

Université du Québec
INRS-GÉORESSOURCES

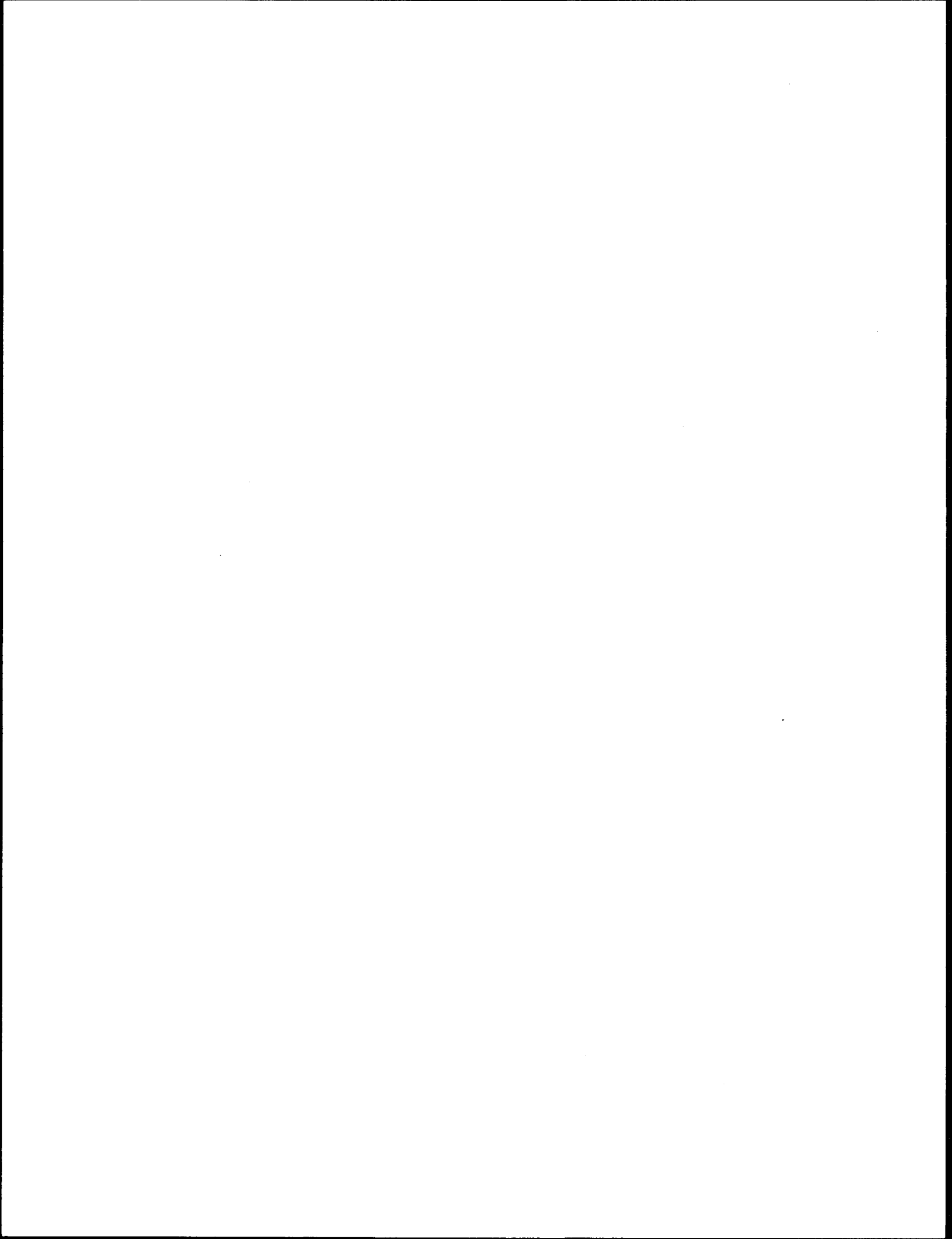
**ÉVALUATION DE QUATRE MÉTHODES DE PHOTOGRAMMÉTRIE
NUMÉRIQUE POUR LA CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE
EN RÉGION MONTAGNEUSE**

Par
Richard VUITTON

Mémoire
présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)

Jury d'évaluation

Président du jury et Examineur interne	Marc A. Vallée Ph. D., INRS-Géoressources
Examineur externe	Christian Larouche Ph. D., Géo-3d Inc.
Directeur de recherche	Daniel Lebel Ph. D., CGC - Québec
Codirecteur de recherche	Michel Malo Ph. D., INRS-Géoressources



Chaque chose qui peut être photographiée, peut être mesurée ...



RÉSUMÉ

Que ce soit dans une perspective académique ou industrielle, la géomatique regroupe plusieurs disciplines utiles en sciences de la Terre. Parmi ses nombreuses applications, la photogrammétrie est depuis longtemps un bon outil pour l'interprétation et la cartographie en géologie. Grâce aux progrès réalisés pour adapter cette méthode à la technologie informatique, la photogrammétrie permet maintenant de déduire rapidement de l'information qualitative ou quantitative à partir de clichés numériques. Elle couvre une gamme très étendue d'échelles allant de la microscopie aux images prises à très haute altitude et permet la collecte d'une multitude de points se trouvant sur les images, pour un coût d'investigation réduit. Elle ne requiert pas de contact avec l'objet à mesurer, et offre la possibilité de mesurer des variations temporelles.

Compte tenu des avantages cités ci-dessus, il a été jugé opportun ici d'utiliser et d'évaluer les méthodes photogrammétriques pour recueillir de l'information géologique, telle l'attitude d'un plan, la localisation des formations géologiques, la mesure précise de leur épaisseur et la détermination d'un réseau de fractures, dans des zones à accès difficile, comme la région de Moose Mountain, dans les Foothills de l'Alberta.

Quatre techniques ont été employées et comparées : (1) l'imagerie aérienne verticale (orthophotos à haute-résolution), (2) l'affichage stéréoscopique, (3) le rendu de terrain (application d'une orthophoto sur la surface d'un Modèle Numérique de Terrain, ou « *Terrain Rendering* » en anglais), et (4) la photogrammétrie terrestre.

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et prometteurs. Ils confirment l'efficacité et l'utilité de la photogrammétrie en région accidentée et difficile d'accès pour le géologue.

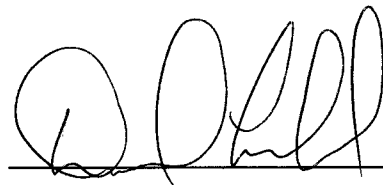
En effet, les écarts de distance entre l'élément structural réel et celui déterminé par photogrammétrie indiquent des valeurs comprises entre 5 et 10 mètres lorsque nous travaillons avec une ortho-image (balayée à 2000 ppp) et un MNT régional, et 10-50 cm en photogrammétrie terrestre. Nous obtenons également des résultats probants concernant la précision des pendages et des directions de plan, évalués sur le terrain par méthode traditionnelle (boussole) en comparaison avec ceux mesurés par triangulation numérique de points coplanaires (différences comprises entre 0 et 10 degrés). Concernant la détermination d'un réseau de fractures préférentiel par photogrammétrie terrestre, nous avons pu identifier différentes familles de joints, qui sont corrélatives avec celles observées sur le terrain.

Cependant, il convient d'être attentif lors des différentes étapes des processus photogrammétriques, et précis lors de l'acquisition des points de contrôle sur le terrain et du calibrage des caméras. Chacune de ces techniques a ses avantages et ses inconvénients, mais couplées ensemble, elles deviennent complémentaires et donnent des résultats probants. La photogrammétrie permet un accès direct à la cartographie dans un univers en trois dimensions et permet par exemple de visualiser avec précision les contacts géologiques des deux versants d'une montagne, sans avoir recours à l'imagination et à des suppositions.

Cette technique devient intéressante et présente un fort potentiel pour l'industrie minière, pétrolière, les commissions géologiques et la gestion des risques géologiques (étude de stabilité des versants).



Étudiant



Directeur de recherche

REMERCIEMENTS

Au terme de ces deux années de maîtrise, je tiens à remercier tous ceux qui, par leur aide, leur compétence et leur disponibilité, ont contribué à son aboutissement. L'expérience acquise, tant sur le plan technique que sur le plan humain, m'a été très précieuse.

Je témoigne ici ma reconnaissance à mon directeur, Daniel Lebel, chercheur à la Commission géologique du Canada et à mon codirecteur, Michel Malo, professeur-chercheur à l'INRS-Géoressources, qui ont su me guider dans toutes mes démarches en me donnant les moyens nécessaires à la réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier tous les partenaires (Shell Canada, Husky Oil et Talisman) et le Réseau GEOIDE pour leur support financier qui est venu compléter celui de l'INRS. Je remercie également toute l'équipe du Projet Moose Mountain, en particulier Christine Deblonde, professionnelle de recherche au Laboratoire de Cartographie Numérique et de Photogrammétrie, pour son enthousiasme, sa souplesse d'esprit et ses prouesses sur le terrain, Marc Alexandre Vallée pour la formation intensive qu'il m'a fournie concernant le logiciel GOCAD, Paul-André Gagnon et Carl Gravel du Département des Sciences Géomatiques de l'Université Laval pour leur introduction au système AutoCAP, Aïcha Achab pour m'avoir permis de contribuer à la vie du Centre géoscientifique de Québec, Christian Larouche de Géo-3D pour la révision de ce document et bien sûr tout le personnel administratif du CGQ.

Je transmets un clin d'œil amical à tous les étudiants gradués du programme conjoint INRS-Laval, avec qui j'ai passé de très bons moments et qui ont toujours été présents pour apporter leur soutien et donner un coup de main de dernière minute.

Enfin, je remercie particulièrement Isa et mes parents pour leur fort soutien moral. Sans eux, ce diplôme n'aurait pas lieu d'être.

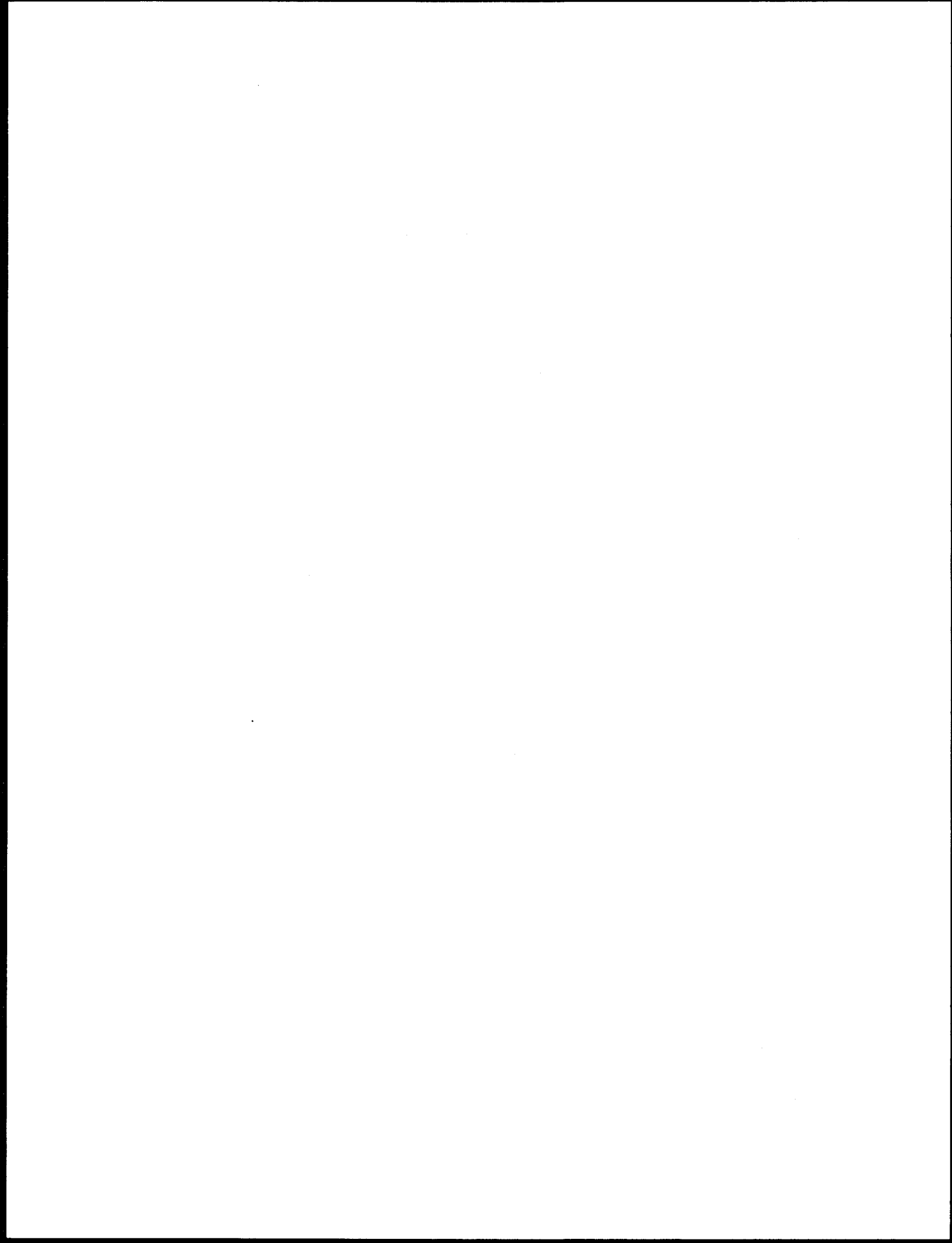


TABLE DES MATIÈRES

	Pages
RÉSUMÉ	V
REMERCIEMENTS	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LEXIQUE	XV
ABRÉVIATIONS ET SIGLES	XVII
CHAPITRE I : INTRODUCTION	1
1.1. PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2. OBJECTIFS	3
1.3. MÉTHODOLOGIE.....	3
1.4. STRUCTURE DU MÉMOIRE.....	6
CHAPITRE II : ÉTATS DES CONNAISSANCES CONCERNANT LA PHOTOGRAMMÉTRIE APPLIQUÉE À LA GÉOLOGIE	9
CHAPITRE III : MÉTHODOLOGIE	13
3.1. AVANT-PROPOS	13
3.2. ÉTAPES RÉALISÉES SUR LE TERRAIN	13
3.2.1. <i>Collecte des données structurales</i>	13
3.2.2. <i>Campagne géodésique</i>	14
3.2.3. <i>Campagne de photographie</i>	17
3.3. ÉTAPES RÉALISÉES AU LABORATOIRE.....	24
3.3.1. <i>Intégration et gestion des données</i>	24
3.3.2. <i>Étalonnage des caméras</i>	25
3.3.3. <i>Choix des logiciels de photogrammétrie numérique</i>	25
CHAPITRE IV : PHYSIOGRAPHIE ET GÉOLOGIE DES SITES ÉTUDIÉS	27
4.1. AVANT-PROPOS	27
4.2. SITE D'ESSAIS POUR LA PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE : LA NAPPE DE LA POINTE-DE-LÉVY	27
4.3. SITE D'ANALYSE GÉOLOGIQUE ET PHOTOGRAMMÉTRIQUE : MOOSE MOUNTAIN (ALBERTA).....	33

