UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉTECTION DES MOUVEMENTS DE BLOCS ROCHEUX PAR IMAGERIE NUMÉRIQUE

MICHEL PAYEUR
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL,
GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

FÉVRIER 2004

© Michel Payeur, 2004

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-97975-X
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-97975-X

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉTECTION DES MOUVEMENTS DE BLOCS ROCHEUX PAR IMAGERIE NUMÉRIQUE

MICHEL PAYEUR
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL,
GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

présenté par : PAYEUR Michel
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. GAMACHE Michel, Ph.D., président
M. CORTHÉSY Robert, Ph.D., membre et directeur de recherche
Mme LEITE Maria Helena, Ph.D., membre et codirectrice de recherche
M. TANGUAY Marc G., Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'Institut de Recherche en Santé et Sécurité au Travail pour le financement nécessaire à la réalisation du projet #98-011. Je remercie également M. André Harvey et M. Patrick Frenette, ingénieurs à la mine Doyon, pour le temps investi dans la réalisation des essais sur le site de la mine.

Je tiens à remercier très sincèrement mes directeurs de recherche, M. Robert Corthésy et Mme Maria Helena Leite pour leur appui, leur soutien et leur patience tout au long de ce projet.

Je dois souligner de façon importante le support technique et l'amitié de M. André Ducharme qui m'a appris à travailler avec soin.

Finalement, je remercie avec amour Isabelle, mes parents et amis qui ont dû m'endurer pendant ce dernier retour aux études.

RÉSUMÉ

La détermination des mouvements de blocs reliés aux instabilités le long de parois rocheuses permet d'assurer la sécurité autour des excavations. Si ces mouvements peuvent être détectés, l'instabilité pourra alors être prédite, évitée et/ou contrôlée. Toutefois, la détection des mouvements de blocs aux parois d'un massif rocheux s'effectue présentement à l'aide d'instruments de mesure qui ne donnent qu'un aperçu très local des mouvements aux parois.

L'objectif visé par le projet était donc de mettre au point une technique de détection des mouvements rigides de blocs en milieu rocheux, tant à l'extérieur que sous terre. Cette technique devait être relativement rapide et simple d'utilisation, de manière à permettre une utilisation plus répandue. Pour répondre à ces critères, la détection de mouvements de blocs par imagerie a été choisie, une approche basée sur l'ensemble des travaux de recherche qu'ont effectués les professeurs Corthésy et Leite dans ce domaine.

Une méthodologie de travail a donc été développée, basée sur la réalisation d'essais en laboratoire et d'essais sur le terrain. À partir de cette méthodologie, les limites de détection de mouvements et les conditions d'utilisation de l'instrumentation ont été déterminées.

L'élément central de la méthodologie est le recalage d'images, c'est-à-dire l'alignement géométrique de deux images de sorte que la différence entre les deux devienne géométriquement acceptable. Pour effectuer ce recalage, deux logiciels ont été évalués, soit Registar(Geo) et Geomatica.

Cette étude a démontrée que la méthodologie développée permet de prédire un mouvement de bloc dans des conditions simulées. Elle a permis également de déterminer

les conditions d'utilisation de cette méthode sur le terrain, et d'identifier les problèmes reliés à son application.

ABSTRACT

Security in the surroundings of a rock face excavation can be assured only when all potential rock block movement has been determined and appropriate action taken. If such movement can be detected beforehand, the instability could then be predicted, avoided and/or controlled. However, present rock block movement detection is done using instruments which are complex to install and give only but a localized view of the general situation along the rock face.

This projects main objective was to establish a rock movement detection technique applied to both sublevel and open faced excavations. Such a technique was to be time efficient and simple to use in order to obtain, in the future, a more widespread use of it. To achieve the projects objectives, numerical imagery was chosen as a choice of methods based on past and present research by Corthésy and Leite on the matter at hand.

A work methodology was therefore developed using laboratory trial results and controlled field experiments. Based on the developed methodology, the method constraints on rock movement detection were determined as were the optimal conditions of use.

The principle element in the developed methodology is image registration or rather the geometrical alignment of to numerical images in order to obtain a geometrically correct image difference. To go threw with the image registration, two softwares were evaluated. These were Registar(Geo) and Geomatica.

The present study demonstrates the capability of the developed methodology to accurately detect simulated rock block movements as well as optimal field conditions of use. Further problems related to the widespread use of the methodology were identified.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **IV**

RÉSUMÉ ..... **V**

ABSTRACT ..... **VII**

TABLE DES MATIÈRES ..... **VIII**

LISTE DES FIGURESURES ..... **XII**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XXI**

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES ..... **XXIV**

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION **1**

1.1 Introduction 1

1.2 Énoncé du problème 1

1.3 Objectifs 2

1.4 Organisation du mémoire 2

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE **4**

2.1 Introduction 4

2.2 Techniques d'instrumentation pour la détection et la mesure de mouvement dans des massifs rocheux 6

2.2.1 Les méthodes à ancrages 6

2.2.2 Les méthodes impliquant des forages 8

2.2.3 Méthodes géomatiques 11

2.2.4 La photogrammétrie 11
2.2.5 Détection de mouvement par analyse d'images conventionnelles 12
2.3 Utilisation d'imagerie numérique en mécanique des roches 13
2.3.1 Caractérisation des discontinuités d'un massif rocheux 14
2.3.2 Mesure de déformations 15
2.3.3 Détection des mouvements de blocs aux parois d'excavation 16

CHAPITRE 3 : PRINCIPES D'IMAGERIE NUMÉRIQUE 17

3.1 Introduction 17
3.2 Notions d'imagerie numérique 17
3.3 La détection de changement par différences d'images 22
3.4 Le recalage d'images 25
3.4.1 Variations d'images 26
3.4.2 Transformations d'images 29
3.4.3 Le domaine fréquentiel 31
3.4.4 Le domaine spatial 32
3.4.5 Les techniques de ré-échantillonnage 36
3.5 Principes de photographie 40
3.5.1 L'objectif de l'appareil 40

CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE DE DÉTECTION DE MOUVEMENT DE BLOCS PAR ANALYSE D'IMAGES NUMÉRIQUES 43

4.1 Introduction 43
4.2 Acquisition et prétraitement des images 45
4.2.1 Acquisition des images 45
4.2.2 Prétraitement 53
4.3 Recalage des images 55

4.4 Différence d'images, post traitement et superposition.....58

4.5 Cas d'évaluation de la méthode 71

4.5.1 Cas A : Rocher d'intérieur, Pavillon André-Eisenstadt 71

4.5.2 Cas B : Paroi extérieure, Stationnement École Polytechnique.....85

4.6 Conclusions.....94

CHAPITRE 5 : ÉTABLISSEMENT DU SEUIL DE DÉTECTION DE MOUVEMENT 97

5.1 Introduction.....97

5.2 Paramètres de détection du mouvement de blocs 98

5.2.1 Seuil de détection du mouvement 98

5.2.2 Quantification du mouvement.....100

5.3 Paramètres géométriques d'acquisition.....115

5.3.1 Influence de la direction de mouvement 115

5.3.2 Influence de la précision de repositionnement de l'appareil.....121

5.4 Paramètres numériques d'acquisition 126

5.4.1 Influence de la résolution d'image 127

5.4.2 Influence de la compression d'image.....130

5.5 Paramètres externes d'acquisition (effets de luminosité).....133

CHAPITRE 6 : ÉTUDES DE CAS.....136

6.1 Premier cas d'étude : Falaise rocheuse, Université de Montréal 136

6.1.1 Premier bloc 144

6.1.2 Deuxième bloc.....145

6.1.3 Troisième bloc.....146

6.1.4 Quatrième bloc 147

6.2 Deuxième cas d'étude : Falaise rocheuse, CEPSUM.....149

6.2.1 Première zone 155
6.2.2 Deuxième zone 158
6.2.3 Troisième zone 161
6.2.4 Quatrième zone 161
6.3 Troisième cas d'étude : Galeries souterraines, Mine Doyon 171
6.3.1 Niveau 14 : Station d'arpentage 44-61 171
6.3.2 Niveau 14 : Arrière côté - J 180
6.3.3 Niveau 9.2 184

CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 191

RÉFÉRENCES 195

LISTE DES FIGURESURES

Figure 2.1. Schématisation des différentes étapes du contrôle de terrain. 4
Figure 2.2. Exemple d'un extensomètre à ruban ancré à la paroi de l'excavation (Scholey et Ingle, 1990). 7
Figure 2.3. Exemple d'un fissuromètre (Corthésy et al, 2001 a). 8
Figure 2.4. Élongamètres à tiges simple et multiples (Franklin, 1990). 9
Figure 2.5. Exemple d'inclinomètre (Franklin, 1990). 10
Figure 2.6. Image des cibles utilisées pour le projet d'imagerie du United States Bureau of Mines (McVey, 1974). 13
Figure 3.1. Représentation des niveaux de gris dans un système à 8 bits (Jensen, 1996)....20
Figure 3.2. a) Image démontrant une forte fréquence spatiale et b) Image démontrant une faible fréquence spatiale. 21
Figure 3.3. Images successives sans mouvement de caméra, ni variation de luminosité : a) image initiale, b) image démontrant un déplacement d'objet, c) détection du mouvement d'objet par différence d'images et d) inversion de l'image. 23
Figure 3.4. Les types de variations qui peuvent survenir entre deux images. 27
Figure 3.5. Exemple des types de variations géométriques. 28
Figure 3.6. Transformations mathématiques associées aux variations linéaires. 30
Figure 3.7. Illustration d'un point de contrôle sur deux images de la même scène, ayant subies une translation et une rotation. 32
Figure 3.8. Principe du ré-échantillonnage d'une image à corriger à une image finale (Jensen, 1996). 37
Figure 3.9. Résumé schématique du processus de recalage par points de contrôle. 39
Figure 4.1. Organigramme de la méthodologie de détection de mouvement de blocs. 44

Figure 4.2. Images successives avec un mauvais repositionnement de caméra : a) image initiale, b) image finale suite au repositionnement de l'appareil, c) différence d'images et d) inversion d'image.....46
Figure 4.3. Montage de l'appareil.....48
Figure 4.4. Position des lasers sur une paroi rocheuse.....50
Figure 4.5. a) Image d'origine ayant une mauvaise distribution d'intensité, b) histogramme de l'image d'origine démontrant une faible étendue, c) l'image d'origine suite à l'égalisation des niveaux et d) le nouvel histogramme de l'image.....54
Figure 4.6. Exemple de l'application des filtres moyen et médian avec une fenêtre de pixels de 3x3. Dans le cas de la méthodologie, le traitement s'effectue alors l'images est à 1 bits (en noir et blanc).....62
Figure 4.7. Utilisation de l'algorithme de détection de bordures avec trois seuils de détection. Les images de droites correspondent aux images finales.....63
Figure 4.8. 1ère étape de la méthodologie : L'acquisition des images. Cette étape comprend la prise de l'image initiale, le repositionnement d'appareil et la prise subséquente des images.....64
Figure 4.9. 2ième étape de la méthodologie : Le prétraitement. Cette étape comprend la transformation des images en niveaux de gris, et l'ajustement de la distribution de l'intensité lumineuse.....65
Figure 4.10. 3ième étape de la méthodologie : Le recalage. Cette étape est le processus d'alignement géométrique de l'image subséquente sur l'image initiale.....66
Figure 4.11. 4ième étape de la méthodologie : La différence d'images. Elle résulte en la différence entre l'image corrigée obtenue suite au recalage et l'image initiale suite au prétraitement.....67
Figure 4.12. 5ième étape de la méthodologie : Le post traitement. Cette étape comprend l'inversion de l'image obtenue par différence, l'application

de l'algorithme de recherche des bordures et ensuite l'application d'un filtre médian. 68

Figure 4.13. 6ième étape de la méthodologie : La superposition des images. Cette étape produit l'image finale, résultat de la superposition de l'image obtenue suite au post traitement sur l'image corrigée, obtenue suite au recalage..... 69

Figure 4.14. 7ième étape de la méthodologie : L'analyse des résultats. Cette étape consiste à déterminer sur l'image finale les blocs qui ont subis un mouvement. Ceci est apparent pour le bloc encerclé. Les autres zones de bruits correspondent toutes au grillage ou à la végétation. 70

Figure 4.15. Image initiale du roc prise dans le pavillon André-Eisenstadt de l'Université de Montréal. 72

Figure 4.16. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Registar(Geo) sur les images prise dans le pavillon André-Eisenstadt (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique. 79

Figure 4.17. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Geomatica sur les images prise dans le pavillon André-Eisenstadt (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique. 80

Figure 4.18. a) Image finale obtenue avec a) Registar(Geo) (recalage cubique, ré-échantillonnage bilinéaire) et b) Geomatica (linéaire, bilinéaire)..... 84

Figure 4.19. Image initiale prise à l'arrière de l'École Polytechnique..... 85

Figure 4.20. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Registar(Geo) sur les images prise à l'arrière de l'École Polytechnique (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique. 91

Figure 4.21. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Geomatica sur les images prise à l'arrière de l'École Polytechnique (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique. 92

Figure 4.22. Superposition du résultat présenté a) à la figure 4.20 (e) et b) figure 4.21 (b) sur l'image initiale. 96

Figure 5.1. Amplitude minimale théoriquement détectable de mouvement sur une paroi en fonction de la distance de l'objet de l'appareil et de l'objectif utilisé pour les appareils Kodak DCS 330 et Pro 14n (avec une résolution de 13.5 M Pixels). 99

Figure 5.2. a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale et d) grossissement de la zone d'intérêt sur le cône. 101

Figure 5.3. Image initiale prise dans le stationnement de l'École Polytechnique..... 103

Figure 5.4. Image finale obtenue suite au mouvement de 1 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica. 104

Figure 5.5. Image finale obtenue suite au mouvement de 3 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec

Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica. 105
Figure 5.6. Image finale obtenue suite au mouvement de 5 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica. 106
Figure 5.7. Zone ciblée, le long de l'arrête du bloc, pour des fins de comparaison entre les trois cas. 107
Figure 5.8. Amplitude mesurée suite au mouvement de 1 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica. 108
Figure 5.9. Amplitude mesurée suite au mouvement de 3 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica. 109
Figure 5.10. Amplitude mesurée suite au mouvement de 5 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica. 110
Figure 5.11. a) position initiale, b) position suite à un déplacement de 5 mm, sans repositionnement d'appareil. 112
Figure 5.12. a) position initiale, b) position suite à un déplacement de 1 mm, avec repositionnement, c) déplacement de 3 mm et d) déplacement de 5 mm.....113
Figure 5.13. Configuration géométrique de l'essai pour mesurer l'influence, sur la quantification du déplacement, de la direction par rapport au positionnement de l'appareil. 116

Figure 5.14. a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale et d) grossissement de la zone d'intérêt sur le cône. 117
Figure 5.15. Configuration géométrique de l'essai pour mesurer l'influence de la direction de déplacement d'un bloc. 118
Figure 5.16. Mouvement détecté sur le bloc de a) la première série avec Registar(Geo), b) la deuxième série avec Registar(Geo), c) la première série avec Geomatica et d) la deuxième série avec Geomatica. 119
Figure 5.17. Mouvement détecté sur le bloc de a) la première série et b) la deuxième série, par méthode de comparaison directe des images. 120
Figure 5.18. Mesures et géométrie de l'essai de la figure 5.12 b). 120
Figure 5.19. Image initiale pour les essais d'influence du repositionnement. 122
Figure 5.20. Bruit associé pour une rotation de a) 5^{o} (Registar(Geo)), b) 5^{o} (Geomatica), c) 10^{o} (Registar(Geo)), d) 10^{o} (Geomatica), e) 15^{o} (Registar(Geo)) et f) 15^{o} (Geomatica). 123
Figure 5.21. Bruit associé à un cisaillement de a) 5 cm (Registar(Geo)), b) 5 cm (Geomatica), c) 10 cm (Registar(Geo)), d) 10 cm (Geomatica), e) 15 cm (Registar(Geo)) et f) 15 cm (Geomatica). 125
Figure 5.22. Mouvement détecté sur le bloc avec une résolution d'image de a) 13.5 M pixels, b) 6.0 M pixels, c) 3.4 M pixels et d) 0.8 M pixels. 128
Figure 5.23. Bruit associé au recalage des images de a) 13.5 M pixels, b) 6.0 M pixels, c) 3.4 M pixels et d) 0.8 M pixels. 129
Figure 5.24. Mouvement détecté sur le bloc sur les images d'une résolution de 13.5 M pixels avec une compression d'image de a) 0% b) 25%, c) 50%, d) 75% et e) 100%. 131
Figure 5.25. Mouvement détecté sur le bloc sur les images d'une résolution de 6.0 M pixels avec une compression d'image de a) 0% b) 25%, c) 50%, d) 75% et e) 100%. 132
Figure 5.26. a) Image prise le 19 août 2003, b) image prise le 27 novembre 2003 et c) résultat du recalage effectué (sans recherche de bordures). 135

Figure 6.1. Située sur le campus de l'Université de Montréal, paroi utilisée pour réaliser la première étude de cas avec les zones d'intérêts encerclées. 137
Figure 6.2. a) Image initiale en tons de gris, b) histogramme de l'image initiale, c) image subséquente et d) histogramme de l'image subséquente. 138
Figure 6.3. a) Image initiale suite au prétraitement, b) histogramme de l'image initiale, c) image subséquente et d) histogramme de l'image subséquente. 139
Figure 6.4. a) Image corrigée avec Registar(Geo) et b) image corrigée avec Geomatica 140
Figure 6.5. Différence d'image suite à l'application du filtre médian a) obtenue avec Registar(Geo) et b) avec Geomatica. 142
Figure 6.6. Image finale obtenue avec Registar(Geo). 142
Figure 6.7. Image finale obtenue avec Geomatica. 143
Figure 6.8. Premier bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica. 144
Figure 6.9. Deuxième bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica. 145
Figure 6.10. Troisième bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica. 146
Figure 6.11. Quatrième bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica. 147
Figure 6.12. Différence d'image suite au recalage avec Geomatica a) avant le filtre médian et b) après le filtre médian. 148
Figure 6.13. Scène du 2^{ième} cas d'étude, à l'arrière du CEPSUM sur le campus de l'Université de Montréal. Les zones d'intérêt sont encerclées 151
Figure 6.14. Image et histogramme des intensités a) Image initiale, b) image subséquente de la 1ère étape et c) image subséquente de la 2^{e} étape. 153
Figure 6.15. Images subséquentes et histogrammes des intensités a) 3^{e} étape, b) 4^{e} étape et c) 5^{e} étape. 154

Figure 6.16. Zone 1 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil, b) suite à la 1ère étape, c) 2e étape et d) 3e étape. 156
Figure 6.17. Zone 1 a) Suite à la 4e étape et b) 5e étape. 157
Figure 6.18. Images finales a) avant l'application du filtre médian et b) après l'application du filtre. 158
Figure 6.19. Zone 2 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil et b) suite à la 1ère étape. 159
Figure 6.20. Zone 2 : Images finales suite à la a) 2e étape, b) 3e étape, c) 4e étape et d) 5e étape. 160
Figure 6.21. Zone 3 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil, b) après la chute à la 4e étape. 161
Figure 6.22. Zone 4 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil, b) 1ère étape, c) 2e étape et d) 3e étape. 162
Figure 6.23. a) Image initiale,b) histogramme initial, c) image subséquente et d) histogramme subséquent. 163
Figure 6.24. Image subséquente prétraitée avec l'ajustement de la courbe de tonalité. 164
Figure 6.25. Image corrigée par Geomatica avec un recalage quadratique et un ré-échantillonnage bilinéaire. 165
Figure 6.26. Images obtenues suite à a) différence d'image et b) la segmentation. 166
Figure 6.27. Images obtenues suite à a) l'application d'un filtre médian 3x3 et b) l'application d'un filtre médian 5x5. 167
Figure 6.28. Image finale du deuxième cas d'étude 169
Figure 6.29. Image finale a) Zone 1, b) Zone2, c) Zone 3 et d) Zone 4 170
Figure 6.30. Vue du toit, à partir de la station d'arpentage 44-61 au niveau 14 de la Mine Doyon 172
Figure 6.31. a) image initiale, b) histogramme initial, c) image subséquente et d) histogramme subséquent. 173

Figure 6.32. Suite au prétraitement a) image initiale, b) histogramme initial, c) image subséquente et d) histogramme subséquent. 174
Figure 6.33. Distribution de l'intensité avant le prétraitement sur a) image initiale et b) subséquente. 175
Figure 6.34. Image corrigée suite au recalage 176
Figure 6.35. Différence d'image présentant une moyenne d'intensité de 213.81 176
Figure 6.36. Images résultantes de l'application de la segmentation à un seuil de 30 et du filtre médian avec des fenêtres de 3x3 et 5x5 pixels. 177
Figure 6.37. Images résultantes de l'application de la segmentation à un seuil de 10 et du filtre médian avec des fenêtres de 3x3 et 5x5 pixels. 178
Figure 6.38. Images finales résultantes de l'application de la segmentation à un seuil de a) 30 et du filtre médian 3x3 et b) 10 et du filtre médian 3x3. 179
Figure 6.39. Niveau 14 : Arrière côté J a) image initiale et b) image subséquente. 181
Figure 6.40. Niveau 14 : Arrière côté J a) image corrigée et b) image différenciée. 182
Figure 6.41. Image obtenue avec l'application du a) détecteur des bordures avec un seuil de 30 et b) filtre médian 3x3. 183
Figure 6.42. Image finale pour l'essai situé à l'arrière côté J du niveau 14 184
Figure 6.43. Site utilisé au niveau 9.2 de la mine Doyon. 185
Figure 6.44. a) Image initiale et b) image subséquente, suite au prétraitement. 186
Figure 6.45. Image corrigée suite au recalage 187
Figure 6.46. a) Image résultante de l'algorithme détecteur de bordures (30) et b) image résultante du filtre médian 3x3. 188
Figure 6.47. a) Image finale du site au niveau 9-2 de la mine Doyon. 189

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1. Nombre minimum de points de contrôle. 34
Tableau 4.1. Tableau des intensités des pixels suite à la différence d'image. 73
Tableau 4.2. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec le logiciel Registar(Geo). Note : PPV signifie Plus Proche Voisin. 73
Tableau 4.4. Constantes (a_0 et b_0) obtenues des polynômes de transformation. 74
Tableau 4.5. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil, obtenues avec Registar(Geo). 76
Tableau 4.6. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil, obtenues avec Geomatica. 76
Tableau 4.7. Constantes obtenues des polynômes de transformation pour le cas avec mouvement d'appareil. 77
Tableau 4.8. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Registar(Geo), entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil. 78
Tableau 4.9. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Geomatica, entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil. 78
Tableau 4.10. Données résultantes des recalages effectués par Registar(Geo) pour les trois paires d'images. 81
Tableau 4.11. Données résultantes des recalages effectués par Geomatica pour les trois paires d'images. 81
Tableau 4.12. Tableau des intensités des pixels suite à la différence d'image. 86
Tableau 4.13. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec Registar(Geo). 86
Tableau 4.14. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec Geomatica. 87

Tableau 4.15. Constantes obtenues des polynômes de transformation. 87
Tableau 4.16. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil avec Registar(Geo). 88
Tableau 4.17. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil avec Geomatica. 88
Tableau 4.18. Constantes obtenues des polynômes de transformation pour le cas avec mouvement d'appareil. 89
Tableau 4.19. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Registar(Geo), entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil. 90
Tableau 4.20. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Geomatica, entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil. 90
Tableau 4.21. Données résultantes des recalages effectués avec Registar(Geo) pour les trois paires d'images. 93
Tableau 4.22. Données résultantes des recalages effectués avec Geomatica pour les trois paires d'images. 93
Tableau 5.1. Amplitude mesurée pour les déplacements de blocs de 1, 3 et 5 mm. 111
Tableau 5.2. Amplitude mesurée directement sur les images, pour les déplacements de blocs de 1, 3 et 5 mm avec repositionnement d'appareil. 114
Tableau 5.3. Moyenne du bruit associé au recalage des images à résolution variables. 130
Tableau 6.1. Paramètres de prises de vue utilisés. 138
Tableau 6.2. Constantes obtenues des polynômes de transformation. 140
Tableau 6.3. Moyennes des intensités pour les images traitées du premier cas. 141
Tableau 6.4. Paramètres de prises de vue utilisés. 150
Tableau 6.5. Résumé des changements intervenus dans la zone #1. 155
Tableau 6.6. Résumé des changements intervenus dans la zone #2. 159

Tableau 6.7. Moyennes des intensités pour les images traitées aux figures 6.26 et 6.27. 168
Tableau 6.8. Paramètres de prises de vue utilisés. 172
Tableau 6.9. Paramètres de prises de vue utilisés. 180
Tableau 6.10. Paramètres de prises de vue utilisés. 185

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

I : Intensité lumineuse ou illuminance.

x_1 : Coordonnée correspondante à la colonne de l'image à corriger.

y_1 : Coordonnée correspondante à la rangée de l'image à corriger.

x_2 : Coordonnée correspondante à la colonne de l'image finale.

y_2 : Coordonnée correspondante à la rangée de l'image finale.

u : Fréquence spatiale correspondante à la colonne de la transformée de Fourrier de l'image.

v : Fréquence spatiale correspondante à la rangée de la transformée de Fourrier de l'image.

I(x,y) : Fonction d'intensité bi-dimensionnelle de l'image.

F(u,v) : Transformée de Fourrier de l'image en fonction des coordonnées (u,v).

BV_{wt} : Moyenne pondérée des nouvelles valeurs d'intensités.

D_r : Dimension réelle d'un pixel sur l'image.

d_o : Distance objet-appareil.

d_f : Distance focale.

n : nombre de pixel.

p : taille d'un pixel.

M : Dimension de la colonne d'une image numérique.

N : Dimension de la rangée d'une image numérique (eq. 3.2, 3.3) et ordre du polynôme (eq. 3.6).

i : indice de la composante imaginaire d'un nombre complexe.

mW : Milliwatt.

RDB : Abréviation pour l'algorithme de Recherche Des Bordures.

GCP : Acronyme tiré de l'anglais pour points de contrôle (*Ground Control Points*).

JPEG : Acronyme tiré de l'anglais pour (*Joint Photographic Experts Group*).

Tiff : Acronyme tiré de l'anglais pour (*Tagged Image File Format*).

Bitmap : Format standard d'image numérique de Windows.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Introduction

Dans tous types de travaux d'excavation en milieu rocheux, les instabilités produites quelle que soit leur nature, posent à la fois des problèmes pour la sécurité en cours de construction et d'exploitation. Ces instabilités se produisent parfois le long de discontinuités dans un massif avec des mouvements de blocs rigides. Pour être en mesure d'assurer la sécurité autour des excavations, qu'elles soient temporaires ou permanentes, ces instabilités aux abords des parois rocheuses doivent être détectées de façon efficace et rapide.

1.2 Énoncé du problème

La détection de mouvements de blocs aux parois d'un massif rocheux peut s'effectuer par l'intermédiaire de plusieurs types d'instruments présentement disponibles et couramment utilisés qui partagent à divers degrés, les points communs suivants :

1. L'instrumentation peut être coûteuse et parfois complexe à installer.
2. Elle ne donne des informations que de façon ponctuelle aux parois rocheuses.

Pour ces raisons d'ordres pratiques, un suivi systématique des mouvements aux abords des excavations en milieu rocheux est souvent négligé, augmentant ainsi les risques associés aux chutes de blocs.

1.3 Objectifs

L'objectif principal du mémoire est de poursuivre les travaux initiés par Corthésy et al (2000, 2001a, 2001b) ayant pour but d'améliorer l'approche de détection de mouvement de blocs rigides pour les excavations souterraines et de mettre au point une méthodologie permettant d'étendre cette technique aux excavations à ciel ouvert pour laquelle les essais préliminaires ont été faits (Corthésy et Leite, 2003 a).

Cette technique de détection devra être assez simple d'utilisation et peu coûteuse, sans toutefois compromettre la fiabilité de la méthode. Ceci permettra à un plus grand nombre d'utilisateurs de s'y intéresser et de l'utiliser de façon courante.

1.4 Organisation du mémoire

Le mémoire est subdivisé en sept chapitres distincts (incluant celui-ci), établis de façon à permettre au lecteur une compréhension continue du sujet présenté.

Dans ce chapitre, l'énoncé du problème ainsi que les objectifs visés par le projet ont été identifiés. Une revue des techniques d'instrumentation existantes ainsi que des développements en imagerie numérique dans le domaine de la mécanique des roches est présentée au chapitre 2. Pour conclure la présentation des notions préalables au projet, une revue de certains principes en imagerie numérique et des techniques de bases en photographie optique est présentée au chapitre 3.

Au chapitre 4, la méthodologie de détection de mouvement de blocs par analyse d'images numériques est présentée selon l'ordre suivi en pratique. À la fin de ce chapitre, deux cas d'évaluation sont présentés de manière à clairement identifier l'influence des différents types de traitement d'image offerts à l'utilisateur ainsi que des choix de logiciels disponibles. Au chapitre 5, les limites de la méthode ainsi que ses

conditions d'utilisation sont traitées en présentant l'établissement du seuil de détection de mouvement.

Finalement, trois cas d'étude complets sont présentés au chapitre 6, soit des essais effectués sur le campus de l'Université de Montréal et à la Mine Doyon. Les conclusions et recommandations de ce rapport sont présentées au chapitre 7.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

En mécanique des roches, le contrôle de terrain est défini comme le contrôle de la zone entourant une excavation, incluant le toit, le plancher et les murs (Corthésy et al, 2001 a). Il peut être divisé en deux phases distinctes, soit l'auscultation et l'intervention. Selon Gill (1995), l'auscultation consiste à observer le comportement et l'évolution d'une structure rocheuse. Cette évolution peut être suivie de façon à mesurer des changements de contraintes ou des déplacements à l'intérieur du massif. La deuxième phase du contrôle de terrain, l'intervention, consiste à effectuer la stabilisation des zones identifiées lors de la première phase. Ceci est illustré à la figure 2.1.

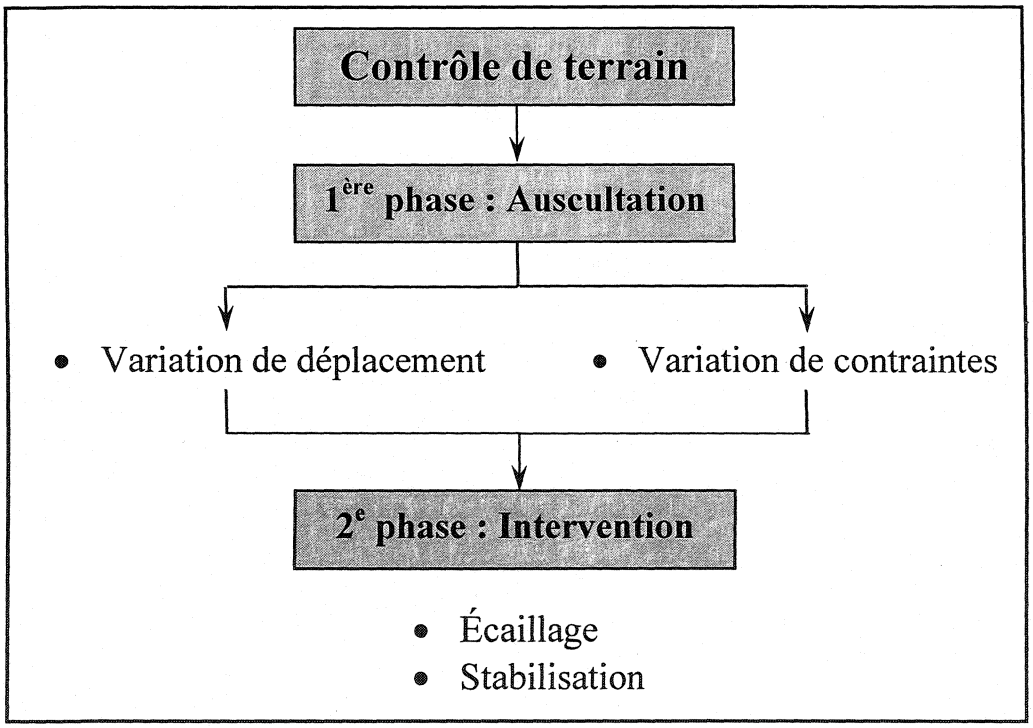


Figure 2.1. Schématisation des différentes étapes du contrôle de terrain.

Le projet vise la détection des mouvements de blocs préalable aux instabilités, correspondant ainsi à la première phase de contrôle de terrain. Ce type de mouvement peut se manifester de différentes façons, soit par la convergence ou par le glissement de blocs le long de plans structuraux.

Brièvement, la convergence est caractérisée par le fluage de la roche dans le temps, quelle soit intacte ou discontinue. Ceci correspond à une fermeture progressive de la galerie souterraine et est généralement observé en profondeur.

Le glissement de blocs sur des discontinuités implique la gravité. Le poids propre du bloc sert d'élément déclencheur pour produire un mouvement en fonction des propriétés mécaniques de la discontinuité et des contraintes qui y agissent. Les vibrations naturelles et induites dans la périphérie de la zone peuvent également influencer le glissement de blocs. Le lecteur peut se référer à plusieurs ouvrages en mécaniques des roches pour des notions plus approfondies de convergence et d'instabilités structurales.

Le principe exploité dans le présent travail est que les instabilités ou chutes de blocs sont précédées par des mouvements de ces blocs et si ces mouvements peuvent être détectés, l'instabilité pourra être prédite, évitée et /ou contrôlée. Avant donc de procéder avec le projet, une revue des techniques actuellement utilisées pour l'auscultation de mouvement dans des massifs rocheux est présentée. Finalement, à la section 2.3, une revue sommaire de l'utilisation de l'imagerie numérique dans le domaine de la mécanique des roches est présentée. Les conclusions portant sur l'ensemble des éléments présentés dans cette revue de littérature sont énoncées à la section 2.4.

2.2 Techniques d'instrumentation pour la détection et la mesure de mouvement dans des massifs rocheux

Il existe plusieurs types d'instruments servant à la détection et la mesure de mouvement. Certaines méthodes requièrent des ancrages fixes à partir desquels un instrument de mesure est posé. D'autres exploitent des trous de forage, instrumentés de manière à déterminer des mouvements à l'intérieur du massif. Des techniques d'arpentage, largement utilisées dans le génie civil sont également utilisées pour l'auscultation d'excavations à ciel ouvert et souterraines. Plus récemment, des systèmes de mesure de distance par lasers ou électro-optiques ont été utilisés. Ils présentent l'avantage d'être des méthodes non destructives, c'est-à-dire qu'aucun ancrage ou forage dans le massif n'est nécessaire. Finalement, des techniques de photogrammétrie sont plus rarement utilisées étant donné leur imprécision relative.

2.2.1 Les méthodes à ancrages

A) Les extensomètres

Le principe de base des extensomètres, qu'ils soient à fil, à ruban ou à tige, consiste à mesurer la distance entre les ancrages scellés au pourtour de l'excavation (Scholey et Ingle, 1990). Ceux-ci sont accrochés aux extrémités d'ancrages et mis sous tension de façon à permettre la lecture des déplacements que subissent les ancrages, tel qu'illustré à la figure 2.2.

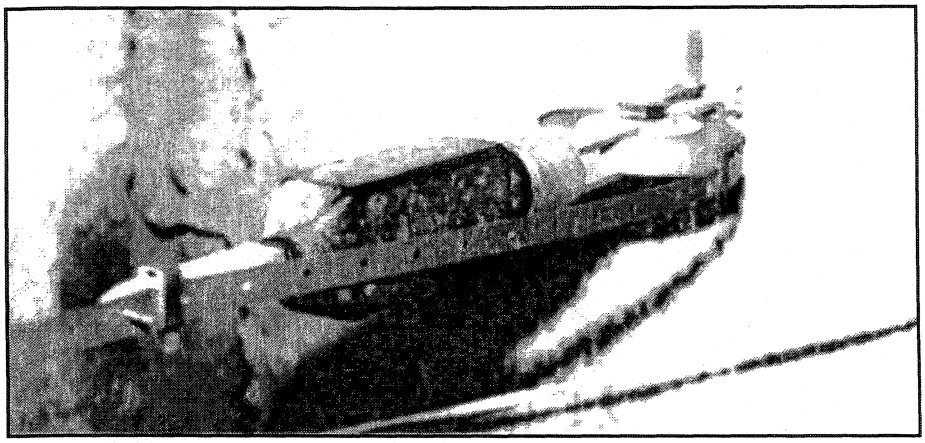


Figure 2.2. Exemple d'un extensomètre à ruban ancré à la paroi de l'excavation (Scholey et Ingle, 1990).

Ce type d'instrument est utilisé pour mesurer la convergence d'une excavation. Il est relativement limité dans son application étant donné qu'il ne permet qu'une mesure des déplacements aux ancrages.

B) Le fissuromètre

Les fissuromètres à tiges ou à corde vibrante permettent de mesurer un déplacement le long d'un joint (ou fissure) en le fixant, de part et d'autre du joint, à des ancrages fixés. Ils sont plutôt utilisés pour suivre l'évolution de fissures de tension dans le cas d'excavation à ciel ouvert ou sur des ouvrages en béton. Son principe de mesure est semblable à celui des extensomètres.

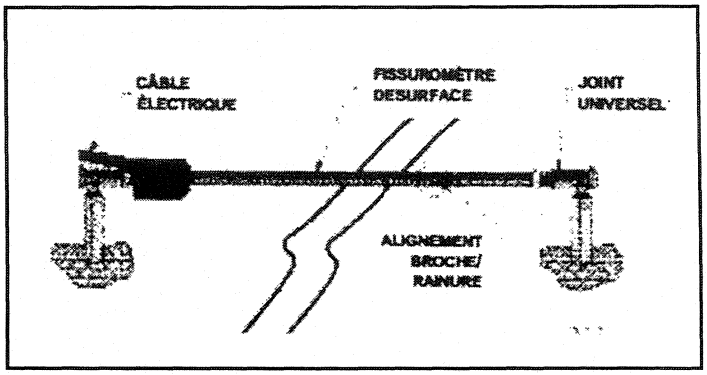


Figure 2.3. Exemple d'un fissuromètre (Corthésy et al, 2001 a).

Il existe plusieurs autres systèmes de détection de mouvement basés sur les deux principes présentés, soit l'extensomètre et le fissuromètre. Ces systèmes varient d'un à l'autre par leur sonde, capteur et/ou lecteur mais les principes demeurent les mêmes.

2.2.2 Les méthodes impliquant des forages

Des variations de déplacement dans un massif rocheux peuvent être mesurées à l'intérieur des trous de forage, soit par la mesure des variations axiales ou transversales des déplacements.

A) L'élongamètre

Les déplacements axiaux sont mesurés par des élongamètres. Un ancrage est fixé en fond de trou et/ou à une autre position désirée, et relié à la tête du forage par une tige pouvant atteindre une centaine de mètres. Un lecteur placé à la tête du forage permet de lire les déplacements le long de l'axe du forage. La figure 2.4 illustre l'élongamètre.

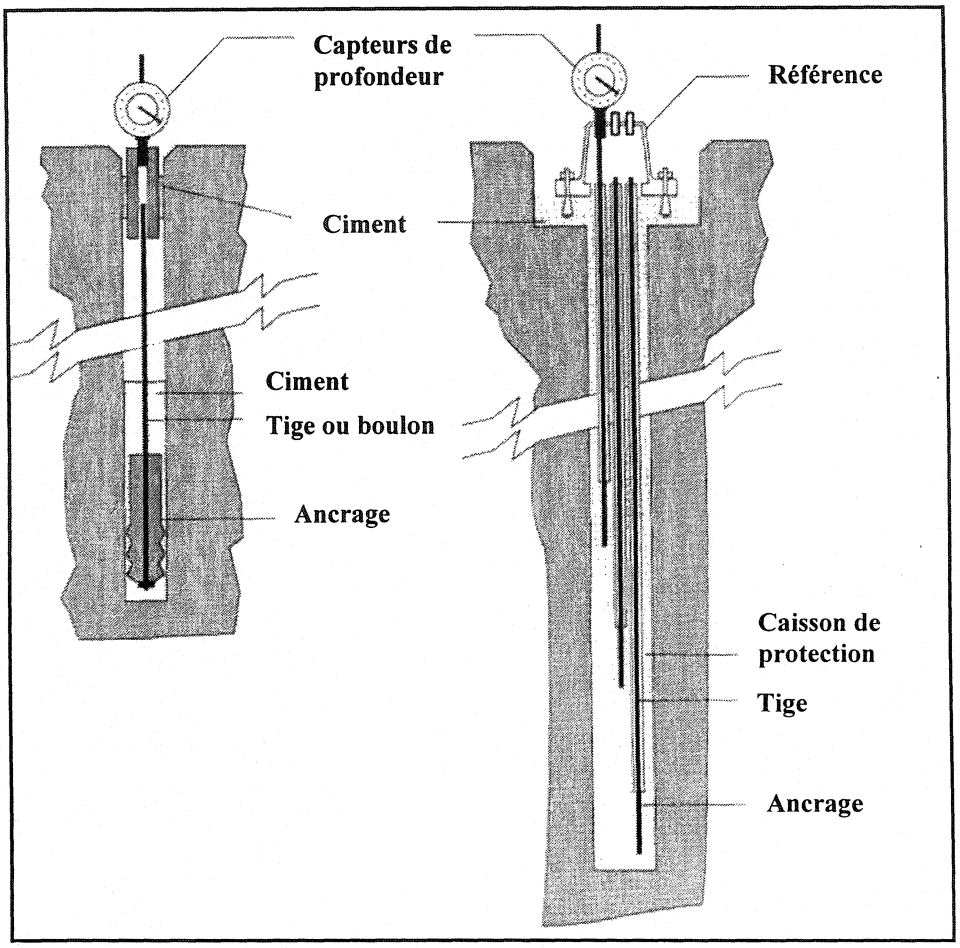


Figure 2.4. Élongamètres à tiges simple et multiples (Franklin, 1990).

Il existe d'autres types d'élongamètres basés sur le même principe. Dans certain cas, la tige est remplacée par un fil conducteur. Le système mesure donc des variations de courant électrique (Franklin, 1990), tel que pour la réflectométrie dans le domaine temporel (TDR). Dans ce cas, un appareil est utilisé pour transmettre un signal électrique le long d'un câble coaxial et pour capter le signal à son retour. La forme du signal réfléchit permet d'identifier le type de modification survenue sur le câble (Corthésy et Leite, 2003 b).

B) L'inclinomètre

Les déplacements transversaux sont quand à eux mesurés par un inclinomètre. Une sonde est placée à l'intérieur d'un tubage inséré dans le forage. Cette sonde est équipée d'un senseur d'inclinaison émettant un signal capté par un lecteur placé en tête de forage. L'angle entre la verticale et l'axe du forage est alors déterminé. La profondeur de la sonde ainsi que son inclinaison permettent par comparaison du profil d'inclinaison à des temps différents de calculer les déplacements transversaux qui surviennent. Cet instrument est illustré à la figure 2.5.

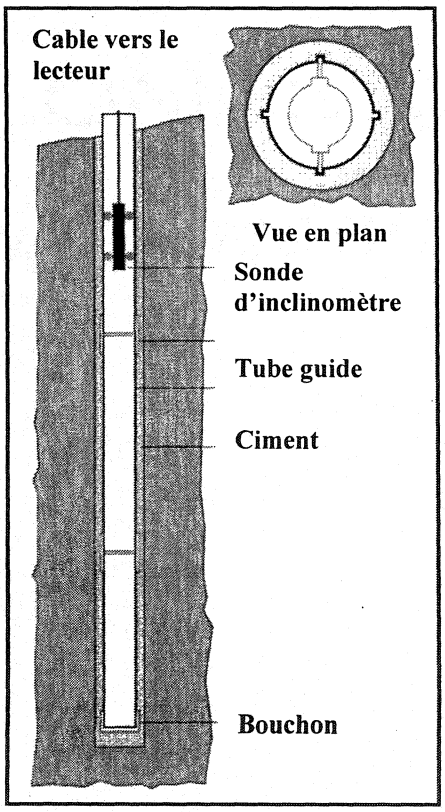


Figure 2.5. Exemple d'inclinomètre (Franklin, 1990).

2.2.3 Méthodes géomatiques

Les méthodes d'arpentage conventionnelles requièrent la mise en place de cibles à des endroits précis. La distance ainsi que les angles horizontaux et verticaux sont mesurés à partir d'une station. Les déplacements sont alors calculés à partir des variations de mesures notées.

Ces méthodes dépendent énormément de la stabilité de ces cibles. Étant donné la nature ponctuelle d'une cible, elle ne transmet que l'information liée à son emplacement immédiat, ce qui limite l'application de la méthode. De façon générale, ces méthodes sont utilisées pour effectuer un suivi du comportement des ouvrages.

Ces méthodes d'arpentage incluent la mesure de niveau, le théodolite, les lignes de traverses, la triangulation, les appareils électro-optiques tels les appareils à lasers et à mesure électronique et finalement, les GPS (Global Positionning System). Des systèmes intégrés, résultats de la combinaison de station d'arpentage classiques et des mesures électro-optiques et/ou GPS existent également.

Étant donné qu'une revue complète des méthodes d'arpentage existantes est hors de la portée de ce document, le lecteur peut se référer à des ouvrages plus complets pour poursuivre la matière (Franklin, 1990 ou autres).

2.2.4 La photogrammétrie

La photogrammétrie est en quelque sorte l'ancêtre de la méthodologie par imagerie numérique faisant l'objet de ce projet. Quoique moins précise que les méthodes d'arpentage précédemment mentionnées, elle permet toutefois l'analyse d'une plus grande étendue de données puisqu'elle ne se base pas sur des cibles posées à des

endroits spécifiques. Les zones en mouvements ne doivent donc pas être connues préalablement.

Le principe de la méthode est basé sur la détection de changement par comparaison d'images prises à des intervalles réguliers. La prise d'images s'effectue sur une pellicule photographique conventionnelle, donc le traitement d'images est presque impossible. La caméra est montée sur un trépied et fixée au sol ou sur une base de manière permanente afin d'obtenir un repositionnement parfait entre les images. Celui-ci est atteint avec un contrôle d'arpentage de façon à localiser les points apparaissant sur l'image (Franklin, 1990).

2.2.5 Détection de mouvement par analyse d'images conventionnelles

McVey (1974) a publié un article portant sur la détection de mouvement d'ouvertures souterraines par analyse d'images conventionnelles. Cette recherche faisait état de la capacité de détecter un mouvement dans une galerie souterraine, en utilisant des points de contrôle et les principes de photogrammétrie mentionnés ci-haut. Ces repères (points de contrôle) étaient placés à des ancrages fixés au toit et aux murs. La caméra était fixée au sol de façon à ne permettre aucun changement de position entre les prises d'images.

Cette technique avait l'inconvénient marqué de ne permettre qu'une mesure de déplacement à l'endroit des cibles, et donc ne reflétait pas une vue d'ensemble de la surface. De plus, l'utilisation de pellicules chimiques réduisait énormément les possibilités de traitement des images. Un exemple d'une installation est illustré à la figure 2.6.

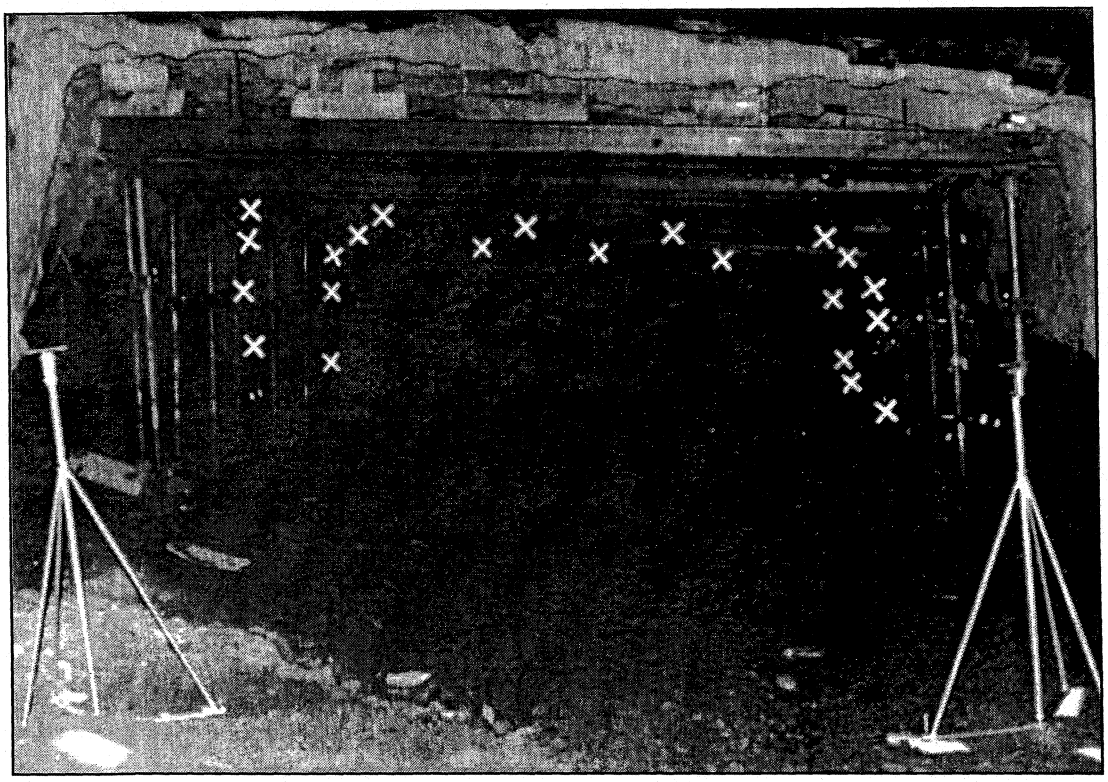


Figure 2.6. Image des cibles utilisées pour le projet d'imagerie du United States Bureau of Mines (McVey, 1974).

2.3 Utilisation d'imagerie numérique en mécanique des roches

L'imagerie numérique est utilisée aujourd'hui dans plusieurs domaines de recherche. La facilité avec laquelle un utilisateur peut traiter une grande quantité d'information rend cette approche nettement plus avantageuse que l'imagerie par pellicule conventionnelle.

Cette section ne résumera pas l'ensemble des domaines de recherche utilisant l'imagerie numérique mais plutôt, comment la mécanique des roches a pu bénéficier de cette nouvelle technologie, en y présentant quelques travaux de recherche qui sont, d'une façon ou d'une autre, reliés au projet présentés.

2.3.1 Caractérisation des discontinuités d'un massif rocheux

La caractérisation des discontinuités d'un massif rocheux avec l'utilisation d'imagerie numérique fait l'objet de quelques recherches. Lemy et Hadjigeorgiou (2003 a et b) utilisent l'imagerie numérique pour la caractérisation d'un massif rocheux dans une mine souterraine. À l'aide de différents algorithmes de détections des bordures et des traces appliqués sur les images prises sous terre, ils parviennent à déterminer les familles de discontinuités présentes dans le massif rocheux, pour en évaluer par la suite le comportement géomécanique.

La technique développée utilise des images conventionnelles qui sont ensuite numérisées en niveaux de gris. Les images sont d'abord prétraitées de façon à rehausser les caractéristiques recherchées sur l'image. Ensuite celles-ci sont segmentées, ce qui consiste en la subdivision de l'image en fonction des traces (correspondant aux discontinuités) en une image binaire. L'image résultante est ensuite filtrée de manière à éliminer toute trace de bruit et conserver les traces de discontinuités. Finalement, l'analyse des résultats s'effectue pour permettre une caractérisation géomécanique du massif rocheux.

Kemeny et al (2003) ont également développé une méthode de caractérisation d'un massif rocheux par l'intermédiaire d'imagerie numérique. L'approche de cette méthode réside plutôt dans la détermination de l'angle entre la trace de la discontinuité et le plan de l'image. La séquence de la méthodologie est très similaire à ce que proposent Lemy et Hadjigeorgiou (2003). Dans leur cas, elle est plutôt utilisée pour des parois lisses. Pour des surfaces irrégulières, les auteurs proposent une autre méthode basée sur la numérisation de la surface du massif rocheux au laser. Cette technique se rapproche davantage aux méthodes d'arpentages par lasers. L'équipement nécessaire est très coûteux, peu transportable et très sensible, limitant ainsi les applications de la méthode.

Gaich et al (2002 a et b, 2003) proposent une identification des paramètres géomécaniques d'un massif rocheux en utilisant un système de vision numérique. Ce système est basé sur la reconstruction d'images numériques prises de paires pour obtenir un modèle en 3-dimensions de la paroi rocheuse. À partir d'une représentation à l'écran, l'utilisateur peut alors déterminer les caractéristiques présentes du massif. La reconstruction des images s'effectue en trois étapes, soit l'identification des paires de points identiques d'une image à l'autre, la construction du modèle en 3-dimensions à partir des coordonnées de l'appareil, son orientation et les points communs des deux images et finalement, la génération d'un maillage qui assure la connexion efficace des points communs.

L'orientation de l'appareil est obtenue à l'aide de repères dont les coordonnées ont été déterminées par arpentage. Étant donné que la méthode ne permet pas une reconnaissance parfaite des caractéristiques géomécaniques du massif, le système permet à l'utilisateur sur le terrain de schématiser directement sur les images captées les différentes structures repérées à l'œil. L'orientation des discontinuités est obtenue directement sur l'image en 3-dimensions en utilisant le principe de triangulation. Similairement aux recherches présentées précédemment, une évaluation des caractéristiques géomécaniques du massif s'effectue avec l'analyse des traces des discontinuités.

2.3.2 Mesure de déformations

Kanduth (1998) dans son mémoire de maîtrise utilise des techniques d'imagerie numérique pour mesurer des micro-déformations sur des échantillons de roches en compression uniaxiale. La mesure des déformations s'effectue par différence d'images entre l'image initiale avant la mise encharge et l'image finale suite à l'essai. Le principe exploité pour effectuer la différence d'image est le *Template matching* qui consiste en une analyse des deux images afin de repérer des zones de pixels identiques.

2.3.3 Détection des mouvements de blocs aux parois d'excavation

Les travaux de Kanduth (1998) ont mené Corthésy et al (2001 a, b et c) à l'utilisation d'imagerie pour détecter des mouvements aux abords de parois rocheuses. Des essais ont été effectués pour valider la possibilité d'utilisation d'imagerie en milieu minier. Le principe de différence d'images pour détecter un changement utilisé. Les auteurs proposent d'utiliser des techniques de recalage, largement utilisées en télédétection, pour obtenir une correction géométrique des images, nécessaire à la différence utilisée pour déterminer un changement.

Corthésy et Leite (2003 a) ont par la suite proposé d'utiliser cette méthode dans des excavations à ciel ouvert où les changements brusques d'intensité lumineuse posent problème au principe de détection de changement par différence d'images.

CHAPITRE 3 : PRINCIPES D'IMAGERIE NUMÉRIQUE

3.1 Introduction

La progression rapide et constante de l'imagerie numérique au cours des dernières années autant pour les appareils photographiques que pour les logiciels de traitement d'images, lui a permis d'être utilisée aujourd'hui de façon systématique dans plusieurs sphères de recherche. En vertu des innombrables possibilités de traitement de l'image numérique, une multitude d'applications s'ouvrent à cet outil parfaitement adapté à de nouvelles méthodes d'auscultation.

À la prochaine section, seront présentées quelques notions de bases en imagerie numérique, utiles tout au long du présent document. Le lecteur pourra se référer à des ouvrages spécifiques traitant d'imagerie numérique pour un aperçu plus en profondeur de la matière présentée. Le principe de détection de changement par différence d'images, qui est au cœur de la méthode proposée, sera expliqué également. Ensuite, le recalage, méthode permettant la correction géométrique d'images sera présenté. Finalement, un aperçu des notions de base en photographie optique sera présenté en fin de chapitre.

3.2 Notions d'imagerie numérique

Une image numérique est définie en fonction de deux critères. Premièrement, si elle est définie de façon continue ou non sur l'ensemble de la surface. Deuxièmement, si ses valeurs associées sont d'une précision infinie ou limitée. En fonction de ces deux critères, elle peut être classifiée en quatre catégories distinctes, soit continue-continue, continue-discrète, discrète-continue ou discrète-discrète.

Une image numérique est une image discrète-discrète parce que, d'une part, elle n'est pas définie de façon continue sur tous les points de l'image et d'autre part, les valeurs associées ne sont pas d'une précision infinie. Pour expliquer ceci davantage, une image numérique peut être définie comme une série bidimensionnelle (matrice) de nombres, chacun représentant l'illuminance d'un élément de l'image, appelé pixel (Watt et Policarpo, 1998). L'illuminance est donc la valeur associée à un pixel de l'image, qui représente la quantité de lumière qu'un objet produit ou réfléchit (Lemy, 2002). Étant donné qu'une image numérique est, ni plus ni moins que l'ensemble des pixels qui la composent et elle n'est donc pas définie de façon continue, elle est dite discrète.

Chaque pixel compris dans l'image est représenté par les coordonnées x et y d'un système cartésien, la valeur en x représentant sa position horizontale (sa colonne) et la valeur en y représentant sa position verticale (sa rangée). La résolution spatiale de l'image est donc déterminée par le nombre de pixels composants l'image, ou plutôt le nombre de pixels qui composent le capteur CCD (Charge Coupled Device). Ce capteur est l'équivalent numérique de la pellicule photosensible, présente dans un appareil conventionnel. Brièvement, le capteur CCD est composé de photosites individuels, ou pixels, qui captent la lumière (les photons émis) et la transforment en un signal électrique. Par conséquent, la qualité d'une image numérique est directement reliée à sa résolution spatiale, qui elle est directement reliée à la sensibilité du capteur CCD.

Il est important de mentionner l'effet de sensibilité du capteur, car il détermine en grande partie la qualité de l'image. Plus les photosites (pixels) d'un capteur CCD ont une grande surface, plus ils permettent l'entrée de photons, donc plus ils sont sensibles. Par contre, pour deux images de mêmes dimensions scalaires, plus une image compte de pixels, plus la taille des pixels sera petite et meilleur sera le détail de l'image. Il existe donc un compromis entre la taille et la quantité de pixels d'un appareil. Ce dernier point est simplement mentionné pour mettre en évidence certaines particularités

liées à la résolution d'une image. L'influence de l'amplitude de la résolution spatiale sur la qualité des résultats sera discutée au chapitre 5.

Une image numérique peut être stockée en mémoire sous différents formats, les plus fréquemment utilisés étant les formats TIFF, Bitmap et JPEG. Les formats TIFF et Bitmap agissent sans compression de l'image, c'est-à-dire sans baisse de la résolution spatiale lors de la mise sous mémoire. Le format JPEG pour sa part, utilise un algorithme de compression variable d'image, qui agit en fonction du niveau de compression désiré. L'algorithme exploite la façon dont l'œil humain perçoit une image en agissant sur des blocs de 8x8 pixels, donc l'image apparaît toujours réelle à l'œil humain après la compression. Toutefois, plus une image est comprimée, plus elle perd de l'information spécifique sur la scène photographiée. Ce point est important lorsque l'image est utilisée comme instrument de mesure. Finalement, le plus gros avantage de la compression JPEG provient de la quantité d'espace mémoire épargnée lors de la sauvegarde du fichier. Les effets de compression d'image seront donc également abordés au chapitre 5.

Sur le terrain, les images sont prises en couleurs RGB (red, green, blue). La projection de la scène photographiée passe par trois filtres spectraux qui la divisent en ses trois composantes. Elles sont ensuite transformées en images monochromatiques définies en niveaux de gris à 8 bits (2^8). Cette transformation s'effectue par le calcul suivant :

$$I_{gris} = 0.3\ I_{rouge} + 0.59\ I_{vert} + 0.11\ I_{bleu} \tag{3.1}$$

où I_n représente la valeur de l'illuminance pour le canal n (Green et MacDonald, 2002). Cette transformation est le *NTSC video formula for American television.* Dans un tel système, il est possible de représenter 256 niveaux d'intensité pour chaque canal, chaque pixel ayant une intensité comprise entre 0 et 255, 0 étant noir et 255 étant blanc. La figure 3.1 illustre ce principe.

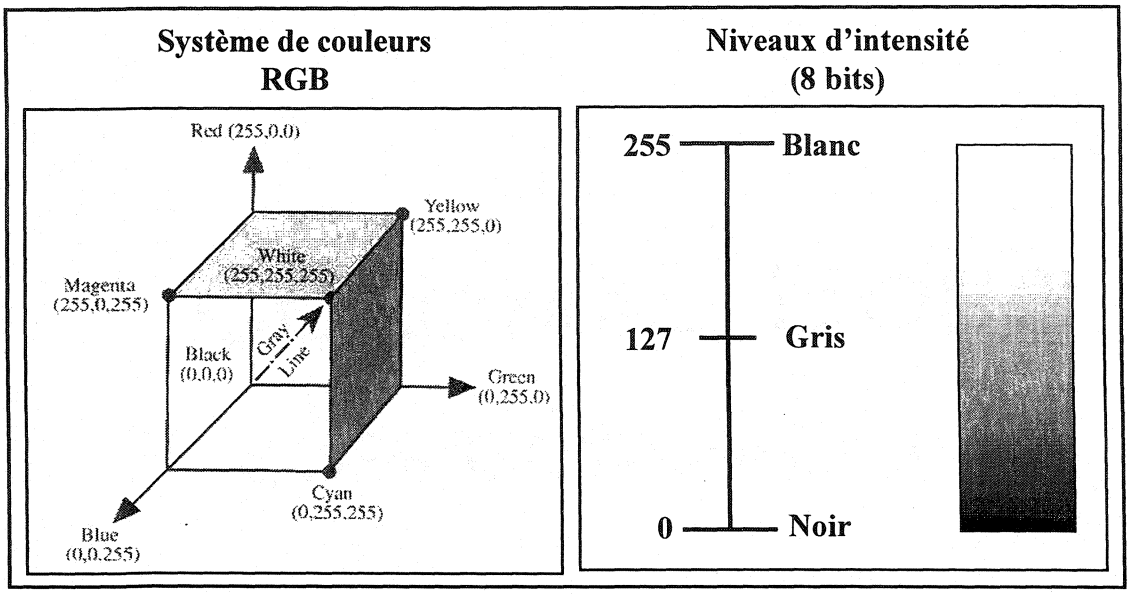


Figure 3.1. Représentation des niveaux de gris et de la couleur dans un système à 8 bits (Jensen, 1996).

