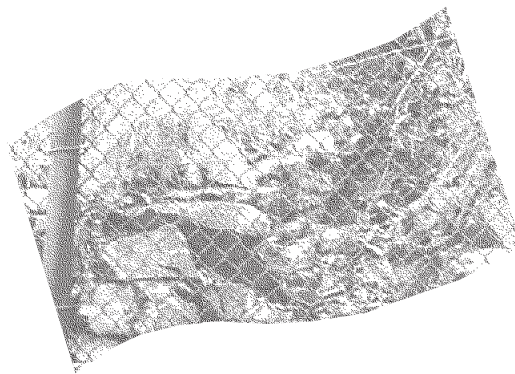


Détection des mouvements de blocs rocheux par imagerie numérique

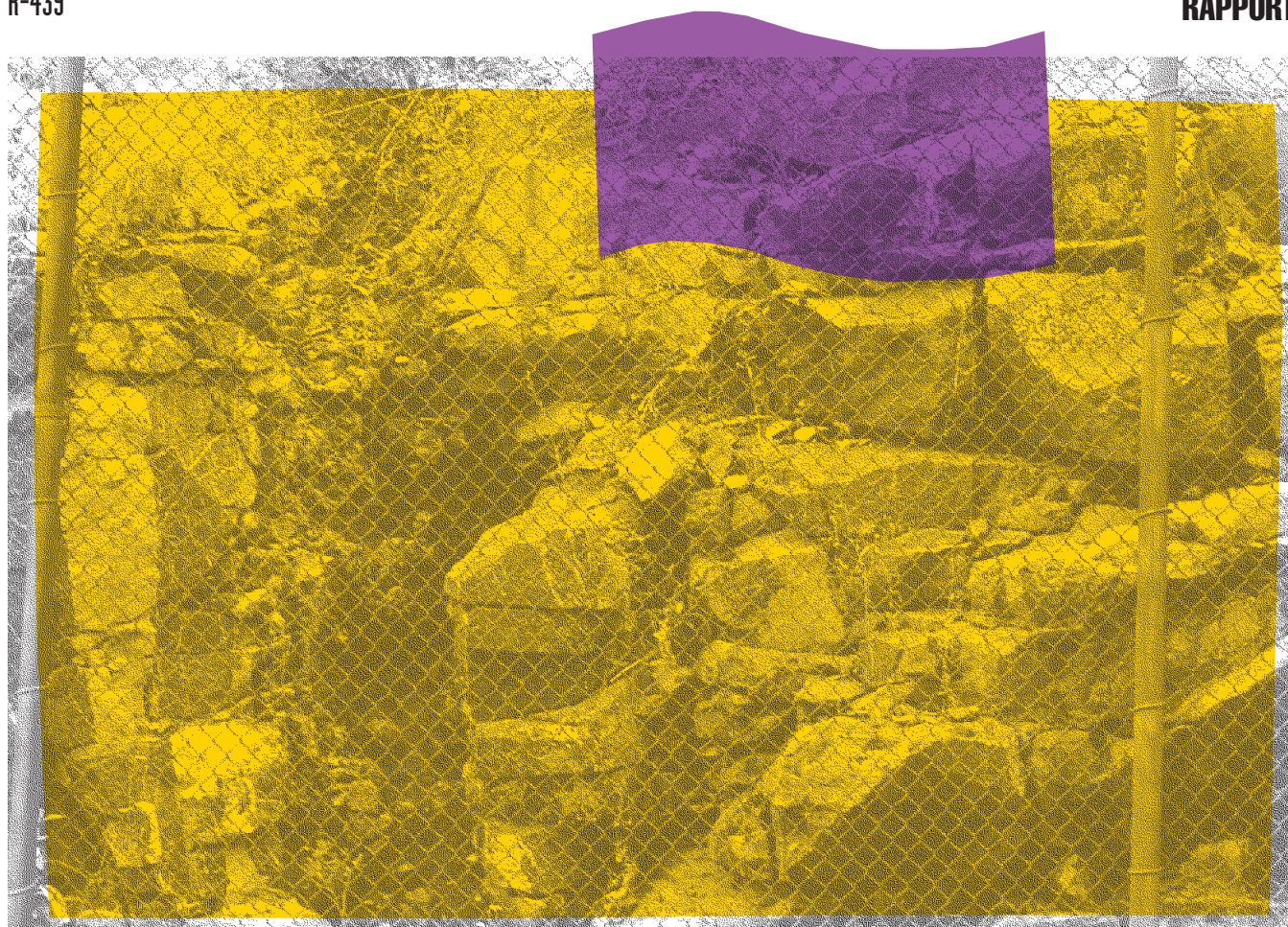


ÉTUDES ET RECHERCHES

Michel Payeur
Robert Corthésy
Maria Helena Leite

R-439

RAPPORT





Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

MISSION

- ▶ Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- ▶ Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- ▶ Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.

Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2006
ISBN 13 : 978-2-89631-045-6 (2^e édition – version imprimée)
ISBN 10 : 2-89631-045-2 (2^e édition – version imprimée)
ISBN 10 : 2-89631-015-0 (1^{ère} édition – version imprimée)
ISBN 13 : 978-2-89631-046-3 (PDF)
ISBN 10 : 2-89631-046-0 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
juin 2006

Détection des mouvements de blocs rocheux par imagerie numérique

Michel Payeur, Robert Corthésy
et Maria Helena Leite

Département des génies civil, géologique et des mines,
École Polytechnique de Montréal

ÉTUDES ET RECHERCHES

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

**Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.**

PRÉAMBULE

Ce rapport est un condensé du mémoire de maîtrise de Michel Payeur intitulé *Détection des mouvements de blocs rocheux par imagerie numérique* déposé à la bibliothèque de l'École Polytechnique. Ce travail de recherche a été réalisé sous la direction des professeurs Maria Helena Leite et Robert Corthésy du département des génies civil, géologique et des mines de l'École Polytechnique. Le mémoire comporte beaucoup d'informations qui n'ont pu être incluses dans ce rapport faute d'espace.

Le mémoire de maîtrise comporte aussi en annexe, un guide d'utilisation de la méthode qui permet à qui le souhaite, de traiter des paires d'images numériques selon la procédure décrite dans ce rapport en utilisant des logiciels bien identifiés.

SOMMAIRE

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 est donc de mettre au point une technique de détection des mouvements rigides de blocs en milieu rocheux, tant à ciel ouvert que sous terre. Cette technique doit 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 de référentiel entre les deux devienne identique. Pour effectuer ce recalage, deux logiciels ont été évalués, soit Registrar(Geo) et Geomatica.

Cette étude a démontré 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.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉAMBULE.....	I
SOMMAIRE.....	I
TABLE DES MATIÈRES.....	II
1) INTRODUCTION	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Énoncé du problème	1
1.3 Objectifs.....	1
2) MÉTHODOLOGIE DE DÉTECTION DE MOUVEMENT DE BLOCS PAR ANALYSE D'IMAGES NUMÉRIQUES	2
2.1 Introduction.....	2
2.2 Acquisition et prétraitement des images	4
2.2.1 Acquisition des images	4
2.2.1.A) Prise d'images initiales	5
2.2.1.B) Prises d'images subséquentes	8
2.2.2 Prétraitement	10
2.3 Recalage des images	12
2.4 Différence d'images, post traitement et superposition	13
2.4.1 Le seuil	14
2.4.2 Algorithmes détecteurs de bordures.....	15
2.4.3 Filtre moyen	15
2.4.4 Filtre médian	15
3) ÉTUDE DE CAS.....	24

4) CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	31
5) APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES ÉVENTUELLES....	33
6) RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE	34
7) LISTE DES ARTICLES SCIENTIFIQUES PRODUITS	36

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 rapport 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.

2) MÉTHODOLOGIE DE DÉTECTION DE MOUVEMENT DE BLOCS PAR ANALYSE D'IMAGES NUMÉRIQUES

2.1 Introduction

L'imagerie numérique prend de l'importance dans plusieurs domaines de recherche, la mécanique des roches faisant partie de cette tendance. Cette section 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 2.1 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 2.1. 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 2.2, avant de discuter du recalage des images à la section 2.3. La différence d'images, le post traitement et la superposition des images sont ensuite présentés à la section 2.4. Finalement, un cas d'application de la méthode est présenté à la section 3.

2.2 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.

2.2.1 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 un certain temps. Le soin apporté à la prise d'images est crucial à la réussite du recalage car la qualité des résultats finaux en dépend.

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 2.2. 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.