CHAPITRE V : L'IMAGERIE AÉRIENNE	43
5.1 AVANT-PROPOS	43
5.2 L'IMAGERIE NUMÉRIQUE STÉRÉOSCOPIQUE	43
5.3 LES ORTHOPHOTOS HAUTE-RÉSOLUTION	46
5.4 LE RENDU DE TERRAIN	49
5.5 LES AVANTAGES ET LES LIMITES DES TECHNIQUES D'IMAGERIE AÉRIENNE NUMÉRIQUE	52
5.5.1 <i>L'imagerie numérique stéréoscopique</i>	52
5.5.2 <i>Les orthophotos haute-résolution</i>	56
5.5.3 <i>Le rendu de terrain</i>	56
CHAPITRE VI : PRINCIPES DE L'IMAGERIE TERRESTRE ET COMPARAISON DE LOGICIELS DE PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE	61
6.1 AVANT-PROPOS	61
6.2 LES PARAMÈTRES D'ÉTALONNAGE	62
6.3 AUTOCAP	65
6.4 PHOTOMODELER ^{MC}	68
6.5 FOTOG-FMS ^{MC}	69
6.6 LES AVANTAGES ET LES LIMITES DES TECHNIQUES D'IMAGERIE TERRESTRE	70
CHAPITRE VII : GÉOLOGIE, MODÉLISATION ET VISUALISATION 3-D ASSISTÉE PAR PHOTOGRAMMÉTRIE	73
7.1 AVANT-PROPOS	73
7.2 LE SITE D'ESSAIS : LÉVIS	73
7.3 LE SITE D'ANALYSE GÉOLOGIQUE ET PHOTOGRAMMÉTRIQUE : MOOSE MOUNTAIN	76
7.3.1 <i>Modélisation et visualisation des surfaces géologiques</i>	77
7.3.2 <i>La géométrie d'un réseau de fractures</i>	84
7.4 RÉSUMÉ	86
CHAPITRE VIII : CONCLUSIONS	89
8.1 AVANT-PROPOS	89
8.2 PROBLÈMES RENCONTRÉS	89
8.3 COMPARAISON DES QUATRE MÉTHODES DE PHOTOGRAMMÉTRIE	91
8.4 CHOIX D'UNE MÉTHODE DE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE SUIVANT LE CONTEXTE GÉOLOGIQUE	95
8.5 RÉSUMÉ ET PERSPECTIVES GÉOLOGIQUES	96
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	99

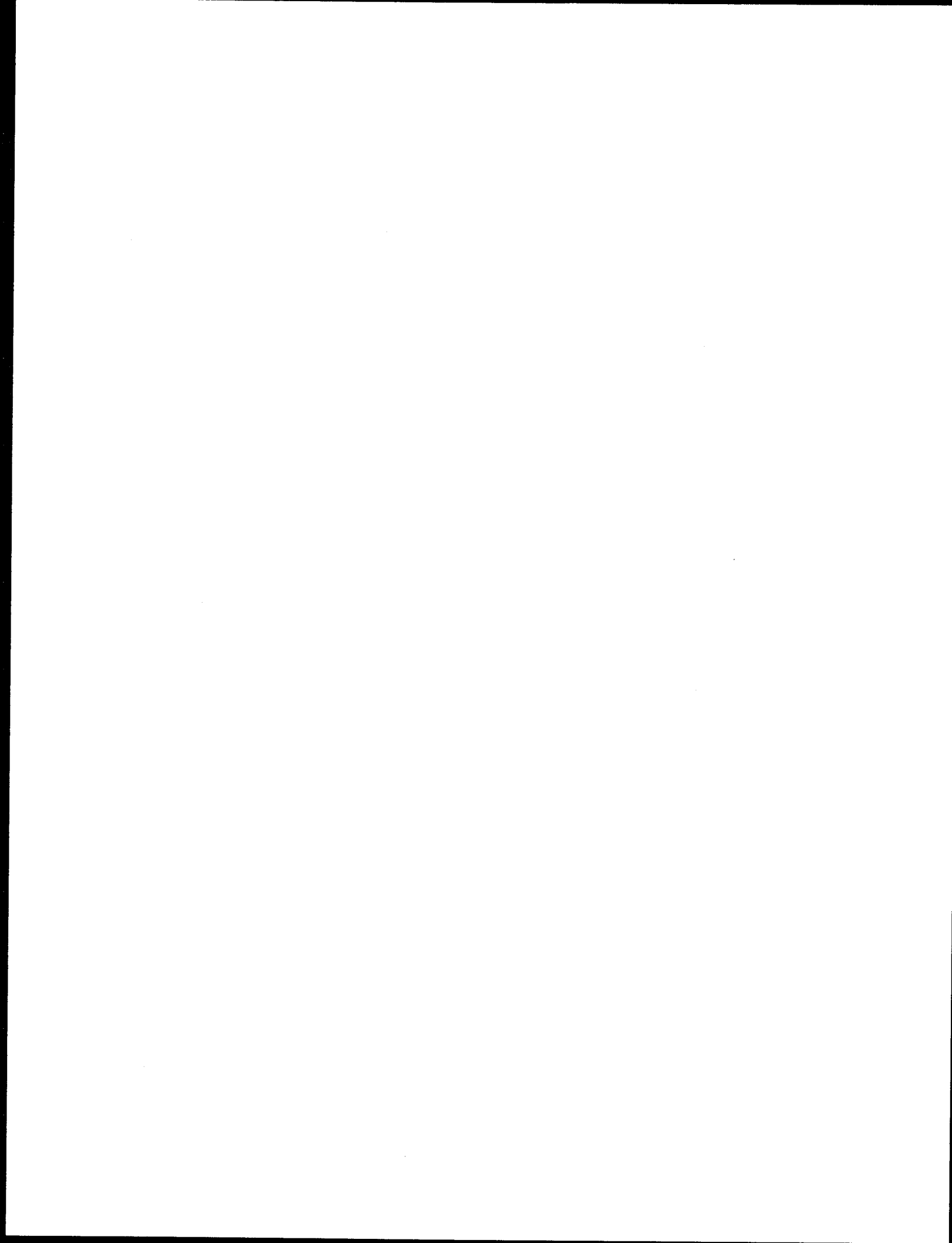
LISTE DES FIGURES

	Pages
FIGURE 1 : CARTE DE LOCALISATION DE LA RÉGION DE MOOSE MOUNTAIN	4
FIGURE 2 : CARTE TOPOGRAPHIQUE DE LA RÉGION DE MOOSE MOUNTAIN (FEUILLET SNRC 82J/15)	5
FIGURE 3 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA DÉMARCHE SUIVIE POUR LA CARTOGRAPHIE GÉOLOGIQUE DE MOOSE MOUNTAIN PAR MÉTHODES PHOTOGRAMMÉTRIQUES	6
FIGURE 4 : MESURES STRUCTURALES RECUEILLIES SUR LES AFFLEUREMENTS DE LÉVIS	14
FIGURE 5 : ARPENTEUR-GÉOMÈTRE SUR LE TERRAIN À MOOSE MOUNTAIN	15
FIGURE 6 : POINTS DE CONTRÔLE MESURÉS DANS LA RÉGION DE MOOSE DOME CREEK	16
FIGURE 7 : POINTS DE CONTRÔLE IDENTIFIÉS LE LONG DE DEUX AFFLEUREMENTS À LÉVIS	17
FIGURE 8 : LOCALISATION PAR INTERSECTION D'ANGLES (RECOUVREMENT MINIMUM 60 %).....	18
FIGURE 9 : RELATION OBJET RÉEL / OBJET IMAGE	20
FIGURE 10 : CAMÉRAS NUMÉRIQUES NON-MÉTRIQUES KODAK DCS420 ET CANON POWERSHOT A5 ZOOM	21
FIGURE 11 : BRONICA ETRSi (FORMAT 45 X 60 MM).....	22
FIGURE 12 : GÉOLOGIE DE LA RÉGION DE QUÉBEC	28
FIGURE 13 : CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DE LÉVIS	30
FIGURE 14 : SITE D'ÉTALONNAGE ET AFFLEUREMENT 1 ÉTUDIÉ À LÉVIS	31
FIGURE 15 : SITE D'ÉTALONNAGE ET AFFLEUREMENT 2 ÉTUDIÉ À LÉVIS	31
FIGURE 16 : SITE D'ÉTALONNAGE ET AFFLEUREMENT 3 ÉTUDIÉ À LÉVIS (CÔTE FRÉCHETTE).....	32
FIGURE 17 : IMAGE SATELLITE RADARSAT SNB DU SUD DE L'ALBERTA ET DE LA COLOMBIE-BRITANNIQUE	34
FIGURE 18 : CARTE GÉOLOGIQUE DE LA RÉGION DE MOOSE MOUNTAIN.....	35
FIGURE 19 : FORMATIONS GÉOLOGIQUES PRÉSENTES DANS LA RÉGION DE MOOSE MOUNTAIN	36
FIGURE 20 : COLONNE STRATIGRAPHIQUE ET HORIZONS MARQUEURS POUR LA PHOTOGRAMMÉTRIE, LOCALISÉS SUR LE VERSANT SUD-EST DE LA CULMINATION DE MOOSE MOUNTAIN.....	37
FIGURE 21 : FALAISE CARACTÉRISANT LA FORMATION DE PEKISKO	39
FIGURE 22 : CONTACTS GÉOLOGIQUES CARTOGRAPHIÉS DANS LA VALLÉE DE MOOSE DOME CREEK	41
FIGURE 23 : COUPLE STÉRÉOSCOPIQUE GÉNÉRÉ À PARTIR DE PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES DE ALBERTA ENVIRONNEMENT, DANS LA RÉGION DE MOOSE DOME CREEK, MOOSE MOUNTAIN	44
FIGURE 24 : DIAP VIEWER ^{MC} ET LA TECHNOLOGIE NUVISION	45
FIGURE 25 : TIN DE LA RÉGION DE MOOSE MOUNTAIN, GÉNÉRÉ À PARTIR DES DONNÉES D'ALBERTA ENVIRONNEMENT SOUS LE LOGICIEL GOCAD	45
FIGURE 26 : VUE RAPPROCHÉE D'UNE PORTION DU TIN DE LA FIGURE 25.	46
FIGURE 27 : ORTHOPHOTO NOIR ET BLANC DE LA RÉGION DE MOOSE MOUNTAIN	48