Les images peuvent être représentées dans le domaine spatial et dans le domaine fréquentiel. Dans le domaine spatial, chaque pixel de l'image est représenté par une valeur d'intensité. Dans un tel cas, l'ensemble des pixels reproduit la scène perçue par l'œil humain. La fréquence spatiale reflète le changement d'intensité entre pixels voisins, donc une image à fréquences spatiales élevées a de forts contrastes. Ceci pourrait être apparenté à l'image d'un jeu d'échecs ayant des alternances de carrés noirs et blancs. Inversement, une image à fréquences spatiales faibles a de faibles contrastes, telle une image représentant un parfait dégradé de tons de gris. Ce principe est illustré à la figure 3.2.

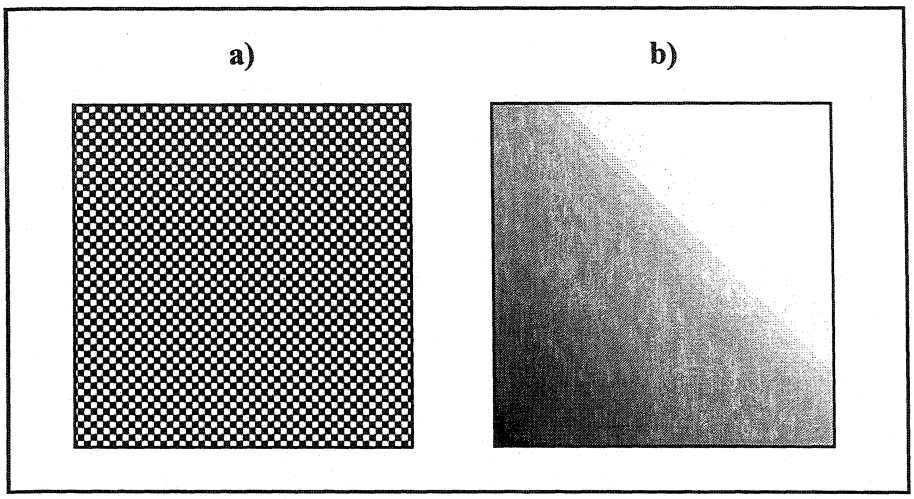


Figure 3.2. a) Image démontrant une forte fréquence spatiale et b) Image démontrant une faible fréquence spatiale.

Une façon de représenter une image est de la transformer dans son domaine fréquentiel, où chaque point de l'image représente une fréquence particulière contenue dans le domaine spatial. La transformée de Fourrier est l'outil par lequel on passe d'un domaine à l'autre, le domaine spatial étant l'*input* et le domaine fréquentiel étant l'*output*. Mathématiquement, ceci est donné par :

$$F(u, v) = (1 / MN) \sum_{X=0}^{M-1} \sum_{Y=0}^{N-1} I(x, y) \exp(-i2\pi((ux / M) + (vy / N))) \qquad (3.2)$$

et la transformée inverse :

$$I(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp(i2\pi((ux / M) + (vy / N))) \qquad (3.3)$$

où M et N sont les dimensions en pixels de l'image. Cette équation peut être interprétée comme étant la valeur de chaque point $F(u,v)$ obtenu par la somme des multiplications de l'image spatiale $I(x,y)$ par la fonction de base correspondante, qui est de nature sinusoïdale. Étant donné qu'une image dans le domaine Fourrier est exprimée par ses composantes sinusoïdales, il devient donc plus facile de manipuler certaines fréquences

de l'image. Ceci étant dit, il faut également mentionner que d'un point de vue fréquentiel, le bruit et les limites de discontinuités sont similaires, donc difficiles à distinguer. Pour cette raison, le domaine fréquentiel n'est pas utilisé dans le cadre de ce projet.

3.3 La détection de changement par différences d'images

L'essentiel de la recherche proposée dans le présent rapport repose sur un élément fort utilisé en imagerie numérique pour la détection de changement, la différence d'images. Simplement expliqué, si une caméra numérique est installée de façon à ne subir aucun déplacement, et deux images successives sont prises, ayant comme seule différence un changement mineur dans la scène, la soustraction de l'image subséquente par rapport à l'image initiale reflétera ce changement. Inversé, ce changement est encore plus perceptible (un cercle de même taille apparaît plus gros lorsqu'il est noir sur un fond blanc que l'inverse). Il est à noter que lors d'une inversion d'image, chaque pixel voit sa valeur d'intensité inversée, donc un pixel ayant une valeur d'intensité de 0 aurait alors une intensité de 255, un pixel ayant une valeur d'intensité de 1 aurait alors une intensité de 254, etc. L'image qui était noire avec un changement de position en blanc devient par opposition blanche avec un changement de position en noir.

Il est important de noter qu'en raison de l'impossibilité d'un pixel d'avoir une valeur d'intensité négative, il existe deux modes de soustraction possibles avec les logiciels de traitement d'images, soit en différence absolue ou normale. En différence absolue, la valeur absolue de l'intensité du pixel est utilisée. Par exemple, si les valeurs suivantes d'intensité sont soustraites, soit (50 – 70), le pixel aurait comme valeur d'intensité, la valeur absolue de -20, donc 20. Pour une soustraction dite normale, toutes valeurs d'intensité négatives suite à la soustraction seraient ramenées à 0, donc (50 – 70) serait égale à 0. La figure suivante illustre le principe de détection de changement par différence d'images.

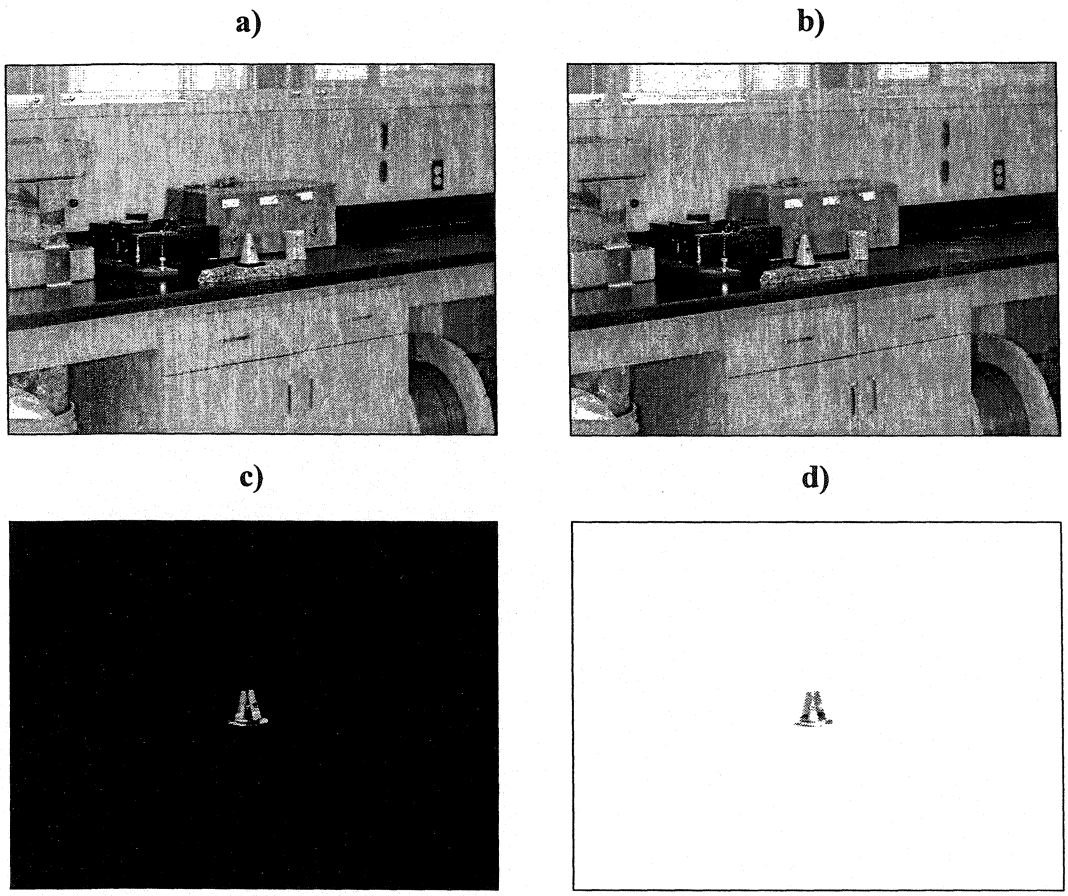


Figure 3.3. Images successives sans mouvement de caméra, ni variation de luminosité : a) image initiale, b) image démontrant un déplacement d'objet, c) détection du mouvement d'objet par différence d'images et d) inversion de l'image.

Cet exemple de différence d'images fait abstraction de tout autre changement pouvant intervenir entre les deux images, tels une différence de luminosité ou un changement des paramètres optiques de photographie. Ce principe est celui qui sera appliqué pour détecter un déplacement quelconque en milieu rocheux. Toutefois, la méthode se complique lorsque tous les paramètres associés à cette prise d'image sont introduits. D'abord, il y a le repositionnement de l'appareil. En effet, il est inconcevable de laisser un appareil numérique en permanence à tous les points de vues. La direction du mouvement par rapport au plan de l'image est également un facteur déterminant. Il est

évident qu'un mouvement normal au plan de l'image est plus difficile à détecter sur une image qu'un mouvement dans le plan. Finalement, il y a les changements de luminosité associés au milieu ambiant et aux bruits générés par la prise d'image ainsi que les changements de réflectivité des surfaces exposées à diverses éléments comme, la poussière, l'eau, l'air etc.

On entend par bruit, toute modification de l'information numérique sur l'image associée à la prise d'image, au traitement, à la quantification, aux paramètres optiques ou autres sources d'information qui nuisent à l'interprétation de l'information désirée. Le bruit se traduit sur l'image en une variation plus ou moins importante et rapide de l'intensité lumineuse des pixels (Lemy, 2002). Celui-ci peut être soit intrinsèque ou extrinsèque.

Les bruits intrinsèques sont les bruits de fond (prise d'image), de traitement, de quantification et des paramètres optiques et donc, sont causés par la prise de vue. Le bruit de fond, de nature physique, provient de la nature corpusculaire de la lumière. Pour des conditions d'éclairage identiques, le nombre de photons détectés par un pixel varie aléatoirement autour d'une valeur moyenne. Les bruits de traitement et de quantification sont plutôt de nature électrique. Le premier est lié à la méthode de lecture des charges sur le capteur CCD de l'appareil numérique alors que le second correspond à l'erreur moyenne d'échantillonnage du signal analogique sur un nombre fini d'incréments (8 bits). Finalement, le bruit thermique relié aux paramètres optiques est proportionnel au temps de pose pour des images prises à longue exposition dans un milieu sombre (Guidicelli, 2002). Une galerie de mine souterraine ou un tunnel correspondent à ce type de milieu.

Le bruit extrinsèque est quand à lui, lié aux traitements infligés à l'image, par exemple le recalage. Au chapitre suivant, les différentes méthodes de recalage seront évaluées

de façon à déterminer l'équilibre entre la détection de mouvement et le bruit présent sur l'image.

En somme, c'est l'ensemble des contraintes mentionnées jusqu'à présent (repositionnement d'appareil, direction de mouvement, luminosité, réflectivité et bruit) qui introduit des différences entre les images, des incompatibilités géométriques comme des erreurs de translation, rotation et distorsion, ainsi que des changements dans la distribution de l'intensité lumineuse sur la surface de l'image. Le recalage d'images est le processus par lequel il est possible de corriger les incompatibilités géométriques sur deux images, pour être en mesure d'effectuer l'analyse par différence d'images.

Avant de poursuivre il est très important de mentionner qu'en raison de la taille des fichiers utilisés pour les images et la taille des fichiers admissibles pour le traitement de texte, les images qui sont présentées dans ce rapport sont toutes fortement compressées. En raison de ceci, les petits détails à l'échelle du pixels sont parfois absents ce qui rend l'appréciation de la méthodologie plus difficile.

3.4 Le recalage d'images

Cette section introduit sommairement le principe du recalage ainsi que son fondement mathématique. Le principe général du recalage consiste à éliminer les sources de distorsions entre deux images, en appliquant une correction à l'image subséquente de façon à permettre son alignement avec l'image initiale. Il est donc important de bien comprendre les sources de distorsion qui peuvent exister entre deux images pour être en mesure de distinguer les types de corrections à apporter.

Avant de poursuivre, certains termes utilisés jusqu'à présent doivent être clarifiés de façon à éliminer toute confusion pour le choix des mots utilisés dans le reste du rapport.

- L'image de référence est l'image que l'on souhaite utiliser comme base pour le recalage. Elle correspond toujours à l'image prise antérieurement à l'autre. Dans le processus du recalage, elle sera nommée **image initiale** ou **image de référence**.

- L'image à corriger est l'image que l'on souhaite transformer à partir des paramètres géométriques de l'image initiale (de référence). Elle correspond toujours à l'image prise ultérieurement à l'autre. Elle sera nommée dans le reste de l'ouvrage **image à corriger** ou **image subséquente**.

- La nouvelle image obtenue par le biais du recalage sera toujours nommée **image corrigée.**

- Suite au post traitement, l'image obtenue est superposée à l'image initiale ou corrigée. L'image résultante est nommée **image finale**.

Entre ces étapes, toute une série d'images peuvent être obtenues. Celles-ci seront nommées au fur et mesure en fonction du traitement qui en découle. Il serait fastidieux de tenter de nommer les images résultantes de chaque combinaison possible de traitement.

3.4.1 Variations d'images

Il existe trois types de variations majeures qui peuvent exister entre deux images (Brown, 1992), soit les variations dans l'alignement, dans l'intensité et celles relatives

au contenu de l'image. Celles-ci peuvent être subdivisées en deux catégories, les distorsions et les variations d'intérêt, tel qu'illustré à la figure suivante.

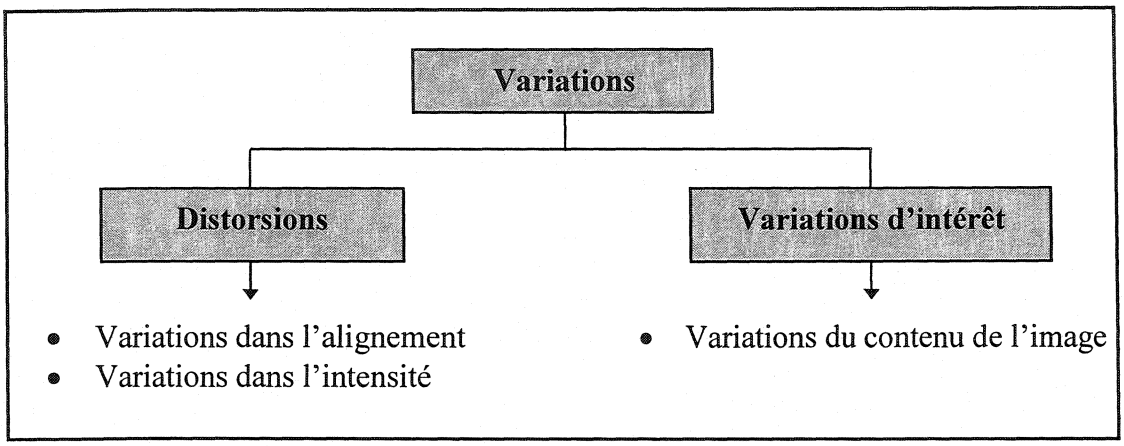


Figure 3.4. Les types de variations qui peuvent survenir entre deux images.

Les variations dans l'alignement entre deux images sont produites par un changement de position de l'appareil. Elles se traduisent par des différences géométriques existantes entre les deux images. Ces différences géométriques sont illustrées à la figure 3.5. Ce type de variation entre deux images doit être corrigé puisqu'il empêche leur alignement adéquat.

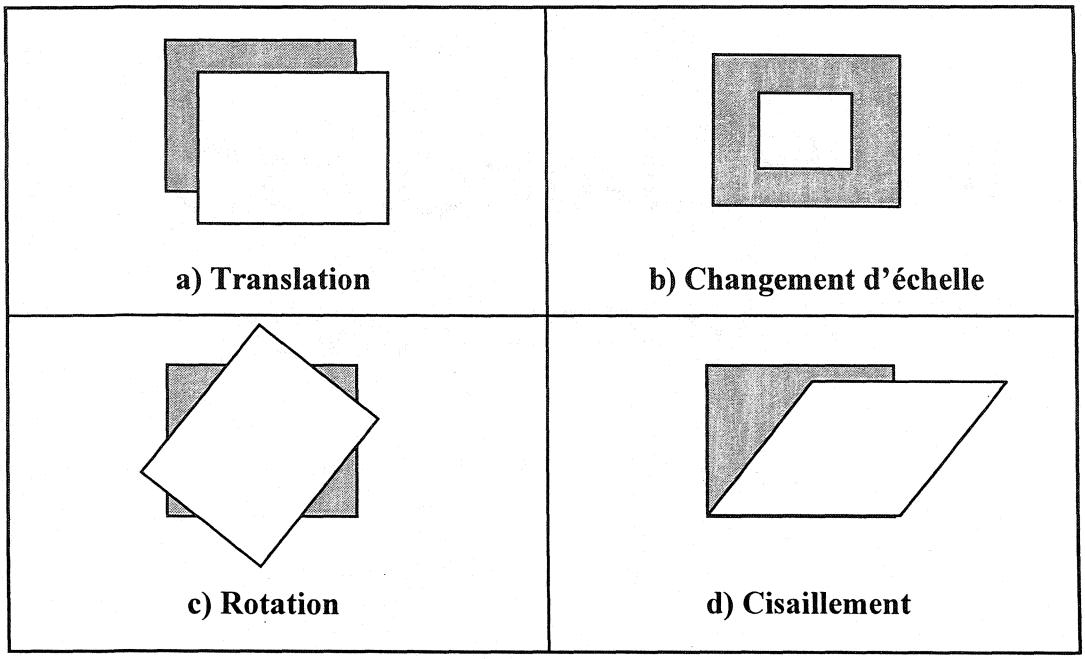


Figure 3.5. Exemple des types de variations géométriques.

Les variations dites d'intensité entre deux images sont produites par un changement de luminosité, traduit dans notre cas, le plus souvent, par un changement de conditions météorologiques. Cependant, ces variations peuvent également être induites par un changement des propriétés réfléchissantes des objets dans la scène. Par exemple, la poussière abondante dans une galerie de mine peut recouvrir les parois entre deux images et donc modifier ses propriétés réfléchissantes, introduisant ainsi une variation d'intensité dans les images même si elles sont soumises aux mêmes sources lumineuses. L'eau sur les parois produit des variations d'intensité importantes. Ce type de variation ne peut être corrigé par le recalage mais plutôt par d'autres méthodes qui seront vues au prochain chapitre. Sans considérations adéquates, les variations d'intensité peuvent supplanter les effets réels d'un mouvement de bloc.

Finalement, le troisième type de variation, soit celui dans le contenu de l'image, est produit par un changement quelconque, déplacement, disparition, apparition,

transformation etc. Ceci correspondrait dans notre cas à un déplacement ou mouvement de bloc. On classe ce type de variation dans les variations d'intérêt car c'est la source d'information que l'on cherche à obtenir. Les variations d'intérêt ne doivent évidemment pas être corrigées par le recalage car toute l'information pertinente qui doit être connue serait alors perdue.

3.4.2 Transformations d'images

Le recalage de deux images peut donc être définie par la relation suivante (Brown, 1992) :

$$I_2(x_2, y_2) = g(I_1(f(x_1, y_1)))$$

où I_n représente l'intensité respective d'un élément de l'image 1 et 2, f est la transformation des coordonnées spatiales (x_1, y_1) à des nouvelles coordonnées (x_2, y_2) et g correspond à une transformation géométrique choisie. Le problème est donc de déterminer la transformation géométrique g optimale pour être en mesure d'exposer les variations d'intérêt entre les deux images (Brown, 1992).

Les transformations les plus communes sont affines, de perspective et polynomiales globales. Brièvement, une transformations affine est une transformation linéaire pouvant corriger les effets de rotation, translation, changement d'échelle et cisaillement, résultants d'un changement de position de l'appareil. Une transformation T est dite linéaire si, $T(x_1 + x_2) = T(x_1) + T(x_2)$ et pour tous c, $cT(x) = T(cx)$. Un cisaillement est considéré comme étant linéaire car les lignes droites se conservent (Brown, 1992).

La figure 3.6 représente les variations linéaires de la figure 3.5 avec l'expression mathématique de la transformation de correction (Wolberg, 1990). À cette figure, les

coordonnées (x_2,y_2) correspondent aux coordonnées suite aux corrections, (x_1,y_1) correspondant aux coordonnées d'origine. Les transformations de perspective cherchent à transformer l'angle de vue de la scène de manière à transformer sa projection. Ces transformations sont plus compliquées et ne sont pas d'intérêt dans le cadre de ce projet.

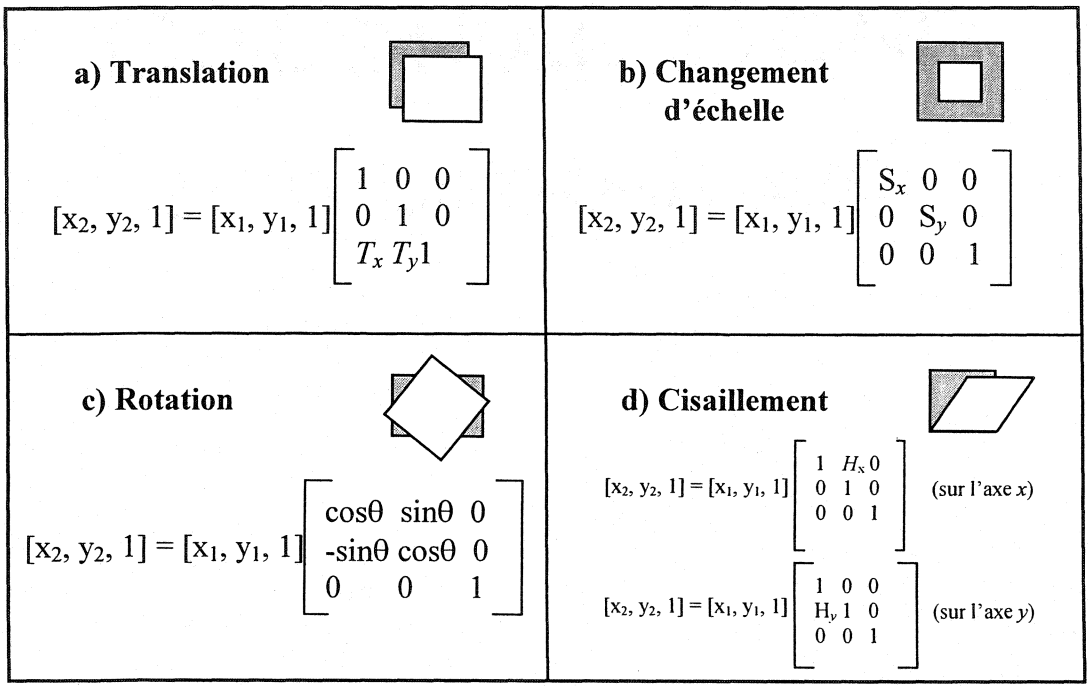


Figure 3.6. Transformations mathématiques associées aux variations linéaires.

Finalement la transformation polynomiale, la plus générale de toutes, permet de corriger plusieurs types de distorsions présentes sur une même image. Étant donné qu'en réalité, deux images prises avec un repositionnement d'appareil n'offrent jamais une différence correspondant à une simple translation ou rotation, mais plutôt la somme de plusieurs types de distorsions géométriques, la transformation de type polynomial est de loin la mieux adaptée aux besoins du projet en autant qu'un nombre de points de contrôle suffisant soit disponible. Mathématiquement, elle prend la forme suivante :

$$x_2 = \sum_{i=0}^{N} \sum_{i=0}^{N-i} a_{ij} x_1^i y_1^j$$

$$y_2 = \sum_{i=0}^{N} \sum_{i=0}^{N-i} b_{ij} x_1^i y_1^j$$

où a_{ij} et b_{ij} sont les coefficients polynomiaux et N l'ordre de la polynomiale.

Une transformation peut également être globale ou locale. Une transformation globale est donnée par une seule équation et est appliquée à l'ensemble de l'image. Un effet de translation entre deux images pourrait être corrigé par une transformation globale. À l'opposé, une transformation locale varie en fonction des variations locales sur l'image. De façon générale, une transformation locale n'est pas très utile dans le cadre du projet, étant donné qu'un mouvement individuel de bloc constitue une variation ponctuelle qui ne doit pas être corrigée d'une image à l'autre.

3.4.3 Le domaine fréquentiel

Tel qu'il a été mentionné, le recalage permet d'éliminer les distorsions entre les images en appliquant la (ou les) transformation appropriée, qu'elle soit locale ou globale. Ce recalage peut s'effectuer dans les deux domaines de l'image, soit le domaine spatial ou le domaine fréquentiel.

Dans le domaine fréquentiel, le recalage d'images exploite les propriétés de la transformée de Fourrier. Ce type de recalage est excellent pour corriger des variations fréquentielles telles du mouvement rigide systématique, donc le résultat des images mal alignées dû à un mauvais repositionnement systématique de l'appareil. Lors d'une translation d'image, les composantes d'amplitude des transformées de Fourrier seront identiques pour les deux images. Seules les composantes de phase différeront

proportionnellement à l'amplitude scalaire de la translation. Dans le cas de la rotation, elle peut être exprimée comme une translation en utilisant des coordonnées polaires.

Le recalage dans le domaine fréquentiel est cependant moins performant lorsqu'il existe trop de variations locales non linéaires entre les deux images. Étant donné que dans le contexte actuel, les variations observables ne sont pas connues préalablement, il est plus utile d'utiliser une méthode de recalage dans le domaine spatial permettant des corrections plus importantes.

3.4.4 Le domaine spatial

Le recalage par points de contrôle s'effectue dans le domaine spatial. Il permet d'effectuer des corrections de variations non systématiques et polynomiales. Les points de contrôle sont des points correspondant à la même position relative sur les deux images, c'est-à-dire qu'ils désignent le même « endroit » sur la scène sans avoir les mêmes coordonnées spatiales sur l'image. La figure suivante illustre ce principe.

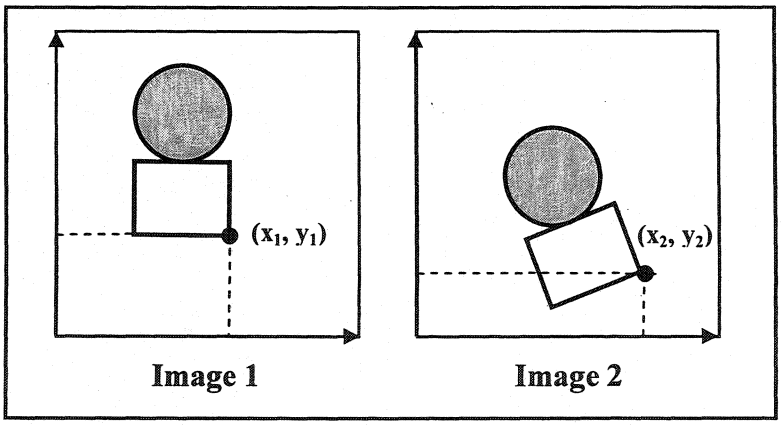


Figure 3.7. Illustration d'un point de contrôle sur deux images de la même scène, ayant subies une translation et une rotation.

Selon Brown (1992), les points de contrôle peuvent être de nature intrinsèque ou extrinsèque. Les points de contrôle extrinsèques sont placés intentionnellement dans la scène afin d'être repérés facilement comme marqueurs lors du recalage. Les points de contrôle intrinsèques font quand à eux, partie intégrale de la scène prise sur l'image. Ils doivent être sélectionnés à des endroits sûrs, des éléments de la scène qui ne subiront pas de variations d'intérêt entre les deux images. Des endroits typiques pour la sélection d'un point de contrôle sont des intersections de lignes, des coins, bref toutes structures facilement identifiables et présentes dans les deux images.

La façon de repérer les points de contrôle varie selon le logiciel utilisé. Certains obligent l'utilisateur à trouver manuellement les points sur chaque image et à les identifier. D'autres associent automatiquement à l'aide de manipulations mathématiques, la position sur l'image à corriger à partir des points de contrôle identifiés sur l'image initiale. Dans ce cas, en fonction de l'importance des variations entre les images, l'utilisateur doit s'assurer de l'exactitude du positionnement automatique sur l'image à corriger et modifier sa position au besoin. Plusieurs logiciels effectuent une reconnaissance automatique des points de contrôle, facilitant énormément la tâche en présence de beaucoup d'information et réduisant le temps d'opération du recalage.

Avec l'obtention d'un nombre suffisant de points, il devient possible de calculer tous les paramètres nécessaires à la correction, soit par approximation, soit par interpolation. Dans le cas des paramètres obtenus par approximation, une approche statistique basée sur une régression linéaire par la méthode des moindres carrés est utilisée. L'erreur associée au repositionnement des points de contrôle est calculée par :

$$Erreur = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{1/2}$$

L'ordre de la correction polynomiale utilisée est simplement l'ordre du polynôme. Une transformation de premier ordre, à six paramètres, peut modéliser six types de distorsions, soit des translations en (x, y), des changements d'échelle en (x, y), un cisaillement et une rotation (Jensen, 1996). Mathématiquement, les équations utilisées pour modéliser des transformations polynomiales globales de premier, deuxième et troisième ordre sont exprimées par :

1er ordre : $x' = a_0 + a_1x + a_2y$
(linéaire) $y' = b_0 + b_1x + b_2y$

2e ordre : $x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2$
(quadratique) $y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2$

3e ordre : $x' = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7xy^2 + a_8x^3 + a_9y^3$
(cubique) $y' = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + b_5x^2 + b_9y^3$

Plus l'ordre de la transformation est grand, plus le nombre de paramètres augmente, et par conséquent, le temps de calcul. Cependant, pour être en mesure d'effectuer les opérations, un nombre minimum de points de contrôle existe. Le tableau suivant donne ces nombres. Il sera vu plus loin comment ceci influence la performance des deux logiciels utilisés pour le recalage d'images dans le présent travail.

Tableau 3.1. Nombre minimum de points de contrôle.

Ordre de la fonction polynomiale	Nombre de points minimums
1	3
2	7
3	11

Cette approche ne peut corriger les variations locales. Donc les variations d'intérêt souhaitables, qui dans le cas présent représentent des mouvements de blocs, ne sont pas affectées. Cette approche est également très efficace lors de l'obtention automatique d'une grande quantité de points contrôle car l'effet d'approximation des résultats amoindri le poids de chaque point.

Les paramètres de transformation obtenus par interpolation sont déterminés de manière à satisfaire exactement chaque paire de points de contrôle. Ceci pose un problème mathématique lorsqu'il y a de nombreuses paires de points de contrôle, car les équations se compliquent rapidement pour des variations un peu plus complexes. Dans de tels cas, l'utilisation de *thin plate splines*, ou splines de surfaces élastiques dont la fonction est la minimisation de l'énergie de déformation élastique associée au changement de géométrie de l'image corrigée, est préférable à une transformation polynomiale puisqu'il est possible d'imposer des contraintes quand aux propriétés des fonctions de transformations. Toutefois, dans le contexte actuel, l'obtention des paramètres de transformation par interpolation est moins appropriée étant donné la quantité de variations locales sur l'image. Dans ce cas, la sélection automatique de nombreux points de contrôle ainsi que la source de variations inconnues rendent l'interpolation trop complexe et l'utilisation de *thin plate splines* devient risquée pour l'élimination des variations d'intérêt.

Il existe d'autres types de recalage qui ne sont pas abordés dans ce document car leurs applications ne correspondent pas aux objectifs visés par le présent projet. Ceux-ci dépassent largement le cadre des applications présentées et relèvent plutôt du domaine de la recherche en imagerie numérique.

3.4.5 Les techniques de ré-échantillonnage

Lorsque le calcul des paramètres de transformation est réalisé et que les corrections nécessaires sont apportées, il reste à déterminer le type de ré-échantillonnage utilisé pour recomposer l'image subséquente en une nouvelle image, soit l'image corrigée. Selon Jensen (1996), ce processus implique l'extraction de la valeur de l'intensité des pixels de l'image à corriger ayant comme coordonnées (x_1, y_1), et la relocalisation aux coordonnées (x_2, y_2) dans l'image corrigée. De façon générale, le ré-échantillonnage est donc le processus de transformation d'une image d'un système de coordonnés à un autre. Théoriquement, ce processus s'effectue en deux étapes distinctes, la reconstruction de l'image et l'échantillonnage. Simplement dit, la reconstruction, aussi appelée l'interpolation, est la convolution de l'image avec une fonction continue pour obtenir une nouvelle grille de coordonnées. L'échantillonnage est la distribution des intensités sur cette nouvelle grille. Il peut s'effectuer selon les algorithmes les plus utilisés suivants :

1. La méthode du plus proche voisin.
2. L'interpolation bilinéaire.
3. L'interpolation bicubique.

La méthode du plus proche voisin utilise l'intensité du pixel le plus proche comme valeur du nouveau pixel. Cette méthode est efficace par son temps de compilation et parce qu'elle n'altère pas l'intensité du pixel, tel que le font les deux autres méthodes. La figure suivante, tirée de Jensen (1996) illustre ce point.

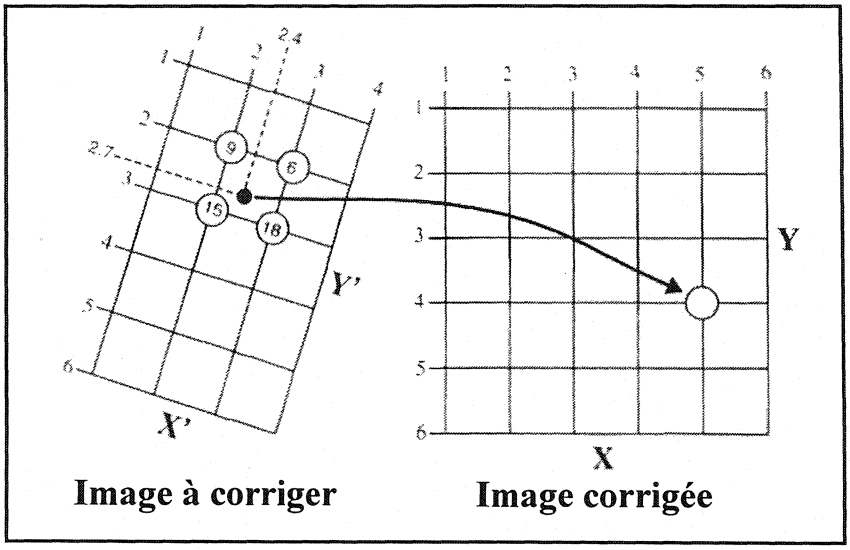


Figure 3.8. Principe du ré-échantillonnage d'une image à corriger à une image finale (Jensen, 1996).

Dans cette figure, on peut voir que le pixel aux coordonnées (5, 4) dans l'image corrigée doit se voir attribuer une intensité de pixel correspondant aux coordonnées (2.7, 2.4). Par la méthode du plus proche voisin, l'intensité attribuable sera de 15, soit la valeur d'intensité du pixel le plus rapproché spatialement des coordonnées.

L'interpolation bilinéaire calcule la nouvelle valeur d'intensité du pixel en effectuant la moyenne pondérée de la valeur des quatre pixels les plus proches à corriger sur une grille de 2x2. Avec cette méthode, on obtiendrait une valeur d'intensité de 13. Cette valeur est obtenue par la relation suivante :

$$BV_{wt} = \frac{\sum_{k=1}^{4} \frac{Z_k}{D_k^2}}{\sum_{k=1}^{4} \frac{1}{D_k^2}}$$

où Z_k sont les valeurs d'intensité des pixels les plus rapprochés (9, 6, 15, 18) et D_k^2 sont leur distance au carré par rapport au pixel ayant les coordonnées (2.4, 2.7).

Finalement, l'interpolation par convolution cubique s'effectue de façon similaire à l'interpolation bilinéaire en faisant intervenir, cette fois-ci, la moyenne pondérée des seize pixels les plus rapprochés dans l'image à corriger sur une grille de 4x4.

Le ré-échantillonnage complète le processus du recalage d'image. Après cette étape, l'image corrigée doit pouvoir être alignée avec l'image initiale de façon à faire ressortir les variations d'intérêt, soit les mouvements de blocs. La figure 3.9 résume les étapes à suivre lors du recalage par points de contrôle.

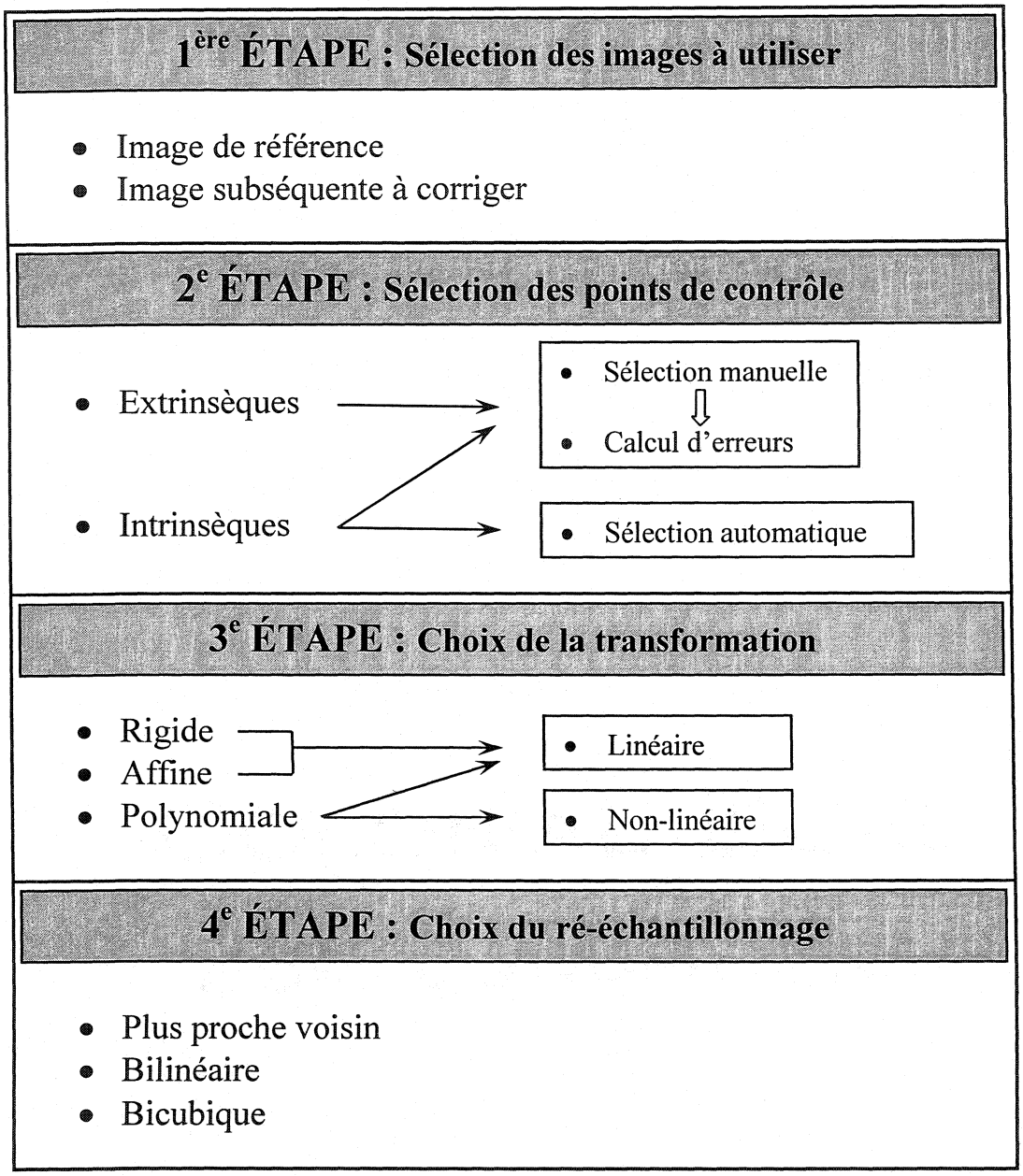


Figure 3.9. Résumé schématique du processus de recalage par points de contrôle.

3.5 Principes de photographie

Dans cette section, quelques principes de base de photographie sont présentés. Le lecteur peut se référer à des ouvrages spécialisés en la matière pour obtenir plus d'information technique.

L'appareil photo numérique principalement utilisé pour ce projet est un Kodak Professional DCS 14n. Contrairement à la plupart des appareils compacts, où le viseur utilisé est indépendant de l'objectif, celui-ci est de type reflex mono-objectif, c'est-à-dire que l'image dans le viseur est renvoyée directement à travers l'objectif. Le viseur donne donc exactement la scène photographiée, sans erreur de parallaxe. Un second appareil numérique de marque Kodak DCS 330 a été également utilisé. Il est également un appareil de type reflex.

3.5.1 L'objectif de l'appareil

L'objectif d'un appareil photographique sert à transmettre la lumière reçue au capteur CCD (dans le cas d'un appareil numérique). Il est composé du fût, du diaphragme et de la bague de mise au foyer.

A) Le fût

Le fût comprend l'ensemble des lentilles permettant de faire varier la quantité de lumière traversant l'objectif en fonction du diaphragme et de la vitesse d'obturation de l'objectif. Plus le diaphragme est ouvert et plus la vitesse d'obturation est lente, plus la lumière pourra traverser l'ensemble de l'objectif pour atteindre l'élément photosensible.

Le nombre « f » que l'on retrouve sur l'objectif correspond à la valeur d'ouverture du diaphragme, ou sa surface disponible. Les valeurs d'ouvertures normalisées sont : 1, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32, 45 etc. La relation avec la valeur d'ouverture est inverse, donc par exemple, lorsque le nombre est de 5.6, la valeur correspondante est de 1/5.6. Par conséquent, plus le nombre est grand, plus la surface du diaphragme est petite, donc plus l'ouverture est petite. Ces valeurs normalisées sont reliées entre elles par une relation d'une demie, c'est-à-dire que d'une valeur à l'autre, l'ouverture du diaphragme diminue toujours de moitié. Mathématiquement, ce nombre est le rapport entre le diamètre d'ouverture du diaphragme et la distance focale de l'objectif.

B) La distance focale

La distance focale de l'appareil correspond à la distance entre le diaphragme et le capteur numérique lorsque l'appareil est réglé sur l'infini. Cette mesure détermine le degré de grossissement et le champ couvert par l'objectif. La mise au foyer de l'image s'effectue à l'aide d'une bague autour de l'objectif.

C) La profondeur de champ et la vitesse d'obturation

L'échelle de profondeur de champ permet de définir la zone de netteté en fonction de l'ouverture du diaphragme et de la mise au foyer. Généralement, plus l'ouverture du diaphragme est petite, plus la profondeur de champ sera bonne, c'est-à-dire que la zone de netteté de l'image sera profonde. Par exemple, si un objet que l'on désire photographier (sur lequel on a effectué une mise au foyer) se situe à quelques mètres à l'avant d'une paroi rocheuse, l'objet et la paroi seront nets sur l'image avec une petite ouverture de diaphragme alors que seul l'objet sera net avec une grande ouverture de diaphragme.

La vitesse d'obturation contrôle le temps d'ouverture de l'obturateur. Les vitesses d'obturation standardisées sont ...2, 1, 1/2, ¼, 1/8, 1/15, 1/30 etc. Comme pour l'ouverture du diaphragme, la relation existante entre les différentes vitesses est de moitié. Dans ce cas-ci, c'est le temps de pose qui est divisé par deux. Avec l'ouverture du diaphragme, la vitesse d'obturation contrôle la quantité de lumière qui entre dans l'objectif.

Ceci conclu l'introduction aux principes de base en photographie. D'autres précisions concernant les appareils seront présentées en cours de texte selon le besoin.

CHAPITRE 4 : MÉTHODOLOGIE DE DÉTECTION DE MOUVEMENT DE BLOCS PAR ANALYSE D'IMAGES NUMÉRIQUES

4.1 Introduction

Tel qu'il a été vu au chapitre précédent, l'imagerie numérique prend de l'importance dans plusieurs domaines de recherche, la mécanique des roches faisant partie de cette tendance. Ce chapitre vise donc à introduire la méthodologie impliquant les techniques d'imagerie numérique pour la détection d'instabilités en milieux rocheux. Elle sera présentée et expliquée de façon à clairement identifier ses différentes étapes, ses conditions d'utilisation optimale ainsi que ses limites.

La méthodologie adoptée dans le cadre de ce projet pour la détermination de mouvements rigides de blocs comporte sept étapes :

1. L'acquisition des images,
2. le prétraitement,
3. le recalage,
4. la différence d'images,
5. le post traitement,
6. la superposition des images,
7. l'analyse des résultats.

L'organigramme de la figure 4.1 schématise ces étapes.

Étape de la méthodologie	Description sommaire
Acquisition des images	Prise d'images initiales, repositionnement de l'appareil et prise d'images finales.
↓ Prétraitement	Préparation des images pour le recalage.
↓ Recalage	Processus d'alignement des deux images.
↓ Différence d'images	Processus de détection de changement par différence entre l'image corrigée et l'image initiale.
↓ Post traitement	Utilisation de techniques de segmentation et des filtres numériques pour rehausser les résultats.
↓ Superposition des images	Superposition de l'image obtenue suite au post traitement sur l'image corrigée.
↓ Analyse des résultats	Localisation des blocs instables et, si possible, estimation de l'amplitude du mouvement.

Figure 4.1. Organigramme de la méthodologie de détection de mouvement de blocs.

De ces étapes, les deux premières, soit l'acquisition et le prétraitement sont présentées à la section 4.2, avant de discuter du recalage des images à la section 4.3. La différence d'images, le post traitement et la superposition des images sont ensuite présentés à la section 4.4. Finalement, deux cas d'évaluation des différentes techniques de recalage sont présentés en fin de chapitre à la section 4.5.

4.2 Acquisition et prétraitement des images

Cette étape de la méthodologie consiste à déterminer l'emplacement des images à prendre en fonction des zones problématiques (ou potentiellement instables), l'acquisition et la préparation des images pour le recalage. L'équipement utilisé dans le cadre de cette recherche est également présenté dans cette section.

4.2.1 Acquisition des images

La première étape de la méthodologie est l'acquisition des images. Elle s'effectue en un minimum de deux étapes, soit la prise d'images initiales et la prise d'images subséquentes. La détection de mouvement ne peut évidemment s'effectuer sans la prise subséquente d'images, qui a lieu après d'éventuels déplacements. Cette étape est cruciale à la réussite du recalage car la qualité des résultats est directement reliée à l'attention prise lors de l'acquisition des images.

Comme il a été indiqué précédemment, lors de la prise subséquente d'images, un mauvais repositionnement de l'appareil peut induire des différences géométriques importantes entre les deux images, tel que démontré à la figure 4.2. Quoique le processus de recalage serve à corriger ces différences géométriques, il est évident que plus les corrections à apporter sont faibles, plus la probabilité d'un bon alignement des deux images est favorable.

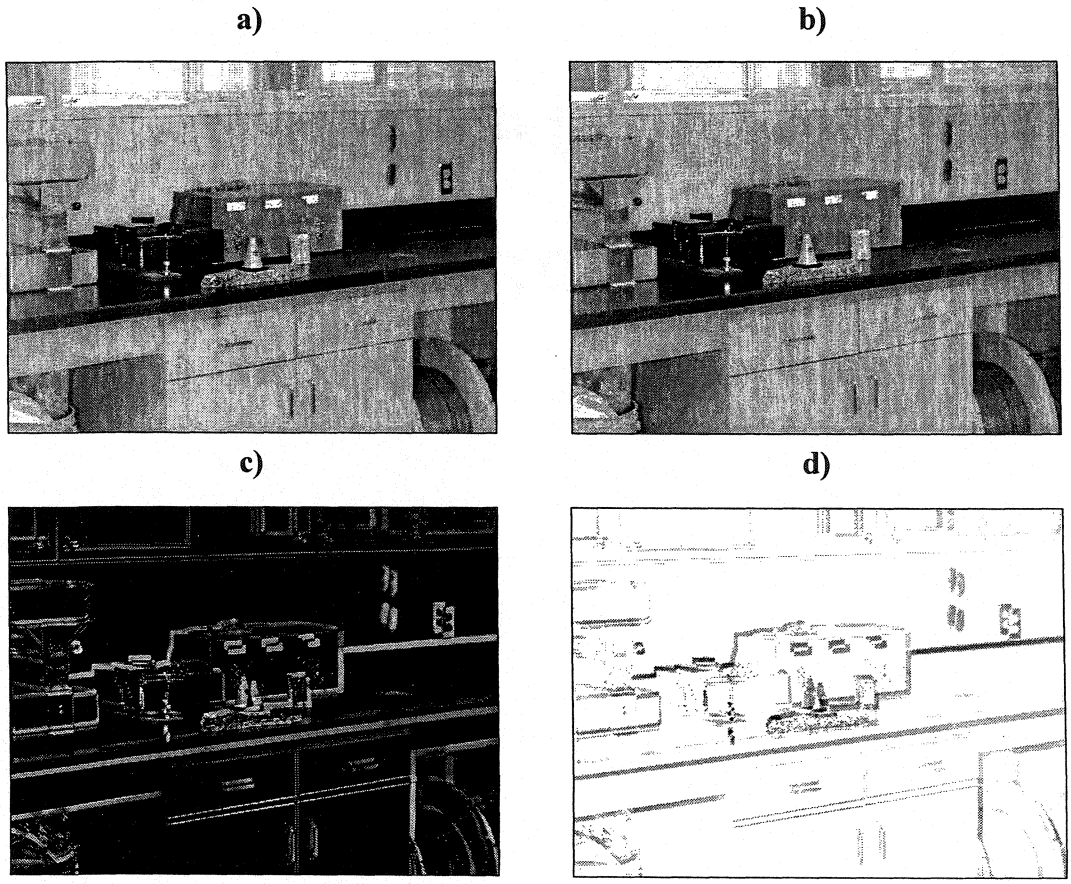


Figure 4.2. Images successives avec un mauvais repositionnement de caméra : a) image initiale, b) image finale suite au repositionnement de l'appareil, c) différence d'images et d) inversion d'image.

Lors de la prise initiale, l'utilisateur doit déterminer les prises de vue des zones instables qui reflèteront le mieux possible les mouvements entre chaque prise. Au moment de la prise subséquente, il est essentiel d'obtenir un bon repositionnement de l'appareil ainsi que des conditions d'éclairage similaires aux conditions initiales pour être en mesure d'obtenir des résultats plus facilement utilisables.

A) Prise d'images initiales

Dans les deux cas, soit les parois extérieures et souterraines, les images sont prises à l'aide d'un appareil numérique monté sur un trépied. Le trépied est composé d'une section supérieure comportant la base équatoriale, c'est-à-dire une base permettant une rotation sur trois plans, posée sur un manche télescopique. Le tout est rattaché à la section inférieure du trépied, soit les trois pattes télescopiques. Les deux sections peuvent être mise au niveau indépendamment l'une de l'autre.

L'appareil est fixé sur une plaquette fixée sans possibilité de mouvement à la base équatoriale. D'une prise à l'autre, grâce à cette plaquette, l'appareil ne subi aucun déplacement relativement au trépied. Vissé sous la base équatoriale, se trouve un support sur lequel sont fixés deux projecteurs halogènes d'une puissance de 500 Watts chacun, situées de part et d'autre de l'appareil. Ces projecteurs assurent un éclairage uniforme lors de la prise d'images sous terre. Un gabarit est également installé en pont par-dessus l'appareil. Celui-ci sert de support pour fixer un laser de nivellement, utilisé pour assurer le replacement précis du trépied en milieu souterrain.

Deux lasers guides d'une puissance de 5 mW chacun à la sortie sont fixés de part et d'autre de l'appareil. Ceux-ci permettent un repositionnement précis de l'appareil selon les axes de rotation, tel qu'illustré à la figure 4.3. Il est à noter que la température ambiante d'utilisation des lasers se situe entre 15 et 30 degrés Celsius. En dessous de cette plage, ceux-ci perdent de l'intensité à la sortie et deviennent donc moins visibles. Dans un tel cas, une pochette auto chauffante de type « Hot Shot » enveloppée d'une laine isolante suffit pour maintenir l'intensité des lasers guides.

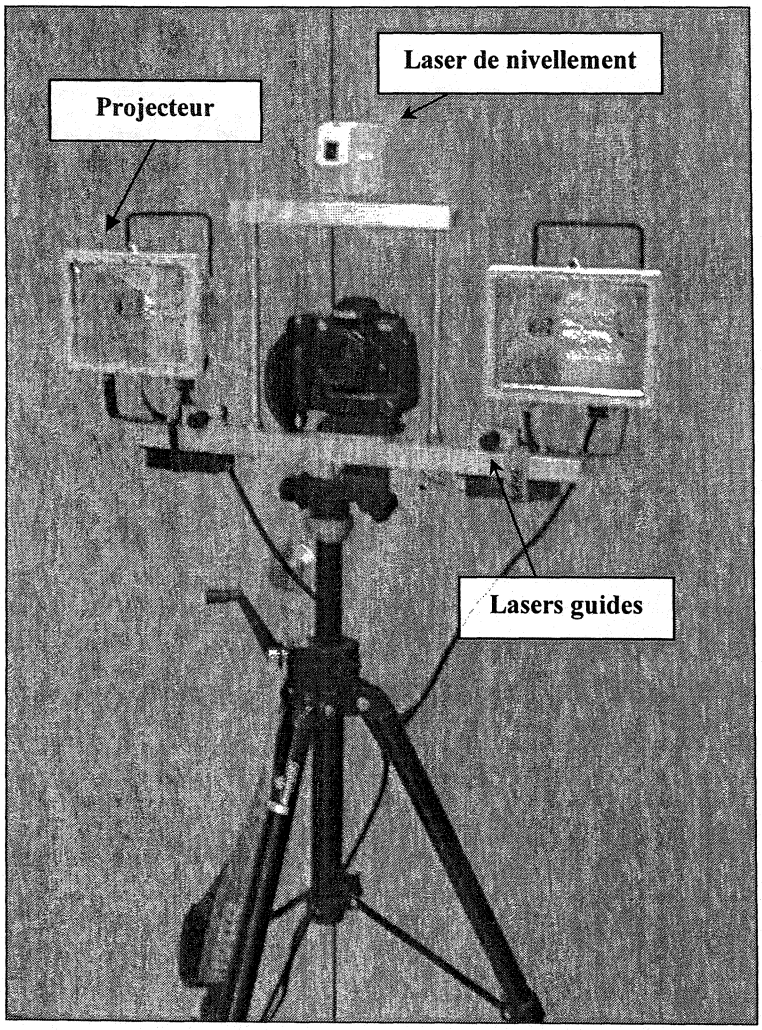


Figure 4.3. Montage de l'appareil.

Une fois les pattes télescopiques de la section inférieure du trépied déployées, la section inférieure du trépied doit être mise au niveau à l'aide d'un niveau à bulle. Lorsque le trépied est de niveau, le manche télescopique se déplace selon l'axe vertical. La position dans le plan horizontal (en x et y) doit alors être identifiée de manière à pouvoir se repositionner au même point lors de la prise d'images subséquentes. Celle-ci peut être repérée avec un fil à plomb suspendu sous le trépied. La position au sol est alors marquée de façon permanente à l'aide d'une peinture, un clou ou n'importe quel autre marqueur. Dans un environnement minier souterrain où celle-ci ne peut être

marquée et préservée convenablement au sol, la position du trépied peut être marquée au toit des galeries. Il est donc préférable, dans ce cas, d'utiliser un laser de nivellement que l'on peut fixer par dessus l'appareil photographique. Ce niveau est doté de trois rayons lasers, un rayon horizontal pointant vers l'avant de l'appareil et les deux autres rayons verticaux, pointant vers le haut et le bas de l'appareil. Si l'appareillage est mis au niveau correctement, le laser vertical sera aligné avec l'axe de rotation du trépied.

Lorsque le trépied est installé correctement et que sa position au sol ou au plafond est bien identifiée, l'angle de vue final doit être obtenu. L'utilisateur peut alors placer l'appareil à la hauteur (position en z) désirée avec l'extension du manche télescopique. Une fois cette hauteur obtenue, celle-ci doit être notée et la position de l'appareil ne devrait plus être modifiée. Si le niveau laser a été utilisé pour repérer la position sur un plan horizontal, celui-ci peu également indiquer la hauteur. Dans ce cas, la position des lasers au plafond et aux murs doit être marquée à l'aide d'une peinture aérosol ou un autre type de marqueur permanent et visible.

Finalement, il ne reste plus à l'utilisateur qu'à ajuster l'angle de vue de l'appareil en utilisant la base équatoriale du trépied. Habituellement, l'ajustement de l'appareil s'effectue avec une rotation dans le plan horizontal et dans le plan vertical (avec l'axe de rotation dans le plan de l'image).

Lors de la prise d'image, il est préférable que la lentille de l'appareil soit toujours perpendiculaire à la paroi de façon à éviter le plus possible les effets de distorsion (Lemy, 2002), d'autant plus que l'amplitude du mouvement dans le plan de l'image sera plus facile à déterminer. Il est également recommandé d'obtenir une (ou des) image de la paroi de plus d'un point de vue. Ceci facilitera l'observation et la détermination des blocs instables. Ce dernier point sera repris plus en détail au chapitre 5. Toutefois, dans un environnement minier souterrain, la proximité des surfaces à photographier oblige parfois une prise de vue plutôt oblique des parois. Peu importe

l'angle de vue, une fois la position idéale déterminée, les lasers guides servent de repères pour le repositionnement angulaire, tel qu'illustré à la figure suivante.

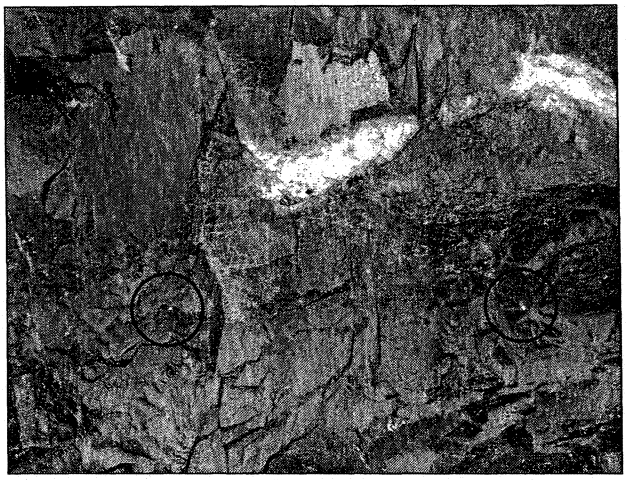


Figure 4.4. Position des lasers sur une paroi rocheuse.

L'appareil principalement utilisé pour ce projet est un Kodak Professional DCS 14n à résolution et compression d'images variables. Les niveaux de résolution spatiale disponibles sont de 0.8, 3.4, 6.0 et 13.5 millions de pixels. Il permet également trois niveaux de compression JPEG d'images. Les images peuvent être stockées en mémoire directement en format JPEG ou en format Raw, le format de base de Kodak qui doit être transformé par la suite en format conventionnel de type Tiff, JPEG ou Bitmap. Avec le format Raw, les paramètres optiques de prises de vue sont conservés en mémoire. L'appareil est de type reflex mono-objectif, c'est-à-dire que l'image dans le viseur est renvoyée directement à travers l'objectif. Le viseur donne donc exactement la scène photographiée, sans erreur de parallaxe.

Un second appareil de marque Kodak DCS 330 a été utilisé pour certains essais effectués avant l'obtention du nouvel appareil. Les images produites sont conservées en

un format Tiff spécial. Elles doivent donc être transformées par la suite en format conventionnel.

La résolution spatiale utilisée dans le cadre de ce projet (avec l'appareil Kodak Pro DCS 14n) est 13.5 millions de pixels, soit des images ayant 4500 x 3000 pixels, chaque pixel étant d'une dimension de 8.0 x 8.0 μm. Au chapitre 5, des résolutions variant de 0.8, 3.4 et 6.0 M pixels ont également été mises à l'étude pour déterminer le seuil de détection de mouvement en fonction de la résolution des images. Les images ont été prises sans compression, de façon à garder le plus d'information possible. Avec le second appareil, les images ont une résolution spatiale de 3.0 M pixels, soit 2008 x 1504 pixels. Ces derniers ont une dimension de 9.2 μm. En comparaison, la taille du capteur CCD de l'appareil DCS 14n est de 36 x 24 mm alors que celle de l'appareil 330 est 18.5 x 13.8 mm. L'influence de la compression a également été étudiée et sera présentée au chapitre 5.

Il est recommandé d'effectuer plusieurs photographies de la paroi avec plusieurs paramètres optiques de façon à maximiser les chances de réussite de la méthodologie. Finalement, tous les détails concernant la prise d'images initiales, tel le climat, les paramètres optiques, l'heure de prise, doivent être notés et conservés comme référence lors de la prise d'images subséquentes.

