations de voisinage entre l'ombre et l'objet qui la génère et les surfaces voisines sur lesquelles elle se projette.

La figure 3.2 présente les différents attributs qui décrivent un segment représentant une zone d'ombre. Ces attributs et connaissances sont analysés un peu plus en détail avec les raisons de leur choix.

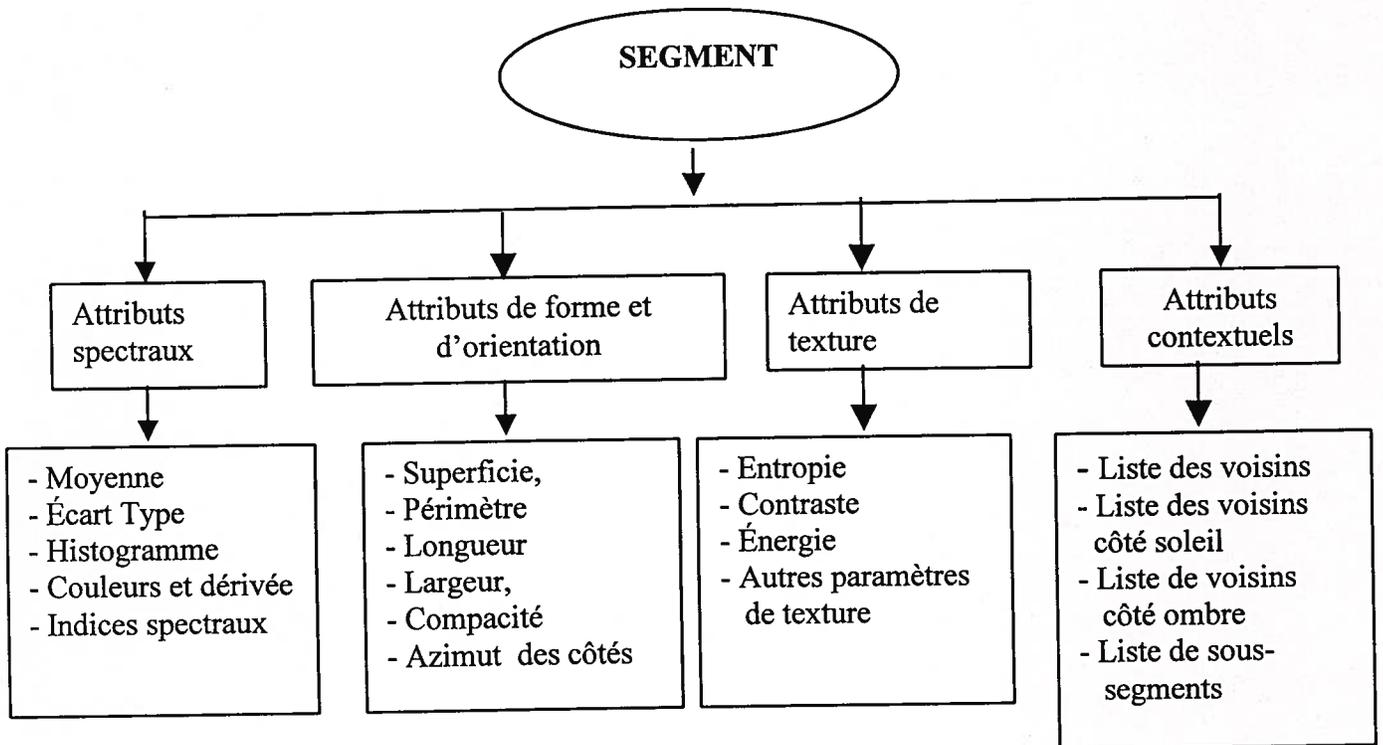


Figure 3.2 : Ensemble d'attributs d'un segment d'ombre.

3.3.1.1. Connaissances et attributs spectraux

Les attributs spectraux sont les caractéristiques les plus utilisées en analyse d'images de télédétection. Ils sont principalement constitués des valeurs spectrales (niveau de gris) des pixels, des moyennes et écarts types de ces valeurs pour chaque segment et de l'histogramme indiquant la variation de ces valeurs. Dans le cas d'images multispectrales, toutes ces valeurs sont calculées dans les différentes bandes spectrales de l'image. L'une des connaissances admises sur les valeurs spectrales des objets ou surfaces à l'ombre est le caractère faible des valeurs radiométriques. La faiblesse de ces valeurs de niveau de gris des pixels dans le visible explique l'état sombre des zones d'ombre sur les images. L'autre connaissance sur les valeurs radiométriques des pixels en zone d'ombre est leur faible variance due à l'homogénéité des zones d'ombre. Les principaux attributs qui décrivent bien ces connaissances sont les statistiques de premier ordre générées sur les pixels. Il s'agit de la moyenne, du maximum, du minimum, etc.

D'autres attributs dérivés des valeurs spectrales sont souvent déterminés et utilisés dans la détection des ombres. Il s'agit des attributs liés à la couleur et à ses transformées (teinte, saturation et intensité) pour les bandes Rouge, Vert et Bleu du visible. Des indices spectraux ou de couleur sont également utilisés dans la détection des zones d'ombre. Il peut s'agir d'un rapport ou de combinaison de bandes. Dans notre approche, nous utiliserons les connaissances et attributs qui sont descriptibles à partir d'une seule bande principale caractéristique d'images panchromatiques. Ces connaissances et ces attributs dérivés sont :

- la faiblesse de niveau de gris des zones d'ombre décrite par la moyenne de niveaux de gris et l'histogramme;
- la faiblesse de la variabilité décrite par l'écart type.

3.3.1.2. Connaissances et attributs de forme et d'orientation

Les attributs de forme décrivent la forme générale des objets. La variation de leur valeur renseigne sur la forme et la taille d'un objet. Ces attributs de forme sont utilisés pour différencier les objets les uns des autres. Ils sont très utilisés en détection des bâtiments ou d'autres infrastructures en milieu urbain sur les images de télédétection. Les attributs de forme peuvent être utilisés également pour détecter les zones d'ombres sur les images, car, tout comme les objets qui les génèrent, les ombres de bâtiments ont des formes régulières qui permettent de les distinguer d'autres types de surface de forme quelconque. Plusieurs descripteurs de forme existent dans la littérature (Definiens, 2002), mais les plus utilisés en analyse d'images sont : la surface, la longueur, la largeur, le rapport longueur/largeur, le périmètre et la compacité.

Les attributs d'orientation indiquent l'orientation générale d'un segment ou celle de certains de ses côtés. Ce sont des attributs géométriques très importants en détection des ombres, car une des principales caractéristiques géométriques des ombres est leur orientation suivant l'azimut du soleil. En effet, sur une image, la forme générale des ombres d'objets fins et élevés comme les tours et les poteaux sont toutes orientées suivant

l'azimut du soleil. Pour ce qui est des objets plus larges comme les bâtiments, les bordures de leurs ombres sont orientées selon l'azimut du soleil. Ainsi, l'orientation d'un ou de plusieurs côtés d'un segment selon l'azimut du soleil permettra de conforter la thèse que ce segment peut être de l'ombre. Le principal attribut d'orientation est l'azimut qui est l'angle que fait une direction avec le Nord.

3.3.1.3. Connaissances et attributs de texture

La texture d'une surface est définie comme l'agencement structurel des petits détails contenus dans cette surface. La texture d'une surface est supposée être invariante de l'ombre, c'est-à-dire qu'elle ne varie pas par le fait que la surface est à l'ombre ou au soleil. Cette propriété est très pertinente dans l'analyse des zones d'ombre en télédétection, principalement quand il s'agit de déterminer le type de surface qu'il y a sous une ombre. Plusieurs paramètres de texture sont décrits dans la littérature et les paramètres suivants dérivés de la matrice de cooccurrence ont été retenus : contraste, entropie, homogénéité, etc.

3.3.1.4. Connaissance et attributs contextuels

Il s'agit des attributs qui décrivent le voisinage immédiat du segment. En détection des zones d'ombre, le voisinage immédiat d'un segment peut apporter une information complémentaire permettant de confirmer la présence d'ombre. La position relative entre le soleil, l'objet et son ombre est toujours connue. En effet, l'ombre d'un objet est toujours située du côté opposé au soleil. Si le soleil est à l'Est, toutes les ombres des objets seront projetées du côté opposé du soleil donc à l'Ouest des objets qui les génèrent. Ainsi, les segments voisins d'une ombre qui sont situés du côté du soleil constituent les objets qui génèrent cette ombre. Tandis que les voisins situés du côté opposé du soleil constituent les surfaces qui reçoivent cette ombre. Pour un segment supposé ombre, son voisinage côté soleil peut permettre de confirmer la présence d'une ombre selon qu'il s'agisse d'un objet de forme régulière pouvant être un bâtiment. Le voisinage côté opposé au soleil d'un segment déjà identifié comme de l'ombre peut fournir une information

utile permettant de rechercher la surface sous l'ombre. Les principaux attributs qui décrivent le contexte du voisinage sont : la liste de tous les segments voisins, la liste des segments voisins côté soleil, la liste des segments voisins du côté opposé au soleil et enfin, la liste des sous-segments qui composent un segment.

3.3.2. Connaissances et attributs retenus dans la nouvelle approche

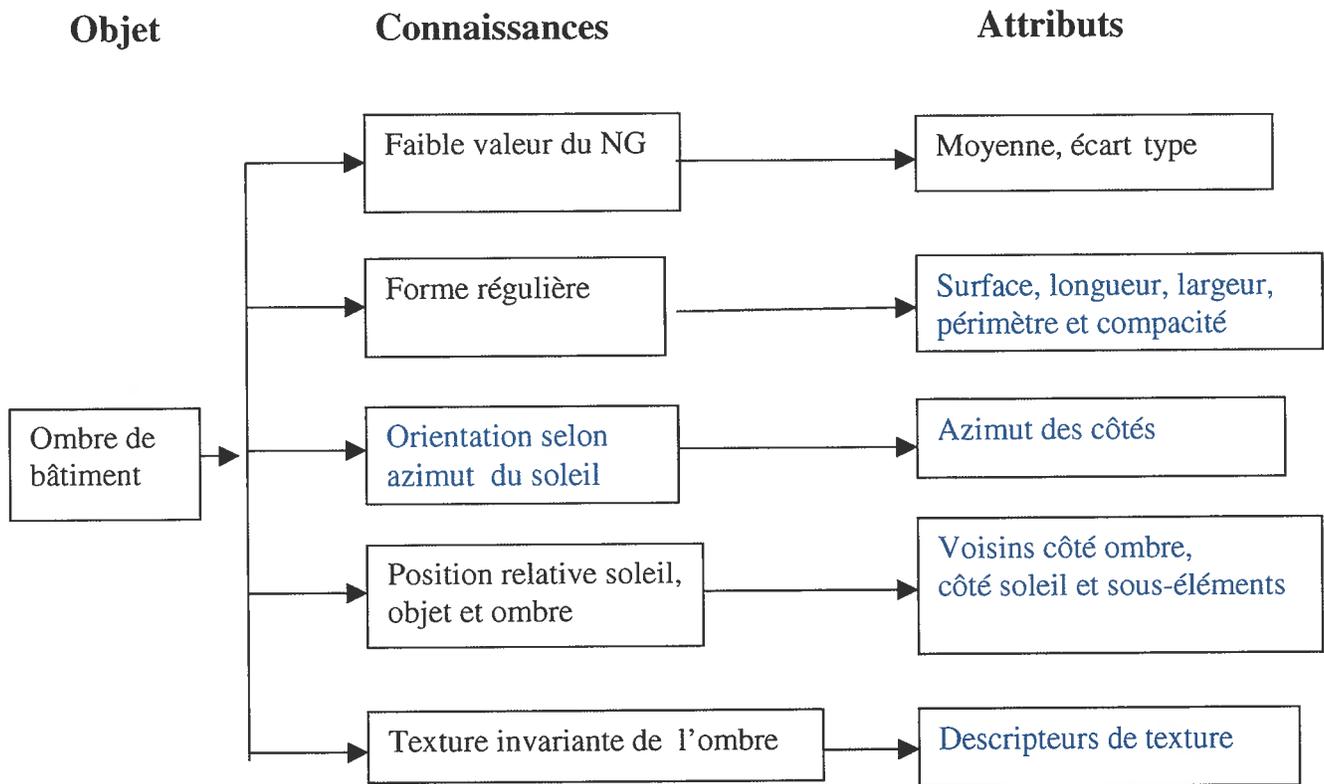
Parmi les connaissances et les attributs cités plus haut, quelques uns seulement seront exploités dans la nouvelle méthode. La figure 3.3 présente les connaissances et attributs caractéristiques d'une ombre ainsi que les connaissances et attributs novateurs utilisés dans la nouvelle approche. Les attributs en bleu sont des attributs dont l'utilisation en détection et exploitation des ombres est novatrice. Il s'agit :

- de la connaissance sur l'orientation de l'ombre selon l'azimut du soleil, caractérisée par l'attribut azimut des côtés de l'ombre qui peut être calculé pour chaque côté d'un segment;
- des attributs géométriques décrivant la forme (surface, longueur, largeur, périmètre et compacité);
- des attributs contextuels décrivant le voisinage;
- des attributs de texture décrivant la texture des surfaces.

La connaissance sur l'orientation de l'ombre selon l'azimut du soleil est utilisée pour la détection des zones d'ombre. Cette connaissance est caractérisée par l'attribut azimut des côtés de l'ombre qui est calculé pour chaque côté du segment d'ombre.

Les attributs géométriques décrivant la forme (surface, longueur, largeur, périmètre et compacité) sont également utilisés pour décrire la forme des segments d'ombre afin de mieux les discriminer. Quant aux attributs contextuels qui décrivent clairement le voisinage de l'ombre côté soleil et côté ombre, ils permettront de confirmer la présence de l'ombre ou de faciliter la restitution de l'information sous l'ombre.

Les attributs de texture présentés dans la figure n'interviennent pas directement dans la détection des ombres, mais sont utilisés pour la restitution de l'information sous l'ombre.



NG : niveau de gris.

Figure 3.3 : Attributs et connaissances pris en compte dans la méthode proposée.

3.4. Méthodologie de la nouvelle approche de détection d'ombre

L'approche proposée est basée sur une analyse hiérarchique à base de règles autour des connaissances et attributs retenus et présentés ci-haut. Le schéma global de la méthodologie présenté à la figure 3.4 se résume comme suit :

- 1) Segmenter l'image pour former des zones homogènes ou segments et calculer les différents attributs.
- 2) Détecter les zones potentiellement ombre par analyse du contraste et appliquer un seuil aux moyennes de niveau de gris pour retenir les zones les plus sombres de l'image.
- 3) Raffiner la détection par analyse locale d'histogramme des zones d'ombre et utiliser des critères de forme et d'orientation pour discriminer les zones d'ombre des autres zones sombres.

- 4) Confirmer la présence d'ombre par analyse contextuelle du voisinage côté soleil et côté ombre.

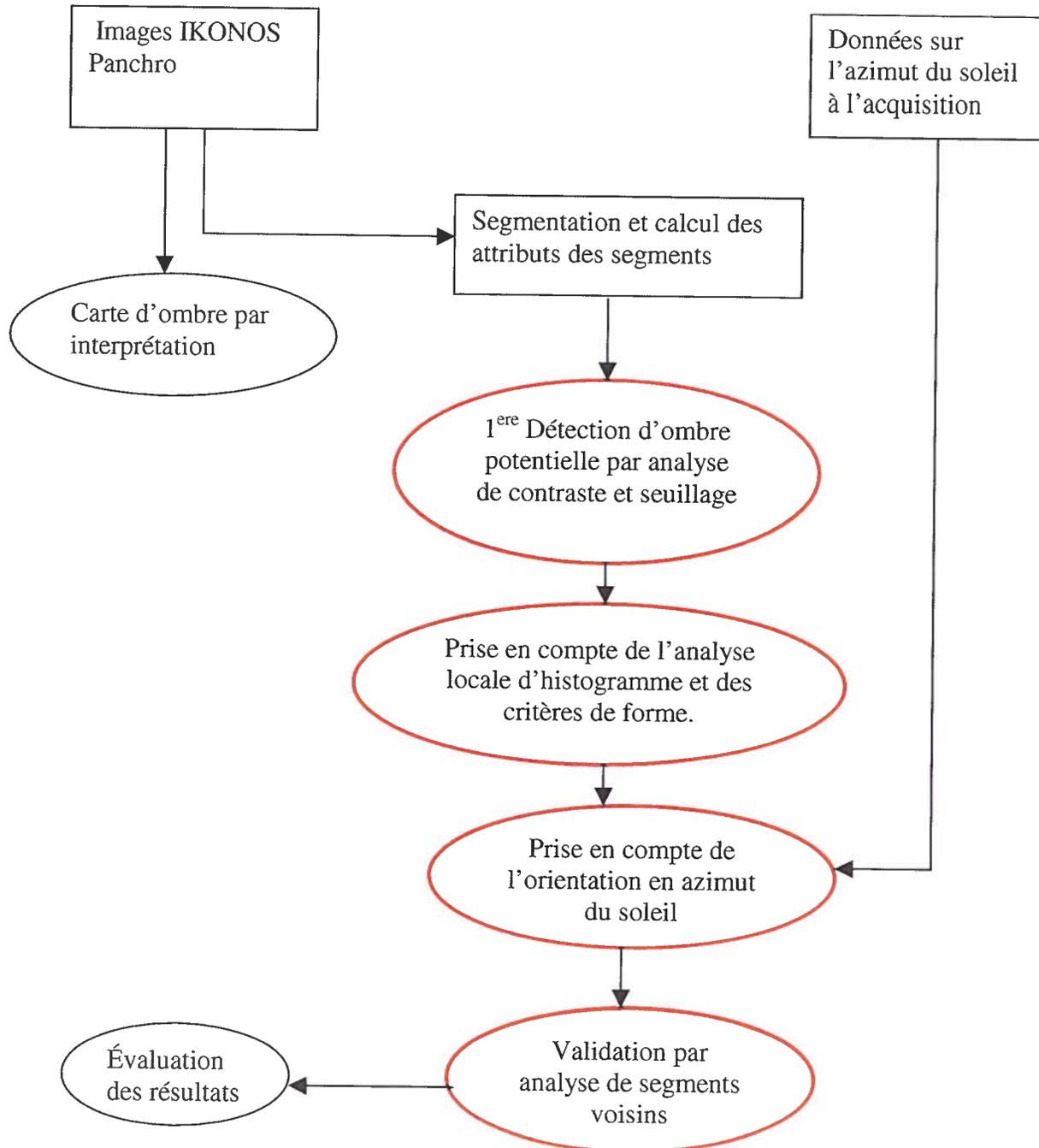


Figure 3.4 : Organigramme méthodologique pour la détection des ombres.

3.4.1. Segmentation et calcul d'attributs

La méthodologie commence par une segmentation de l'image pour regrouper les pixels en zones homogènes (segments). Plusieurs méthodes de segmentation d'images existent dans la littérature; une excellente revue de ces méthodes est faite par Pal et Pal. (1993). Elles sont classées en trois grands groupes selon leur principe de base : Les méthodes basées sur la détection du contenu des segments, celles basées sur les contours des segments et les méthodes hybrides jumelant les deux principes. Nous avons utilisé la technique de segmentation hiérarchique du logiciel E-cognition (Definiens, 2002), qui se classe parmi les méthodes de propagation. Cette technique de segmentation développée par Baatz et Schaepe (2000) est une méthode hiérarchique et multi-échelle. À chaque niveau d'échelle, la segmentation se fait comme suit :

- les segments voisins sont fusionnés selon un critère appelé coût de fusion. Ce coût de fusion est la mesure d'homogénéité entre deux segments adjacents. Il est calculé en tenant compte des valeurs de niveau de gris des segments et de certains critères de forme des segments.
- la fusion entre segments voisins et adjacents s'arrête quand le coût de fusion atteint un seuil d'arrêt fixé par l'utilisateur.
- La segmentation reprend sur la base du même principe pour le niveau d'échelle suivant.

Cette méthode offre plusieurs avantages qui constituent les raisons de notre choix.

- L'approche multi-échelle de la méthode permet de contrôler la taille des segments en fonction des objets présents dans l'image. Cette possibilité permet de segmenter l'image sur plusieurs niveaux et choisir le niveau qui convient le mieux aux types de surfaces présentes dans l'image.
- Des critères de forme sont utilisés dans le calcul du coût de fusion entre segments adjacents en plus du contexte du voisinage. La plupart des méthodes de

segmentation se limitent aux valeurs de niveau de gris des segments et au contexte du voisinage.

- Pour chaque segment dans tous les niveaux d'échelle, des paramètres descripteurs sont calculés. Il s'agit des attributs spectraux liés au niveau de gris (moyenne, écart types, etc.), des attributs de forme (longueur, largeur, surface, compacité, etc.), des attributs de voisinage (distance par rapport à un segment spécifié, liste de segments adjacents, etc.).

Le choix de niveau d'échelle a été fait de façon à permettre d'obtenir un très grand nombre de segments très proche de la réalité du terrain et aussi permettant de conserver le maximum de détails, ce qui permet une conservation de l'information et une réduction du volume des données. La conservation de l'information qui se traduit par la conservation des plus petites variations de niveau de gris est très importante pour l'analyse des ombres. En effet, une même ombre peut se projeter sur plusieurs surfaces. C'est le cas d'une ombre de bâtiment qui se projette en partie sur une pelouse et sur le stationnement. En optant pour un très grand nombre de segments, on peut préserver cette différence par des segments différents de la même ombre sur la pelouse et sur le stationnement.

Plusieurs attributs descripteurs des segments ont également été calculés. Il s'agit d'attributs décrivant les caractéristiques spectrales, morphologiques, contextuelles et texturales de chaque segment, calculés directement dans le logiciel. Il s'agit essentiellement de la moyenne et de la variance pour les attributs spectraux, de la superficie, de la longueur, de la largeur, de la compacité pour ce qui est des attributs géométriques. Les autres attributs liés à l'orientation et au contexte du voisinage ainsi qu'à la texture sont calculés en dehors du logiciel E-cognition.

3.4.2. Première détection par analyse du contraste et du seuillage

Il s'agit à cette étape de rechercher tous les segments qui peuvent être potentiellement de l'ombre. Tous les segments dont la moyenne du contraste avec leurs voisins immédiats est négative ou nulle ont été retenus. Ce sont tous les segments plus sombres par rapport à

leur entourage. Mais parmi ces segments, il y en a qui ne peuvent pas être de l'ombre malgré un contraste négatif. Il s'agit de segments suffisamment éclairés, mais peut-être moins réfléchissants que leur entourage. C'est pourquoi l'introduction d'un seuil permet d'éliminer ces segments bien éclairés, mais dont le contraste avec l'entourage est négatif. Ce seuil est fixé à partir des valeurs de niveau de gris de certaines surfaces à l'ombre relevées sur les images. À partir de l'histogramme de l'image contenant les ombres à détecter, un seuil est choisi de telle sorte que tous les segments sombres soient préservés tout en éliminant ceux qui sont suffisamment éclairés. Ainsi, les segments qui sont potentiellement de l'ombre sont détectés à l'issue de cette étape. Ils sont alors étiquetés et utilisés pour la suite de l'analyse.

3.4.3. Analyse locale et prise en compte des critères de forme

Après la première détection des zones d'ombre potentielle, plusieurs segments sans ombre sont confondus avec ceux qui sont réellement de l'ombre. C'est ici que l'analyse locale d'histogramme et les critères de forme sont utilisés pour discriminer les segments d'ombre des autres. Comment sont alors utilisés ces différents critères pour faire cette discrimination?

3.4.3.1 Analyse locale d'histogramme sur les zones d'ombre

L'analyse de l'histogramme de l'image sur ces zones supposées ombre fait ressortir deux classes assez distinctes : les zones plus sombres considérées comme ombre (projetée et portée) et les zones moins sombres qui constituent la pénombre et autres objets sombres de même nature spectrale. Un histogramme sur l'ensemble des zones d'ombre potentielle est alors calculé (un exemple d'histogramme sur les zones d'ombre dérivé de l'image Ikonos du Campus est présenté à la figure 3.5) Sur cet histogramme généralement de forme bimodale, les maxima et les minima locaux sont identifiés. Un seuil qui minimise l'erreur de classification entre les deux plus grands maxima est calculé de manière automatique. Les zones d'ombre ont un niveau de gris très faible quelque soit le type de surface sous ces ombres. Ainsi, tous les segments détectés comme ombre potentielle

dont, la moyenne des niveaux de gris est inférieure au seuil déterminé précédemment sont considérés comme de l'ombre sous réserve de la validation par analyse contextuelle des voisins côté soleil. Pour les segments restants, l'analyse se poursuit en utilisant des critères de forme et d'orientation pour discriminer les ombres des surfaces sans ombre.