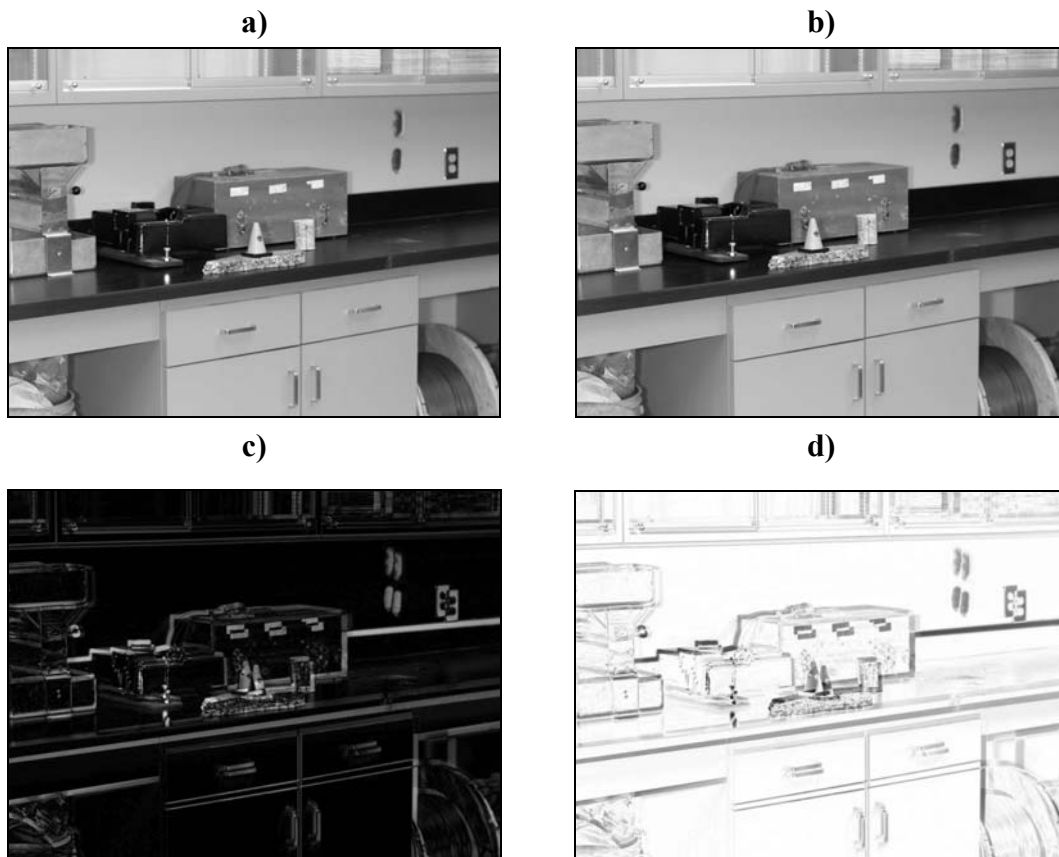


Figure 2.2. Images successives avec un mauvais repositionnement de caméra : a) image initiale, b) image finale suite au repositionnement de l'appareil, c) différence d'images et d) inversion d'image.

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.

2.2.1.A) Prise d'images initiales

Quel que soit l'environnement, mine à ciel ouvert ou souterraine, 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 mises au niveau indépendamment l'une de l'autre.

L'appareil est fixé sur une plaquette elle-même fixée sans possibilité de mouvement à la base équatoriale. D'une prise à l'autre, grâce à cette plaquette, l'appareil ne subit aucun déplacement relativement au trépied. Vissé à la base équatoriale, se trouve un support sur lequel sont fixés deux projecteurs halogènes d'une puissance de 500 Watts chacun, situés 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 remplacement 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 2.3. 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.

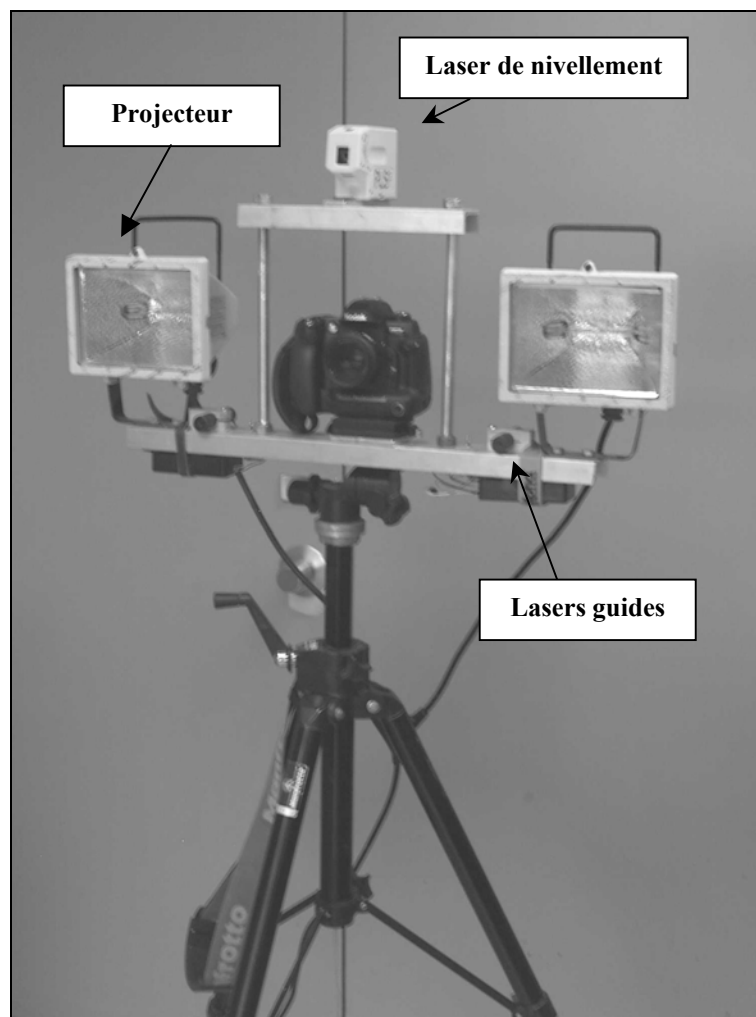


Figure 2.3. Montage de l'appareil.

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 peut 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. Toutefois, dans un environnement 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 2.4. 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 . 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.

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, tels les conditions météorologiques, les paramètres optiques, l'heure de prise, doivent être notés et conservés comme référence lors de la prise d'images subséquentes.

2.2.1.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 soit 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 variations 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 liés 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).

2.2.2 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.

Avec l'exemple de la figure 2.5 qui suit, on peut voir que les discontinuités sont mieux discernées après le prétraitement. Quoique relever leurs traces ne soit 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 importante.

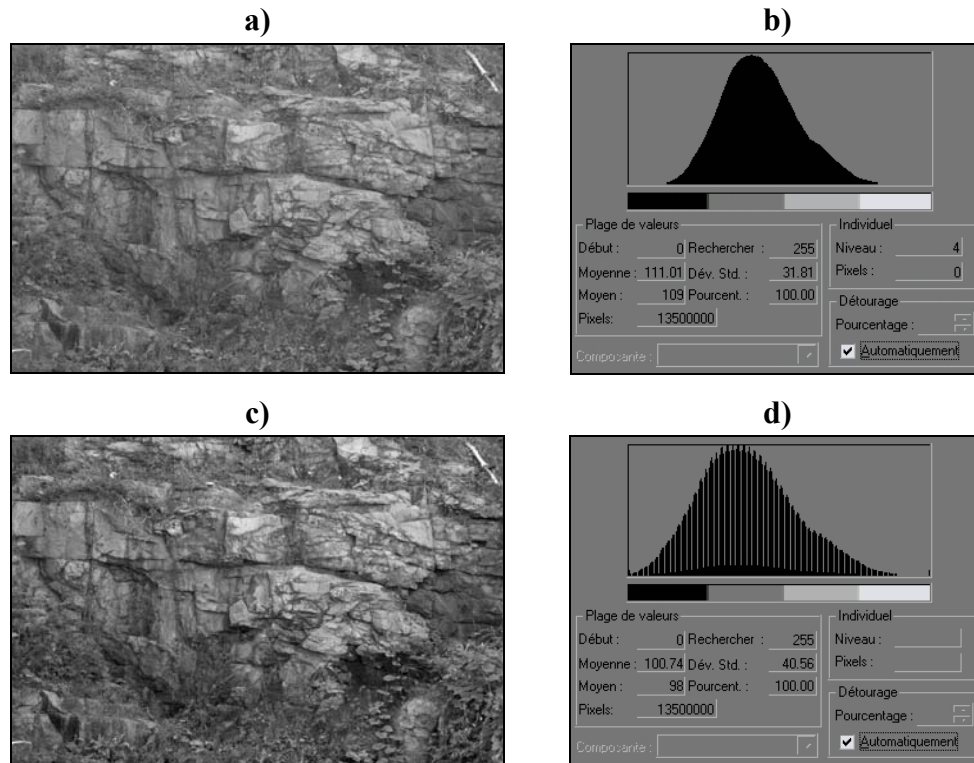


Figure 2.5. a) Image d'origine ayant une mauvaise distribution d'intensité, b) histogramme de l'image d'origine démontrant une faible étendue, c) l'image d'origine suite à l'égalisation des niveaux et d) le nouvel histogramme de l'image.