B) Prises d'images subséquentes

Lors de la prise d'images subséquentes, l'installation de l'appareil s'effectue tel que décrit à la section précédente. Le marqueur utilisé pour déterminer l'emplacement au sol ou au plafond (en x et y) du trépied doit être repéré et celui-ci repositionné de la même façon que lors de la prise d'images initiales. L'appareil doit être réinstallé à la même hauteur également (sa position en z).

Tout comme pour la prise d'image initiale, une fois l'appareillage installé correctement en x, y et z, seule la base équatoriale sert à ajuster l'alignement angulaire de la caméra. Une copie imprimée de l'image d'origine ou une représentation sur l'écran d'un ordinateur portable peuvent être utilisées pour repérer la position des lasers. Le repositionnement est très important pour minimiser les corrections géométriques à apporter entre les deux images lors du recalage.

Beaucoup d'attention doit être apportée à l'éclairage de la scène. Étant donné que le recalage ne permet pas de corriger les variations causées par des différences d'intensité entre les deux images, il est très important de s'assurer d'obtenir les mêmes conditions de luminosité que lors de la prise d'images initiales.

Lors des photographies extérieures, les différences de luminosité proviennent des conditions météorologiques, de la période de l'année et/ou de l'heure de prise. Quoiqu'il est généralement recommandé d'effectuer les prises d'images sous un ciel couvert pour éviter l'influence des ombrages sur la paroi, la position du soleil par rapport à la paroi, dans le cas de prise sous un ciel dégagé, émet un jeu d'ombres qui peut différer complètement avec le changement de position du Soleil. Ce problème est également présent en souterrain. Même si la source lumineuse est constante entre les images (deux projecteurs de 500 W.), d'autres sources de lumière temporaires ou permanentes peuvent avoir été ajoutées entre les images initiales et subséquentes.

Ce dernier point est capital pour la mise en œuvre de la méthodologie. Avec un bon repositionnement, les variation géométriques peuvent, la plupart du temps, être corrigées, alors que les variations d'intensité sont souvent très difficiles à traiter. Elles causent principalement les plus gros problèmes reliés à cette méthodologie. Pour minimiser leurs effets, il faut donc s'assurer que :

1. Lorsque les conditions d'éclairage sont constantes dans le temps, tous les paramètres optiques de l'appareil soient les mêmes pour l'image subséquente et l'image initiale. Ceci inclus le temps d'exposition, l'ouverture du fût, la sensibilité de l'appareil à la lumière et la distance focale.
2. Si les images sont prises à l'extérieur, il faut s'assurer qu'elles soient prises au même moment de la journée et de l'année et dans des conditions météorologiques similaires aux images initiales.
3. Si les images sont prises sous terre, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de source de lumière additionnelle (machinerie lourde, lumière amovible temporaire, lumières frontales de mineurs).

4.2.2 Prétraitement

Le prétraitement des images est utilisé de façon à améliorer la qualité des images à traiter sans toutefois modifier l'information qu'elles contiennent. Celui-ci s'effectue par l'intermédiaire de logiciels de traitement d'images largement utilisés, tels Corel Photo-Paint ou Adobe Photoshop. Ces logiciels offrent l'avantage d'être simples d'utilisation et facilement accessibles.

Toutes les images à traiter sont d'abord transformées en niveaux de gris, et ce pour le restant des étapes. L'histogramme des intensités nous permet alors de vérifier la distribution de l'illuminance des pixels présents dans l'image. Lorsque la distribution des valeurs de l'histogramme n'est pas optimale, c'est-à-dire lorsque la forte majorité des valeurs d'illuminance des pixels se maintient dans une plage restreinte entre 0 et 255, l'image peut manquer de contraste et paraître plutôt inutile. En redistribuant la valeur de l'intensité des pixels sur une étendue plus large, le contraste est accentué sur l'image. Ce faisant, les valeurs d'intensité des pixels au centre de l'histogramme demeurent les mêmes alors que les valeurs aux extrémités de la courbes s'éloignent de son centre ayant pour effet que les endroits les plus sombres et les plus clairs sont

accentués, redonnant à l'image les reliefs qui aident à distinguer les discontinuités. Du même coup, les effets néfastes de l'ombrage produit aux endroits sur la paroi à fort relief disparaissent.

Les logiciels peuvent effectuer cette correction automatiquement, ce qui donne généralement de très bons résultats. Théoriquement, les algorithmes déterminent les limites des valeurs d'intensité sur l'histogramme qui correspondent à 99.95% de la totalité des pixels. Les valeurs d'intensité de ces limites sont alors ramenées respectivement à 0 et à 255 avec une redistribution des valeurs intermédiaires. La figure suivante illustre bien ce principe.

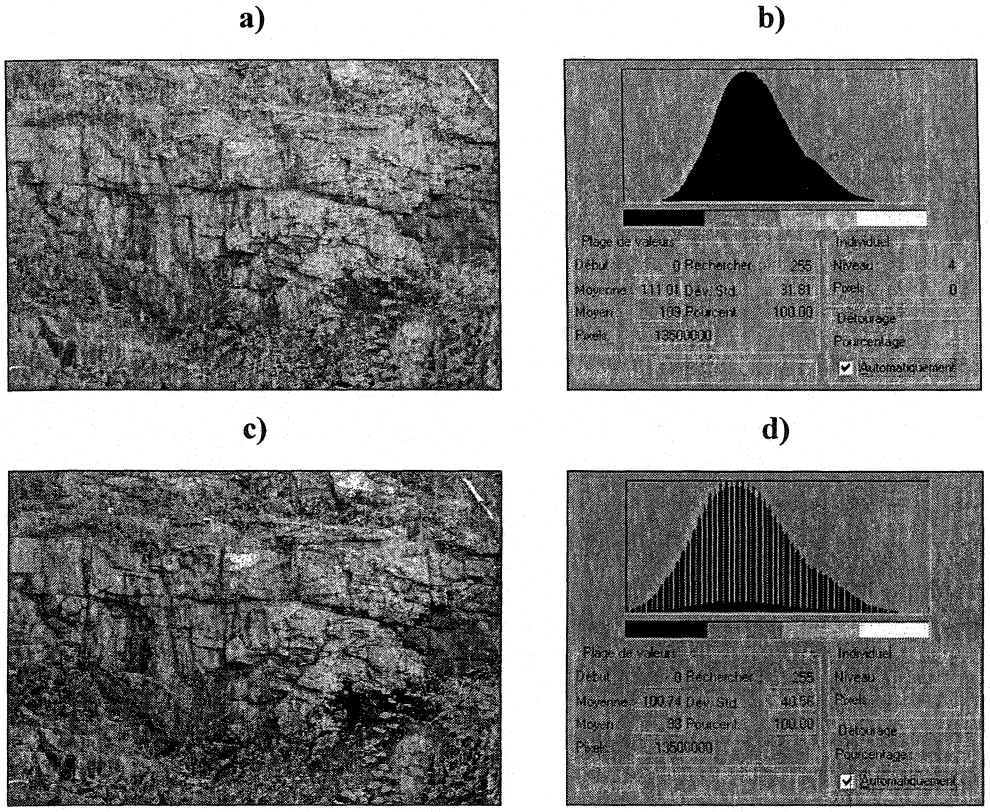


Figure 4.5. a) Image d'origine ayant une mauvaise distribution d'intensité, b) histogramme de l'image d'origine démontrant une faible étendue, c) l'image d'origine suite à l'égalisation des niveaux et d) le nouvel histogramme de l'image.

Avec l'exemple de la figure 4.5, on peut voir que les discontinuités sont mieux discernées après le prétraitement. Quoique relever leurs traces n'est pas l'objectif visé par ce projet, il est important de reconnaître qu'un mouvement de bloc rigide s'effectue le long de ces discontinuités, par conséquent si elles sont mal contrastées sur l'image, l'apparence d'un déplacement réel sera moins important.

Il peut arriver que les images initiales et subséquentes présentent des moyennes d'intensité des pixels nettement différentes l'une de l'autre. Dans ce cas, il est préférable de tenter de rapprocher ces moyennes, avant d'effectuer l'égalisation des niveaux, de façon à permettre une distribution des intensités entre les images la plus similaire possible. Pour ce faire, plusieurs outils s'offrent à l'utilisateur avec les logiciels Photoshop et Photo-Paint. Tous ont pour but d'ajuster les tonalités des pixels de l'image, seules leurs façons de faire diffèrent. Dans un cas l'ajustement est linéaire et dans l'autre, non linéaire. Dans le cas d'un ajustement linéaire, celui-ci augmente ou diminue (selon le besoin) l'intensité de tous les pixels de l'image de la même quantité. Il est cependant important de noter qu'un tel ajustement n'est qu'une façon approximative de traiter les images. Le changement réel de distribution de luminosité sur une paroi ne s'effectue pas de façon parfaitement linéaire d'autant plus que l'histogramme résultant devient tronqué à la valeur de l'ajustement. Dans le cas de l'ajustement non linéaire, celui-ci permet d'ajuster l'intensité sur une étendue plus spécifique de la gamme des tonalités, donc permet plus de finesse. Finalement, le but ultime de ces méthodes est d'obtenir une image subséquente similaire en termes de moyenne et de distribution de l'intensité des pixels à l'image initiale.

4.3 Recalage des images

Malgré toutes les précautions prises lors des étapes de prise d'images initiales et subséquentes, et le prétraitement appliqué à celles-ci, des variations de différents types persistent toujours, annulant donc la possibilité d'utiliser immédiatement la différence

d'image pour détecter une variation d'intérêt quelconque. Rappelons que ces variations peuvent être d'ordre géométrique, le résultat d'un mauvais repositionnement d'appareil, ou d'ordre d'intensité, causé par des variations d'éclairage de la scène photographiée. Les variations d'intérêt sont, dans le contexte du projet, des mouvements de blocs ou autres changements dans la forme de l'excavation.

Dans le domaine de l'instrumentation géotechnique (et générale), la précision de mesure de l'appareillage est souvent fonction des réglages utilisés. L'utilisateur détermine au départ la précision de l'appareil nécessaire pour les fins de l'étude menée. Ce principe s'applique plus ou moins dans la méthodologie présentée dans ce rapport. Cependant, dans le cas du recalage d'image pour des fins de détection de mouvements de blocs, certaines tendances peuvent être remarquées en fonction de la méthode du recalage choisie. Le but ultime d'un choix de méthode est d'obtenir la meilleure définition de mouvement avec un minimum de bruit sur l'image.

Dans le cadre de ce projet, deux logiciels différents, permettant le recalage d'image, ont été retenus. Le premier, Registar(Geo) 1.0, développé par Auriga Imaging pour le traitement d'images d'astronomie, procède par points de contrôle (GCP) sélectionnés automatiquement. Il utilise un algorithme détecteur de bordures pour détecter les changements brusques d'intensité, en balayant l'image par rangée jusqu'à ce qu'un pixel clair par rapport à son entourage soit détecté. Un contour est défini là ou les valeurs maximales du gradient de la fonction $f(x, y)$ de l'image sont détectées. Ensuite, un algorithme est utilisé pour délimiter les contours du point de contrôle. Certaines contraintes géométriques sont appliquées pour distinguer l'étoile d'un bruit lumineux.

Son temps de traitement lui confère un avantage indéniable sur le second logiciel, Geomatica 8.0, développé par PCI Geomatics, qui lui, utilise une sélection manuelle des points de contrôle. Dans certains cas, lorsque les variations d'intensité entre les deux images à traiter sont trop nettes, Registar(Geo) ne peut établir automatiquement

une nouvelle grille correspondant à l'image corrigée (ce point sera abordé au prochain chapitre). Le logiciel Geomatica contourne ce problème, car les points sont sélectionnés par l'utilisateur. Toutefois, le logiciel ne permet pas un alignement aussi précis en raison de la faible quantité de points de contrôle par recalage. Par comparaison, Registar(Geo) peut compter, en quelques secondes, plus de 5000 points de contrôle par image alors que plusieurs minutes sont nécessaires pour sélectionner seulement trois à quatre points avec Geomatica.

Avec ces deux logiciels, le recalage peut se faire de deux façons, soit par une fonction polynomiale globale ou par la méthode impliquant des *thin plate splines*. Dans le contexte du projet, en raison de la quantité importante de variations qui peut être introduite entre les deux images, cette dernière méthode est moins efficace. Rappelons qu'elle agit par interpolation sur les points choisis. Étant donné que cette méthode agit localement sur chaque point de contrôle sélectionné, il existe une possibilité qu'elle élimine les variations d'intérêt qui font l'objet de l'étude. Cette méthode est donc mise de côté au profit des méthodes plus générales de recalage, soit les méthodes polynomiales globales.

Puisque le recalage comporte deux étapes distinctes, soit le processus d'alignement géométrique des deux images qui peut se faire de façon linéaire, quadratique ou cubique et la méthode de ré-échantillonnage qui peut être du plus proche voisin, bilinéaire ou cubique, il faut évaluer quelle est la meilleure combinaison pour les neuf cas possibles.

Pour être en mesure d'évaluer les méthodes de ré-échantillonnage, il s'agit d'abord de comprendre l'effet qu'aura chaque type de ré-échantillonnage sur l'image corrigée. Le ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin n'altère pas l'intensité des pixels, il les replace tout simplement en fonction de la nouvelle grille établie lors du recalage. Ceci n'est pas le cas avec les deux autres méthodes, qui elles, appliquent un

calcul impliquant la moyenne d'une zone de pixels, de 2x2 dans le cas bilinéaire et 4x4 dans le cas cubique. On peut donc s'attendre à obtenir moins de bruit associé au recalage, si celle-ci est effectuée avec une méthode de ré-échantillonnage bilinéaire ou cubique en raison de l'effet de moyenne.

La donnée utilisée pour comparer le bruit entre deux images est la moyenne de l'intensité des pixels suite à la différence et à l'inversion. Plus celle-ci s'éloigne de 255, plus de bruit est introduit dans l'image. En théorie, si les deux images sont identiques, la moyenne d'intensité, après les opérations de recalage, de différence d'image et d'inversion, serait de 255. Donc, tout bruit introduit entre les deux prises d'images pour quelque raison que ce soit, aurait pour effet d'éloigner la moyenne de 255. Il faut donc, d'abord, évaluer le bruit intrinsèque associé à la prise de vue, avant d'introduire un repositionnement d'appareil et par la suite un déplacement de bloc sur l'image. Cette démarche sera revue avec les deux cas d'évaluation présentés à la section 4.5.

4.4 Différence d'images, post traitement et superposition

Suite au recalage, dans la mesure où celle-ci a été réussie avec succès, on se retrouve avec trois images; l'image initiale de référence, l'image subséquente à corriger et l'image corrigée. Cette dernière n'est ni plus ni moins que l'image subséquente réalignée sur l'image initiale (voir section 3.4). La différence d'image pixel par pixel peut alors permettre la détection de mouvement tel que défini à la section 3.3. Or, celle-ci n'est pas suffisante pour localiser avec certitude les différences (ou mouvements) entre les deux images. Trois raisons principales peuvent expliquer ceci :

1. L'image initiale et l'image finale ont des différences d'intensité significatives qui n'ont pas été corrigées à l'étape du prétraitement.
2. Le recalage n'aligne pas parfaitement les deux images.
3. Trop de bruit extrinsèque empêche la détection efficace de mouvement.

Donc, pour mettre en évidence les déplacements de blocs et du même coup réduire le bruit associé aux imperfections du recalage, l'utilisateur peut avoir recours à deux types de filtres numériques, soit la segmentation, pour mettre en valeur les changements brusques d'intensité et les filtres désignés pour nettoyer le bruit résiduel sur l'image, tel un filtre médian.

Un filtre numérique est ni plus ni moins qu'un algorithme écrit pour exécuter une fonction mathématique sur l'image. Dans le domaine spatial, le filtre concerne l'intensité des pixels alors que dans le domaine fréquentiel, celui-ci agit sur la transformée de Fourrier. Étant donné que les déplacements que l'on tente de déterminer se font le long de discontinuités dans le massif, et que ces discontinuités sont, d'un point vue fréquentiel, semblables au bruit, un filtre opérant dans le domaine fréquentiel aurait tendance à adoucir les déplacements que l'on souhaite rehausser. Ce type de filtre est donc à proscrire dans l'optique de cette recherche. Par contre, un filtre spatial devient intéressant car celui-ci agit localement sur l'image, sur des zones prédéterminées.

Dans le cas de la segmentation, l'image en tons de gris, obtenue suite à la différence entre l'image corrigée et l'image subséquente, est transformée en image binaire (pixels noirs ou blancs). En théorie, si tout fonctionne parfaitement, suite à la segmentation, tous les pixels correspondants à un mouvement quelconque prendraient la valeur d'intensité de 0 (noir). Malheureusement, un certain bruit résiduel demeure toujours sur l'image suite à la segmentation, et ce pour les raisons mentionnées ci-haut. Donc une façon d'éliminer ou de minimiser le bruit indésirable sur une image, est de lui appliquer un filtre pour nettoyer en quelque sorte l'image. Avant de décrire ces différents filtres disponibles, il est souhaitable de commencer par présenter les différentes techniques de segmentation.

A) Le seuil

Une façon de mettre en évidence les déplacements sur l'image obtenue suite à la différence d'image, est d'appliquer une procédure qui, dépassé un certain seuil de tolérance, ramène tout simplement les pixels se trouvant au-dessous et au-dessus du seuil, aux valeurs de 0 et 255 respectivement. Dans le contexte du projet, les meilleurs résultats ont tous été obtenus avec une valeur du seuil fixée à la valeur de la moyenne de l'intensité des pixels de l'image moins une à deux fois la valeur de l'écart-type sur la moyenne.

Cette fonction ne tient toutefois pas compte du gradient de variation de la luminosité, donc des changements rapides ou graduels d'intensité. Elle peut induire du bruit qui n'est pas associé à un mouvement et peut également masquer un mouvement qui n'a pas un très fort contraste. Cette méthode repère généralement très bien les chutes de blocs, toutefois ceux-ci ne sont pas d'intérêt majeur car les blocs ont déjà chuté au sol. Le seuil n'est pas nécessairement l'outil le mieux adapté au projet car il ne permet pas une aussi grande précision sur la détection.

B) Algorithmes détecteurs de bordures

Les autres techniques de segmentation sont toutes des algorithmes de détection des bordures. Ceux-ci ont pour but de détecter les contrastes nets sur une image. Ils procèdent à l'identification des variations importantes de la fonction d'intensité d'une image, soit des bordures, en appliquant un calcul de gradient dans le voisinage de chacun des pixels de l'image. Ainsi, la position des points des bordures les plus importantes correspond aux points où la norme du gradient est supérieure à un seuil donné (Lemy, 2002).

L'utilisation des détecteurs de bordures s'avère être le filtre le plus utile car, contrairement au seuil, il peut différencier entre un changement brusque d'intensité et un changement faible. De ces algorithmes, le détecteur utilisé par le logiciel Photo-Paint est le plus efficace et donc, celui qui sera utilisé dans ce projet.

Lorsque l'opération de segmentation est terminée, il peut parfois demeurer sur l'image résultante, un bruit de fond empêchant l'identification des zones instables. C'est à cette étape que l'on peut utiliser un filtre désigné pour réduire ce bruit. Les deux filtres les plus utilisés sont les filtres moyens et les filtres médians.

C) Filtre moyen

Un filtre moyen s'applique en remplaçant la valeur de l'intensité de chaque pixel à l'intérieur d'une zone, par la valeur d'intensité correspondant à la moyenne des pixels de cette zone (figure 4.6). En plus de réduire le bruit sur l'image, ce type de filtre à tendance à adoucir les discontinuités, donc à nuancer en quelque sorte l'information pertinente.

D) Filtre médian

Un filtre médian offre l'avantage de ne pas radoucir les discontinuités sur l'image tout en éliminant le bruit indésirable. Celui-ci opère de la même façon que le filtre précédent, à la différence près, qu'il remplace les valeurs d'intensité par la valeur médiane du groupe de pixels (figure 4.6).

Il est à noter que ces filtres doivent être utilisés avec beaucoup de jugement car il peut en résulter une perte importante d'information en fonction de la taille de la matrice choisie. Cette perte d'information peut effacer des petits déplacements survenus dans le massif. La figure suivante illustre le fonctionnement des filtres moyen et médian.

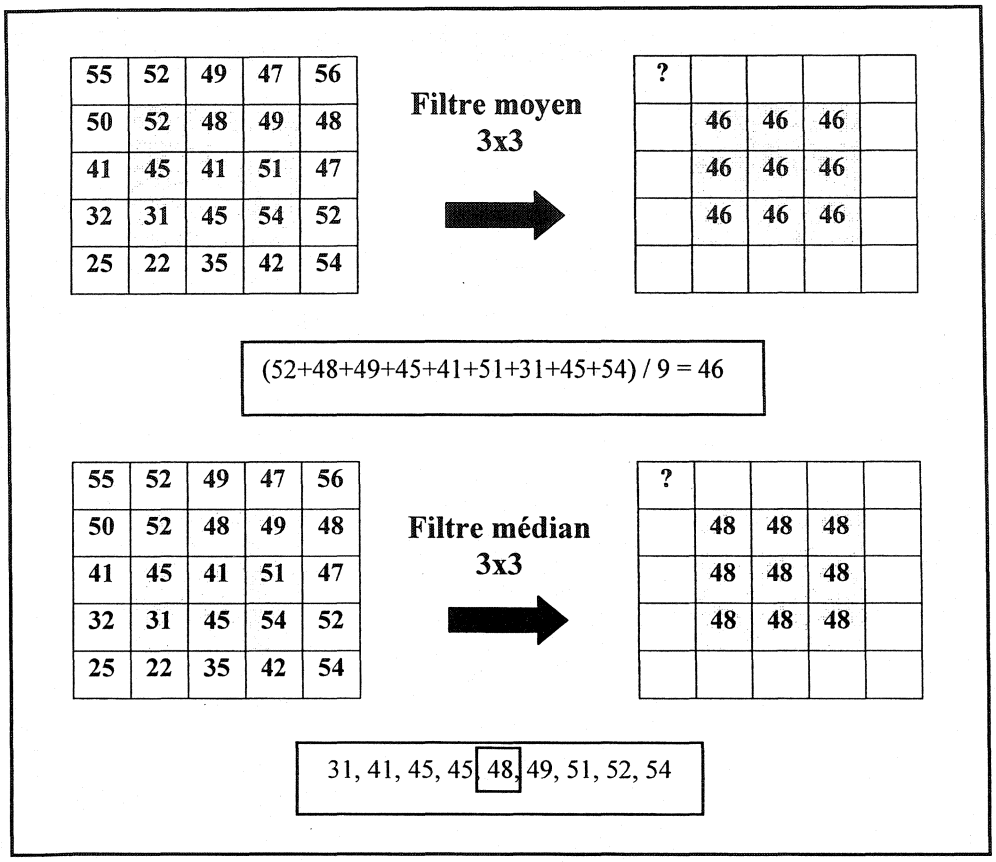


Figure 4.6. Exemple de l'application des filtres moyen et médian avec une fenêtre de pixels de 3x3. Dans le cas de la méthodologie, le traitement s'effectue alors que les images sont à 1 bits (en noir et blanc).

Finalement, l'image résultante suite à l'application du filtre peut alors être superposée à l'image initiale ou corrigée dans le but de faire ressortir les zones qui ont subit un certain mouvement. La figure suivante illustre l'utilisation du filtre choisi pour la segmentation dans le reste du projet, soit l'algorithme de recherche des bordures. Les images de gauche sont celles obtenues suite à l'application de l'algorithme détecteur de bordures. Les images de droite correspondent aux images finales. Celles-ci sont obtenues en superposant l'image de gauche sur l'image corrigée.

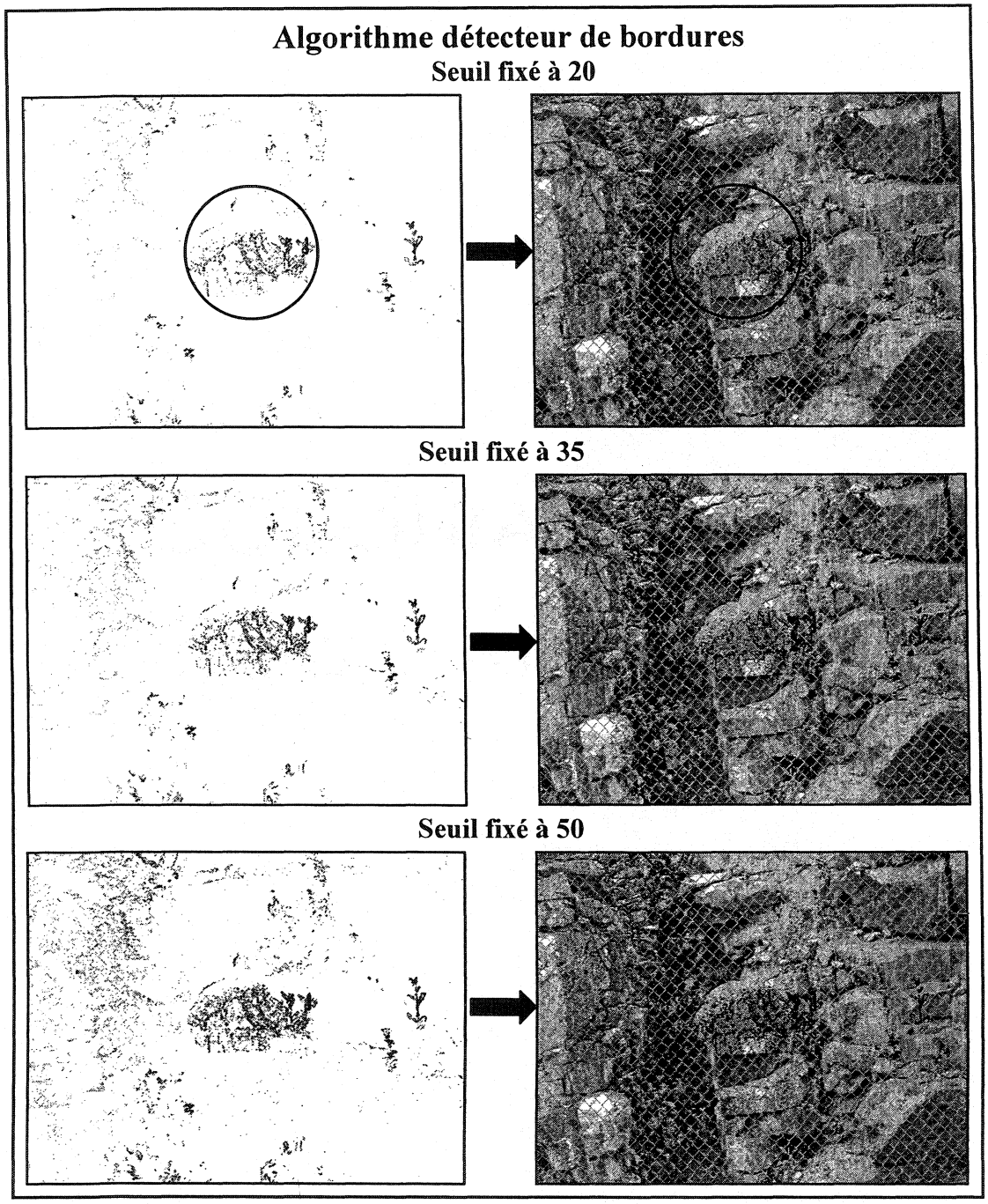


Figure 4.7. Utilisation de l'algorithme de détection de bordures avec trois seuils de détection. Les images de droites correspondent aux images finales.

Sur la figure 4.7, le seul bloc à avoir subi un mouvement est le bloc encerclé. Toutefois, le bruit associé à la méthodologie est clairement visible ailleurs sur l'image. Celui-ci est causé en partie par de la végétation qui a bougé entre les prises de vue, par le mouvement du grillage et par des différences de ré-échantillonnage des images.

Avant de passer aux cas d'évaluation, voici un résumé schématique des procédures employées jusqu'ici.

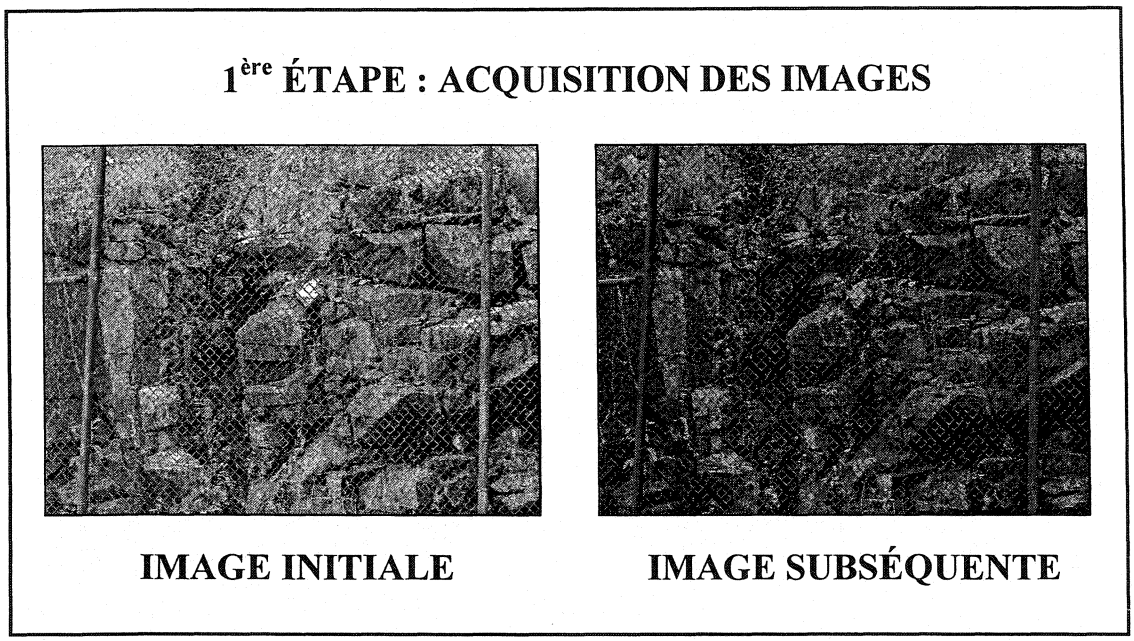


Figure 4.8. 1ère étape de la méthodologie : L'acquisition des images. Cette étape comprend la prise de l'image initiale, le repositionnement d'appareil et la prise subséquente des images.

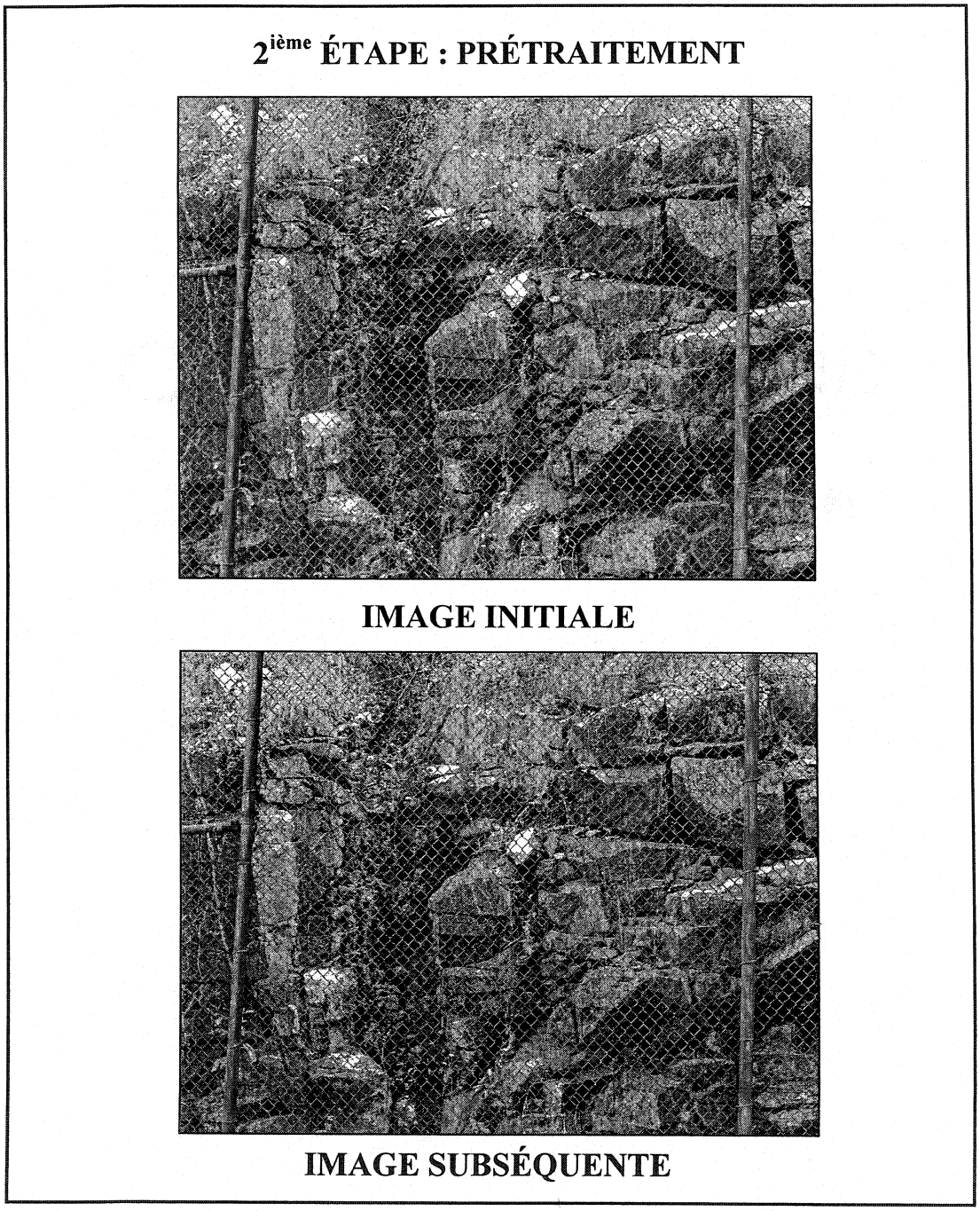


Figure 4.9. 2ième étape de la méthodologie : Le prétraitement. Cette étape comprend la transformation des images en niveaux de gris, et l'ajustement de la distribution de l'intensité lumineuse.

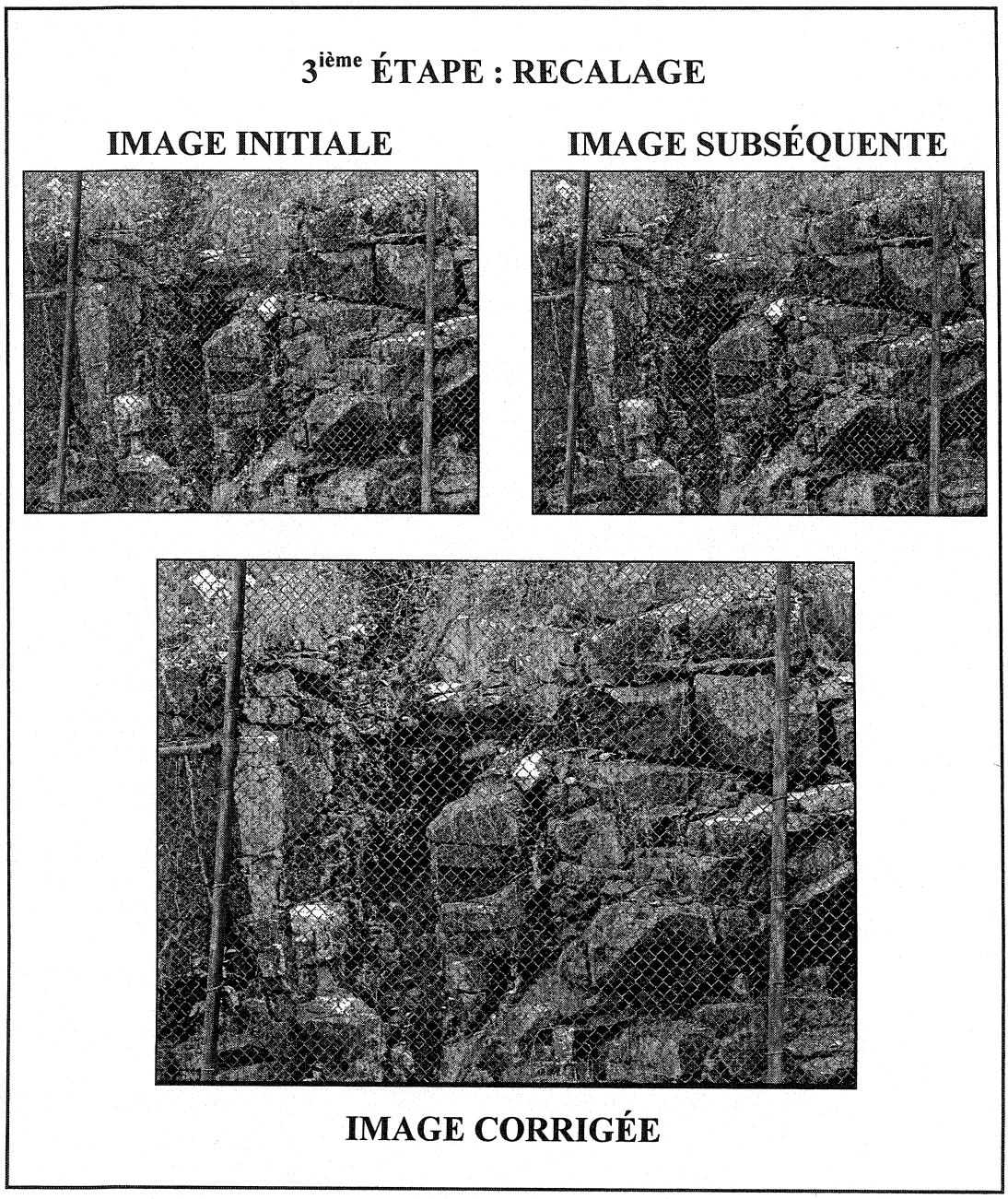


Figure 4.10. 3ième étape de la méthodologie : Le recalage. Cette étape est le processus d'alignement géométrique de l'image subséquente sur l'image initiale.

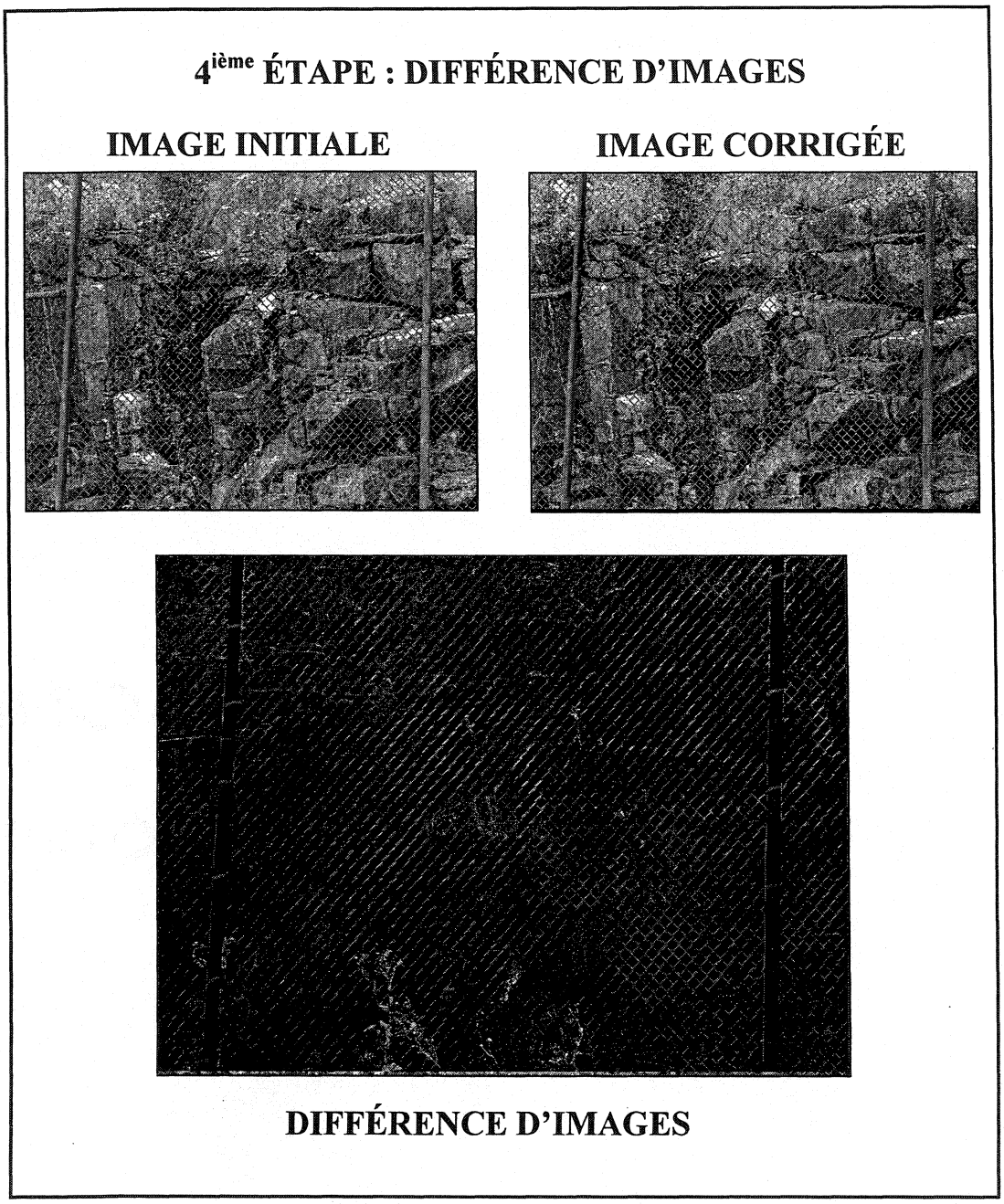


Figure 4.11. 4ième étape de la méthodologie : La différence d'images. Elle résulte en la différence entre l'image corrigée obtenue suite au recalage et l'image initiale suite au prétraitement.

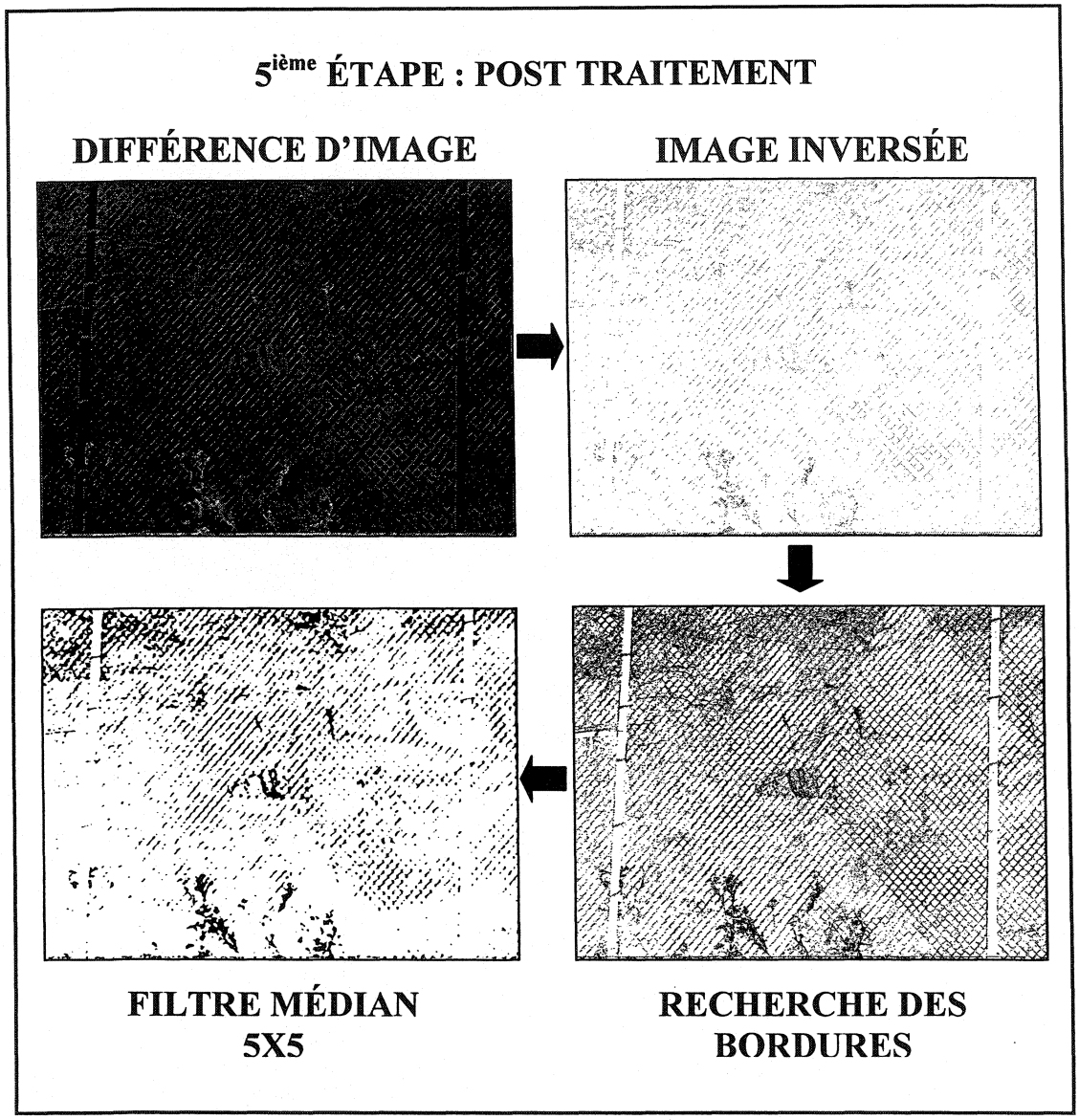


Figure 4.12. 5ième étape de la méthodologie : Le post traitement. Cette étape comprend l'inversion de l'image obtenue par différence, l'application de l'algorithme de recherche des bordures et ensuite l'application d'un filtre médian.

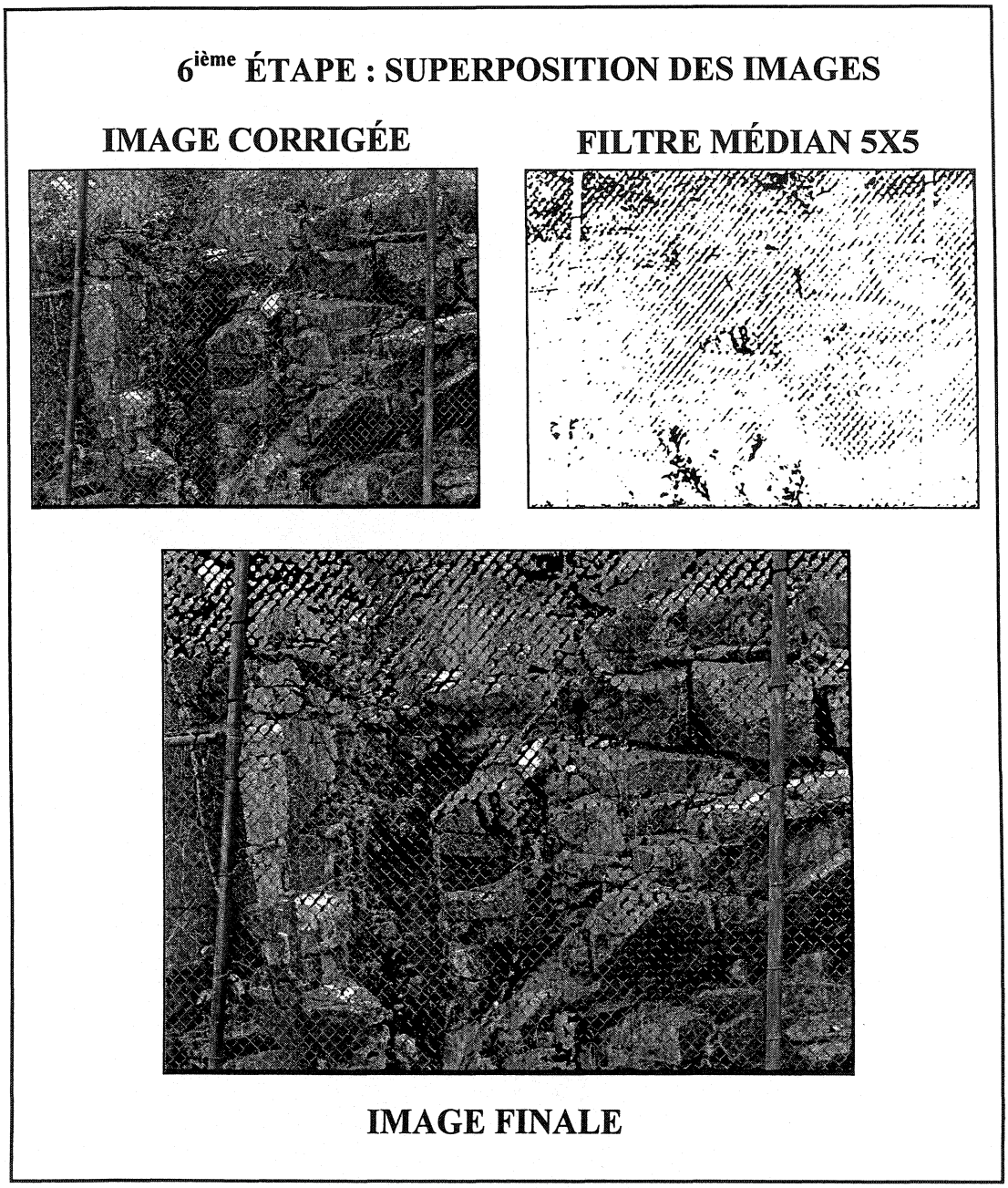


Figure 4.13. 6ième étape de la méthodologie : La superposition des images. Cette étape produit l'image finale, résultat de la superposition de l'image obtenue suite au post traitement sur l'image corrigée, obtenue suite au recalage.

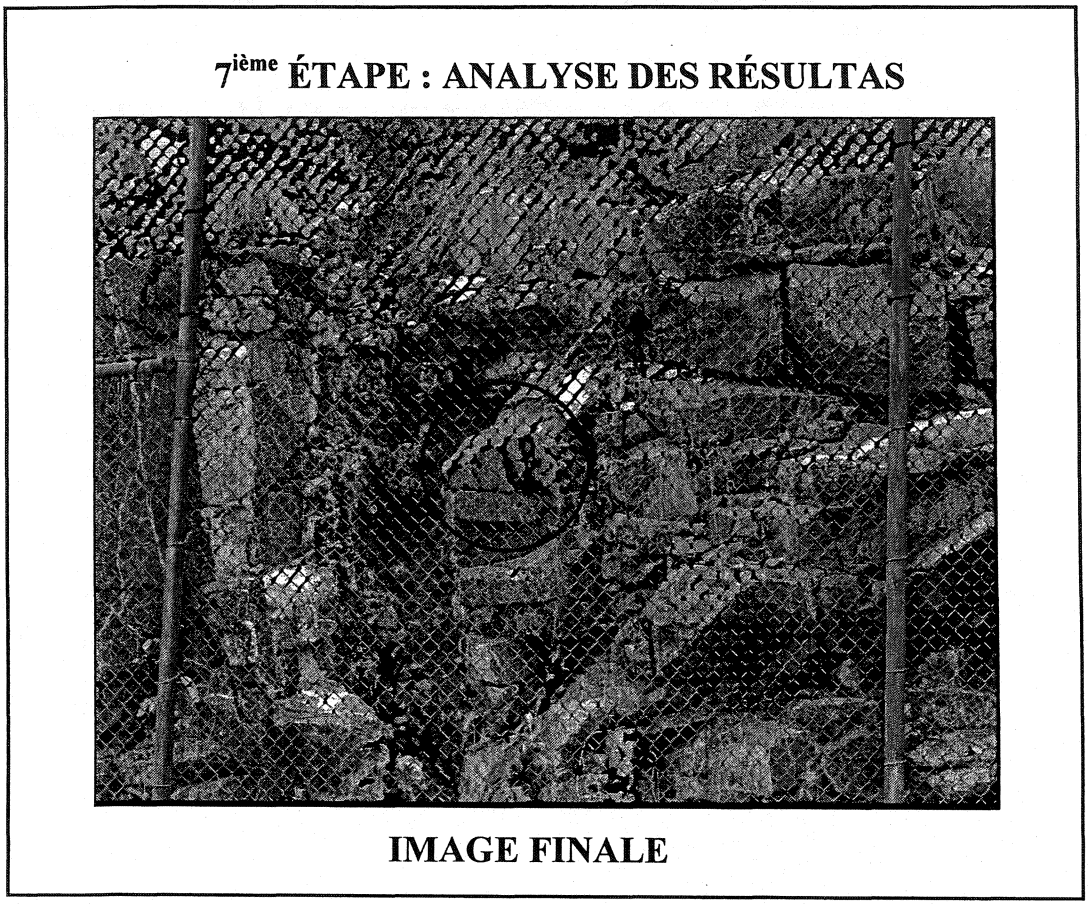


Figure 4.14. 7ième étape de la méthodologie : L'analyse des résultats. Cette étape consiste à déterminer sur l'image finale les blocs qui ont subis un mouvement. Ceci est apparent pour le bloc encerclé. Les autres zones de bruits correspondent toutes au grillage ou à la végétation.

4.5 Cas d'évaluation de la méthode

4.5.1 Cas A : Rocher d'intérieur, Pavillon André-Eisenstadt

L'essai a été effectué à l'intérieur du pavillon André-Eisenstadt sur le campus de l'Université de Montréal. Étant donné que les images sont prises dans un environnement contrôlé, toute possibilité de variations entre les images étant réduite au minimum, il est possible d'évaluer le bruit associé à la prise d'image et au recalage avant et après mouvement de l'appareillage. Deux images ont d'abord été prises successivement sans modification quelconque entre les deux. Ensuite, un repositionnement d'appareil a été effectué et une troisième image a été prise. Finalement, pour la quatrième image, un mouvement de bloc de 3 mm a été introduit dans la scène. Les images, prises avec l'appareil Kodak DCS 330, sont d'une résolution de 2008x1504 pixels. Pour des fins de comparaison, le recalage a été effectuée avec les deux logiciels.

La figure suivante illustre la scène photographiée. L'image a subi le prétraitement habituel, c'est-à-dire une transformation en niveaux de gris et un ajustement des niveaux de tonalités à un seuil de 99.95%.



Figure 4.15. Image initiale du roc prise dans le pavillon André-Eisenstadt de l'Université de Montréal.

Les données du tableau suivant indiquent la quantité de bruit sur l'image lorsqu'une simple différence est effectuée. La différence est possible puisque, a priori, les deux images sont « identiques ». La colonne Moyenne (RDB 30) correspond à la moyenne d'intensité des pixels de l'image après l'application de l'algorithme de recherche des bordures (RDB) avec un seuil de 30.

Tableau 4.1. Tableau des intensités des pixels suite à la différence d'image.

Image	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Initiale	137.49	---	---	---
Subséquente	141.04	---	---	---
Différence d'images	247.61	7.39	253.58	1.42

On peut voir que le bruit intrinsèque associé à la prise d'image après inversion est de 7.39. En rappel, cette valeur est obtenue de la différence entre 255 et la moyenne d'intensité des pixels (suite à la différence d'images dans ce cas-ci). Ceci peut être attribuable aux variations subtiles d'éclairage, d'imperfections de lentille ou de capteur numérique ou même, d'un mouvement infime de la caméra associé à la pression du doigt sur le déclencheur. Puisqu'il n'y a pas eu de mouvement d'appareil, on peut considérer ce cas comme étant celui d'un repositionnement parfait. Les conditions pour effectuer le recalage sont alors les meilleures possibles. Les résultats des neuf cas possibles de recalage, avec les deux logiciels, de ces deux images sont présentés aux tableaux suivants.

Tableau 4.2. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec le logiciel Registar(Geo). Note : PPV signifie Plus Proche Voisin.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	248.22	6.78	253.31	1.69
	Bilinéaire	250.05	4.95	254.70	0.30
	Cubique	249.95	5.05	254.92	0.08
Quadra. (2^{e} ordre)	PPV	248.22	6.78	253.31	1.69
	Bilinéaire	250.04	4.96	254.69	0.31
	Cubique	249.94	5.06	254.92	0.08
Cubique (3^{e} ordre)	PPV	248.22	6.78	253.31	1.69
	Bilinéaire	250.04	4.96	254.69	0.31
	Cubique	249.94	5.06	254.92	0.08

Tableau 4.3. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec le logiciel Geomatica.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	248.13	6.87	252.92	2.08
	Bilinéaire	249.04	5.96	253.77	1.23
	Cubique	248.70	6.30	253.67	1.33
Quadra. (2e ordre)	PPV	247.98	7.02	252.31	2.69
	Bilinéaire	248.64	6.36	253.19	1.81
	Cubique	248.31	6.69	252.80	2.20
Cubique (3e ordre)	PPV	246.37	8.63	243.38	11.62
	Bilinéaire	247.35	7.65	246.43	8.57
	Cubique	246.79	8.21	244.66	10.34

La constante des polynômes associée aux translations indique, dans les deux cas, un très petit déplacement entre les deux images, moins de 1 pixel en x et en y, à l'exception de la correction cubique effectuée avec Geomatica. Pour faciliter la comparaison, celles-ci sont présentées au tableau suivant.

Tableau 4.4. Constantes (a_0 et b_0) obtenues des polynômes de transformation.

	Registar(Geo) (5000 GCP)		Geomatica (11 GCP)	
Recalage	Constante (x')	Constante (y')	Constante (x')	Constante (y')
Linéaire	-0.6967	-0.2801	-0.4868	0.0382
Quadratique	-0.7558	-0.3766	0.0661	0.0777
Cubique	-0.7829	-0.3880	1.7324	-1.5248

En rappel, le logiciel Registar(Geo) utilise en moyenne 5000 points de contrôle (GCP) en comparaison a 11 sélectionnés avec Geomatica. Ce cas de deux images presque identiques est idéal pour observer les différences entre les deux logiciels et évaluer les différentes méthodes de ré-échantillonnage, puisqu'en principe, le type de recalage n'a

pas beaucoup d'importance en raison du déplacement presque inexistant entre les deux images. D'ailleurs, des données précédentes obtenues avec Registar(Geo), les moyennes d'intensités des pixels obtenues semblent plutôt suivre cette tendance. Avec Geomatica, cette tendance n'est toutefois pas respectée pour le recalage cubique, où de forts niveaux de bruits sont remarqués.

De façon générale, les recalages effectués par Geomatica donnent légèrement plus de bruit qu'avec Registar(Geo) (ceci est encore plus marqué pour le recalage de 3^{e} ordre). Le très faible nombre de points de contrôle (en comparaison à Registar(Geo)) est le principal responsable de ceci. Avec Geomatica, une légère augmentation du niveau de bruit survient avec l'augmentation de l'ordre du recalage, d'autant plus que le niveau de bruit enregistré est supérieur après l'application du détecteur de bordures pour le recalage de troisième ordre. Une évidence se dessine; le recalage cubique est très mal adapté au problème avec le logiciel Geomatica puisque le nombre faible de GCP ne permet pas de bien conditionner la fonction polynomiale. Dans tous les cas, il n'est pas surprenant que la méthode du plus proche voisin génère plus de bruit que les deux autres. Elle reprend les valeurs d'intensité sur la nouvelle grille telles qu'elles sont sur l'image subséquente.

Dans le cas de Registar(Geo), l'image finale a moins de bruit par rapport à la différence d'image alors que le processus de recalage augmente très légèrement le bruit avec Geomatica. Finalement, les constantes des polynômes (dans les deux cas) indiquent clairement qu'un déplacement subtil a eu lieu quoique l'appareil n'ait pas été déplacé, du moins, de façon intentionnelle. Ceci permet de conclure très sommairement, qu'un ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin introduit plus de bruit sur l'image traitée que les deux autres approches. Il est également possible de conclure que même pour deux images prises sans mouvement apparent, un recalage est souhaitable pour éliminer toute imperfection d'alignement, aussi mineure soit elle, entre les deux images. Finalement, en raison du faible nombre de points de contrôle, l'utilisateur peut

s'attendre à obtenir des résultats peu performants avec un recalage cubique avec Geomatica. Si on introduit un repositionnement d'appareil, on obtient les résultats de recalage suivants pour les deux logiciels.

Tableau 4.5. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil, obtenues avec Registar(Geo).

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	248.43	6.57	252.75	2.25
	Bilinéaire	249.60	5.40	254.26	0.74
	Cubique	249.45	5.55	254.44	0.56
Quadra. (2e ordre)	PPV	248.72	6.28	253.65	1.35
	Bilinéaire	250.05	4.95	254.73	0.27
	Cubique	249.92	5.08	254.81	0.19
Cubique (3e ordre)	PPV	248.72	6.28	253.66	1.34
	Bilinéaire	250.05	4.95	254.74	0.26
	Cubique	249.92	5.08	254.81	0.19

Tableau 4.6. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil, obtenues avec Geomatica.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	247.87	7.13	250.37	4.63
	Bilinéaire	248.90	6.10	252.96	2.04
	Cubique	248.43	6.57	252.54	2.46
Quadra. (2e ordre)	PPV	247.87	7.13	249.86	5.14
	Bilinéaire	248.95	6.05	252.08	2.92
	Cubique	248.48	6.52	251.62	3.38
Cubique (3e ordre)	PPV	247.58	7.42	248.36	6.64
	Bilinéaire	248.56	6.44	251.02	3.98
	Cubique	248.08	6.96	250.43	4.57

Dans les meilleures conditions, le repositionnement de l'appareil introduit un déplacement de l'ordre de 7 pixels en x et 15 en y avec Registar(Geo), 7 pixels en x et

10 à 15 pixels en y avec Geomatica, comme en témoignent les constantes des polynômes pour les transformation effectuées.