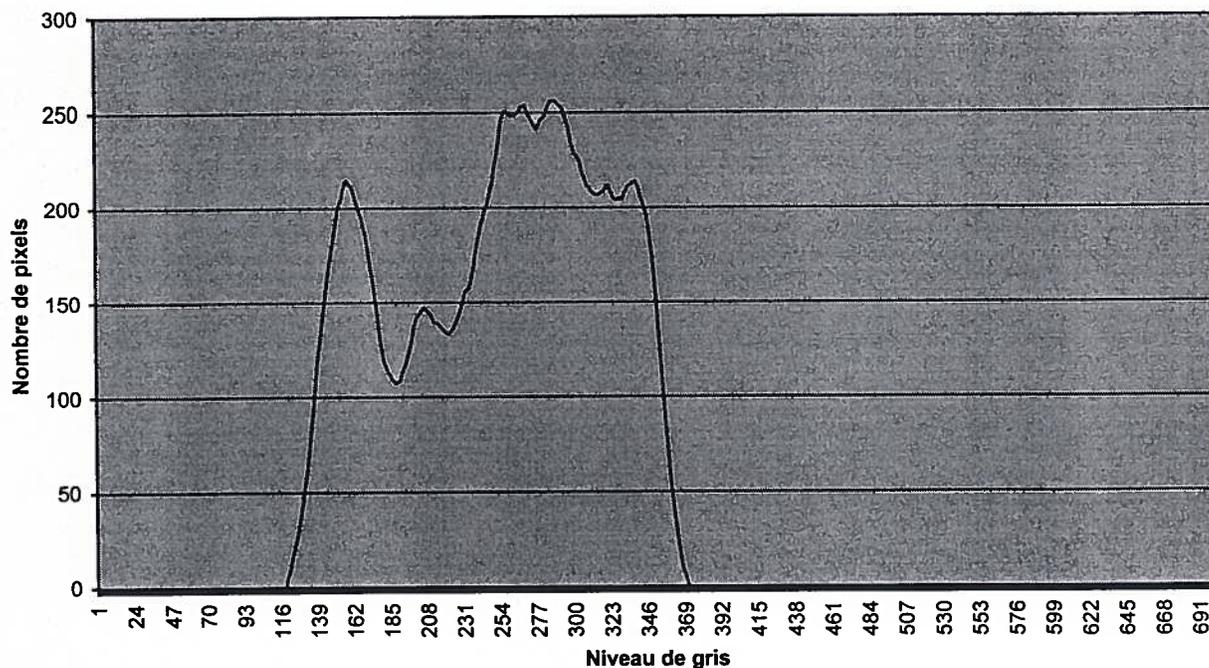


Figure 3.5 : Histogramme calculé sur les zones d'ombre potentielle à partir de l'image du campus.

3.4.3.2. Apport des attributs de forme

Les attributs de forme utilisés dans cette approche sont : la superficie, le rapport surface/longueur versus la largeur, la compacité et enfin l'orientation. Le choix porté sur ces attributs s'explique pour plusieurs raisons.

La superficie est un indicateur de la taille du segment. Les zones d'ombre de bâtiment sont caractérisées par des segments de moyenne et grande taille ce qui permet de les distinguer des tout petits segments.

Le rapport superficie/longueur versus la largeur est un indicateur sur la régularité de la forme du segment. Ainsi, un segment de forme régulière aura un rapport surface/longueur très proche de la largeur, tandis qu'un segment de forme irrégulière aura un rapport surface/longueur nettement différent de la largeur.

La compacité est définie comme étant le rapport entre la superficie d'un polygone (segment) sur la superficie d'un cercle qui a le même périmètre (Definiens, 2001).

$$\text{Compacité} = 4\pi Sp/(\text{pr})^2 \quad (5)$$

Sp : surface du polygone et **pr** : périmètre du polygone.

La compacité varie de 0 pour un objet très allongé ou irrégulier à 1 pour un objet de forme circulaire. Ce critère permettra de distinguer les ombres de bâtiment de celle des arbres qui ont tendance à refléter la forme de la couronne des arbres qui a une très forte compacité.

Tous ces attributs de forme sont pris en compte dans la détection des ombres. Cette prise en compte est résumée à la figure 3.7 et se décrit comme suit :

1. Aux segments non retenus comme ombre à la suite de l'analyse locale d'histogramme, on applique la règle suivante du critère de régularité de forme. Tous les segments non retenus comme ombre à l'étape précédente, dont la moyenne du niveau de gris est inférieure à la moyenne de tous les segments supposés ombre et dont le rapport surface/longueur est inférieur à la largeur (forme régulière) sont considérés comme de l'ombre sous réserve de confirmation par l'analyse contextuelle.
2. Les segments dont la moyenne du niveau de gris est supérieure à la moyenne de tous les segments et dont le rapport surface/longueur est inférieur à un seuil dérivé de l'estimation de la taille de la pénombre comme indiqué à la figure 3.6. Soient L_2 : la taille de la pénombre; L_1 : la taille de l'ombre, H : la hauteur du soleil

(distance terre-soleil), D : le diamètre du soleil, et h : la hauteur de l'immeuble, la taille de la pénombre L_2 est alors exprimée par la relation :

$$L_2 = D * h / H - h \quad (6)$$

Le seuil de 4 est retenu en considérant une hauteur moyenne de bâti estimée à 20 m et prenant en compte le diamètre du soleil et la distance terre-soleil.

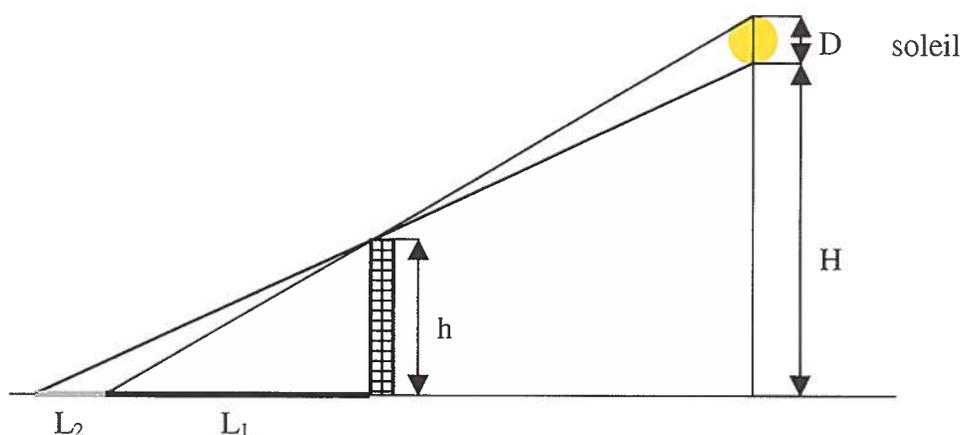
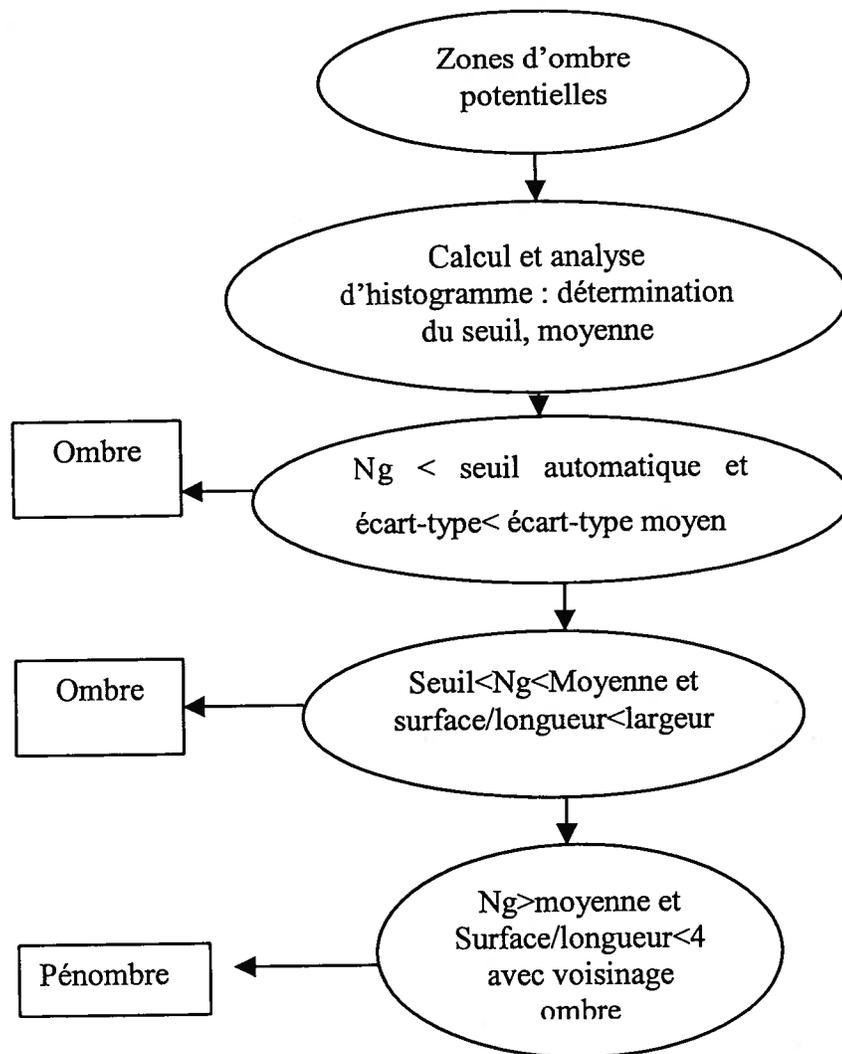


Figure 3.6 : Taille de l'ombre et de la pénombre en fonction de la hauteur de l'objet, de la distance terre-soleil et du diamètre du soleil.

3. Pour différencier les ombres de bâtiment de celles des arbres, la compacité est utilisée. Un objet de forme carrée a une compacité voisine de 78 %. Tous les segments d'ombre dont la compacité est supérieure à celle d'un carré sont considérés comme des ombres des cimes d'arbre, tandis que ceux dont la compacité est inférieure à ce seuil sont considérés comme ombre de bâti.
4. Les segments d'ombre voisins sont fusionnés pour former des segments géométriquement plus significatifs. Plusieurs portions d'ombre sont alors fusionnées pour former des ombres de bâtiment de forme plus complexe.



Ng : niveau de gris moyen de chaque segment

Figure 3.7 : Analyse d'histogramme et de critères de forme dans la détection des ombres.

3.4.3.3. Apport de l'orientation suivant l'azimut du soleil

La fusion des segments d'ombre voisin permet de former des segments géométriquement plus représentatifs. Par exemple une ombre qui se projette sur différents types de surface peut se traduire après segmentation par plusieurs segments d'ombre voisins, qui une fois fusionnés, donnent un segment dont la forme géométrique est plus significative. Ensuite, les orientations de chacun des côtés du segment sont déterminées pour être comparées à l'azimut du soleil. Les côtés des segments d'ombre visés dans cette approche sont les limites d'ombre générées par les bordures verticales des objets comme l'indique la figure

3.8 qui présente un schéma illustrant l'orientation des bordures de l'ombre en fonction de l'azimut du soleil. La représentation du soleil au nord-ouest est simplement à titre illustratif. Les segments dont l'orientation d'un ou deux côtés coïncide avec l'azimut du soleil plus ou moins une tolérance ϵ , sont considérés fortement comme de l'ombre, sous réserve de validation. La tolérance ϵ , fixée à 3 degrés, résulte des imprécisions potentielles dans le calcul des orientations à partir des coordonnées des pixels et des imprécisions induites par la vectorisation des segments en polygones. Le choix de la valeur 3 pour la tolérance ϵ est justifié en annexe 2. Les segments d'ombre dont l'orientation d'aucun côté ne coïncide avec l'azimut du soleil, sont également soumis à la validation par la présence d'objets susceptibles de générer cette ombre.

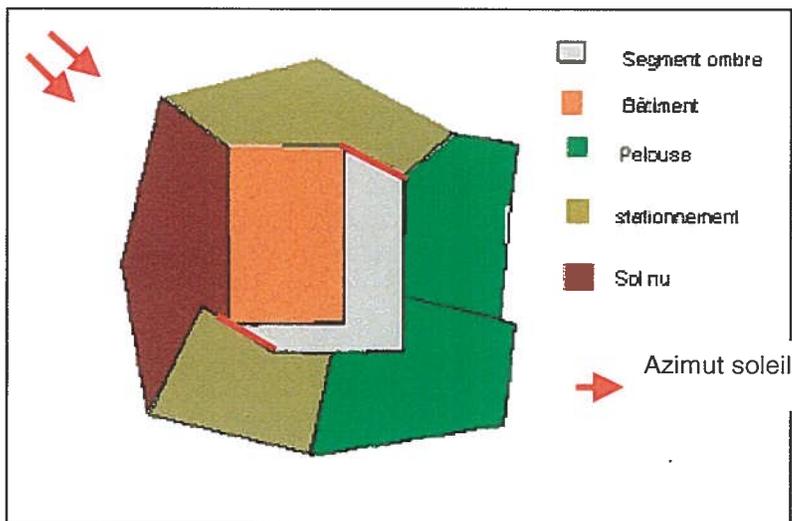


Figure 3.8 : Schéma indicatif de l'orientation d'un ou plusieurs côtés de l'ombre selon l'azimut du soleil.

3.4.4. Confirmation de la présence d'ombre

La présence d'ombre est confirmée au niveau de chaque segment d'ombre par l'analyse contextuelle de son voisinage côté soleil. Il s'agit d'abord de vérifier si parmi les segments voisins de l'ombre, situés du côté soleil, il y a des segments qui peuvent former

un bâtiment susceptible de générer cette ombre. Pour cela, tous les segments côté soleil de chaque ombre sont identifiés comme indiqué à la figure 3.8. La figure 3.8.a présente une illustration d'un segment d'ombre (en gris) avec tous les segments voisins possibles tandis qu'à la figure 3.8.b, tous les segments en jaune constituent les segments situés du côté soleil dont celui qui génère l'ombre. Les segments voisins qui ont sensiblement la même valeur radiométrique sont fusionnés pour former des objets plus représentatifs et dont la forme peut être mieux analysée. Cette analyse de forme consiste à évaluer la forme du segment ainsi formé. Si cette forme est régulière, le segment est considéré comme un bâtiment susceptible de générer l'ombre analysée. Ce segment d'ombre est donc confirmé comme étant de l'ombre de bâtiment.

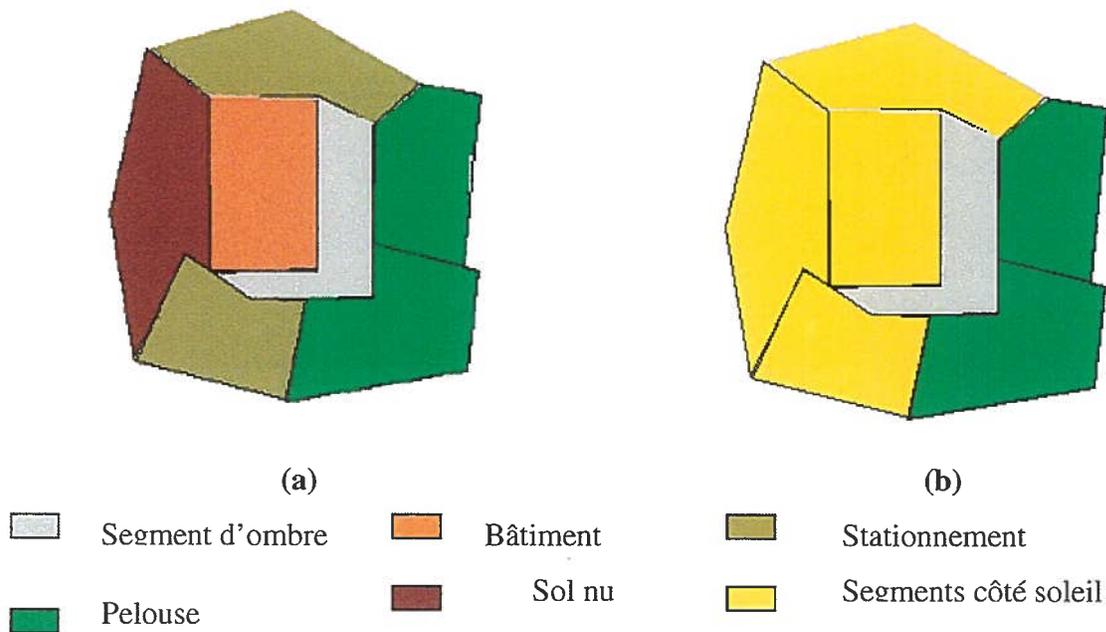


Figure 3.8 : Segments susceptibles de générer l'ombre : (a) ombre entourée de plusieurs segments, (b) segments voisins situés du côté soleil.

3.5. Conclusion partielle

L'approche objet est bien adaptée à l'analyse d'images de télédétection. La méthode de détection d'ombre proposée s'inspire bien de cette approche en orientant les analyses sur les segments et leurs attributs. En effet, plusieurs attributs et connaissances caractérisent un segment d'ombre dans une image de télédétection. Seuls ceux qui caractérisent le mieux les ombres ou qui ont un apport nouveau sont retenus pour la détection des zones d'ombre générées par des bâtiments en milieu urbain. C'est principalement les attributs spectraux, de forme, d'orientation et de voisinage des zones d'ombre dans l'image. L'intégration de ces connaissances et attributs se fera de manière hiérarchique en utilisant une approche à base de règles pour discriminer les zones d'ombre des autres surfaces présentes sur l'image.

Avant d'appliquer cette nouvelle approche aux images de télédétection, il est nécessaire de présenter les sites d'étude, les types d'images utilisées pour tester la méthode et également les données pour valider les résultats.

4. SITES ET DONNÉES D'ÉTUDE

La zone d'études retenue pour ces travaux est la Ville de Sherbrooke, Québec, Canada. Deux sites caractéristiques ont été sélectionnés pour tester la nouvelle approche de détection d'ombre et les types d'exploitation développés. Les données de base sont constituées d'images IKONOS, de plans d'occupation du sol et de mesures sur le terrain.

4.1. Présentation de la ville de Sherbrooke

La ville de Sherbrooke est située au Sud-est de Montréal dans la province de Québec au Canada. Sa position géographique est définie par la latitude de 45° 24' 00" Nord et la longitude de 71° 54' 00" Ouest.

C'est une ville de taille moyenne et de style urbain nord américain où les bâtiments ne sont pas clôturés. Sherbrooke ne possède pas de très grandes tours d'immeubles dont les ombres se projettent les unes sur les autres, ce qui pourrait rendre difficile toute possibilité d'exploitation de ces ombres. Elle est constituée de quartiers caractérisés par un type précis d'occupation et d'utilisation du sol. Il s'agit de quartiers de type résidentiel, commercial et industriel et de grands équipements collectifs. Le choix de la ville de Sherbrooke s'explique par la disponibilité des images IKONOS que nous utiliserons dans le cadre de cette recherche et aussi la connaissance *a priori* du terrain.

4.2. Choix des sites d'étude

Deux sites ont été retenus en fonction de leurs caractéristiques. Le premier site est le campus ouest de l'Université de Sherbrooke (figure 4.1), considéré comme un quartier de type administratif avec équipements collectifs. Il offre plusieurs immeubles facilement identifiables, de hauteur moyenne et de densité d'occupation assez faible. Les zones d'ombre sur ce site sont bien identifiables. Le second site retenu est le Centre-ville de Sherbrooke (figure 4.2) qui possède quelques immeubles en hauteur et dont la densité de

bâti est relativement plus importante que sur le campus. Les zones d'ombre sur ce site sont également assez denses.

4.3. Données d'étude

Deux groupes de données seront exploitées dans cette étude : les images IKONOS de la ville de Sherbrooke et plusieurs données auxiliaires qui s'y rattachent.

4.3.1. Données images

Les principales données exploitées dans le cadre de ce projet sont des images IKONOS en mode panchromatique, acquise le 20 mai 2001. Ces données images présentent les caractéristiques suivantes :

- Limite de résolution spatiale au sol : 1 m.
- Échelle de niveau de gris : acquisition en 11 bits variant de 0 à 2047.
- Heure et date d'acquisition : 15 heures 50 GMT, 20 mai 2001.
- Position du capteur : élévation : 67,5 degrés, azimut : 354,0 degrés.
- Position du soleil (élévation et azimut) : élévation : 62,5; azimut : 151,8 degrés.

Les images ont été acquises par temps clair avec une atmosphère dégagée et une très bonne visibilité.

Ce sont les images panchromatiques qui sont utilisées dans cette recherche, car elles sont les plus entachées par la présence d'ombre. Deux extraits d'images couvrant les deux sites d'études sont présentées aux figures 4.1 et 4.2. Des images en mode multispectral ont été acquises dans les mêmes conditions par le capteur et dont les caractéristiques sont : quatre bandes spectrales (Bleu, Vert, Rouge et Proche infra-rouge) et la résolution spatiale est de 4 m. Les effets d'ombre sur ces images ne sont pas aussi présents que sur les images panchromatiques, mais tout de même la méthodologie développée pourrait être adaptée à ces images.



Figure 4.1 : Image panchromatique du site 1 (Campus Ouest de l'Université de Sherbrooke).

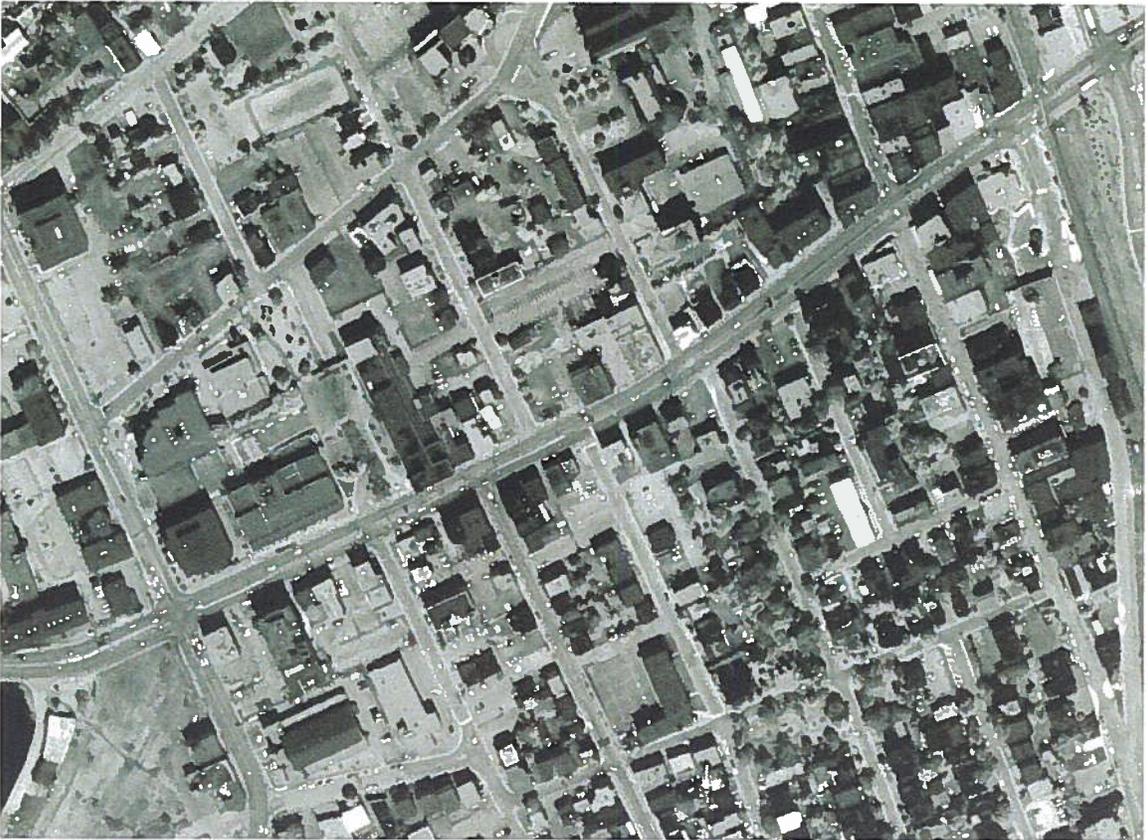


Figure 4.2 : Image panchromatique du deuxième site (Centre-ville de Sherbrooke).