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.

2.3 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 où 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 importantes, Registar(Geo) ne peut établir automatiquement une nouvelle grille correspondant à l'image corrigée. 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 remplace 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 le cas d'évaluation présenté à la section 3.

2.4 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. La différence d'image pixel par pixel peut alors permettre la détection de mouvement. 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 Fourier. 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 de 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.

2.4.1 Le seuil

Une façon de mettre en évidence les déplacements sur l'image obtenue à la suite de 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.

2.4.2 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.

2.4.3 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. En plus de réduire le bruit sur l'image, ce type de filtre a tendance à adoucir les discontinuités, donc à nuancer en quelque sorte l'information pertinente.

2.4.4 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.

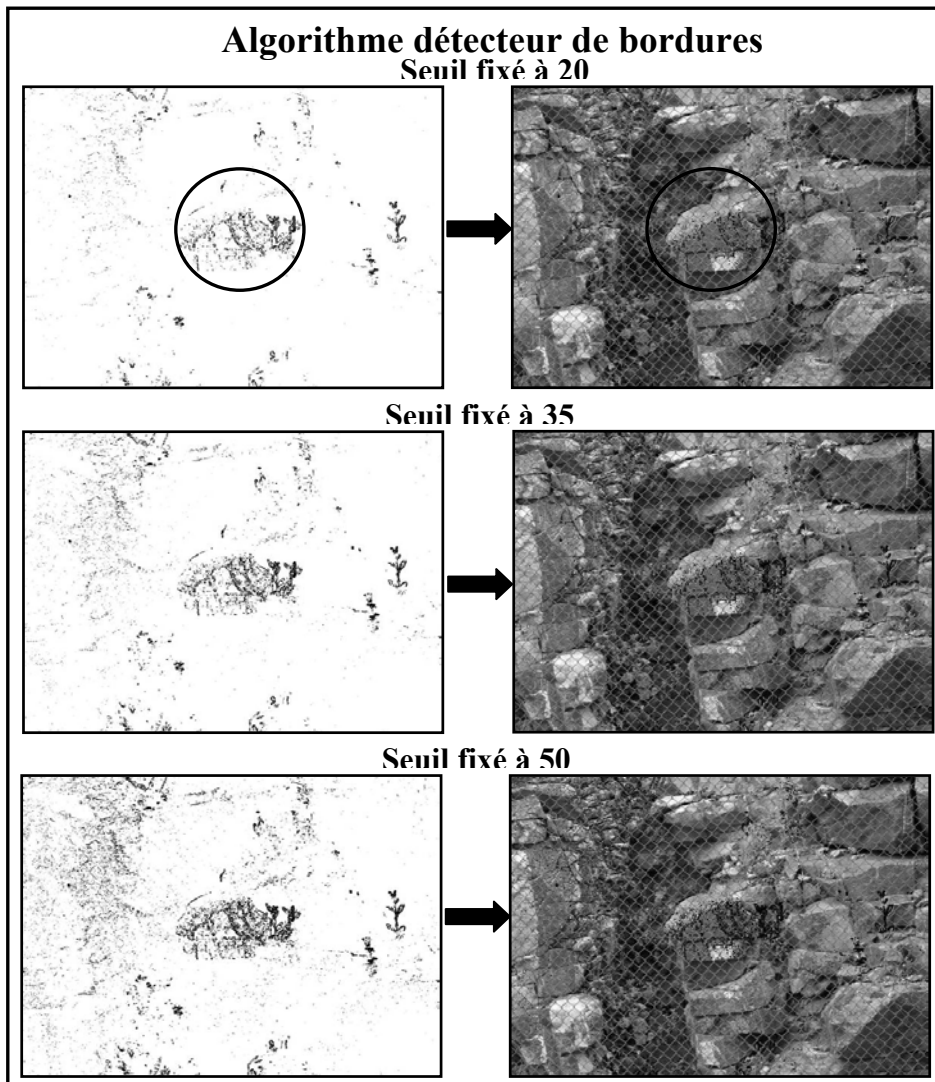


Figure 2.6. Utilisation de l'algorithme de détection de bordures avec trois seuils de détection. Les images de droites correspondent aux images finales.

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. 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 subi un certain mouvement. La figure 2.6 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.

Sur la figure 2.6, 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.

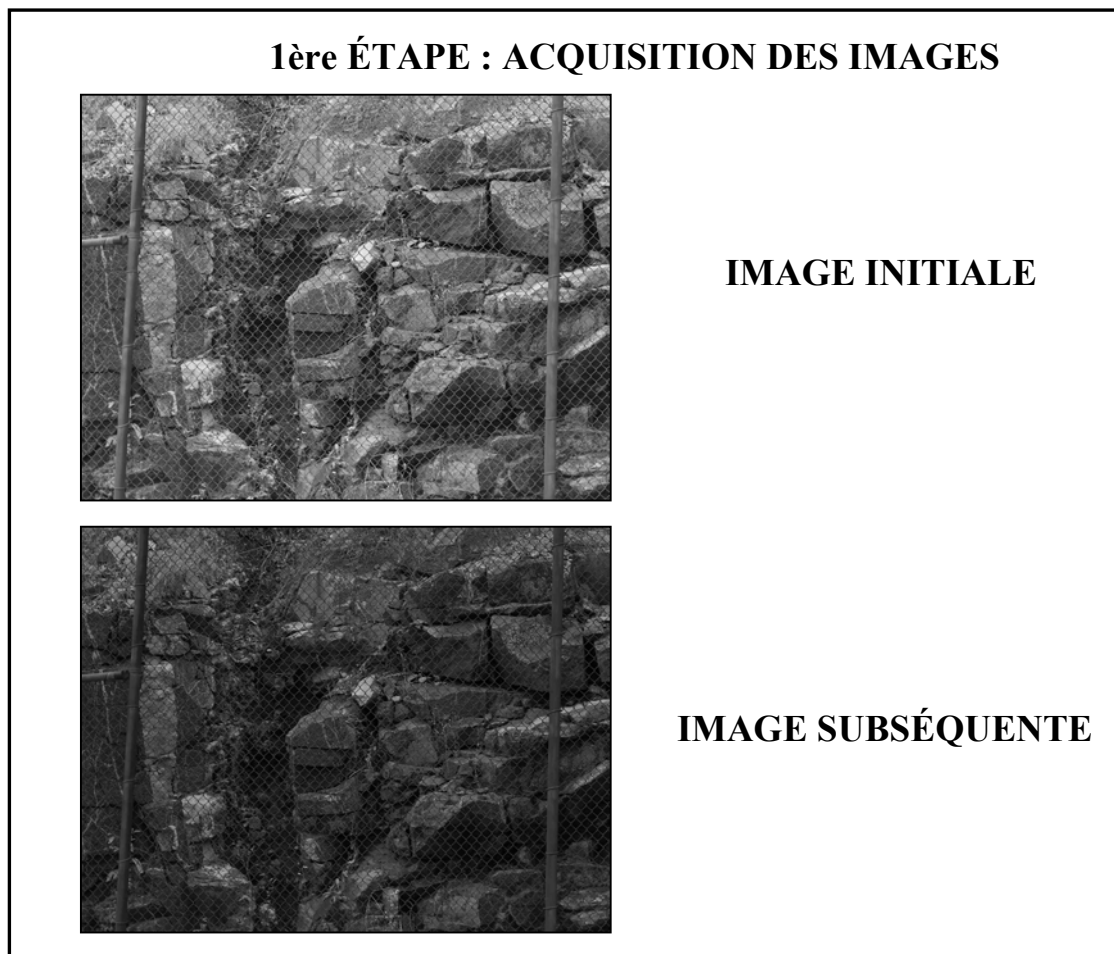


Figure 2.7. 1ère étape de la méthodologie : L'acquisition des images. Cette étape comprend la prise de l'image initiale, le repositionnement d'appareil et la prise subséquente des images.