FIGURE 28 : ORTHOPHOTO COULEUR ILLUSTRANT LA RÉGION CENTRALE DE MOOSE MOUNTAIN.....	49
FIGURE 29 : ORTHOPHOTO APPLIQUÉE SUR LA SURFACE D'UN TIN, RÉGION SUD-EST DE MOOSE MOUNTAIN, QUI PERMET D'OBTENIR UNE VUE EN PERSPECTIVE OU RENDU DE TERRAIN.....	50
FIGURE 30 : COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES EXTRAITES DE LA BNDT, DU MNT ET LES MESURES RELEVÉES PAR IMAGERIE TERRESTRE.....	54
FIGURE 31 : EFFETS D'OMBRAGE ET PROBLÈMES LIÉS AUX PAROIS VERTICALES ET AU COUVERT VÉGÉTAL...55	
FIGURE 32 : COMPARAISON D'UNE PHOTOGRAPHIE RÉELLE AVEC UNE IMAGE EXTRAITE DE L'ORTHOPHOTO NOIR ET BLANC, APPLIQUÉE SUR LE TIN	57
FIGURE 33 : TRACÉ DES CONTOURS GÉOLOGIQUES PAR LA TECHNIQUE DU RENDU DE TERRAIN DANS LA RÉGION DE MOOSE DOME CREEK, À MOOSE MOUNTAIN.....	58
FIGURE 34 : EXEMPLE DE PROJECTION D'UNE IMAGE OBLIQUE SUR LE TIN	59
FIGURE 35 : TRANSFORMATION PROJECTIVE 3-D POUR L'ORIENTATION RELATIVE.....	62
FIGURE 36 : ENSEMBLE CAMÉRA NUMÉRIQUE (KODAK DCS420) ET STATION-TOTALE (LEICA TC 1600).....	65
FIGURE 37 : SESSION DE TRAVAIL DANS LE LOGICIEL AUTOCAP	67
FIGURE 38 : SESSION DE TRAVAIL DANS LE LOGICIEL PHOTOMODELER.....	68
FIGURE 39 : SESSION DE TRAVAIL DANS LE LOGICIEL FOTOG-FMS ^{MC}	70
FIGURE 40 : POSITIONS DES STATIONS DE PRISE DE VUE DANS LA VALLÉE DE MOOSE DOME CREEK.	71
FIGURE 41 : COMPARAISON ENTRE LES VALEURS DE DIRECTION ET DE PENDAGE COLLECTÉES SUR LE TERRAIN ET CELLES OBTENUES AVEC LE LOGICIEL FOTOG	75
FIGURE 42 : COMPARAISON ENTRE LES VALEURS DE LONGUEUR OBTENUES SUR LE TERRAIN ET CELLES MESURÉES AVEC LES LOGICIELS DE PHOTOGRAMMÉTRIE	75
FIGURE 43 : SESSION DE TRAVAIL DANS LE LOGICIEL GOCAD.....	78
FIGURE 44 : CONTACTS GÉOLOGIQUES DÉTERMINÉS SELON LA TECHNIQUE DE RENDU DE TERRAIN	79
FIGURE 45 : SURFACES GÉOLOGIQUES DÉTERMINÉES À PARTIR DU TRACÉ DES CONTACTS GÉOLOGIQUES DANS LA VALLÉE DE MOOSE DOME CREEK, MOOSE MOUNTAIN.....	80
FIGURE 46 : CALCUL DE L'ÉPAISSEUR D'UNE FORMATION GÉOLOGIQUE ENTRE DEUX SURFACES	80
FIGURE 47 : EXEMPLE DE LA GÉOMÉTRIE D'UN RÉSEAU DE FRACTURE DÉTERMINÉ SUR LA FORMATION DE PEKISKO (VUE VERTICALE VERS L'EST).....	84
FIGURE 48 : FORMATIONS GÉOLOGIQUES IDENTIFIÉES PAR PHOTOGRAMMÉTRIE PHOTOGRAMMÉTRIE ET REPRODUITES PAR LA TECHNIQUE DU RENDU DE TERRAIN.	87
FIGURE 49 : SOURCES D'ERREURS POTENTIELLES LORS DE LA RESTITUTION PHOTOGRAMMÉTRIQUE.....	91

LISTE DES TABLEAUX

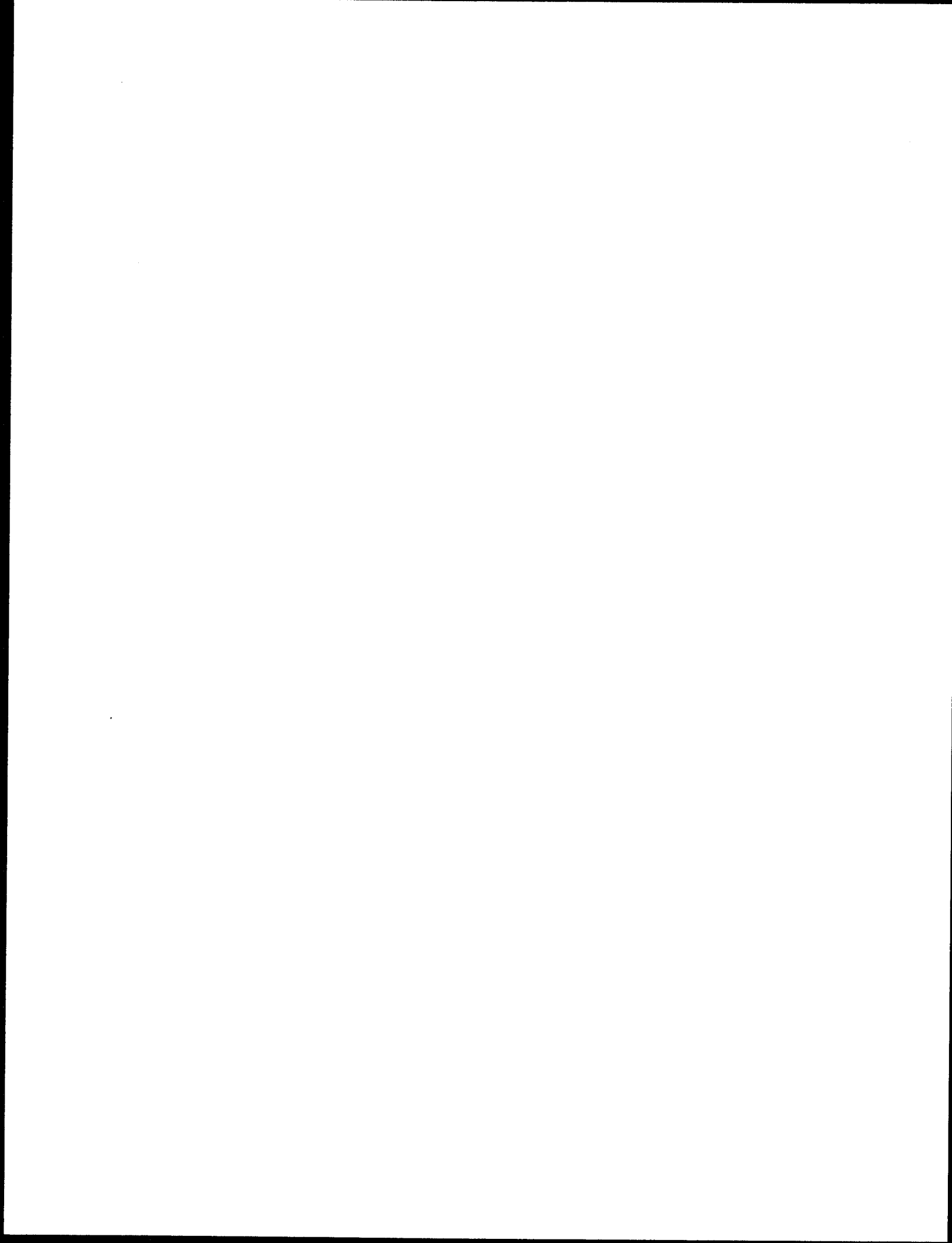
	Pages
TABLEAU 1 : COMPARAISON ENTRE LA PHOTOGRAPHIE NUMÉRIQUE ET LA PHOTOGRAPHIE SUR FILM	23
TABLEAU 2 : LOGICIELS DE PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE UTILISÉS POUR L'ÉTUDE.....	26
TABLEAU 3 : COMPARAISON DES VALEURS DE DIRECTION, PENDAGE ET LONGUEUR ENTRE LES DONNÉES TERRAIN ET LES LOGICIELS DE PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE.	74
TABLEAU 4 : ÉPAISSEURS DES FORMATIONS GÉOLOGIQUES ÉVALUÉS SELON LES QUATRE MÉTHODES DE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE ET COMPARÉS AUX MESURES DE RICHARDS <i>ET AL.</i> (2000)	81
TABLEAU 5 : PENDAGES DES SURFACES GÉOLOGIQUES ÉVALUÉS SELON LES QUATRE MÉTHODES DE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE ET COMPARÉS AUX MESURES DE BEACH (1943).....	82
TABLEAU 6 : AZIMUTH MOYEN DES SURFACES GÉOLOGIQUES ÉVALUÉES SELON LES QUATRE MÉTHODES DE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE ET COMPARÉES AUX MESURES DE BEACH (1943).....	83
TABLEAU 7 : CARACTÉRISATION DES JOINTS LE LONG D'UNE LIGNE DE RÉFÉRENCE	85
TABLEAU 8 : PROBLÈMES RENCONTRÉS	90
TABLEAU 9 : CRITÈRES COMPARATIFS ENTRE LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE.....	92



LEXIQUE

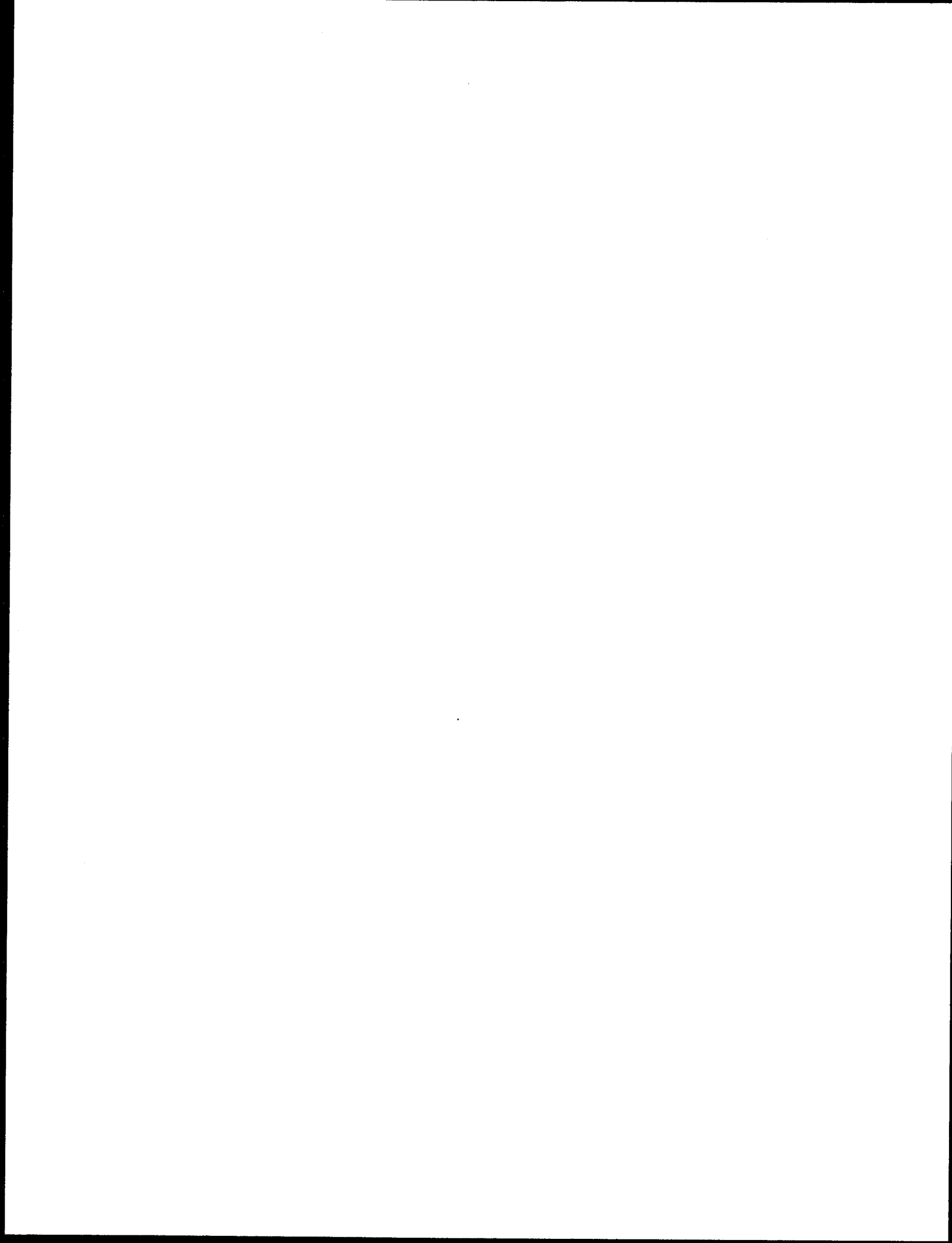
Photogrammétrie : L'étymologie du nom indique que le terme photogrammétrie provient du grec *photos* et *graphein* qui veulent dire lumière et écrire (photographier) et *metron* pour mesure. C'est une science qui permet de tirer de l'information qualitative ou quantitative d'un objet d'un territoire donné à partir de photographies [Boulianne, 1998]. Selon la *American Society of Photogrammetry* [Slama, 1980] et Karara (1989), c'est une technique permettant d'obtenir des informations précises en rapport à des objets ou à l'environnement à l'aide de procédés de mesure et d'interprétation d'images photographiques. Pour Kraus et Waldhäusl (1998), la photogrammétrie permet de définir la forme et la position d'objets à partir de photographies. On parle de photogrammétrie numérique lorsque des images sont exploitées sur fichiers informatiques. Ces images sont le fruit d'une numérisation de films par des balayeurs optiques ou proviennent de caméras numériques.

Orthophoto : Une ortho-image ou orthophoto est définie comme un fichier image d'une photographie aérienne corrigée géométriquement, pour se conformer à une projection cartographique donnée (ex. : UTM). Les corrections appliquées éliminent les déformations relatives au relief et à la prise de vue des photographies, pour obtenir une référence spatiale propre (X,Y). Nous pouvons assembler plusieurs ortho-images et en former une mosaïque. Une orthophoto est donc une photographie dans laquelle tous les objets sont montrés dans leurs véritables positions géographiques. Ainsi, à la différence des images conventionnelles, nous pouvons utiliser une orthophoto comme une carte et effectuer des mesures directes de distance, d'angle, de position. L'ortho-image est donc une excellente source d'information géospatiale.