Tableau 4.7. Constantes obtenues des polynômes de transformation pour le cas avec mouvement d'appareil.

	Registar(Geo) (5000 GCP)		Geomatica (11 GCP)	
Recalage	**Constante (x')**	**Constante (y')**	**Constante (x')**	**Constante (y')**
Linéaire	6.9438	-15.3654	7.2549	-14.5479
Quadratique	6.9820	-14.9633	7.9513	-13.2294
Cubique	7.0561	-14.8926	7.4203	-10.8061

Dans le cas de Registar(Geo), le fait d'introduire un repositionnement d'appareil n'introduit aucun changement significatif dans le bruit généré par le recalage quadratique et cubique, ceci étant encore une fois, le résultat du grand nombre de points de contrôle utilisés par Registar(Geo). Toutefois, malgré les précautions prises lors du repositionnement, une légère augmentation de bruit pour l'approche linéaire est à noter. Pour Geomatica, les tendances observées au premier exemple se reflètent ici, c'est-à-dire, plus de bruit généré avec un ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin et une augmentation du bruit avec l'augmentation de l'ordre du recalage.

Un fait important qui doit être mentionné est qu'étant donné la faible quantité de points de contrôle utilisé avec Geomatica, il est parfois possible d'observer certaines formes de linéations, ou changements subtils dans l'image suivant des contours bien définis. Ceci est dû à l'application des transformations mathématiques qui doivent s'effectuer sur des zones plus importantes. Le problème important relié à ce phénomène est celui de l'application de l'algorithme détecteur de bordures qui, parfois, souligne ces linéations, ce qui peut mener une certaine confusion lors de l'analyse de l'image finale. Ce point sera d'ailleurs abordé plus loin.

Afin de poursuivre l'évaluation du cas présent, un mouvement de bloc a été introduit dans la scène et les différentes méthodes de recalage sont reproduites avec les deux logiciels. Les tableaux suivants présentent les résultats obtenus.

Tableau 4.8. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Registar(Geo), entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	247.39	7.61	250.31	4.69
	Bilinéaire	248.38	6.62	252.25	2.75
	Cubique	248.25	6.75	252.29	2.71
Quadra. (2e ordre)	PPV	247.63	7.37	251.23	3.77
	Bilinéaire	248.73	6.27	252.81	2.19
	Cubique	248.62	6.38	252.75	2.25
Cubique (3e ordre)	PPV	247.61	7.39	251.19	3.81
	Bilinéaire	248.73	6.27	252.90	2.10
	Cubique	248.62	6.38	252.79	2.21

Tableau 4.9. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Geomatica, entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	247.03	7.97	248.38	6.62
	Bilinéaire	247.96	7.04	251.04	3.96
	Cubique	247.56	7.44	250.51	4.49
Quadra. (2e ordre)	PPV	246.98	8.02	247.90	7.10
	Bilinéaire	247.94	7.06	250.34	4.66
	Cubique	247.52	7.48	249.64	5.36
Cubique (3e ordre)	PPV	246.43	8.57	245.11	9.89
	Bilinéaire	247.20	7.80	247.80	7.20
	Cubique	246.68	8.32	246.54	8.46

Le bruit associé aux différentes méthodes de recalage pour les images est illustré aux figures suivantes pour les deux logiciels utilisés.

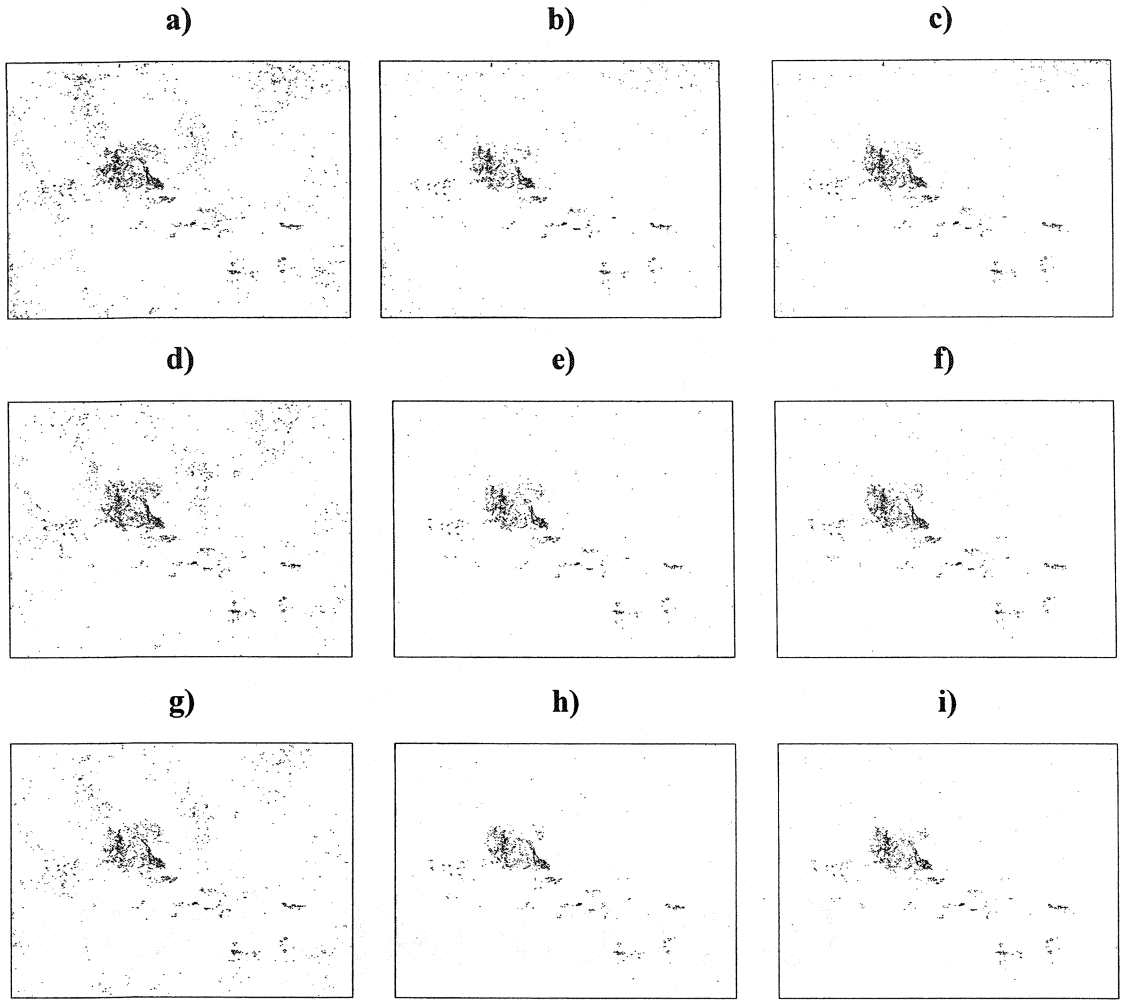


Figure 4.16. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Registar(Geo) sur les images prise dans le pavillon André-Eisenstadt (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique.

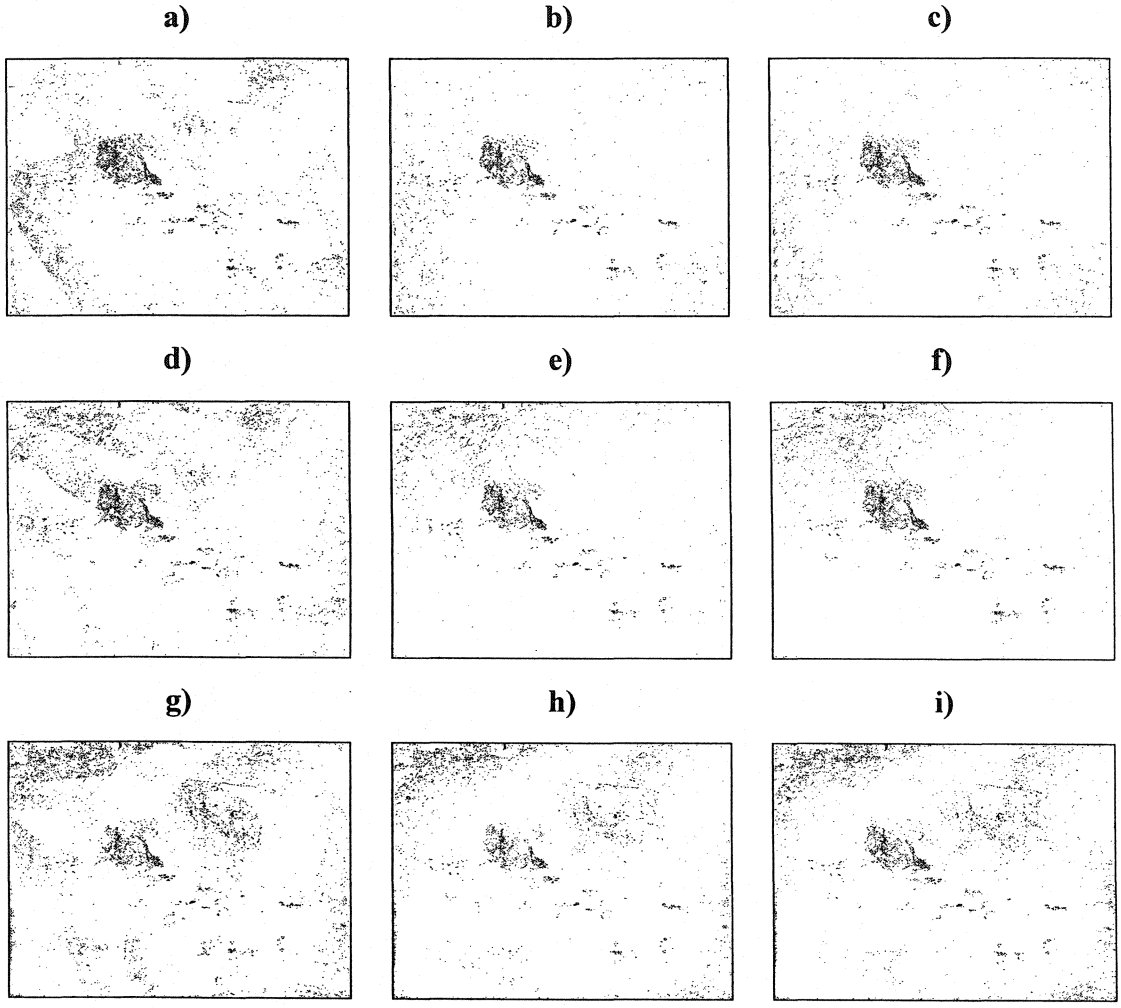


Figure 4.17. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Geomatica sur les images prise dans le pavillon André-Eisenstadt (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique.

Les deux tableaux suivants reprennent tous les résultats obtenus pour les trois cas présentés, soit sans mouvement (images 1-2), avec un mouvement d'appareil (images 1-3) et avec un mouvement d'appareil et de bloc (images 1-4). La comparaison des données est intéressante entre les deux premier cas, elle nous permet de conclure que le recalage fonctionne très bien pour corriger les erreurs de repositionnement d'appareil.

Dans le cas d'un mouvement de bloc, la comparaison entre les niveaux de bruit perd sa signification, car une partie inconnue de ce bruit est lié au mouvement même et non aux procédures de recalage. Cependant, il est toujours possible d'observer la tendance du niveau bruit d'un cas à l'autre. Cette tendance devrait démontrer une augmentation du bruit suite au mouvement de bloc, ce qui est confirmée aux tableaux 4.10 et 4.11.

Tableau 4.10. Données résultantes des recalages effectués par Registar(Geo) pour les trois paires d'images.

		Images 1-2		Images 1-3		Images 1-4	
Recalage	**Ré-échant.**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**
Linéaire	PPV	6.78	1.69	6.57	2.25	7.61	4.69
	Bilinéa.	4.95	0.30	5.40	0.74	6.62	2.75
	Cubiq.	5.05	0.08	5.55	0.56	6.75	2.71
Quadra.	PPV	6.78	1.69	6.28	1.35	7.37	3.77
	Bilinéa.	4.96	0.31	4.95	0.27	6.27	2.19
	Cubiq.	5.06	0.08	5.08	0.19	6.38	2.25
Cubique	PPV	6.78	1.69	6.28	1.34	7.39	3.81
	Bilinéa.	4.96	0.31	4.95	0.26	6.27	2.10
	Cubiq.	5.06	0.08	5.08	0.19	6.38	2.21

Tableau 4.11. Données résultantes des recalages effectués par Geomatica pour les trois paires d'images.

		Images 1-2		Images 1-3		Images 1-4	
Recalage	**Ré-échant.**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**
Linéaire	PPV	6.87	2.08	7.13	4.63	7.97	6.62
	Bilinéa.	5.96	1.23	6.10	2.04	7.04	3.96
	Cubiq.	6.30	1.33	6.57	2.46	7.44	4.49
Quadra.	PPV	7.02	2.69	7.13	5.14	8.02	7.10
	Bilinéa.	6.36	1.81	6.05	2.92	7.06	4.66
	Cubiq.	6.69	2.20	6.52	3.38	7.48	5.36
Cubique	PPV	8.63	11.62	7.42	6.64	8.57	9.89
	Bilinéa.	7.65	8.57	6.44	3.98	7.80	7.20
	Cubiq.	8.21	10.34	6.96	4.57	8.32	8.46

Il est possible de faire ressortir des deux tableaux précédents quelques conclusions importantes en fonction du logiciel utilisé pour effectuer le recalage. Pour les deux logiciels, on note que le niveau de bruit est sensiblement le même suite au recalage pour les deux premiers cas. On observe également une augmentation du niveau de bruit attribuable au mouvement de bloc. Cependant, ce bruit n'est pas associé à l'amplitude d'un déplacement, mais plutôt, il est fonction de la taille du bloc, donc du nombre de pixels qu'il représente sur une image. Un bloc de plus grosse taille aurait provoqué une plus grosse augmentation du niveau de bruit.

Avec Registar(Geo),

1. Les résultats obtenus semblent plutôt liés au choix de ré-échantillonnage qu'au type de recalage utilisé.
2. Il n'y aucune différence notable entre le recalage effectué par une méthode polynomiale de 2^e ou 3^e ordre.
3. Le ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin introduit systématiquement plus de bruit dans les images qu'avec les deux autres méthodes.

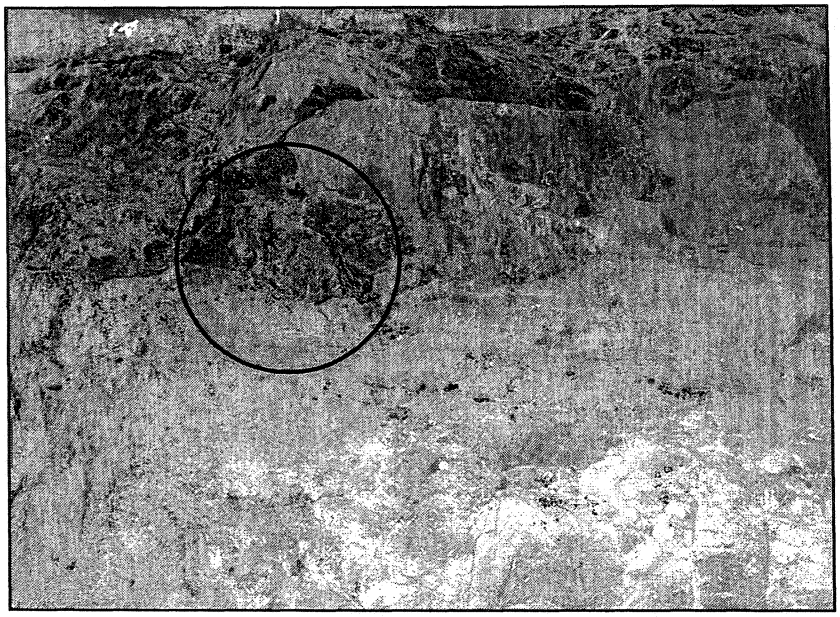
Avec Geomatica,

1. D'emblée, le recalage cubique n'est pas du tout approprié pour effectuer les corrections nécessaires. Il introduit un niveau de bruit inacceptable en raison de la faible quantité de points contrôle avec laquelle le logiciel travaille. De plus, il introduit des résultas difficiles à interpréter.
2. L'utilisation d'un ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin introduit plus de bruit que les deux autres méthodes en plus de provoquer des effets de linéations, qui ressortent avec l'application de l'algorithme détecteur de bordures.
3. Le recalage de premier ordre semble plus adapté au problème posé.

Dans cette étude de cas, en utilisant le logiciel Registar(Geo), tous les types de recalage semblent bien définir le mouvement de bloc qui a eu lieu entre les deux images. Toutefois, il est évident que le recalage quadratique et cubique avec un ré-échantillonnage bilinéaire et cubique offre le résultat avec le moins de bruit ambiant et ce, sans compromettre la qualité de la détection du mouvement. Dans le cas de Geomatica, le recalage linéaire avec un ré-échantillonnage bilinéaire semble le mieux définir le mouvement de bloc avec le moins de bruit ambiant.

La figure suivante démontre les images finales obtenues par les méthodes jugées les plus appropriées dans chacun des cas.

a)



b)

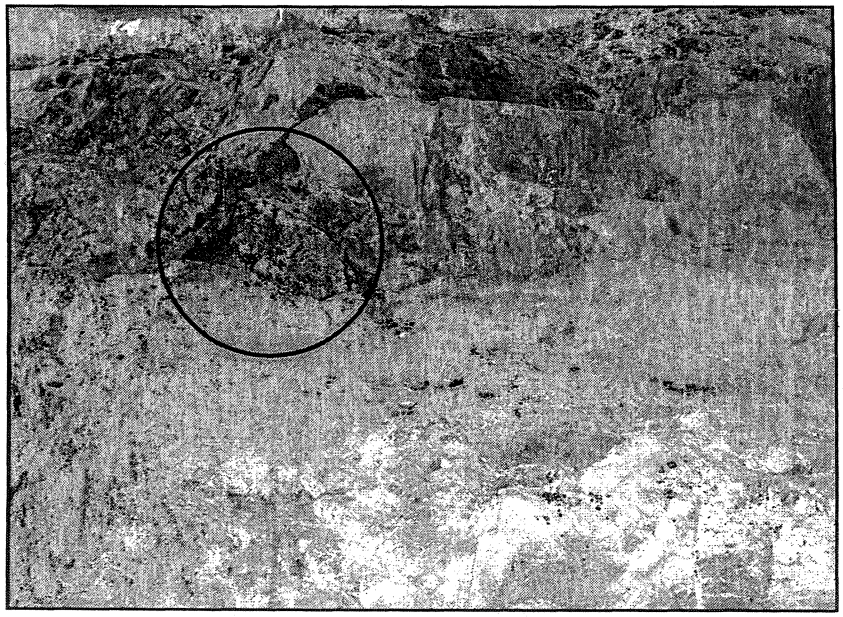


Figure 4.18. a) Image finale obtenue avec a) Registar(Geo) (recalage cubique, ré-échantillonnage bilinéaire) et b) Geomatica (linéaire, bilinéaire).

4.5.2 Cas B : Paroi extérieure, Stationnement École Polytechnique

Il serait intéressant de poursuivre l'évaluation avec une série d'images prises avec les mêmes précautions, mais à l'extérieur, donc soumises aux variations naturelles d'intensité lumineuse. L'essai a été effectué dans le stationnement à l'arrière de l'École Polytechnique à proximité d'un garage d'entretien, sur le campus de l'Université de Montréal. Deux images ont d'abord été prises successivement sans modification quelconque entre les deux. Ensuite, un repositionnement d'appareil a été effectué et une troisième image a été prise. Finalement, une petite chute de bloc a été induite dans la scène pour la quatrième image. Les images, prises avec un appareil Kodak DCS 330, ont une résolution de 2008x1504 pixels. La figure suivante présente l'image initiale.

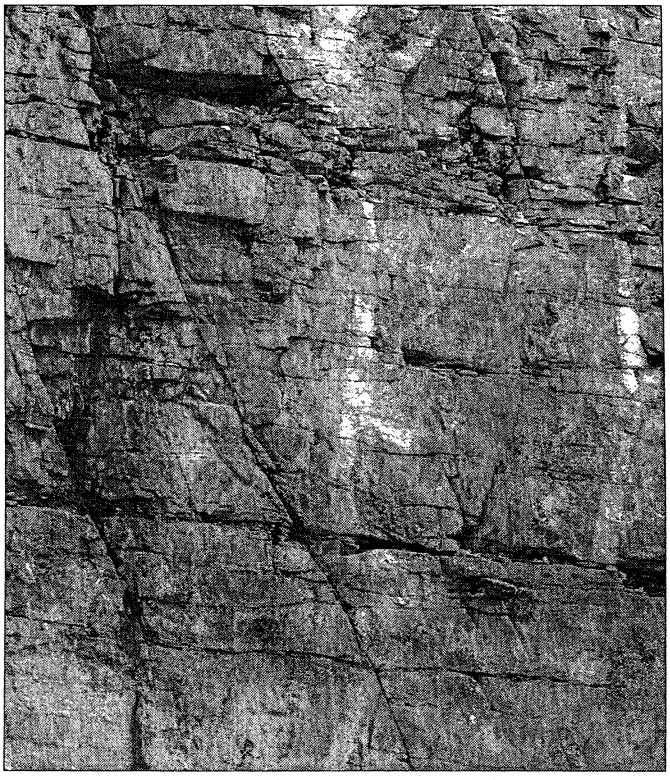


Figure 4.19. Image initiale prise à l'arrière de l'École Polytechnique.

Voici les données relatives aux deux premières images, prises sans repositionnement d'appareil.

Tableau 4.12. Tableau des intensités des pixels suite à la différence d'image.

Image	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Initiale	120.90	---	---	---
Subséquente	120.50	---	---	---
Différence d'image	251.05	3.95	254.78	0.22

En rappel, l'essai peut être considéré comme étant celui d'un repositionnement parfait. Le résultat des neuf cas possible de recalage de ces deux images (avec les deux logiciels) est présenté aux tableaux suivants.

Tableau 4.13. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec Registar(Geo).

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	251.01	3.99	254.86	0.14
	Bilinéaire	251.61	3.39	254.62	0.38
	Cubique	251.70	3.30	254.93	0.07
Quadra. (2e ordre)	PPV	251.01	3.99	254.86	0.14
	Bilinéaire	251.62	3.38	254.65	0.35
	Cubique	251.70	3.30	254.93	0.07
Cubique (3e ordre)	PPV	251.01	3.99	254.86	0.14
	Bilinéaire	251.61	3.39	254.65	0.37
	Cubique	251.69	3.31	254.93	0.07

Tableau 4.14. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, sans mouvement d'appareil avec Geomatica.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	251.01	3.99	254.86	0.14
	Bilinéaire	251.00	4.00	254.49	0.51
	Cubique	251.02	3.98	254.51	0.49
Quadra. (2e ordre)	PPV	251.01	3.99	254.86	0.14
	Bilinéaire	251.07	3.93	254.76	0.24
	Cubique	251.08	3.92	254.76	0.24
Cubique (3e ordre)	PPV	250.88	4.12	254.38	0.62
	Bilinéaire	250.56	4.44	253.95	1.05
	Cubique	250.56	4.44	253.95	1.05

Les constantes des polynômes de transformation établis pour les trois types de recalage sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 4.15. Constantes obtenues des polynômes de transformation.

	Registar(Geo) (5000 GCP)		Geomatica (11 GCP)	
Recalage	**Constante (x')**	**Constante (y')**	**Constante (x')**	**Constante (y')**
Linéaire	-0.0065	0.2261	-0.0278	0.0407
Quadratique	-0.0168	0.2596	-0.0409	0.0495
Cubique	0.0021	0.2962	0.0981	-0.3292

Jusqu'ici, les résultats vont dans le même sens qu'à l'essai précédent dans le cas des deux logiciels. En introduisant un repositionnement réel d'appareil suite à son déplacement, on obtient les résultats de recalage suivants.

Tableau 4.16. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil avec Registar(Geo).

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	242.38	12.62	243.68	11.32
	Bilinéaire	243.22	11.78	252.14	2.86
	Cubique	243.24	11.76	253.48	1.52
Quadra. (2e ordre)	PPV	242.43	12.57	244.54	10.46
	Bilinéaire	243.27	11.73	252.76	2.24
	Cubique	243.30	11.70	254.11	0.89
Cubique (3e ordre)	PPV	242.43	12.57	244.54	10.46
	Bilinéaire	243.08	11.92	251.19	3.81
	Cubique	243.30	11.70	254.10	0.90

Tableau 4.17. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives, avec mouvement d'appareil avec Geomatica.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	242.31	12.69	240.68	14.32
	Bilinéaire	243.05	11.95	249.59	5.41
	Cubique	242.93	12.07	250.42	4.58
Quadra. (2e ordre)	PPV	242.31	12.69	240.83	14.17
	Bilinéaire	243.14	11.86	249.85	5.15
	Cubique	243.01	11.99	250.44	4.56
Cubique (3e ordre)	PPV	239.58	15.42	212.33	42.67
	Bilinéaire	240.12	14.88	217.71	37.29
	Cubique	239.55	15.45	213.41	41.59

Le repositionnement de l'appareil introduit un déplacement de l'ordre de 22 pixels en x et 14 en y, comme en témoignent les constantes des polynômes pour les transformations effectuées. Il est à noter que le repositionnement réussi lors de cet essai a été effectué avec le premier équipement utilisé, qui était constitué d'un seul laser fixé de façon moins solide à l'appareillage. Avec le nouvel appareillage, l'erreur sur le repositionnement aurait sans doute été beaucoup plus petite.

Tableau 4.18. Constantes obtenues des polynômes de transformation pour le cas avec mouvement d'appareil.

	Registar(Geo) (5000 GCP)		Geomatica (11GCP)	
Recalage	**Constante (x')**	**Constante (y')**	**Constante (x')**	**Constante (y')**
Linéaire	-22.0099	-14.3586	-22.5086	-14.4141
Quadratique	-22.3606	-14.6583	-22.7524	-14.5342
Cubique	-22.3588	-14.6893	-21.1439	-12.4014

Contrairement au cas précédent, le fait d'introduire un repositionnement d'appareil introduit un changement significatif dans le bruit généré par le recalage. D'ailleurs, l'erreur sur le repositionnement au tableau 4.18 le démontre.

Dans le cas de Registar(Geo), avant l'application de l'algorithme, le bruit était sensiblement le même pour les différents recalages. Une nette différence est survenue suite à l'application de l'algorithme de recherche des bordures au niveau du bruit généré sur l'image par rapport au type de ré-échantillonnage. Pour Geomatica, les résultats suivent la même tendance, le recalage de troisième ordre ne fonctionne pas du tout alors que le ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin continue d'engendrer plus de bruit que les deux autres.

Finalement, les tableaux suivants présentent les résultats des recalages effectués entre l'image initiale et la quatrième image, soit celle dans laquelle il y eu une chute de bloc.

Tableau 4.19. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Registar(Geo), entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	234.80	20.20	233.53	21.47
	Bilinéaire	235.28	19.72	247.74	7.26
	Cubique	235.26	19.74	249.15	5.85
Quadra. (2e ordre)	PPV	234.84	20.16	234.62	20.38
	Bilinéaire	235.31	19.69	248.84	6.16
	Cubique	235.29	19.71	250.31	4.69
Cubique (3e ordre)	PPV	234.84	20.16	234.65	20.35
	Bilinéaire	235.30	19.70	248.88	6.12
	Cubique	235.29	19.71	250.29	4.71

Tableau 4.20. Données résultantes des recalages effectués sur les images successives avec Geomatica, entre lesquelles il y a eu un mouvement de bloc et d'appareil.

Regis-tration	Ré-échantill.	Moyenne	Bruit	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
Linéaire (1er ordre)	PPV	235.03	19.97	228.44	26.56
	Bilinéaire	235.45	19.55	242.11	12.89
	Cubique	235.34	19.66	241.29	13.71
Quadra. (2e ordre)	PPV	234.95	20.05	227.96	27.04
	Bilinéaire	235.47	19.53	240.81	14.19
	Cubique	235.35	19.65	239.63	15.37
Cubique (3e ordre)	PPV	233.23	21.77	194.65	60.35
	Bilinéaire	233.60	21.40	201.90	53.10
	Cubique	233.13	21.87	195.81	59.19

Le bruit associé aux différentes méthodes de recalage pour les images est illustré aux figures suivantes pour les deux logiciels.

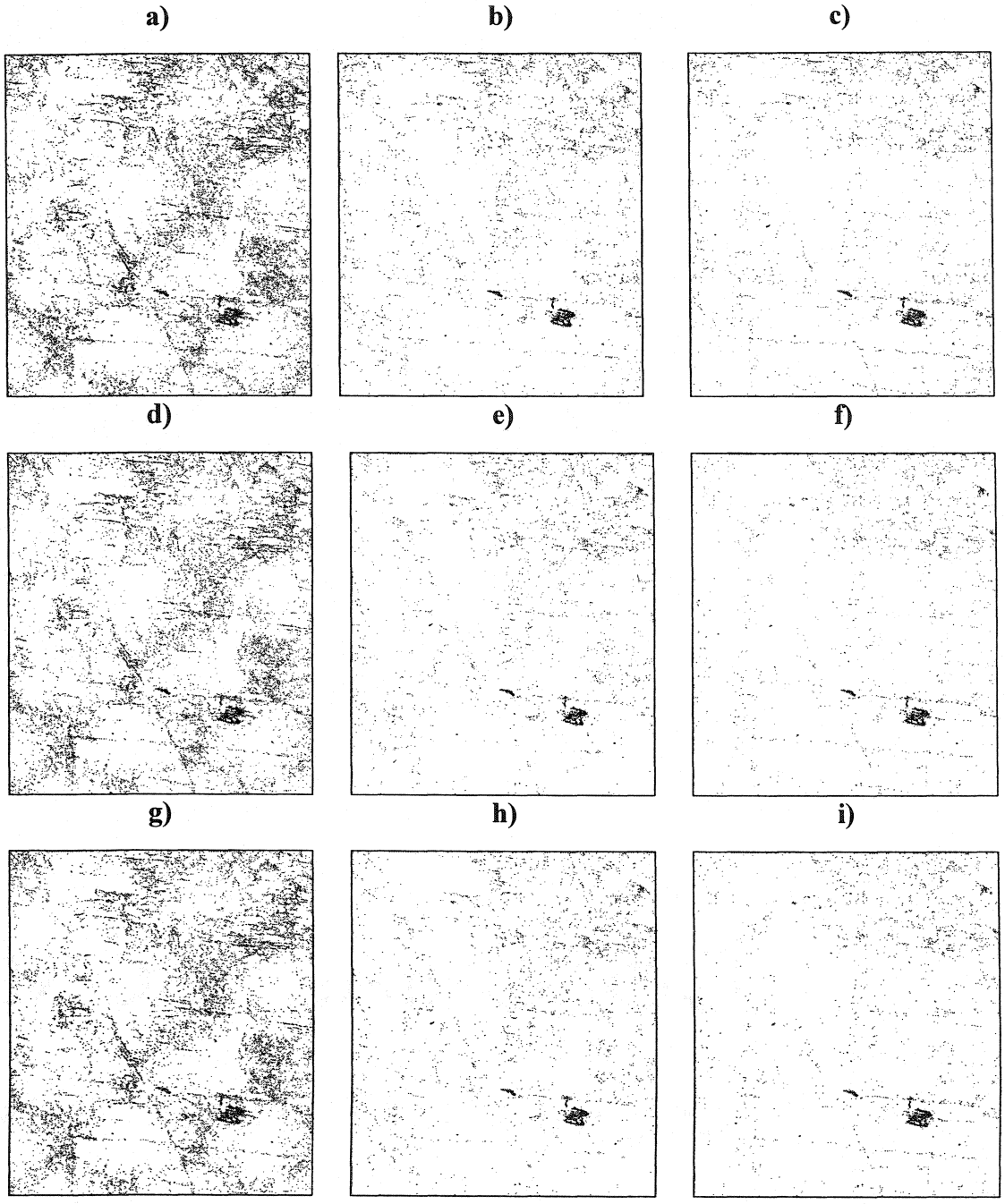


Figure 4.20. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Registar(Geo) sur les images prise à l'arrière de l'École Polytechnique (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique.

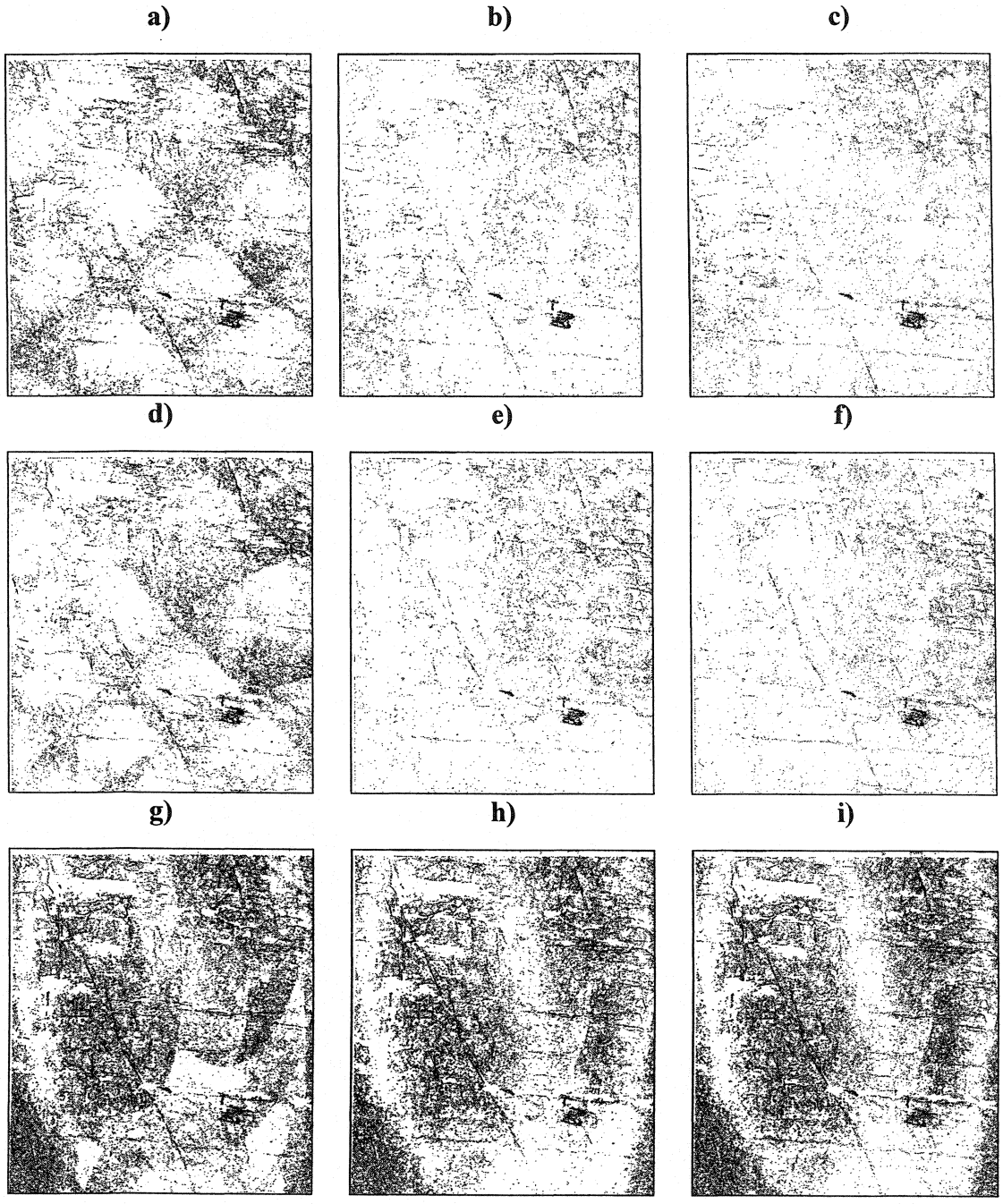


Figure 4.21. Bruit associé aux différents types de recalage effectués avec Geomatica sur les images prise à l'arrière de l'École Polytechnique (type de recalage, type de ré-échantillonnage), a) linéaire, plus proche voisin, b) linéaire, bilinéaire, c) linéaire, cubique, d) quadratique, plus proche voisin, e) quadratique, bilinéaire, f) quadratique, cubique, g) cubique, plus proche voisin, h) cubique, bilinéaire et i) cubique, cubique.
Les tableaux suivants reprennent tous les résultats obtenus pour les trois cas présentés.

Tableau 4.21. Données résultantes des recalages effectués avec Registar(Geo) pour les trois paires d'images.

		Images 1-2		Images 1-3		Images 1-4	
Recalage	**Ré-échant.**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**
Linéaire	PPV	3.99	0.14	12.62	11.32	20.20	21.47
	Bilinéa.	3.39	0.38	11.78	2.86	19.72	7.26
	Cubiq.	3.30	0.07	11.76	1.52	19.74	5.85
Quadra.	PPV	3.99	0.14	12.57	10.46	20.16	20.38
	Bilinéa.	3.38	0.35	11.73	2.24	19.69	6.16
	Cubiq.	3.30	0.07	11.70	0.89	19.71	4.69
Cubique	PPV	3.99	0.14	12.57	10.46	20.16	20.35
	Bilinéa.	3.39	0.37	11.92	3.81	19.70	6.12
	Cubiq.	3.31	0.07	11.70	0.90	19.71	4.71

Tableau 4.22. Données résultantes des recalages effectués avec Geomatica pour les trois paires d'images.

		Images 1-2		Images 1-3		Images 1-4	
Recalage	**Ré-échant.**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**	**Bruit**	**Bruit RDB 30**
Linéaire	PPV	3.99	0.14	12.69	14.32	19.97	26.56
	Bilinéa.	4.00	0.51	11.95	5.41	19.55	12.89
	Cubiq.	3.98	0.49	12.07	4.58	19.66	13.71
Quadra.	PPV	3.99	0.14	12.69	14.17	20.05	27.04
	Bilinéa.	3.93	0.24	11.86	5.15	19.53	14.19
	Cubiq.	3.92	0.24	11.99	4.56	19.65	15.37
Cubique	PPV	4.12	0.62	15.42	42.67	21.77	60.35
	Bilinéa.	4.44	1.05	14.88	37.29	21.40	53.10
	Cubiq.	4.44	1.05	15.45	41.59	21.87	59.19

De même qu'au cas d'évaluation précédent, lorsque l'on introduit un mouvement de bloc dans la scène, la comparaison entre les niveaux de bruit perd sa signification, car une partie inconnue de ce bruit est lié au mouvement même et non aux procédures de recalage. Cependant, ce bruit n'est pas associé à l'amplitude d'un déplacement, mais plutôt, il est fonction de la taille du bloc, donc du nombre de pixels qu'il représente sur

une image. Il est possible de conclure des tableaux précédents que les tendances observées au premier cas se répètent ici pour les deux logiciels.

4.6 Conclusions

Dans les premières lignes de cette section sur le recalage d'image, il a été mentionné que l'objectif visé par l'évaluation des méthodes disponibles était de définir des tendances dans la façon dont la méthodologie fonctionne. Il est donc important de noter que les conclusions mentionnées ci-haut sont presque identiques à celles mentionnées pour la première étude de cas. Basé sur ces deux études, il est donc possible d'en extraire quelques tendances générales qui pourront être vérifiées avec d'autres cas plus complexes. Ces tendances se résument à :

Avec Registar(Geo),

1. Le choix du ré-échantillonnage est plus déterminant au niveau du bruit généré que le type de recalage utilisé.
2. Avec la précision de repositionnement possible, les recalages quadratiques et cubiques sont mieux adaptés que le recalage linéaire.
3. Le ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin introduit plus de bruit extrinsèque que les deux autres méthodes, quadratique et cubique.

Avec Geomatica,

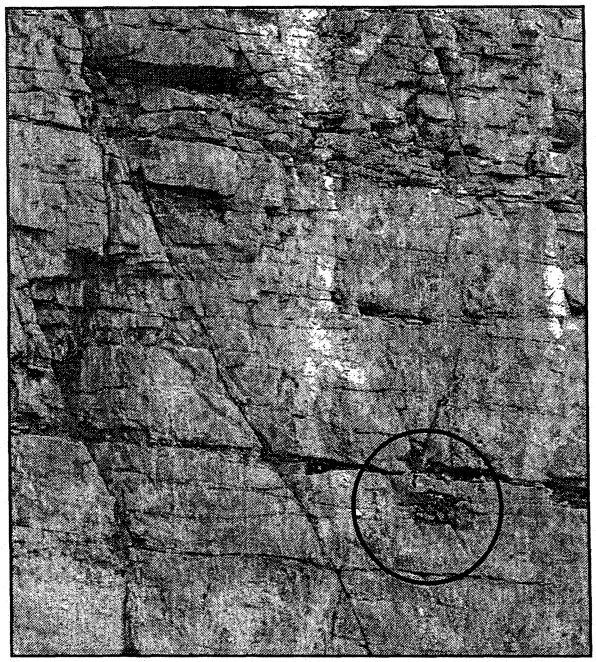
1. Le recalage de premier ordre semble plus adapté au problème posé alors que le recalage du troisième ordre est complètement inacceptable.
2. L'utilisation d'un ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin introduit plus de bruit que les deux autres méthodes en plus de provoquer des effets de linéations, qui ressortent avec l'application de l'algorithme détecteur de bordures.

Les tendances générales décrites ci-haut, illustrent bien la performance des logiciels d'un point de vue individuel. Cependant, lorsque ceux-ci sont comparés, le logiciel Registar(Geo) démontre de meilleures performances dans ce contexte. Le logiciel est beaucoup plus rapide, effectuant une saisie automatique des points de contrôle, permettant une plus grande précision et donc, moins de bruit sur les images finales. Par contre, les essais effectués laissent de côté un aspect important à considérer, le temps.

Lorsque les images ne sont pas prises de façon successive, comme dans les essais présentés, la possibilité d'augmenter les variations de luminosité et de réflectivité augmente. Dans le cas des variations d'intérêt, définies comme étant des changements du contenu de la scène et associées jusqu'ici à un mouvement de bloc, elles peuvent également être liées à un changement de végétation ou tout autre changement qui s'opère au cours du temps, qui peuvent poser des problèmes lors d'une saisie automatique des points de contrôle. Pour cette raison, malgré l'efficacité apparente du logiciel Registar(Geo), celui-ci doit toujours prouver qu'il peut fonctionner dans des essais réels où l'intervalle de temps entre l'image initiale et les autres est important (mois, années).

Les images de la figure suivante démontrent la superposition de l'image obtenue par le recalage quadratique avec un ré-échantillonnage cubique, sur l'image initiale.

a)



b)

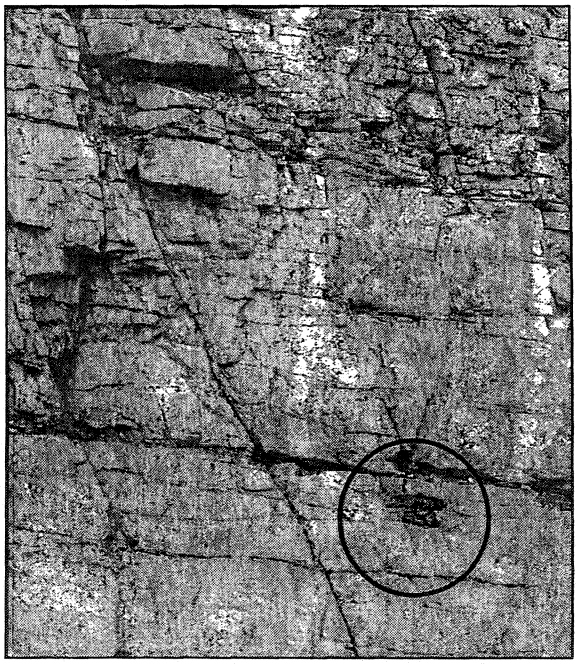


Figure 4.22. Superposition du résultat présenté a) à la figure 4.20 (e) et b) figure 4.21 (b) sur l'image initiale.

CHAPITRE 5 : ÉTABLISSEMENT DU SEUIL DE DÉTECTION DE MOUVEMENT

5.1 Introduction

Au chapitre 4, la méthodologie adoptée dans le cadre de ce projet a été présentée de façon à clairement identifier et expliquer les différentes étapes qui la composent. Beaucoup d'emphase a été mise sur l'importance de la précision et de la minutie lors de l'acquisition des images. Les cas présentés à la section 4.3 pour évaluer la méthodologie ainsi que les logiciels, étaient réalisés avec beaucoup de soin afin d'obtenir des conditions d'utilisation optimales. Malheureusement, les conditions en présence pour réaliser ces essais ne reflètent pas toujours les conditions réelles. Sur le terrain, plusieurs sources de problèmes peuvent influencer le fonctionnement de la méthodologie. Ils peuvent être de nature géométrique, externes et/ou d'acquisition.

Dans le présent chapitre, le seuil de la détection de mouvement associé à la méthodologie sera cette fois-ci présenté de façon à déterminer ses conditions limites de bon fonctionnement. Pour ce faire, les problèmes de nature géométrique tels l'influence du repositionnement de l'appareil et la direction du mouvement par rapport au plan de l'image seront examinés. Ensuite, les paramètres d'acquisition numérique, comme les influences de la résolution et de la compression d'image, seront abordés. Les influences externes comme les effets de la luminosité variable et leurs impacts sur le recalage seront étudiés à leur tour.

Toutefois, avant de poursuivre avec les sujets mentionnés, il serait important d'abord de comprendre les mécanismes de quantification du mouvement, l'amplitude de mouvement mesurée versus l'amplitude réelle.

5.2 Paramètres de détection du mouvement de blocs

Un des objectifs mentionnés dans le chapitre d'introduction de ce mémoire était de développer une méthodologie qui est en mesure de fournir de l'information quantifiable. Or, jusqu'à présent le développement de la méthodologie de détection de mouvement de blocs a été vu de façon à comparer le mouvement observé au niveau de bruit sur l'image finale, que l'on peut associer à la détermination du rapport signal/bruit. Dans le contexte de ce projet, la prise efficace de mesures quantifiables demeure un objectif secondaire mais intéressant.

En introduction du chapitre 3, la nature discrète d'une image numérique a été expliquée brièvement. C'est justement cette caractéristique qui limite la possibilité de quantifier un mouvement, car celui-ci est limité par la taille même d'un pixel. Étant donné qu'un pixel est le plus petit élément indivisible d'une image numérique, toute information inférieure en dimension à un pixel est perdue. Donc avant de procéder avec ce qui est quantifiable par la méthodologie, il serait intéressant de démontrer ce qui est quantifiable théoriquement.

5.2.1 Seuil de détection du mouvement

Pour être en mesure de déterminer ce qui est quantifiable théoriquement, ou plutôt la valeur dimensionnelle d'un pixel de l'image, il s'agit d'utiliser l'équation définissant la dimension réelle d'un pixel sur une image :

$$D_r = \frac{d_o}{d_f} np \tag{5.1}$$

où n et p représentent le nombre et la taille des pixels, d_o la distance de l'objet à l'appareil et d_f la distance focale utilisée. La taille d'un pixel varie d'un appareil à

l'autre, elle est respectivement de 8.0 et 9.2 µm pour les appareils Kodak DCS Pro 14n et Kodak DCS 330. La plus petite mesure détectable est donc d'un pixel qui correspond aux valeurs indiquées à la figure suivante.

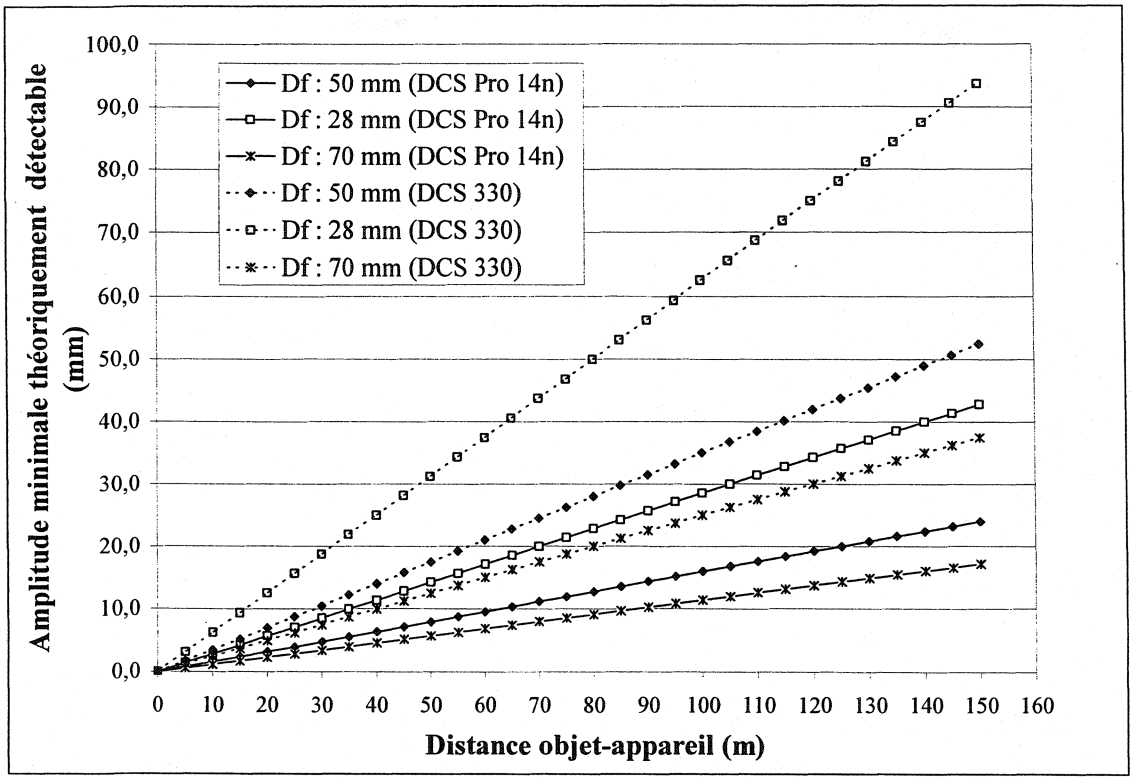


Figure 5.1. Amplitude minimale théoriquement détectable de mouvement sur une paroi en fonction de la distance de l'objet de l'appareil et de l'objectif utilisé pour les appareils Kodak DCS 330 et Pro 14n (avec une résolution de 13.5 M Pixels).

Pour une distance d'objet-appareil de 10 mètres avec une distance focale de 50 mm, on obtient une valeur de 1.6 mm comme étant la distance représentée par un pixel de l'image prise avec le Kodak DCS Pro 14n. Donc d'un point de vue théorique, à une distance de 10 mètres, la méthodologie devrait être en mesure de détecter un déplacement de bloc de plus de 1.6 mm. Il est a noter qu'une correction supplémentaires doit être apportée aux images prises avec le Kodak DCS 330 en raison

de la taille du capteur CCD inférieure à une taille standard de 35 mm. Ceci revient à diviser la distance focale par 1.9.

5.2.2 Quantification du mouvement

Sachant qu'il existe des contraintes pour la quantification du mouvement associées à la nature discrète d'une image, il faut maintenant déterminer les contraintes associées à la méthodologie même, c'est-à-dire, déterminer les effets du détecteur de bordures sur le mouvement d'un objet ainsi que les paramètres géométriques associés à la prise d'image. Il est important de réaliser que les mouvements observés sur une image correspondent à la projection de la composante dans le plan (de l'image) du mouvement total sur la paroi. Sans information sur la direction du mouvement et sur la position de l'appareil par rapport à celui-ci, le mouvement observé demeurera toujours la projection de la composante dans le plan et non le mouvement total. Mais avant de traiter ce dernier point, il serait utile, avec un exemple simple, d'examiner la façon dont le mouvement est repéré par l'algorithme de détection des bordures.

La figure suivante reprend les essais en laboratoire effectués avec un petit cône rouge (figure 3.3). Ayant pour but de vérifier le bon fonctionnement du détecteur de bordures, un déplacement de 18 mm est effectué parallèlement au plan de l'image. L'appareil est situé à une distance de 3.52 mètres de l'objet, avec une distance focale de 70 mm. Dans ce cas-ci, une simple différence d'image est effectuée pour observer le mouvement. Les images sont prises avec le Kodak DCS Pro 14n.

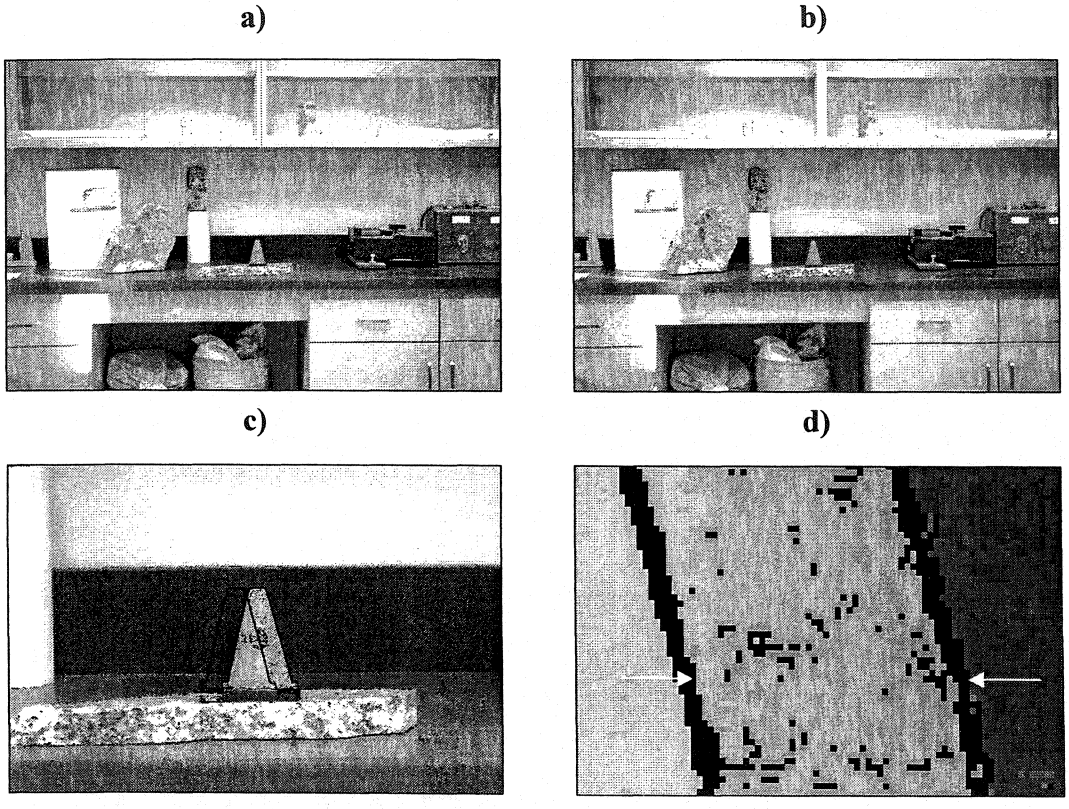


Figure 5.2. a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale et d) grossissement de la zone d'intérêt sur le cône.

La distance mesurée entre les deux flèches (figures 5.2 d) est de 46 pixels, la distance calculée du déplacement du cône est de :

$$(3.52 / 70 \text{ E-}03) * 46 * 8 \text{ E-}06 = 0.0185 \text{ m} \qquad (5.2)$$

où 18.5 mm. Le déplacement réel était de 18 mm, mesuré avec une règle précise au mm. Donc le déplacement réel est de 18 +/- 1 mm. À une distance de 3.52 mètres de l'objet, avec une distance focale de 70 mm, un pixel représente 0.40 mm, ce qui représente la précision sur la mesure. Donc la distance mesurée devient 18.5 +/- 0.4

mm. Il est important de noter qu'aucun recalage n'a été effectué de manière à observer uniquement l'opération de l'algorithme détecteur de bordures.
Cet essai a été effectué dans les meilleures conditions possibles, avec un cône permettant une parfaite détection de bordures. Il serait maintenant utile d'appliquer ceci à un cas plus réel de paroi rocheuse. Le site utilisé pour ceci, et qui revient ailleurs dans le document, est la falaise de roc située à l'arrière de l'École Polytechnique, sur le campus de l'Université de Montréal. L'intérêt du site réside dans le fait qu'un bloc est naturellement posé sur le dessus de la paroi et facilement déplaçable. Une règle précise au millimètre a d'ailleurs été colée à la paroi sous le bloc en question pour permettre la mesure des déplacements. L'inconvénient du site est la clôture métallique de protection installée à un mètre et demi à l'avant de la paroi. Celle-ci complique un peu le processus de recalage des images en raison des effets de variation de parallaxe et d'occultation qui peuvent être engendrés avec un léger mouvement d'appareil (mouvement du grillage par rapport à la paroi).

Les images ont été prises avec l'appareil Kodak DCS Pro 14n, avec une résolution de 13.5 M pixels. L'appareil est situé à 10.1 mètres de la paroi et la distance focale utilisée est de 50 mm. Pour simplifier l'essai, le bloc est déplacé successivement de 1, 3 et 5 mm, parallèlement au plan de l'image. À cette distance de la paroi, la valeur de un pixel de l'image est de 1.62 mm. Cette valeur représente donc la précision sur la mesure. Le site est présenté à la figure suivante. Le bloc en question est encerclé.



Figure 5.3. Image initiale prise dans le stationnement de l'École Polytechnique.

Pour effectuer l'essai, les deux logiciels ont été utilisés. Les images ont d'abord été prises sans mouvement d'appareil, puis avec un mouvement, de façon à introduire les différences associées à un repositionnement et un recalage d'images. Le bloc a été agrandi à la figure suivante de façon à mettre en évidence le mouvement. L'essai est d'abord présenté en trois sections distinctes représentant un déplacement de 1, 3 et 5 mm. Dans chacune des sections, il y a comparaison des images obtenues avec et sans repositionnement d'appareil, traitées avec Registar(Geo) et Geomatica. Encore une fois, l'application d'un filtre numérique a été omise pour observer uniquement le bruit associé au déplacement et au recalage.

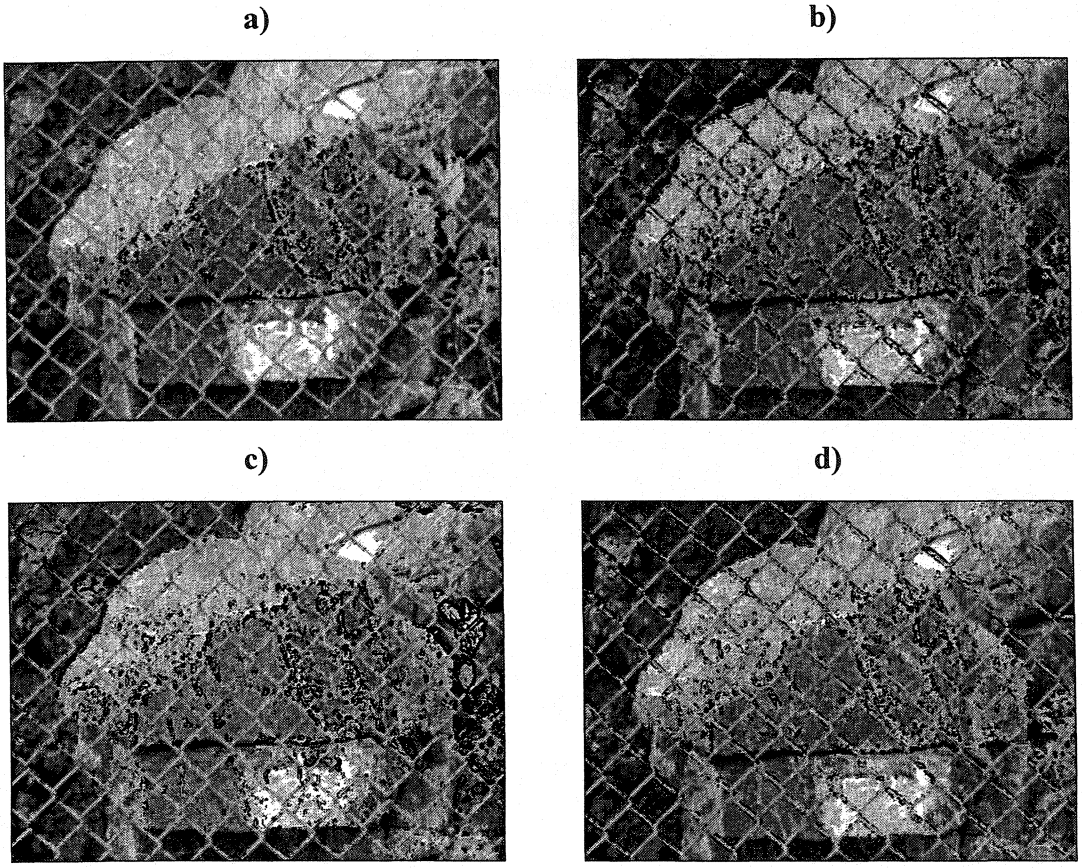


Figure 5.4. Image finale obtenue suite au mouvement de 1 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica.

Les résultats de la figure 5.4 sont semblables entre les deux logiciels à l'exception de l'image c), qui propose une meilleure définition du mouvement sur le bloc (sans repositionnement d'appareil) par Geomatica que Registar(Geo). Il sera plus facile de dégager une tendance quelconque en analysant l'ensemble des images, c'est-à-dire les mouvements de 3 et 5 mm. La figure suivante reprend les images obtenues suite au mouvement de 3 mm.