2ième ÉTAPE : PRÉTRAITEMENT

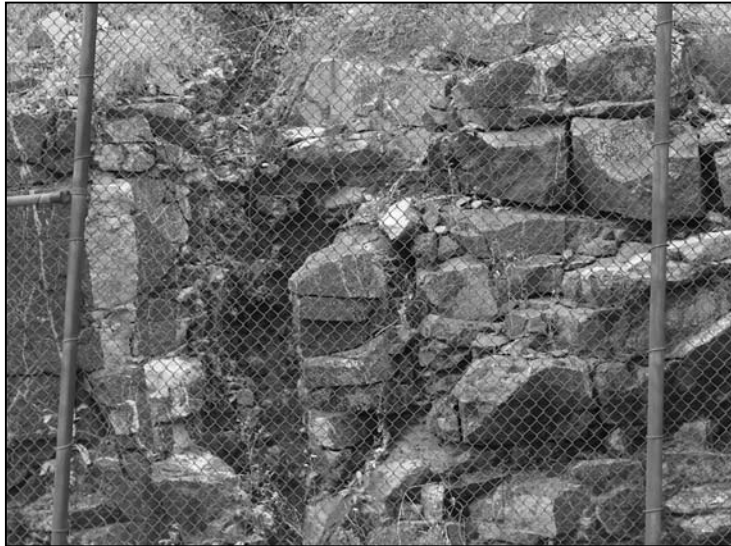


IMAGE INITIALE



IMAGE SUBSÉQUENTE

Figure 2.8. 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.

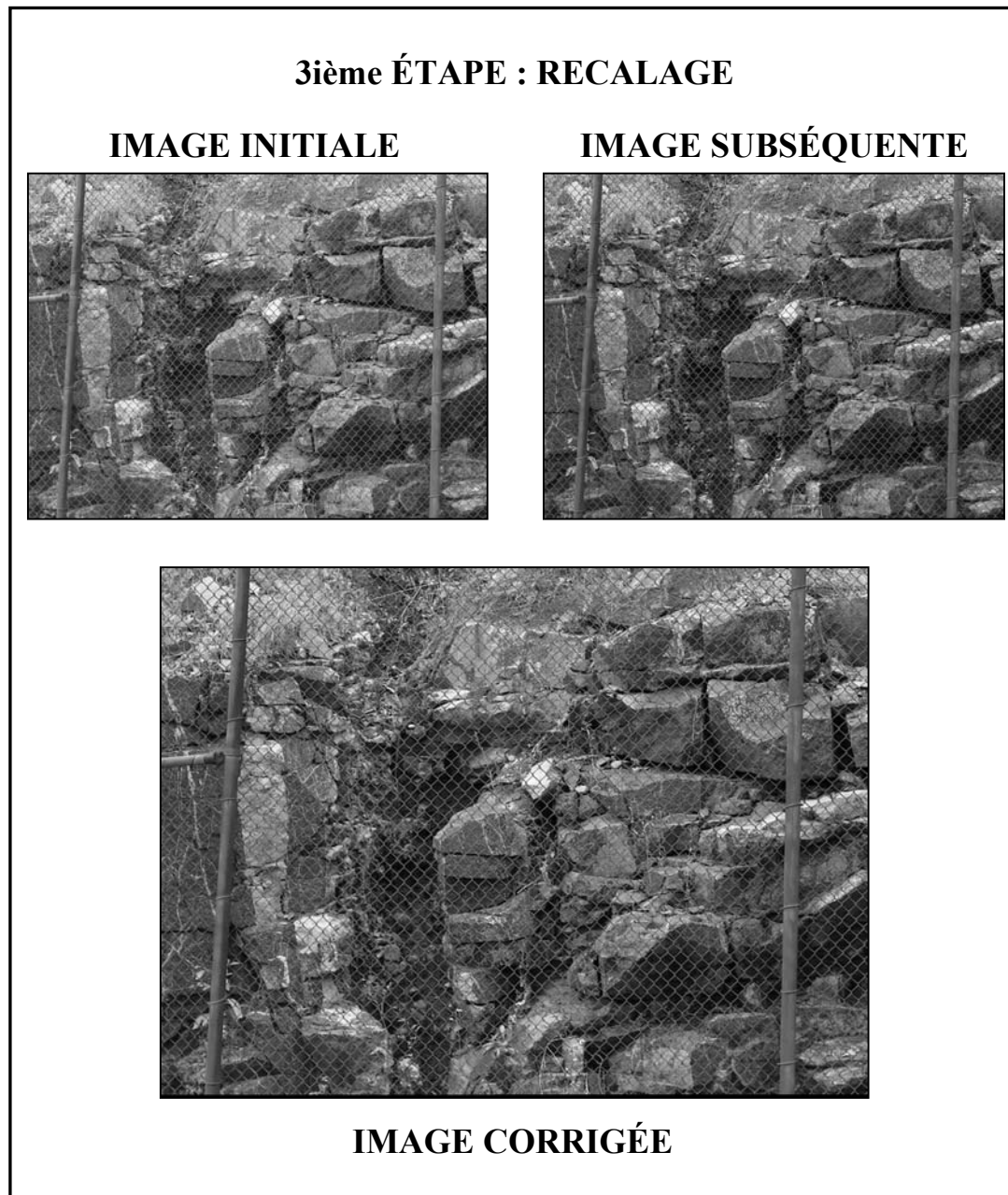


Figure 2.9. 3ième étape de la méthodologie : Le recalage. Cette étape est le processus d'alignement géométrique de l'image subséquente sur l'image initiale.