ABRÉVIATIONS ET SIGLES

AE	<i>Alberta Environment agency</i>
ASPRS	<i>American Society of Photogrammetry and Remote Sensing</i>
BNDT	Banque nationale de données topographique (Géomatique Canada, Ressources naturelles Canada)
CGC	Commission géologique du Canada
CGQ	Centre géoscientifique de Québec
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
MNT	Modèle Numérique de Terrain
Mo	Méga octets
PPP	Point Par Pouce
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
VRML	<i>Virtual Reality Modeling Language</i>



CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Problématique

La collecte des données est l'un des volets importants de la géologie et de la géomatique. Parmi les différentes techniques de captage, la photogrammétrie est un moyen efficace pour prendre la mesure de notre environnement [Boulianne, 1998]. C'est une discipline dont les origines remontent aux environs des années 1830 et coïncide avec l'invention du procédé photographique [Kraus et Waldhäusl, 1998]. Elle regroupe l'ensemble des méthodes techniques permettant de déduire de l'information qualitative ou quantitative à partir de photographies ou d'images (sur film ou par imagerie numérique). En 1980, *l'American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) a choisi d'inclure la télédétection parmi les techniques photogrammétriques [Slama, 1980].

Pour le géologue, la photogrammétrie est un outil dont les qualités fondamentales sont de gérer des environnements où les échelles de cartographie sont différentes, de recueillir une multitude de données (bien souvent en nombre supérieur à ce qui est nécessaire à l'instant) et surtout de palier aux problèmes d'accès d'un site d'étude donné. Elle donne une représentation complète de l'objet (à l'exception des parties cachées).

La photogrammétrie fournit également un document facile à manier et à conserver, disponible en tout temps pour effectuer des mesures, des contrôles, et une recherche ultérieure de renseignements complémentaires. Elle donne une représentation très détaillée de l'objet, susceptible de fournir une grande précision de mesure [Bonneval, 1972]. Son enregistrement est instantané.

Aujourd'hui, les géoscientifiques se concentrent de plus en plus sur l'acquisition et l'interprétation des données de géophysique et de photogrammétrie pour explorer la Terre. Quand toutes ces données sont intégrées numériquement avec la connaissance régionale du site étudié et les modèles conceptuels des processus de la Terre, elles deviennent une banque d'information pertinente pour interpréter l'histoire géologique d'une région et évaluer son potentiel en hydrocarbures par exemple [Lebel *et al.*, sous presse].

L'imagerie numérique haute-résolution, émanant de sources satellitaires, aériennes ou terrestres, est de plus en plus répandue et représente un nouvel outil pour affiner les modèles géologiques d'exploration. Comme la photographie analogique, elle fournit une image familière de l'environnement, qui peut être rapidement interprétée et, dans beaucoup de cas, validée avec d'autres données de terrain. Les logiciels de géomatique permettent de géoréférencer rapidement ces images, de sorte qu'elles puissent être visualisées et combinées avec d'autres données géospatiales.

Compte tenu des avantages cités plus haut, les techniques de photogrammétrie numérique ont donc été choisies pour recueillir les informations géologiques pertinentes comme l'attitude d'un plan, la localisation des formations géologiques, l'évaluation précise de leur épaisseur ou encore la détermination d'un réseau de fractures, dans des zones à accès difficile. L'usage et l'évaluation de ces techniques nous ont permis de développer et de proposer une nouvelle méthode de photogrammétrie pour le géologue confronté à une situation similaire sur le terrain.

La présente recherche s'inscrit dans le cadre du projet Moose Mountain. Ce projet, d'une durée de trois ans (1999-2002), s'insère dans un des nombreux thèmes de recherche du réseau GEOIDE (GÉOmatique pour des Interventions et des Décisions Éclairées), bénéficiant d'une subvention du programme fédéral de Réseaux de Centres d'Excellence (cf. <http://www.geoide.ulaval.ca> et <http://www.inrs.quebec.ca/moose-geoide/>).

1.2 Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer de nouvelles méthodes pour intégrer les données de photogrammétrie et élaborer de nouveaux modèles d'exploration des réservoirs gaziers, dans le secteur clé de l'avant-pays des Cordillères canadiennes [Lebel *et al.*, 2000].

L'étude se concentre particulièrement sur l'utilisation d'outils de visualisation et de modélisation 3-D au cœur de structures géologiques, dans la région de Moose Mountain, située à l'ouest de Calgary, dans les Foothills de l'Alberta (Figures 1 et 2).

Quatre techniques de photogrammétrie numérique, utilisant l'imagerie haute-résolution, ont été évaluées et comparées afin de développer une méthodologie permettant : d'évaluer avec précision l'attitude des structures géologiques, délimiter les contacts des formations rocheuses, et déterminer la géométrie d'un réseau de fractures. Ces quatre techniques font appel à l'imagerie aérienne (cf. chapitre V) et à l'imagerie oblique (cf. chapitre VI). Dans notre étude, l'imagerie aérienne regroupe trois méthodes : (1) l'orthophoto haute-résolution, (2) la stéréo-imagerie numérique et (3) le rendu de terrain (*Terrain Rendering*). Quant à l'imagerie oblique, nous en avons tiré partie grâce à la photogrammétrie terrestre. Chaque méthode possède ses avantages et ses propres limites ; ceci influençant directement le degré de précision.

1.3 Méthodologie

La cartographie en géologie comprend toutes les activités et techniques appropriées pour recueillir, interpréter et représenter l'information géologique sous différents supports graphiques.

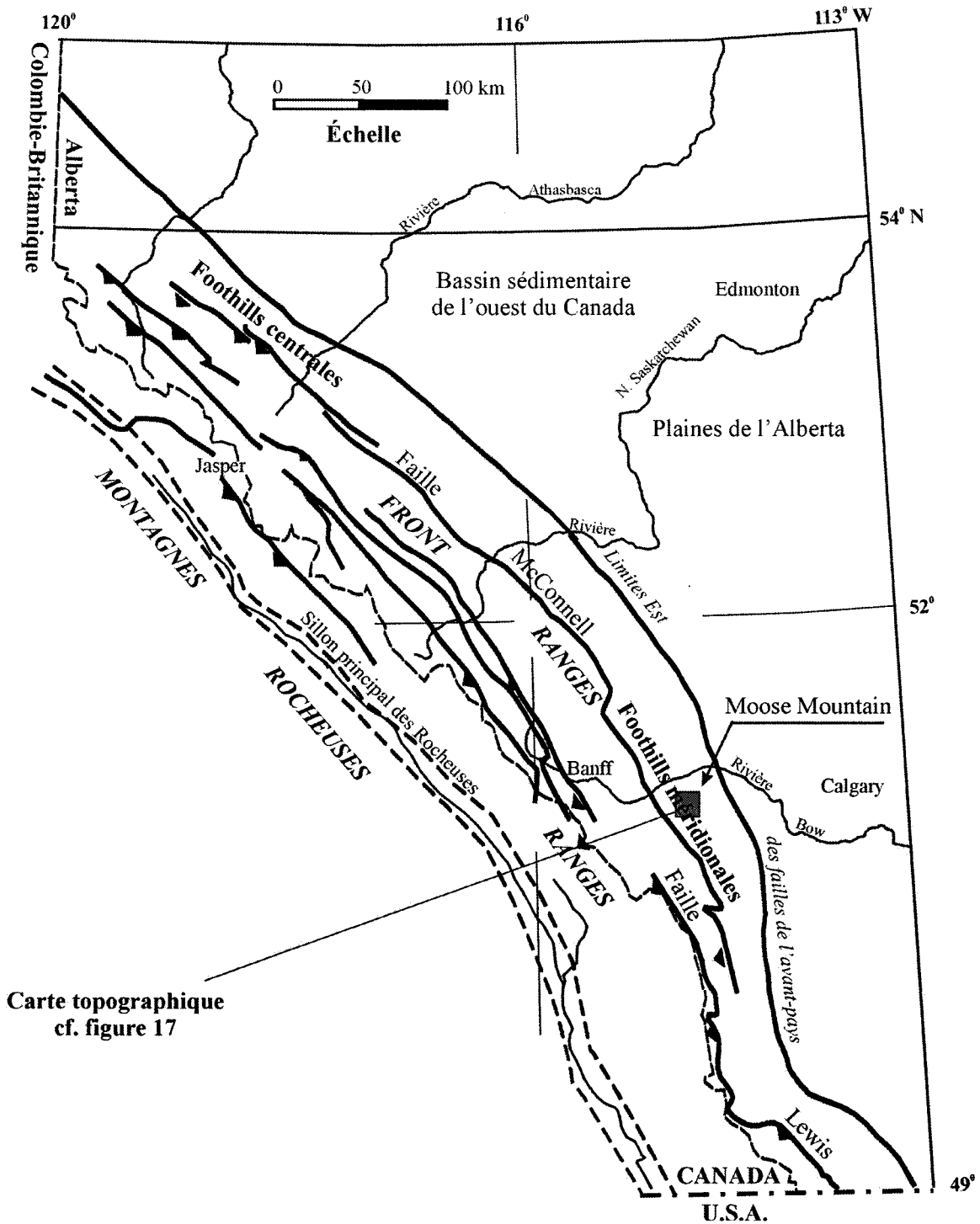


Figure 1 : Carte de localisation de la région de Moose Mountain (modifiée d'après Lebel *et al.*, 1996)

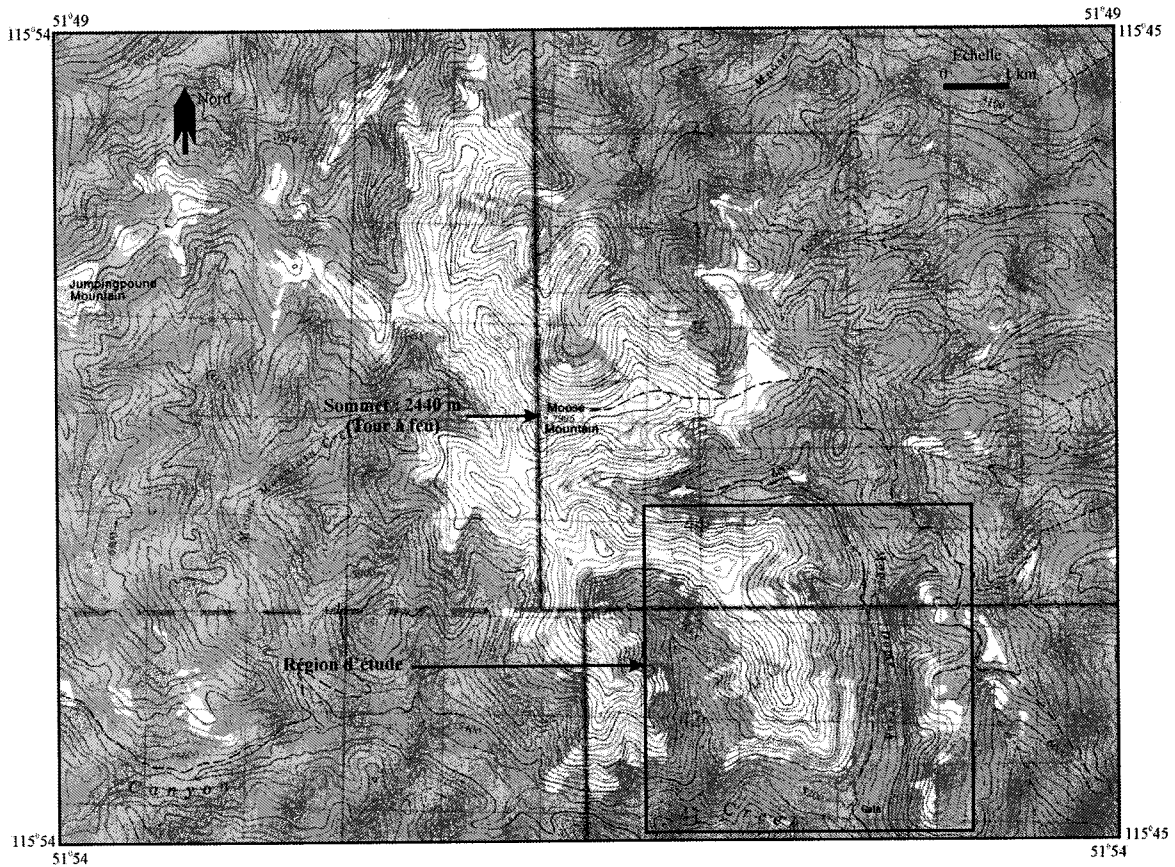


Figure 2 : Carte topographique de la région de Moose Mountain (Feuillet SNRC 82J/15)

Dans le cadre de ce projet de recherche, les travaux de cartographie ont principalement été concentrés sur la région de Moose Mountain où nous avons : (1) collecté des données structurales sur le terrain, (2) établi un réseau géodésique, (3) calibré les appareils photos, (4) pris des clichés panoramiques et rapprochés des affleurements étudiés, (5) intégré et géré toutes les informations recueillies et (6) choisi les logiciels et techniques appropriés pour modéliser et visualiser des éléments géologiques dans un univers à trois dimensions au laboratoire (cf. chapitre III et Figure 3).