4.3.2. Données auxiliaires

Des données auxiliaires indispensables (plans, cartes, etc.) ont été collectées. Il s'agit principalement des cartes numériques du réseau routier, du plan parcellaire des propriétés et du bâti couvrant le territoire de l'ancienne ville de Sherbrooke. Toutes ces données ont été fournies par le service chargé de la géomatique municipale de la ville de Sherbrooke. Elles seront utilisées pour les corrections géométriques et pour la validation de certains résultats de la recherche, comme la restitution de l'information sous l'ombre.

D'autres données complémentaires ont été collectées. Il s'agit de la hauteur des principaux bâtiments sur le site du campus Ouest. Ces hauteurs ont été dérivées des plans architecturaux archivés au service des immeubles de l'Université de Sherbrooke. Un extrait est présenté au Tableau 4.1. Ces données sur la hauteur des immeubles serviront à la validation des hauteurs calculées à partir des ombres détectées en tenant compte de l'orientation et de la hauteur du soleil.

Tableau 4.1 : Hauteurs de quelques bâtiments sur le Campus Ouest.

Immeubles	Hauteurs (m)
FLSH (Bloc A1)	12
FLSH (Bloc A4)	13,41
Bloc A3	6,71
Bloc A5	16,15
Bloc A6	
Bloc A7(Aile1)	11,58
Bloc A7(Aile2)	8,69
Bloc A8	12,5
Faculté d'éducation (A2 et façade)	12,5
Faculté d'éducation (Façade)	9,75
Résidences	8,84
Fac des sciences (Chimie)	15,24
Fac des sciences (Physique)	11,58
Fac des sciences(Biblio1)	16,46
Fac des sciences(Biblio2)	14,02
Fac de génie (Bloc2)	15,24
Fac de génie(Bloc1)	10,82
Cheminée	49,52

En plus de ces données sur les hauteurs, un plan numérique du Campus comprenant le réseau routier et les bâtiments a été fourni par le service des immeubles de l'Université.

4.4. Prétraitements des données

Plusieurs types de prétraitement en vue d'extraire les zones d'étude et de ressortir certaines caractéristiques des surfaces sous l'ombre sont effectués.

4.4.1. Les types de prétraitement

Le prétraitement des données a consisté tout d'abord en une extraction des images couvrant les deux sites d'étude à partir de l'image entière du 20 mai 2001 couvrant la ville de Sherbrooke. Ensuite, une interprétation des zones d'ombre a été réalisée à partir des caractéristiques spectrales de ces zones et de la connaissance du terrain. Le résultat de cette interprétation est une carte des zones d'ombre qui servira à la validation des résultats fournis par la méthode de détection développée.

L'objectif de notre projet étant le développement d'une méthodologie de détection des zones d'ombre, les préalables de correction atmosphérique n'étaient pas nécessaires vue la qualité des images et l'approche d'analyse adoptée qui est celle du traitement d'images sur la base des connaissances (forme, orientation et voisinage). Les déformations géométriques présentes sur l'image ont été évaluées par Lhomme *et al.* (2004). Il serait utile et nécessaire de corriger ces images pour les superposer avec la base cartographique de la Ville de Sherbrooke. Cependant, la limite de résolution altimétrique (10 m) du modèle numérique de terrain disponible n'améliorera en rien la précision géométrique de ces images de 1 m de limite de résolution spatiale. Donc, les données altimétriques sur les sites d'étude permettant de faire une correction géométrique efficace ne sont pas disponibles. Le manque de cette correction n'a pas d'influence sur le développement de la méthode de détection des zones d'ombre en milieu urbain.

Dans l'exploitation des ombres pour calculer la hauteur des objets à partir de leur ombre, la prise en compte des déformations dues au relief et à la hauteur des objets est indispensable. Cependant, la résolution du modèle numérique du terrain (10 m) ne permet

pas d'obtenir des pentes précises sur une longueur voisine de la taille des ombres. L'influence de ces pentes n'est pas prise en compte dans notre approche.

4.4.2 Caractéristiques de quelques surfaces à l'ombre

Pour illustrer l'impact de l'ombre sur les différents types de surface retrouvée en ville, un tableau comparatif des valeurs de niveau de gris de différentes surfaces a été préparé (Tableau 4.2). Il s'agit des surfaces : pelouse, asphalté (route), asphalté (parking), sol nu et trottoir. Ces surfaces ont été identifiées sur l'image et vérifiées sur le terrain pour être sûr qu'il s'agit des mêmes surfaces à l'ombre.

La comparaison des valeurs de niveau de gris indiquent clairement la faiblesse des valeurs à l'ombre comme illustré sur la figure 4.3. Les valeurs de niveau de gris à l'ombre étant presque identiques quelque soit la surface, il est donc pratiquement impossible de prédire à partir de ces valeurs que telle ombre provient de telle surface.

L'écart type des valeurs des pixels est également faible sur les surfaces à l'ombre en comparaison avec l'écart type des mêmes surfaces au soleil. Cette faiblesse indique que les valeurs des pixels dans l'ombre n'ont pas de grande variabilité, mais tout de même il existe de l'information sous l'ombre. Cette présence d'information sous l'ombre est confirmée par les histogrammes des figures 4.4 et 4.5. Il s'agit des premiers tests d'analyse effectués sur les régions d'ombre. En effet, un seuil a été choisi pour rehausser toutes les zones d'ombre sur l'image du campus et du Centre-ville. Ensuite un histogramme sur chacune des images a été généré seulement sur les zones d'ombres. La figure 4.4 représente l'histogramme sur les régions d'ombre sur le campus tandis que la figure 4.5 représente celui du Centre-ville.

Tableau 4.2 : Valeurs radiométriques de certaines surfaces à l'ombre et au soleil relevées sur les images du campus

	Surfaces au soleil				Surfaces à l'ombre			
	Mini	Maxi	Moyenne	Écart type	Mini	Maxi	Moyenne	Écart type
Pelouse	441	584	520	23,1	124	198	149	12,6
Asphalte (Route)	348	529	420	18,0	127	223	145	16,8
Asphalte (Stationnement)	398	534	464	12,5	133	228	149	21,9
Sol	299	475	386	42,7	130	294	157	27,9
Passage cimenté	451	815	585	73,0	122	228	147	19,8

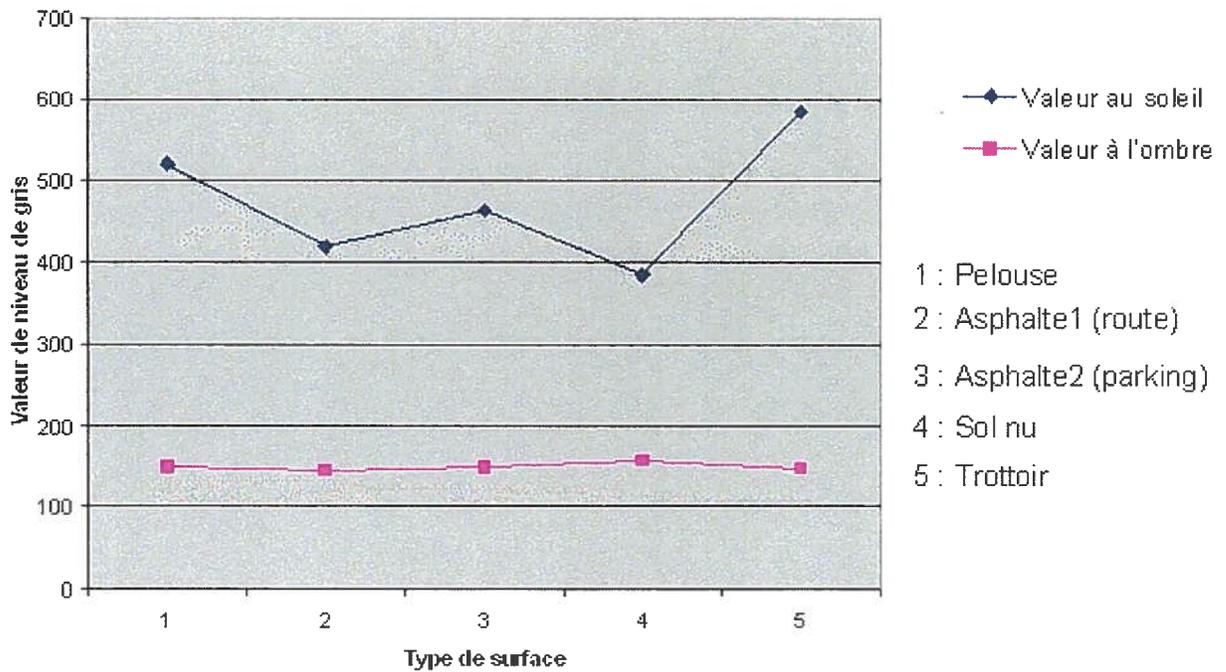


Figure 4.3 : Comparaison des valeurs à l'ombre et au soleil de certaines surfaces (valeurs relevées sur l'image).

La forme multimodale de ces histogrammes relève l'existence d'information sous les zones d'ombre et indique qu'il existe plusieurs classes d'ombre. Il est donc possible d'en extraire de l'information en exploitant ces histogrammes localisés sur ces zones qui sont potentiellement de l'ombre.

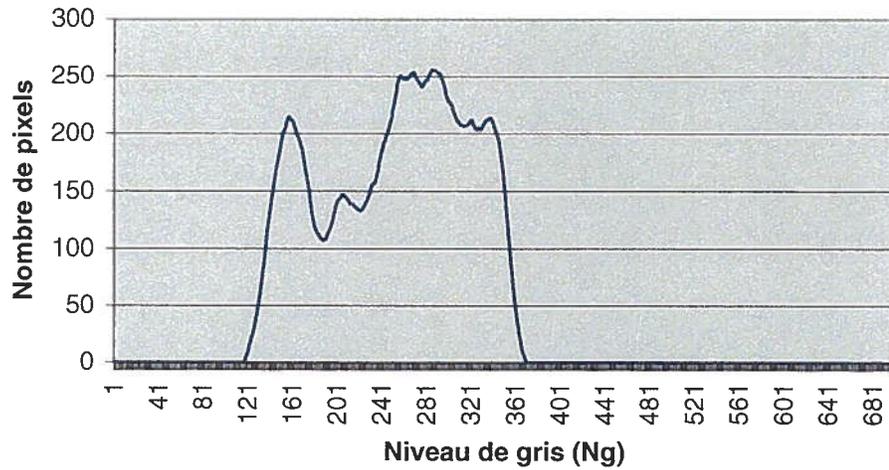


Figure 4.4. : Histogramme des zones potentiellement ombre sur le site du campus.

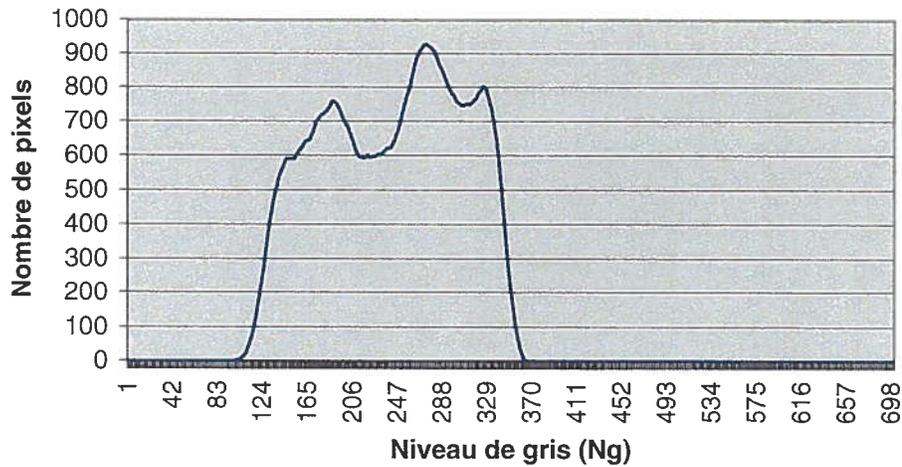


Figure 4.5 : Histogramme de zones potentiellement ombre au Centre-ville.

5. DÉTECTION DES OMBRES DU BÂTI SUR LES IMAGES IKONOS

La nouvelle méthode de détection a été appliquée aux images IKONOS du Campus ouest et du Centre-ville de Sherbrooke. Les résultats obtenus sur les deux sites sont présentés, évalués et analysés. Pour une meilleure analyse de la démarche, les différentes étapes de l'application sur les images du campus sont présentées; c'est aussi le cas des résultats partiels obtenus à chacune des étapes.

5.1. Segmentation de l'image et calculs d'attributs

Cette première étape consiste à regrouper les pixels voisins et homogènes en entités appelées segments, et à calculer les principaux attributs de chacun des segments. La technique de segmentation utilisée est la propagation hiérarchique des régions.

5.1.1. La segmentation

Le choix de la méthode de segmentation a été guidé par deux principes essentiels qui sont la disponibilité opérationnelle de l'outil de segmentation et la possibilité offerte de segmentation hiérarchique permettant un contrôle du niveau de segmentation. C'est ainsi que notre choix a été porté sur la méthode de segmentation hiérarchique offerte par le logiciel E-cognition de Definiens, (2002) qui offre également d'autres avantages sur le calcul des attributs. La segmentation hiérarchique offerte par ce logiciel permet de contrôler le niveau de regroupement des pixels dans la formation des segments. Ainsi, la segmentation hiérarchique commence par un très grand nombre de segments pour le premier niveau de segmentation. La segmentation hiérarchique de Definiens (2002) a été utilisée comme souligné précédemment. Les segments homogènes voisins dont les caractéristiques sont presque similaires sont fusionnés pour former de nouveaux segments. Le critère d'arrêt de la fusion des segments est fixé par l'utilisateur en fonction de ses besoins. Dans notre cas, le niveau de regroupement est arrêté en fonction de la taille des segments en vue de préserver au maximum l'information sous l'ombre. Comme

plusieurs surfaces peuvent se retrouver sous la même ombre, il est important de préserver cette légère variabilité en conservant les différents segments qui représentent ces surfaces. Le niveau de regroupement de la segmentation hiérarchique permet de préserver au maximum la variabilité présente dans l'image à travers un grand nombre de segments sans pour autant se retrouver avec un très grand nombre de segments géométriquement moins significatifs.

5.1.2. Calcul des attributs des segments

Après la segmentation, des attributs spectraux, géométriques et texturaux ont été calculés pour chaque segment. Certains de ces attributs sont directement calculés pendant la segmentation et d'autres ont été calculés après.

a. Attributs spectraux : les attributs spectraux calculés et retenus pour la suite de l'analyse sont la moyenne de niveau gris de tous les pixels du segment et son écart type. La moyenne est utilisée pour le seuillage de niveau de gris et l'analyse locale tandis que l'écart type est exploité dans la phase analyse locale d'histogramme.

b. Attributs géométriques : les attributs géométriques retenus sont utilisés pour décrire la forme du segment. Il s'agit de :

- la surface calculée à partir de la taille du segment (nombre de pixels) multipliée par la taille du pixel. Dans le cas des images IKONOS, la taille du pixel est égale à l'unité.
- la longueur et la largeur qui sont les dimensions du plus petit rectangle qui englobe le segment.
- le périmètre du segment représentant le contour du segment. Il est calculé à partir du nombre de pixels dans le contour du segment multiplié par la taille du pixel.
- la compacité du segment qui décrit la forme par le rapport entre la superficie et le périmètre.

c. les attributs de texture : plusieurs attributs de texture ont été retenus et calculés pour évaluer celui qui contribue le mieux dans la restitution de l'information sous l'ombre. Tous les attributs sont dérivés de la matrice de cooccurrence de Haralick, (1979); l'entropie, l'énergie, le contraste et la corrélation. En dehors de l'entropie qui a été calculée dans le logiciel E-cognition, tous les autres indicateurs de texture ont été calculés selon une fenêtre de 5*5 et suivant la direction horizontale. Les attributs de texture sont utilisés dans la recherche de l'information sous l'ombre, c'est-à-dire le type de surface à l'ombre en comparant sa texture avec les surfaces voisines qui ne sont pas à l'ombre.

Après l'étape de segmentation et de calculs d'attributs des segments, les données sont intégrées dans une base de données. Chaque segment est numéroté dans la base de données et tous les attributs qui lui sont rattachés, sont indexés comme présentés au tableau 5.1 qui est un extrait de 30 segments tirés de la base de données constituée après segmentation. Il s'agit des 30 premiers segments issus de la base de données obtenue après segmentation de l'image du Campus. Chaque segment et ses attributs sont organisés comme une entité indépendante. Au cours de l'analyse, d'autres attributs liés au contexte du voisinage et aux composantes du segment sont ajoutés au fur et à mesure.

Tableau 5.1 : Structuration des attributs de segment (moyenne, écart type, surface, longueur, largeur, texture, etc.).

Numéro	Moyenne	Écart Type	Texture Entropie	Surface	Longueur	Largeur	Orientation Générale	Compacité
1	467.3	16.16	5.722	837	71	18	88.673	0.244
2	505.1	39.37	6.195	286	63	7	89.993	0.145
3	458.3	9.07	4.997	132	41	5	89.023	0.149
4	530.5	50.24	5.323	25	10	3	4.586	0.465
5	479.7	15.91	5.425	485	53	14	82.785	0.313
6	411.0	16.77	5.742	180	41	9	85.078	0.225
7	423.9	18.89	6.192	492	81	12	87.994	0.163
8	455.1	16.41	5.951	577	143.13	13.90	81.824	0.056
9	469.6	10.32	5.227	295	67.00	6.99	89.652	0.148
10	429.0	16.42	5.780	136	42.29	12.34	84.283	0.133
11	455.8	15.96	5.858	306	66.16	11.11	78.017	0.114
12	769.2	209.93	4.853	17	5	4	65.066	0.666
13	688.3	51.66	5.337	23	12	2	179.336	0.390
14	243.8	43.87	5.380	27	6	5	156.683	0.756
15	358.6	32.30	5.629	31	11.68	9.07	154.259	0.211
16	432.5	12.79	5.573	220	65	5	88.853	0.143
17	264.1	59.12	5.594	31	7	6	152.977	0.767
18	514.6	30.61	6.582	190	67	4	89.936	0.110
19	540.1	19.73	6.042	83	44	3	89.878	0.071
20	313.3	63.55	6.435	85	13	13	48.472	0.466
21	438.0	25.26	6.487	1133	70	50	37.701	0.265
22	380.6	37.91	6.017	82	21.13	6.58	87.019	0.380
23	495.8	21.72	6.691	524	176.10	31.20	80.503	0.045
24	469.3	14.44	5.885	317	53.95	18.72	78.583	0.113
25	403.6	36.50	6.724	244	41	11	88.516	0.200
26	287.1	55.53	5.066	17	6	3	175.667	0.704
27	301.5	54.38	5.513	27	10.13	4.40	131.417	0.571
28	404.9	39.10	5.391	31	8	7	167.208	0.475
29	455.6	21.50	6.253	228	38	18	96.070	0.152
30	292.2	66.34	5.025	16	6	3	170.757	0.643

5.2. Détection des zones d'ombre potentielle

La première étape de la détection des zones d'ombre commence d'abord par la recherche de toutes les zones qui peuvent être potentiellement de l'ombre. Tous les segments dont les valeurs de niveau de gris sont faibles peuvent être considérés comme potentiellement de l'ombre. Il suffit donc de choisir un seuil en dessous duquel tous les segments dont la moyenne de niveaux de gris est inférieure à ce seuil sont considérés comme de l'ombre.

Le choix du seuil est fait de sorte à retenir le maximum de zones sombres, car l'objectif à cette étape est de dégrossir le nombre de segments à analyser dans les étapes suivantes de la détection d'ombre. Ainsi, le seuil est fixé après une analyse de l'histogramme global de l'image de sorte à ne pas omettre des zones d'ombre dès cette étape préliminaire. Après analyse de l'histogramme globale qui est présenté à la figure 5.1 et des caractéristiques de certaines surfaces à l'ombre, le seuil a été fixé à 350 dans la grille des valeurs de niveaux de gris de l'image. Ce seuil a été établi en se basant sur les valeurs de niveau de gris de quelques surfaces sous ombre présentées au tableau 4.2 du chapitre précédent. Le maximum des valeurs de niveaux de gris sous ombre est de 294 et le choix de la valeur 350 est fait pour permettre de garder toutes les zones d'ombre.

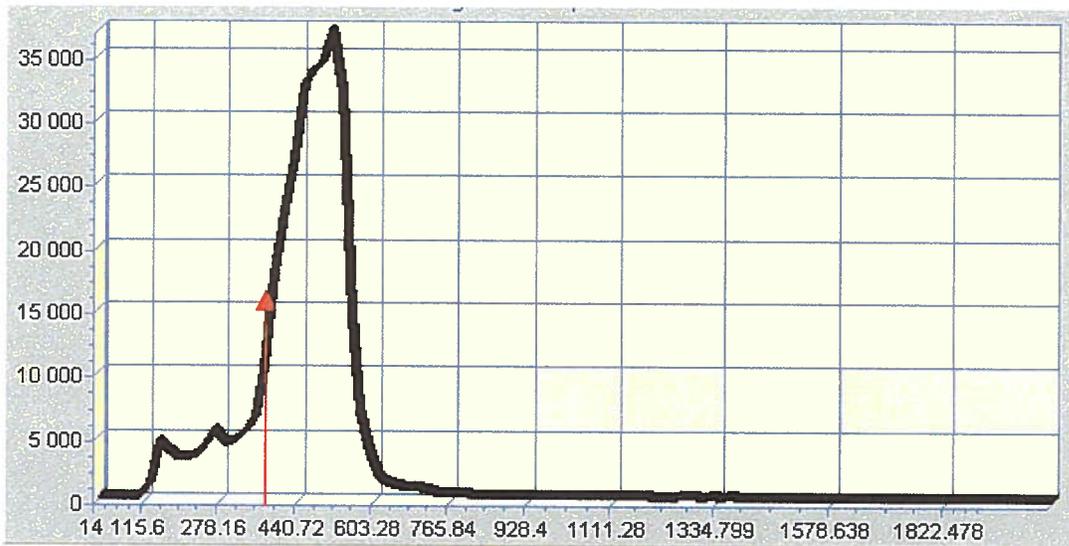


Figure 5.1 : Choix du seuil pour la détection des zones d'ombre potentielle.

Les résultats de ce seuillage font ressortir toutes les zones d'ombre et les surfaces sombres de l'image. L'ensemble de ces zones d'ombre et des surfaces sombres constituent les zones d'ombre potentielles sur lesquelles il faut travailler pour extraire les zones d'ombre réelles des autres surfaces. Un extrait des résultats de cette première étape de détection des zones d'ombre potentielles est présenté à la figure 5.2.(b) où toutes les

zones sombres sont mises en évidence. Certaines sont de l'ombre tandis d'autres représentent des surfaces ou objets sombres.

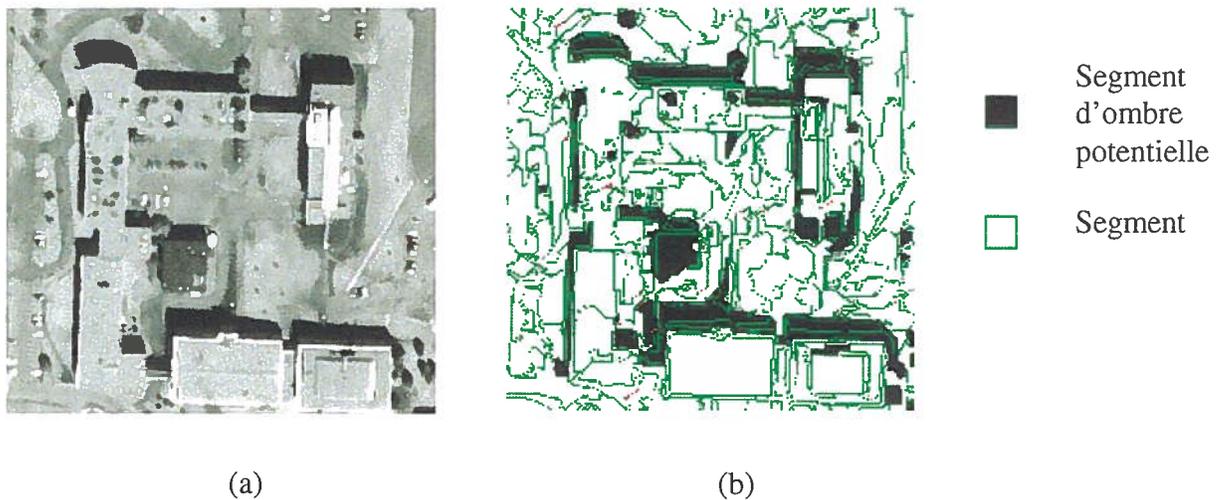


Figure 5.2 : (a) Extrait d'une image du campus, (b) image des segments d'ombre potentielle.