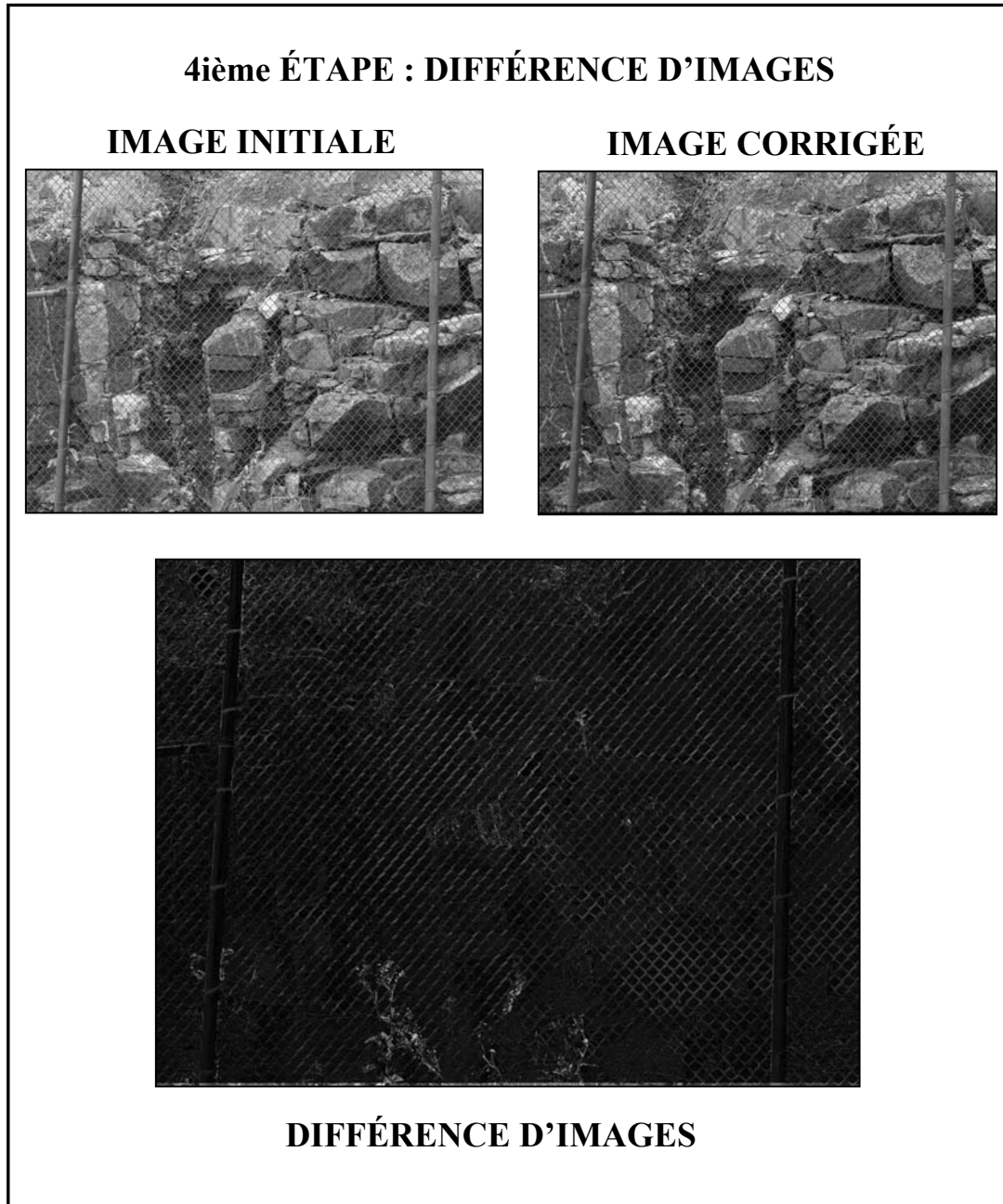


Figure 2.10. 4ième étape de la méthodologie : La différence d'images. Elle résulte en la différence entre l'image corrigée obtenue suite au recalage et l'image initiale suite au prétraitement.

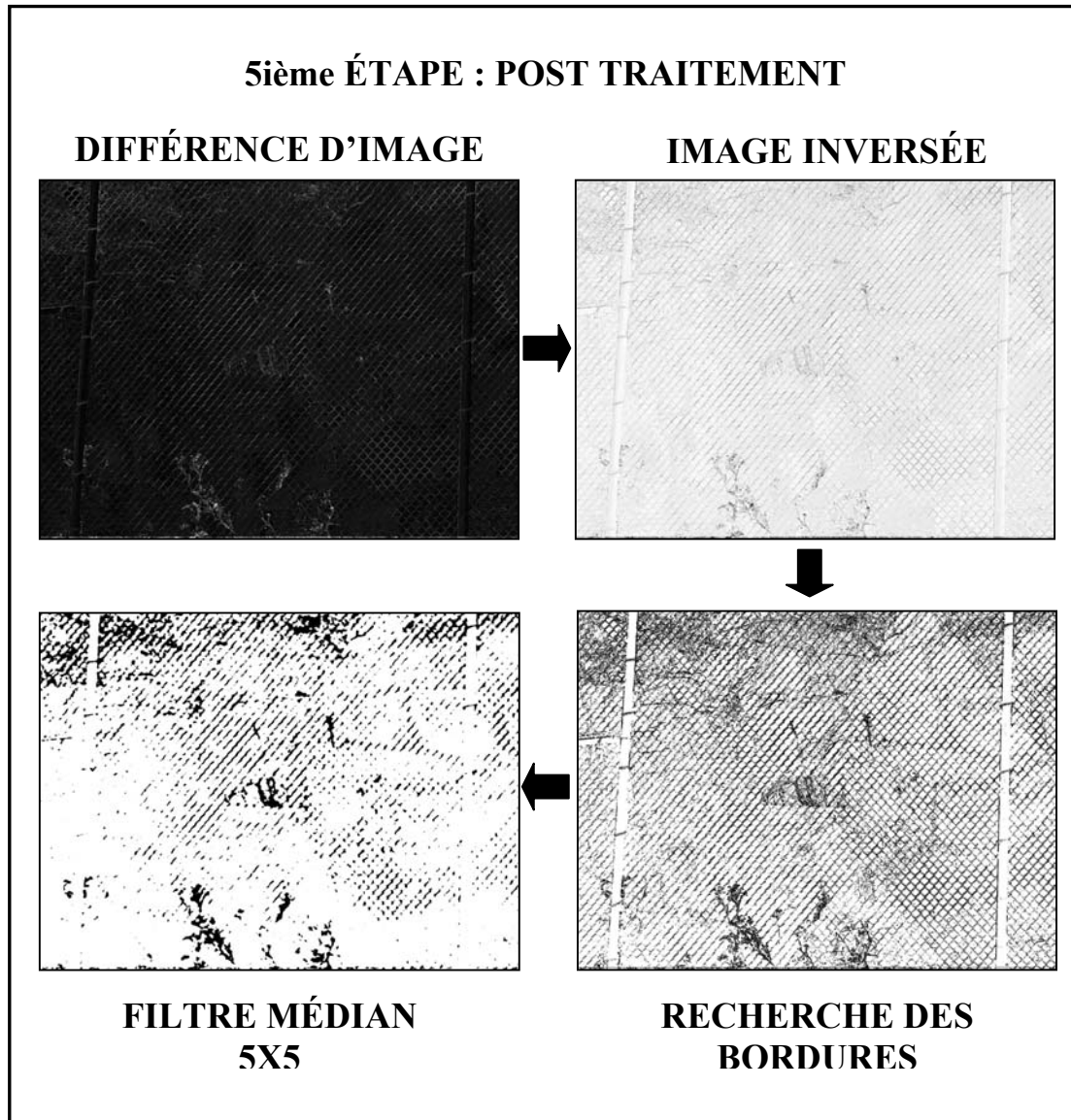


Figure 2.11. 5ième étape de la méthodologie : Le post traitement. Cette étape comprend l'inversion de l'image obtenue par différence, l'application de l'algorithme de recherche des bordures et ensuite l'application d'un filtre médian.

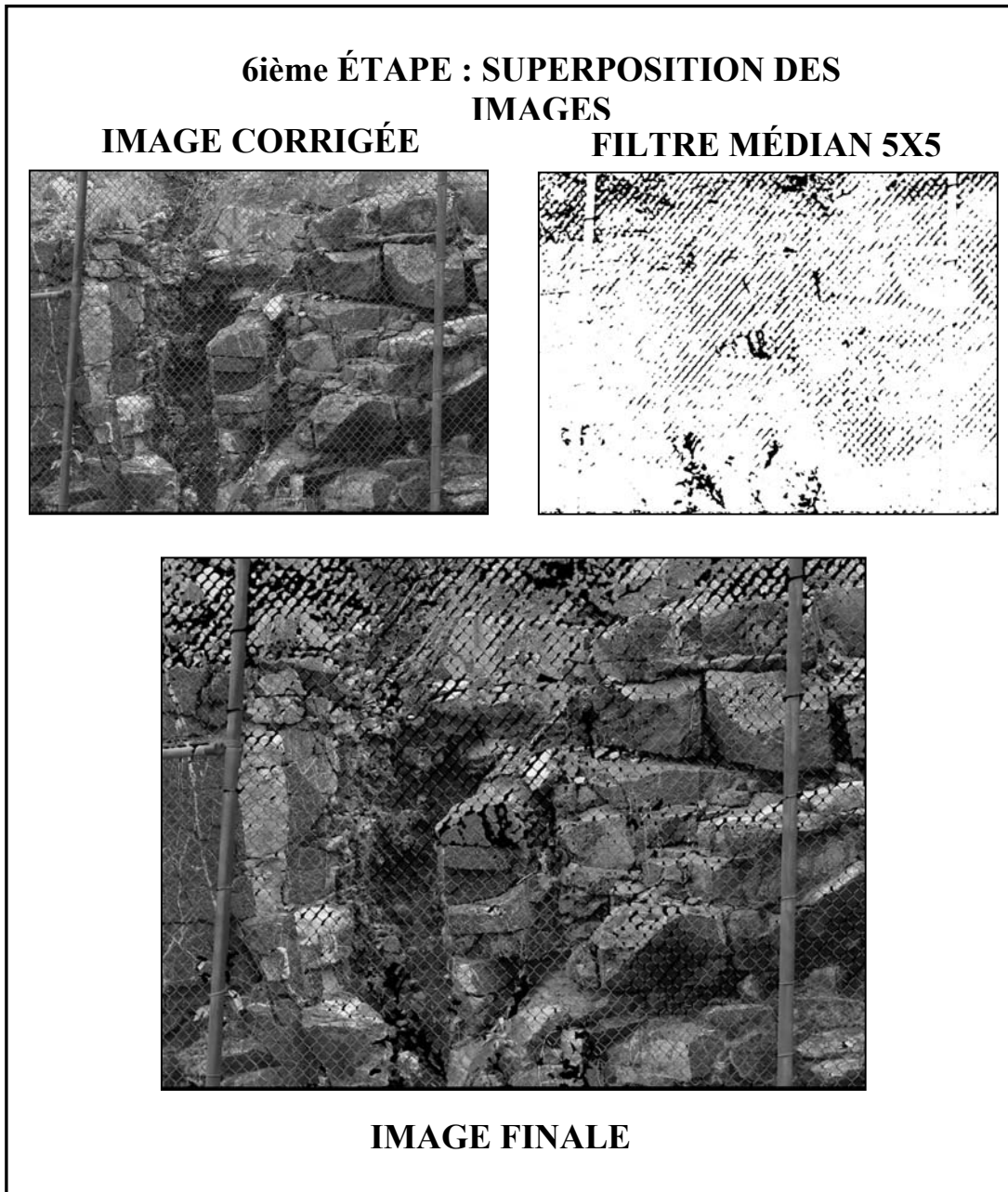


Figure 2.12. 6ième étape de la méthodologie : La superposition des images. Cette étape produit l'image finale, résultat de la superposition de l'image obtenue suite au post traitement sur l'image corrigée, obtenue suite au recalage.