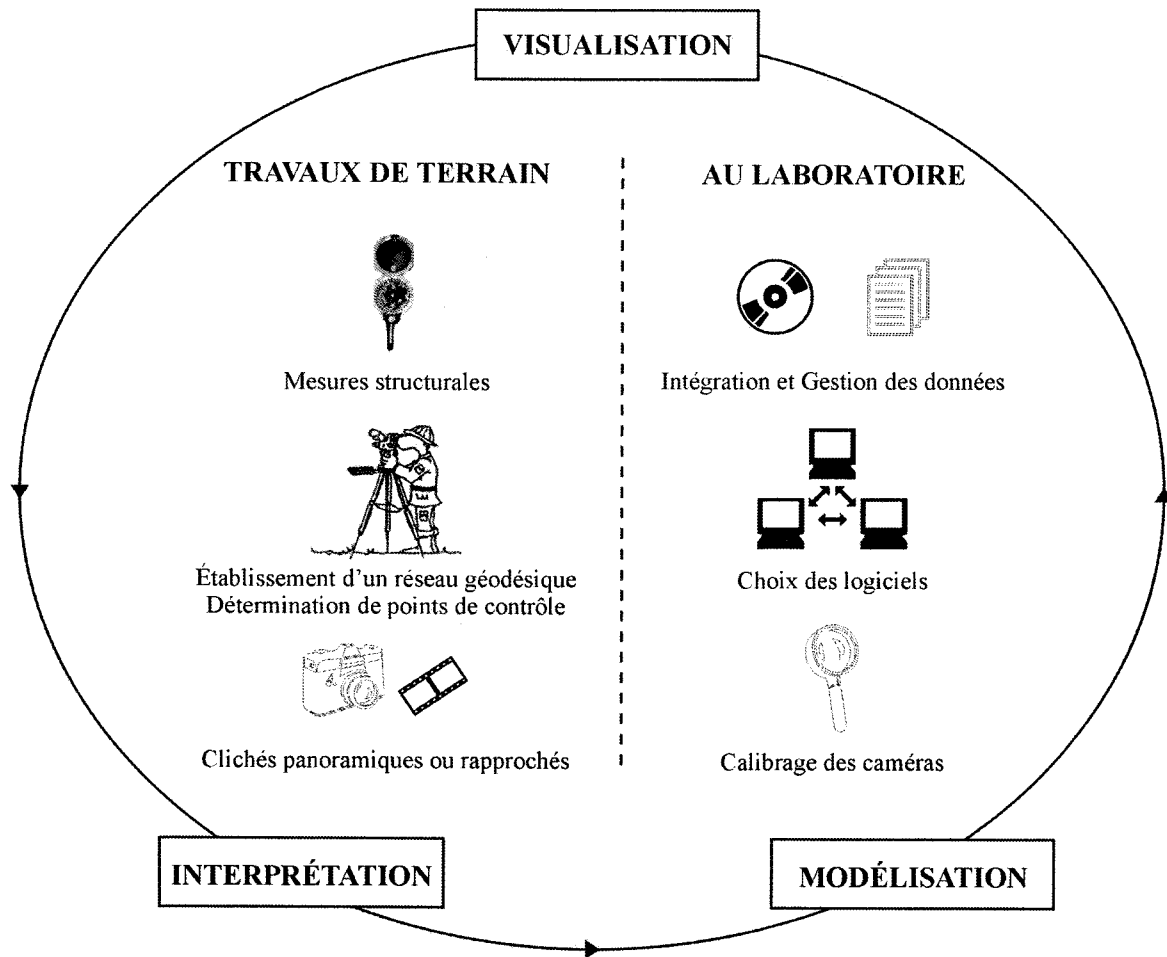


Figure 3 : Représentation schématique de la démarche suivie pour la cartographie géologique de Moose Mountain par méthodes photogrammétriques

1.4 Structure du mémoire

Outre l'introduction, faisant principalement référence à la problématique et aux objectifs du projet de recherche, le présent mémoire est divisé en huit parties.

Le chapitre II fait état des connaissances dans le domaine de la photogrammétrie appliquée à la géologie.

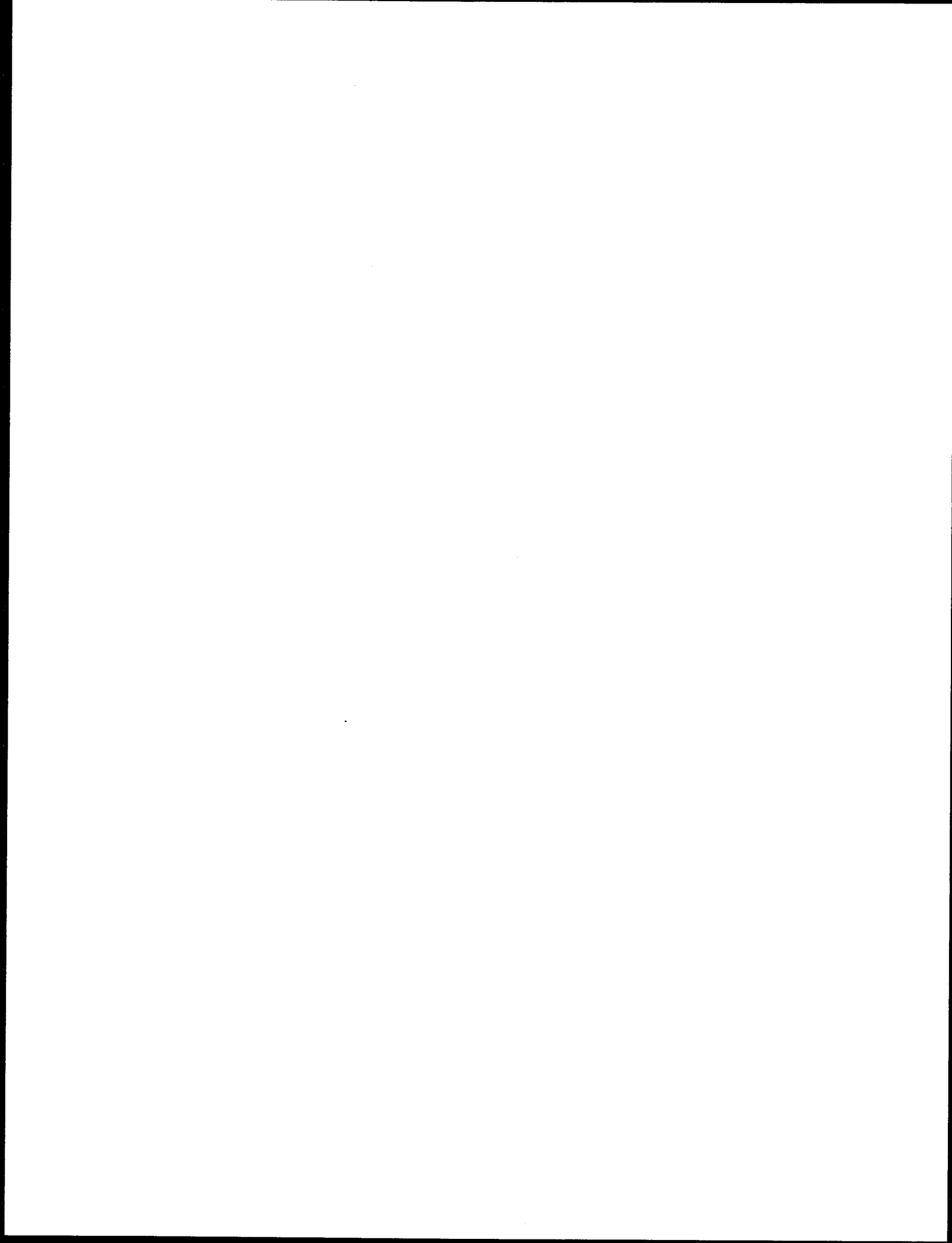
Le chapitre III élabore de façon succincte la méthodologie employée dans le cadre de ce projet de recherche.

Le chapitre IV expose le contexte géologique des sites d'étude, en mettant l'accent sur les caractéristiques physiographiques qui les distinguent.

Les chapitres V et VI décrivent les différentes méthodes de photogrammétrie employées dans cette étude pour la cartographie géologique.

Le chapitre VII expose les résultats obtenus par photogrammétrie, comparés aux données de terrain, puis affiche et commente les modèles 3-D réalisés.

Enfin, le huitième et dernier chapitre discute de la précision et de l'utilité des techniques développées dans ce document, et propose des critères pour le choix de la meilleure méthode de photogrammétrie pour le géologue sur le terrain.



CHAPITRE II

ÉTATS DES CONNAISSANCES CONCERNANT LA PHOTOGRAMMÉTRIE APPLIQUÉE À LA GÉOLOGIE

Les cartes géologiques permettent de publier, sur un support graphique, des informations portant sur la surface de la Terre, comme par exemple, la distribution et la nature des unités rocheuses, ou encore les éléments structuraux, tels les plis et les failles.

C'est au début des années 50 que les progrès techniques, engendrés par la Seconde Guerre Mondiale dans la conception et la fabrication des appareils de restitution à partir de prise de vues aériennes, ont entraîné un essor rapide et important de la cartographie géologique avec support photogrammétrique.

Les champs d'application de la photogrammétrie sont aujourd'hui très variés, parmi ceux-ci nous retrouvons :

- Foresterie (inventaire forestier, peuplement forestier, etc.) : [Bethesda, 1990]
- Génie (planification routière, déformation de structures, etc.) : [De Gunst, 1996]
- Agriculture (inventaire et état de santé des cultures, etc.) : [Mausel, 1995]
- Archéologie (plan des sites de fouilles) : [Guillot, 1997]
- Architecture (restauration, déformation, etc.) : [Streilein et Niederöst 1998 ; Grussenmeyer *et al.*, 1999]
- Police (plan des lieux d'un crime ou d'un accident) : [Boulianne *et al.*, 1995a]
- Urbanisme (étude de la circulation, d'occupation, etc.) : [Huang, 1998]
- Géologie (mésosofabriques structurales, etc.) : [Duelholm *et al.*, 1992 ; Duelholm *et al.*, 1993b ; Coe et Nelson, 1997]

Travaillant le plus souvent avec des couples stéréoscopiques composés de photographies aériennes traditionnelles, les géologues préfèrent reporter les informations géologiques sur des cartes topographiques de sorte que les relevés soient bien positionnés et que les rapports tridimensionnels entre les unités géologiques et la surface topographique puissent être montrés. Toutefois, le positionnement de ces données sur les cartes est souvent ardu et dépasse rarement une différence de 30 mètres entre la valeur réelle et la valeur mesurée.

Aujourd'hui, la puissance des ordinateurs et la performance des systèmes photogrammétriques permettent de produire directement des cartes au format numérique sur lesquelles les géologues peuvent faire des mesures directes et modéliser des éléments géologiques.

Il convient toutefois de reconnaître que l'utilité de la photogrammétrie est proportionnelle à la quantité et la qualité de l'affleurement du socle rocheux, et au type de géomorphologie présente. En règle générale, les régions arides et semi-arides, comme les zones alpines de la Cordillère canadienne et la toundra de l'Arctique, sont beaucoup plus propices à de telles études que les forêts boréales qui recouvrent la plus grande partie de l'Est du Canada.

Plusieurs chercheurs ont déjà utilisé la technique de stéréo-imagerie, comme décrite dans ce document au chapitre V, pour cartographier des contacts géologiques. Toutefois, les systèmes photogrammétriques employés auparavant faisaient appel à des stéréorestituteurs analogues, qui sont de gros et lourds instruments [Pillmore, 1989]. Les premiers prototypes numériques [Larouche *et al.*, 1994] ont entraîné la création de nouveaux outils géologiques permettant d'évaluer l'attitude du litage, ou encore l'épaisseur des unités.

Duelholm *et al.* (1989) ont créé et développé une nouvelle technique, appelée photogrammétrie multi-modèles. Élaborée spécifiquement pour la cartographie géologique des terrains arides et accidentés du Groënland, cette méthode a permis plusieurs percées originales, portant en autres sur l'analyse d'unités sédimentaires pour construire des modèles analogues de réservoirs pétroliers, ou pour conduire des analyses stratigraphiques [Duelholm et Olsen, 1993a ; Duelholm *et al.*, 1993b]. Cette méthode permet également aux géologues de terrain de générer des modèles tridimensionnels précis à partir d'une série de diapositives standards (couleurs ou monochromes), prises avec des appareils photos conventionnels. L'avantage de cette technique multi-modèles est qu'elle permet le lien entre plusieurs images stéréoscopiques visant les mêmes cibles, avec des angles et des focales différentes. L'inconvénient principal de la méthode est qu'elle fait appel à un système analytique ou semi-numérique (stéréorestituteur analogue couplé avec un ordinateur) qui est maintenant devenu désuet.

D'autres chercheurs ont également présenté des techniques similaires pour la cartographie régionale et l'évaluation des structures par imagerie satellitaire [Lang *et al.*, 1987 ; Lang et Paylor, 1994 ; McGuffie *et al.*, 1989 ; McMahan et North, 1993]. Berger *et al.* (1992) ont montré qu'il était possible d'extraire de l'information sur les structures géologiques à partir des données du satellite SPOT^{MC} (Satellite Pour l'Observation de la Terre). Récemment, Bilotti *et al.* (2000) ont utilisé la même technique avec les données du satellite Landsat Thematic Mapper^{MC} dans les Cordillères nord-américaines et andéennes. Ils ont intégré les profils sismiques de subsurface aux mesures de surface afin de générer des coupes structurales balancées, tirant avantage de la triangulation photogramétrique pour faciliter l'interprétation et cibler les structures géologiques propices à piéger les hydrocarbures.