Il s'agit à cette étape de l'analyse de faire ressortir toutes les surfaces sombres qui peuvent être de l'ombre même si elles ne le sont pas. Les étapes suivantes de l'analyse permettront de discriminer les vraies zones d'ombre des surfaces sombres. Et parmi les autres étapes de l'analyse, notons l'analyse locale d'histogramme centrée sur ces zones sombres ainsi que l'exploitation des critères de forme pour discriminer les ombres des autres surfaces.

5.3. Analyse locale d'histogramme et de forme

Après la détection des zones potentiellement ombre à l'étape précédente, la suite de l'analyse consiste à discriminer les zones réellement ombre des zones sombres non ombre. Pour ce faire, l'analyse locale de l'histogramme sur ces zones couplée à la prise en compte de certains critères de forme dérivés des attributs géométriques permettra d'identifier les zones réellement ombre.

5.3.1 Analyse locale d'histogramme

L'analyse locale d'histogramme consiste d'abord à calculer l'histogramme de l'image uniquement sur les zones d'ombre potentielle. Ainsi, un masque est créé à partir des zones considérées comme potentiellement de l'ombre. Avec ce masque, un histogramme localisé sur ces zones est généré. Un exemple de cet histogramme dérivé de l'image du campus ouest est présenté à la Figure 5.3.

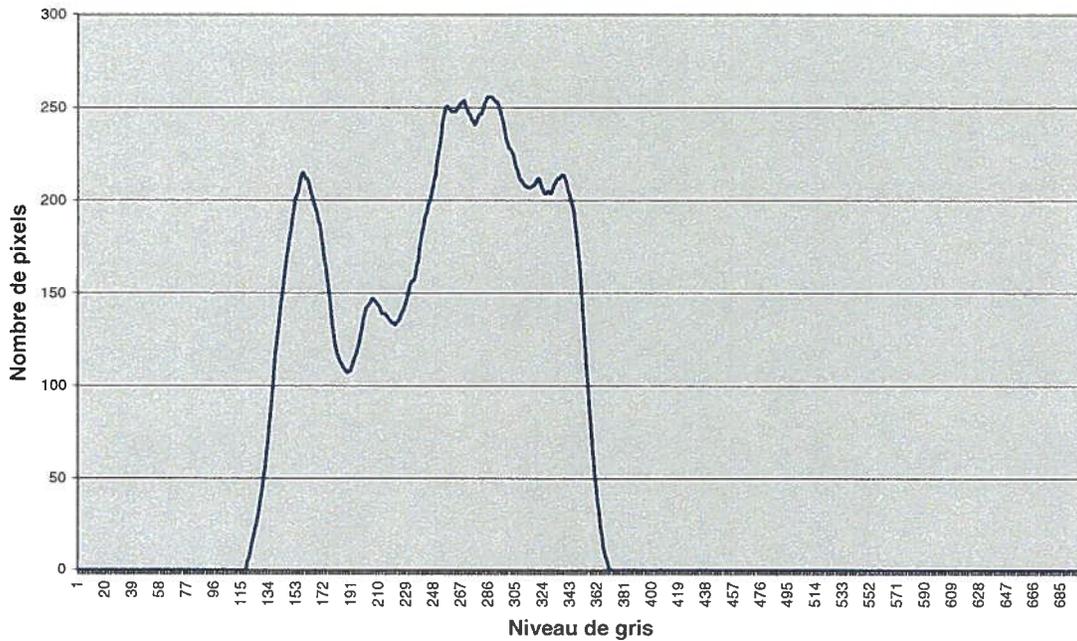


Figure 5.3. : histogramme local des zones d'ombre potentielle du campus.

L'analyse de cet histogramme en termes de maximum et minimum permet de constater plusieurs maxima qui indiquent la présence possible de plusieurs classes dans cet ensemble de zones sombres. Les zones réellement ombre sont caractérisées par de faibles valeurs de niveaux gris quelque soit le type de surface en dessous. Cela est confirmé par le tableau 4.2. qui présente l'ordre de grandeur des valeurs de niveaux de gris de certaines surfaces au soleil et à l'ombre sur la même image du campus.

La détection des zones d'ombre à cette étape se fait comme suit :

- Calcul d'un seuil T à partir du premier maximum qui minimiserait l'erreur de classification des zones potentiellement ombre en deux classes :
- Tous les segments potentiellement ombre dont la moyenne de niveaux de gris est inférieure au seuil T sont considérés comme de l'ombre et étiquetés comme tel sous réserve de confirmation aux étapes ultérieures.
- Pour tous les autres segments qui sont potentiellement de l'ombre, mais non retenus à cette étape, l'analyse se poursuit.

L'analyse locale d'histogramme ne permet pas de détecter toutes les zones d'ombre, c'est pourquoi, il faut continuer l'analyse pour ces autres zones en combinant l'analyse d'histogramme et de critères géométriques des segments.

5.3.2. Critères de forme

L'utilisation des critères de forme dans cette deuxième étape d'analyse consiste à exploiter les propriétés géométriques des ombres pour les distinguer des surfaces sombres. En effet, les critères de forme utilisés sont la régularité de la forme exprimée par la comparaison du rapport surface/longueur à la largeur du segment, la compacité des segments et l'orientation des côtés.

a) rapport surface/longueur

Pour une surface de forme régulière (rectangulaire ou carrée) le rapport surface/longueur est presque identique à la largeur, ce qui indique que le segment a une forme régulière. Ce critère est utilisé pour discriminer les zones d'ombre qui n'ont pas été identifiées à l'étape de l'analyse locale d'histogramme. Ainsi, pour tous les segments potentiellement ombre et non identifiés à l'étape précédente, le critère de régularité de forme est appliqué comme suit :

- Calcul du rapport surface/longueur

- Soient T : seuil calculé à l'étape d'analyse d'histogramme, M_s : la moyenne de niveau de gris du segment à analyser, M_g : la moyenne de niveau de gris de tous les segments potentiellement ombre.
- Si la moyenne M_s du segment à analyser est comprise entre le seuil T et la moyenne M_g et que le rapport Surface/largeur est inférieur à la largeur, alors le segment est étiqueté comme ombre sous réserve de confirmation ultérieure.
- Si la moyenne M_s du segment à analyser est supérieure à la moyenne M_g et que sa largeur est inférieure à 4 (le choix de 4 est argumenté au paragraphe 3.3.3.2), le segment est considéré comme de la pénombre et étiqueté comme ombre sous réserve de confirmation.

b) compacité

La compacité est définie par le rapport entre la surface et le périmètre d'une surface. Elle décrit également la forme d'un segment et est comprise entre zéro et un. Une surface allongée a une compacité faible, tandis qu'une surface carrée a une compacité élevée. Une surface de forme circulaire a la compacité la plus élevée. Ainsi, en fixant un seuil près de la compacité d'une surface carrée, il est possible de différencier les ombres des bâtiments de celles des arbres.

c) Orientation des côtés

L'orientation d'un ou plusieurs côtés d'une ombre dans la même direction que l'azimut est une propriété géométrique intrinsèque de l'ombre liée à la configuration ombre, objet et soleil. Cette propriété est traduite par l'orientation dans le même azimut que le soleil. Ainsi, un segment potentiellement ombre dont l'azimut d'un ou plusieurs côtés coïncident avec l'azimut du soleil à l'heure de l'acquisition de l'image renforce ses chances d'être de l'ombre. La mise en œuvre de ce critère a nécessité la fusion de tous les segments identifiés comme ombre dans les étapes précédentes pour former des zones d'ombre beaucoup plus représentatives. Après la fusion, l'application du critère d'orientation se fait comme suit :

- Conversion des segments du format image en mode vectoriel.
- Calcul de l'azimut des côtés de chaque segment à partir des coordonnées des sommets;
- Pour chaque segment, l'azimut de chacun des côtés est comparé à l'azimut du soleil. Si la différence entre les deux azimuts est inférieure à une tolérance fixée à 3 degrés, le segment est plus que jamais conforté comme de l'ombre. Les raisons pour lesquelles la tolérance a été fixée à 3 degrés ont été décrites au paragraphe 3.3.3.3 et en annexe 2.

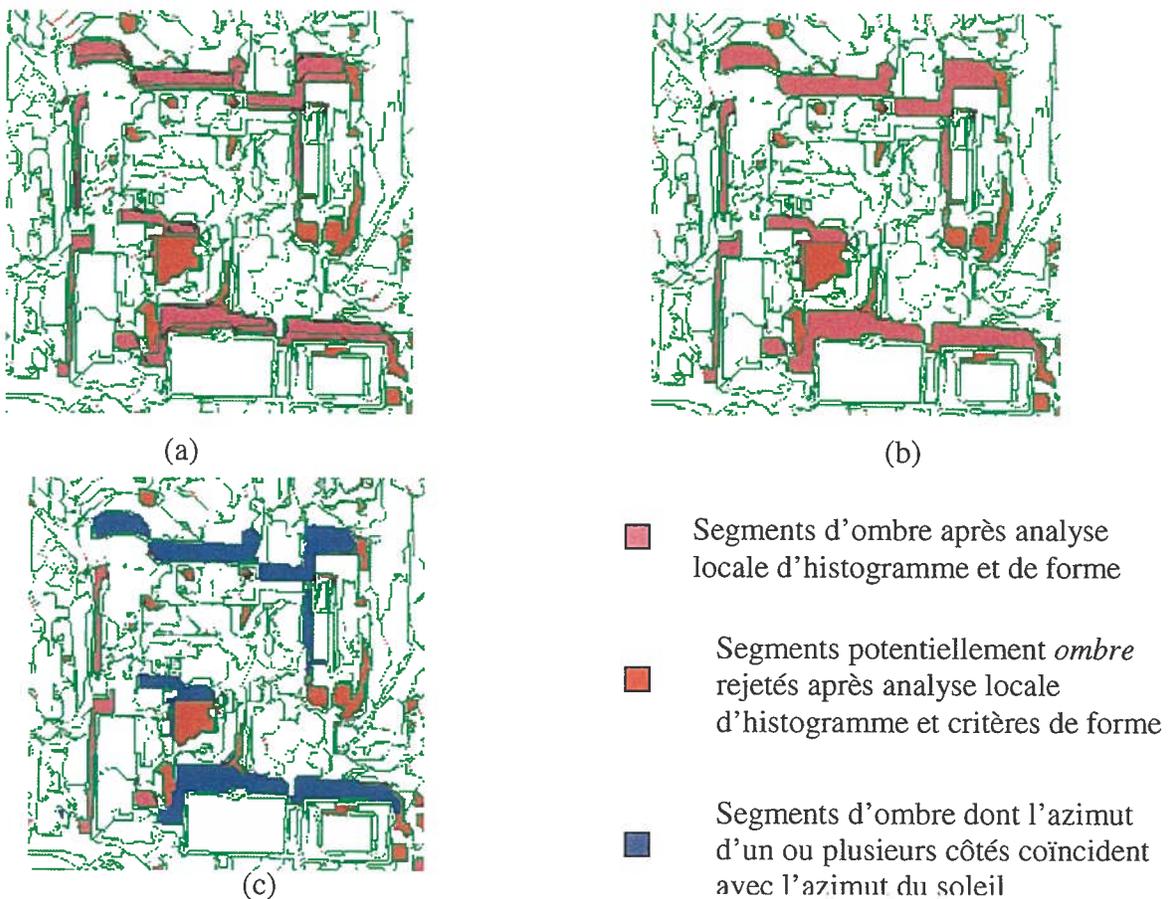


Figure 5.4. : Résultats partiels de détection : (a) Analyse d'histogramme et critères de formes, (b) Après fusion des segments d'ombre, (c) Ombre dont les côtés sont orientés selon l'azimut du soleil.

L'azimut du soleil est de 151 degrés. Après transformation de tous les segments d'ombre en polygone, l'azimut de chaque côté du polygone est calculé. Cet azimut est comparé à celui du soleil plus 180 degrés soit 331 degrés. Tous les segments d'ombre dont l'un ou plusieurs côtés ont un azimut très proche de 331 sont confortés comme ombre. Un extrait des résultats est présenté à la figure 5.4. (c) où les segments ayant un ou plusieurs côtés orientés dans l'azimut du soleil sont indiqués en bleu.

Les critères de forme et d'orientation contribuent énormément à la discrimination des ombres par rapport aux autres surfaces sombres qui ne sont pas des ombres comme le montrent les figures 5.4 (a), (b) et (c). Cependant, il est important de confirmer si les objets discriminés sont réellement des ombres.

5.4. Confirmation de l'ombre

La confirmation des ombres détectées consiste à vérifier s'il existe des objets susceptibles de générer ces ombres. Ainsi pour chaque ombre détectée, il faut d'abord vérifier s'il existe réellement un objet situé du côté du soleil et qui est en mesure de la générer. Pour ce faire, il faut d'abord rechercher tous les segments adjacents de l'ombre situés du côté du soleil, les analyser et vérifier l'hypothèse.

5.4.1. Recherche des segments voisins côté soleil

Pour identifier les objets situés du côté soleil par rapport à une ombre, il faut tout d'abord rechercher les segments voisins de l'ombre et situés du côté du soleil. La recherche des segments voisins côté soleil se fait comme suit :

- Parcourir le contour du segment d'ombre pixel par pixel.
- À chaque pixel, identifier tous les segments voisins situés dans la direction opposée à l'azimut du soleil.
- Dresser la liste de tous les segments voisins côté ombre de chaque segment d'ombre.

- Fusionner les segments voisins côté soleil qui présentent des moyennes proches pour former des objets géométriquement représentatifs.

La figure 5.5 présente en couleur mauve un extrait de segments voisins de l'ombre situés du côté soleil et susceptibles de générer des ombres. Il s'agit principalement de bâtiments.



- Segments voisins de l'ombre situés du côté soleil
- Segments voisins de l'ombre situés du côté ombre

Figure 5.5. Segment voisins de l'ombre côté soleil.

5.4.2. Confirmation des segments d'ombre

Pour chaque segment d'ombre, il faut évaluer si son voisin côté soleil est un objet susceptible de générer l'ombre. Il faut évaluer si ce segment présente les caractéristiques d'un bâtiment et analyser son orientation générale par rapport à celle du segment d'ombre. Dans la majorité des cas, l'ombre et le bâtiment qui la génère ont souvent la même orientation générale selon la position du soleil. Soit, l'ombre est du côté de la longueur du bâtiment, ou du côté de la largeur. Ainsi, en analysant les orientations générales des segments d'ombre et de leurs voisins côté soleil, on est à mesure de confirmer que les ombres détectées sont réellement des ombres de bâtiments. Sur l'image du campus tous les segments supposés ombre sont confirmés comme étant de l'ombre.

5.5. Résultats globaux de la détection des ombres sur le campus

Après les résultats partiels sur les différentes étapes de détection présentés sur quelques extraits, la figure 5.6 présente les résultats globaux de la détection d'ombre du bâti sur l'image entière du campus ouest. Ce sont les résultats finaux de détection après toutes les étapes d'analyse de la première détection grossière jusqu'à la confirmation des zones d'ombre.



 Zones d'ombre de bâti détectés sur le campus ouest de l'Université.

Figure 5.6 : Zones d'ombre détectées sur le campus superposées à l'image Ikonos.

5.6. Évaluation des résultats sur le campus

Pour évaluer les résultats globaux de la détection des ombres sur le campus, nous avons interprété visuellement l'image du campus et identifié toutes les ombres du bâti présentes. Les résultats de cette interprétation sont présentés à la figure 5.7 où toutes les ombres de bâti sont délimitées par des contours en blanc.

Pour évaluer les résultats fournis par la méthode et présentés à la figure 5.6, ces derniers sont comparés à ceux obtenus par interprétation. Une matrice de confusion est générée en considérant les résultats de l'interprétation comme vérité-terrain et ceux de la détection comme résultats d'une classification.



■ Zones d'ombre interprétée

Figure 5.7. : Ombres interprétées visuellement et utilisées comme vérité-terrain.

Deux classes ont été considérées dans cette matrice de confusion. Il s'agit des zones d'ombre d'une part et des zones non ombre d'autre part.

Tableau 5.2 : Taux de bonne détection d'ombre en pourcentage

Ombres interprétées	Ombres détectées		
	Nombre de pixels non ombre (Pourcentage)	Nombre de pixels d'ombres du Bâti (pourcentage)	Nombre total de pixels
Non Ombre	304143 (98%)	6605 (2 %)	310748
Ombre Bâti	2641 (14 %)	16205 (86 %)	18846
Total	306784	22810	329594

Précision globale : 0,97 , Kappa : 0,97

Les résultats globaux fournis par cette matrice de confusion sont présentés au tableau 5.2. Ils indiquent une précision globale de l'ordre de 97 % selon la comparaison de la carte d'ombre issue de l'interprétation et des résultats de la détection. S'agissant des zones d'ombre de bâtiments, seulement 14 % de pixels d'ombre interprétée n'ont pu être détectés par la méthode soit parce que ce sont essentiellement de petites ombres ou des parties d'ombre qui ne sont pas totalement détectées. Ces 14 % de pixels d'ombre interprétés mais non détectés représentent les erreurs d'omission. Cependant, environ 29 % des pixels détectés par la méthode comme étant de l'ombre ne sont pas essentiellement de l'ombre de bâti. Il s'agit d'ombre de rangées d'arbres qui s'assimile à de l'ombre de bâtiment.

5.7. Détection des zones d'ombre sur l'image du Centre-ville de Sherbrooke

La méthode de détection est appliquée à l'image du Centre-ville qui présente des caractéristiques légèrement différentes de celles du campus. Elle a une plus grande densité d'immeubles et les zones d'ombre sont beaucoup plus nombreuses et sont mêlées par endroit avec les ombres des arbres. Le choix de cette image est d'évaluer la robustesse de la méthode sur des images de forte densité d'ombres et de bâtis.

5.7.1. Résultats d'application

La méthode de détection d'ombre a été appliquée en commençant par la segmentation et le calcul des principaux attributs des segments. Les attributs des segments ont été organisés sous forme de base de données et les zones d'ombre potentielle ont été identifiées par analyse de contraste et de seuillage. C'est le même seuil que sur l'image du campus, car ce seuil a été retenu pour toute l'image IKONOS de la ville et ne varie pas en fonction du site d'études. Après cette première étape, la détection des ombres a continué avec l'analyse locale d'histogramme, l'analyse des critères de forme et l'apport de l'orientation azimutale. L'objectif de cette application étant d'évaluer, la performance de la méthode sur un site relativement dense; seuls, les résultat finaux de la détection d'ombre sont présentés et évalués. La figure 5.8 présente les résultats finaux de la détection d'ombre sur le site du Centre-ville. Toutes les zones en rouge représentent les ombres détectées par la méthode.



Zones d'ombre détectées par la méthode au niveau du Centre-ville.

Figure 5.8 : Résultat de détection d'ombre sur l'image Ikonos du Centre-ville.

Il s'agit des ombres de bâtiments, des ombres des arbres et des surfaces d'ombre potentielle non rejetées après l'analyse locale d'histogramme et l'application des critères de forme et d'orientation.

5.7.2. Évaluation des résultats de détection

L'évaluation quantitative des résultats de la détection d'ombre par la nouvelle méthode se fera en comparant ces résultats de détection à ceux d'une interprétation d'image. En effet, les zones d'ombre sur l'image du centre ont été identifiées par interprétation d'images en

vue justement d'évaluer les résultats obtenus par la méthode de détection automatique. La figure 5.9 présente les ombres identifiées par interprétation d'image.



Figure 5.9 : Zones d'ombre interprétées sur le site du centre ville de Sherbrooke.

Ces ombres interprétées ont servi comme vérité-terrain pour l'évaluation des résultats fournis par la détection automatique. Ainsi, une matrice de confusion a été générée pour quantifier les proportions de pixels identifiés comme appartenant réellement à l'ombre.

Les résultats de la matrice de confusion sont présentés dans le tableau 5.3 suivant avec deux classes : les zones d'ombre et les zones non-ombre. Les taux de bonne détection sont exprimés en pourcentage entre les parenthèses.

Tableau 5.3 : Taux en pourcentage des pixels d'ombre détectés par la méthode.

		Ombre détectées		
		Nombre de pixels non ombre (pourcentage)	Nombre de pixels d'ombre (pourcentage)	Nombre total de pixels
Ombre interprétées	Non ombre	399539 (90,0)	44334 (10%)	443873
	Ombre	9272 (19.0)	39455 (81.0)	48727
	Total	408811	83789	492600

Nbre : nombre, Pourcentage global : 0,89 Kappa : 0,89

5.8. Analyse et interprétation des résultats

Après leur évaluation, les résultats de détection obtenus avec cette nouvelle méthode seront analysés et interprétés pour dégager les apports et les insuffisances de la méthode.

5.8.1. Analyse des résultats globaux sur le campus

Les résultats globaux de la détection des ombres sur le site du campus indiquent un fort pourcentage de bonne détection d'ombre. 14 % des pixels interprétés comme ombre de bâtiment n'ont pu être détectés par la méthode et 29% des pixels détectés comme ombre de bâtiments, ne représentent pas une ombre de bâtiment selon les résultats de l'interprétation. En effet, plusieurs arbres groupés forment des ombres de formes et dimensions variables difficiles à différencier des ombres de bâtiments. Ainsi, la nouvelle méthode de détection d'ombre de bâtiments a, dans certains cas, quelques difficultés à discriminer l'ombre d'un groupe ou d'une lignée d'arbres de celle d'un bâtiment. Cette difficulté pourrait être liée au seuil de 75 % utilisé avec le critère de forme appliqué qu'est la compacité alors que les ombres des arbres n'ont pas toutes des formes concentriques.

5.8.2. Analyse des résultats partiels étape par étape du campus

La première détection par analyse de contraste et de seuillage a permis de dégrossir les segments à analyser en identifiant les segments potentiellement ombre. Le choix du seuil est fait après analyse d'histogramme général de l'image dans le souci d'englober toutes les zones d'ombre possibles présentes dans l'image, mais aussi des zones sombres non ombre.

L'analyse locale d'histogramme permet de discriminer certaines zones d'ombre, mais la détermination automatique du seuil sur l'histogramme des zones potentiellement ombre ne permet pas de discriminer toutes les ombres principalement, les ombres portées et les pénombres. Pour les zones d'ombre potentielle non retenues comme ombre par l'analyse locale d'histogramme, les attributs de forme sont utilisés pour compléter la détection. Ainsi, l'apport de l'analyse locale et des critères de forme (rapport surface/largeur) permet de discriminer des zones d'ombre des surfaces sombres non ombre. L'apport de l'orientation n'est pas très déterminant, mais contribue à renforcer la certitude de la détection. Chaque segment supposé ombre qui a des côtés orientés dans le sens de l'azimut du soleil, a une plus grande probabilité d'être de l'ombre. Le critère de compacité permettant de discriminer les ombres du bâti de celles des arbres ne donne pas pleine satisfaction à cause de la forme allongée des ombres de certains arbres et aussi de la présence de plusieurs arbres formant des rangées et dont les ombres prennent des formes non compactes. Un seuil trop élevé ne permet pas de différencier les ombres des arbres de celles du bâti; un seuil assez bas entraînerait le rejet de certaines ombres de bâti de forme relativement arrondie.

Au niveau de la validation, l'analyse du voisinage de l'ombre côté soleil, confirme bien la présence de l'ombre, mais ne suffit pas pour différencier les ombres du bâti des autres ombres, ce qui n'est pas son rôle premier. Une analyse de forme plus poussée (présence d'angle droit, longueur de côté du segment en contact avec l'ombre, etc.) pourrait permettre d'identifier les segments comme un bâtiment et par conséquent, confirmer l'ombre comme celle d'un bâtiment.

5.8.3. Analyse des résultats sur le Centre-ville

L'objectif de l'application de la méthode sur le site du Centre-ville était d'évaluer la robustesse de la méthode en présence d'une grande densité d'ombre et de bâti. Les résultats obtenus au cours de cette application révèlent une légère baisse de la précision globale de détection des zones d'ombre versus zones sans ombre (89 %) par rapport au site du campus (97 %). La précision de détection des zones d'ombre du bâti par rapport aux zones d'ombre interprétées est de l'ordre de (81 %) au Centre-ville contre (86 %) sur le campus. Cette baisse de précision par rapport aux résultats sur le campus s'explique par la grande densité du bâtiment et des ombres sur ce site. Une forte présence d'ombre des arbres sur la partie résidentielle du site située plus au sud de l'image est également un facteur qui influence la précision des résultats, surtout que la méthode a de la difficulté à discriminer les ombres des arbres et celles des bâtiments. Dans cette partie de l'image, qui est une zone plus résidentielle, les ombres de bâtiments se mêlent avec celles des arbres pour donner des formes géométriques complexes difficilement discernables par une simple analyse de compacité.