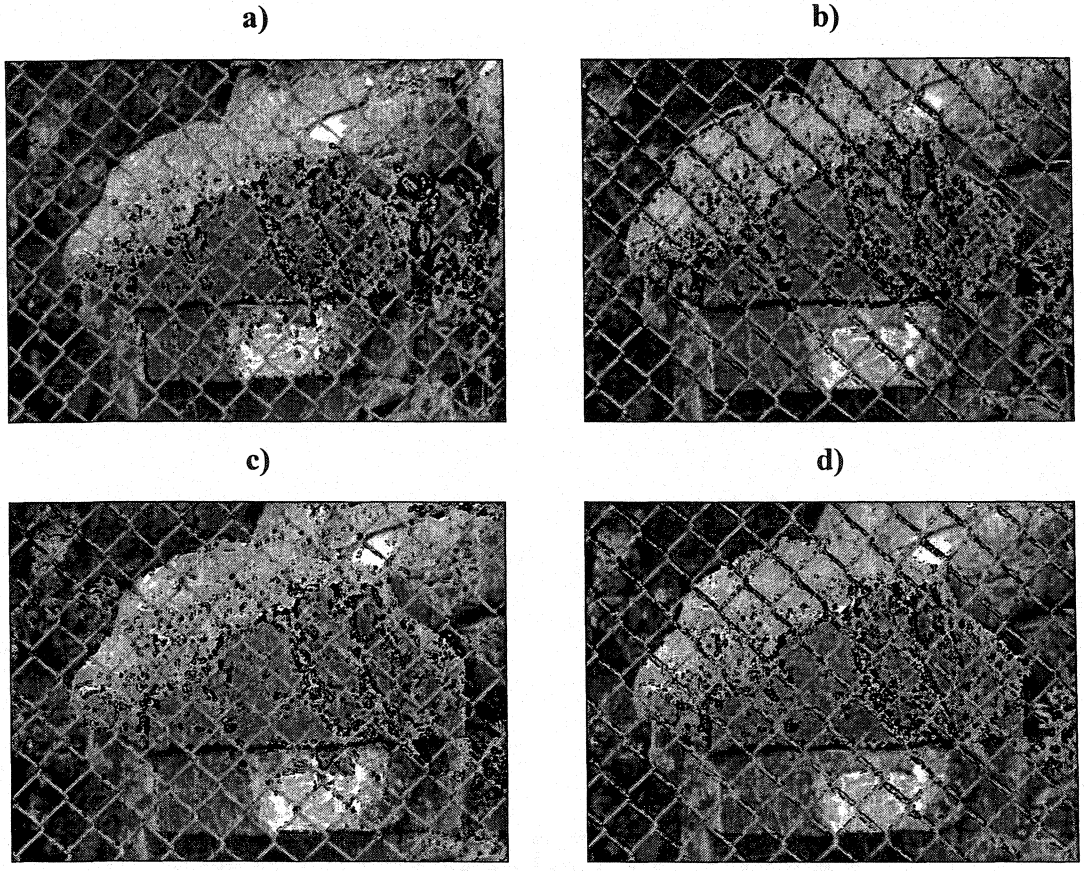


Figure 5.5. Image finale obtenue suite au mouvement de 3 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica.

La tendance est la même qu'après le mouvement de 1 mm. Les résultats sont semblables à l'exception de l'image c) qui présente une meilleure définition du bruit sur le bloc que l'image a) traitée avec Registar(Geo).

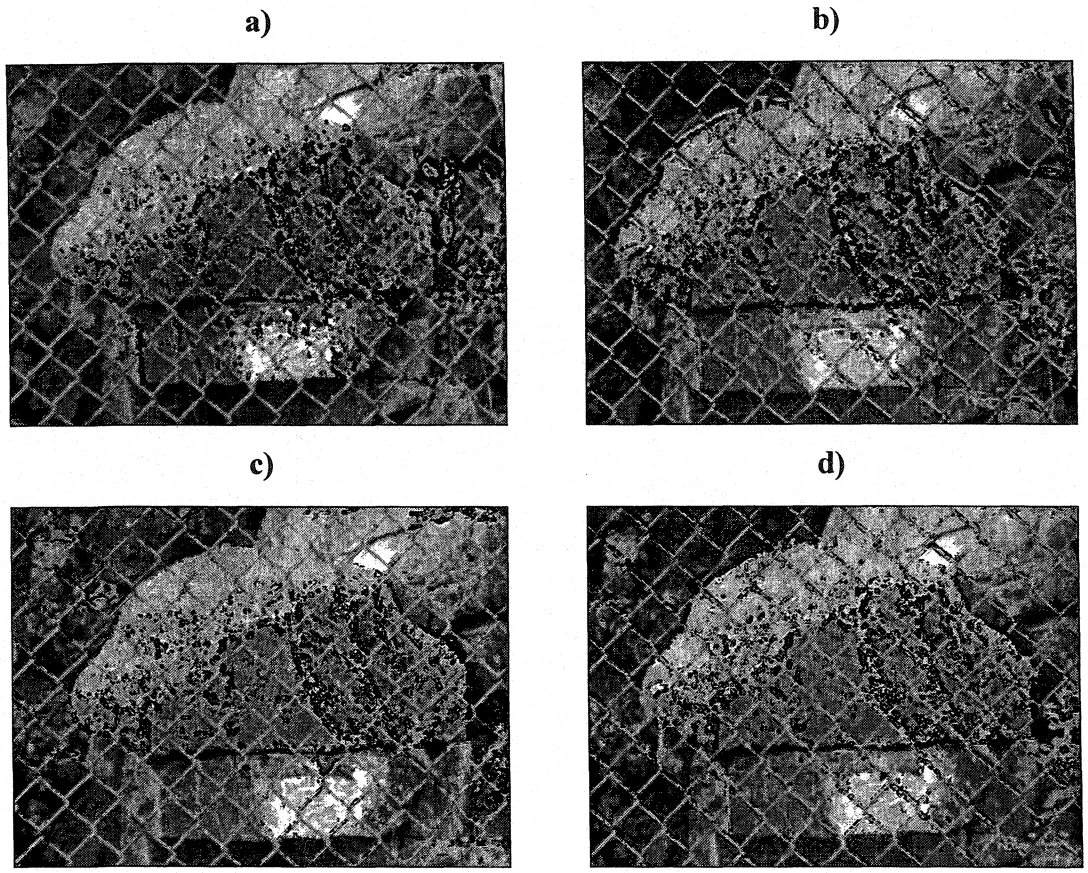


Figure 5.6. Image finale obtenue suite au mouvement de 5 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica.

Finalement, la tendance se maintient pour le déplacement de 5 mm. Donc, pour des images prises avec un déplacement d'appareil, la définition du mouvement est visuellement la même, qu'elle soit obtenue suite à un traitement par Registar(Geo) ou Geomatica. Dans le cas des images prises sans repositionnement d'appareil, les images obtenues par Geomatica offrent systématiquement plus de bruit sur le bloc déplacé.

À plus grande échelle, il est possible de distinguer l'apparence générale du mouvement, l'augmentation graduelle de la définition du mouvement sur le bloc avec l'augmentation de l'amplitude donnée. Cependant, il reste difficile de bien percevoir

les subtiles différences relatives au pixel même. Pour ceci, une zone particulière a été ciblée et agrandie de façon à mieux comparer l'amplitude du mouvement pour les trois cas (1, 3 et 5 mm). Cette zone est encerclée à la figure suivante.



Figure 5.7. Zone ciblée, le long de l'arrête du bloc, pour des fins de comparaison entre les trois cas.

La figure suivante reprend la zone ciblée ci-haut, agrandie de façon à quantifier le mouvement et déterminer l'incertitude sur celui-ci.

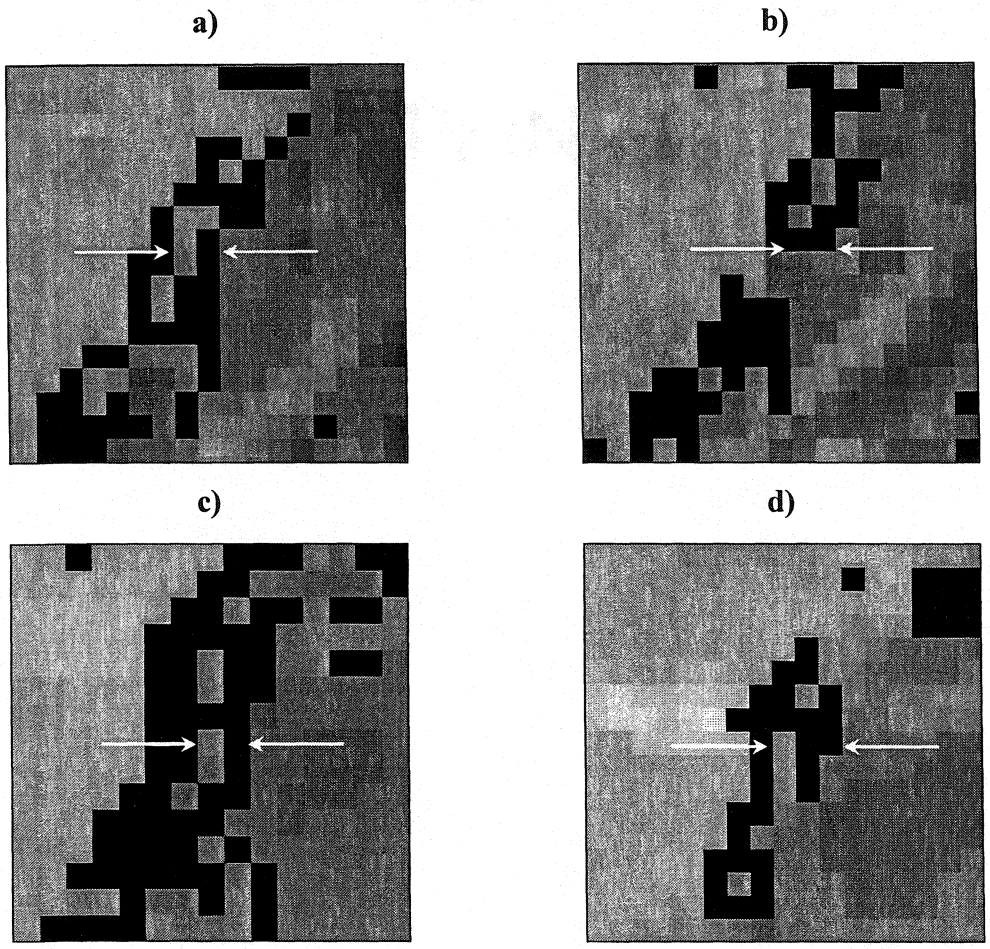


Figure 5.8. Amplitude mesurée suite au mouvement de 1 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica.

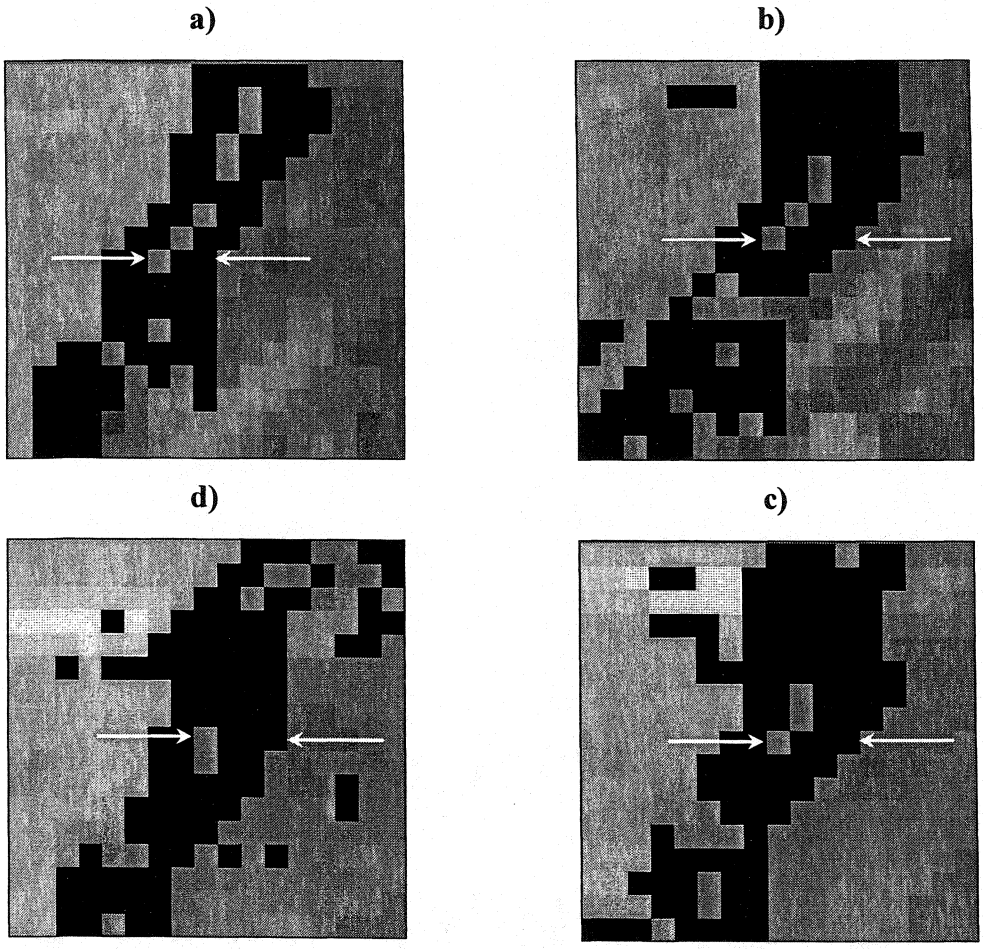


Figure 5.9. Amplitude mesurée suite au mouvement de 3 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica.

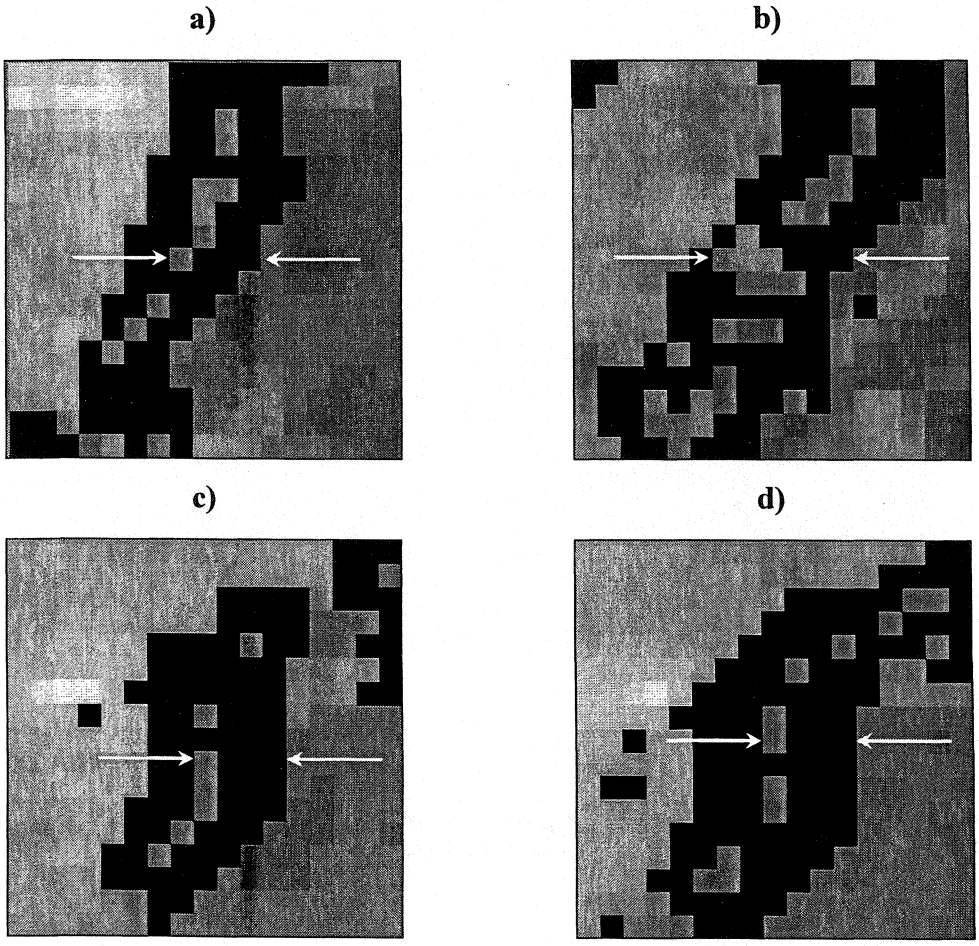


Figure 5.10. Amplitude mesurée suite au mouvement de 5 mm a) sans repositionnement avec Registar(Geo), b) avec repositionnement avec Registar(Geo), c) sans repositionnement avec Geomatica et d) avec repositionnement avec Geomatica.

Visuellement, l'augmentation du bruit associé à l'augmentation de l'amplitude du mouvement est appréciable. Il s'agit toutefois de déterminer si cette augmentation visuelle se traduit par une augmentation réelle et exacte du bruit en termes de pixels. Pour ce faire, une rangée de pixels représentative a été sélectionnée. Elle correspond approximativement à l'écart moyen entre les deux définitions de bordures. Le tableau suivant résume les amplitudes mesurées à la figure précédente.

Tableau 5.1. Amplitude mesurée pour les déplacements de blocs de 1, 3 et 5 mm.

Figure	Pixels mesurés	Amplitude (mm)
5.8 a)	2	3.2
5.8 b)	2	3.2
5.8 c)	2	3.2
5.8 d)	3	4.8
5.9 a)	3	4.8
5.9 b)	4	6.5
5.9 c)	4	6.5
5.9 d)	4	6.5
5.10 a)	4	6.5
5.10 b)	6	9.7
5.10 c)	4	6.5
5.10 d)	4	6.5

Les résultats présentés au tableau précédent sont nettement plus difficiles à interpréter que ceux obtenus avec le cône en laboratoire. Tout d'abord, la précision sur la mesure exacte est supérieure à celle obtenue en laboratoire en raison de la difficulté de contrôler le déplacement du bloc. Celui-ci ne se glisse pas sur une surface plane, sans défaut, mais plutôt rugueusement par coups. Ensuite, il y a les problèmes associés à la détection de bordures sur une surface irrégulière comme un bloc (sur fond similaire) versus la surface bien définie du cône (sur fond distinct), qui entraîne également une imprécision associée au choix de la rangée à utiliser pour représenter le nombre de pixels associé à un déplacement.

De meilleurs résultats auraient probablement pu être obtenus si une zone différente avait été utilisée pour chaque déplacement. Dans l'exemple présenté, la même zone a été utilisée pour faciliter la comparaison. Toutefois, cet emplacement n'est peut être pas l'endroit optimal pour déterminer le mouvement, en plus des autres contraintes mentionnées ci-haut. Les endroits propices pour l'évaluation du déplacement sont évidemment ceux qui sont soulignés par le détecteur de bordures, comme les arrêtes,

mais de plus, ceux qui présentent des contrastes facilement repérables d'une image à l'autre, par exemple une veine de quartz. Donc, sachant avec certitude, grâce à la méthodologie, qu'un mouvement a eu lieu, il serait possible de repérer un endroit à fort contraste et simplement faire une comparaison visuelle des deux images, tel que démontrée à l'image suivante pour le cas d'un déplacement de 5 mm sans repositionnement d'appareil.

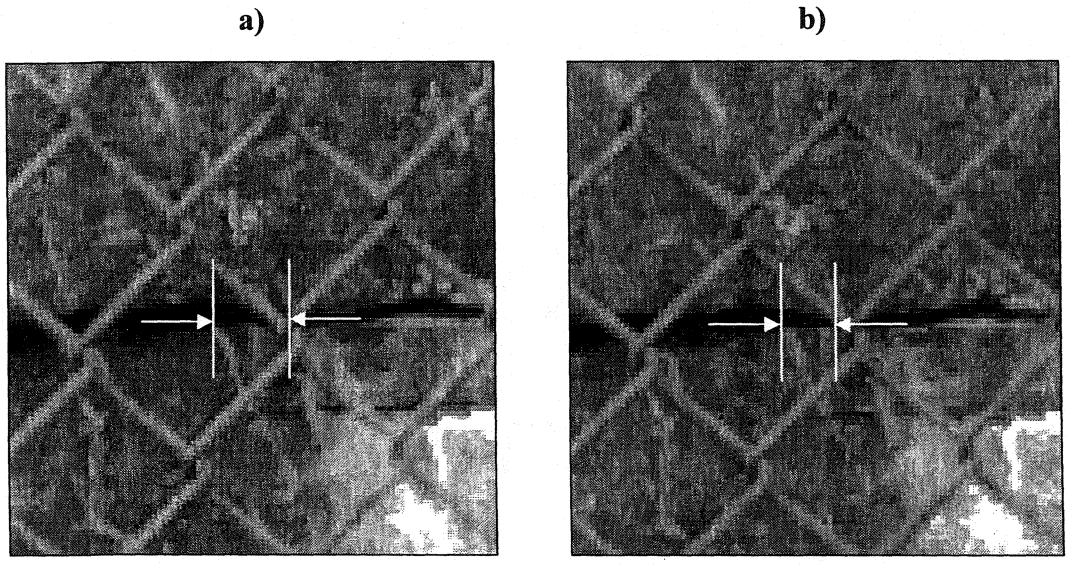


Figure 5.11. a) position initiale, b) position suite à un déplacement de 5 mm, sans repositionnement d'appareil.

La différence d'espacement entre les deux veines correspond à 4 pixels d'écart, donc 6.5 mm de déplacement, ce qui confirme la mesure prise à la figure 5.10 a), soit un déplacement de 5 mm sans repositionnement d'appareil. D'ailleurs cette mesure se répète exactement pour le cas avec un repositionnement d'appareil, tel que démontré à la figure suivante.

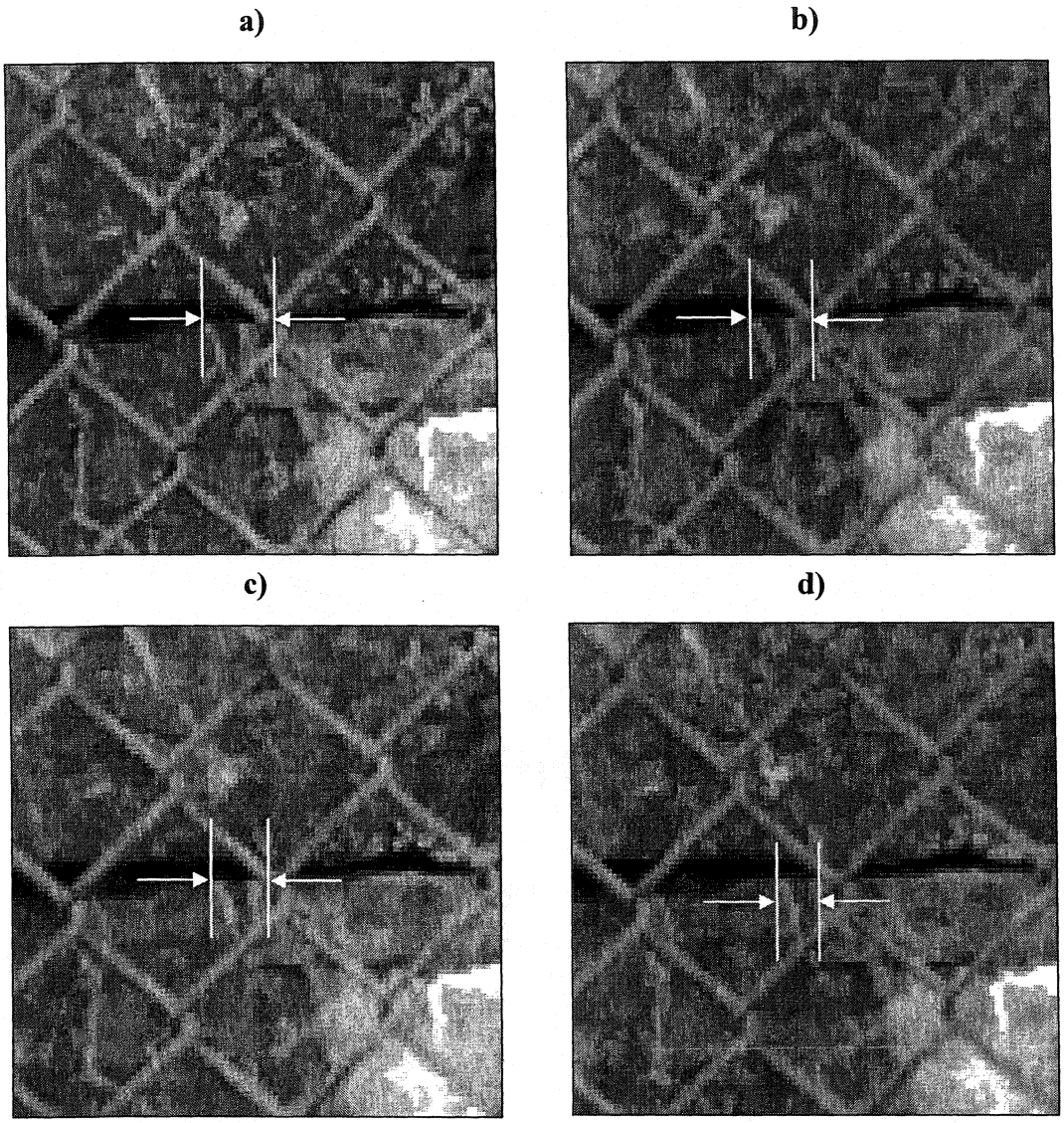


Figure 5.12. a) position initiale, b) position suite à un déplacement de 1 mm, avec repositionnement, c) déplacement de 3 mm et d) déplacement de 5 mm.

Le tableau suivant résume les déplacements mesurés à la figure précédente.

Tableau 5.2. Amplitude mesurée directement sur les images, pour les déplacements de blocs de 1, 3 et 5 mm avec repositionnement d'appareil.

Amplitude réelle (mm)	Pixels mesurés	Amplitude mesurée (mm)
1	1	1.6
3	2	3.2
5	4	6.5

Les résultats obtenus par mesure directe sont nettement plus proches des déplacements réels que ceux obtenus par mesure avec le détecteur de bordures. Donc, une façon d'évaluer le déplacement serait de localiser les zones en mouvement avec la méthodologie et puis d'effectuer la mesure par comparaison directe. Notons toutefois que l'objectif initial du projet est de détecter un mouvement. La quantification de ce mouvement demeure intéressante mais secondaire.

Il ne faut pas perdre de vue que la mesure prise sur les images correspond à la projection dans le plan de l'image du déplacement réel. Jusqu'à présent, les exemples étaient choisis de façon à ce que la direction du mouvement soit toujours dans le plan de l'image, et donc que la projection du déplacement soit égale au déplacement réel. En réalité, si la caméra est placée de manière à ce que le plan de l'image soit parallèle à la paroi, les déplacements de blocs se feront en fonction du pendage des plans sur lesquels le glissement se produit, ou suivant la direction de la droite d'intersection des plans impliqués dans le glissement s'il s'agit d'instabilités de tétraèdres. L'orientation de l'appareil par rapport à la paroi est donc un aspect important de la méthodologie, de même que la qualité du repositionnement. Dans les exemples précédents, ce repositionnement était optimal mais pas toujours représentatif de ce qui peut être réalisé sur le terrain. Ces deux contraintes géométriques peuvent modifier les résultats et donc méritent d'être traités à la section suivante.

5.3 Paramètres géométriques d'acquisition

La relation géométrique qui existe entre la direction du déplacement de bloc, la position initiale de l'appareil ainsi que son repositionnement, influence énormément la qualité des résultats possibles. Au chapitre 4, il a été démontré que la méthodologie était viable dans le cas d'essais effectués dans les meilleures conditions possible. Dans ces cas, les contraintes géométriques qui peuvent nuire dans une situation réelle ont été réduites au minimum pour des fins d'évaluation.

Ces contraintes géométriques peuvent être groupées en deux classes, soit celles associées au repositionnement de l'appareil et celles associées à la direction de mouvement des blocs sur la paroi. Cette section permet donc d'évaluer l'influence qu'auront ces deux types de contraintes géométriques sur les résultats finals et donc sur la capacité de détecter un mouvement de bloc ainsi que l'incertitude associé à sa mesure.

Pour étudier l'influence du repositionnement de l'appareil, la galerie souterraine menant au pavillon André-Eisenstadt sur le campus de l'Université de Montréal a été retenue. C'est ce même site qui a servi pour l'évaluation de la méthodologie au chapitre 4. Dans le cas de l'influence de la direction de mouvement, le site à l'arrière de l'École Polytechnique a été utilisé, tel qu'à la section 5.1.

5.3.1 Influence de la direction de mouvement

La direction de déplacement d'un bloc sur une paroi par rapport à la position et l'angle de vue de l'appareil a beaucoup d'influence, non seulement sur la capacité de bien quantifier l'amplitude du mouvement, mais également sur la capacité de détection du mouvement. Intuitivement, si un bloc se détache d'une paroi dans une direction normale à celle-ci et que l'appareil est placé de façon à ce que le plan de l'image soit

parallèle au plan de la paroi, ce déplacement sera beaucoup plus visible si l'axe de l'appareil n'est pas parallèle à l'axe de direction du mouvement. Évidemment, l'ampleur de l'effet est également reliée à la structure de la roche, son relief, sa forme etc. Quand à la quantification du mouvement, tel que mentionné précédemment, celle-ci n'est précise qu'en connaissance de la direction du mouvement par rapport à la direction de l'axe optique de l'appareil.

Avant d'étudier le problème dans un cas simulé sur paroi rocheuse, un essai simple de laboratoire reprenant le petit cône est présenté pour schématiser le problème. À la figure 5.2, la mesure du déplacement du cône était de 18.5 mm alors que le déplacement réel avait été de 18 mm, mesuré avec une règle précise au mm près. La figure suivante présente la configuration géométrique du problème.

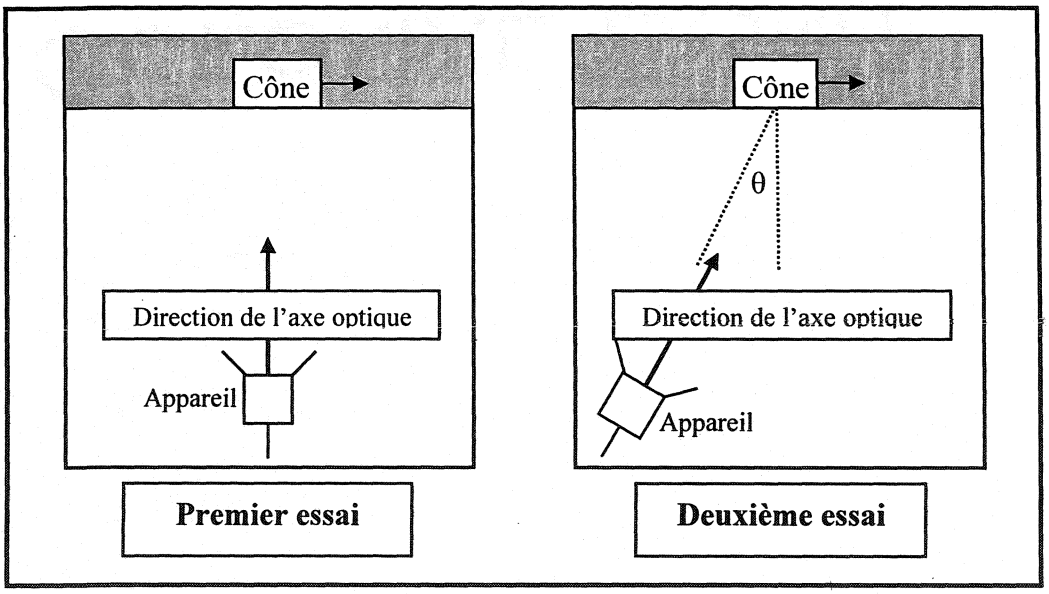


Figure 5.13. Configuration géométrique de l'essai pour mesurer l'influence, sur la quantification du déplacement, de la direction par rapport au positionnement de l'appareil.

La figure suivante présente l'essai et les résultats obtenus.

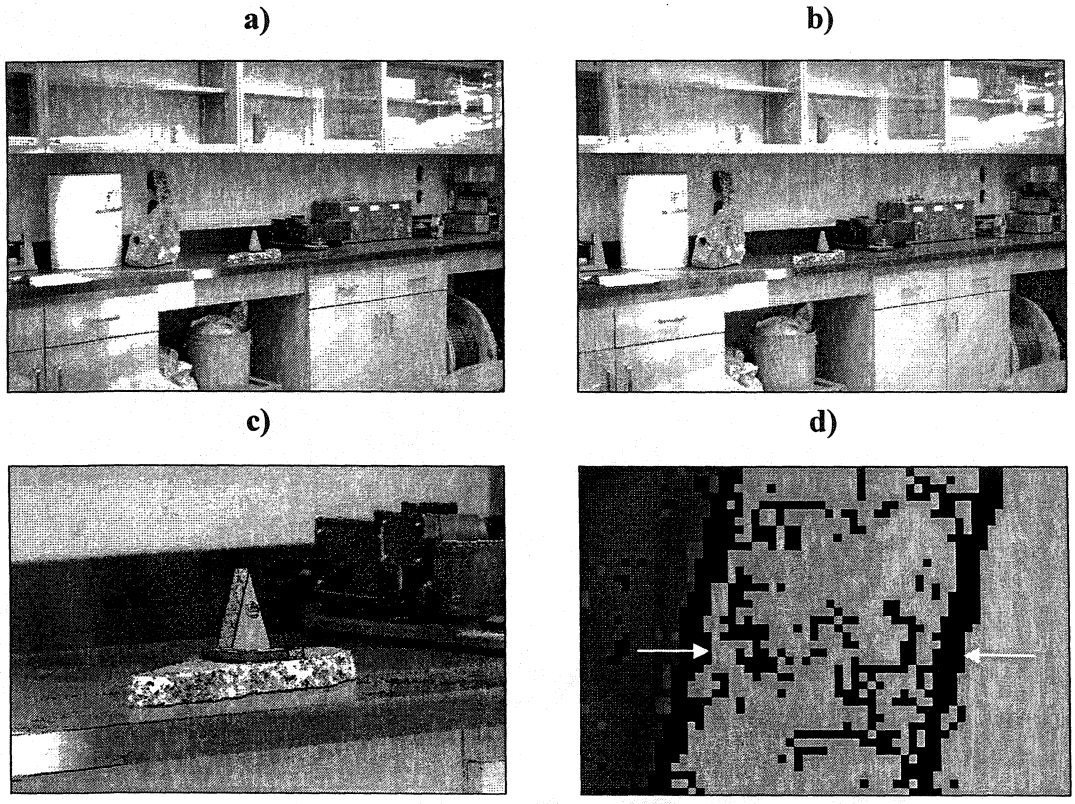


Figure 5.14. a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale et d) grossissement de la zone d'intérêt sur le cône.

La distance mesurée est de 31 pixels, la distance calculée du déplacement du cône est de :

$$(4.10 / 70\ \text{E-}03) * 31 * 8\ \text{E-}06 = 0.0145\ \text{m} \qquad (5.3)$$

ou 14.5 mm. Le déplacement réel était de 18 mm. Ceci illustre donc le problème de la projection du déplacement réel dans le plan de l'image. Toutefois, dans ce cas-ci l'angle entre la perpendiculaire au déplacement et la prise est de 37°. Donc, le déplacement réel mesuré est de 14.5/cos(37), soit 18.2 mm. Cette mesure correspond au déplacement réel de 18 mm.

Dans le cas de l'essai effectué à l'extérieur, le bloc d'intérêt encerclé à la figure 5.3 est situé directement dans l'axe optique de l'appareil. Un déplacement de 3 cm vers l'avant (suivant l'axe optique) a donc été induit. Une deuxième série d'images a été prise avec l'appareil situé à quelques mètres de sa position originale, tout en maintenant la même distance de la paroi. L'appareil est alors positionné avec l'axe optique orienté vers le bloc d'intérêt. En ce faisant, la direction du déplacement ne se trouve plus dans l'axe optique, mais plutôt à un angle quelconque. La figure suivante illustre la configuration géométrique de l'essai.

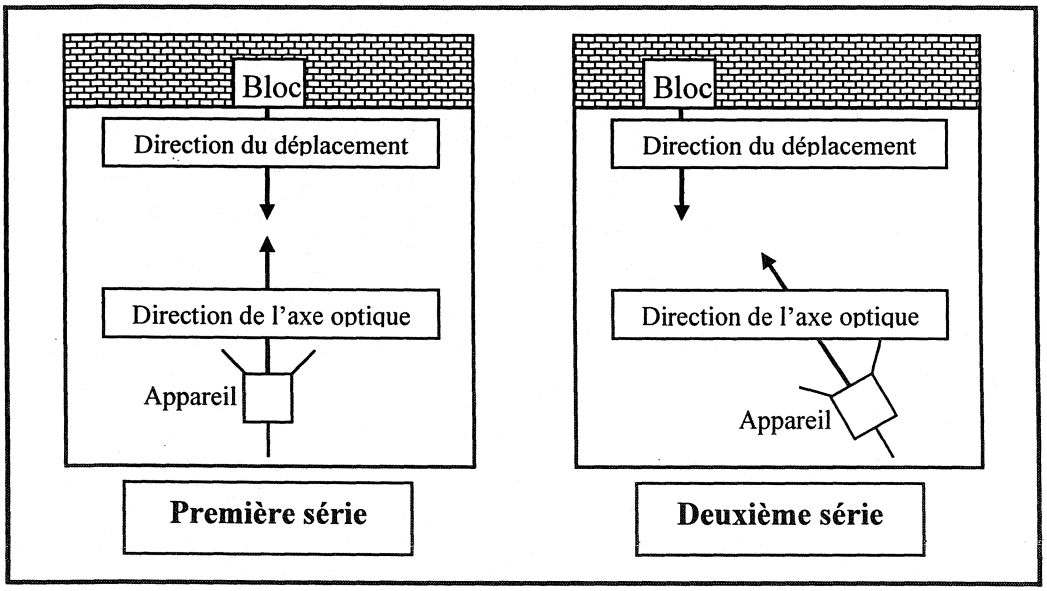


Figure 5.15. Configuration géométrique de l'essai pour mesurer l'influence de la direction de déplacement d'un bloc.

Les essais de recalage ont été effectués par la méthode quadratique avec un ré-échantillonnage bilinéaire avec le logiciel Registar(Geo). La figure suivante présente les résultats obtenus pour les deux séries d'images.

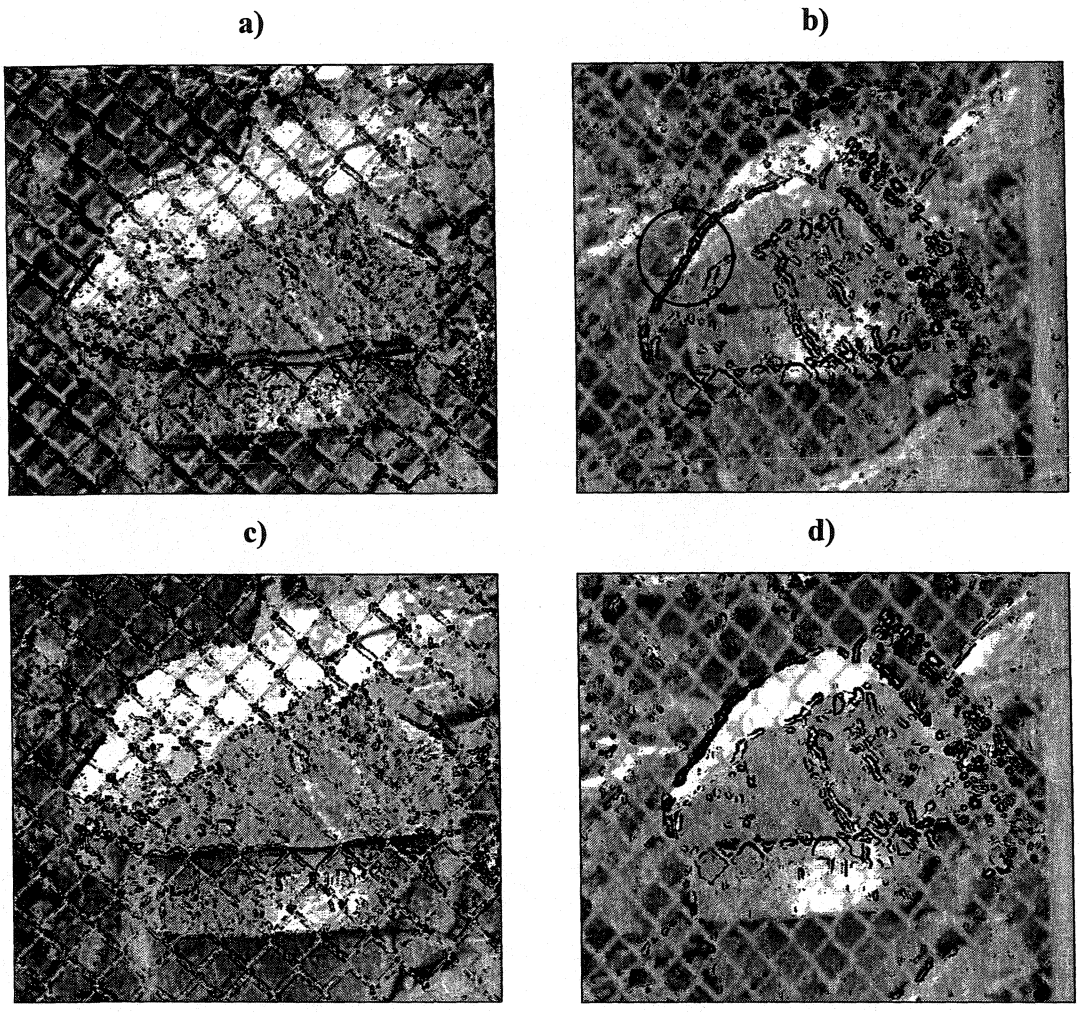


Figure 5.16. Mouvement détecté sur le bloc de a) la première série avec Registar(Geo), b) la deuxième série avec Registar(Geo), c) la première série avec Geomatica et d) la deuxième série avec Geomatica.

Les figures 5.16 a) et c) sont malheureusement peu convaincantes en raison de la quantité de bruit associée au grillage. Il ne faut cependant pas perdre de vue que le déplacement est directement dans l'axe optique de l'appareil, donc le moins évident possible. Tout au plus, cette image permet de déterminer qu'il y a eu un mouvement du bloc, sans tirer plus de conclusions. En utilisant la méthode de quantification par comparaison directe des images, il n'est toujours pas possible de quantifier le mouvement, toutefois il devient évident que celui-ci s'est effectué dans la direction de

l'axe optique. Connaissant la direction du déplacement, la deuxième image prise avec un angle de l'axe optique peut alors servir pour quantifier ce mouvement. La figure suivante représente le déplacement en nombre de pixels du bloc par comparaison directe des images.

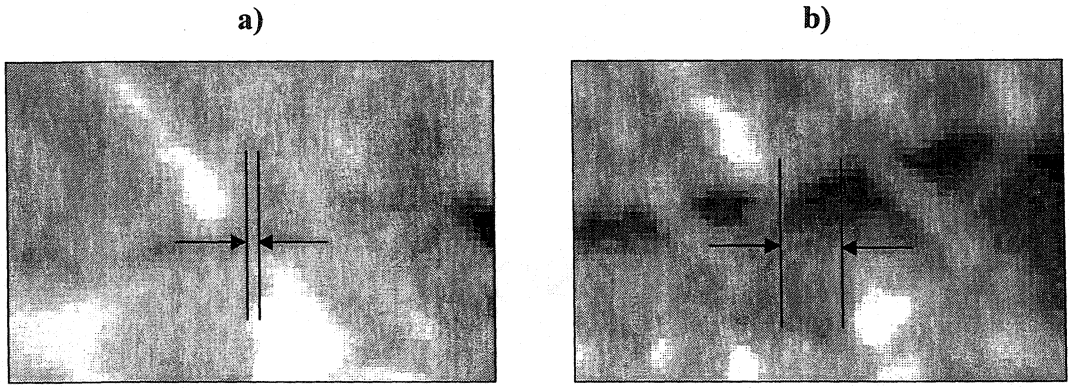


Figure 5.17. Mouvement détecté sur le bloc de a) la première série et b) la deuxième série, par méthode de comparaison directe des images.

Il y a une différence de 8 pixels entre les deux positions de blocs. Le schéma suivant résume la géométrie du problème avec les mesures exactes.

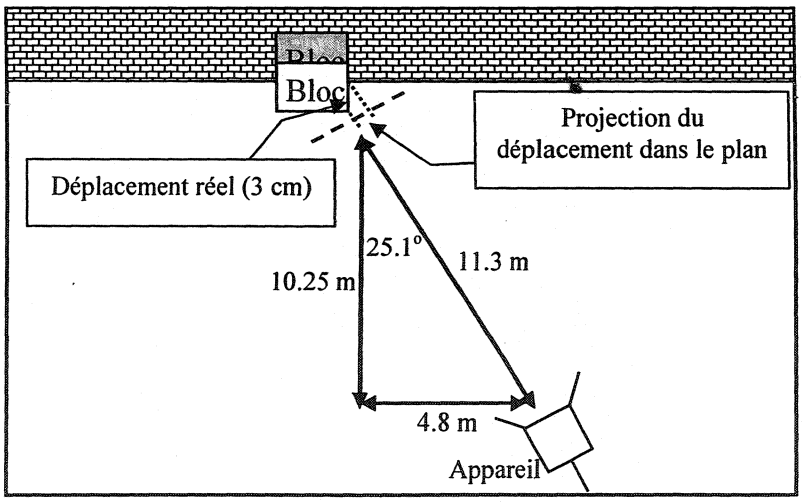


Figure 5.18. Mesures et géométrie de l'essai de la figure 5.12 b).

Les mesures présentées à la figure précédente permettent de déterminer l'amplitude du mouvement. Tout d'abord, la projection dans le plan du déplacement est de 8 pixels (figure 5.18). Ceci correspond à,

$$(11.3 / 50\ \text{E-03}) * 10 * 8\ \text{E-06} = 0.0145\ \text{m} \qquad (5.4)$$

Ensuite pour transformer la projection en déplacement réel, il suffit d'utiliser les relations trigonométriques. En ce faisant, le déplacement mesuré est de :

$$14.5 / \cos(90\text{-}25.1) = 34.2\ \text{mm} \qquad (5.5)$$

Le déplacement réel était de 3 centimètres avec une incertitude sur la mesure +/- 1 mm. L'incertitude sur la mesure obtenue est de l'ordre du pixel, soit 1.8 mm en faisant abstraction de l'incertitude associé aux prises de mesures sur le terrain.

Une façon d'éliminer une partie de l'incertitude associée à la quantification de l'amplitude d'un mouvement ayant une direction inconnue serait d'effectuer systématiquement deux séries d'images à deux positions différentes. En incluant la comparaison directe d'image, cette procédure éliminerait beaucoup de doute quand au type (ou la direction) de mouvement sur la paroi, et aiderait à la détermination plus exacte de l'amplitude. De plus, des techniques photogramétriques permettraient de quantifier le mouvement. Ceci dépasse toutefois l'objectif du présent rapport.

5.3.2 Influence de la précision de repositionnement de l'appareil

Pour évaluer l'influence de la précision de repositionnement de l'appareil, il faut d'abord comprendre les mécanismes géométriques impliqués lors de la prise d'image. Ceci rapporte le lecteur au chapitre 3, section 3.4.1. Les erreurs associées au repositionnement peuvent être soit une translation, une rotation, un changement

d'échelle, un cisaillement ou n'importe quelle combinaison entre elles. Il est donc fastidieux d'essayer de reproduire toutes les situations possibles, d'autant plus qu'il est difficile de les isoler parfaitement. Pour les étudier, elles seront donc séparées individuellement. Les effets de cisaillement et de rotation d'appareil seront évalués séparément et ce, comme d'habitude, pour les deux logiciels de recalage utilisés.

Le site utilisé pour effectuer les divers essais est celui de la galerie intérieure du pavillon André-Eisenstadt. Une différente section a toutefois été prise. Les images ont été prises avec l'appareil Kodak DCS Pro 14n à une résolution de 13.5 M Pixels. Pour les essais de rotation, le trépied est demeuré fixe alors que la base équatoriale a subi des rotations de 5, 10 et 15 degrés. Dans le cas des essais de cisaillement, le trépied de l'appareil a d'abord subi une translation de 0 à 15 cm (par incréments de 5 cm) puis l'appareil a subi une rotation sur le plan horizontal de façon à ramener les lasers sur les cibles de l'image initiale. Un des blocs sur l'image a été déplacé pour effectuer l'essai. La figure suivante présente l'image initiale avec le bloc en question encerclé.

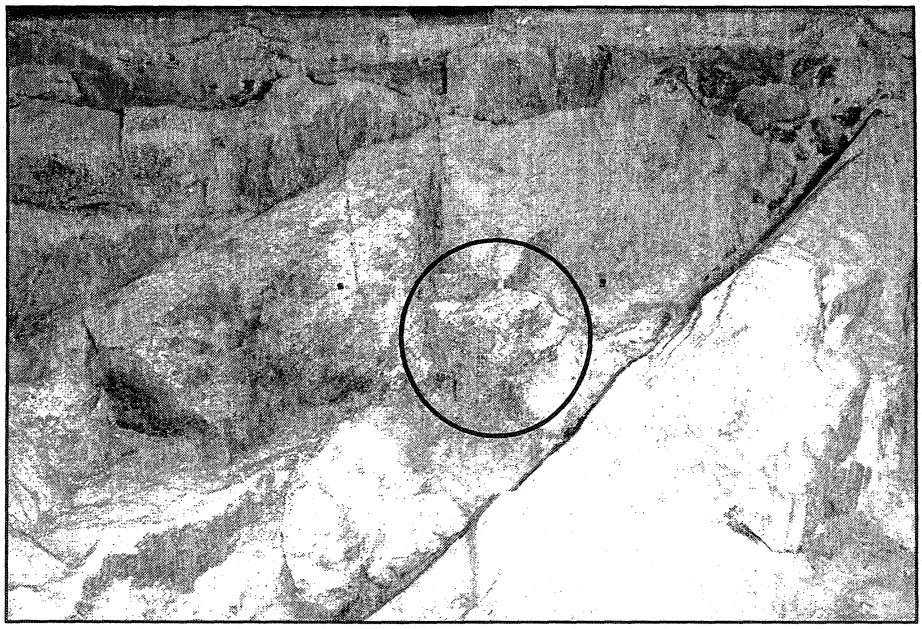


Figure 5.19. Image initiale pour les essais d'influence du repositionnement.

Le bruit associé aux différents degrés de rotation semble être plutôt aléatoire, tel que démontré à la figure suivante.

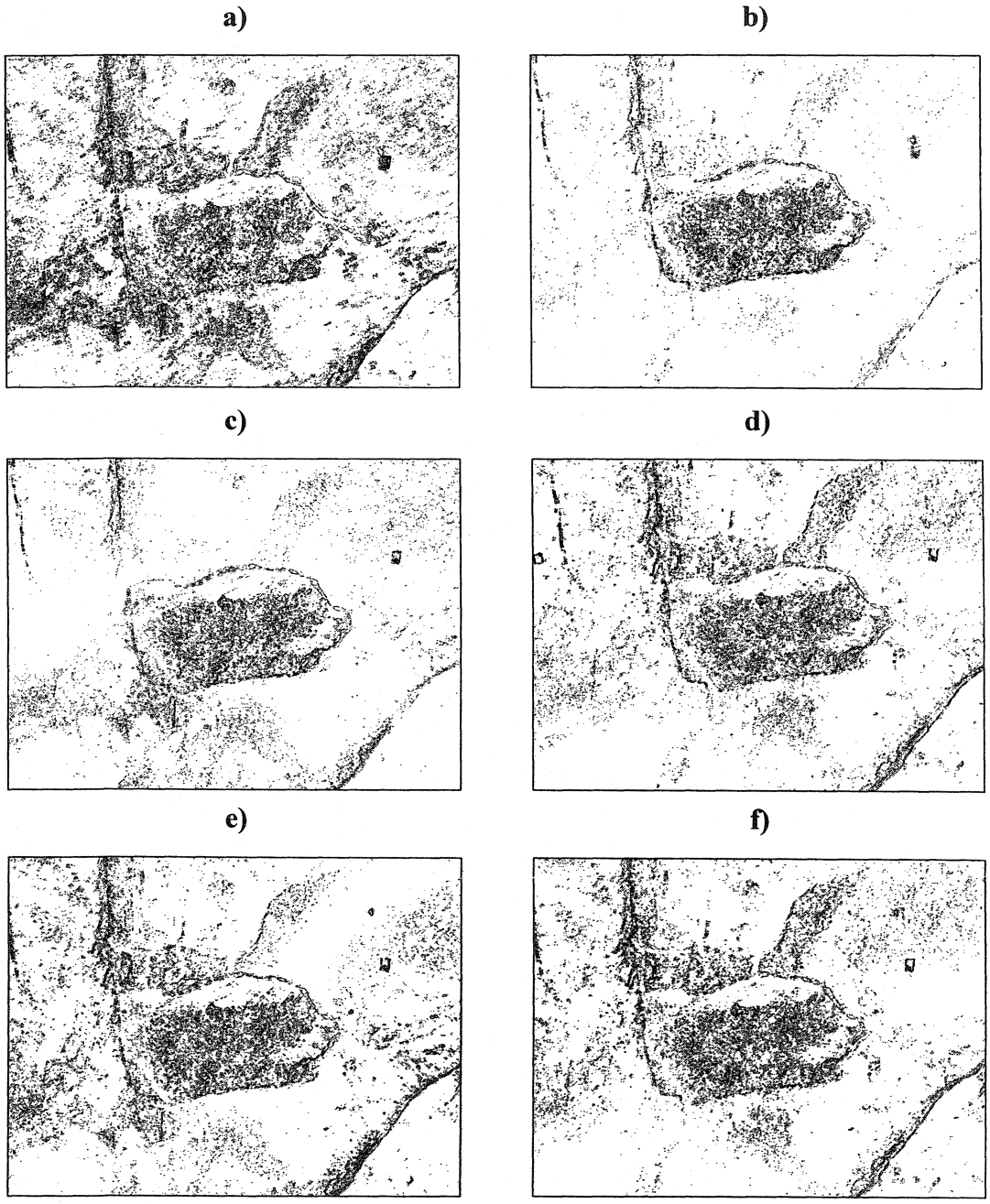


Figure 5.20. Bruit associé pour une rotation de a) 5° (Registar(Geo)), b) 5° (Geomatica), c) 10° (Registar(Geo)), d) 10° (Geomatica), e) 15° (Registar(Geo)) et f) 15° (Geomatica).

Avec le logiciel Registar(Geo), les essais ont été effectués avec un recalage quadratique et un ré-échantillonnage bilinéaire, un recalage linéaire avec un ré-échantillonnage bilinéaire dans le cas de Geomatica.

Dans le cas du logiciel Registar(Geo), les résultats obtenus ne suivent pas un ordre logique. L'image qui a subit le moins de rotation (a) présente le plus de bruit alors que le bruit augmente légèrement d'une image à l'autre, entre les rotations de 10 et 15 degrés. À 10 degrés de rotation le mouvement est bien identifiable, toutefois celui-ci est moins évident pour une rotation plus grande. Cet essai n'étant pas très concluant, avant de tirer quelques conclusions que ce soit sur l'utilisation du logiciel Registar(Geo), l'essai devrait être répété afin de voir si cette tendance se maintient.

Les résultats obtenus avec Geomatica suivent, quant à eux, une tendance logique. Le bruit associé au traitement augmente légèrement sur l'image avec l'augmentation de l'angle de rotation de l'appareil. Dans l'ensemble, Geomatica donne de meilleurs résultats pour cet essai en dépit du fait que l'erreur associée au positionnement des points de contrôle croissait avec l'augmentation de l'angle de rotation. Dans le cas du cisaillement, la figure suivante présente les résultats obtenus.

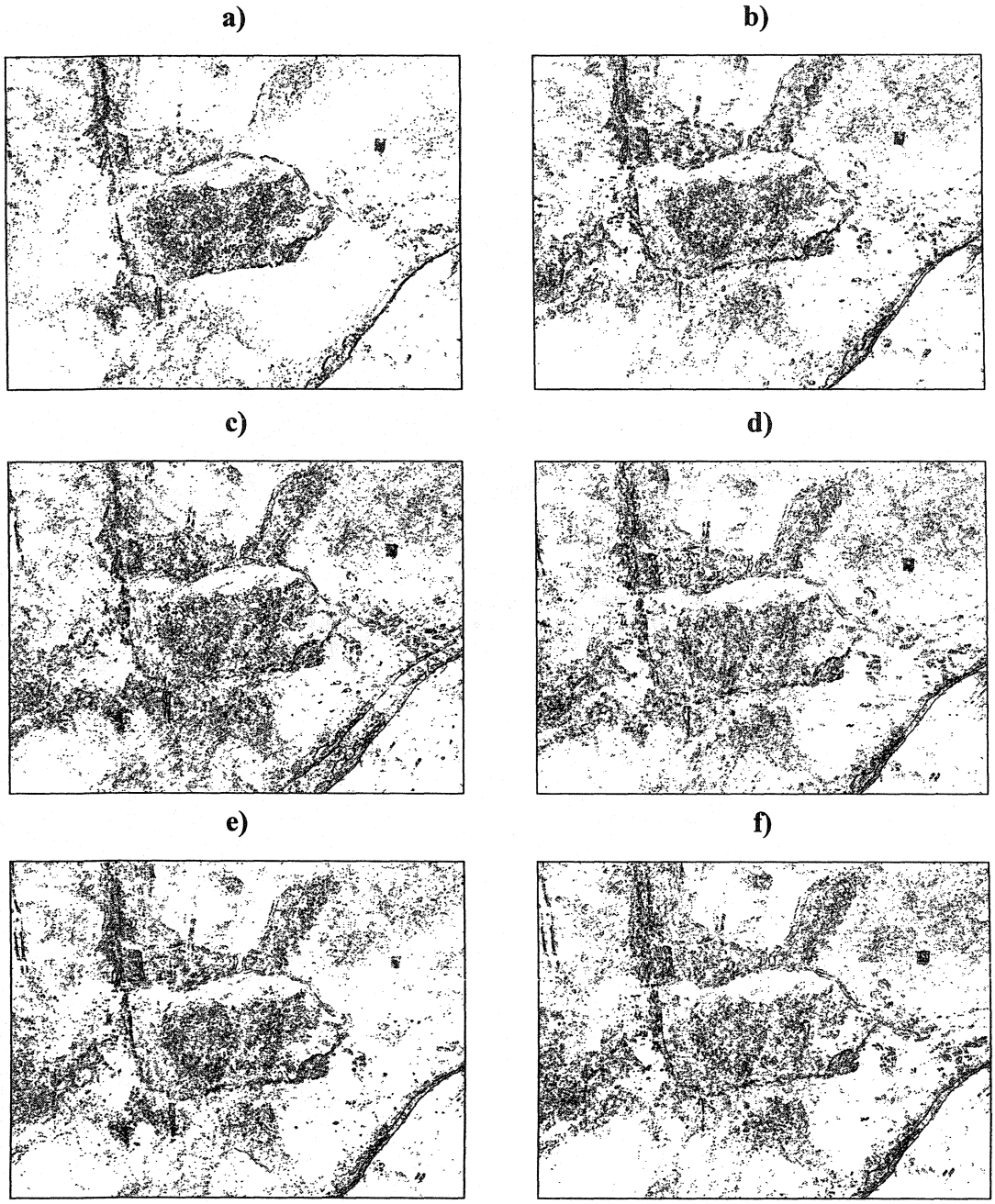


Figure 5.21. Bruit associé à un cisaillement de a) 5 cm (Registar(Geo)), b) 5 cm (Geomatica), c) 10 cm (Registar(Geo)), d) 10 cm (Geomatica), e) 15 cm (Registar(Geo)) et f) 15 cm (Geomatica).

Le cisaillement d'image dans ce cas-ci provoque un changement de perspective de la scène entre chaque incrément de translation. Ce type de correction est le plus problématique parce qu'il y a distorsion d'image pour être en mesure de recadrer les images l'une sur l'autre. La figure 5.21 illustre bien le problème. Après une translation du trépied de 5 centimètres, le mouvement devient impossible à déterminer. Étant donné que la scène était à une distance de 3.55 mètres, les incréments de translations correspondent respectivement à 0.8, 1.6 et 2.4 degrés d'ouverture avec l'axe sur l'image initiale. Ceci est très peu, mais suffisant pour brouiller les résultats de recalage. Avec Geomatica, les résultats sont semblables à ceux obtenus avec Registar(Geo). Ceci démontre l'importance du repositionnement lors de la prise d'image subséquente.

5.4 Paramètres numériques d'acquisition

Les influences qu'exercent la résolution et la compression d'image sur le seuil de détection d'un mouvement de bloc sont plutôt intuitives. D'emblée, il parait assez évident que plus une image a une forte résolution, meilleure sera la définition de la scène, et par conséquent, meilleure sera la définition du mouvement percevable. Il en va ainsi pour la compression d'image.

Cette section permet donc de comparer des résultats obtenus de recalage d'images de différentes résolutions et compressions pour des mouvements de blocs connus de manière à éclairer le lecteur sur l'influence de la qualité de l'appareil sur la méthodologie. Les images présentées ont été prises, telles qu'à la section 5.1, dans le stationnement à l'arrière de l'École Polytechnique.