À l'autre extrême du spectre de l'échelle d'analyse géologique, des études de fracturation ont été conduites sur de petites régions ($< 100 \text{ m}^2$) et pour la cartographie de structures géologiques dans les mines afin d'évaluer la migration des fluides [Duelholm et Olsen, 1993a ; Coe et Nelson, 1997]. Les avantages majeurs de l'utilisation de la photogrammétrie oblique dans une mine sont : (1) la réduction du temps d'analyse étant donné le nombre important de fractures, (2) la prise de mesure dans des endroits inaccessibles et (3) le travail sur des images claires au lieu de parois uniquement éclairées par une lampe de poche.

Compte tenu des projets photogrammétriques cités ci-dessus, des moyens financiers disponibles et des conditions physiographiques des sites d'étude (cf. chapitre IV), l'imagerie aérienne et terrestre à haute-résolution a été choisie pour mieux comprendre le contexte des réservoirs gaziers fracturés des Foothills de l'Alberta.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

3.1 Avant-propos

Compte tenu des objectifs fixés et détaillés à la Section 1.2, les travaux de recherche ont été conduits en procédant selon les étapes suivantes :

- (1) collecte de données structurales afin de valider les valeurs obtenues par les diverses méthodes de photogrammétrie,
- (2) établissement d'un réseau géodésique pour déterminer des points de contrôle, nécessaires à la construction d'un modèle photogrammétrique,
- (3) étalonnage des appareils photos,
- (4) prise de clichés panoramiques et rapprochés des affleurements étudiés,
- (5) intégration et la gestion de toutes les informations recueillies, et
- (6) choix des logiciels et techniques appropriés pour modéliser et visualiser des éléments géologiques dans un univers à trois dimensions au laboratoire.

Les étapes (1) à (4) ont été menées sur le terrain, et les étapes (5) et (6) en laboratoire. Elles ont principalement été concentrées sur la région de Moose Mountain. Les étapes (2) à (4) sont particulières à la photogrammétrie terrestre.

3.2 Étapes réalisées sur le terrain

3.2.1 Collecte des données structurales

À Moose Mountain (cf. chapitre IV et Figure 1), comme à Lévis (site d'étalonnage, cf. chapitre VI), les mesures structurales ont été prises sur le terrain selon des méthodes conventionnelles (boussole du géologue et rubans à mesurer ; Figure 4).

Les données géologiques recueillies et analysées comprennent : (1) l'orientation et le pendage de mésostructures tels que le litage, les fractures et les veines, et (2) l'épaisseur des unités (cf. chapitre VII). Toutes ces informations ont été indexées dans une base de données.



Figure 4 : Mesures structurales recueillies sur les affleurements de Lévis (septembre 1999)

Les données géologiques, recueillies à Moose Mountain, ont été utilisées pour raffiner les cartes antérieures de la région [McMechan, 1995 ; Newson et Sanderson, 1999] et amener de nouvelles interprétations avec l'aide des solides connaissances déjà acquises [Fermor, 1999 ; Richards *et al.*, 2000].

3.2.2 Campagne géodésique

Environ 80 points de contrôle (position en X, Y, Z) ont été mesurés à l'aide d'une station-totale de type Leica TC-1600 et rattachés au réseau géodésique (système de référence NAD 83) pour Moose Mountain et à un système local dans le cas de Lévis. Ils ont servi à l'orientation des modèles en photogrammétrie terrestre (cf. chapitre VI). Ces points de contrôle ont été mesurés avec un prisme ou calculés par intersection spatiale lorsque la zone était trop difficile d'accès. Chacun d'entre eux a été photographié avec un téléobjectif (300 mm) et indexé dans une base de données.

La Figure 5 illustre la technique d'arpentage à Moose Mountain. Il est facile d'imaginer que le relief limite également les déplacements et le transport de l'équipement d'arpentage sur le terrain. Dans de telles conditions, il est préférable d'avoir à disposition une technique aéroportée.



Figure 5 : Arpenteur-Géomètre sur le terrain à Moose Mountain (vue sur le sommet de Moose Mountain, été 1999). La falaise visée a une hauteur de 600 mètres par rapport au point de vue caractérisé par la présence de l'arpenteur-géomètre. Le sommet est situé à 2438 m d'altitude. Les plis et empilement de failles, observés dans les carbonates du Groupe de Rundle (Carbonifère inférieur), sont typiques des structures prospectées à 3000 - 4000 m au-dessous de la surface pour la recherche du gaz naturel. Plusieurs puits d'exploration ont été forés à cette profondeur, à quelques kilomètres de cet emplacement (gisements de gaz de Moose Mountain).

Les Figures 6 et 7 représentent la position des points de contrôle relevés sur le terrain. À Lévis, un système de coordonnées local défini par une station de référence ayant les coordonnées suivantes : $X,Y,Z = 100,100,100$ (station no.2 sur la Figure 7) a été implanté. Les distances calculées entre chaque station (appelées bases) sont comprises entre 15 et 25 mètres.

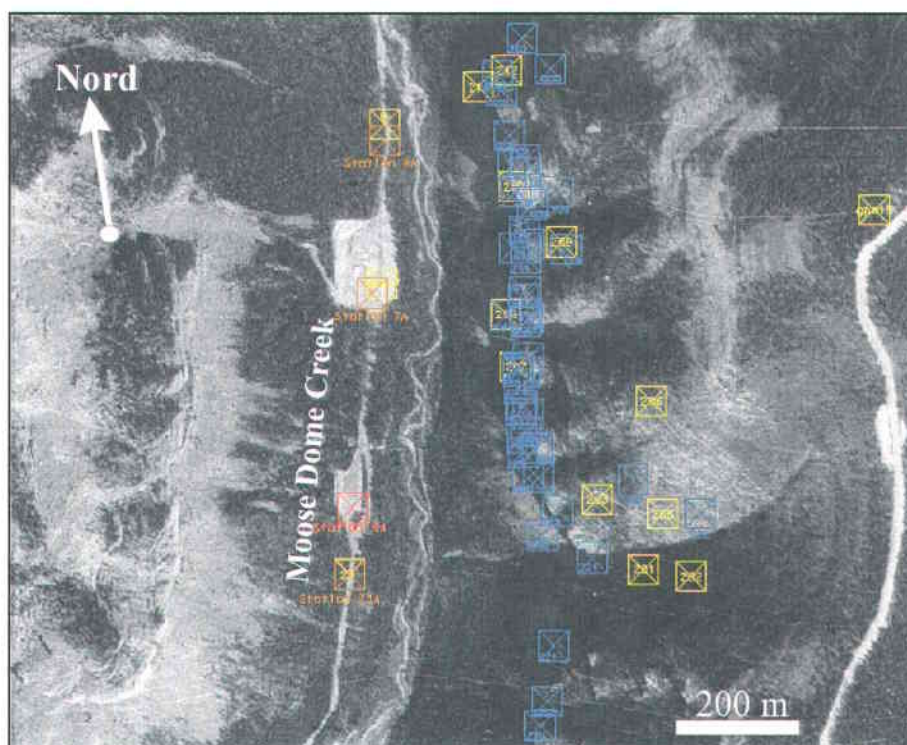


Figure 6 : Points de contrôle mesurés dans la région de Moose Dome Creek. En bleu : points de contrôle déterminés à l'été 2000 ; en jaune : points de contrôle déterminés à l'été 1999 ; les points le long de la route de Moose Dome Creek symbolisent la position des stations.

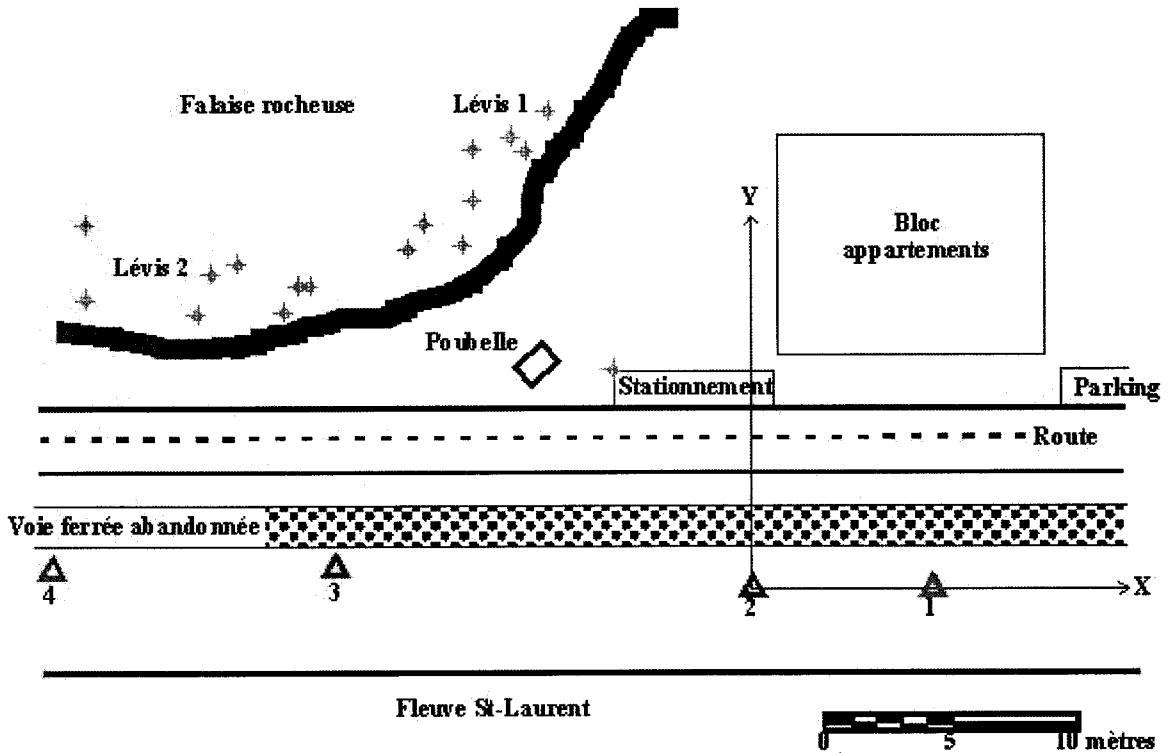


Figure 7 : Points de contrôle identifiés le long de deux affleurements à Lévis. Les triangles illustrent les stations de prises de vue et les cibles (croix) représentent les points de contrôle.

3.2.3 Campagne de photographie

Plus de 100 clichés panoramiques et rapprochés ont été pris le long des affleurements rocheux de la vallée de Moose Dome Creek à Moose Mountain et 18 à Lévis, pour aider à la compréhension géologique du site, faciliter la reconnaissance des points de contrôle et surtout orienter les modèles de photogrammétrie terrestre. Toutes ces images ont été prises avec attention en respectant un recouvrement minimum de 60% entre deux images (Figure 8). Une multitude de points de l'objet visible sur deux photographies peut donc être mesurée.

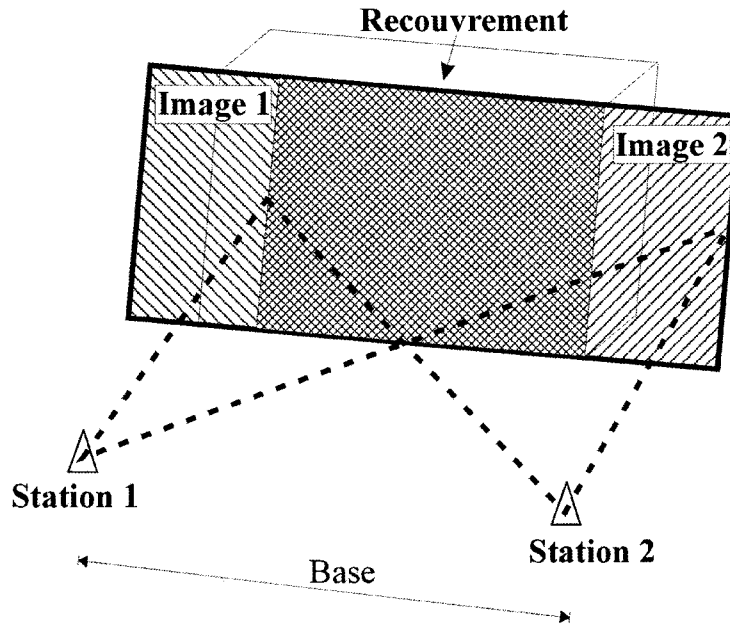


Figure 8 : Localisation par intersection d'angles (recouvrement minimum 60 %)

Afin de construire un modèle tri-dimensionnel à partir des photographies prises à Moose Mountain, ou à Lévis, nous avons dû respecter certaines conditions :

- prises de vue parallèles ou très peu convergentes,
- la base (distance entre deux stations) doit être fonction de l'éloignement, généralement 1/5 de l'éloignement à la structure photographiée [Guillot, 1997] ou selon la formule suivante :

$$B = (1-0.6) D c / f \quad (\text{pour un recouvrement de } 60\%)$$

Avec :

B	Base
D	Distance caméra-objet ($D = c / \text{Échelle moyenne de l'image}$)
f	longueur de la focale
c	taille de l'image

Les conditions suivantes sont également nécessaires pour garantir une bonne restitution des modèles 3-D :

- l'éloignement doit être fonction de l'échelle demandée,
- la base doit être relativement parallèle à la structure de manière à s'assurer des éloignements similaires des deux stations à la structure,
- un recouvrement longitudinal et latéral est nécessaire.

La Figure 9 illustre la relation entre l'objet réel et l'objet image, tel que projeté dans un système optique. La lentille de la caméra est représentée géométriquement par un seul point, le centre de perspective. La distance du centre de perspective et du plan de l'image dans la caméra est la distance principale (ou focale). La mesure du point principal, de la distance principale et du centre de perspective sont les éléments les plus importants de l'étalonnage d'une caméra, appliquée à la photogrammétrie terrestre en particulier (cf. chapitre VI).