Les résultats de détection sur la partie nord de l'image sont très satisfaisants, car presque toutes les ombres de bâtiments ont été détectées. En effet, cette partie de l'image se caractérise par une forte densité de grands bâtiments et dont les ombres se détectent aisément comme sur les images à faible densité de bâtis.

La méthode est donc sensible à la densité des ombres et plus particulièrement aux ombres des arbres de forme complexe que les critères géométriques retenus ne permettent pas de bien discriminer surtout quand les ombres des arbres et des bâtiments s'entremêlent par endroit.

5.8.4. Forces et faiblesses de la méthode de détection

En télédétection, presque toutes les méthodes relevées dans la littérature présentent davantage des évaluations qualitatives de la détection des ombres Jiang *et al.* (1994),

Funka-Lea (1994). Très peu d'études offrent des évaluations quantitatives comme la méthode développée par Nadimi et Banu (2004) qui obtiennent une précision de l'ordre de 85 % en moyenne sur des séquences d'images vidéo de véhicules sur asphalt. Avec une précision globale moyenne de détection d'ombre de l'ordre 90 %, la nouvelle méthode de détection des ombres de bâti donne des résultats très satisfaisants. La précision moyenne de détection d'ombre obtenue par la nouvelle méthode est équivalente à la méthode Nadimi et Banu (2004) qui est basée sur le modèle physique de l'ombre.

En plus de la précision de détection, cette nouvelle méthode possède également d'autres avantages : toutes les ombres de bâtiment sont détectées; donc cette méthode a moins d'erreurs d'omission (toutes les ombres de bâti sont détectées). Un autre avantage de cette méthode est qu'elle détecte des zones d'ombre difficilement identifiables par interprétation. C'est le cas de la petite ombre sur le toit sombre du pavillon central (campus) qui n'est pas identifiable par interprétation car cette ombre se confond avec le toit qui apparaît sombre et qui est d'ailleurs assimilé après seuillage à une zone potentiellement ombre.

Malgré ces avantages, la méthode proposée a des faiblesses dont il faut souligner les caractéristiques. En effet, la première faiblesse est le fait que la méthode n'arrive pas à bien différencier les ombres des arbres de celles des bâtiments. L'attribut géométrique descripteur de forme n'est pas bien adapté pour discriminer la forme des ombres des arbres et celles des bâtiments. Cette faiblesse entraîne donc beaucoup d'erreurs de commissions dans les résultats de la détection. Une autre faiblesse de la méthode réside au niveau de la confirmation de l'ombre à partir de l'analyse du voisinage côté soleil. En effet, la confirmation de l'ombre par analyse des segments voisins côté soleil susceptibles de générer l'ombre n'est pas assez efficace, car les éléments d'analyse des segments voisins restent principalement la forme géométrique de ces segments. Si la forme est régulière, il est fort probable que le segment soit un bâtiment, ce qui permet de confirmer l'ombre analysée.

5.9. Conclusion partielle

Les résultats obtenus par cette méthode démontrent bien l'apport des nouveaux attributs utilisés, principalement l'analyse locale d'histogramme, les critères de forme et d'orientation. Ces résultats confirment très bien notre hypothèse sur la détection des ombres en intégrant les connaissances et attributs spectraux, spatiaux et contextuels qui caractérisent les ombres.

L'évaluation rigoureuse de ces résultats tant sur le campus que le centre-ville confirme le potentiel des attributs de forme dans la détection des ombres du bâti en milieu urbain. Après leur détection, les ombres constituent une source d'information qu'il faut savoir exploiter soit pour reconstituer les informations masquées par ces ombres, soit pour déterminer les hauteurs des objets qui les génèrent. L'exploitation des ombres est justement l'objet du chapitre suivant.

6. EXPLOITATION DES ZONES D'OMBRE DÉTECTÉES

Après la détection des zones d'ombre sur les images Ikonos, quelle exploitation peut-on en faire? En effet, pour donner plus de valeur ajoutée à la détection des ombres, ces dernières peuvent être utilisées pour reconstituer la surface sous ombre et par delà rehausser l'image en la corrigeant des effets d'ombre. L'ombre étant une source d'information sur l'objet qui la génère, elle peut être utilisée pour déterminer la hauteur des bâtiments à partir de sa taille et de la géométrie d'acquisition.

6.1. Restitution de l'information sous ombre

La restitution de l'information sous les ombres détectées se déroule en deux étapes : l'identification des surfaces voisines susceptibles de recevoir cette ombre et l'étiquetage de la zone d'ombre. Avant de détailler ces étapes, rappelons l'approche méthodologique développée pour rechercher l'information sous l'ombre.

6.1.1 Approche méthodologique

La méthodologie mise en œuvre pour la restitution des surfaces sous ombre et la compensation de ses effets sur les images est présentée à la figure 6.1. Cette méthodologie se résume comme suit : (1) ressortir les attributs retenus pour chaque segment d'ombre et ses voisins, (2) analyser la différence de texture entre le segment d'ombre et ses voisins, (3) identifier le segment voisin qui a la même texture que le segment d'ombre. Pour la correction des effets d'ombre, on détermine les paramètres de compensation entre les pixels à l'ombre et ceux de la même surface au soleil déjà identifiée.

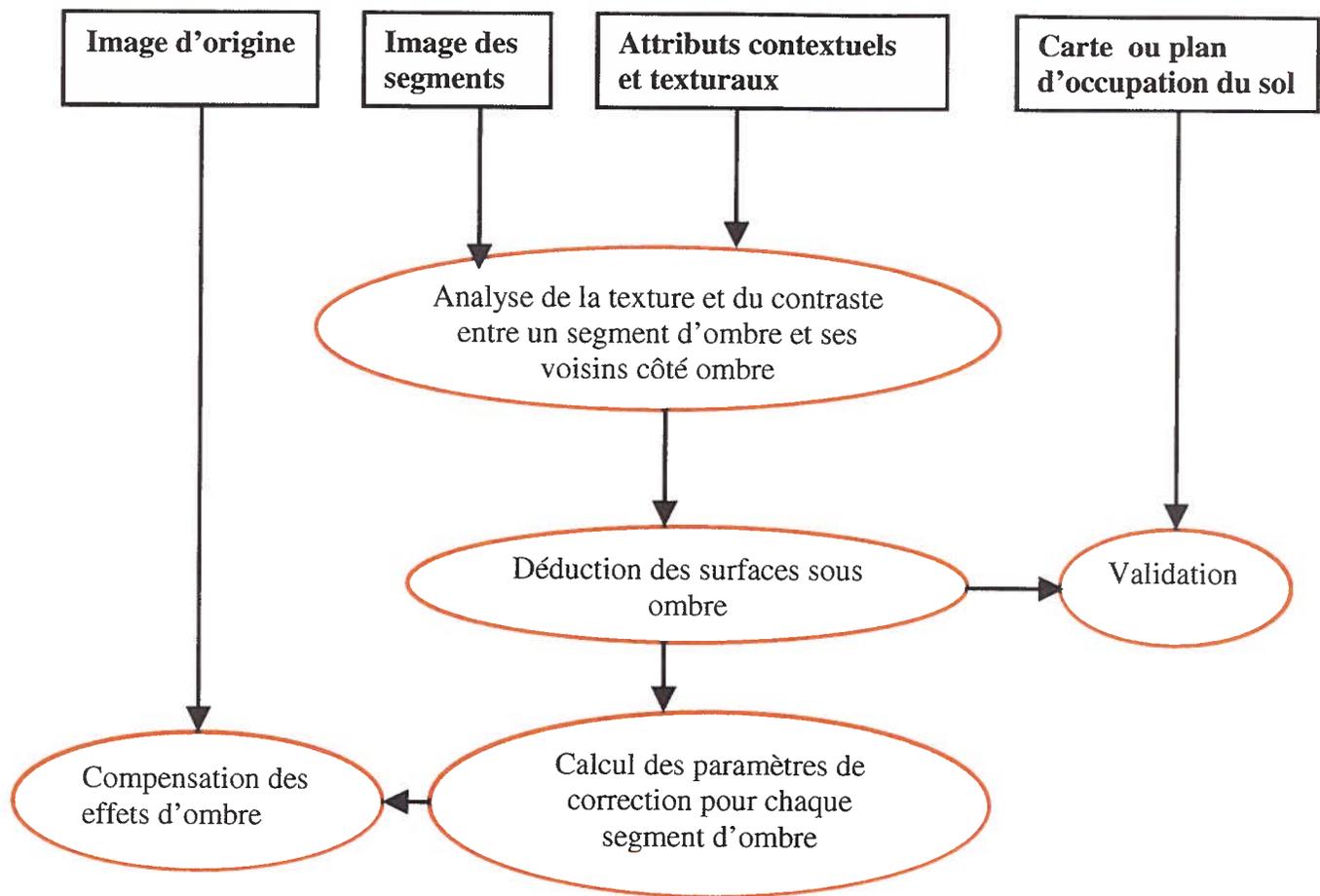


Figure 6.1. : Méthodologie pour la restitution de l'information sous ombre et la correction de ses effets.

6.1.1.1 Données et attributs en entrée

La recherche de l'information sous l'ombre nécessite la définition des données et attributs adaptés à prendre en compte.

a) Données nécessaires

Les données en entrée se composent tout d'abord des segments identifiés comme zone d'ombre, les segments voisins immédiats ainsi que tous les attributs nécessaires. Les

zones d'ombre étant parfois le résultat d'une fusion de plusieurs segments, il est important de disposer de tous les sous-segments, car chacun d'eux peut représenter une information différente. En effet, la même ombre peut se projeter sur deux ou plusieurs surfaces différentes et ainsi avoir plusieurs sous-segments; d'où l'intérêt de tous les segments qui composent une zone d'ombre.

Pour les besoins de validation de l'information restituée de l'ombre, il faut disposer d'une carte d'occupation du sol du même site en vue de confirmer si la surface détectée sous une ombre correspond bien à la surface effectivement sur le terrain. Enfin la correction des effets d'ombre nécessite en entrée l'image de base à corriger. La compensation des effets d'ombre ne s'applique qu'aux zones ombragées; le reste de l'image reste sans changement.

b) les attributs pris en compte

La recherche de l'information sous l'ombre se fait sous l'hypothèse que la texture d'une surface est légèrement invariante de l'ombre (Adjouadi, 1986).

- 1. Les attributs du voisinage :** Ils décrivent le voisinage immédiat d'un segment. Comme l'ombre se projette toujours du côté opposé du soleil, les surfaces sur lesquelles elle se projette doivent être cherchées du côté opposé du soleil. À partir des propriétés géométriques et de voisinage spatial, les attributs du voisinage seront constitués de la liste des segments voisins de l'ombre situés du côté opposé du soleil. La recherche des segments côté ombre se fait en analysant les pixels voisins dans la direction opposée du soleil en suivant le contour du segment pixel par pixel. La figure 6.2 illustre ces segments voisins de l'ombre.

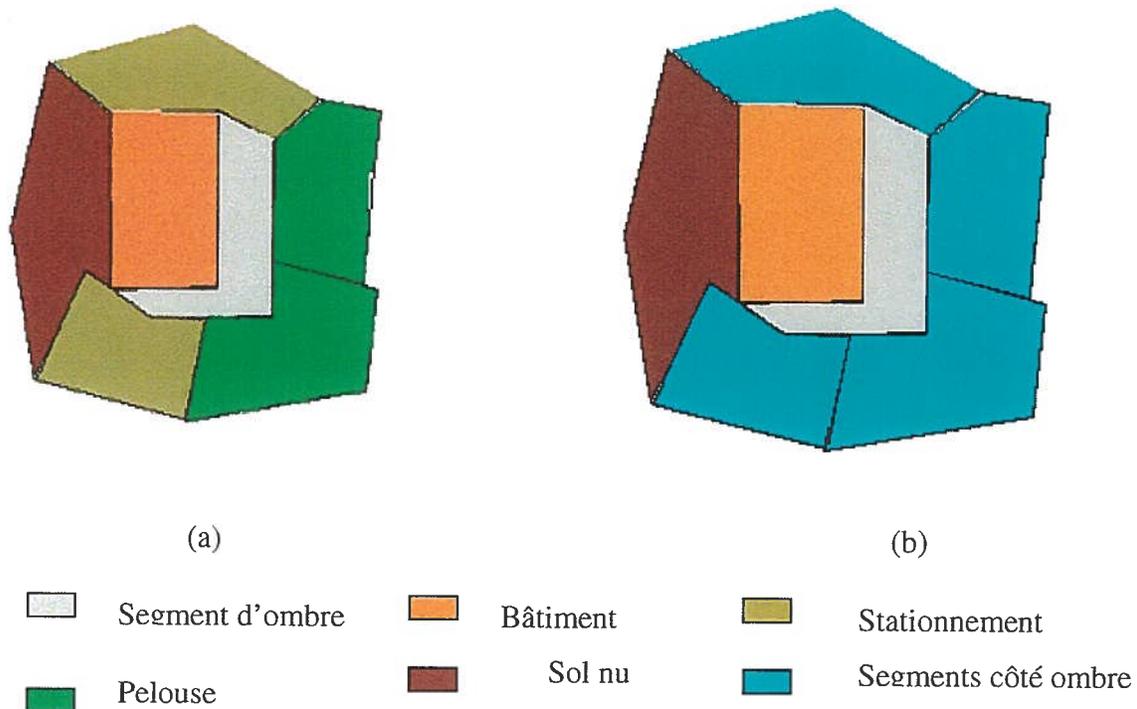


Figure 6.2 : Exemple de configuration de l'ombre et des surfaces voisines : (a) image de segments de différentes surfaces, (b) Les segments voisins côté ombre.

2. **Attributs de texture** : Ils décrivent la texture d'un segment et en pratique il s'agit de la valeur moyenne du paramètre de texture considéré sur l'ensemble du segment. Comme décrit au paragraphe 3.2.1.3, plusieurs paramètres descripteurs de texture existent dans la littérature (Haralick, 1979). Parmi ces paramètres, nous avons retenu ceux qui sont les plus utilisés et aussi les plus faciles à mettre en œuvre (Gagnon, 2003)). Il s'agit des paramètres suivants dérivés de la matrice de cooccurrence : l'entropie, l'énergie, le contraste, la corrélation et l'homogénéité. Ces paramètres caractérisent la distribution spatiale et la forme des textures des différentes surfaces contenues dans l'image.

Tous les attributs de textures et de voisinage sont calculés pour chacun des segments d'ombre qui composent une zone d'ombre et pour tous ses voisins côté ombre identifiés précédemment.

6.1.1.2 Analyse de texture

L'analyse de texture à cette étape de la méthodologie consiste à comparer pour chaque paramètre choisi, la texture du segment d'ombre à celle des autres segments voisins situés du côté ombre. Il s'agit de trouver le segment voisin qui a la même texture que le segment d'ombre, c'est-à-dire le segment dont la valeur moyenne du paramètre de texture est la plus proche possible de celle du segment d'ombre. Cette comparaison se fait par une différence entre la valeur moyenne du paramètre de chaque segment et celle du segment d'ombre. Une comparaison entre les différences permet facilement de trouver la plus faible différence et de déterminer le segment dont la texture est la plus proche de celle de l'ombre. Après détermination de ce segment, on procède à l'identification de la surface sous ombre et à son étiquetage.

6.1.1.3. Identification et étiquetage de la surface sous ombre

La surface sous ombre est déduite à partir de la surface que représente le segment identifié comme ayant la même texture que l'ombre. Cette surface est déterminée à partir d'une carte d'occupation du sol issue d'une classification ou d'une interprétation d'image. En cas de classification ou d'interprétation d'image, le segment d'ombre prend la même étiquette ou le même symbole graphique que la surface identifiée. En représentation cartographique, la zone d'ombre prend la même couleur ou le même symbole que le reste de la surface restée au soleil.

6.1.2. Application aux ombres détectées sur le campus

La méthode de restitution des surfaces sous ombre est appliquée aux zones d'ombres détectées sur le campus. La procédure et les résultats sont présentés étape par étape.

6.1.2.1. Données en entrée

Pour restituer l'information sous les ombres des bâtiments du campus, les données suivantes sont nécessaires et indispensables :

- une image des zones d'ombre détectées (Un extrait de zones d'ombre détectées sur le campus est présenté à la figure 6.3.(b));
- une liste des segments voisins côté ombre comme spécifiée au paragraphe 6.1.1 pour chaque segment ou sous-segment d'ombre;
- un descripteur de texture qui indique la valeur moyenne de la texture pour chaque segment d'ombre ou voisin de l'ombre; pour les besoins d'évaluation et de comparaison, nous avons utilisé cinq descripteurs de texture (l'entropie, l'homogénéité, corrélation, l'énergie et le contraste);
- enfin une carte de d'occupation du sol du campus qui sert de vérité-terrain pour valider les résultats. Un extrait de cette carte est présenté à la figure 6.3 (a).

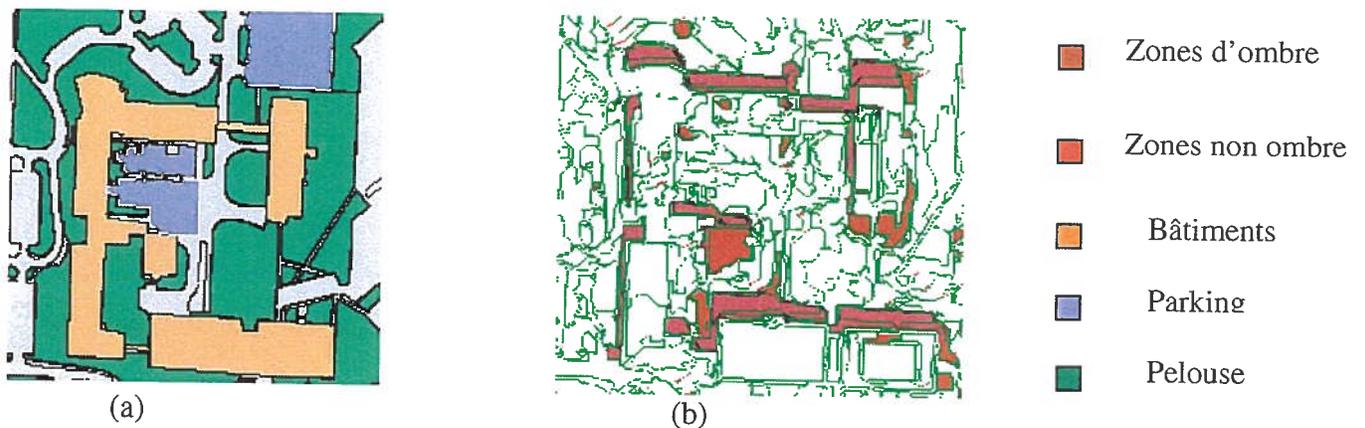


Figure 6.3 : Données utilisées pour la restitution de l'information sous l'ombre et sa validation (a) : carte d'occupation du sol du site et (b) carte de zones d'ombre détectées.

6.1.2.2. Recherche du segment voisin de même texture

Pour chacun des descripteurs de texture, la recherche du segment voisin de l'ombre ayant la même texture se fait comme suit :

- Calcul de la différence de texture entre le segment d'ombre et tous ses voisins de la liste des segments côté ombre;
- Recherche de la plus petite différence de moyennes de texture.
- Le segment dont la différence de moyennes de texture est la plus petite est retenu comme le segment recherché, c'est-à-dire comme segment ayant la même texture que la surface à l'ombre.

Un extrait de l'image de segment voisin identifié est présenté à la figure 6.4. Il s'agit des résultats obtenus avec le paramètre entropie. Les segments en couleur noire représentent des segments identifiés comme ayant la même texture que les segments d'ombre.



- Segments de même texture que l'ombre
- Segments d'ombre

Figure 6.4 : Segments voisins de même texture que l'ombre.

6.1.2.3. Étiquetage des zones d'ombre

Après l'identification des segments voisins de même texture que l'ombre représentant la même surface que l'ombre, la deuxième étape consiste à identifier les surfaces que représente chaque segment voisin. Sur l'image présentée à la figure 6.5 qui est le résultat d'une restitution des surfaces sous ombre, les ombres sont remplacées par les couleurs des surfaces voisines identifiées comme ayant la même texture que ces zones d'ombre.

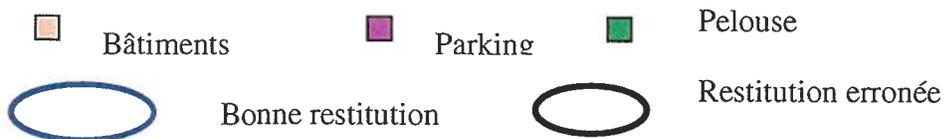
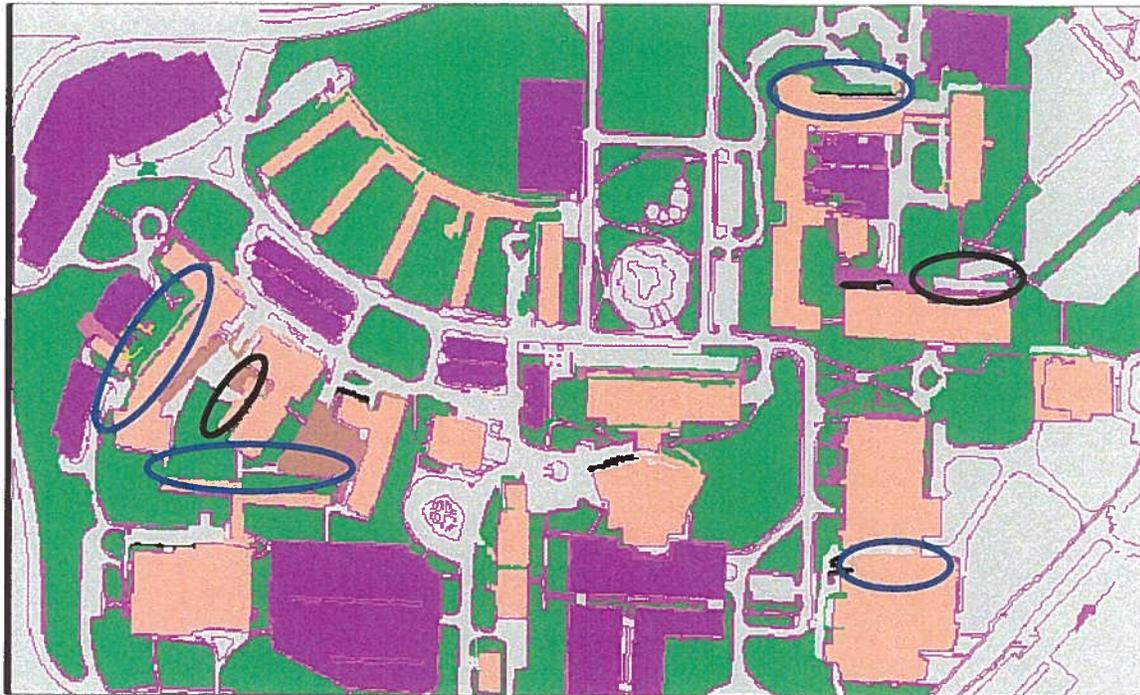


Figure 6.5 : Restitution de l'information sous l'ombre sur le campus.

6.1.2.4. Validation des résultats de la restitution

L'objectif de la validation est d'évaluer l'apport de la restitution de l'information sous l'ombre pour une cartographie issue de l'interprétation ou de la classification de l'image avec ombre. Pour atteindre cet objectif, nous avons généré un masque de zones d'ombre que nous avons superposé à la carte d'occupation du sol pour obtenir une image comme résultats d'une interprétation avec une classe ombre et les autres classes de la carte. Un extrait de cette nouvelle carte avec ombre superposée est présenté à la figure 6.6. Les ombres sont représentées en couleur noire et les autres thèmes d'occupation du sol dans les différentes couleurs. Nous avons calculé la matrice de confusion entre cette nouvelle carte avec ombre et la vérité-terrain (carte d'occupation du sol originale). L'objectif à ce

niveau est de quantifier la proportion des pixels des autres surfaces qui se retrouvent dans la classe ombre et aussi d'évaluer globalement l'imprécision due à la présence d'ombre si cette carte est considérée comme le résultat d'une interprétation de l'image Ikonos du campus.