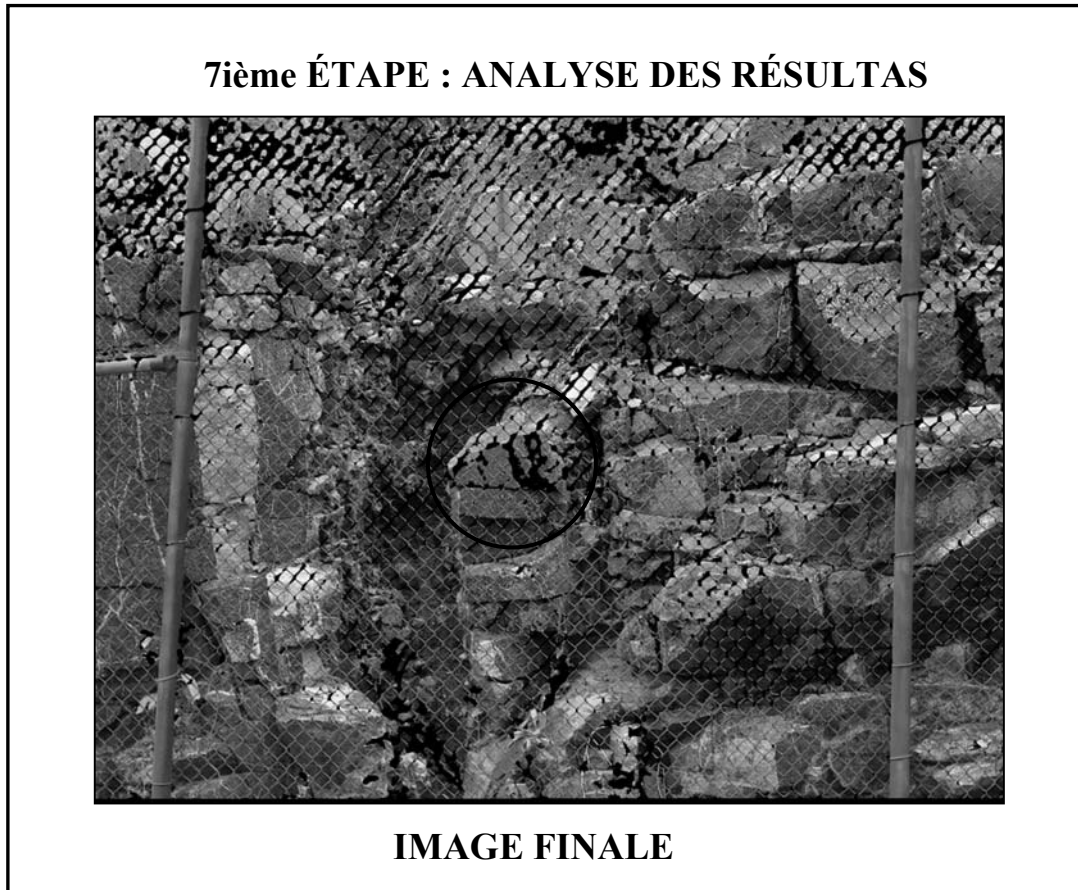


Figure 2.13. 7ième étape de la méthodologie : L'analyse des résultats. Cette étape consiste à déterminer sur l'image finale les blocs qui ont subi un mouvement. Ceci est apparent pour le bloc encerclé. Les autres zones de bruits correspondent toutes au grillage ou à la végétation.

3) ÉTUDE DE CAS

La validation de la méthodologie avec des cas réels est nécessaire à la poursuite de l'étude. Trois études ont été réalisées, une seule sera présentée dans ce rapport afin d'en maintenir la concision. Pour ce cas, quelques blocs ont été aléatoirement déplacés à l'insu du photographe qui traitera les images subséquemment. Les images ont été prises le même jour avec un repositionnement d'appareil.

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 indiquées à la section 2. À la suite de 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.

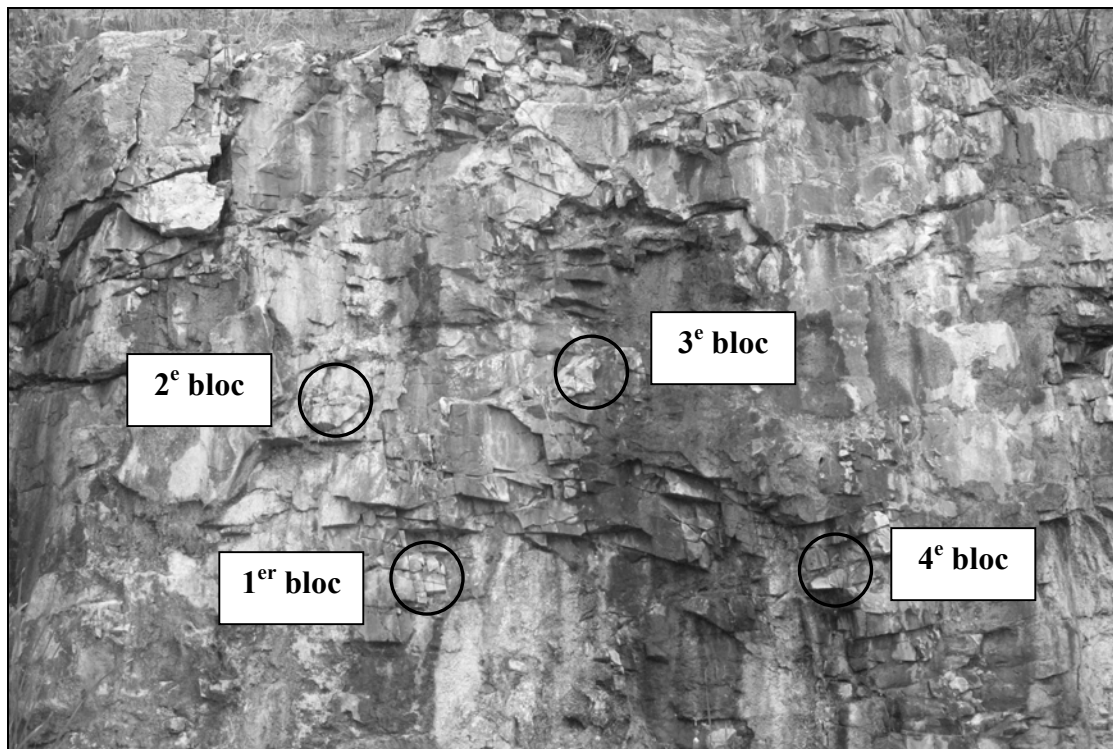


Figure 3.1. Image générale de la paroi située sur le campus de l'Université de Montréal et utilisée pour réaliser la première étude de cas avec les zones d'intérêts encadrées.

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

Tableau 3.1. 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 initiales 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.