La position du point principal (Figure 9), projeté du centre de perspective sur le fond de la chambre, doit être connue avec la même précision que celle de la focale. Ce point n'est pas forcément le centre du cliché. Il est défini comme la normale au plan image passant par le centre de perspective.

La focale indiquée sur les objectifs du commerce est une valeur arrondie qui doit être calculée précisément par une procédure d'étalonnage des instruments [Guillot, 1997]. La précision requise est de l'ordre de quelques dizaines de microns.

Les paramètres de distorsion correspondent aux erreurs de représentation introduites par l'imperfection des lentilles. L'ordre de grandeur de ces distorsions est de quelques microns pour les chambres métriques à quelques dixièmes de millimètres pour les chambres amateurs [Guillot, 1997; Boulianne, 1998].

Les marques fiduciaires ne sont pas obligatoires, mais sont vivement recommandées car elles fournissent des repères supplémentaires pour calibrer le modèle, et donc augmentent la précision des résultats. Dans cette recherche, quatre marques fiduciaires ont été placées, une à chaque coin de l'image. Pour ce faire, quatre transparents ont été collés dans le fond de la chambre de l'appareil photo (entre la lentille et le film), sur lesquels était imprimée une croix.

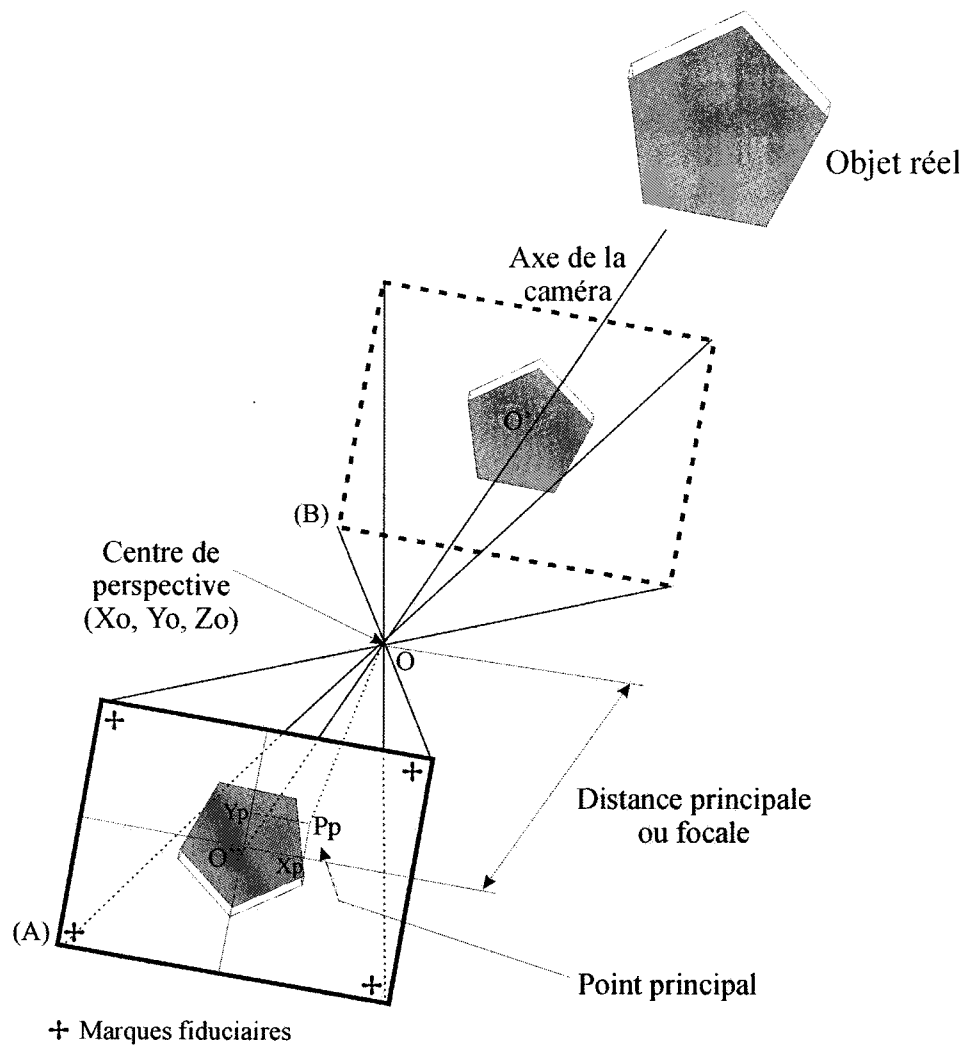


Figure 9 : Relation objet réel / objet image. (A) : Position négative et (B) : Position positive ; Pp est le point principal, dont les coordonnées, dans le repère image, sont Xp et Yp ; O' et O'' correspondent aux centres des images. Ils sont symétriques par rapport au centre de perspective O, dont les coordonnées sont Xo, Yo, Zo.

Pour des raisons techniques et financières, des appareils photos numériques non-métriques de type commercial ou professionnel, couplés ou non avec une station-totale et avec des appareils traditionnels sur film, ont été choisis. Cependant, toutes les photos prises sur film ont été balayées à 2000 ppp (généralant ainsi des fichiers de 50 Mo) afin de pouvoir les utiliser dans les logiciels de photogrammétrie (cf. chapitre VI). La facilité d'utilisation, la maniabilité, leur disponibilité ou leur prix fort raisonnable et le faible poids et encombrement des appareils ont été les principaux critères de sélection.

La vocation première de ces appareils n'étant pas la photogrammétrie, il fallait s'assurer d'ajuster le zoom à l'infini afin de bien connaître la distance focale de l'objectif (Figure 9).

La caméra numérique Kodak DCS420 (Figure 10), utilisée dans le cadre de notre étude, est de type monochrome. Elle a une résolution de 1524 x 1012 pixels (14,0 x 9,3 mm), soit 1,5 millions de pixels par image. C'est un appareil de type professionnel. Sa focale est de 28 mm. Son disque dur interne peut stocker un peu plus de 110 images (1,5 MB par images), indépendamment de la carte choisie.

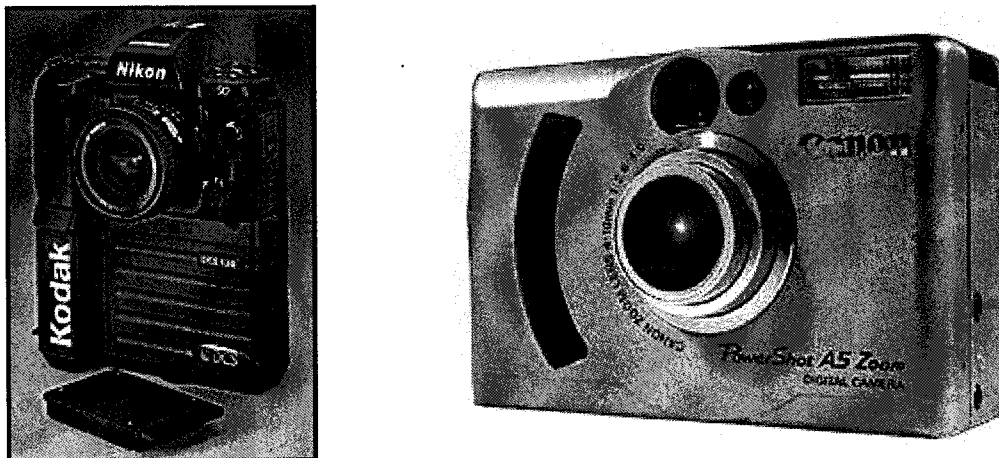


Figure 10 : Caméras numériques non-métriques Kodak DCS420 (à gauche) et Canon PowerShot A5 Zoom (à droite).

Une seconde caméra numérique a été utilisée sur le terrain. Il s'agit de la Canon PowerShot A5 Zoom (Figure 10). C'est un appareil polychrome avec une résolution de 1024 x 768 pixels, soit 786432 pixels par image. Il peut stocker, suivant le format de compression souhaité, entre 8 et 37 images (format JPEG). La plage focale varie de 4 mm à 10 mm, en fonction du zoom optique sélectionné.

La faible résolution de ces deux caméras reflète les capacités des senseurs CCD actuels. C'est pourquoi, ces deux caméras numériques n'ont été utilisées que pour des applications à courte distance (50 mètres), et en particulier pour le site d'étalonnage à Lévis.

Li (1999) dresse un bilan de l'utilisation des caméras numériques à faible-résolution, comme la Canon PowerShot A5 Zoom, en photogrammétrie. Deux appareils photos traditionnels ont également été utilisés sur de plus longues distances (300 mètres) et avec différents zooms, pour tirer avantage de la plus grande capacité de captage du film photographique. Ces appareils sont :

- Bronica ETRSi : format 45 x 60 mm, zoom 70 et 250 mm (Figure 11),
- Minolta X9 : format 35 mm, zoom 75 et 135 mm.



Figure 11 : Bronica ETRSi (format 45 x 60 mm).

Des marques fiduciaires ont été insérées sur chacun de ces deux appareils.

Le tableau 1 dresse les critères comparatifs entre la photographie numérique et la photographie traditionnelle sur film :

Critères comparatifs	Photographie numérique	Photographie sur film
Précision de la mesure	Limitée à la taille du pixel et aux caractéristiques optiques	Limitée par la taille du grain photographique et par les caractéristiques optiques
Acquisition de l'information	Directe à partir du fichier	Développement et tirage du cliché
Réponse du capteur	Linéaire	Logarithmique
Support informatique	Indéformable	Souple et déformable
Stockage des données	Disquette ou disque dur	Sur film, sur verre ou sur papier (diapositives, négatifs, photos)
Nombre de niveaux de gris	Grande dynamique : jusqu'à 1000 niveaux	Au maximum 60 niveaux
Traitement de l'image	Possibilités illimités d'amélioration des qualités esthétiques de l'image	Tout se joue au développement et au tirage
Qualité de l'image avec le temps	Aucune altération	Altération, notamment des films couleurs

Tableau 1 : Comparaison entre la photographie numérique et la photographie sur film (modifié d'après Guillotin, 1997).

3.3 Étapes réalisées au laboratoire

3.3.1 Intégration et gestion des données

Toutes les informations recueillies dans la région de Moose Mountain (données structurales, levés géodésiques et photographies obliques) ont été saisies dans le système de données Microsoft Access 97, en vue de permettre un accès rapide et ordonné pour le présent projet de recherche.

Afin d'avoir une large gamme de points de vue, un grand nombre d'images a été balayé à 2000 ppp. Nous avons volontairement choisi de les transformer au format de *MrSid^{MC}* (logiciel de compression d'images, développé par la compagnie Lizardtech), afin d'accélérer leur affichage à l'écran et limiter l'espace nécessaire au stockage des données. Le résultat de cette compression permet d'obtenir des images dont la taille (en Mo) est 100 fois plus petite que la taille originale, tout en gardant une très bonne résolution écran pour permettre de fournir des informations complémentaires lors de l'interprétation. Toutefois, pour la construction des modèles 3-D, nous avons travaillé avec les originaux, au format *.tif, dont les pixels n'ont été affectés par aucune transformation.

Toutes les mesures structurales collectées durant les deux campagnes de terrain à Moose Mountain (été 1999 et 2000), ainsi que celles obtenues à Lévis, ont été comparées aux valeurs déterminées par photogrammétrie terrestre (cf. chapitre VI).

3.3.2 Étalonnage des caméras

L'étalonnage des instruments de prises de vue est l'étape la plus importante du processus de photogrammétrie terrestre. Il influence la précision des données géométriques finales, et impose donc d'être très rigoureux. Dans le cas du logiciel AutoCAP, les photographies ont été prises sous des angles et des distances différents selon la technique de « *self-calibration* » ou auto-étalonnage [Fryer, 1992]. Le site d'étalonnage est décrit par Agnard *et al.* (1998). Des informations complémentaires sur les processus d'étalonnage et de restitution photogrammétrique sont fournies au chapitre VI.

3.3.3 Choix des logiciels de photogrammétrie numérique

Depuis quelques années, les appareils mécaniques et analogiques, utilisés pour l'analyse photogrammétrique, deviennent désuets et de multiples logiciels de photogrammétrie ont fait leur apparition sur le marché (FotoG, PhotoModeler, DVP, DiAP, Tiphon, Shape Capture, PhotoMod, etc. ; cf. chapitre VI).

Les progrès de l'informatique engendrent le développement de logiciels de photogrammétrie de plus en plus performants. Toutefois, les principaux avantages de leur utilisation ne changent guère, à savoir : (1) un faible coût, (2) une interface conviviale homme-machine et (3) aucune pièce mécanique.

Dans le cadre de notre étude, nous avons choisi de tester trois logiciels de photogrammétrie : AutoCAP (prototype développé par le département des sciences géomatiques de l'Université Laval, Québec), PhotoModeler (EOS System Corp., Vancouver, Canada), et FotoG-FMS^{MC} (Vexcel Cie, Colorado, U.S.A.). Outre le produit AutoCAP dont l'usage nous a été octroyé par l'auteur, les deux autres logiciels ont des prix qui varient de 1500\$ pour PhotoModeler à 15000\$ pour FotoG-FMS et des fonctionnalités différentes.

Cependant, il convient de garder à l'esprit que les prix mentionnés ci-dessus ne comptent pas le temps d'investigation nécessaire à la création d'un modèle photogrammétrique, dont la technique reste difficile à maîtriser pour un non-spécialiste.