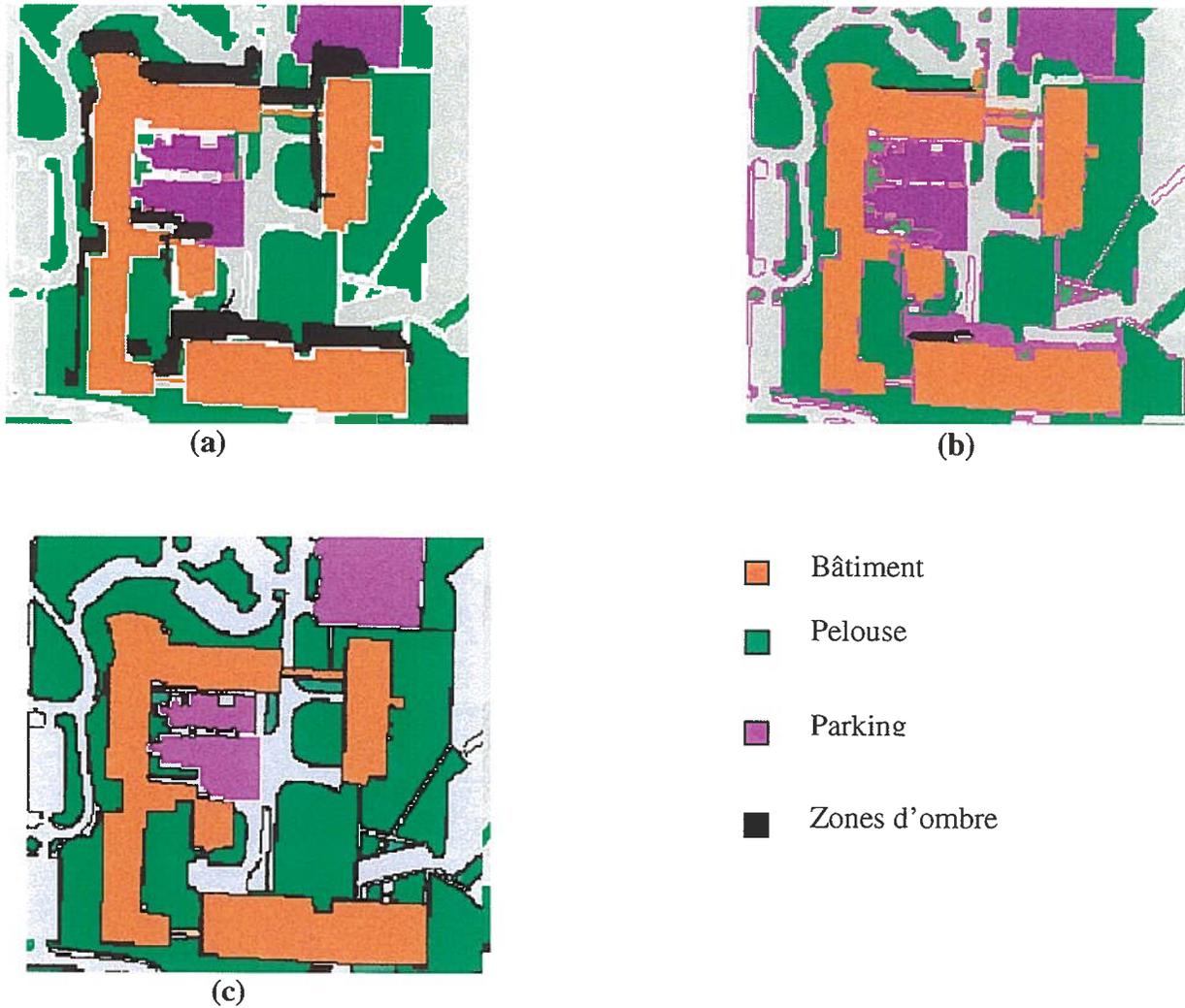


Figure 6.6 : Évaluation de la restitution de l'information sous l'ombre : (a) Carte d'occupation de sol avec ombre, (b) carte d'occupation du sol après restitution de l'information (c) carte d'occupation de sol de base.

Les résultats fournis par la matrice de confusion entre la carte d'occupation du sol avec ombre et la carte d'occupation du sol originale sont présentés au tableau 6.1. qui indique

dans la première colonne (cls0) les pourcentages des pixels des autres classes qui se retrouvent masquées dans l'ombre.

Pour évaluer l'apport de la restitution de l'information sous l'ombre, il suffit de comparer les résultats de la carte d'occupation de sol après restitution de l'information sous l'ombre avec ceux de la carte d'occupation du sol avec ombre. Pour ce faire, nous avons calculé la matrice de confusion entre la carte d'occupation du sol obtenue après restitution de l'information sous l'ombre et la carte d'occupation du sol originale. Les résultats sont présentés au tableau 6.2. Dans la première colonne (cls#o) les proportions des pixels des autres classes qui sont dans l'ombre dont les surfaces en dessous n'ont pu être restituées. La diagonale représente le taux de bonne classification des pixels et indique une amélioration de la précision due à la restitution de l'information sous l'ombre.

Tableau 6.1. : Matrice de confusion indiquant la proportion de pixels des autres surfaces sous ombre.

	Cls#0	Cls#1	Cls#2	Cls#3	Cls#4	Cls#5	Cls#6	Cls#7	Cls#8
Cls#0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#1	4,8	95,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#2	9,2	0,0	90,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#3	4,9	0,0	0,0	95,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#4	8,8	0,0	0,0	0,0	91,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#5	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	98,7	0,0	0,0	0,0
Cls#6	29,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	70,6	0,0	0,0
Cls#7	15,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	84,4	0,0
Cls#8	27,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	72,5

Précision moyenne : 93,4

Tableau 6.2 : Matrice de confusion après restitution de l'information sous ombre.

	Cls#0	Cls#1	Cls#2	Cls#3	Cls#4	Cls#5	Cls#6	Cls#7	Cls#8
Cls#0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#1	0,2	97,8	0,8	0,4	0,7	0,0	0,1	0,1	0,0
Cls#2	0,3	1,3	96,5	0,9	0,9	0,1	0,1	0,0	0,0
Cls#3	0,2	0,9	1,6	97,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Cls#4	0,2	2,9	3,1	0,9	92,3	0,2	0,2	0,1	0,0
Cls#5	0,0	0,0	0,5	0,1	0,1	99,1	0,3	0,0	0,0
Cls#6	0,0	22,2	5,9	0,2	0,0	0,4	71,0	0,3	0,0
Cls#7	0,0	0,1	0,5	4,7	0,0	0,0	4,9	89,7	0,0
Cls#8	0,0	0,0	4,4	0,0	0,0	12,3	10,9	0,0	72,5

Précision globale : 96,3

Les correspondances thématiques des classes représentées dans ces tableaux sont présentées dans le tableau 6.3 ci-dessous.

Tableau 6.3 : Correspondances entre les classes et les surfaces présentes.

CLS#0	Ombres détectées
CLS#1	Contours des objets
CLS#2	bâtiments
CLS#3	Pelouse
CLS#4	Stationnement asphalté
CLS#5	Route et passage
CLS#6	Terrasse cimentée
CLS#7	Sol nu
CLS#8	Non classés

6.1.3. Analyse et interprétation des résultats de la restitution

Après l'évaluation des résultats fournis par la technique de restitution de l'information sous l'ombre, ces derniers seront analysés qualitativement et quantitativement en faisant ressortir les forces et les faiblesses de la méthode.

L'analyse qualitative des résultats de la restitution sur le campus présentés à la figure 6.1.2, indique des zones de très bonne restitution comparativement à la carte d'occupation du sol du campus. Toutes les surfaces sous ombre ont été restituées à l'exception de quelques ombres portées sur le centre culturel et sur le bloc de la bibliothèque des sciences. Ce qui est d'ailleurs normal, car les segments voisins côté ombre de l'ombre portée sont constitués de l'ombre projetée au sol et ne peuvent donc représenter les surfaces sous ombre.

L'évaluation de l'apport de la restitution de l'information sous l'ombre dans une cartographie d'occupation du sol à travers les résultats des matrices de confusion aux tableaux 6.1 et 6.2, confirme l'intérêt de la restitution de l'information sous l'ombre pour le complètement des cartes d'occupation du sol. En effet, l'analyse des nouvelles valeurs en diagonale sur les tableaux indique une augmentation de la précision moyenne de l'ordre de 3 % passant 93,4 % pour la carte avec les ombres à 96,3 % pour la carte avec l'information sous les ombres restituée.

Ces résultats de restitution confirment notre hypothèse qu'il est bel et bien possible de restituer l'information masquée sous l'ombre en utilisant l'information texturale pour identifier la surface sur laquelle l'ombre s'est projetée. Parmi les paramètres de texture utilisés (entropie, homogénéité, contraste, corrélation), le contraste et l'homogénéité donnent les meilleurs résultats.

Malgré les excellents résultats fournis par la méthode de restitution de l'information sous l'ombre, quelques limitations méritent d'être soulignées. Il s'agit principalement des

erreurs de restitution; certaines surfaces sous ombre identifiées par la méthode ne sont pas en réalité les surfaces sous cette ombre. C'est le cas de la restitution de l'information sous l'ombre du bâtiment abritant la faculté des sciences du côté de la bibliothèque des sciences, où la véritable surface sous l'ombre est une pelouse, tandis que la méthode identifie une route asphaltée.

L'autre faiblesse réside dans les paramètres de texture. En effet, les paramètres utilisés basés sur la matrice de cooccurrence ne sont pas efficaces pour décrire la texture sur les images de très haute résolution spatiale avec une forte densité de détails. L'utilisation de nouveaux paramètres de texture plus adaptés à ce type d'image pourrait améliorer la précision de la restitution de l'information sous l'ombre.

Après l'identification des surfaces de même texture que les ombres et la restitution de l'information sous ces ombres, une autre exploitation de cette identification serait la correction radiométrique des effets d'ombre sur les images de télédétection.

6.2. Correction des effets d'ombre

Après identification de l'information sous l'ombre, il devient très aisé de corriger les effets d'ombre sur cette surface. Après un rappel de la méthode de correction retenue, les résultats d'application sur les images du campus et du Centre-ville sont évalués et analysés.

6.2.1. Méthodes de correction

La correction des effets d'ombre sur une image consiste à rehausser les valeurs des pixels sous ombre, pour leur donner des valeurs qu'ils devraient avoir s'il n'y avait pas d'ombre. Pour cela, plusieurs techniques sont utilisées pour réaliser ce rehaussement. Deux groupes de méthodes se distinguent par leur mode opératoire; il s'agit des méthodes globales basées sur l'étalement d'histogramme sur toute l'image et les méthodes locales qui exploitent le voisinage immédiat de chaque ombre pour la rehausser.

Après l'identification des surfaces sous l'ombre, il serait plus aisé et plus adéquat de procéder à la compensation des effets d'ombre en prenant en compte cette information. Plusieurs méthodes sont employées pour faire cette restitution des valeurs des pixels. Les principales techniques sont :

- l'assortiment d'histogramme qui consiste à rehausser les valeurs des pixels sous ombre en imposant la dynamique de l'histogramme des mêmes surfaces au soleil.
- la correction par translation qui consiste à ajouter à tous les pixels une même valeur moyenne représentant l'éclairage direct qui ne parvenait pas aux surfaces à l'ombre. Cette valeur moyenne est calculée par simple différence entre la moyenne de niveaux de gris entre la partie au soleil et celle à l'ombre de la même surface.
- les transformations gamma consistent à appliquer une transformation de type gamma à chaque pixel à l'ombre pour retrouver sa valeur s'il était au soleil. La transformation est utilisée parce que la modification des valeurs des pixels due à l'ombre varie selon l'emplacement du pixel par rapport à l'objet qui génère l'ombre. Le facteur de transformation gamma est calculé après identification des surfaces à l'ombre en utilisant la moyenne des pixels à l'ombre et au soleil.

6.2.2. Paramètres de correction des images

Pour chacune des méthodes de compensation disponible, des paramètres de correction sont calculés. Le rôle de ces paramètres est de permettre, pour chacun des pixels à l'ombre, de passer de sa valeur actuelle à la valeur qu'il aurait dû avoir s'il n'y avait pas cette ombre. Ces paramètres sont généralement calculés en utilisant les valeurs statistiques (moyenne, écart type, maximum, minimum, etc.) des pixels des zones d'ombre et de ceux des surfaces correspondantes au soleil. Certaines méthodes imposent des limites maximales en bordure des ombres pour améliorer les résultats des corrections. Une fois les paramètres de correction bien définis, l'étape de correction consiste à appliquer à chaque pixel à l'ombre la transformation retenue pour obtenir une valeur compensée du pixel des effets d'ombre.

6.2.3. Méthode de correction retenue

La méthode locale retenue dans cette recherche est basée sur la transformation gamma des pixels à l'ombre Nakajima *et al.*, (2002). Cette méthode nécessite la connaissance de la surface sur laquelle l'ombre se projette. Elle s'adapte parfaitement à des zones d'ombres après identification des surfaces sur lesquelles ces ombres se projettent.

Le paramètre de correction qui est le coefficient de la transformation gamma est calculé en utilisant les moyennes des pixels des zones d'ombre et de ceux de la surface au soleil correspondante. La formule de la transformation appliquée à chaque pixel à l'ombre est la suivante :

$$OutPixel = 2047 * (InPixel / 2047)^{1/\delta} \quad (7)$$

Avec *OutPixel* : Pixel corrigé, *InPixel* : Pixel ombre et δ : Paramètre de transformation calculé à partir de la moyenne de niveaux de gris du segment d'ombre et du segment voisin de même texture et enfin 2047 : valeur maximale d'un pixel pour les images IKONOS en 11bits. Le calcul du paramètre de transformation se fait après identification du segment voisin qui a la même texture que la zone d'ombre. En considérant la moyenne de niveaux de gris du segment voisin comme étant le *OutPixel* et la moyenne de niveau de gris de l'ombre comme *InPixel*, le paramètre δ est calculé en posant le log de la formule 7. Une fois ce paramètre calculé, tous les pixels à l'ombre sont transformés en appliquant la formule 7.

6.2.4. Application aux images du campus et du Centre-ville

Après l'identification des surfaces sous ombre pour chaque segment, la méthode de correction des effets d'ombre a été appliquée à chaque zone d'ombre sur les images du campus et du Centre-ville. Les résultats (images rehaussées) sont présentés et évalués dans les paragraphes suivants.

6.2.4.1 Résultats d'application

Pour chaque image à corriger, les données nécessaires et indispensables sont l'image d'origine et la carte des segments d'ombre. Pour chacun des segments d'ombre, il faut disposer de son segment voisin côté ombre qui a la même texture que lui comme identifié à l'étape précédente. Ainsi, le coefficient de transformation δ est calculé pour chaque segment d'ombre. Les résultats de cette transformation sont des images rehaussées et débarrassées ou presque des principales zones d'ombre. Des extraits de l'image rehaussée du campus sont présentés à la figure 6.7 où les images (a) et (c) sont des extraits d'images brutes et les images (b) et (d) sont les résultats correspondants de la transformation.

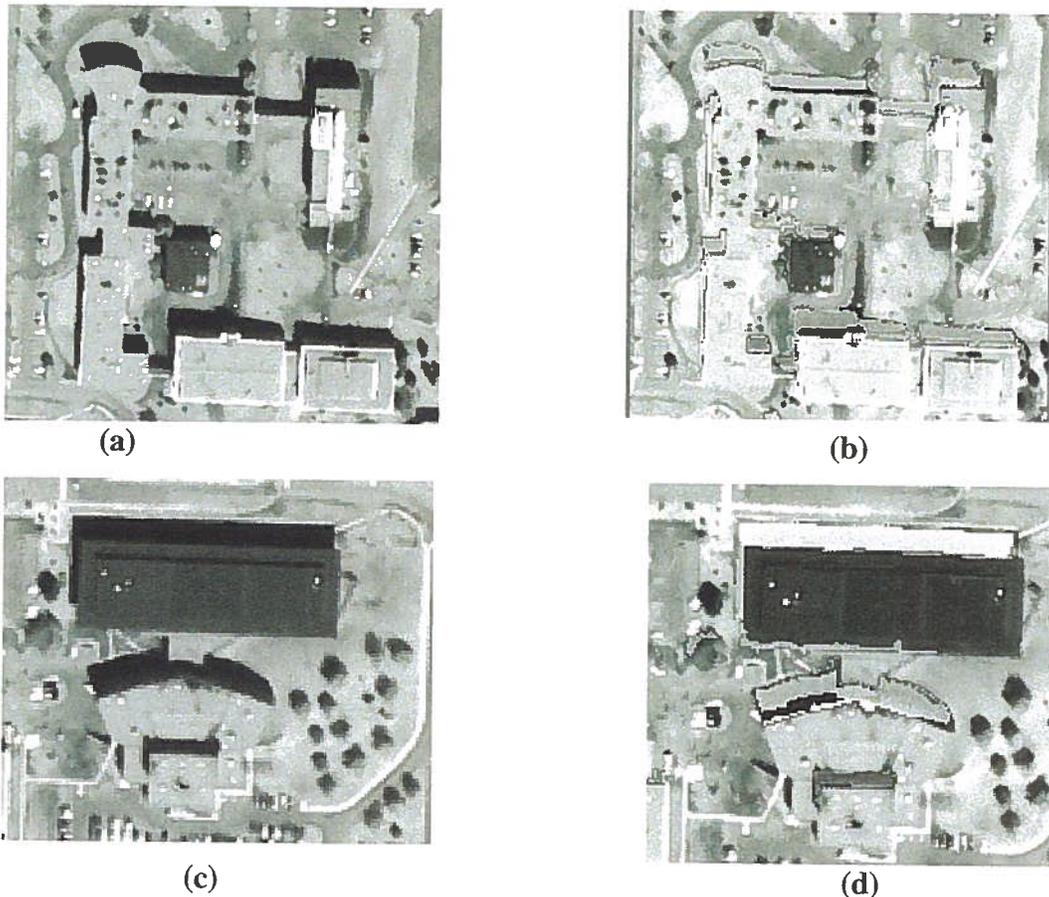


Figure 6.7 : Résultats de rehaussement des effets d'ombre sur les images, (a) et (b) : images originales sans correction, (c) et (d) images respectives de (a) et (b) après correction des effets d'ombre.

6.2.4.2. Évaluation des résultats par comparaison d'histogramme

L'objectif de la correction des effets d'ombre est d'améliorer la qualité visuelle des images en éliminant les faibles valeurs de niveau de gris qui assombrissent les surfaces à l'ombre. Une comparaison d'histogramme de la même image avant et après correction permet d'évaluer qualitativement les changements apportés à l'image.

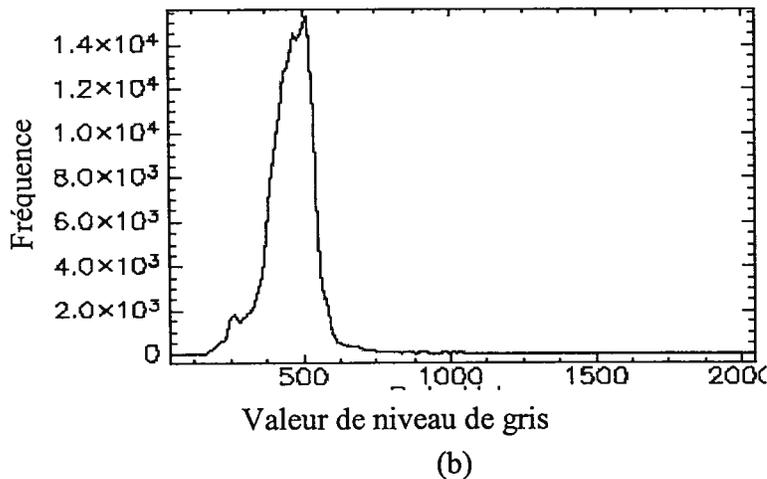
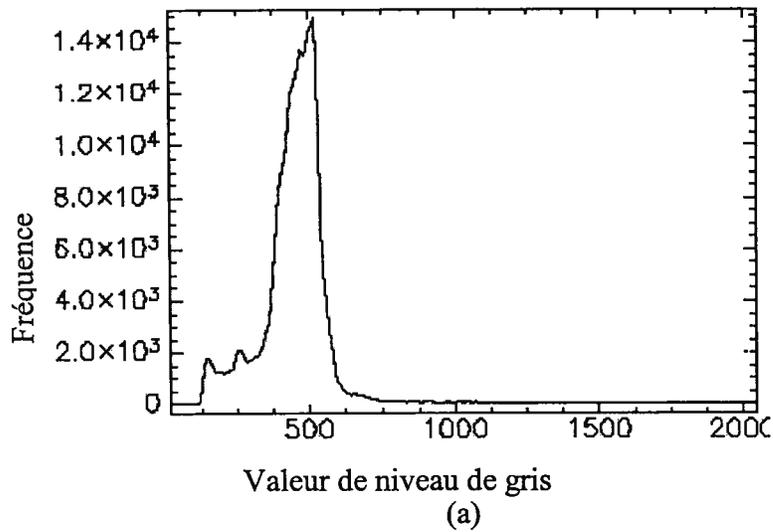


Figure 6.8 : Histogramme de l'image du campus, (a) histogramme avant correction et (b) histogramme après correction des effets d'ombre.

Sur l'histogramme avant correction, on observe un double pic dans les zones de faibles valeurs des pixels qui représentent les zones d'ombre. Après correction, le pic caractérisant les zones d'ombre a disparu avec les ombres et le sommet du pic principal de l'histogramme est légèrement modifié avec l'apport des nouvelles valeurs des surfaces sous l'ombre.

6.2.5 Analyse et interprétation des résultats de la correction

Compte tenu de l'objectif assigné à la correction des effets d'ombre qui est d'améliorer la qualité visuelle de l'image, l'évaluation par comparaison d'histogrammes suffit largement pour apprécier l'apport de cette technique. En effet, presque toutes les méthodes relevées dans la littérature se limitent à une évaluation qualitative de la correction en comparant l'image corrigée à l'image originale sans procéder à une analyse d'histogramme (Graham *et al.* (2002), Li *et al.* (2003), Nakajima *et al.*, (2002)). La méthode proposée de correction prend en compte deux aspects importants qui améliorent la qualité de la correction qui sont : (1) la prise en compte des sous-segments de l'ombre et (2) la recherche de la surface voisine qui a la même texture que l'ombre.

La prise en compte de sous-segments qui composent l'ombre permet de conserver les différents détails sous cette ombre. Il s'agit des différents objets qui sont sous la même ombre, malheureusement non identifiables à cause des effets de l'ombre et qui réapparaissent après rehaussement. C'est le cas d'une ombre qui se projette sur plusieurs surfaces (pelouse, parking, autres bâtiments, etc.). Après segmentation, les sous-segments qui composent cette ombre sont utilisés individuellement pour le rehaussement, ce qui permet de conserver l'information sous l'ombre au moment du rehaussement. La recherche de la surface voisine qui a la même texture que l'ombre et son utilisation dans le calcul des paramètres de correction locale permettent d'améliorer les résultats du rehaussement local. Une technique similaire est utilisée par Li *et al.* (2004) pour améliorer les résultats de la correction en utilisant les surfaces voisines côté ombre. Les résultats obtenus par cette méthode sont qualitativement excellents.

La transition entre les zones d'ombre rehaussées et les surfaces au soleil est parfois abrupte. Même si ce phénomène de bordure altère légèrement la qualité visuelle de l'image, il constitue une source d'information en marquant les contours des objets.

6.3. Détermination de la hauteur de bâtiments à partir de leur ombre

En télédétection, la détermination de la hauteur des objets à partir de leur ombre n'est pas très développée et répandue à cause de certaines difficultés liées à la maîtrise de la taille de l'ombre et aux autres paramètres liés aux conditions géométriques de prise de vue (hauteur du soleil, position du capteur, etc.). Nous tiendrons compte de ces paramètres dans la détermination de la hauteur des bâtiments à partir de leur ombre.

6.3.1. Principe et méthode

La méthode utilisée pour déterminer la hauteur des bâtiments à partir de leur ombre est basée sur un principe caractérisé par les propriétés géométriques de l'ombre et complétée par la prise en compte de certains paramètres influents tels que l'élévation du soleil et du capteur, l'azimut du soleil et du capteur, l'orientation du bâtiment.

6.3.1.1. Principe de base

Le principe de la détermination de la hauteur des objets en fonction de leur ombre est basé sur deux des principales propriétés géométriques de l'ombre. La première propriété met en relation la taille de l'ombre et la hauteur de l'objet qui la génère. La taille de l'ombre est directement fonction de la hauteur de l'objet qui la génère : plus l'objet est haut, plus la taille de son ombre est importante. La seconde propriété géométrique est relative à la position du soleil. En effet, la taille de l'ombre d'un objet est directement fonction de la position du soleil au moment de la prise de vue. La taille de l'ombre est donc inversement proportionnelle à l'élévation du soleil.