5.4.1 Influence de la résolution d'image

Rappelons du chapitre 3 que la qualité d'une image numérique est directement reliée à sa résolution spatiale, ou encore, à la sensibilité du capteur CCD. Comme il a été mentionné, plus un pixel possède une grande surface, plus celle-ci permet une meilleure absorption des photons. Cependant, plus un pixel a une petite surface, plus celle-ci représente un petit élément de la scène. Nonobstant ceci, le but de ce rapport n'est pas de comparer ces différences entre elles, mais plutôt d'éclairer le lecteur sur les paramètres influençant la résolution d'une image.

Pour ce faire, une série d'images d'un même bloc ayant subi un déplacement parallèle au plan de l'image mesuré de 3 mm a été prise. Les niveaux de résolution évalués pour chaque série sont de 13.5 M pixels (4500x3000), 6.0 M pixels (3000x2000), 3.4 M pixels (2250x1500) et 0.8 M pixels (1125x750). La figure 5.3 présente l'image initiale (13.5 M pixels).

Pour cet essai, seul le logiciel Registar(Geo) a été utilisé. Le type de recalage retenu est le recalage quadratique avec un ré-échantillonnage bilinéaire. L'essai a été effectué sans repositionnement d'appareil entre les images. Étant donné que l'intérêt de l'essai réside dans la définition du mouvement sur le bloc à différentes résolutions, celui-ci a été isolé et agrandi pour les images de la figure suivante.

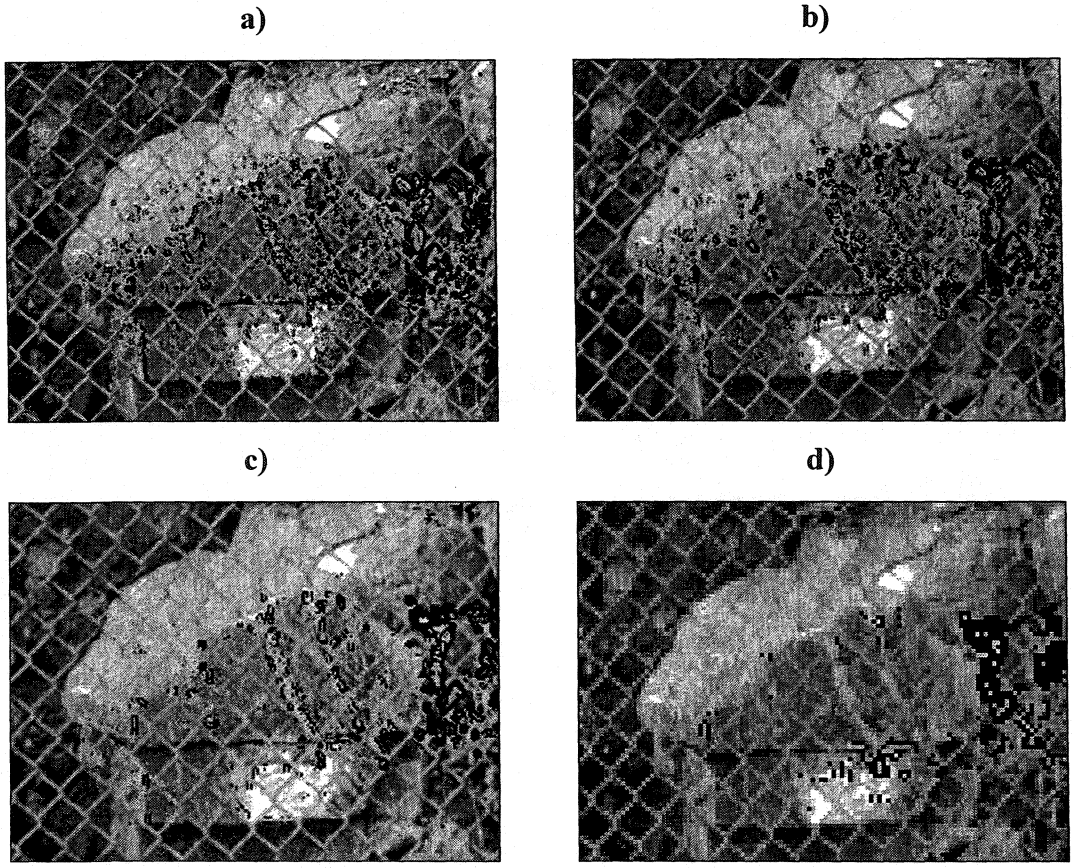


Figure 5.22. Mouvement détecté sur le bloc avec une résolution d'image de a) 13.5 M pixels, b) 6.0 M pixels, c) 3.4 M pixels et d) 0.8 M pixels.

Il est possible d'observer à la figure précédente une nette augmentation du détail de la détection de mouvement sur le bloc avec une augmentation de la résolution de l'image. Ceci est d'autant plus évident que le contraste entre les images à résolution de 13.5 et de 6.0 M pixels et les images avec 3.0 et 0.8 M pixels est important. Une comparaison directe d'image est sans intérêt dans ce cas-ci, car l'idée est de permettre la détection d'un bloc en mouvement. Si, à une telle résolution d'image, le mouvement n'est plus relevé par le détecteur de bordures, alors la comparaison d'image devient complètement inutile.

Il est vrai que l'image à plus forte résolution produit un bruit associé à un mouvement plus visible. Toutefois, si l'ensemble de l'image possède également plus de bruit, l'effet recherché serait alors perdu. Pour évaluer cet aspect, il est intéressant d'évaluer le bruit produit sur l'ensemble de l'image présentée à la figure 5.22. La figure suivante présent le bruit associé aux images complètes. Le bloc en question est encerclé.

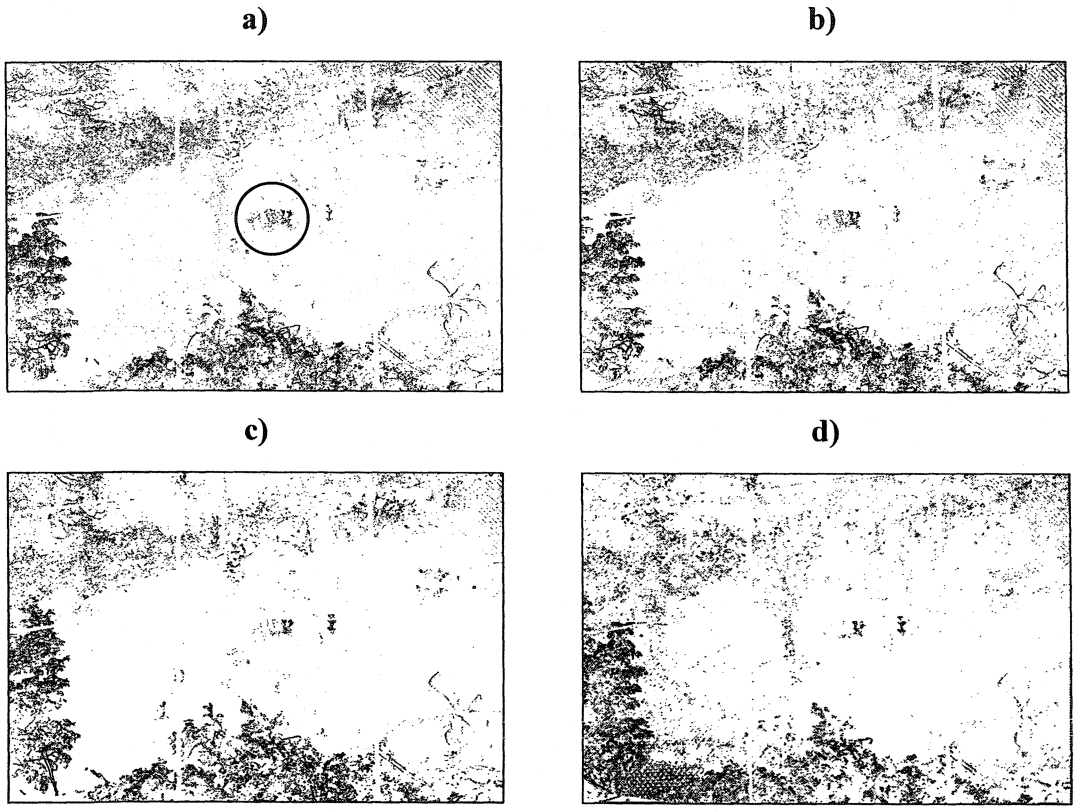


Figure 5.23. Bruit associé au recalage des images de a) 13.5 M pixels, b) 6.0 M pixels, c) 3.4 M pixels et d) 0.8 M pixels.

Tableau 5.3. Moyenne du bruit associé au recalage des images à résolution variables.

Résolution (M pixels)	Moyenne (RDB 30)	Bruit (RDB 30)
13.5	232.83	22.17
6.0	231.68	23.32
3.4	232.52	22.48
0.8	226.91	28.09

À la vue des résultats du tableau 5.3, la tendance ne semble pas très claire. Le bruit sur l'ensemble de l'image diminue avec une augmentation de la résolution de l'appareil à l'exception de la résolution de 3.4 M pixels. Toutefois, si l'on regarde les images de la figure 5.22, il est clair que le bruit associé au mouvement de bloc est beaucoup moins important pour cette résolution d'image. Donc sur l'ensemble du rapport signal/bruit, la résolution de 3.4 M Pixels demeure moins efficace. À partir de ceci, on peut conclure que non seulement le détail de la définition du mouvement augmente avec la résolution de l'image mais qu'également le bruit total associé à l'ensemble de l'image diminue avec une augmentation de la résolution.

5.4.2 Influence de la compression d'image

Lorsque les images sont traitées en format JPEG, le choix de l'amplitude de la compression se pose à l'utilisateur. Rappelons du chapitre 3 que l'algorithme de compression JPEG opère sur des blocs de 8x8 pixels sur l'image. Bref, une image fortement compressée ne perd pas de résolution spatiale, mais perd systématiquement de l'information en fonction de l'intensité des pixels compris dans la zone de 8x8.

De même qu'à la section précédente, les résultats des essais suivants sont plutôt intuitifs. Les résultats suivants, obtenus à partir de la même scène qu'à la section suivante, présentent la définition du mouvement du bloc pour les images sans compression, avec un niveau de compression de 0%, 25%, 50%, 75% et 100%. Le

recalage (quadratique avec un ré-échantillonnage bilinéaire) a été effectué sur les images d'une résolution de 13.5 et 6.0 M pixels.

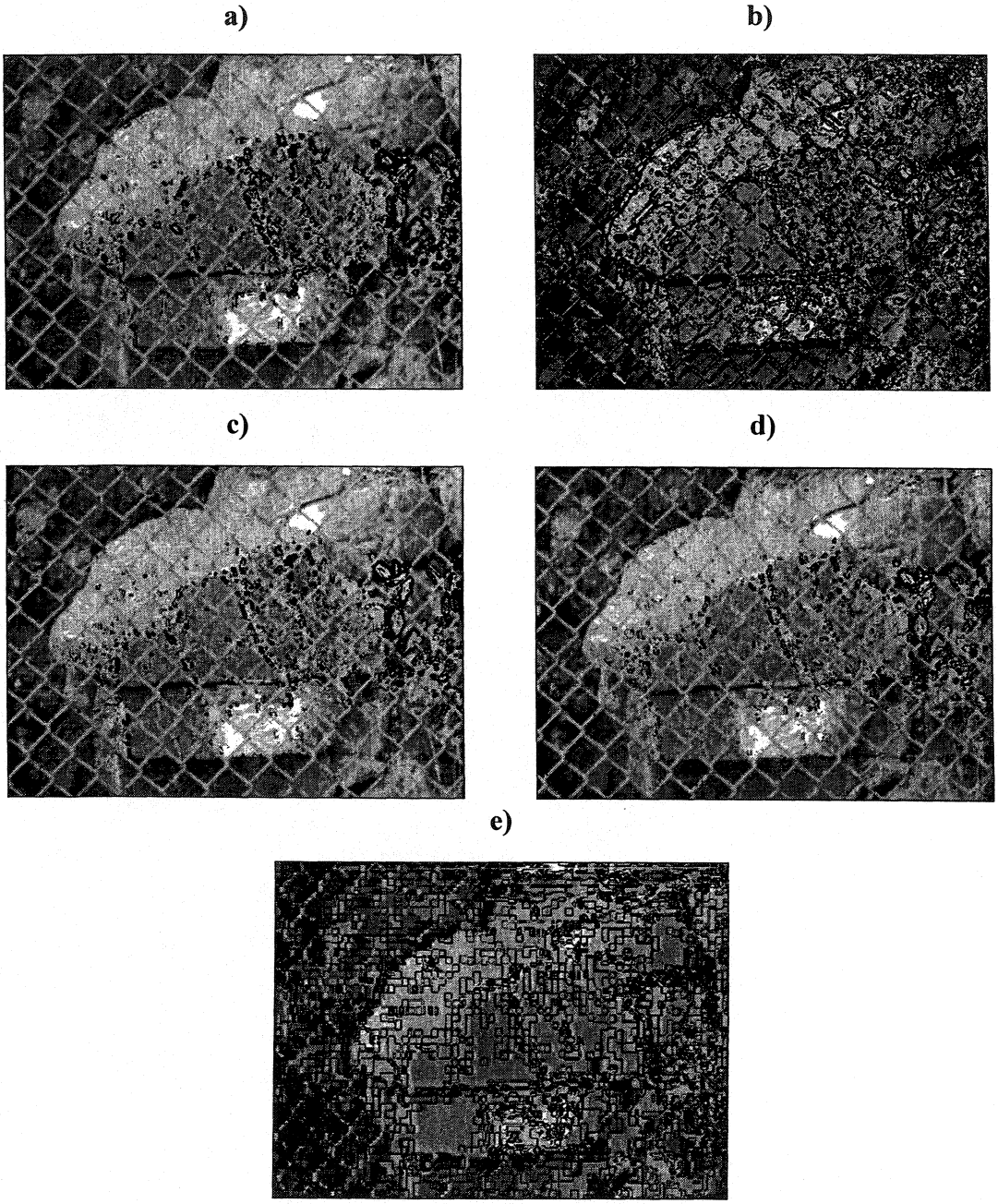


Figure 5.24. Mouvement détecté sur le bloc sur les images d'une résolution de 13.5 M pixels avec une compression d'image de a) 0% b) 25%, c) 50%, d) 75% et e) 100%.

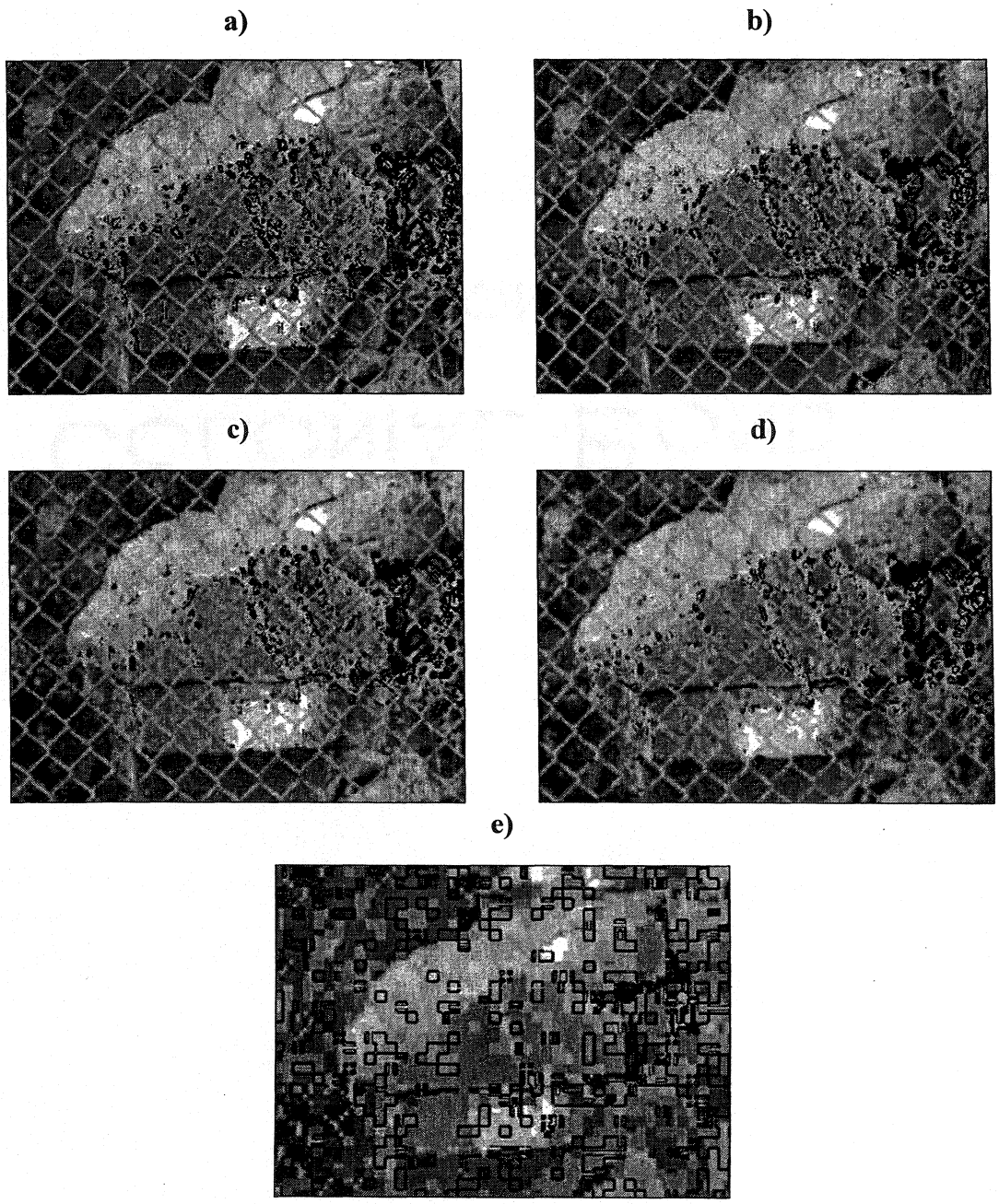


Figure 5.25. Mouvement détecté sur le bloc sur les images d'une résolution de 6.0 M pixels avec une compression d'image de a) 0% b) 25%, c) 50%, d) 75% et e) 100%.

Dans les deux cas (résolution de 13.5 et 6.0 M pixels), les images démontrent une diminution progressive du détail relevé sur le bloc avec une augmentation du taux de

compression de l'image, et ce jusqu'à l'obtention d'une image complètement inutile, suite à une compression maximale. Le danger de travailler avec des images ayant un certain taux de compression, même relativement faible, est bien illustré à la figure 5.24 b). Avec un taux de compression de 25% (vérifié avec trois logiciels différents), les images deviennent difficilement reconnaissables par le logiciel de recalage, le résultat étant le niveau de bruit inacceptable. Pour déterminer l'effet réel de ce résultat, il aurait fallu appliquer le même type de recalage aux deux séries d'images de façon à faire une comparaison dans des conditions similaires.

Une image comprimée est de très peu d'utilité dans le cas d'une application nécessitant un niveau de précision élevé. Les résultats l'indiquent d'ailleurs. Il est donc préférable de travailler avec des images non comprimées de type Tiff ou de format JPEG (sans compression, bien sûr).

5.5 Paramètres externes d'acquisition (effets de luminosité)

Il a été vu au chapitre 3 que les variations d'intensité entre deux images ne peuvent être corrigées par le processus de recalage. Ce point est capital car une différence importante d'intensité lumineuse peut provoquer l'échec de la méthodologie. C'est d'ailleurs une des raisons principales qui justifie l'utilisation des deux logiciels de recalage. Une différence trop importante d'intensité lumineuse rend le logiciel Registar(Geo) inutilisable en raison de la sélection automatique des points de contrôle. Toutefois, même avec un logiciel à sélection manuelle comme Geomatica, les différences d'images suite au recalage démontreront souvent un niveau de bruit difficile à traiter. Ce type d'effet est d'ailleurs le plus gros problème lié à la méthodologie sur des images prises sur des intervalles de temps importants.

Ces différences peuvent être présentes, tant en milieu souterrain qu'à l'extérieur. À l'extérieur, les sources de variations sont plus évidentes. Les conditions

météorologiques jouent évidemment beaucoup sur la luminosité. Une scène prise sous le soleil présente des jeux d'ombrages qui sont inexistants sous une couverture de nuage. Le temps de la prise a une incidence importante également lorsque les images sont prises au soleil. La position du Soleil par rapport à la paroi peut modifier complètement la scène, d'un point de vue numérique. Finalement, la présence d'eau sur la paroi influence les propriétés réfléchissantes de celle-ci, occasionnant donc des variations d'intensités.

Dans un milieu souterrain, la source de lumière utilisée ne varie pas. Toutefois l'environnement varie constamment. Dans une mine, les chantiers, en évolution continuelle, peuvent offrir des environnements très différents entre les prises d'images. Les images de la figure 5.26 présentent un cas à l'extérieur où les différences d'intensité lumineuse sont problématiques. Dans ce cas-ci, le recalage doit être effectuée avec Geomatica.

Les images a) et b) de la figure 5.26 ont été prises devant la falaise de roc à l'arrière du CEPSUM sur le campus de l'Université de Montréal, aux dates indiquées sur la légende. Ce cas sera traité de façon plus approfondie au chapitre suivant, toutefois, il est présenté ici pour mettre en valeur l'importance de l'influence des effets de luminosité sur la méthodologie. Un recalage et une différence d'images ont été effectués avec les images a) et b). L'image finale est présentée en c).

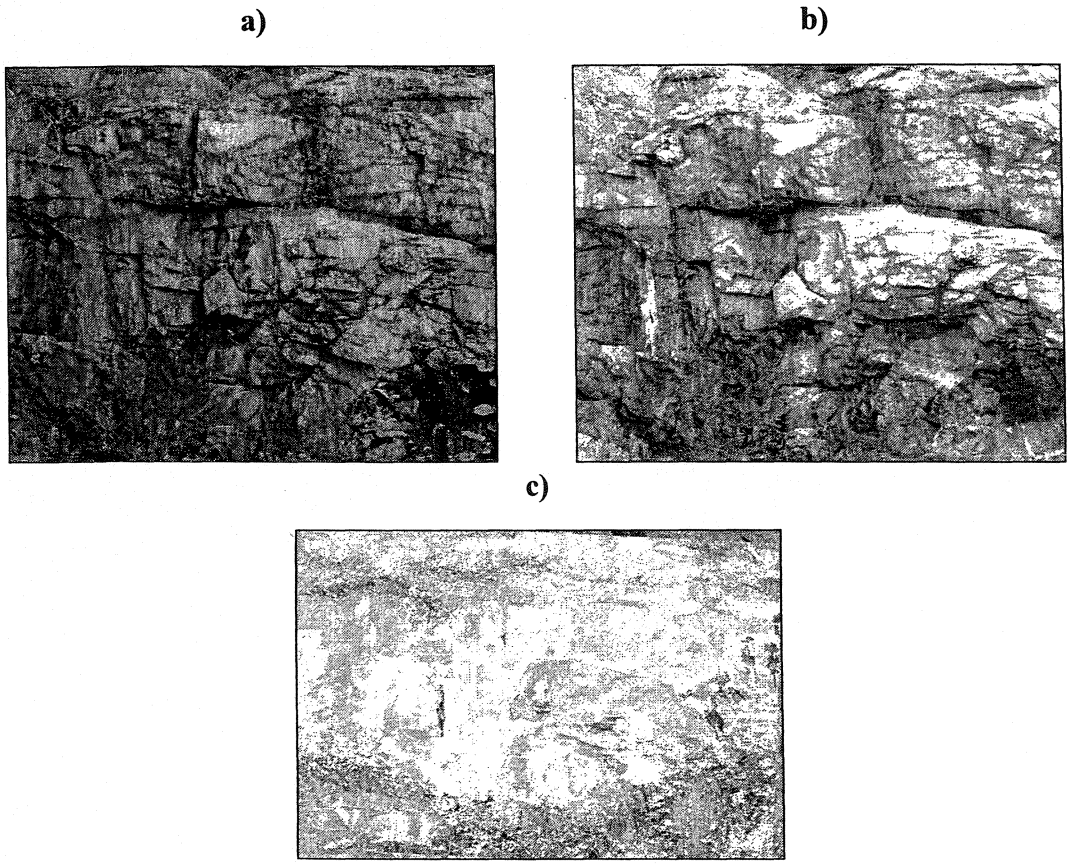


Figure 5.26. a) Image prise le 19 août 2003, b) image prise le 27 novembre 2003 et c) résultat du recalage effectué (sans recherche de bordures).

Les paramètres externes d'acquisition concluent ce chapitre. Au chapitre 6, les études de cas menées pendant le projet seront présentées de façon à aborder tous les points de la méthodologie mentionnés aux chapitres 4 et 5.

CHAPITRE 6 : ÉTUDES DE CAS

La validation de la méthodologie avec des cas réels est nécessaire à la poursuite de l'étude. Trois études de cas seront présentées dans ce chapitre. Les deux premières sont des simulations de déplacements de blocs sur des parois rocheuses extérieures situées sur le campus de l'Université de Montréal. La troisième est un essai réel effectué sur le site de la mine Doyon en Abitibi, en milieu souterrain.

Pour le premier cas, quelques blocs ont été aléatoirement déplacés à l'insu de l'utilisateur. Les images ont été prises le même jour avec un repositionnement d'appareil. Ce cas simple est placé au début du chapitre pour simplement permettre une revue détaillée de la méthodologie sur un nouveau cas pour les deux logiciels.

Les deux autre cas d'étude sont par ailleurs plus intéressants car ils font intervenir un intervalle de temps plus important, comparable à la fréquence de mesures dans une situation réelle. Ce dernier paramètre (le temps), n'a pas encore été traité dans le mémoire, l'étude étant présentée de manière à évaluer la performance des deux logiciels dans des situations entièrement contrôlées. Dans ce chapitre, l'utilisation des filtres numériques nettoyants suite à l'application du filtre de segmentation sont utilisés. Pour chaque cas, toutes les étapes de traitement seront clairement identifiées pour permettre au lecteur de comprendre le cheminement de la méthodologie.

6.1 Premier cas d'étude : Falaise rocheuse, Université de Montréal

Situé sur un terrain vacant sur le campus de l'Université de Montréal, ce cas comporte deux séries d'images. Entre les deux séries, quelques petits blocs ont été déplacés sur la paroi rocheuse. Les images ont été acquises de façon conventionnelle, c'est-à-dire en respectant les consignes du chapitre 4. Suite à l'image initiale, l'appareil a été repositionné à l'aide d'un repère au sol. Le ciel était nuageux. La paroi avait une

orientation Nord. Toutes les images ont été prises avec l'appareil Kodak DCS Pro 14n avec une résolution de 13.5 M pixels. La distance de l'appareil à la paroi était de 10.6 mètres alors que la distance focale utilisée était de 50 mm. La figure suivante présente le site utilisé pour effectuer cette première étude de cas.

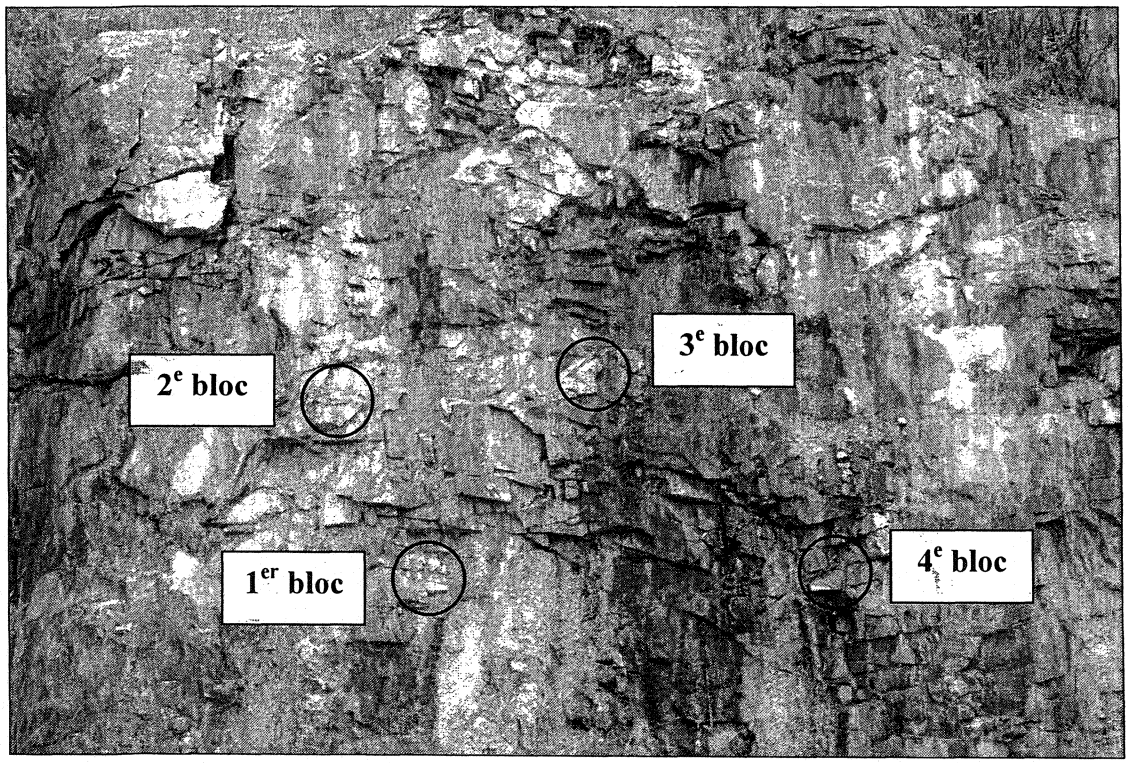


Figure 6.1. Située sur le campus de l'Université de Montréal, paroi utilisée pour réaliser la première étude de cas avec les zones d'intérêts encerclées.

Le tableau suivant indique les paramètres optiques utilisés pour cette étude de cas.

Tableau 6.1. Paramètres de prises de vue utilisés.

Paramètre	Image initiale	Image subséquente
Vitesse	1/6 s.	1/4 s.
Ouverture	13	16
Sensibilité	320	320
Distance focale	50 mm	50 mm

Les images initiale et subséquentes ont d'abord été transformées en niveaux de gris à 8 bits. La figure suivante présente ces deux images en tons de gris avec leur histogramme d'intensité.

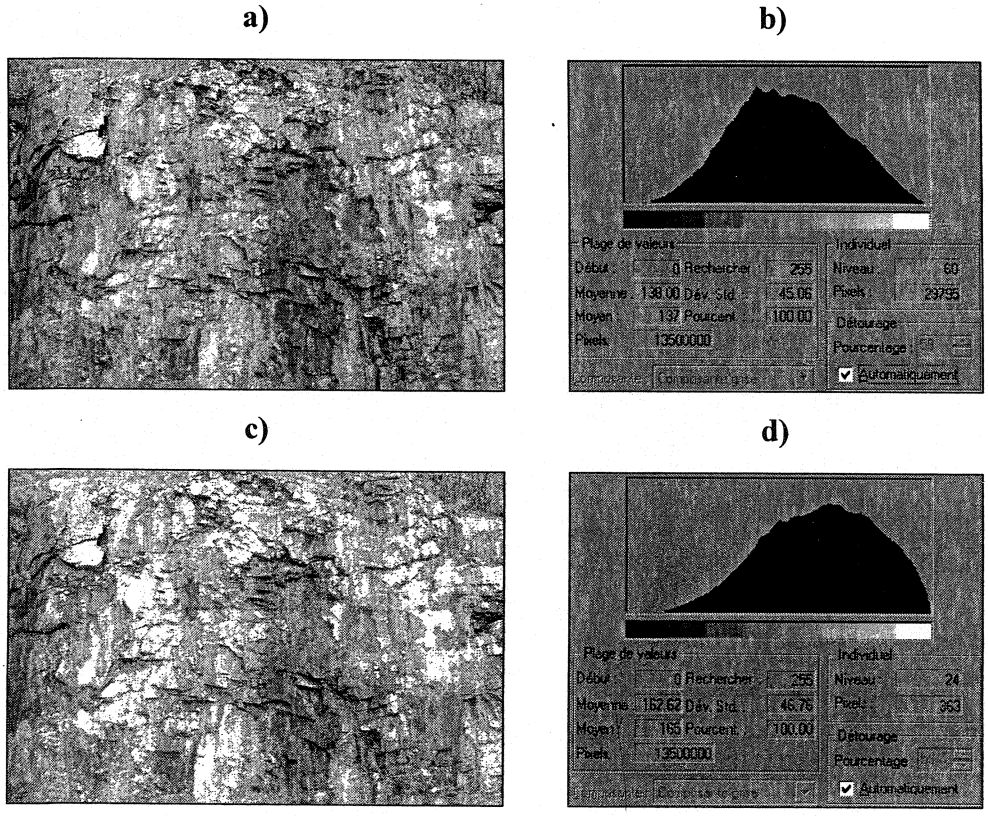


Figure 6.2. a) Image initiale en tons de gris, b) histogramme de l'image initiale, c) image subséquente et d) histogramme de l'image subséquente.

À l'observation des histogrammes à la figure 6.2, on aperçoit une différence importante de moyenne d'intensité, 138.00 pour l'image initiale et 162.62 pour l'image subséquente, ainsi qu'une différence dans la distribution de cette intensité. De plus, les deux images n'ont pas des valeurs d'intensité distribuées sur toute l'étendue (de 0 à 255). Étant donné que la courbe de distribution des valeurs de l'image initiale est normale (ou presque), celle-ci peut être modifiée légèrement en appliquant une égalisation des niveaux avec un seuil de 99.95%. En ce basant sur cette nouvelle image initiale, on obtient les résultats suivants.

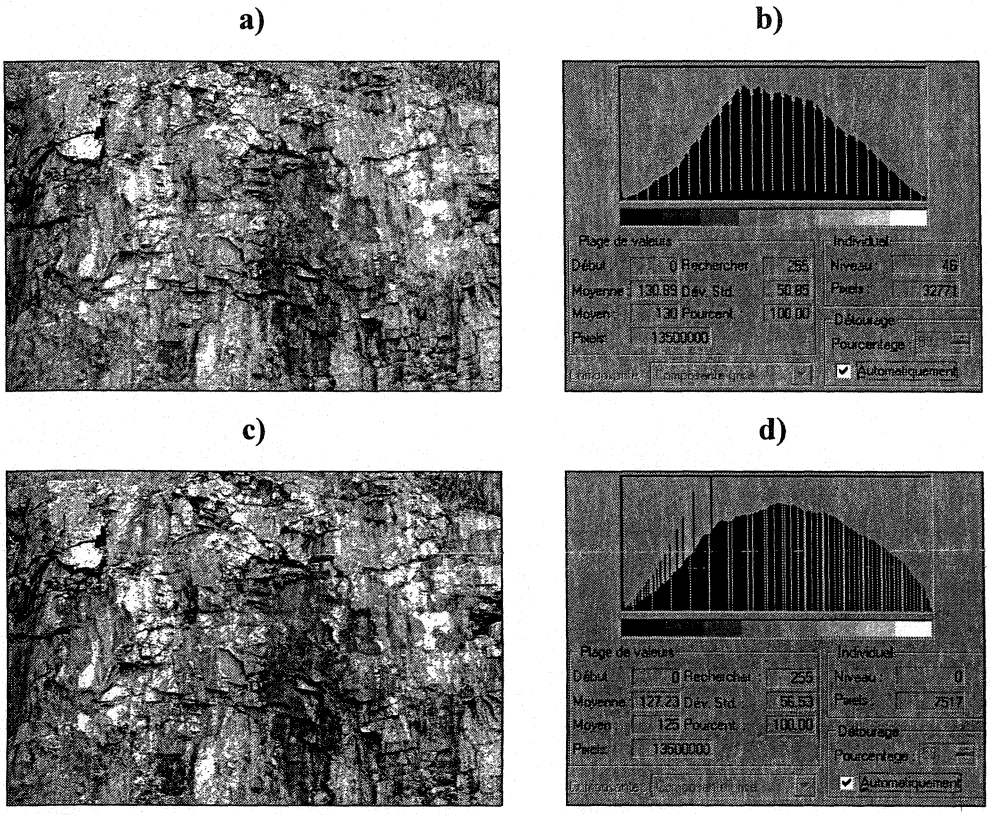


Figure 6.3. a) Image initiale suite au prétraitement, b) histogramme de l'image initiale, c) image subséquente et d) histogramme de l'image subséquente.

Pour obtenir l'image subséquente, celle-ci a été modifiée avec un ajustement non linéaire de sa courbe de teinte et ensuite une égalisation des niveaux avec un seuil de

99.95% pour le noir et de 100% pour le blanc. Les moyennes des intensités sont maintenant de 130.89 pour l'image initiale et 127.23 pour l'image subséquente. Celles-ci sont désormais prêtes pour l'étape du recalage.

Avec le logiciel Registar(Geo), le recalage utilisé est quadratique avec un ré-échantillonnage bilinéaire. Dans le cas de Geomatica, celui-ci est linéaire avec un ré-échantillonnage bilinéaire. Pour les deux transformations, les constantes de translation obtenues sont semblables et pas trop élevées, le repositionnement a donc été adéquat.

Tableau 6.2. Constantes obtenues des polynômes de transformation.

	Registar(Geo) (5000 GCP)		**Geomatica (6 GCP)**	
Recalage	**Constante (x')**	**Constante (y')**	**Constante (x')**	**Constante (y')**
Linéaire	---	---	- 11.9899	- 5.16564
Quadratique	-12.2205	- 6. 6477	---	---

La figure suivante présente les deux images corrigées suite aux recalages respectifs.

a) **b)**

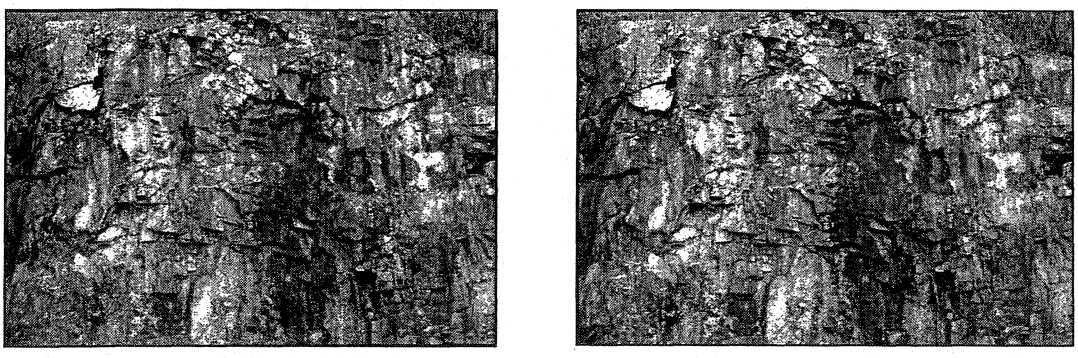


Figure 6.4. a) Image corrigée avec Registar(Geo) et b) image corrigée avec Geomatica.

Comme c'est souvent le cas lorsque le repositionnement est bien réussi, les images corrigées sont très similaires (en apparence visuelle) aux images subséquentes, c'est-à-dire, qu'on ne perçoit pas de bandes noires importantes en bordures, signe qu'une transformation plus marquée a eu lieu. La prochaine étape consiste en une différence d'image entre l'image corrigée et l'image initiale. Ensuite, cette différence est inversée et est soumise à l'application du filtre de segmentation et du filtre médian. Dans ce cas-ci, comme dans tout le rapport, le filtre de segmentation choisi est l'algorithme détecteur de bordures du logiciel Corel Photo-Paint avec un seuil à 30. Le filtre médian, pour sa part, a été appliqué avec une fenêtre de 3x3 pixels. Le tableau suivant reprend les moyennes d'intensités des images après chacune des étapes mentionnées, pour les deux logiciels.

Tableau 6.3. Moyennes des intensités pour les images traitées du premier cas.

	Registar(Geo)	**Geomatica**
Différence d'image	246.53	244.66
Recherche des bordures	251.89	245.06
Filtre médian	253.72	252.58

Le tableau 6.2 démontre clairement que l'application du détecteur de bordures a été plus sensible sur l'image obtenue avec Geomatica. Toutefois, le filtre médian permet d'obtenir deux images avec un niveau de bruit presque identique. Ces deux images sont présentées à la figure suivante.

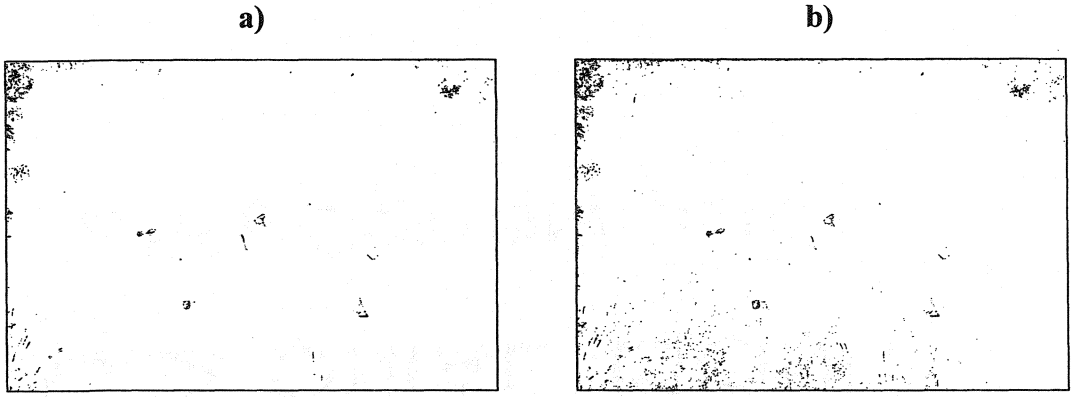


Figure 6.5. Différence d'image suite à l'application du filtre médian a) obtenue avec Registar(Geo) et b) avec Geomatica.

Finalement, les images obtenues suite à l'application du filtre médian ont été superposées aux images corrigées pour obtenir les images finales suivantes.

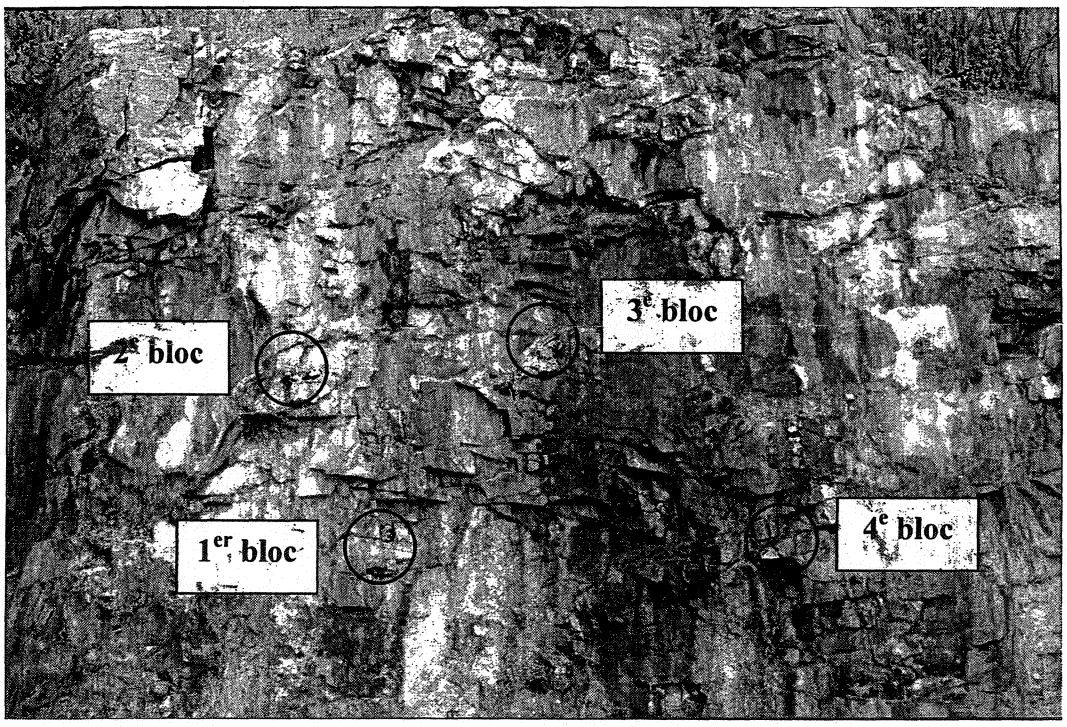


Figure 6.6. Image finale obtenue avec Registar(Geo).

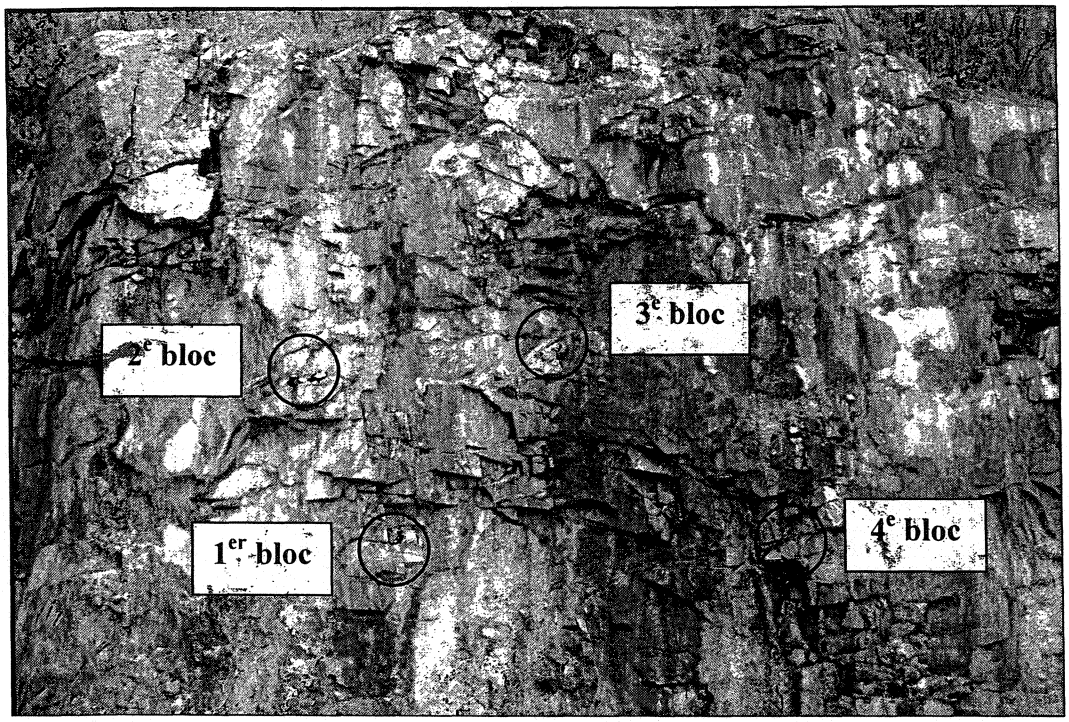


Figure 6.7. Image finale obtenue avec Geomatica.

Étant donné la petite taille des blocs et la qualité moyenne de l'impression des figures 6.6 et 6.7, chaque déplacement sera évalué indépendamment des autres aux cours des sous-sections suivantes. Pour chaque bloc d'intérêt, les images présentées seront : l'image initiale et subséquente suite au prétraitement et les images finales obtenues pour chaque logiciel.

6.1.1 Premier bloc

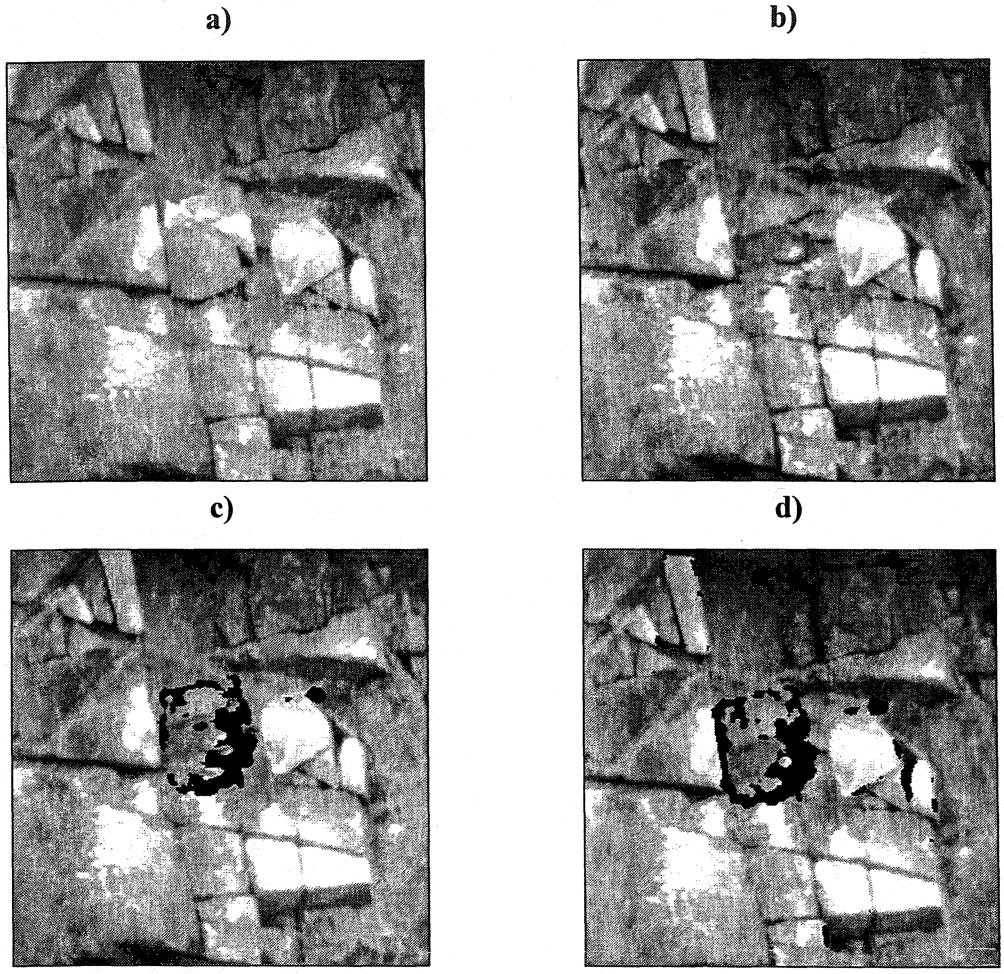


Figure 6.8. Premier bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica.

Dans ce cas-ci, il est évident qu'il y a eu chute de bloc, il n'est donc pas nécessaire de quantifier le mouvement. Les images c) et d) démontrent bien, toutes deux, cette chute.

6.1.2 Deuxième bloc

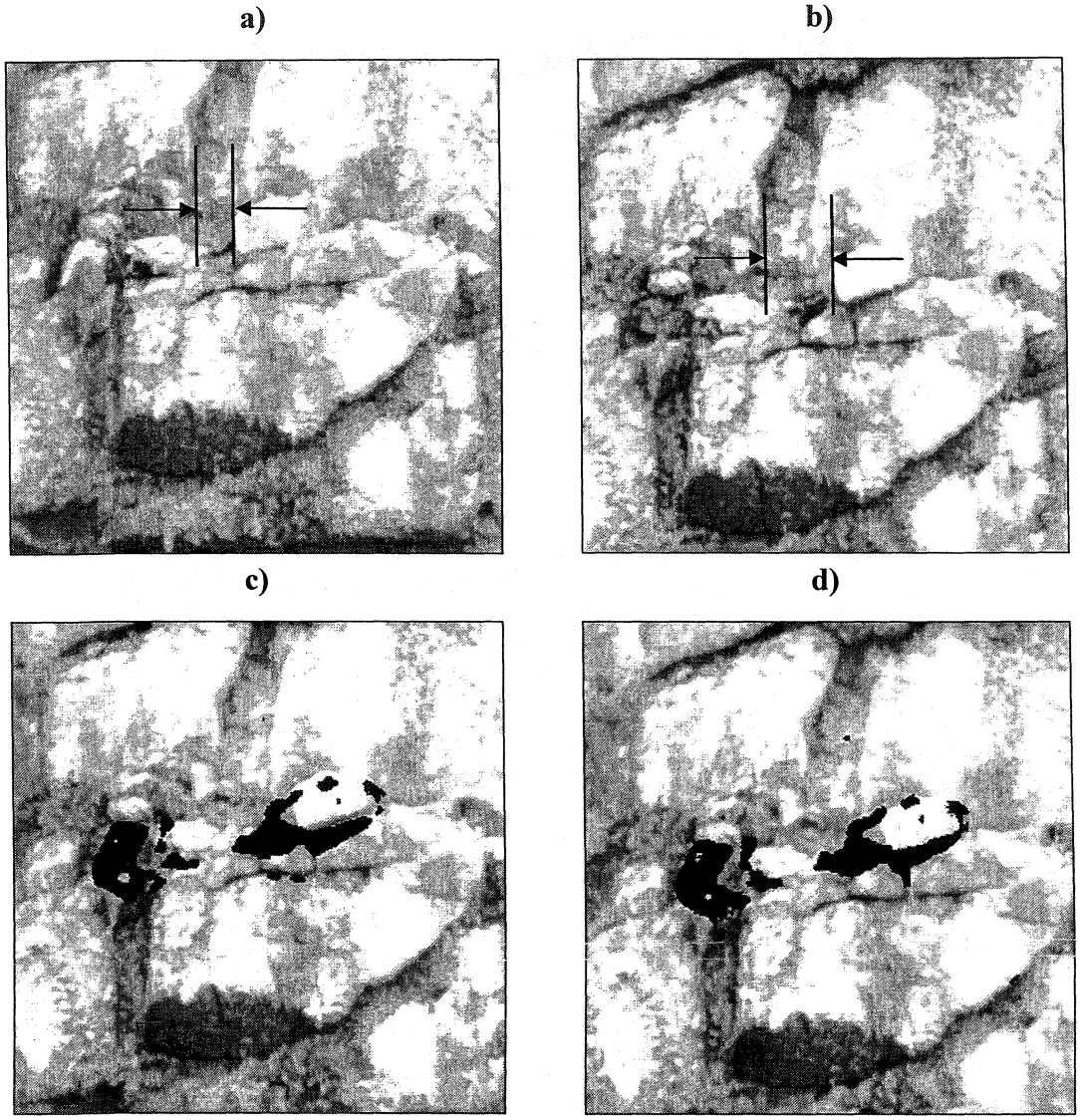


Figure 6.9. Deuxième bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica.

Le déplacement du deuxième bloc par rapport à la paroi est clairement visible. Les images initiale et finale indiquent qu'un déplacement latéral de l'ordre de 18 pixels a eu lieu. Ce déplacement se traduirait par une distance de 30.5 mm, moyennant une

incertitude d'au moins la valeur d'un pixel, donc de 1.7 mm. La figure 6.9 c) et d) souligne également la chute du petit bloc de gauche.

6.1.3 Troisième bloc

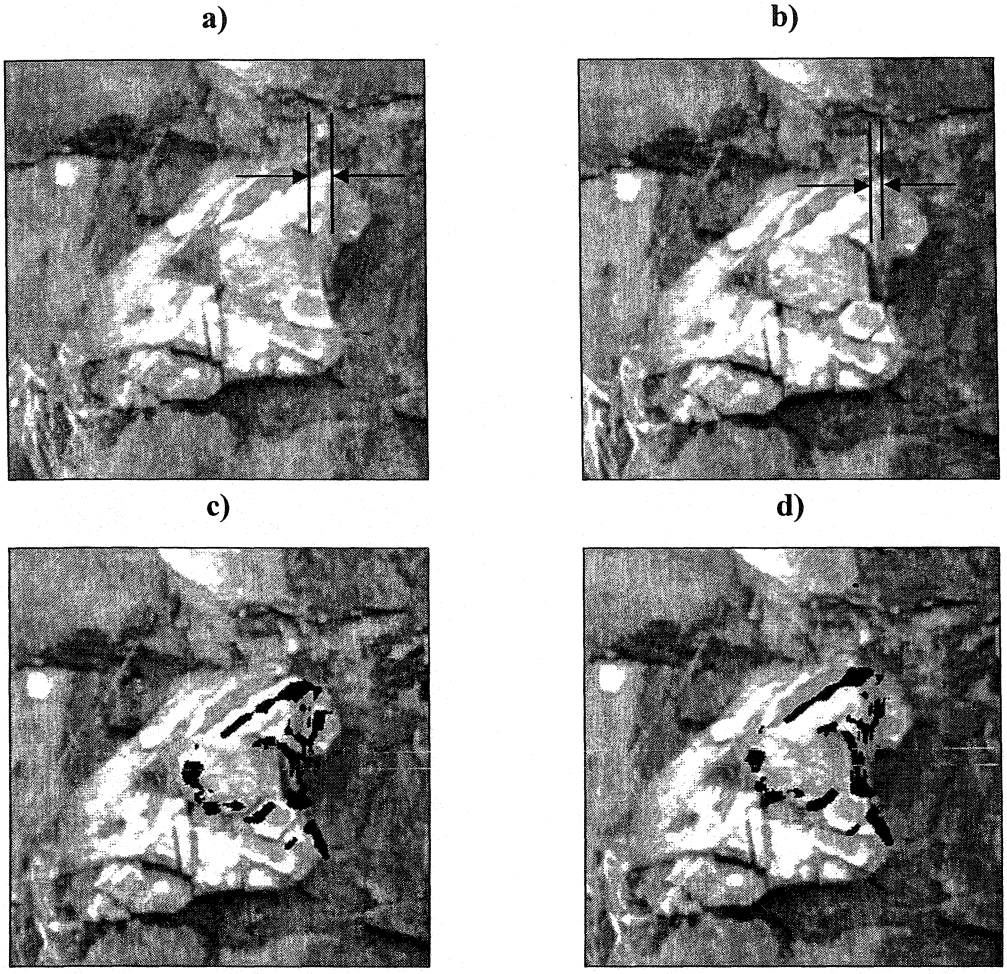


Figure 6.10. Troisième bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica.

Le déplacement qui a eu lieu est plus subtil, cependant la méthodologie l'a détecté tout de même. Celui-ci, de 6 pixels, correspond à 10.2 mm sur le plan de l'image.

6.1.4 Quatrième bloc

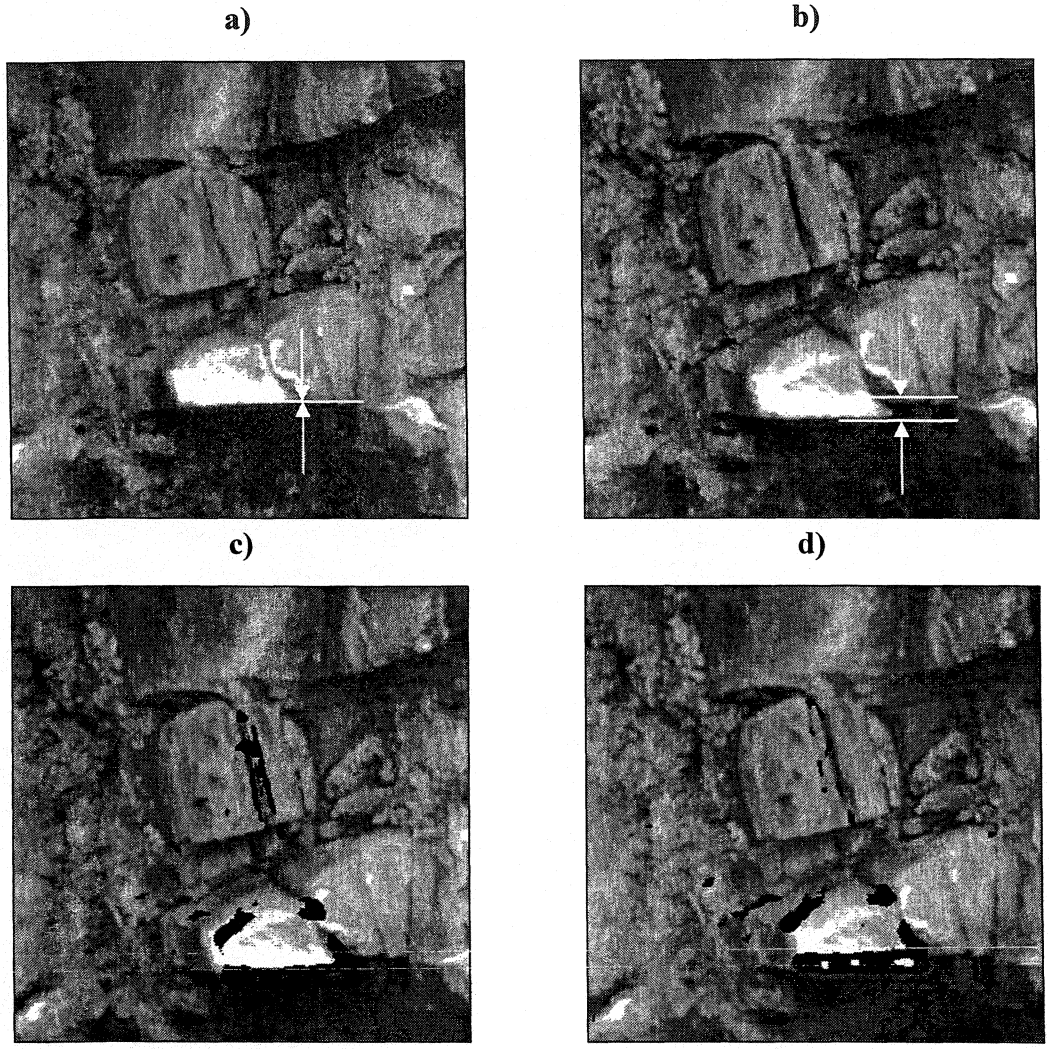


Figure 6.11. Quatrième bloc a) image initiale, b) image subséquente, c) image finale avec Registar(Geo) et d) image finale avec Geomatica.

Le déplacement mesuré sur l'image est de 9 pixels, donc de 15.3 mm.