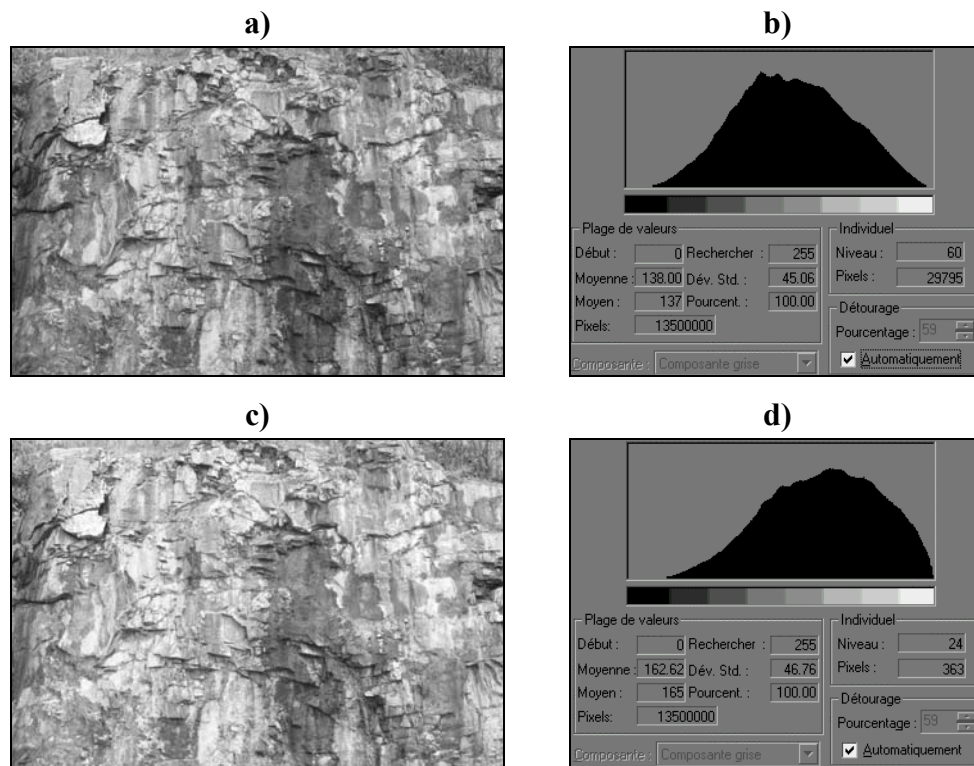


Figure 3.2. a) Image initiale en tons de gris, b) histogramme de l'image initiale, c) image subséquente et d) histogramme de l'image subséquente.

À l'observation des histogrammes à la figure 3.2, 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.

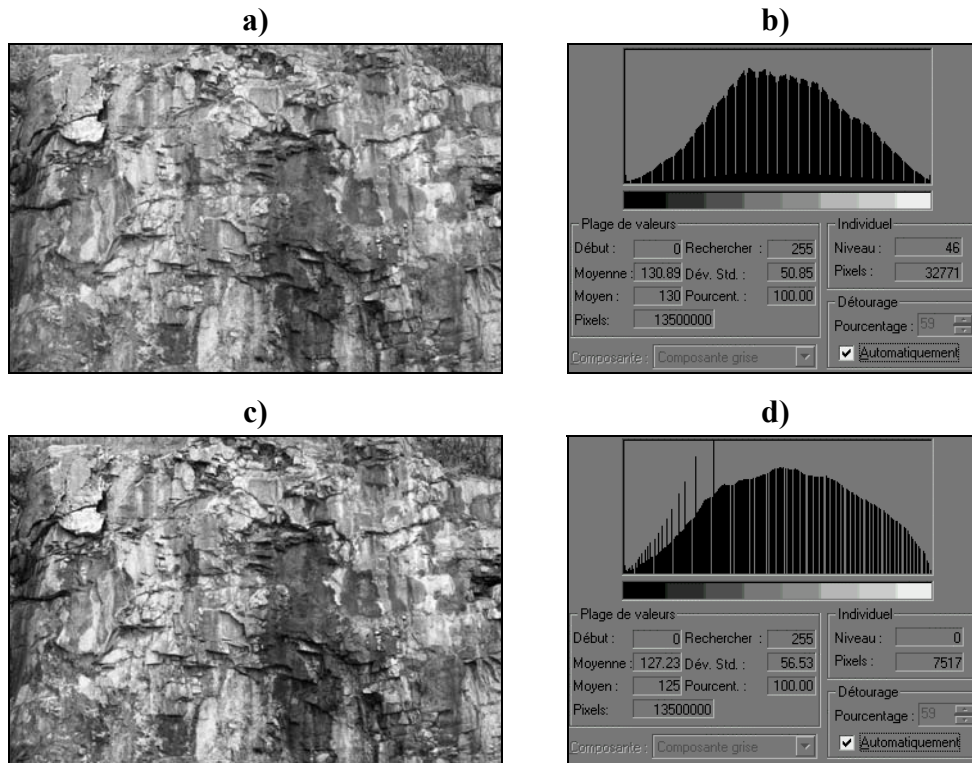


Figure 3.3. a) image initiale prétraitée, b) histogramme de l'image initiale, c) image subséquente prétraitée et d) histogramme de l'image subséquente.

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 Registrar(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 3.2. Constantes obtenues des polynômes de transformation.

Recalage	Registar(Geo) (5000 GCP)		Geomatica (6 GCP)	
	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.

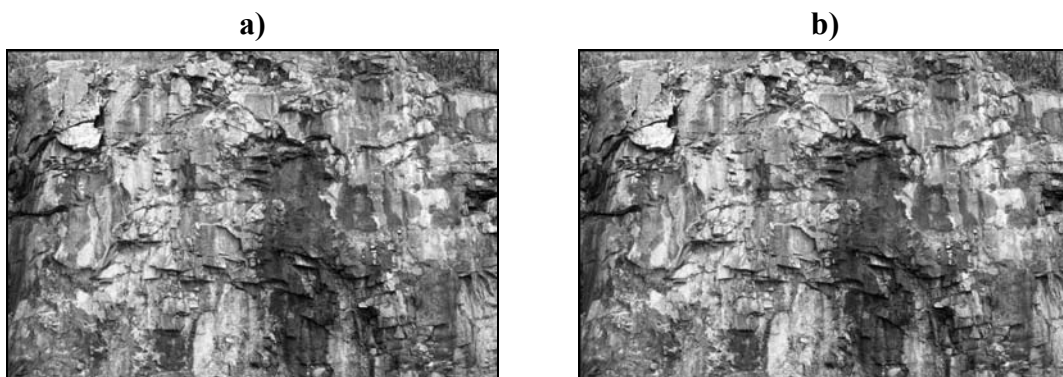


Figure 3.4. a) Image corrigée avec Registar(Geo) et b) image corrigée avec Geomatica.

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 3.3. 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 3.2 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.

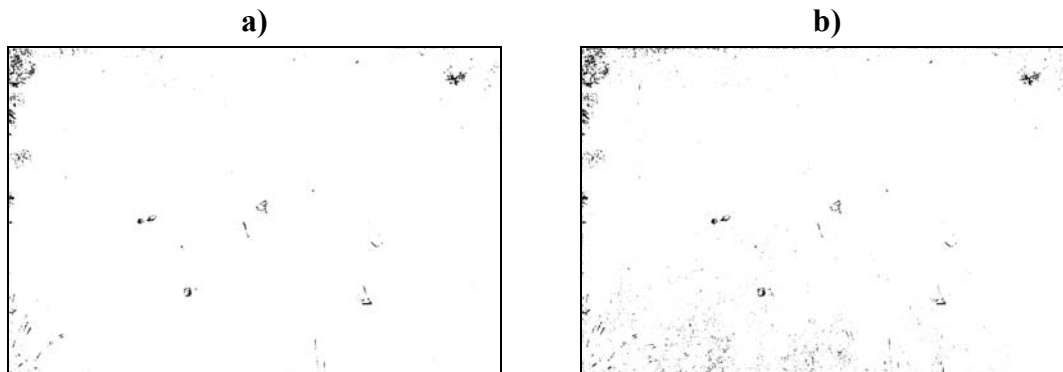


Figure 3.5. Différence d'image suite à l'application du filtre médian a) obtenue avec Registar(Geo) et b) avec Geomatica.