En assumant que l'ombre se projette sur une surface plane comme indiqué à la figure 6.9, on peut aisément déterminer la hauteur de l'objet en connaissant la taille de l'ombre et de l'élévation du soleil au moment de la prise de vue. Cette détermination se fait à l'aide de la relation trigonométrique :

$$\mathbf{H = L \times \tan(\Phi)} \quad \mathbf{(8)}$$

Avec : **H** : hauteur de l'objet, **L** : longueur de l'ombre et **Φ**: élévation du soleil.

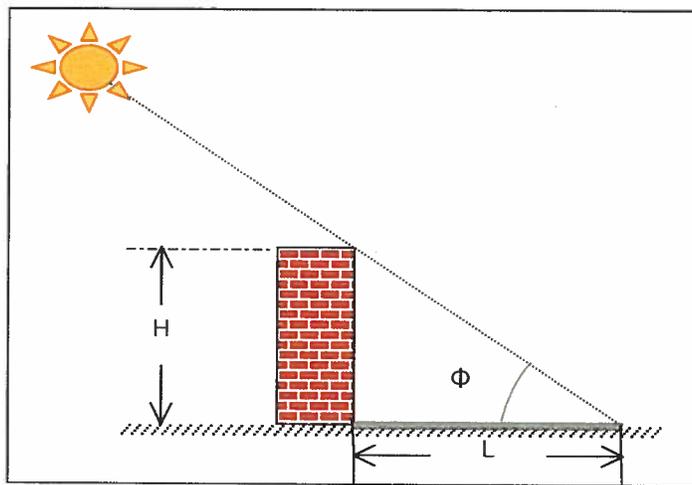


Figure 6.9 : Relation entre hauteur H de l'objet et taille L de l'ombre.

6.3.1.2. La prise en compte des facteurs influents

Plusieurs paramètres influencent directement la taille de l'ombre projetée et introduisent ainsi des imprécisions sur la hauteur des objets. Il s'agit principalement de la position relative (élévation et orientation) du capteur et du soleil au moment de la prise de vue, de l'orientation générale (azimut) du bâtiment qui génère l'ombre et de la pente de la surface sur laquelle se projette l'ombre.

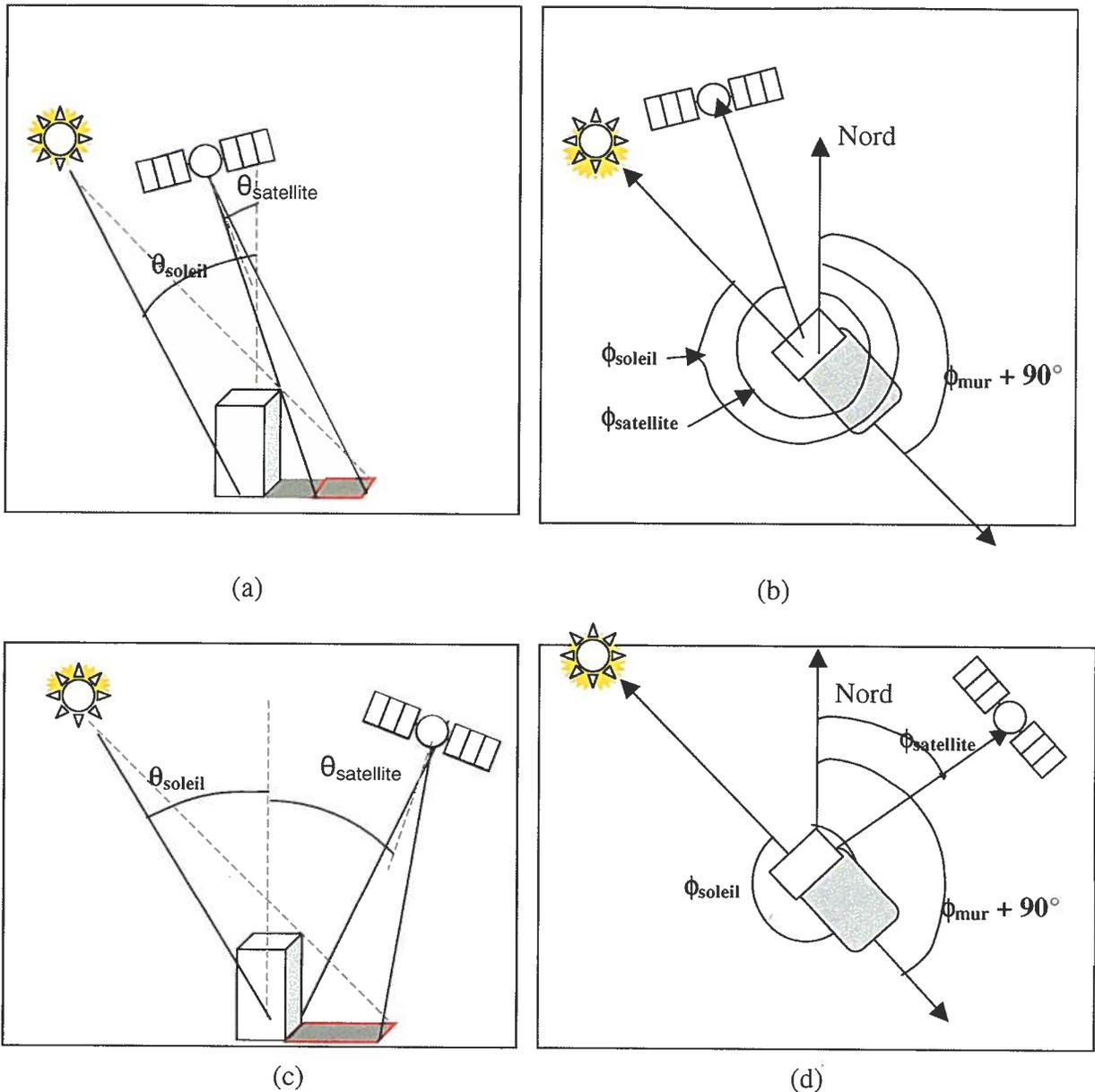


Figure 6.10 : Facteurs influents sur la détermination des hauteurs à partir des ombres
 (a) : Le capteur est du même côté que le soleil, (b) vue en plan de la configuration (a), (c) le capteur est du côté opposé du soleil (d) : vue en plan de la configuration (c).

La position relative du capteur (élévation et orientation) par rapport au soleil détermine la proportion de l'ombre observée par le capteur et visible sur l'image. Si le capteur est situé du côté opposé du soleil, comme présenté à la figure 6.10.c, c'est-à-dire du côté de l'ombre, la proportion de l'ombre observée est plus importante. Cette proportion

regroupe l'ombre projetée et l'ombre portée. Si le capteur et le soleil se trouvent du même côté, la proportion de l'ombre observée est beaucoup moins importante que le cas précédent. Dans cette configuration illustrée à la figure 6.10.b., une partie de l'ombre est masquée par l'objet qui la génère.

L'orientation du soleil détermine directement l'azimut de l'ombre projetée; l'ombre est toujours projetée dans la direction prolongeant l'azimut du soleil. Ainsi, la taille maximale de l'ombre projetée est obtenue dans cette direction. La portion d'ombre vue par le capteur est aussi fonction de l'orientation de l'objet par rapport au soleil et au capteur, ce qui implique la connaissance de l'orientation (ou azimut) des trois éléments en présence (soleil, capteur et objet). La configuration géométrique des différents éléments est illustrée à la figure 6.10. où sont représentées les vues en perspective (a) et (c) qui montrent les éléments en hauteur et les vues en plan (b) et (d) qui indiquent les orientations des éléments par rapport à la même référence qui est le Nord. La formule mettant en relation tous les paramètres tirés de Shettigara et Sumerling, (1998) tient compte de l'effet de la hauteur de l'objet sur son ombre selon l'azimut et l'élévation du capteur. La méthode de calcul de la hauteur est fonction de l'azimut et du zénith du soleil et du capteur, de l'azimut du mur du bâtiment du côté de l'ombre et de la longueur de l'ombre mesurée selon la normale au mur du bâtiment. Elle est définie par l'équation suivante :

$$H = L_{\text{ombre}} / \{ [\cos(\phi_{\text{soleil}} + 90^\circ - \phi_{\text{mur}}) / \tan(\theta_{\text{soleil}})] - [\cos(\phi_{\text{satellite}} + 90^\circ - \phi_{\text{mur}}) / \tan(\theta_{\text{satellite}})] \} \quad (9)$$

H : hauteur du bâtiment;

L_{ombre} : longueur de l'ombre projetée;

θ_{soleil} et $\theta_{\text{satellite}}$: élévation du soleil et du capteur;

ϕ_{soleil} et $\phi_{\text{satellite}}$: azimut du soleil et du capteur;

ϕ_{mur} : azimut du mur du bâtiment du côté ombre;

La pente de la surface sur laquelle l'ombre se projette doit être prise en compte dans la détermination de la hauteur des objets à partir de leur ombre (Cheng et Thiel, 1995).

Cette pente modifie la longueur de l'ombre. Dès lors que la surface n'est plus plane, il faut tenir compte de la pente de la surface pour corriger la longueur de l'ombre mesurée.

6.3.2 Détermination de la hauteur de bâtiments sur le campus

La connaissance de la configuration de prise de vue est connue à travers les métadonnées qui fournissent l'élévation et l'azimut du soleil et du capteur à l'heure de l'acquisition de l'image. L'orientation des objets qui génèrent l'ombre est mesurée sur l'image de même que la longueur de l'ombre.

6.3.2.1 Mesure de la longueur de l'ombre

La longueur de l'ombre projetée se mesure de manière précise pour permettre une utilisation optimale en vue d'obtenir des résultats qui reflètent la réalité. Pour chaque ombre détectée, la mesure se fait dans un coin précis formé par le sommet de l'ombre et celui du bâtiment qui la génère et suivant la direction normale au mur du bâtiment qui génère cette ombre. Pour les besoins de validation, des hauteurs de bâtiments ont été mesurées sur le terrain à des endroits spécifiques (angles de bâtiments). C'est également à ces endroits que les longueurs des ombres ont été mesurées sur l'image. La mesure de la taille de l'ombre aux mêmes endroits que la mesure de la hauteur sur le terrain a une grande importance d'autant plus que la taille de l'ombre d'un même bâtiment n'est pas uniforme tout le long du mur.

6.3.2.2. Calcul des hauteurs

Une fois les longueurs des ombres mesurées, le calcul se fait en appliquant la formule pour chacune des longueurs. Les autres paramètres (zénith et azimut) du soleil et du capteur sont fournis dans les métadonnées de l'image; ces quatre paramètres sont constants pour la scène. L'orientation du mur est dérivée de l'orientation générale du bâtiment mesurée sur l'image. Après la définition des données en entrée, chaque hauteur est calculée en prenant en compte ses paramètres déterminants (Tableau 6.4).

Tableau 6.4 : Extrait des hauteurs de bâtiments mesurées et calculées sur le campus.

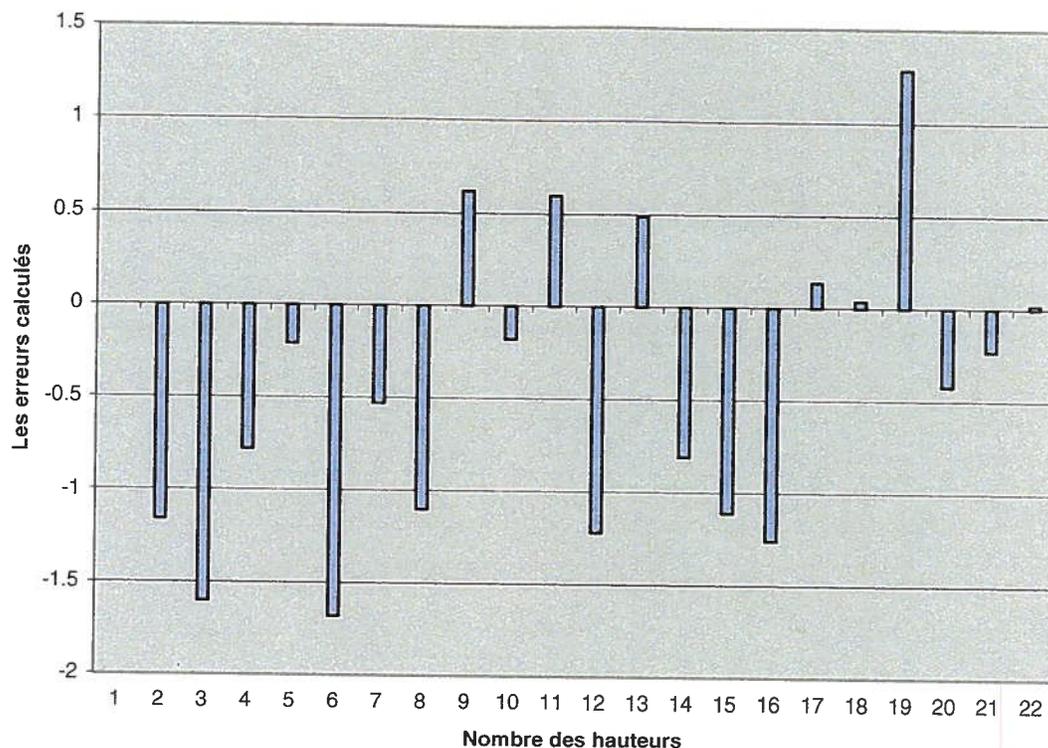
Immeubles	Hauteurs (m)	Taille Ombre (pixels)	Orientation (degrés)	Hauteurs calculées (m)	Erreur (m)
FLSH (Bloc A4)	13,41	10	38,63	12,89	0,52
FLSH(Bloc A3)	6,71	6	38,0	7,87	-1,16
FLSH(Bloc A5)	16,15	9	128,0	17,75	-1,6
FLSH(BlocA5)	16,15	13	38,63	16,93	-0,78
F,Ed (Bloc A1,façade)	12,0	9	108,0	12,21	-0,21
F, Ed (A2 et façade)	12,5	10	32,0	14,18	-1,68
F,Ed (Façade)	9,75	6	122,0	10,28	-0,53
F,Ed (Bloc A7)(Aile1)	11,58	11	90,3	12,68	-1,1
F,Ed(Bloc A7)(Aile2)	8,69	7	90,3	8,07	0,62
F,Droit (Bloc A8)	12,5	11	90,28	12,68	-0,18
Résidences (E5)	8,84	7	54,55	8,24	0,6
Pavillon Central	11,58	11	91,75	12,8	-1,22
Pavillon multifonctionnel	15,0	12	97	14,51	0,49
Centre Culturel	15,54	15	82,92	16,71	-0,81
Fac des sciences (Chimie)	15,24	14	92,28	16,35	-1,11
Fac des sciences (Physique)	11,58	11	92,28	12,84	-1,26
Fac des sciences(Biblio1)	16,46	14	92	16,32	0,14
Fac des sciences(Biblio2)	14,02	12	92	13,98	0,04
Fac de génie (Bloc2)	15,24	12	91,75	13,96	1,28
Fac de génie(Bloc1)	10,82	10	91,75	11,24	-0,42
École Musique	7,92	7	92	8,15	-0,23
Cheminée	49,52	32	27,15	49,5	0,02

Sur le campus 22 hauteurs de bâtiment et de la cheminée ont été calculées à partir de leur ombre. Les résultats sont présentés au tableau 6.4 dans la colonne identifiée Hauteurs calculées.

6.3.2.3 Validation des hauteurs calculées

Pour toutes les hauteurs d'immeubles calculées, la hauteur réelle correspondante a été mesurée sur le terrain. La différence entre la hauteur calculée et mesurée a été déduite et constitue l'erreur commise dans la détermination de cette hauteur (voir le Tableau 6.4.) La figure 6.11 présente l'amplitude des erreurs qui varient de 0,02 m à 1,68 m en valeur absolue. L'erreur moyenne quadratique (e.m.q) pour l'ensemble des mesures est estimée à 0,87, pour une erreur relative moyenne de 6,1 %

Une analyse globale de cette série d'erreurs nous permettra de mieux interpréter les résultats obtenus par cette méthode, d'en évaluer les forces et faiblesses par comparaison à d'autres méthodes et aussi d'évaluer son potentiel pour des applications futures.



Erreur relative moyenne = 6,13 % EMQ = 0,87 m.

Figure 6.11 : Amplitudes des erreurs entre les hauteurs calculées et mesurées.

6.3.3. Analyse et interprétation des résultats

La précision est de loin meilleure que celle obtenue et présentée dans les travaux de Cheng et Thiel (1995), Hartl et Cheng (1995), de Shettigara et Sumerling, (1998) et de Hui *et al.*, (2000) même si la résolution des images est différente. Les applications étaient faites sur les images SPOT panchromatique de 10 m de limite de résolution spatiale. Parmi tous ces travaux, seuls, ceux de Cheng et Thiel, (1995) présentaient une évaluation rigoureuse sur presque 40 immeubles avec une précision moyenne autour de 5 m et une e.m.q d'environ 3.6 contre une moyenne nominale de 0,60 m et une e.m.q de 0.87 pour la méthode proposée. Un regroupement des erreurs tel que présenté au Tableau 6.5., permet de noter que plus de 64 % des hauteurs sont calculées avec une erreur de moins d'un

mètre, tandis que 36 % des hauteurs sont obtenues avec une erreur comprise entre 1 et 2 m. Aucune hauteur n'excède une imprécision de plus de 2 m.

Tableau 6.5 : Répartition des erreurs sur les hauteurs

Erreur < 1 m	1 m < Erreur < 2 m	Erreur > 2 m
64 %	36 %	0%

L'amélioration de la précision est principalement due à la limite de résolution des images IKONOS panchromatiques qui est de 1 mètre contre 10 m pour les images SPOT panchromatiques. En dépit de la résolution, la prise en compte de la position du capteur (azimut et zénith) ainsi que de l'orientation du mur a certainement contribué dans l'amélioration de la précision. Ces résultats sont d'ailleurs comparables à ceux obtenus par stéréoscopie (Hijazi, 2002).

Malgré les excellents résultats obtenus, une imprécision sur la mesure de la taille de l'ombre peut facilement augmenter l'erreur de détermination de la hauteur. Il est donc important de bien mesurer la taille de l'ombre pour minimiser l'erreur sur la hauteur calculée. La précision peut également être améliorée en tenant compte de la pente de la surface sur laquelle l'ombre se projette, car la pente de la surface influence la taille de l'ombre au sol.

6.4. Conclusion partielle

Les résultats obtenus des différentes méthodes d'exploitation d'ombre confirment bien que l'ombre est une source d'information et que l'information masquée sous les ombres peut bel et bien être restituée. En effet, l'apport des attributs contextuels et texturaux permettent d'identifier la surface sous l'ombre et confirme ainsi l'hypothèse de la

restitution de l'information sous l'ombre par analyse de texture. Une fois l'information sous l'ombre connue, il devient facile de corriger les effets négatifs de cette ombre.

Les résultats sur les hauteurs calculées à partir des ombres confirment bien l'autre hypothèse sur la possibilité de déterminer la hauteur des objets connaissant la taille de leur ombre.

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

7.1. Conclusion générale

Les ombres sur les images de très haute résolution spatiale deviennent de plus en plus une préoccupation en télédétection. Malgré leurs effets négatifs sur les images, elles constituent une source d'information sur les objets qui les génèrent.

En télédétection, plusieurs méthodes sont proposées pour la détection de ces ombres, mais très peu recouvrent l'information masquée par celles-ci. Dans cette recherche, nous avons élaboré une méthode pour améliorer la détection des ombres et des outils pour leur exploitation (rechercher l'information masquée sous l'ombre, rehausser la qualité visuelle des images et déterminer la hauteur des objets à partir de leur ombre). La méthode de détection développée intègre les informations spectrales et géométriques qui caractérisent les ombres pour mieux les identifier. Il s'agit principalement de l'analyse locale d'histogramme des zones potentiellement ombre et des attributs de forme et d'orientation. L'apport de ces attributs a permis d'obtenir un taux élevé d'ombres détectées sur le Campus de l'Université et au Centre-ville de Sherbrooke. Ainsi, l'intégration de l'information spectrale, des critères de forme et d'orientation ainsi que le voisinage permet de discriminer de manière automatique les zones d'ombre sur les images de très haute limite de résolution spatiale en milieu urbain comme postulé dans la première hypothèse.

Après évaluation, les résultats de la restitution des surfaces sous ombre obtenus sur le campus sont excellents et la méthode développée basée sur l'intégration de l'information contextuelle et texturale est très novatrice. La restitution de l'information sous l'ombre permet de corriger aisément ces effets sur la qualité visuelle des images. L'utilisation du contexte du voisinage et de la texture permet de rechercher l'information sous l'ombre, ce qui confirme le postulat de la deuxième hypothèse de cette recherche.

La dernière exploitation de l'ombre est la détermination de la hauteur des bâtiments à partir de leur ombre. Les résultats obtenus sur quelques bâtiments du campus confirment l'intérêt de cette exploitation et démontrent également qu'il existe une forte relation entre la taille de l'ombre, la hauteur de l'objet qui la génère, ainsi que les positions (azimut et zénith) du capteur et du soleil au moment de la prise de vue. La précision de la détermination de certaines hauteurs met en relief le potentiel de cette technique.

Pour rendre ces méthodes opérationnelles, il faut les tester sur d'autres sites et améliorer les critères de confirmation de l'ombre dans la méthode de détection, utiliser de nouveaux descripteurs de texture plus adaptés aux images de très haute résolution spatiale pour la recherche de l'information sous l'ombre et enfin intégrer là où c'est disponible la pente des surfaces sur lesquelles l'ombre se projette dans la détermination des hauteurs des objets à partir de leur ombre.

7.2. Contributions

Les résultats obtenus durant ces travaux de recherche constituent une contribution majeure et dans certains cas, ils peuvent être considérés comme novateurs. La contribution majeure concerne principalement l'usage de nouveaux attributs dans la détection des ombres. Il s'agit en occurrence des descripteurs de forme (surface, largeur, longueur et compacité) qui sont utilisés pour la première fois dans la détection des ombres comme attributs géométriques. L'attribut géométrique de l'orientation selon l'azimut du soleil est également nouveau en détection des ombres; cependant, sa contribution reste très limitée.

L'analyse locale d'histogramme des zones potentiellement ombre a révélé qu'il existe bel et bien de l'information sous l'ombre et qu'il est possible de discriminer certaines zones d'ombre à partir d'une meilleure interprétation de cet histogramme. L'autre contribution novatrice de cette recherche est la restitution de l'information sous l'ombre. En effet, l'utilisation de l'information texturale pour rechercher la surface sous l'ombre est jusqu'à ce jour une nouvelle approche et les résultats obtenus sont très encourageants pour l'utilisation de cette technique pour rechercher les surfaces masquées par l'ombre et

difficilement identifiables par interprétation ou classification d'images. Cette technique trouvera certainement une application dans le complètement des cartes d'occupation du sol réalisées à partir d'images de très haute limite de résolution spatiale en milieu urbain. La recherche de l'information sous l'ombre peut avoir une application non moins importante qu'est la correction des effets d'ombre sur les images pour rehausser leur qualité visuelle et aussi leur contenu en information.

Enfin, la dernière contribution de cette recherche est la démonstration que l'ombre peut être exploitée comme source d'information pour calculer la hauteur des objets. La prise en compte des facteurs influents a permis d'améliorer la précision des résultats comparables à ceux fournis par la photogrammétrie. La disponibilité d'images de très haute limite de résolution spatiale pourrait donner un regain à cette méthode principalement dans les pays sous équipés en information cartographique, ainsi qu'au développement des systèmes d'information géographique à trois dimensions. Une autre contribution de cette méthode serait la production d'un modèle numérique de surface avec des hauteurs d'immeubles en vue de la rectification des images pour produire des ortho-images superposables à des cartes ou autres couches d'information dans un système d'information géographique.

7.3. Limites et amélioration des méthodes

Malgré les résultats prometteurs obtenus, les méthodes développées peuvent nécessiter des améliorations sur certains aspects. Parmi ces aspects, il faut citer : l'amélioration des critères de confirmation de la détection l'ombre, l'évaluation de la confiance de détection, l'utilisation de nouveaux descripteurs de texture mieux adaptés aux images de très haute résolution et la prise en compte de la pente des surfaces sur lesquelles les ombres se projettent durant le calcul des hauteurs à partir des ombres.