Dans l'ensemble, la méthodologie a permis de repérer les quatre blocs ayant subi un déplacement entre les deux prises d'image. Même si les mesures de déplacement étaient inconnues, la connaissance du déplacement dans le plan de l'image est possible

par la méthode de comparaison d'images. Cependant, ceux-ci ne sont valables que dans le plan de l'image, donc ne correspondent pas nécessairement au déplacement total sur la paroi.

En comparaison, les deux logiciels ont bien fonctionné pour cet essai. Le bruit associé au mouvement sur les blocs ainsi que le bruit parasite étaient semblables sur l'ensemble de l'image. Cet essai nous apporte également un appui supplémentaire pour justifier l'utilisation du filtre médian. Avec Registar(Geo), celui-ci n'était pas nécessaire suite à la segmentation, il n'a apporté qu'un changement mineur sur le bruit parasite. Toutefois, il a eu un impact important sur l'image obtenue avec Geomatica. En comparant les images ensemble (Registar(Geo) et Geomatica), on a pu voir que l'utilisation du filtre médian avec une petite fenêtre de 3x3 pixels n'a pas éliminé la trace des déplacements sur les blocs, mais a contribué à éliminer en grande partie le bruit parasite. La figure suivante présente l'image obtenue par différence avant et après l'application du filtre médian (avec Geomatica).

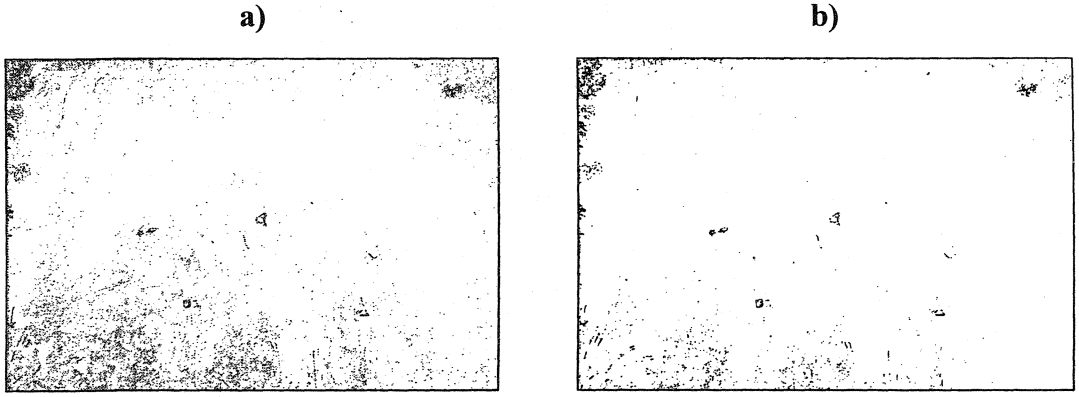


Figure 6.12. Différence d'image suite au recalage avec Geomatica a) avant le filtre médian et b) après le filtre médian.

6.2 Deuxième cas d'étude : Falaise rocheuse, CEPSUM

Situé à l'arrière du CEPSUM sur le campus de l'Université de Montréal, le deuxième cas d'étude comporte plusieurs séries d'images. Les images ont été acquises de façon conventionnelle, décrite à la section 4.1 du présent rapport. Entre chaque série, l'appareil a été repositionné à l'aide d'un repère au sol. Plusieurs déplacements de blocs ont été provoqués sur ce site. Ces déplacements varient en fonction du type de bloc, certains sont dans le plan de l'image, d'autres normaux au plan de l'image (parallèle à l'axe de la caméra) et certaines chutes de blocs figurent également.

L'étude a été effectuée en six étapes distinctes, prises en trois jours, les 19 et 20 août et le 27 novembre 2003. À chacune des étapes à l'exception du 27 novembre, un changement a été introduit dans la scène, soit en augmentant l'amplitude d'un mouvement précédent, soit en introduisant une chute ou bien en introduisant simplement un nouveau déplacement.

Les images des trois premières étapes de l'étude ont été prises le premier jour, entre dix et onze heures du matin. Le temps était ensoleillé. La paroi, d'une orientation Nord, était à l'ombre. Il y a eu un repositionnement d'appareil suite aux images initiales, puis l'appareil est demeuré fixe pour le reste de l'essai. Les images des deux dernières étapes ont été prises le lendemain après-midi vers quatorze heures, avec des conditions météorologiques similaires au premier jour. Le 27 novembre 2003, une troisième série d'images a été prises sur ce même site, avec des conditions météo différentes. Les images ont été prises en fin d'après-midi sous un ciel ennuagé. Aucun changement intentionnel n'a été effectué sur les blocs de la paroi lors de cette dernière série d'image. Toutes les images ont été prises avec l'appareil Kodak DCS Pro 14n avec une résolution de 13.5 M pixels. La distance de l'appareil à la paroi était de 10.55 mètres alors que la distance focale utilisée était de 50 mm.

L'intérêt de cette étude est l'intervalle de temps qui s'est écoulé entre les images du 19 et 20 août et celles du 27 novembre. En ce qui concerne les images prises les 19 et 20 août, le processus est le même qu'établi pour le premier cas d'étude et ne sera que présenté brièvement ici. Les conditions d'utilisation de la méthode ont été établies, il reste donc à les vérifier à long terme. Le tableau suivant résume paramètres de prise de vue utilisés pour cet essai.

Tableau 6.4. Paramètres de prises de vue utilisés.

Paramètre	**Image initiale (19 août)**	**Image subséquente (27 novembre)**
Vitesse	1/6 s.	1/6 s.
Ouverture	9.5	11
Sensibilité	0	320
Distance focale	50 mm	50 mm

La figure suivante présente le site choisi avec encerclées, les zones qui subiront un mouvement lors des séquences suivantes.

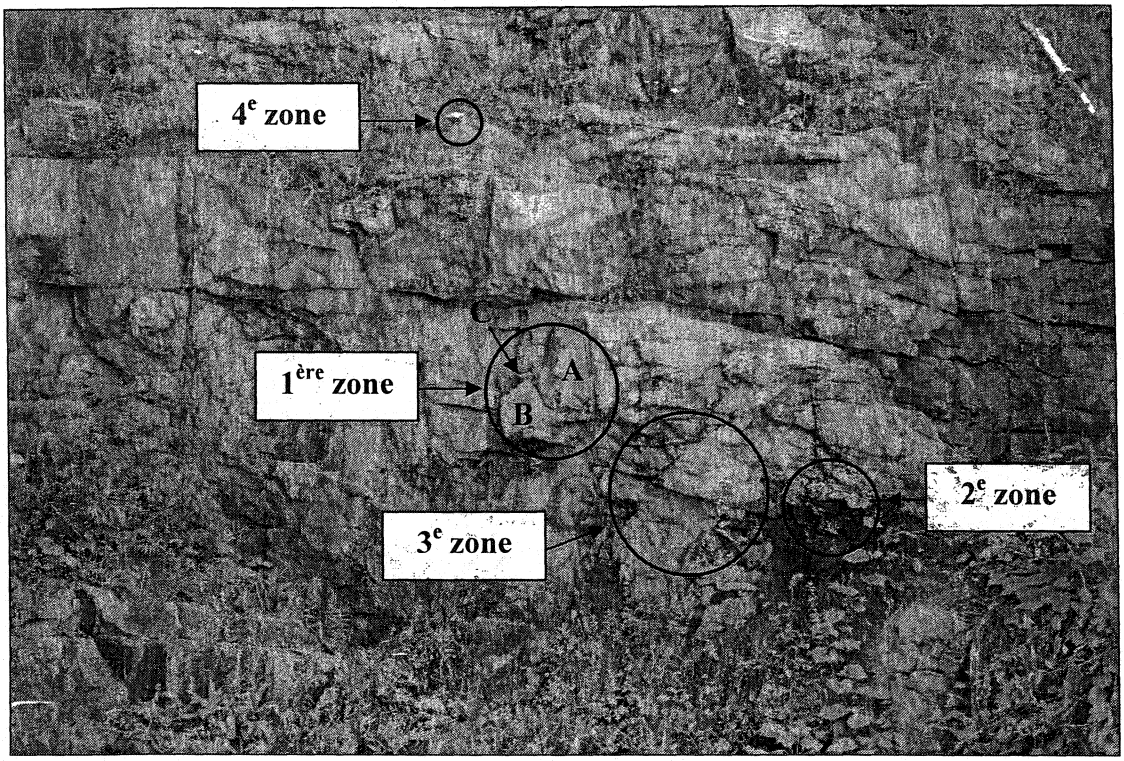


Figure 6.13. Scène du 2ième cas d'étude, à l'arrière du CEPSUM sur le campus de l'Université de Montréal. Les zones d'intérêt sont encerclées.

À ce stade, il est important de mentionner que peu importe le type de traitement effectué sur l'image subséquente prise le 27 novembre, Registar(Geo) n'a pas été en mesure d'établir la grille correspondante de l'image corrigée en fonction de l'image initiale. Ce problème provient de la façon dont Registar(Geo) procède au recalage des images. Il a été vu que ce dernier balaye successivement chaque rangée de l'image à la recherche de points qui correspondent à un gradient d'intensité quelconque. Avec certaines contraintes géométriques, ces points sont retenus comme points de contrôle.

Lorsqu'un lapse de temps important intervient entre les deux prises d'images, plusieurs facteurs peuvent contribuer à modifier suffisamment l'environnement pour provoquer une incompatibilité d'images. Ces facteurs peuvent être reliés à la flore, dans ce cas-ci la perte de feuillage entre les saisons, l'eau ou la glace sur la paroi, mais surtout

l'intensité lumineuse. Un simple ajustement des paramètres optiques d'un appareil, comme l'ajustement de la sensibilité à la lumière, peut rendre impossible le recalage par Registar(Geo). Donc, malgré son efficacité et sa rapidité (lorsqu'il est opérationnel), ce logiciel ne demeure pas entièrement fiable en raison de la variabilité des conditions et de sa trop grande sensibilité à cet égard.

Le problème est partiellement évité avec Geomatica. En choisissant soi-même les points de contrôle, l'utilisateur exerce le pouvoir d'obtenir la précision nécessaire sur le recalage, au dépend du temps d'opération. Le problème n'est que partiellement évité car comme il a été démontré à la section 5.3 du chapitre précédent, sans ajustement particulier, une différence trop grande d'intensité lumineuse peut empêcher l'obtention de bons résultats avec la méthodologie.

Tel que mentionné, l'intérêt de cette étude demeure l'essai à long intervalle de temps (celui du 27 novembre), donc pour la suite du cas d'étude, moins d'emphase sera mise sur les étapes réalisées les 19 et 20 août. Nonobstant ceci, l'évolution des différentes zones sera présentée rapidement avec Registar(Geo) de façon à permettre au lecteur d'observer les changements intervenus entre l'image initiale prise le 19 août et la dernière image prise le lendemain du même mois. Ensuite Geomatica sera utilisé pour tenter d'observer ces changements, et possiblement d'autres de causes naturelles, avec l'image prise le 27 novembre.

Le prétraitement des images choisies est toujours la première étape à effectuer lors de la manipulation des images. Pour ce faire, celles-ci sont d'abord transformées en tons de gris et examinées de façon à déterminer quel type de prétraitement sera le plus adéquat pour préparer le recalage. Les figures suivantes présentent donc les images choisies pour chaque étape (sauf le 27 novembre) et leur histogramme respectif des intensités.

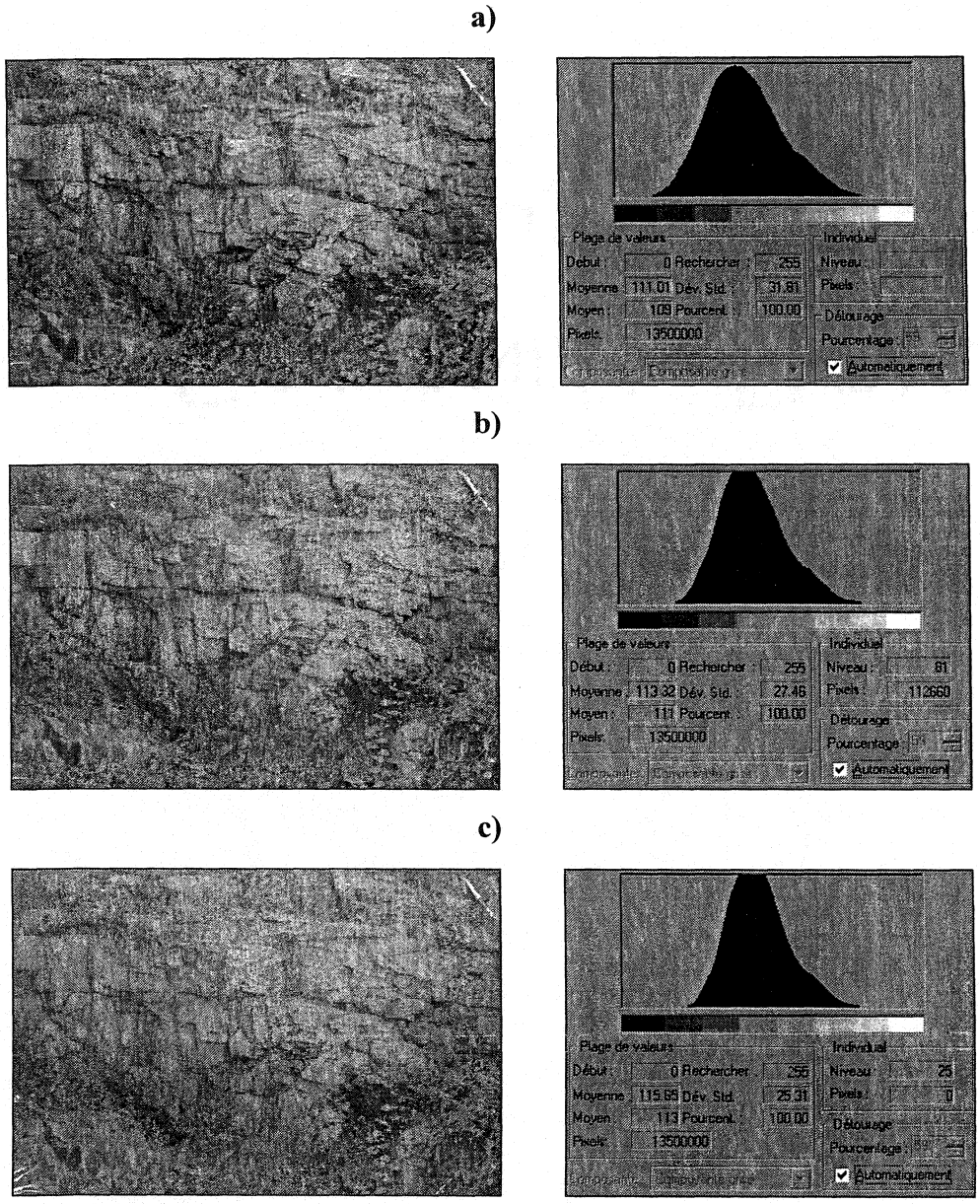


Figure 6.14. Image et histogramme des intensités a) Image initiale, b) image subséquente de la 1ère étape et c) image subséquente de la 2e étape.

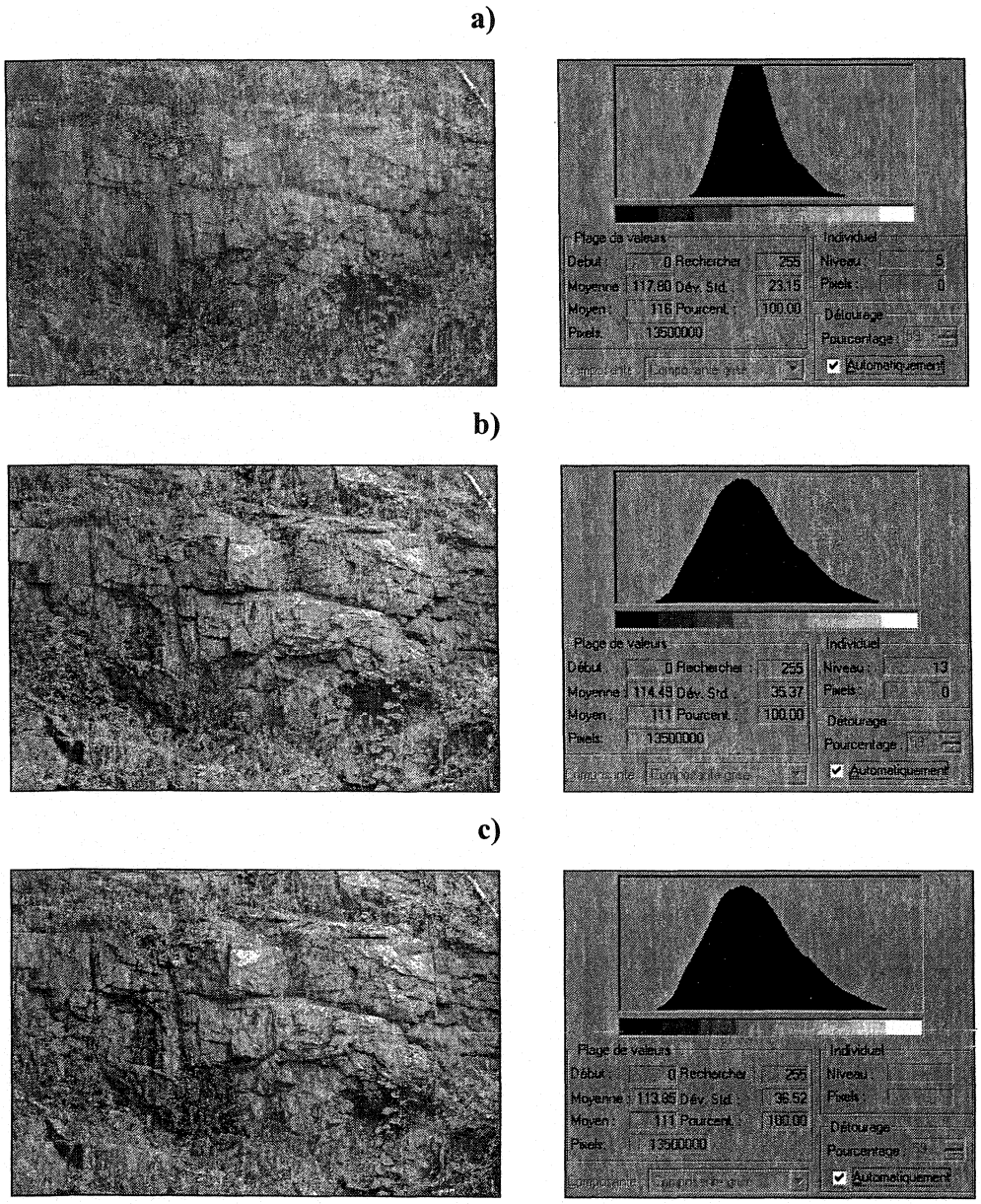


Figure 6.15. Images subséquentes et histogrammes des intensités a) 3^{e} étape, b) 4^{e} étape et c) 5^{e} étape.

Les figures 6.14 et 6.15 démontrent la faible étendue des moyennes d'intensités de pixels pour les images choisies, entre 111.01 pour l'image initiale et 117.80 pour l'image subséquente de la troisième étape. Quoique pas identiques, les distributions

sont toutes normales mais mal étalées sur l'ensemble des valeurs. En raison de ces résultats, une simple égalisation des niveaux avec un seuil fixé à 99.95% a été utilisée comme prétraitement. Les images finales obtenues après chaque étape pour chaque zone (voir figure 6.13) sont présentées aux sections suivantes.

6.2.1 Première zone

Le tableau suivant résume les changements intervenus dans la première zone pour chaque étape. L'incertitude sur l'évaluation des déplacements est assez grande étant donné que celles-ci ont été prises plutôt visuellement. L'emplacement des blocs et le danger associé à une chute potentielle rendaient toutes mesures plus précises impossibles.

Tableau 6.5. Résumé des changements intervenus dans la zone #1.

Étude de cas #2 : CEPSUM	
Étape	**1ère Zone**
1ère (19 août)	Déplacement mineur vers la gauche du bloc A. Déplacement mineur vers la gauche du bloc B.
2e (19 août)	Déplacement vers la gauche du bloc A. Déplacement vers la gauche du bloc B.
3e (19 août)	Chute du bloc A. Déplacement vers la gauche et l'avant du bloc B.
4e (20 août)	Déplacement du bloc B. Chute du bloc C.
5e (20 août)	Déplacement mineur du bloc B.

Pour évaluer les changements avec Registar(Geo), un recalage de type quadratique avec un ré-échantillonnage bilinéaire a été utilisé. Suite à la différence d'image, un détecteur de bordures a été utilisé avec un seuil de 30 ainsi qu'un filtre médian avec une fenêtre de 3x3. Les figures suivantes présentent les images finales pour chaque

étape mentionnée au tableau précédent, en commençant par l'image initiale à la figure 6.16 a).

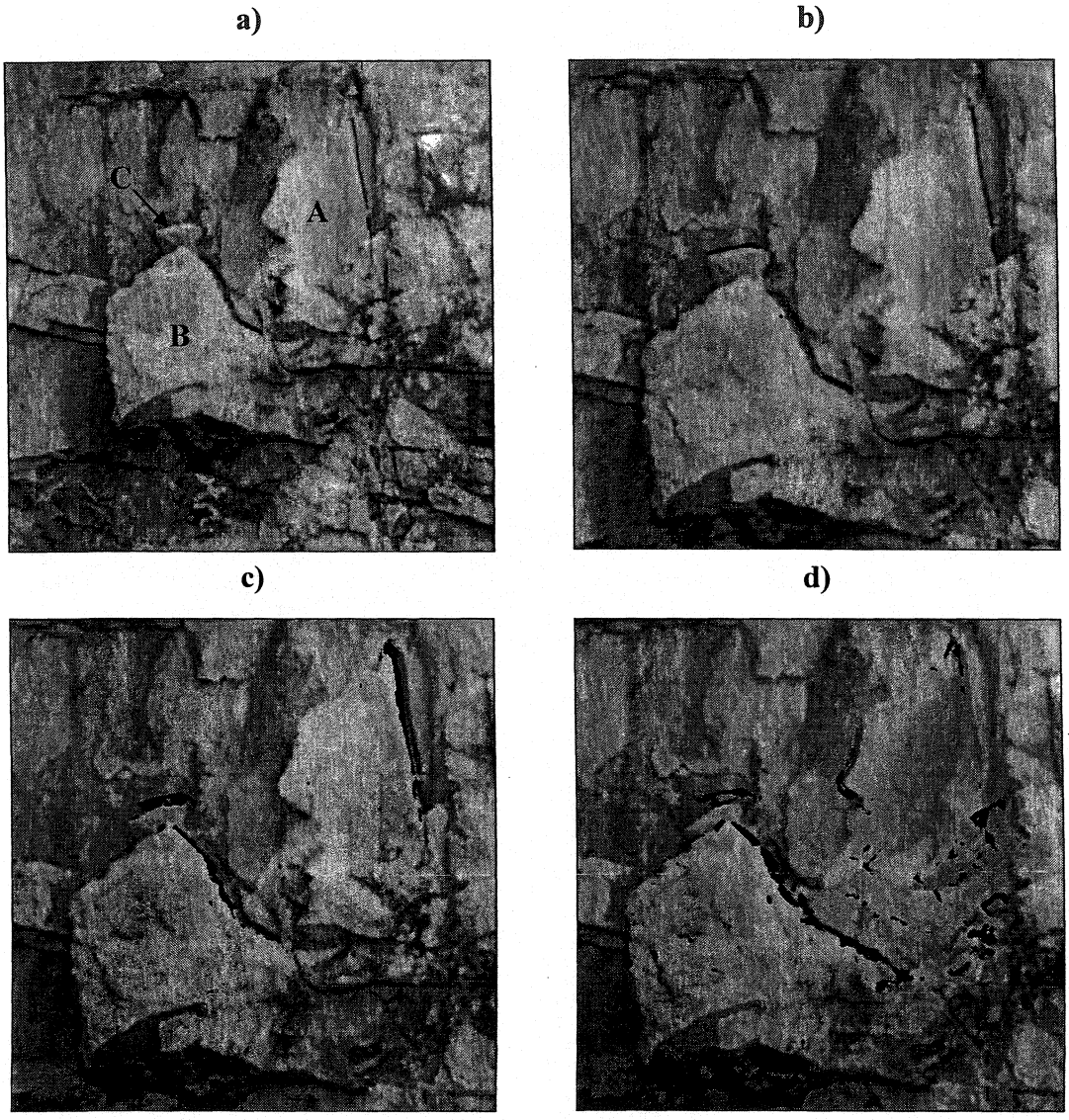


Figure 6.16. Zone 1 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil, b) suite à la 1ère étape, c) 2e étape et d) 3e étape.

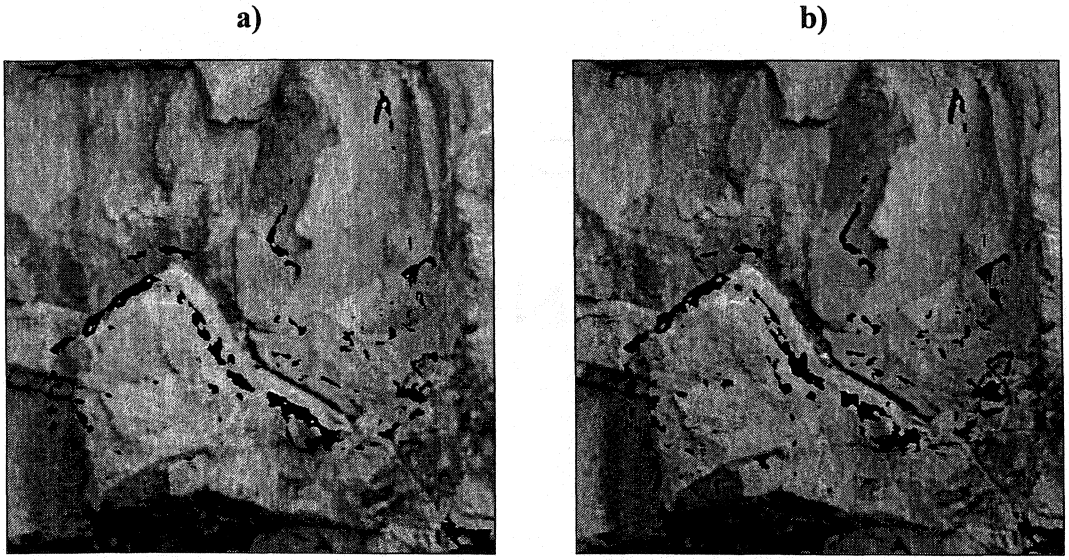


Figure 6.17. Zone 1 a) Suite à la 4^{e} étape et b) 5^{e} étape.

Les figures 6.16 et 6.17 illustrent bien la séquence des changements survenus sur les blocs de la zone #1. L'intérêt de ceci ne réside pas dans la quantification mais plutôt dans l'appréciation de l'évolution du bruit associé aux changements. À ce niveau, la méthodologie fonctionne bien. Seul un problème est notable. À la première étape, un déplacement mineur avait été occasionné à l'endroit du bloc, alors qu'aucun indice va en ce sens à la figure 6.16 b). Il serait intéressant de regarder l'image sans l'application du filtre médian. Celle-ci est présentée à la figure suivante.

a) b)



Figure 6.18. Images finales a) avant l'application du filtre médian et b) après l'application du filtre.

La qualité de l'image reproduite nuit à l'observation adéquate. Toutefois, à l'écran le bruit associé à un petit déplacement est visible sur l'image suite à la segmentation et disparaît suite à l'application du filtre médian. Ceci confirma donc que pour de très petits déplacements, la possibilité de le masquer avec un filtre médian est réelle.

6.2.2 Deuxième zone

Le cas de la 2^{e} zone reflète les limitations de la détection de mouvement sur un bloc ayant subi un déplacement normal par rapport au plan de l'image, proche de l'axe de prise de vue de la caméra. Cette zone est composée uniquement d'un bloc. Le tableau suivant résume les déplacements du bloc.

Tableau 6.6. Résumé des changements intervenus dans la zone #2.

Étude de cas #1 : CEPSUM	
Étape	**2e Zone**
1ère (19 août)	Déplacement mineur vers l'avant.
2e (19 août)	Déplacement vers l'avant.
3e (19 août)	Aucun changement.
4e (20 août)	Déplacement important vers le bas causé par la chute du bloc dans la zone 3.
5e (20 août)	Chute du bloc.

Les figures suivantes représentent les images finales de la deuxième zone, obtenues après chaque étape mentionnée au tableau 6.6.

a) **b)**

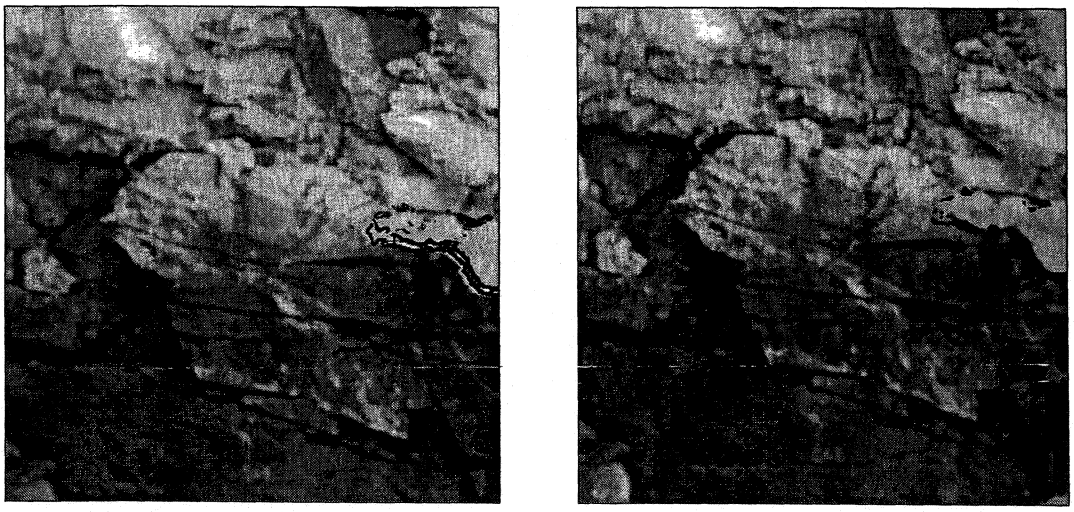


Figure 6.19. Zone 2 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil et b) suite à la 1ère étape.

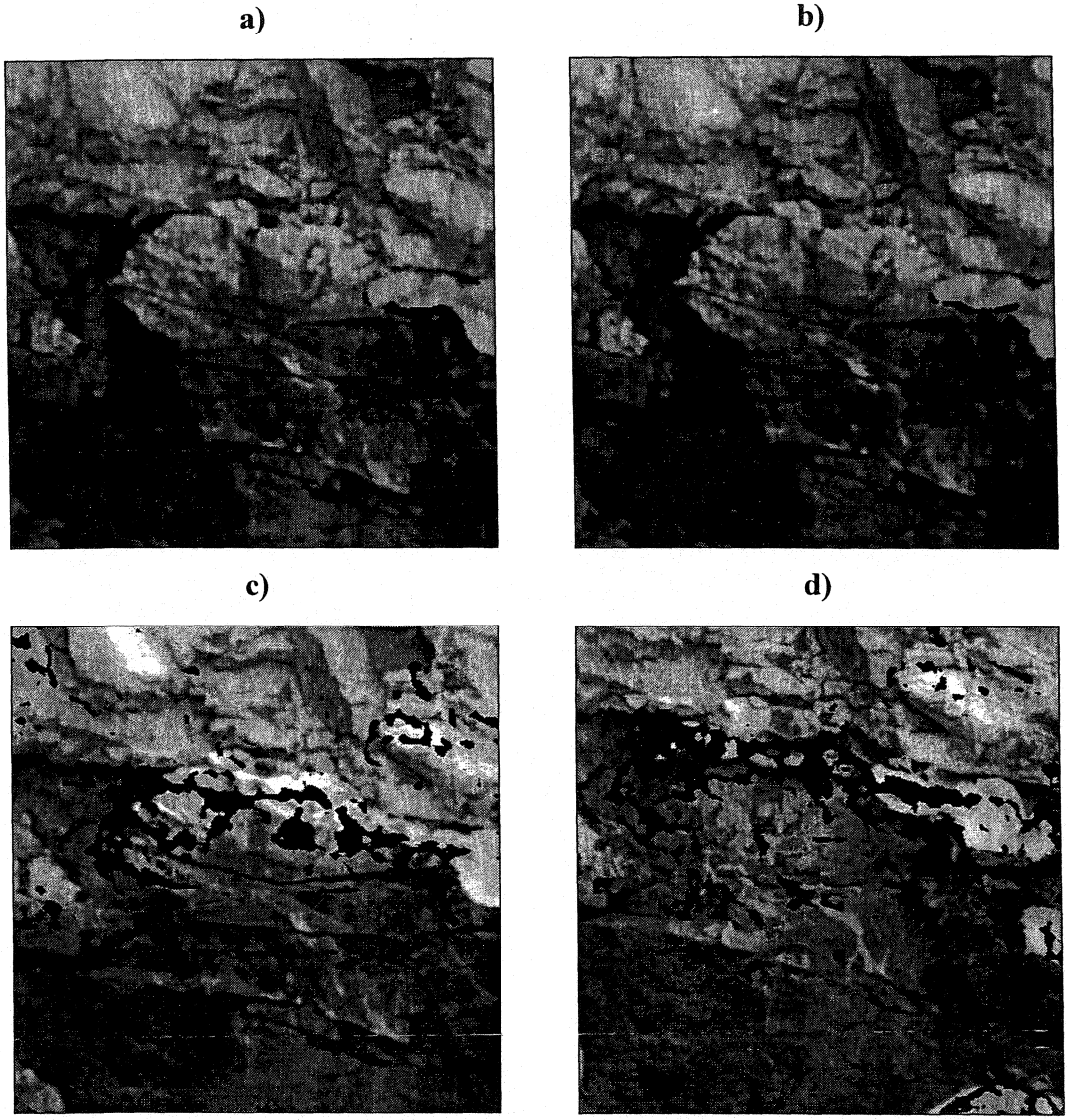


Figure 6.20. Zone 2 : Images finales suite à la a) 2^{e} étape, b) 3^{e} étape, c) 4^{e} étape et d) 5^{e} étape.

Les figures 6.19 b) et 6.20 a) et b) illustrent bien la difficulté de détecter un déplacement normal au plan de l'image et proche de l'axe de l'appareil. Sans l'application du filtre médian, on peut percevoir un peux de bruit sur le bloc, mais sans forme particulière et ne démontrant pas de façon claire la présence d'un changement.

6.2.3 Troisième zone

L'intérêt de la troisième zone est moindre. Le bloc n'a subi qu'une chute à la quatrième étape, sans mouvement préalable. La figure suivante présente la chute détectée sur l'image finale traitée.

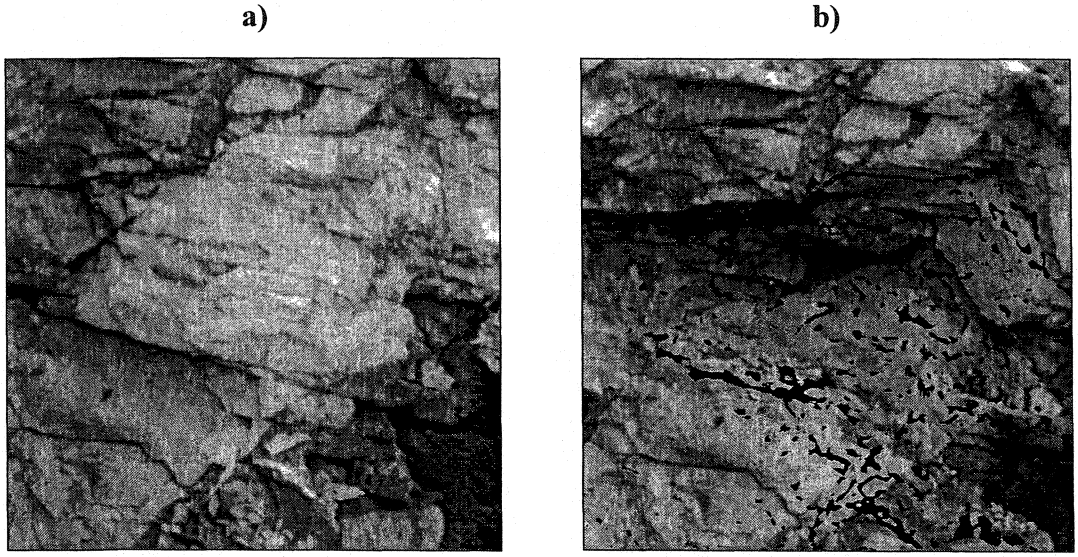


Figure 6.21. Zone 3 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil, b) après la chute à la 4^{e} étape.

Il est clairement visible que le bloc a chuté entre les deux images, même en faisant abstraction du bruit associé à la chute. Toutefois, lors d'une analyse rapide des résultat, ceci peut passer inaperçu, et donc la méthodologie est fort efficace pour mettre en relief la chute en question.

6.2.4 Quatrième zone

Finalement, le bloc de la 4^{e} zone est un petit bloc posé sur le dessus du massif. Celui-ci a été déplacé vers l'avant lors des deux premières étapes. Le déplacement (ainsi que la

chute à la troisième étape), comme en témoigne la figure suivante, est clairement possible à distinguer.

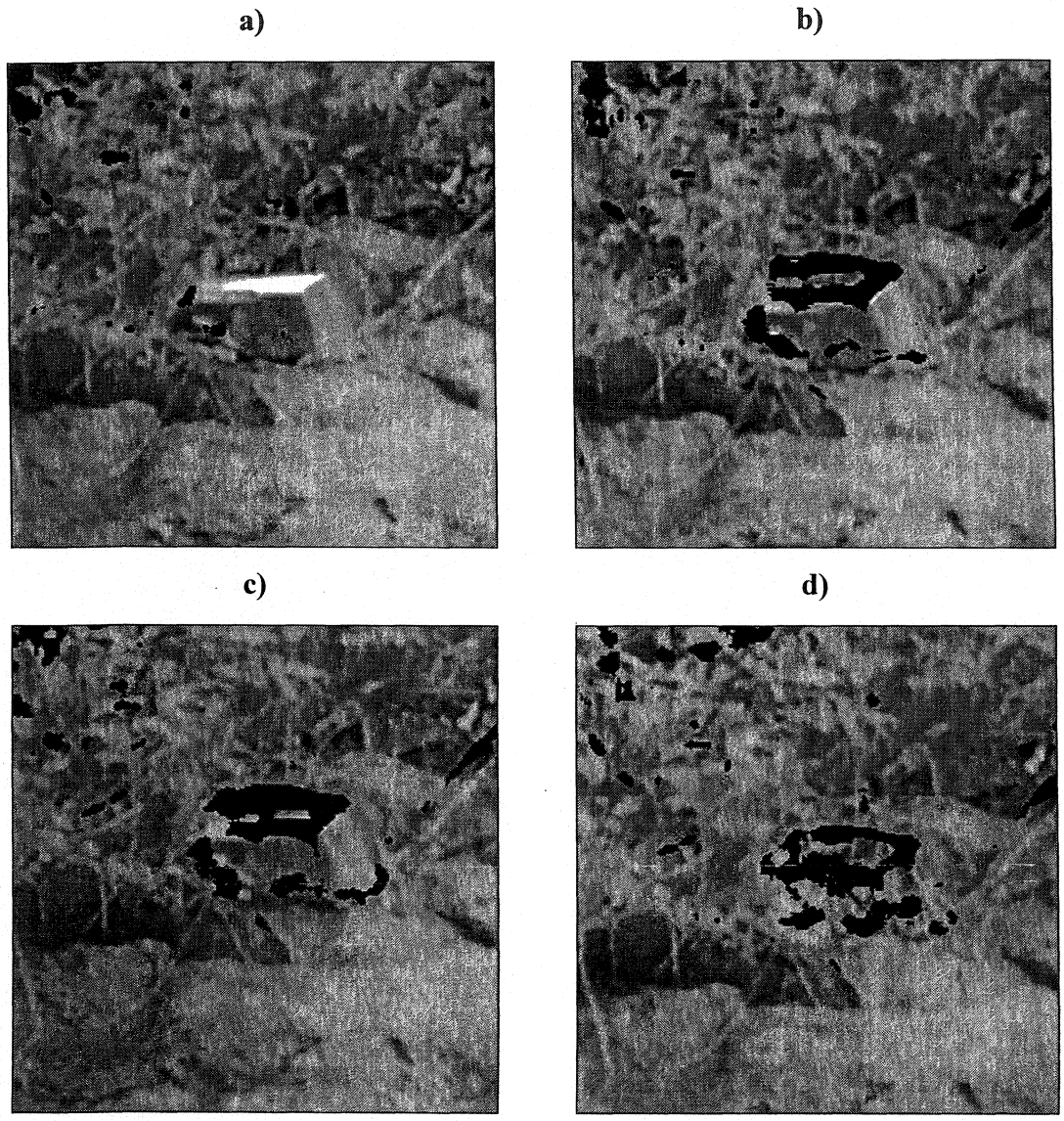


Figure 6.22. Zone 4 a) Images sans changement, avec repositionnement d'appareil, b) 1ère étape, c) 2e étape et d) 3e étape.

Ceci conclue la revue des déplacements survenus pendant les journées du 19 et 20 août. L'étude du cas se tourne donc vers l'image obtenue le 27 novembre, soit trois mois plus tard, alors qu'un changement majeur de flore et de luminosité différencie les deux images. L'image initiale et l'image subséquente sont présentées ici avec leur histogramme d'intensités respectif.

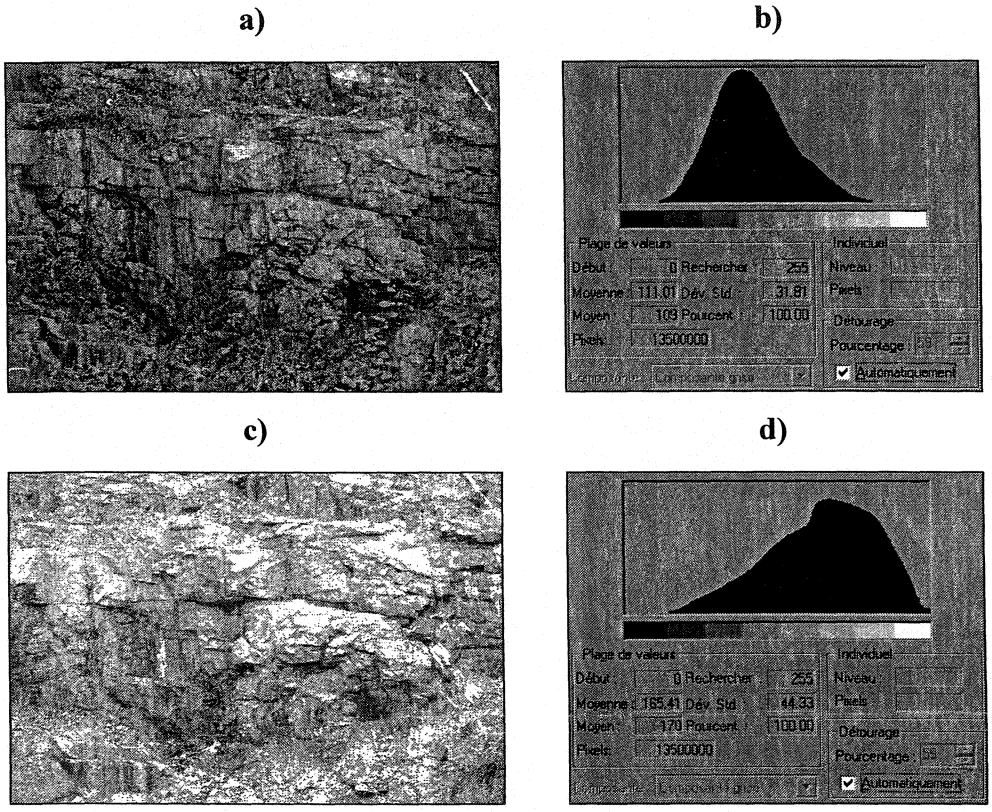


Figure 6.23. a) Image initiale,b) histogramme initial, c) image subséquente et d) histogramme subséquent.

Les histogrammes des images démontrent clairement la différence en ce qui concerne la moyenne de l'intensité des pixels, 111.01 pour l'image initiale et 165.41 pour l'image subséquente et en ce qui concerne la distribution des intensités.

En rappel, l'image initiale avait été ajustée avec une égalisation des niveaux à une limite de 99.95%. Pour réajuster l'image subséquente, un ajustement non linéaire des courbes de tonalité a été employé. L'image résultante de ce traitement est présentée à la figure suivante.

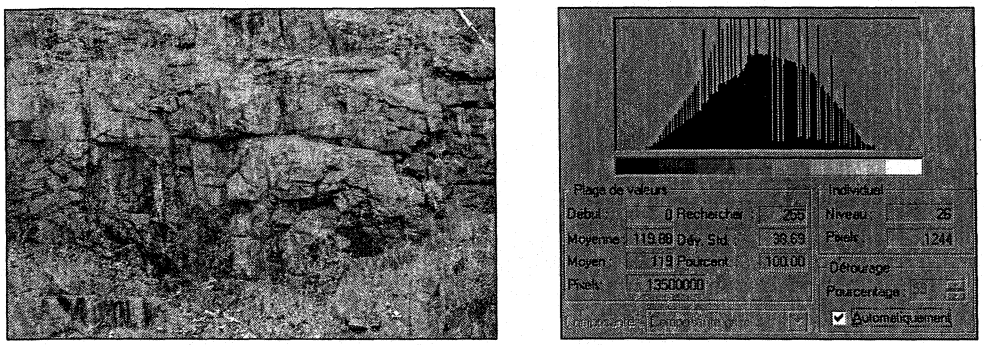


Figure 6.24. Image subséquente prétraitée avec l'ajustement de la courbe de tonalité.

La distribution des intensités se rapproche de l'image initiale, avec une moyenne des intensités de 119.88. Cette image, prise avec une sensibilité à la lumière de l'appareil différente de l'image d'origine, fût difficile à prétraiter. Toutefois, elle est d'apparence beaucoup plus proche de l'image initiale que l'image subséquente simplement prétraitée avec l'ajustement des niveaux.

Un recalage de premier ordre avec un ré-échantillonnage bilinéaire est alors appliqué avec Geomatica. Les équations de transformations établies lors du recalage sont les suivantes.

$$x' = -34.15666 + 0.9990136x + 0.0483021y \quad (6.1)$$

$$y' = 99.68637 - 0.04893937x + 0.9997221y \quad (6.2)$$

On peut remarquer que les constantes de transformations sont assez importantes, même en dépit d'un procédé de repositionnement efficace. En raison du temps froid,

l'intensité des lasers servant au repositionnement a diminuée considérablement lors de l'essai, même recouvert d'une laine isolante. L'exactitude du repositionnement a donc été difficile à atteindre, comme en témoigne le résultat du recalage à la figure suivante.



Figure 6.25. Image corrigée par Geomatica avec un recalage quadratique et un ré-échantillonnage bilinéaire.

Suite au recalage, une différence d'image a été effectuée et l'image résultante à été soumise à l'application du détecteur de bordures, toujours à un seuil de 30, et d'un filtre médian avec deux fenêtres, l'une de 3x3 et l'autre de 5x5 pixels. Les quatre images résultantes sont présentées aux figures 6.27 et 6.28.

a)



b)

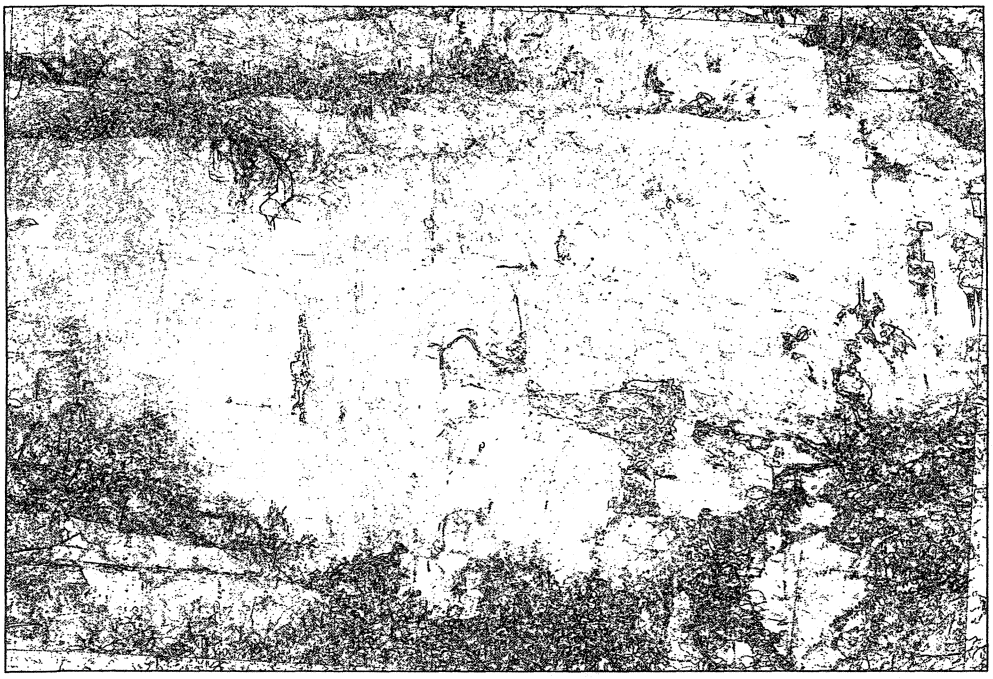
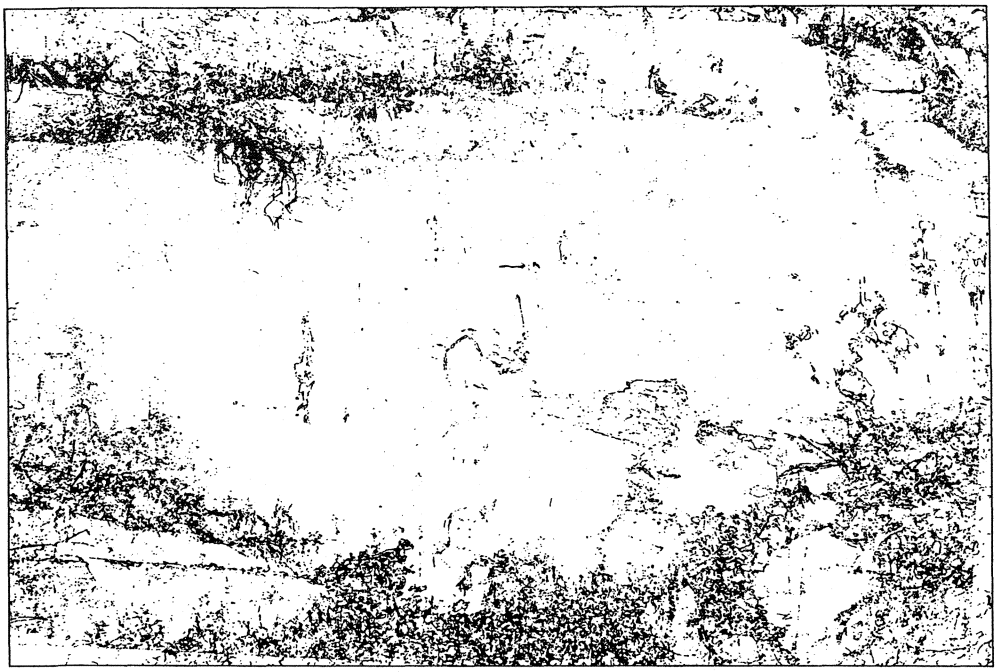


Figure 6.26. Images obtenues suite à a) différence d'image et b) la segmentation.

a)



b)



Figure 6.27. Images obtenues suite à a) l'application d'un filtre médian 3x3 et b) l'application d'un filtre médian 5x5.

Le tableau suivant présente les moyennes d'intensité associées aux deux figures précédentes.

Tableau 6.7. Moyennes des intensités pour les images traitées aux figures 6.26 et 6.27.

Image	Geomatica
Recherche des bordures	211.05
Filtre médian 3x3	224.21
Filtre médian 5x5	229.71

En raison de la différence existant entre la distribution des intensités (même suite au prétraitement), du repositionnement plus difficile avec la baisse d'intensité des lasers et de la différence de sensibilité à la lumière de l'appareil entre les deux images, la différence d'image, 6.26 a), présente un niveau de bruit supérieur à la moyenne des essais effectués jusqu'à présent. Tout de même, avec l'application de la segmentation et du filtre médian, les images finales permettent une identification correcte des zones ayant subi un déplacement. On remarque que l'application du filtre médian avec une fenêtre plus grande ne permet pas une meilleure reconnaissance des mouvements, mais plutôt le contraire.

Dans un tel cas, l'utilisateur doit faire preuve de jugement en analysant les images. Il est clair que le bruit en périphérie de l'image 6.27 a) est associé à la végétation environnante, donc une réduction supplémentaire du bruit ne donnerait pas d'information nouvelle. Celle-ci est donc superposée à l'image corrigée pour obtenir l'image finale, présentée à la figure suivante.

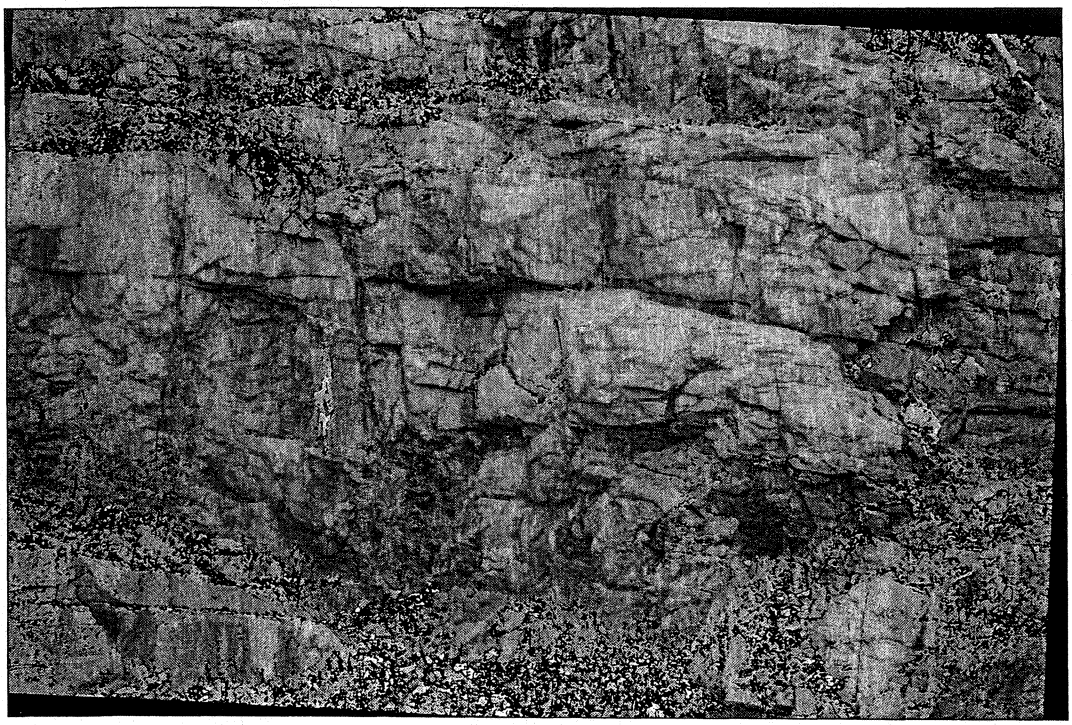


Figure 6.28. Image finale du deuxième cas d'étude.

Pour mieux apprécier l'identification des zones importantes sur l'image finale, elles sont présentées à la figure suivante.

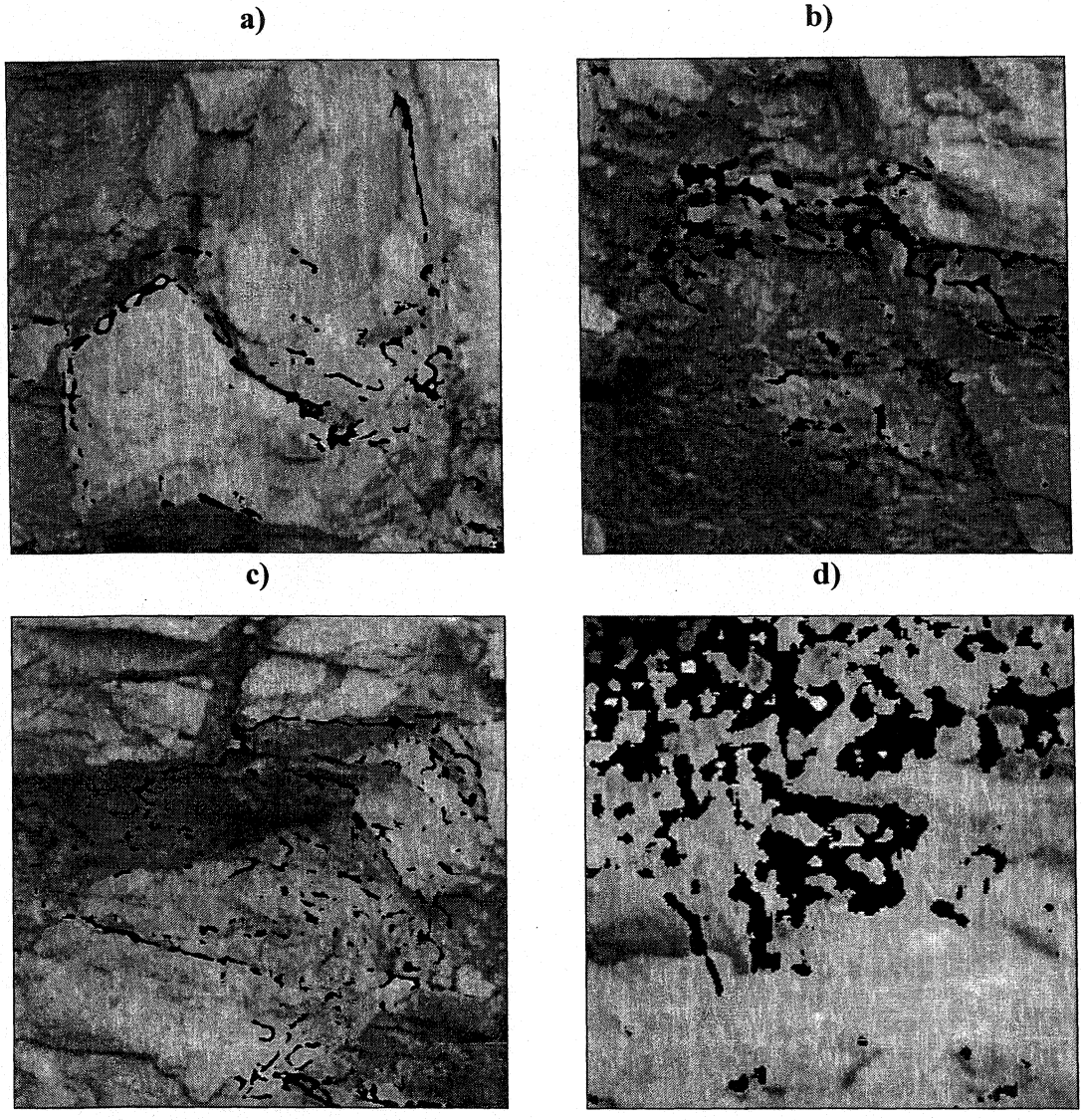


Figure 6.29. Image finale a) Zone 1, b) Zone2, c) Zone 3 et d) Zone 4.

6.3 Troisième cas d'étude : Galeries souterraines, Mine Doyon

Le dernier cas d'étude, le seul d'ailleurs qui fût un cas réel, sans intervention intentionnelle pour générer des mouvements de blocs, s'est effectué à la Mine Doyon en Abitibi. Des images ont été prises sous terre dans quelques galeries jugées intéressantes pour le projet. Les essais ont été effectués en trois jours, soit les images initiales prises les 8 et 30 juillet 2003, et les images subséquentes prises le 1er octobre de la même année. Au moment de l'acquisition des images, la source de lumière était la même pour tous les essais. Celle-ci était assurée par deux projecteurs de 500 Watts chaque, posées sur les extrémités du montage. La position et la hauteur du trépied furent marquées à l'aide du laser de nivellement, spécialement fixé sur le dessus du boîtier autour de l'appareil.

Les images ont été effectuées à trois endroits différents de la Mine, à deux endroits du niveau 14 et au niveau 9.2. D'autres images ont également été prises ailleurs, mais n'ont pu être complétées avec des images subséquentes en raisons de l'exploitation de certains chantiers. Toutes les images ont été prises avec l'appareil Kodak DCS Pro 14n avec une résolution de 13.5 M pixels. La lentille à distance focale ajustable de 28-70 mm a été utilisée pour tous les essais. Au moment des prises subséquentes, le niveau de sensibilité à la lumière de l'appareil était différent qu'à l'acquisition des images initiales. Ce fait n'était pas connu au moment de la prise d'images.

6.3.1 Niveau 14 : Station d'arpentage 44-61

Le premier site étudié dans la Mine Doyon était situé au niveau 14, à la station d'arpentage 44-61. La figure suivante présente la scène utilisée pour l'essai.