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

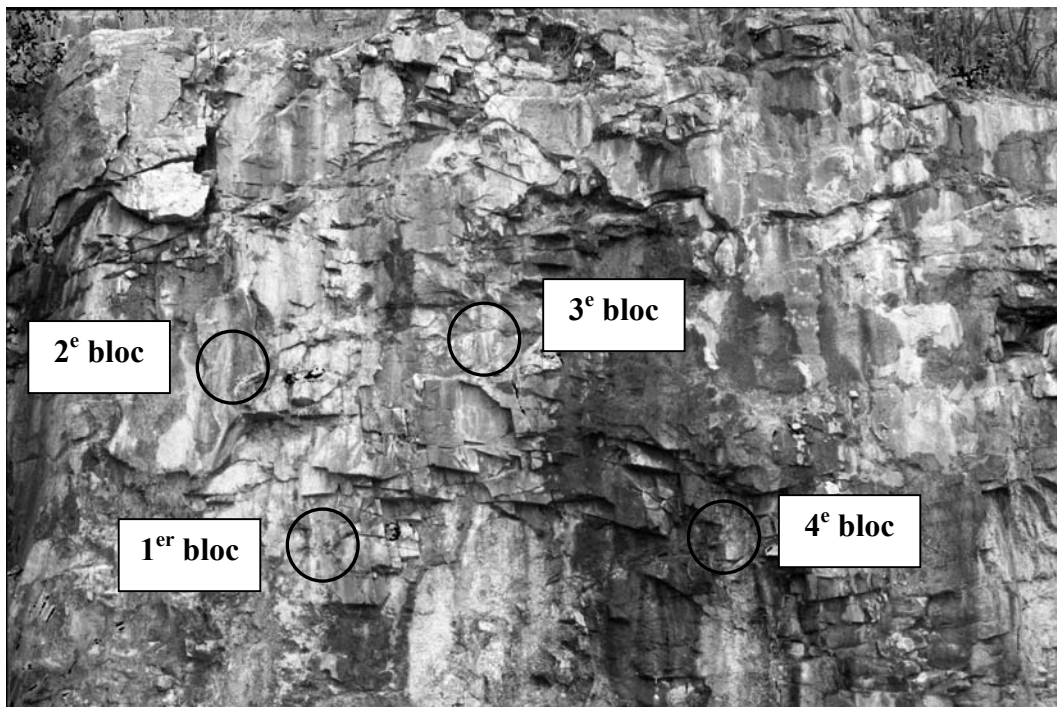


Figure 3.6. Image finale obtenue avec Registrar(Geo).

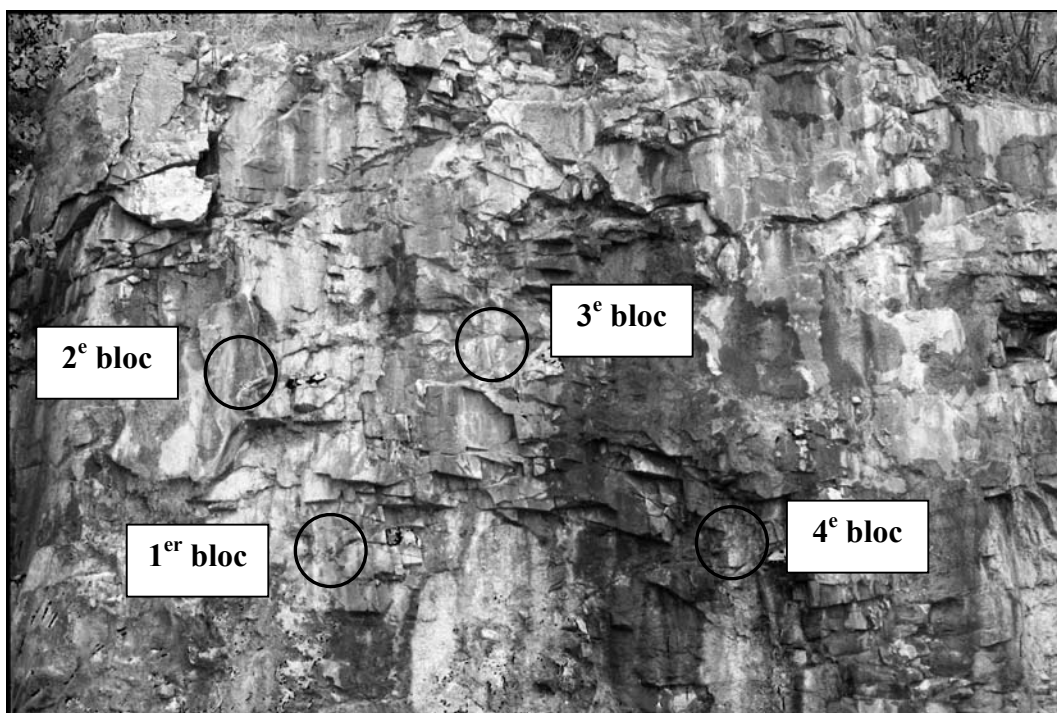


Figure 3.7. Image finale obtenue avec Geomatica.

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 fourni également un appui supplémentaire pour justifier l'utilisation du filtre médian. Avec Registrar(Geo), celui-ci n'était pas nécessaire à la suite de 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 (Registrar(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).

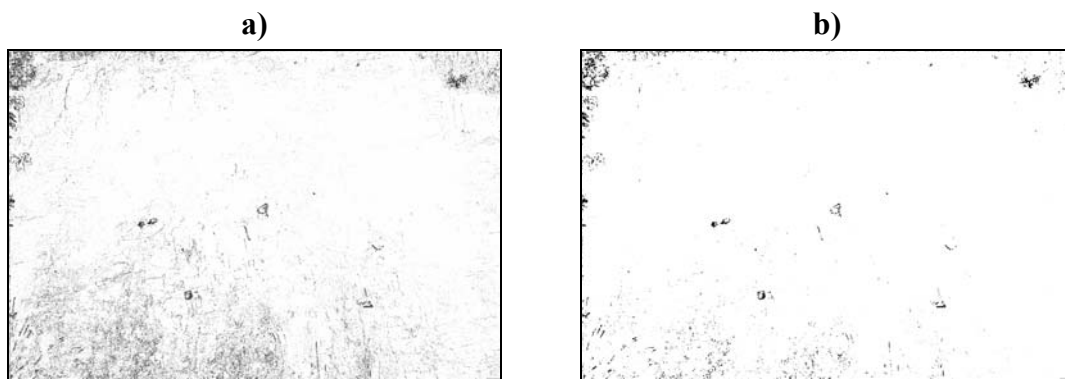


Figure 3.8. Différence d'image suite au recalage avec Geomatica a) avant le filtre médian et b) après le filtre médian.

4) CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette recherche repose sur le principe selon lequel les instabilités structurales sont 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 rapport 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. L'instrumentation utilisée et la méthodologie de travail développée ont été présentées à la section 2. 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'ait 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 entre les images existent. 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 polynomiaux 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 Registrar(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 constitue le type de ré-échantillonnage le plus efficace dans la forte majorité des cas. En effectuant une moyenne pondérée sur les pixels voisins, 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 ce 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 est relié 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 étudiée 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 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.

5) APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS ET RETOMBÉES ÉVENTUELLES

Le présent rapport ne présente qu'un cas d'application synthétique et les effets du temps sur la réflectivité des surfaces n'ont pu être considérés. Des images prises sur des sites de carrières et de centrales hydroélectriques seront traitées dans les mois et années à venir. Ce n'est qu'à partir des résultats de ces cas réels que l'applicabilité de la méthode pour les fins auxquelles elle a été développée pourra être confirmée ou infirmée. Ces cas réels permettront aussi, le cas échéant, d'apporter des modifications à la méthodologie présentée.

Pour ce qui est des retombées, la société Services Techniques Mensoft (STM) ayant ses bureaux à Longueuil et qui se spécialise dans l'auscultation de massifs rocheux et ouvrages en béton, a déjà proposé à la société Alcan d'utiliser la méthodologie développée dans le cadre de ce projet pour la surveillance des ses installations hydroélectriques. Alcan s'est montrée très intéressée et un projet de collaboration est en cours entre Polytechnique et STM. Cette collaboration aura l'avantage de fournir de nombreuses données permettant de valider ou invalider la méthode proposée.

6) RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

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 Tunneling, 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

7) LISTE DES ARTICLES SCIENTIFIQUES PRODUITS

CORTHÉSY, R. LEITE, M.H., (2003). "Digital imaging for rock slope movement detection". Proc. 39th U.S. Rock Mechanics Symposium. vol 1. pp. 185-191.

CORTHÉSY, R., LEITE, M.H., ST-CYR, C. (2002). "Détection des mouvements de blocs par imagerie numérique.- Résultats préliminaires". Canadian Tunneling Canadien, pp.27-35.

CORTHÉSY, R., LEITE, M.H., ST-CYR, C. (2002). "Détection des mouvements de blocs aux parois des excavations souterraines par imagerie numérique", Colloque de l'IRSST sur la sécurité dans les mines, Mars 2002, Val d'Or, 45 p.

CORTHÉSY, R., LEITE, M.H., ST-CYR, C. (2001). "Potential use of digital imaging for rock movement detection", Proc. of the 38th U.S. Rock Mechanics Symposium. Vol 1 pp. 473-480.