La confirmation de la détection des ombres à travers la recherche d'objets (bâtiments) susceptibles de générer ces ombres est parfois biaisée par la détection de l'objet. Les critères de détection de bâtiments utilisés dans la méthode (critères de forme) ne sont pas suffisants pour décider qu'un objet est un bâtiment. Pour mieux décider qu'un segment est

un bâtiment sensé générer une ombre, il serait souhaitable de tenir compte de nouvelles méthodes développées dans le domaine sans pour autant tomber dans le piège de la confirmation du bâtiment par l'ombre qu'on cherche à confirmer la détection.

Un autre moyen de contourner cette difficulté est d'introduire une mesure de confiance à chaque étape de la détection. À chaque règle de décision, on associe une mesure de confiance et à la fin du processus de détection, chaque ombre sera détectée avec une certaine mesure de confiance. Cette technique de mesure de confiance a été introduite par Voirin (2005) dans la détection des objets par un système à base de règles. Même si l'attribution des poids aux différentes règles reste empirique, cette approche trouve tout son sens dans la détection des ombres où certains attributs utilisés contribuent seulement à renforcer la certitude qu'un segment est une ombre. C'est le cas de l'attribut sur l'orientation des côtés de l'ombre selon l'azimut du soleil, qui en pratique ne permet pas vraiment de détecter une zone d'ombre, mais contribue à renforcer la certitude qu'un segment est une ombre.

Un autre aspect qui mérite plus d'investigations est l'utilisation de nouveaux descripteurs de texture pour la recherche de l'information sous l'ombre comme ceux de Hoogs *et al.*, (2003). En effet, les descripteurs de texture adaptés aux images de très résolution spatiale avec une forte densité de détails, permettraient d'améliorer la qualité des résultats de la restitution de l'information sous l'ombre. Parmi ces descripteurs de texture, citons ceux dérivés de la morphologie mathématique utilisés par Voorons *et al.*, (2004) dans la segmentation d'images à très haute limite de résolution spatiale.

Enfin, la prise en compte de la dénivelée dans la mesure de la taille des ombres permettrait d'améliorer la précision de la détermination des hauteurs d'objets à partir de l'ombre. C'est confirmé dans les résultats présentés par Cheng et Thiel, (1995). Nous n'avons pas intégré cet aspect parce que nous ne disposons pas de modèle numérique de terrain sur le campus de résolution spatiale adaptée à celle des images utilisées.

7.4. Perspectives de développement

Les méthodes d'exploitation d'ombre comme la restitution des surfaces sous l'ombre, le rehaussement des effets d'ombre et la détermination des hauteurs à partir des ombres peuvent trouver des champs d'application opérationnelle. Il s'agit principalement de la réduction des effets d'ombre sur les images par les fournisseurs d'images, du complètement des cartes d'occupation du sol obtenues par interprétation ou classification, de la génération d'un modèle urbain en trois dimensions en déterminant les hauteurs des bâtiments à partir de leurs ombres à l'échelle d'une ville.

Les fournisseurs d'images de très haute résolution spatiale sont confrontés parfois au problème de présence d'ombre sur leur produit et désirent justement en réduire les effets néfastes sur la qualité visuelle de leurs images. Notre méthode de détection et correction des effets d'ombre sur les images peut également être utilisée pour corriger les ortho-images de certains centres urbains pour améliorer leur qualité visuelle.

Une autre application opérationnelle de la restitution des surfaces sous ombre est le complètement des cartes d'occupation du sol dérivées des images de très haute résolution soit par interprétation ou par classification. L'utilisation de cette méthode pour restituer les informations masquées par l'ombre permettrait de minimiser le temps de travaux de terrain pour réaliser le complètement.

Enfin la dernière application et non la moindre est la possibilité de générer un modèle urbain 3D après détermination des hauteurs de bâtiments à partir de leur ombre. Pour généraliser cette application sur un quartier ou toute la ville, il faut disposer d'un modèle numérique de terrain sur lequel seront superposées les hauteurs calculées.

RÉFÉRENCES

Adams, J. B., Sabol, D. E., Kapos, V, Filo, R, A, Roberts, D. A., Smith, M. O., and Gillespie, A. R., (1995), Classification of Multispectral Images Based on Fractions of Endmembers: Application to Land-Cover Change in the Brazil Amazon, Remote Sensing of Environment Vol. 52, pp. 137-154.

Adjouadi M. (1986), Image Analysis of Shadows, Depressions and Upright Objects in the Interpretation of Real-world Scenes, Proceedings of the eighth international conference on pattern recognition. pp. 834-838.

Adler-Golden S. M., Mathew M. W., Anderson G. P., Felde G. W and Gardner J. A. (2002). An algorithm for de-shadowing spectral imagery. Presented to the AVIRIS earth sciences and applications Workshop at the NASA Jet Propulsion Laboratory, <http://www.spectral.com/publications.htm>

Allan J. W, (2001), High resolution Geographic Imagery and its impact on Gis, Gisdeveloppement.net, www.gisdeveloppement.net/technology/rs/techrs0015pf.htm (janvier 2003).

Baatz M. and Schaepe A., (2000), Multiresolution Segmentation -- An Optimization Approach for High Quality Multispectral Image Segmentation", In Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G. (eds.), Wichmann-Verlag, Heidelberg, pp. 12-23, 2000.
www.caf.dlr.de/.../projekte_nutzung/landsat/landsat_projekte/Projekt%20Hoffmann/lit/baatz_schaepe.pdf

Barnard K. and Finlayson G. (2000), Shadow Identification using Colour Ratios, <http://vision.cs.arizona.edu/kobus/research/publications/IST-00/IST-00.pdf>

Cheng F. and Thiel K.-H. (1995), Delimiting the building heights in a city from the shadow in a panchromatic SPOT-image Part 1. Test of forty-two buildings, *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 16, n° 3. pp. 409-415.

Collins J.B. and Woodcock C.E. (1999), Geostatistical Estimation of Resolution-Dependent Variance in Remote Sensed Images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 65, N°1, pp. 41-50.

Crevier D. and Lepage R., (1997), Knowledge-based Image Understanding System: A Survey, *Computer Vision and Image Understanding* Vol.67, N°2, pp. 161-185.

Definiens Imaging, Site Web central du logiciel E-cognition, www.definiens-imaging.com (décembre 2002).

Funka-Lea, G., D. (1994), The visual recognition of shadows by an active observer, Ph.D Dissertation, University of Pennsylvania.

Gagnon, L., Bugnet, P. and F. Cavayas. (2003), "Texture-based segmentation of temperate-zone woodlands in panchromatic IKONOS imagery", In Proceedings of the 17th Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls) : Geo-Spatial Image and Data Exploitation Developments and Applications IV(AeroSense 2003 - SPIE #5097). Orlando, Florida, April 21-25, 2003.

Gilles T. Philip (2001), Remote Sensing and Cast Shadows in Mountainous Terrain, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 67, N°7, pp.833-839.

Gwinner K., and Schaale M. (1997), A case study on the influence of shadows and shading on multispectral airborne imaging data, Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 7-10 July, Copenhagen, Denmark.

- Graham D. F., Hordley S. D. and Drew M. S.** (2002), Removing Shadows from Images, Proceedings of the 7th European Conference on Computer Vision-Part IV pp. 823 – 836.
- Haboudane, D.** (1999), Intégration des données spectrales et géomorphométriques pour la caractérisation de la dégradation des sols et l'identification des zones de susceptibilité à l'érosion hydrique, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 180 p.
- Hambrick, N., L., Loew, M., H., and Carroll, R., L.** (1987), The Entry-Exit Method of Shadow Boundary Segmentation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Vol. 9, N° 5, pp 597-607.
- Haralick, R. M.** (1979), Statistical and structural approach to texture, Proceedings of the IEEE, Vol.67, n° 5, P. 786-804.
- Hartl Ph. and Cheng F.** (1995) Delimiting the building heights in a city from the shadow on a panchromatic SPOT-image: Part 2: Test of a complete city. International Journal of Remote Sensing, Vol. 16 N° 15, pp. 2829-2842.
- Hasenfratz J.-M., Lapierre M., Holzschuch and Sillion F. X.** (2003), A survey of Real-time Soft Shadow Algorithms, STAR- State of The Art Report, EUROGRAPHICS 2003, pp. 1-20
- Hijazi J.** (2002), Elevation Extraction from Satellite Data Using PCI Software, PCI Geomatics, <http://www.pcigeomatics.com>
- Hoogs A., Collins R., Kaucic R. and Mundy J.** (2003), A Common Set of Perceptual Observables for Grouping, Figure-Ground Discrimination and Texture Classification, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 25 N° 4, pp. 458-474.

Hui A., Liew S., C., Kwoh L. K. and Lim H. (2000), Extraction and Utilization of Geometrical and Contextual Information in very High Resolution IKONOS Satellite Imagery, Gisdevelopment.net, AARS, ACRS,
[Http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/](http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/)

Hsieh J-W., Hu W-F., Chang C-J., Chen Y-S. (2003), Shadow elimination for effective moving object detection by Gaussian shadow modeling, Image and Vision Computing, 21, pp. 505-516.

Irvine B. R. and McKeon D. M. (1989), Methods for Exploiting the Relationship Between Buildings and their Shadows in Aerial Imagery, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol. 19, N° 6, pp. 1564-1575.

Jiang, C., and Ward, M., O. (1994), Shadow Segmentation and classification in a Constrained Environment. CVGIP: Image Understanding, Vol. 59, N° 2, PP. 213-225.

Lhomme, S., He D.-C., et Morin, D. (2004), « Évaluation de la qualité d'une image Ikonos pour l'identification du bâti en milieu urbain », Télédétection vol. 3, no 5, 2004.

Li Y., Sasagawa T. and Gong P. (2004), A System of the Shadow Detection and Shadow Removal for High Resolution City Aerial-Photo, Proceedings of the ISPRS congress in Istanbul July 2004, www.isprs.org/istanbul2004/comm3/papers/378.pdf.

Chungan L. and Nevatia R. (1998), Building Detection and Description from a single Intensity Image, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 72 n°2, pp. 101-121.

Martri J., Freixenet J., Batle J. and Casals A. (2001), A new approach to outdoor scene description based on learning and top down segmentation, Elsevier, Image and Vision Computing, 19, pp. 1041-1055. www.elsevier.com/locate/imavis.

Meister, G., Rothkirch, A., Monno, R., Wiemker R., Bienlein J. and Spitzer H. (1997), BRDF Effects in Remotely Sensed High Resolution Images of Urban Areas, Joint Workshop of ISPRS WG 1/1, 1/3 and IV/4, Sensors and Mapping from Space, September29-October 2.

Mikic I., Cosman P. c., Kogut G. T. and Trivedi M. M. (2000), Moving Shadow and Object Detection in Traffic Scenes, ICPR 2000, Barcelona, Spain.

Nadimi S. and Banu B. (2004), Physical Models for Moving Shadow and Object Detection in Video, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Vol. 26, N° 8, pp. 1079-1087.

Nakajima T., Tao G. and Yasuoka Y. (2002), Simulated recovery of information in shadow areas on IKONOS image by combining ALS data, Proceedings of ACRS.
www.gisdevelopment.net/acrs/2002/vhr/214.pdf.

Pal N. R. and Pal S. K. (1993), A review on image segmentation techniques, Pattern Recognition., vol. 26, no. 9, pp. 1277-1294.

Papamarkos N. and Gatos B. (1994), A new Approach for Multilevel Threshold Selection, CVGIP: Graphical Models and Image Processing, Vol. 56 N° 5, pp. 357-370.

Prati A., Mikic, I., Crana C., and Trivedi M., M., (2001), Detecting Moving Shadow: Formulation, Algorithms and Evaluation, Technical Report.
<http://cvrr.ucsd.edu/aton/publications/pdfpapers/>. (février 2003).

Prati A., Mikic, I., Trivedi, M. M., Cucchiara R., (2003), Detecting Moving Shadows: Algorithms and Evaluation, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, N°7, pp. 918-923.

Rau Jiann-Yeou, Chen, N-Y, Chen, L.-C. (2000), Hidden Compensation and Shadow Enhancement for True Orthophoto Generation, GISdeveloppement.net, www.gisdeveloppement.net/aars/acrs/2000/ts4/digi0003pf.htm, (mai 2003).

Robin, M. (1995), La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographiques, Paris : Nathan, 318 p.

Rosin P. L. and Ellis T. (1995), Image difference threshold strategies and shadow detection, 6th British Machine Vision Conf., Birmingham, pp. 347-356 1995, <http://users.cs.cf.ac.uk/Paul.Rosin/resources/papers/shadows.pdf>

Salvador, E., Cavallaro A., Ebrahimi T. (2001), Shadow identification and classification using invariant color models, Proc. of IEEE Signal Processing Society International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP-2001) Salt Lake City (Utah-USA), pp. 1545-1548, 7-11 May, 2001.

Salvador E., Cavallaro A. and Ebrahimi T. (2004), Cast Shadow segmentation using invariant color features, Computer Vision and Image Understanding 95, pp. 238-259, www.elsevier.com/cviu.

Sébari Imane (2004), Phénomène d'ombre sur les images de très haute résolution spatiale, Question de physique examen tel 910, Université de Sherbrooke, 16 p.

Settle, J. J., and Drake, N. A. (1993), Linear Mixing estimation of Ground Cover Proportions, International Journal of Remote sensing, Vol.14 n°6, PP 1159-1177.

Shettigara V. K. and Sumerling G.M. (1998), Height Determination of extended Objects Using Shadows in Spot Images, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 64, N°1, pp. 35-44.

Simpson J. J., Jin Z. and Stitt R. J. (2000), Cloud Shadow Detection Under Arbitrary Viewing and Illumination Conditions, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol.38, N° 2, pp. 972-976.

Sowmya A and Trinder, J. (2000), Modeling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images, Review Paper, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.55, pp 34-47.

Stauder J., Mech R., and Ostermann J. (1998), Detection of Moving Cast Shadows for Object Segmentation, Project TEMICS, www.irisa.fr/prive/jergen.stauder, (novembre 2002).

Tanaka S., and Sugimura T. (2001), A new frontier of remote sensing from IKONOS images, International Journal of Remote Sensing, Vol. 22, n°1, pp 1-5.

Toutin T. (2001), Elevation modeling form satellite visible and infrared (VIR) data, International Journal of remote sensing, Vol. 22, N° 6, pp. 1097-1125.

Tsai V. J. D. (2003), Automatic Shadow Detection and Radiometric Restoration on Digital Aerial Images, Geosciences and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS APOS, Proceedings 2003 IEEE International, Vol. 2, 21-25 July 2003, pp. 732 – 733.

Voirin Y. (2005), Élaboration d'un système à base de règles pour l'identification des zones perturbées en milieu forestier. Thèse de doctorat en télédétection, Université de Sherbrooke. P.170.

Voorons M., Voirin Y. Béné G. B. and Fung K. (2004), Very High Spatial Resolution Image Segmentation Based on the Multifractal Analysis, ISPRS Conference in Istanbul, July 2004.

Yamada Y. (2002), Using Shadow on the ground cast to orient high resolution satellite, Proceedings of the ACRS, www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/pos1/144.

Yoon J. J., Koch C. and Ellis T. J. (2002), ShadowFlash: an approach for shadow removal in an active illumination environment, BMVC 2002, pp.636-645, http://www.bmva.ac.uk/bmvc/2002/papers/74/full_74.pdf

Annexe 1 : Fonctionnement étape par étape des outils développés

Cette annexe résume les principales étapes des outils d'analyse développés pour la détection d'ombre, la restitution de l'information sous l'ombre, la compensation des effets d'ombre et la détermination des hauteurs des immeubles à partir de leur ombre.

A. DETECTION DES OMBRES DE BÂTI

Segmentation et calculs attributs dans E-cognition :

- Données d'entrée : image panchromatique.
- Résultats : fichier image de segments, fichier table d'attributs de segments (Numéro, moyenne, écart type, surface, longueur, largeur, orientation générale, compacité, entropie).

Première détection d'ombre

- Entrée : lecture du fichier image de segments et de la table d'attributs (figure A1.1).
- Tous les segments dont la moyenne de niveaux de gris est inférieure à 350 et dont le contraste est négatif sont considérés comme ombre potentielle.
- Sortie: vecteur de segments potentiellement ombre.

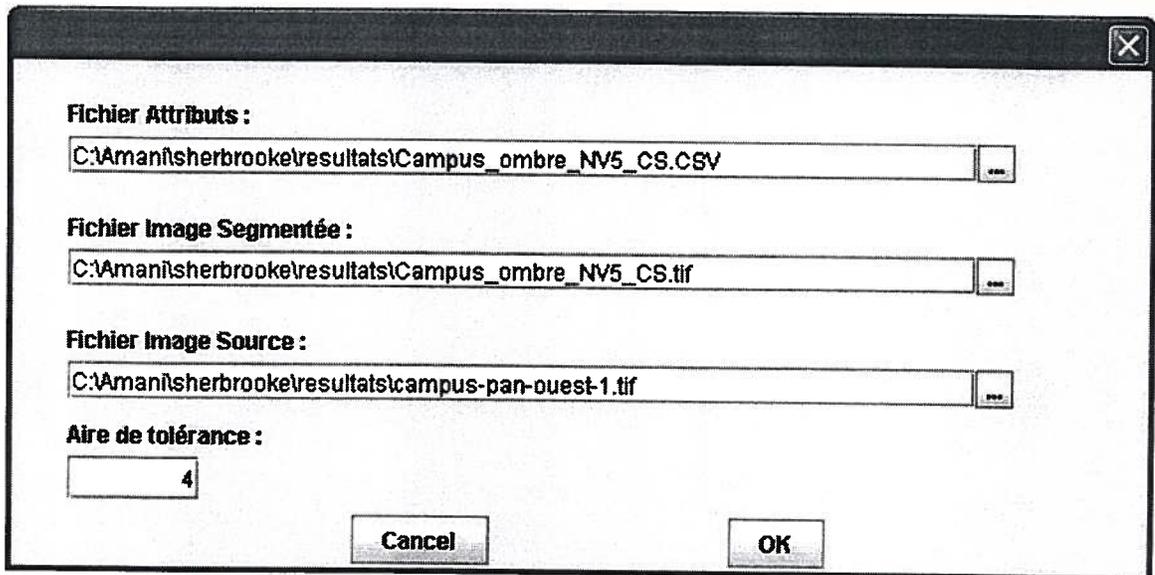


Figure A1.1 : Exemple d'écran d'entrée de données pour la détection des ombres.

Calcul des paramètres pour l'analyse locale, de forme et d'orientation

Pour chaque segment potentiellement ombre :

- Calculer l'orientation des côtés (azimut de chaque côté).
- Rechercher la liste des segments voisins, la liste des segments voisins côté soleil, la liste des segments voisins côté ombre.

Analyse locale d'histogramme et prise en compte des critères de forme et d'orientation

1. Analyse locale d'histogramme

- Calculer l'histogramme des zones d'ombre potentielle.
- Rechercher automatiquement le seuil par analyse d'histogramme des zones potentiellement ombre.
- Tous les segments dont la valeur moyenne de niveaux de gris est inférieure à ce seuil, sont considérés comme de l'ombre.

2. Critères de forme (surface/longueur versus largeur)

Pour tous les autres segments, l'analyse se poursuit avec les critères de forme et d'orientation comme suit :

- Tout segment potentiellement ombre dont la moyenne de niveaux de gris est comprise entre le seuil automatique et la moyenne globale des zones potentiellement ombre et dont le rapport surface/longueur est inférieur à la largeur (forme régulière) est considéré comme ombre.
- Tout segment dont la moyenne de niveaux de gris est supérieure à la moyenne globale et dont la largeur est inférieure à 4 est considéré comme de la pénombre donc comme de l'ombre.

3. Application du critère de compacité

La compacité est appliquée pour différencier les ombres du bâti de celles des arbres. Tous les segments d'ombres dont la compacité est inférieure à 78 % sont considérés comme ombre de bâti sous réserve de confirmation.

4. Fusion des segments d'ombre voisins

Tous les segments d'ombre voisins sont fusionnés pour former des entités géométriquement plus représentatives. Un nouveau vecteur de segments d'ombre est alors généré.

5. Critère d'orientation

Tous les segments d'ombre dont un ou plusieurs côtés ont un azimut qui coïncide avec l'azimut du soleil est considéré comme de l'ombre.

Confirmation de l'ombre

Tout segment d'ombre dont un segment voisin côté soleil possède une forme régulière (surface/longueur versus largeur), est considéré comme un bâtiment susceptible de générer cette ombre.

B. RESTITUTION DE L'INFORMATION SOUS L'OMBRE ET COMPENSATION DES EFFETS D'OMBRE

Recherche de segment de même texture que l'ombre

- Données en entrée : segments d'ombre, attributs (texture et liste des sous-segments qui composent ce segment d'ombre, liste de segments voisins côté ombre).
- Pour tout sous-segment d'ombre, rechercher parmi ses voisins côté ombre celui qui a la même texture que le segment d'ombre.
- Indexer le numéro de ce segment identifié dans les attributs du sous-segment d'ombre.

Restitution de l'information sous ombre

- Données en entrée : les sous-segments d'ombre avec comme principal attribut le segment de même texture, la carte d'occupation du sol du site.
- Pour chaque sous-segment d'ombre, identifier le type d'occupation de sol qui correspond au segment voisin indexé.
- Attribuer le même type d'occupation de sol au sous-segment d'ombre.

Compensation des effets d'ombre

- Données d'entrée : les sous-segments d'ombre avec comme principal attribut le segment voisin de même texture, l'image d'origine.
- Pour chaque sous-segment d'ombre, calculer les paramètres de transformation en utilisant les attributs radiométriques (moyenne de niveaux de gris, écart type, etc.) du segment d'ombre et de son voisin de même texture.
- Appliquer la transformation à tous les pixels du sous-segment d'ombre pour calculer leur nouvelle valeur s'ils n'étaient pas à l'ombre.
- Sauvegarder le nouveau fichier image corrigée.

C. DÉTERMINATION DE LA HAUTEUR D'IMMEUBLES

Pour chaque ombre d'immeuble, mesurer la taille de l'ombre selon l'azimut du soleil.

- Données en entrée : taille de l'ombre, les données sur la position du soleil et du capteur (angle zénithal et azimutal), l'angle azimutal donnant l'orientation générale de l'immeuble.
- Calcul de la hauteur de l'immeuble en fonction de la taille de son ombre.
- Validation avec les hauteurs connues.

Annexe 2 : Effets de la vectorisation sur le seuil de tolérance angulaire ϵ des azimuts calculés

La technique de vectorisation permettant de passer du mode raster (image) au mode vecteur (polygone) introduit des erreurs sur l'azimut des côtés des segments comme illustré sur les côtés AB et BC du polygone ABC à la figure A2.1 résultat d'une vectorisation de la surface ABC. Cette erreur est fonction de la résolution de l'image et de la longueur du côté du segment.

Si ϵ est l'erreur angulaire commise sur l'azimut du côté AB en s'inspirant de la figure A2.1. Sa valeur est estimée par la relation suivante : est estimée à :

$$\epsilon = \text{Arctg} (r/2 / d(AB))$$

Avec Arctg : arc-tangente, r : résolution spatiale de l'image (taille du pixel) et $d(AB)$ distance entre les sommets A et B.

En se basant sur l'image IKONOS de Sherbrooke, la taille moyenne des ombres observées sur celle-ci est de 10 (tableau 6.4) et la taille des pixels étant connue (1m), l'erreur commise est estimée à 2,8 degrés. C'est ce qui explique le choix de 3 degrés comme erreur sur l'estimation de l'azimut des côtés de segment d'ombre.

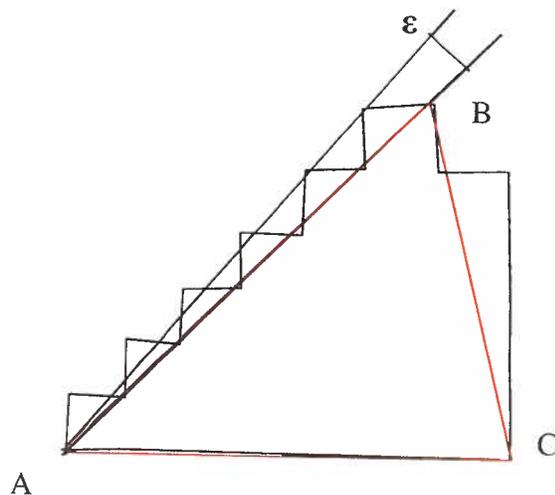


Figure A2.1 : Erreur commise sur l'estimation de l'azimut du côté AB du polygone ABC.