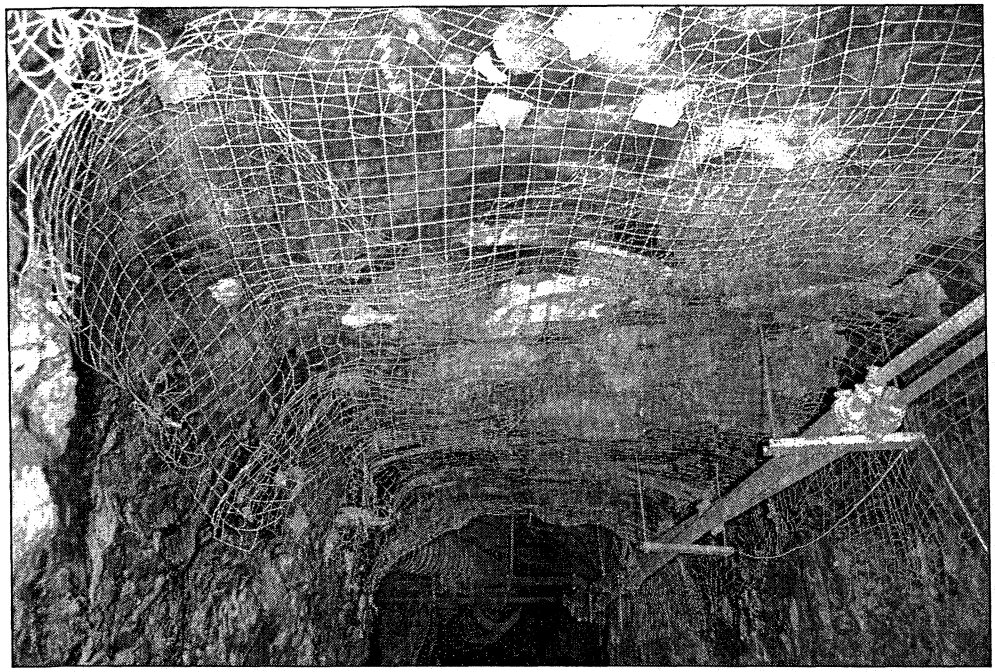


Figure 6.30. Vue du toit, à partir de la station d'arpentage 44-61 au niveau 14 de la Mine Doyon.

Le tableau suivant résume les paramètres optiques pour ce cas d'étude.

Tableau 6.8. Paramètres de prises de vue utilisés.

Paramètre	Image initiale (8 juillet)	Image subséquente (1 octobre)
Vitesse	1.5 s.	1.0 s.
Ouverture	8.0	16
Sensibilité	0	320
Distance focale	35 mm	35 mm

Un des problèmes rencontrés à cet endroit lors de la prise subséquente d'images fût la pose d'un conduit de ventilation en direction de la section de la galerie en développement. Pour ce qui est du recalage avec Geomatica, ce problème est de moindre importance car les points de contrôle peuvent être sélectionnés autour de la

conduite, sauf qu'une perte d'information persiste, cumulée au problème de sensibilité de l'appareil.

La figure suivante présente l'image initiale et l'image subséquente en tons de gris ainsi que leur histogrammes respectifs.

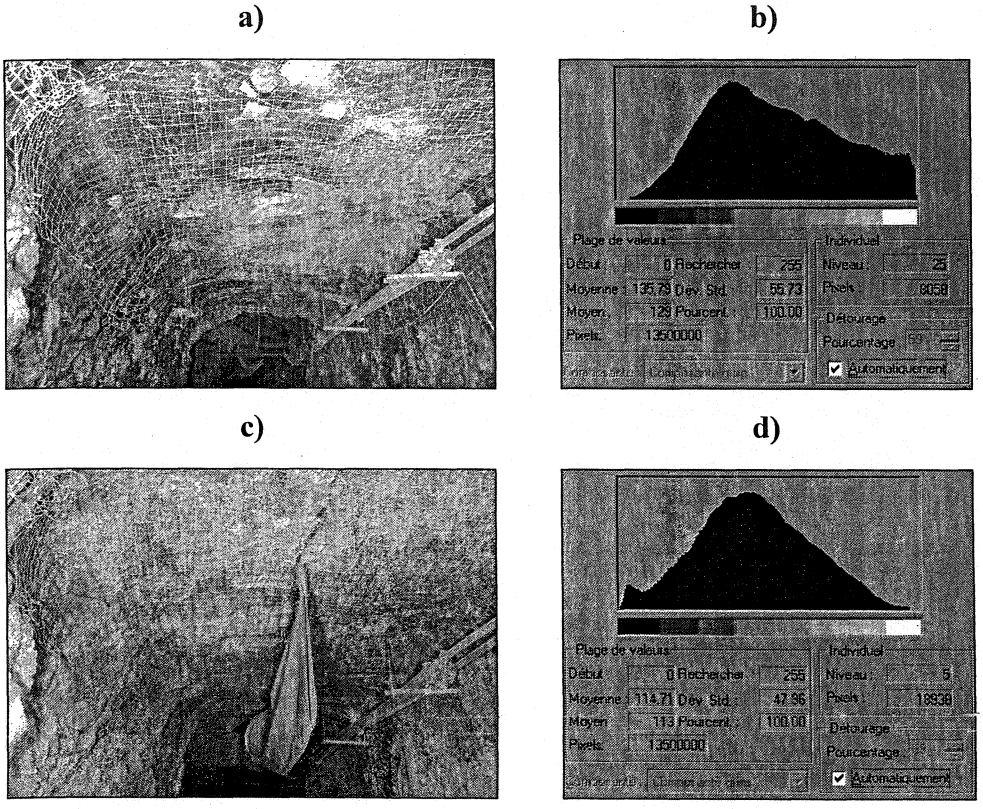


Figure 6.31. a) image initiale, b) histogramme initial, c) image subséquente et d) histogramme subséquent.

La différence entre les distributions des intensités est assez marquée. Lors de l'image initiale, le grillage au toit a semblé réfléchir la lumière et donc parait beaucoup plus clair qu'au moment de l'image subséquente. Ce type de différence est difficile à enlever car elle se situe dans une plage très restreinte des valeurs. Étant donné que l'image subséquente présente des allures mieux distribuées, une égalisation des niveaux

à un seuil de 99.95% est utilisée comme prétraitement. C'est une des rares fois où l'image initiale est ajustée en fonction de l'image subséquente. Dans le cas de l'image initiale, un ajustement non linéaire de la courbe d'intensité a permis d'obtenir le résultat suivant.

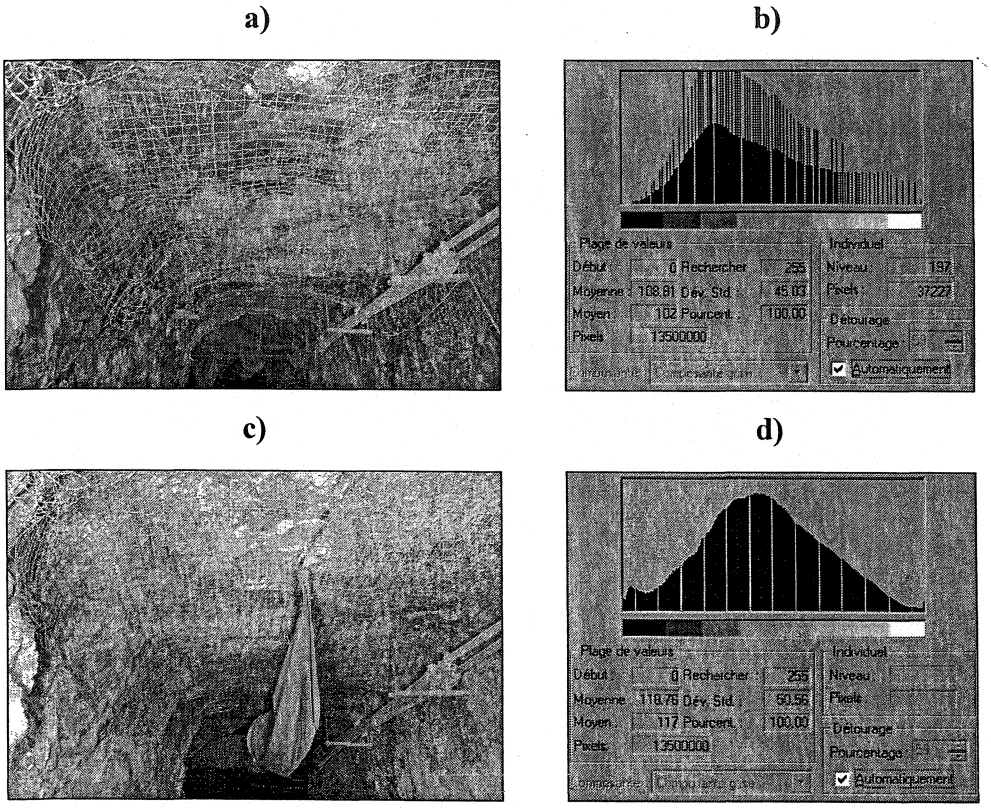


Figure 6.32. Suite au prétraitement a) image initiale, b) histogramme initial, c) image subséquente et d) histogramme subséquent.

Les moyennes d'intensité des pixels se trouvent à être de 108.81 pour l'image initiale et de 118.76 pour l'image subséquente. La figure suivante illustre bien le problème associé au niveau de sensibilité de l'appareil. Elle démontre l'agrandissement d'une zone au toit correspondant au coin d'une plaquette de boulon et des mailles de grillage.

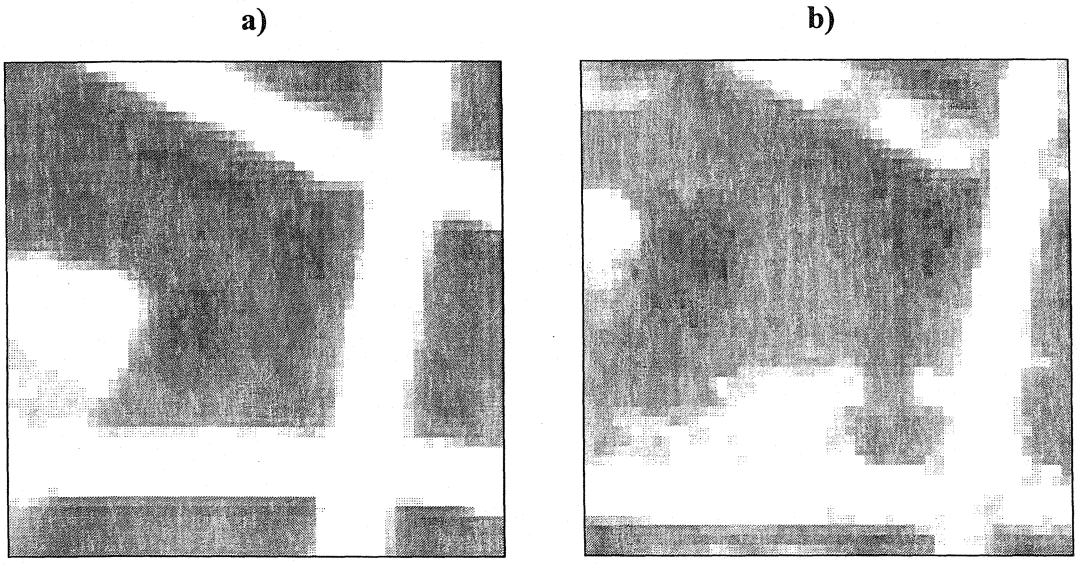


Figure 6.33. Distribution de l'intensité avant le prétraitement sur a) image initiale et b) subséquente.

Le phénomène démontré ci-haut s'amplifie sur les éléments plus en profondeur dans la galerie, au point de n'être plus distinguable. Ceci est très problématique car ce même problème se retrouve sur toutes les images prises lors des essais à Doyon. Le prétraitement ne peut corriger ces zones floues.

Le recalage a été effectué par la méthode linéaire avec un ré-échantillonnage bilinéaire. Les équations de transformation établies lors du recalage de premier ordre sont les suivants.

$$x' = 1.797445 + 1.009465x - 0.01934503y \quad (6.3)$$

$$y' = -41.17099 + 0.006314974x + 1.021305y \quad (6.4)$$

Le résultat du recalage et la différence obtenue entre l'image corrigée et l'image initiale sont présentés aux figures suivantes.

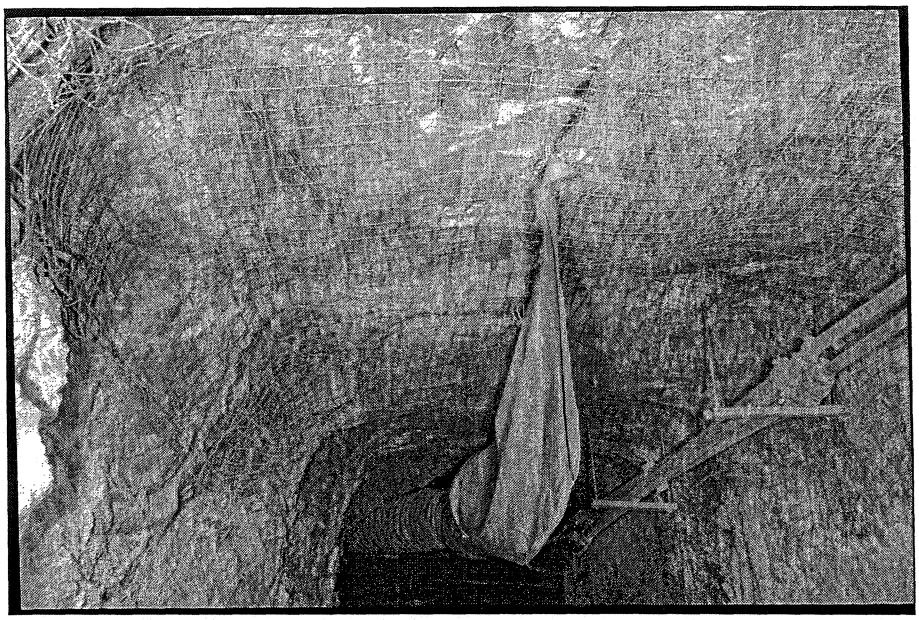


Figure 6.34. Image corrigée suite au recalage.

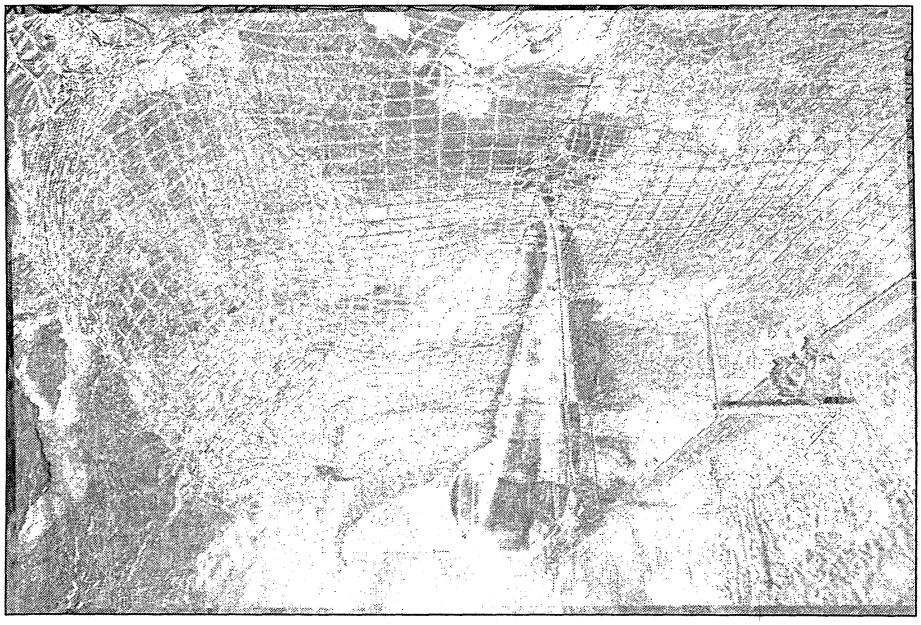


Figure 6.35. Différence d'image présentant une moyenne d'intensité de 213.81.

On peut s'attendre à obtenir une image avec énormément de bruit suite à la segmentation. Ce site n'est pas sans rappeler le site situé à l'arrière de l'École Polytechnique, où le grillage à l'avant de la paroi était souvent problématique lors du recalage. Dans un tel cas, l'utilisation d'un filtre médian est une nécessité. Toutefois, pour réduire le bruit davantage, un seuil plus bas de détection de bordures peut être employé. La figure suivante présente deux procédures. Dans la première, l'image différenciée est soumise à un détecteur de bordures avec un seuil à 30, et ensuite deux différents filtres médians, l'un de 3x3, l'autre de 5x5 pixels. Pour la deuxième procédure, un détecteur de bordures avec un seuil de 10 est utilisé avant l'application des deux mêmes filtres médians.

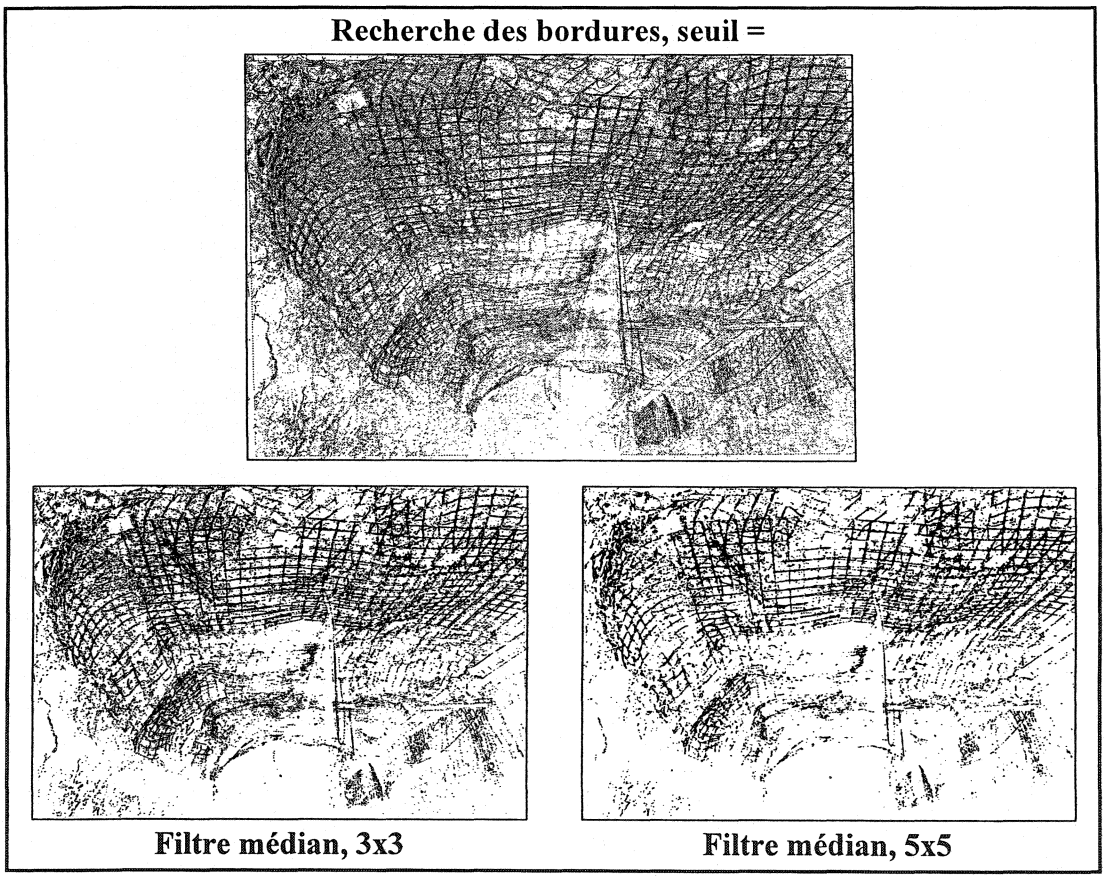


Figure 6.36. Images résultantes de l'application de la segmentation à un seuil de 30 et du filtre médian avec des fenêtres de 3x3 et 5x5 pixels.

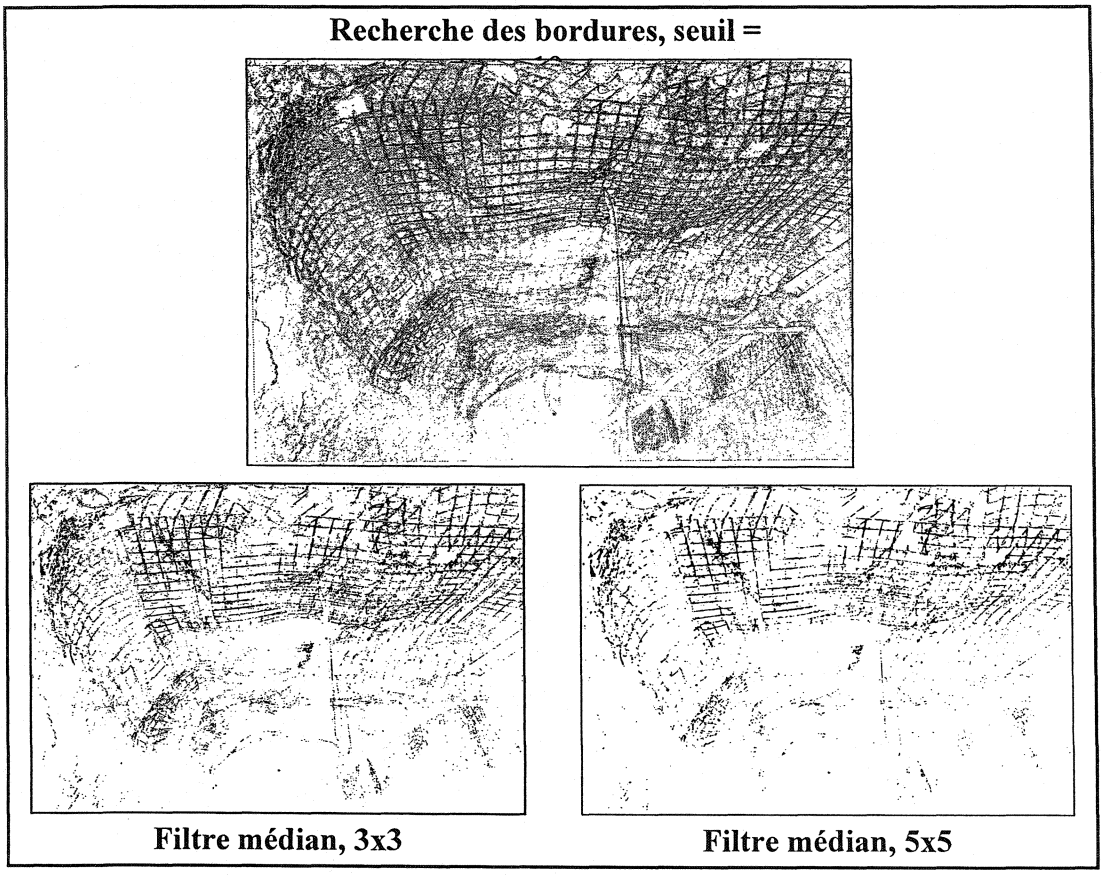
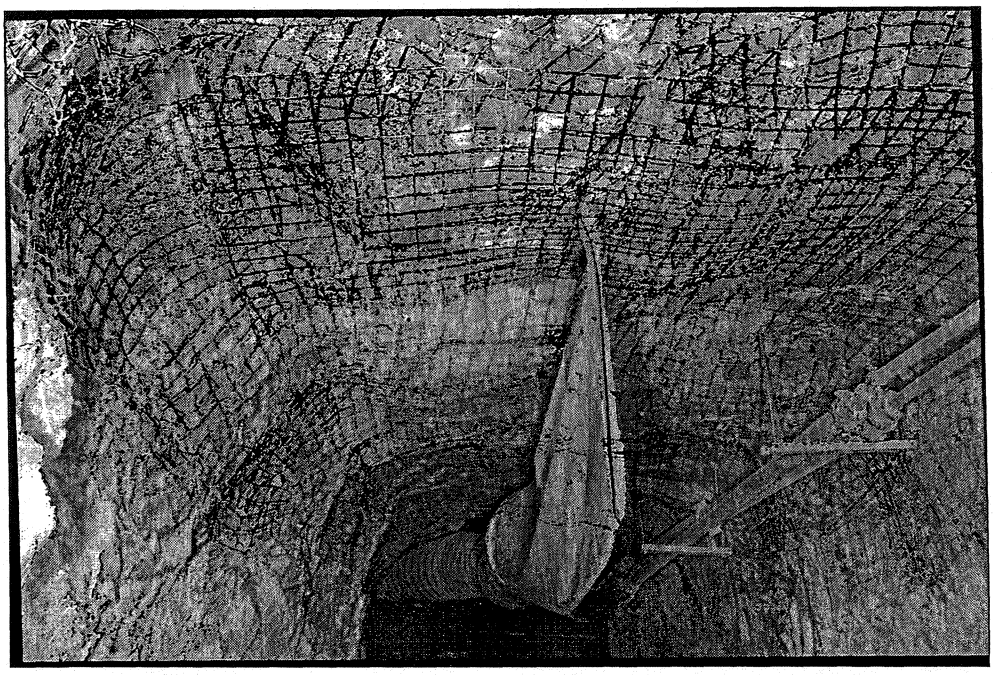


Figure 6.37. Images résultantes de l'application de la segmentation à un seuil de 10 et du filtre médian avec des fenêtres de 3x3 et 5x5 pixels.

Dans tous les cas, énormément de bruit résiduel demeure sur les images. On peut le distinguer facilement par la géométrie du grillage. Avec le seuil à un minimum, le niveau bruit diminue, mais celui-ci est uniquement concentré sur les zones de grillage. En augmentant la fenêtre du filtre médian, le bruit associé à la texture de la roche disparaît. Il est donc préférable de maintenir l'information sur la texture de la roche, la seule disponible avec ces images. À titre de comparaison, les deux images finales, résultantes des deux seuils de segmentation avec un filtre médian à 3x3, sont présentées à la figure suivante. Sur ces images, aucune information n'est disponible quand à un mouvement de bloc.

a)



b)

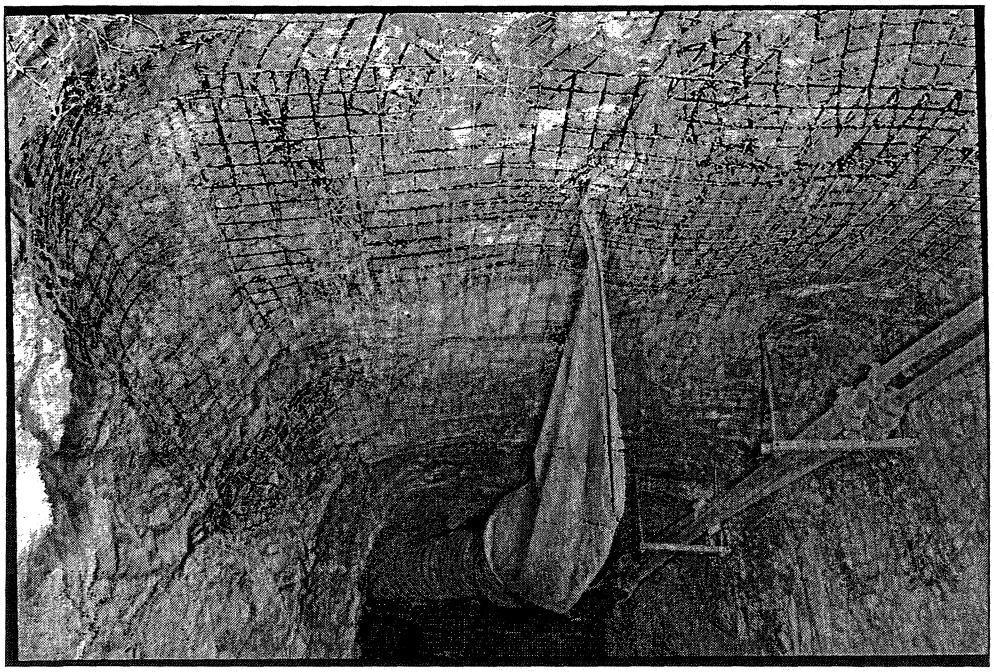


Figure 6.38. Images finales résultantes de l'application de la segmentation à un seuil de a) 30 et du filtre médian 3x3 et b) 10 et du filtre médian 3x3.

6.3.2 Niveau 14 : Arrière côté - J

Une deuxième série d'images a été prise au niveau 14 de la mine, cette fois-ci à l'arrière côté J. L'emplacement n'était pas idéal à cet endroit, la galerie de mine étant très étroite avec une voie ferrée au centre. Les images ont été prise en ligne oblique par rapport à la paroi de façon à permettre une plus grande surface de vue. Le tableau suivant reprend les paramètres optiques utilisés.

Tableau 6.9. Paramètres de prises de vue utilisés.

Paramètre	Image initiale (8 juillet)	Image subséquente (1 octobre)
Vitesse	1.5 s.	1.5 s.
Ouverture	22	22
Sensibilité	0	320
Distance focale	28 mm	28 mm

Les histogrammes des intensités des images avant le prétraitement étaient de même forme et distribution, donc le prétraitement s'est limité à un égalisation des niveaux standard (99.95%). La figure suivante présente l'image initiale et subséquente. Celles-ci ont été recadrées de manière à retenir que la section de l'image qui présente un intérêt réel. Les moyennes d'intensité des pixels sont de 162.93 pour l'image initiale et de 169.87 pour l'image subséquente.

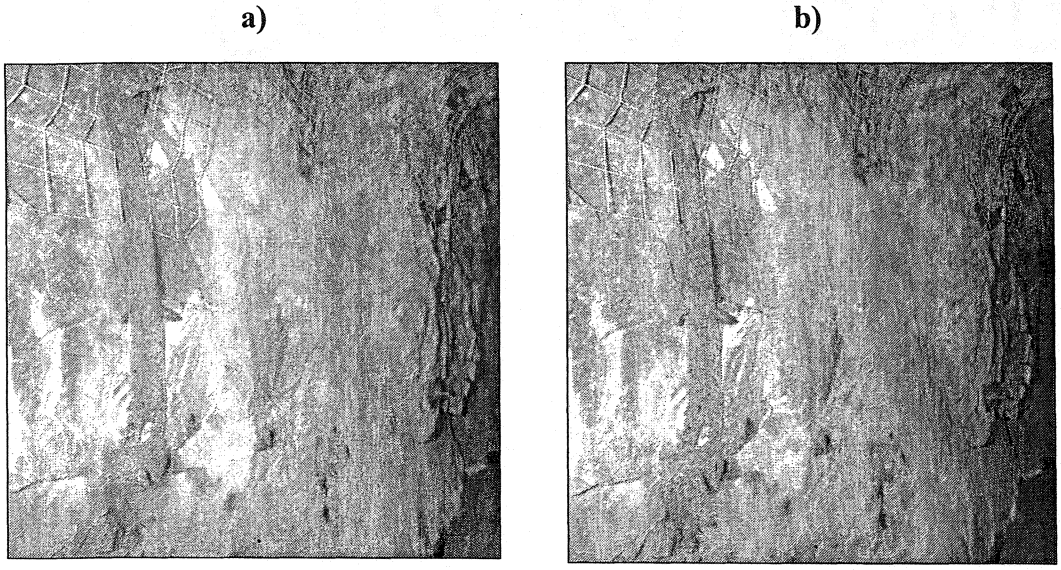


Figure 6.39. Niveau 14 : Arrière côté J a) image initiale et b) image subséquente.

Le recalage a été effectué avec une méthode linéaire et un ré-échantillonnage bilinéaire. Les équations de transformations établies lors du recalage sont les suivantes.

$$x' = -1.035817 + 0.9893985x + 0.007513137y \quad (6.5)$$

$$y' = -26.55619 - 0.006909262x + 1.006856y \quad (6.6)$$

L'image corrigée résultante de la transformation décrite ci-dessus est présentée à la figure suivante. On peut y voir également l'image obtenue par différence entre l'image corrigée et l'image initiale.

a) b)

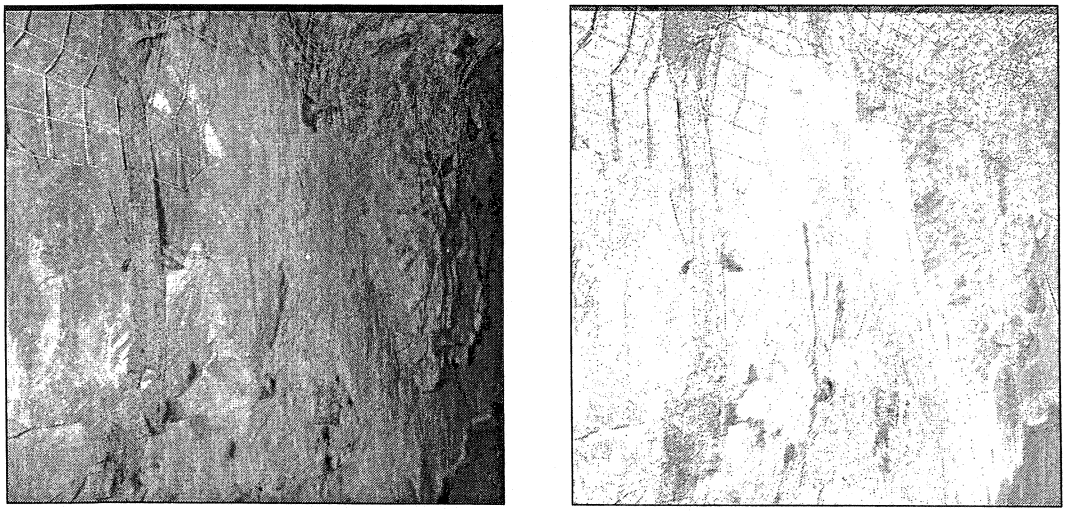


Figure 6.40. Niveau 14 : Arrière côté J a) image corrigée et b) image différenciée.

Encore une fois, le grillage présent sur la partie supérieure de l'image démontre le plus de bruit sur l'image différenciée. Pour compléter le post traitement, l'algorithme détecteur de bordures avec un seuil de 30 et le filtre médian 3x3 ont été appliqués. Les résultats sont présentés à l'image suivante.

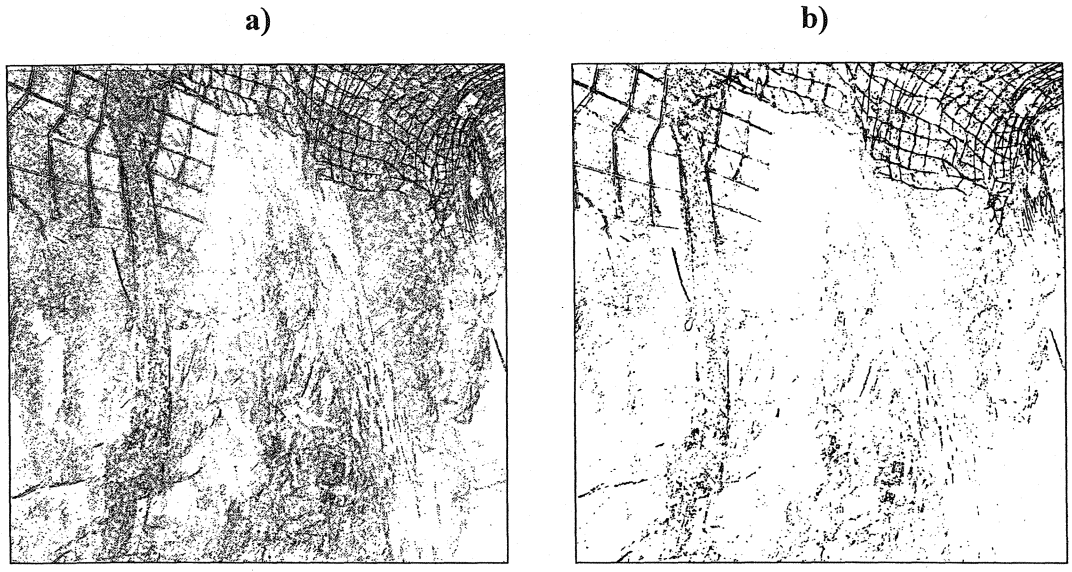


Figure 6.41. Image obtenue avec l'application du a) détecteur des bordures avec un seuil de 30 et b) filtre médian 3x3.

L'image finale produite par la superposition de la figure 6.41 b) sur l'image corrigée est présentée à la figure suivante. On peut s'apercevoir que le bruit sur l'image, à l'exception du grillage, se concentre sur les zones de relief sur la paroi. Entre les deux séries d'image sur le terrain, une installation électrique munie d'une lumière fût installée juste en aval de la paroi photographiée. Elle n'apparaît pas à l'image, car elles ont été recadrées avant de procéder au prétraitement. Donc, même avec une correction d'intensité, il est difficile d'éliminer les effets néfastes d'une source lumineuse variable. On ne peut donc pas statuer avec certitude dans un sens ou dans l'autre quand à la possibilité d'un mouvement généralisée de la paroi le long du plan présent sur l'image.



Figure 6.42. Image finale pour l'essai situé à l'arrière côté J du niveau 14.

6.3.3 Niveau 9.2

Finalement, le dernier site étudié à la Mine de Doyon est localisé au niveau 9.2, à l'endroit d'un des contacts entre le gisement exploitable et la roche dure. Pour cet essai, l'ensemble de la galerie fût photographié de manière à obtenir une « coupe ». Étant donné que la galerie se trouve en milieu de roche plus tendre, les déplacements qui auront lieu dans le massif se feront plutôt par convergence. Un des inconvénients du site est que la roche soit en partie recouverte de béton projeté. Avec le temps, les eaux d'infiltration viennent modifier considérablement la couleur du béton sur les murs de façon non uniforme. La figure suivante présente le site utilisé pour cet essai.

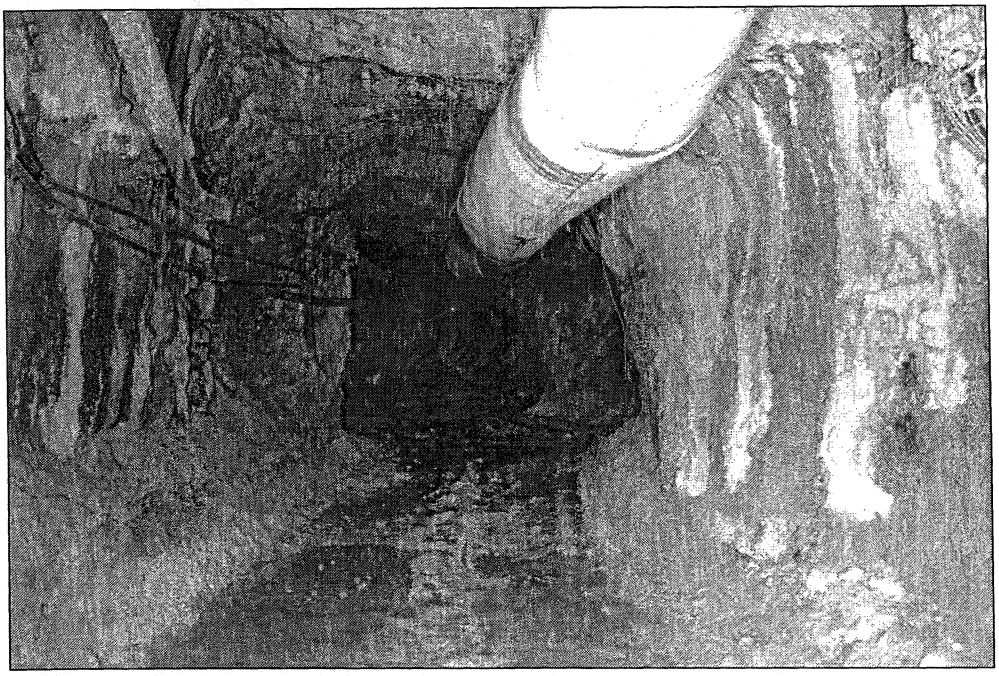


Figure 6.43. Site utilisé au niveau 9.2 de la mine Doyon.

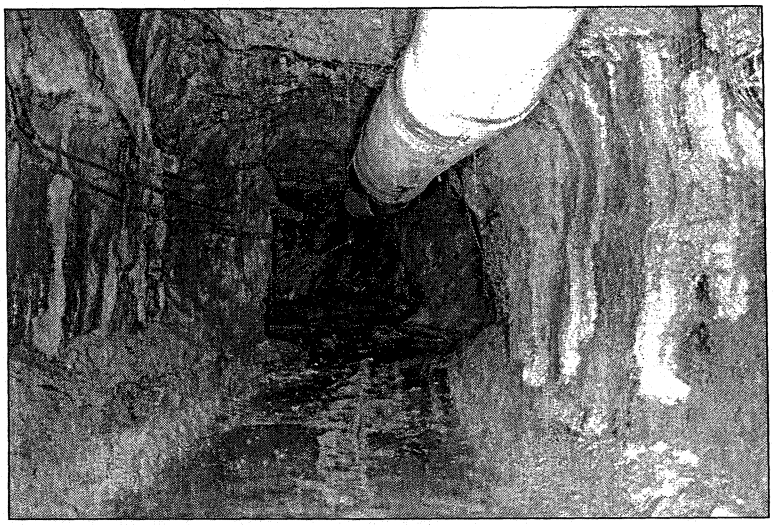
Le tableau suivant indique les paramètres de prise de vue utilisés.

Tableau 6.10. Paramètres de prises de vue utilisés.

Paramètre	Image initiale (30 juillet)	Image subséquente (1 octobre)
Vitesse	1.5 s.	1.5 s.
Ouverture	6.7	11
Sensibilité	0	320
Distance focale	28 mm	28 mm

Pour les distributions d'intensités sur les images retenues, celles-ci étaient presque identiques avec des moyennes de 128.57 pour l'image initiale et 126.91 pour l'image subséquente. Ces valeurs ont été obtenues suite au prétraitement, qui a consisté en une égalisation des niveaux à un seuil de 99.95%. La figure suivante présente l'image initiale et subséquente.

a)



b)

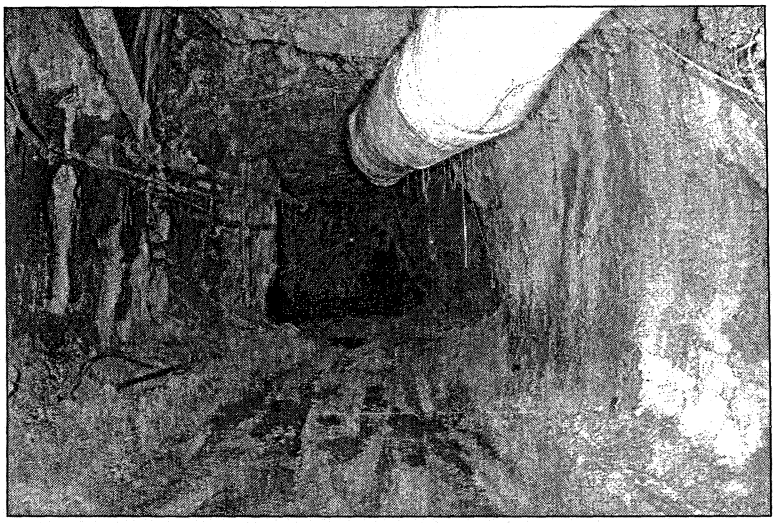


Figure 6.44. a) Image initiale et b) image subséquente, suite au prétraitement.

À l'œil, on distingue clairement les différences remarquables entre les deux images, dont les traces de suintement sur les parois et les traces de boue sur le chemin. Un appareil qui n'était pas sur l'image initiale est également posé sur le bord du mur gauche sur l'image subséquente.

Le recalage effectué fût la même que pour les autre essais, c'est-à-dire linéaire avec un ré-échantillonnage bilinéaire. Les équations de transformation établies pour le recalage sont :

$$x' = 22.45377 + 0.987512x + 0.008717192y \quad (6.7)$$

$$y' = -13.82886 - 0.007334919x + 0.9906388y \quad (6.8)$$

L'image corrigée résultante des transformations appliquées est présentée à la figure suivante.

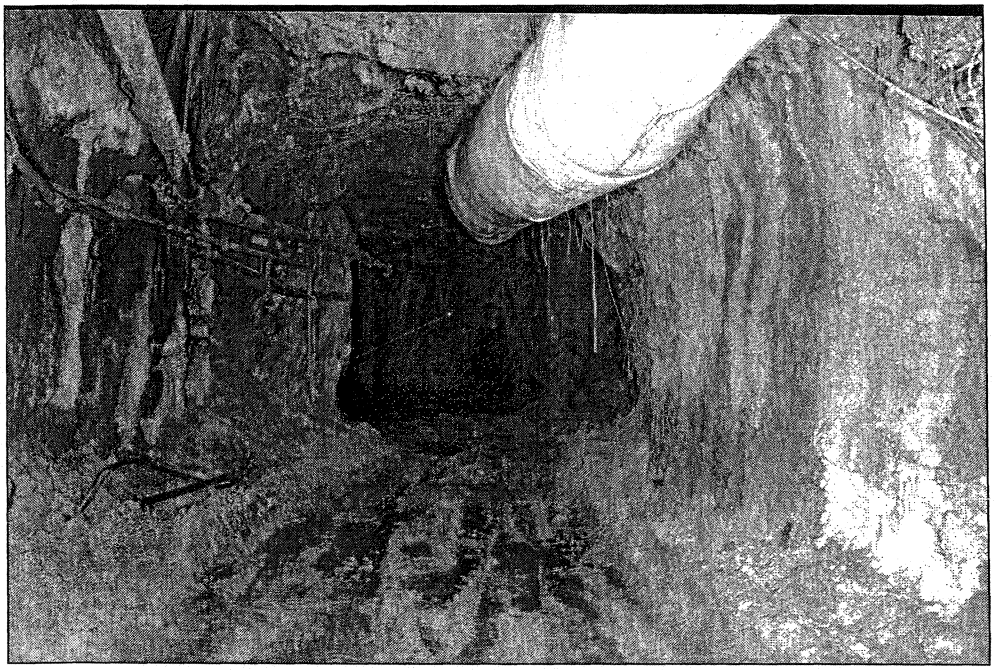
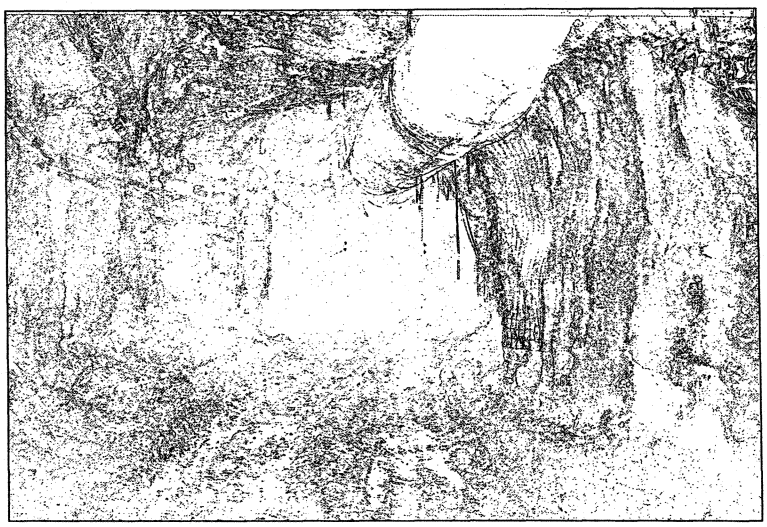


Figure 6.45. Image corrigée suite au recalage.

Le post traitement pour cet essai est identique aux autres cas, c'est-à-dire une détection de bordures à un seuil de 30 et un filtre médian 3x3. Les images correspondantes sont présentées à la figure suivante.

a)



b)

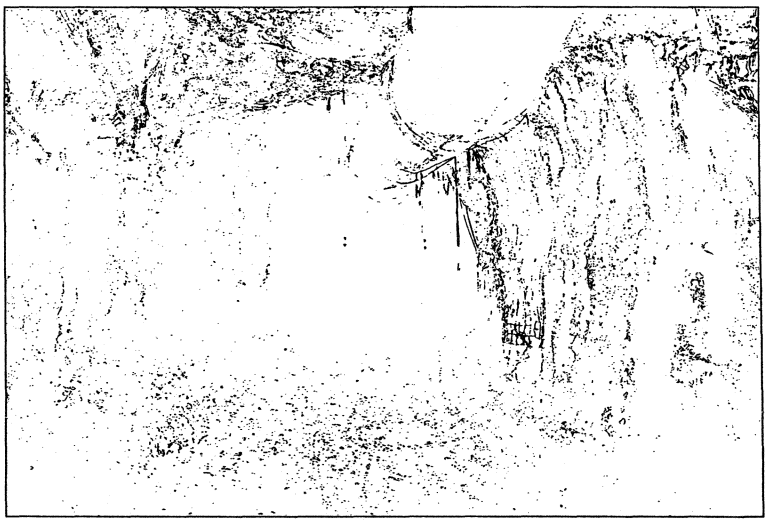


Figure 6.46. a) Image résultante de l'algorithme détecteur de bordures (30) et b) image résultante du filtre médian 3x3.

Finalement, l'image finale suite à la superposition de la figure 6.46 b) et l'image corrigée est présentée à la figure suivante.

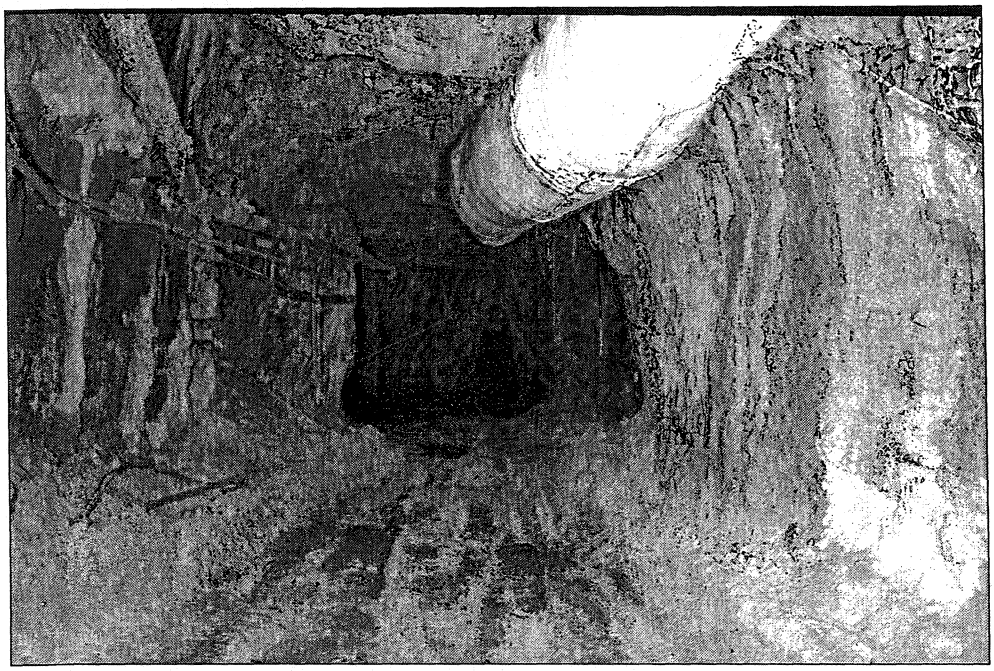


Figure 6.47. a) Image finale du site au niveau 9-2 de la mine Doyon.

On ne peut pas affirmer avec certitude que le bruit sur l'image soit associée à un changement quelconque au niveau de la géométrie de la galerie. La texture des parois et les changements de tonalités associés au suintement rendent difficile le processus de détection de changement avec la méthode présentée dans ce mémoire. De plus l'objet situé sur le bord du mur de gauche ne ressort pas avec cette approche.

Tel les deux autres cas dans la mine Doyon, on peut tirer plusieurs conclusions.

1. Il n'y a pas eu de changement significatif entre les deux images.
2. Les endroits choisis pour effectuer les essais ne sont pas idéals. Dans ce cas-ci, la présence de béton projeté sur les murs ne correspond pas aux types de surfaces visées.

3. Les changements de sensibilité de l'appareil ne permettent pas d'obtenir des points de contrôle ayant une précision assez grande pour permettre un recalage adéquat des deux images.
4. Une vue en coupe de la galerie ne permet pas l'observation efficace de mouvements de blocs et ne correspond pas à un positionnement d'appareil idéal.

CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le principe sur lequel repose cette recherche implique que les instabilités structurales soient précédées par des mouvements de blocs aux abords des parois rocheuses. Si ces mouvements peuvent être détectés, l'instabilité pourra alors être prédite, évitée et/ou contrôlée.

L'objectif initial visé par le projet était donc de poursuivre les travaux de Corthésy et al (2001 a, b et c) afin de perfectionner une technique de détection des mouvements rigides de blocs en milieu rocheux souterrain, et de développer une méthodologie similaire pour des excavations à ciel ouvert. Tel qu'énoncé, ces techniques devaient être relativement rapides et simples d'utilisation, de manière à permettre une utilisation plus répandue, advenant que celles-ci répondent aux critères exigés.

La recherche présentée dans ce mémoire devait alors servir à mettre au point une méthodologie de travail basée sur la réalisation d'essais de laboratoire et de terrain et d'établir les conditions limites d'applicabilité de la technique. Pour y arriver, plusieurs essais ont été réalisés au cours de cette recherche et ils sont présentés aux chapitres 4, 5 et 6 de ce mémoire. Tout d'abord, l'instrumentation utilisée et la méthodologie de travail développée ont été présentées au chapitre 4. Cette méthodologie est développée en sept étapes :

1. L'acquisition des images,
2. le prétraitement,
3. le recalage,
4. la différence d'images,
5. le post traitement,
6. la superposition des images,
7. l'analyse des résultats.

En résumé, les différences qui peuvent survenir entre deux images prises de la même scène peuvent être de trois natures différentes, soit géométrique, d'intensité et de contenu. Pour corriger les différences géométriques existantes, deux logiciels ont été choisis, Registar(Geo) et Geomatica.

Dans le cas de Registar(Geo), le fait qu'il effectue la sélection des points de contrôle automatiquement, lui donne un avantage de rapidité et de précision de recalage indéniable. En raison du très grand nombre de points choisis, il est possible d'effectuer des recalages de deuxième et de troisième ordre. Toutefois, ce qui constitue l'avantage de ce logiciel, son procédé automatique, est également son plus grand inconvénient. Le fait que l'utilisateur n'a aucun contrôle sur le processus de recalage nuit énormément au développement de cette approche. Plutôt que d'afficher un mauvais résultat de recalage, avec lequel l'utilisateur peut tirer quelques conclusions, Registar(Geo) refuse d'effectuer le recalage lorsque trop de différences entres les images existent. De plus, tel que démontré aux figures 5.20 a) et 5.24 b), le logiciel donne parfois des résultats complètement imprévisibles.

Quoique très performant pour corriger des différences géométriques entre deux images prises successivement, le logiciel n'a pu démontrer au cours des essais impliquant un intervalle de temps importants des résultats satisfaisants.

Dans le cas du logiciel Geomatica, il répond bien aux critères exigés par la méthodologie. La faible quantité de points de contrôle utilisable pour le recalage l'empêche toutefois d'être précis lors des recalages polynomiales d'ordres supérieurs. Malgré ceci, la précision du repositionnement atteignable par l'instrumentation vient contrer cette faiblesse. Lors des essais, il a été vu que le niveau de précision obtenu sur la détection des mouvements était aussi élevé avec Geomatica (recalage de premier ordre) qu'avec Registar(Geo) (recalage de deuxième et troisième ordre).

Dans tous les cas, un ré-échantillonnage par la méthode du plus proche voisin s'est avéré trop imprécis pour permettre une détection efficace des mouvements. Un ré-échantillonnage bilinéaire s'est montré être le type de ré-échantillonnage le plus efficace dans la forte majorité des cas. En effectuant une moyenne pondérée sur les pixels voisinant, cette approche vient éliminer une partie du bruit créé par un recalage imparfait.

Les essais simulés, effectués sur le campus de l'Université de Montréal ont donc permis de constater qu'il était possible de prédire un mouvement rigide de blocs le long de discontinuités dans un massif rocheux même en faisant intervenir un intervalle de temps important. Ces essais ont permis de constater également qu'il est possible de déterminer avec beaucoup de certitude l'amplitude de la composante du mouvement de bloc dans le plan de l'image. Pour poursuivre les recherches dans se sens, il s'agit de déterminer également la meilleure position de l'appareil par rapport à la paroi de façon à maximiser la détection de mouvement. Cette position peut être choisie en fonction des caractéristiques géomécaniques du massif comme l'orientation des discontinuités.

En somme, les recommandations de l'ensemble de ce projet visent toutes à améliorer le traitement numérique des images. Le présent projet a permis de décortiquer l'influence et l'importance de plusieurs aspects différents ainsi que d'établir une méthodologie de travail à partir de laquelle des travaux futurs seront basés.

Le problème majeur que rencontre la méthodologie présentement se situe principalement par rapport aux différences d'intensité qui peuvent survenir avec des changements des conditions météorologiques à l'extérieur et à l'intérieur ou avec les changements des conditions de réflectivité des surfaces. Plusieurs recherches en télédétection font état de nouvelles façons de procéder pour permettre une correction des différences d'intensité entre deux images basée sur une approche statistique, plutôt

qu'un ajustement approximatif utilisé dans le cadre de ce projet. Ces corrections seront nécessaires à la poursuite du projet.

Dans le cadre du post traitement, des logiciels plus performant comme Matlab, permettant un contrôle total sur les paramètres de calculs, seraient la prochaine étape à envisager pour rehausser les résultats et diminuer les effets du bruit parasite.

De plus, il serait intéressant d'évaluer le choix des longueurs d'ondes les moins susceptibles aux changements de réflectivité des surfaces rocheuses. Ceci permettrait l'utilisation d'un canal spécifique de couleur (rouge, bleu ou vert) plutôt que d'utiliser une équation de transformation pour obtenir une image en niveaux de gris.

Lorsque la fiabilité de la méthode sera établie, la mesure efficace de l'amplitude de mouvement pourra être étudié de façon plus approfondie afin de permettre un meilleur suivi géomécanique des zones instables. En utilisant une approche basée sur l'évaluation des caractéristiques géomécaniques d'un massif par techniques d'imagerie, comme l'orientation des discontinuités (voir la section 2.3.1), l'utilisateur pourra avec une même série d'images, caractériser le réseau de discontinuités et déterminer l'emplacement de blocs instables ayant subis un déplacement, tout en déterminant l'amplitude de ce déplacement.

RÉFÉRENCES

BROWN, L. G., (1992), A Survey of Image Registration Techniques, Department of Computer Science, Columbia University, N. Y., pp. 325-351

CORTHÉSY, R., LEITE, M. H. et ST-CYR, C., (2000), Détection des Mouvements aux Parois d'Excavations en Rocher par Imagerie Numérique – Résultats Préliminaires, Canadian Tunnelling, pp. 27-35

CORTHÉSY, R., LEITE, M. H. et ST-CYR, C., (2001 a), Détection des Mouvements de Blocs aux Parois des Excavations par Imagerie Numérique, Projet IRSST #98-011, 116 p.

CORTHÉSY, R., LEITE, M. H. et ST-CYR, C., (2001 b), Potential Use of Digital Imaging for Rock Movement Detection, Rock mechanics in the National Interest, pp. 473-480

CORTHÉSY, R. et LEITE, M. H., (2003 a), Digital Imaging for Rock Slope Movement Detection, Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 185-192

CORTHÉSY, R. et LEITE, M. H., (2003 b), Note de cours GML 6002, Mécaniques des Roches II, École Polytechnique de Montréal, Canada.

FRANKLIN, J., (1990), Mine Monitoring Manuel, The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 109-117

GAICH, A., FASCHINGS, A., SCHUBERT, W. et FUCHS, R., (2003), Structural Rock Mass Parameters Recorded by a Computer Vision System, Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 87-94

GAICH, A., FASCHINGS, A., BEER, G., OPRIESSNIG et GOLSER, H., (2002 a), Geotechnical Data Acquisition, Numerical Simulation and Visualization on Site, Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Autriche, 6 p.

GAICH, A., FASCHINGS, A., HOFER, G., PEITLER, W. SCHUPFER, S. et GRUBER, M. (2002 b), Stereoscopic Imaging System for Geological Data Acquisition, Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Autriche, 10 p.

GILL, D., (1995), Note de cours 6.502, Mécaniques des Roches et Contrôle de Terrain, École Polytechnique de Montréal, Canada.

GREEN, P. et MACDONALD, L., (2002), Colour Engineering, Wiley, pp. 341-369

GUIDICELLI, P., (2002), Photographie Numérique Infographie, http://pierre.guidicelli.free.fr, 39 p.

JENSEN, J. R., (1996), Introductory Digital Image Processing, Prentice Hall, pp. 93-192

KANDUTH, H., (1998), Digital Image Analysis for Strain Measurements, Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada, 96 p.

KEMENY, J. et MOFYA, E., (2003), The Use of Digital Imaging and Laser Scanning Technologies for Field Rock Fracture Characterization, Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 117-122

LEMY, F. et HADJIGEORGIOU, J., (2003 a), Rock Mass Characterization Using Image Analysis, Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp. 95-100

LEMY, F. et HADJIGEORGIOU, J., (2003 b), Discontinuity Trace Maps Construction Using Photographs of Rock Exposures, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40, pp. 903-918

LEMY, F. (2002), Caractérisation des Réseaux de Discontinuités par Analyse d'Images, Thèse de Doctorat, Université de Laval, Canada, 221 p.

MCVEY, J. R., LEWIS, S. R. et GUIDICE, E. E., (1974), Deformation Monitoring of Underground Openings by Photographic Techniques, Bureau of Mines Report of Investigations, No. 7912, 26 p.

SCHOLEY, J. et INGLE, D. G., (1990), Monitoring tunnel support by convergence measurements, Proceedings of Geotechnical Instrumentation in Practice, pp. 495-506

WATT, A. et POLICARPO, F., (1998), The Computer Image, Addison-Wesley, pp. 217-275

WOLBERG, G., (1990), Digital Image Warping, Ieee Computer Press Monograph, pp. 6-160