Logiciels	Institution / Compagnies	Sites Internet
AutoCAP	Paul-André Gagnon / Université Laval (Département des sciences géomatiques)	<i>En développement</i>
FotoG-FMS	Vexcel Corporation	Http :\\www.vexcel.com\\fotog\\
PhotoModeler	EOS System Corp.	Http:\\www.photomodeler.com

Tableau 2 : Logiciels de photogrammétrie terrestre utilisés pour l'étude.

CHAPITRE IV

PHYSIOGRAPHIE ET GÉOLOGIE DES SITES ÉTUDIÉS

4.1 Avant-propos

Deux sites géologiques ont été sélectionnés pour évaluer les nouvelles techniques de photogrammétrie numérique.

La région de Lévis, située à proximité de la ville de Québec, a d'abord été retenue comme site d'essais. Les affleurements étudiés sur ce site montrent suffisamment de plans de stratification, de joints et de veines pour se familiariser avec la méthode de photogrammétrie terrestre.

La région de Moose Mountain, située dans les Foothills de l'Alberta, a été choisie en raison de ses caractéristiques physiographiques (relief de type alpin), de l'évidence de ses structures géologiques et de l'importance des structures géologiques pour la compréhension des réservoirs d'hydrocarbures.

4.2 Site d'essais pour la photogrammétrie terrestre : la Nappe de la Pointe-de-Lévy (Lévis, Québec)

La Nappe de la Pointe-de-Lévy est composée de roches allochtones du domaine externe de la Zone de Humber dans les Appalaches. Elle est limitée au nord-ouest par la faille (ou ligne) de Logan et la Nappe du Promontoire de Québec et au sud-est par la Nappe de Bacchus (Figures 12 et 13).

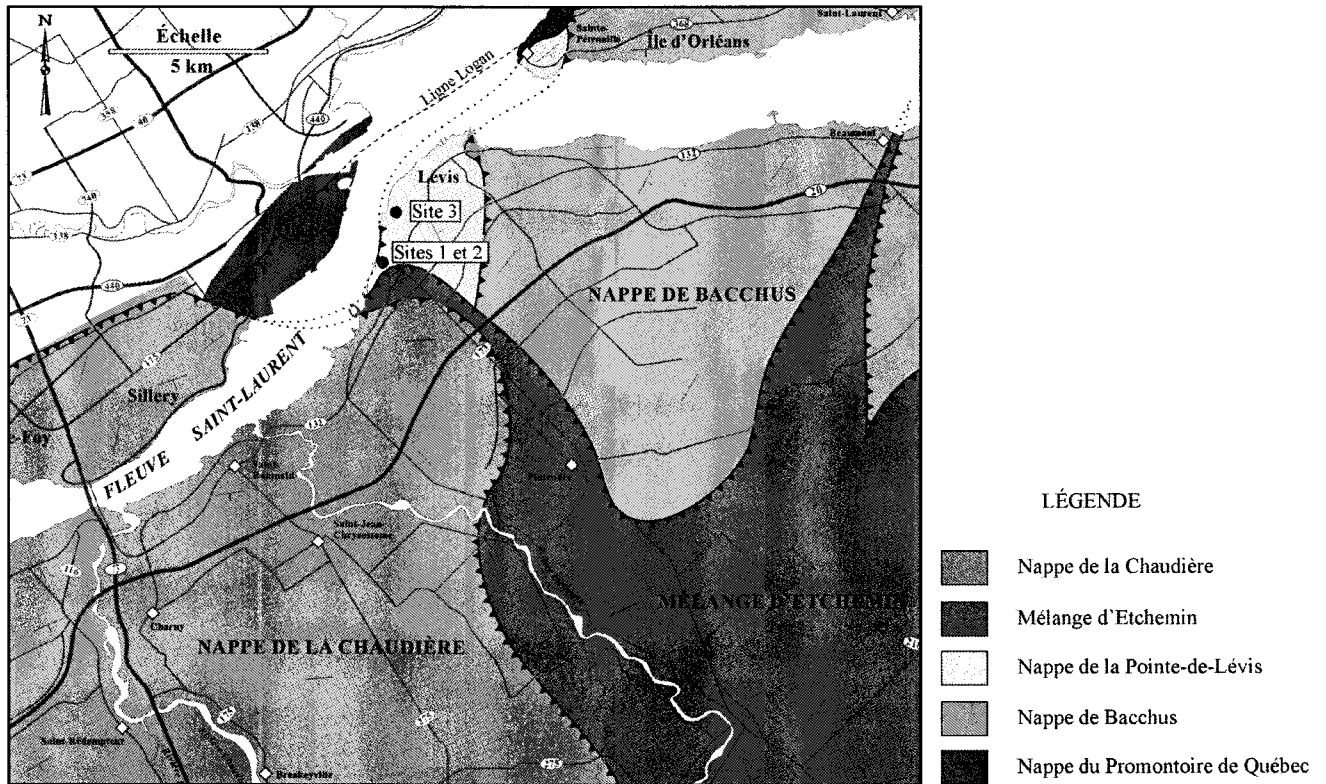


Figure 12 : Géologie de la région de Québec (modifiée d'après Feininger *et al.*, 1995).

La Nappe de la Pointe-de-Lévy est caractérisée par des affleurements spectaculaires de conglomérats calcaires, et de diverses lithologies flyschiques (Figures 14, 15 et 16). Des plis et failles déforment cette unité en un ensemble complexe, dont la plus grande partie est difficile d'accès le long des falaises bordant le Fleuve St-Laurent, à Lévis.

Depuis les premiers jours de la géologie au Canada jusqu'à aujourd'hui, la présence de failles internes, de plis ainsi que de discontinuités a soulevé diverses controverses quant à l'interprétation de la stratigraphie de la nappe, avec de nombreuses définitions et mesures. Certains auteurs, dont Lebel et Kirkwood (1998), ont suggéré de grouper toutes les unités de cette nappe dans la Formation de Lévis.

Trois affleurements ont été choisis pour étalonner la méthode de photogrammétrie terrestre dans la région de Lévis, en raison des structures complexes (plis, fractures, veines) qui les caractérisent et de la proximité du site.

Les deux premiers sites d'étalonnage (Figures 12 et 13) sont situés dans la section côtière ouest de la ville de Lévis. La section est dominée par des shales gris-verts et des couches compétentes plissées de turbidites calcaires (Figures 14 et 15) et sableuses profondes [Breakey, 1975] ou dépôts de lobe [Landing *et al.*, 1992] de la Formation de Lévis (Ordovicien inférieur).

Le troisième site d'étalonnage est un grand affleurement situé à la Côte Fréchette, aussi connue comme la Côte du Passage (Figures 12 et 13). Il est caractérisé par un pli anticlinal faillé (Figure 16). C'est un pli fermé (45 degrés), droit légèrement déjeté à la base de l'affleurement (car une autre charnière de ce pli se retrouve plus haut et est de type déversé, disharmonique). Son axe est subhorizontal avec une direction NNE-SSO et son plan axial subvertical de direction NE/SO. Les axes des plis plongent faiblement vers le sud-ouest.

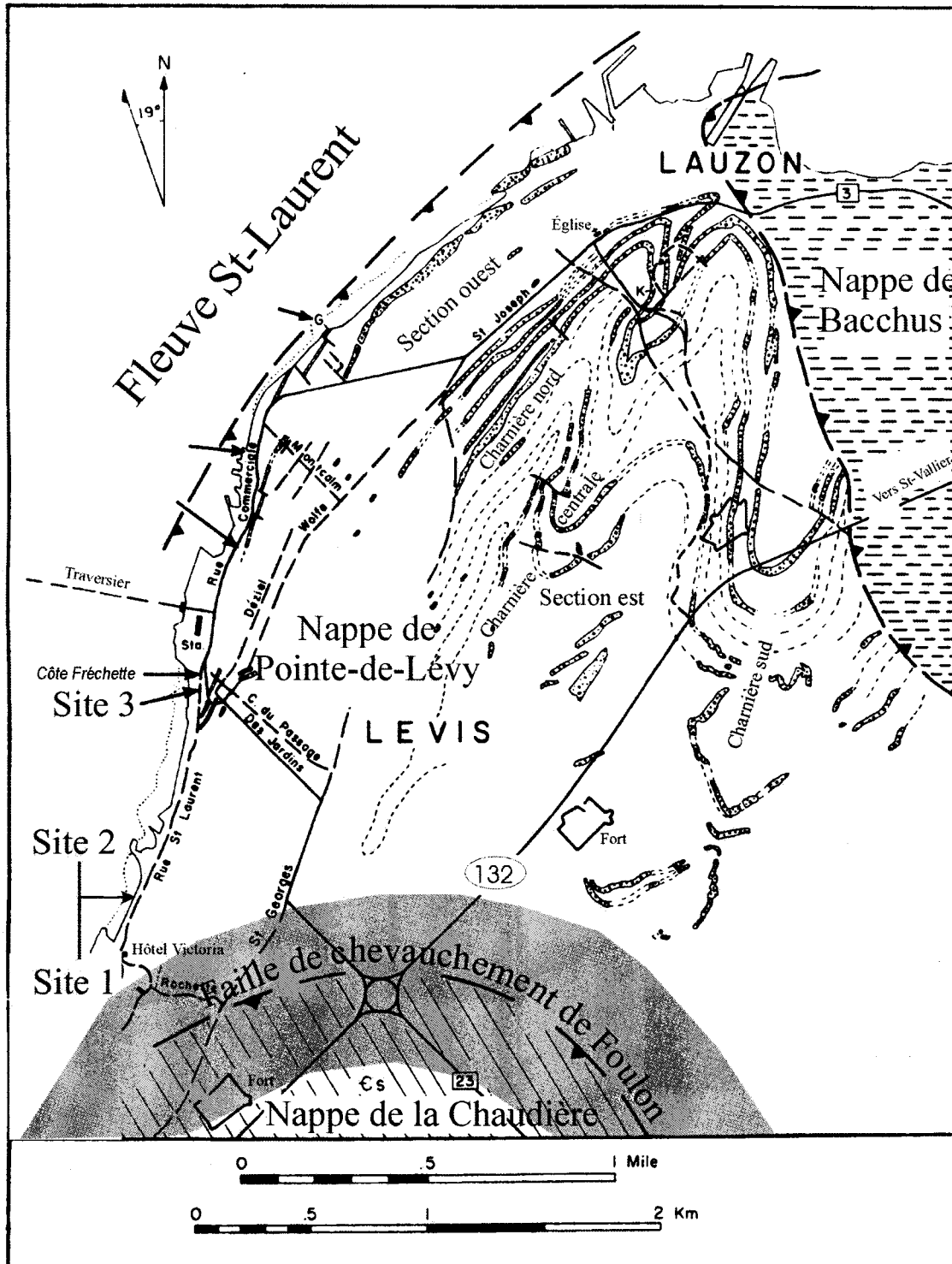


Figure 13: Carte géologique de la région de Lévis (modifiée d'après Lebel et Kirkwood, 1998).



Figure 14 : Site d'étalonnage et affleurement 1 étudié à Lévis. Présence de couches compétentes, épaisses et plissées, de turbidites calcaires (en blanc) interstratifiées avec des shales gris-verts (en gris-foncé).

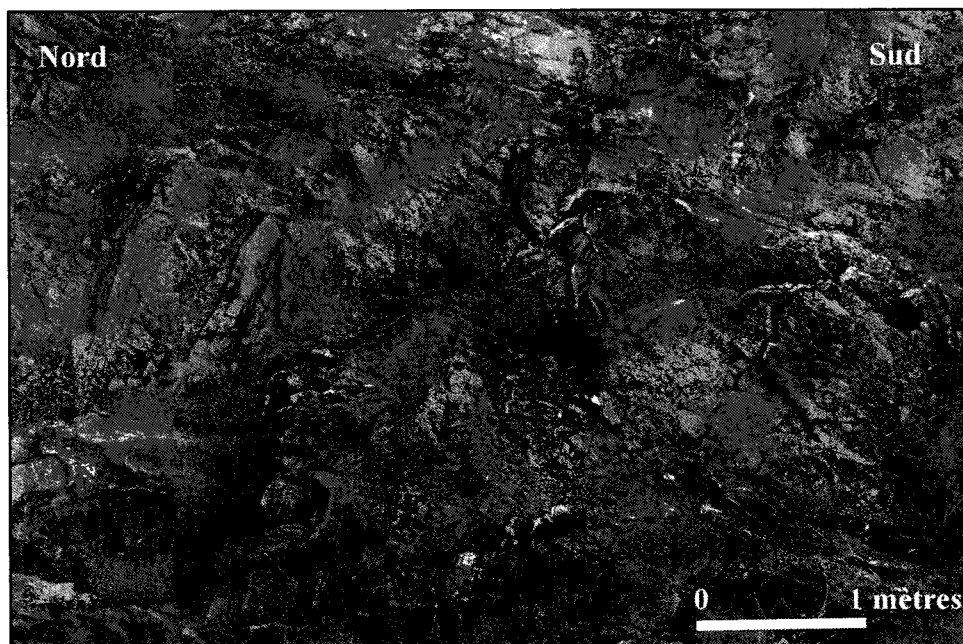


Figure 15 : Site d'étalonnage et affleurement 2 étudié à Lévis. Mise en évidence des surfaces, des joints et des veines de calcaire (en blanc).

À la Côte Fréchette, les lithologies de la Formation de Lévis sont constituées principalement par des mudstones gris-vert et de calcaires détritiques.

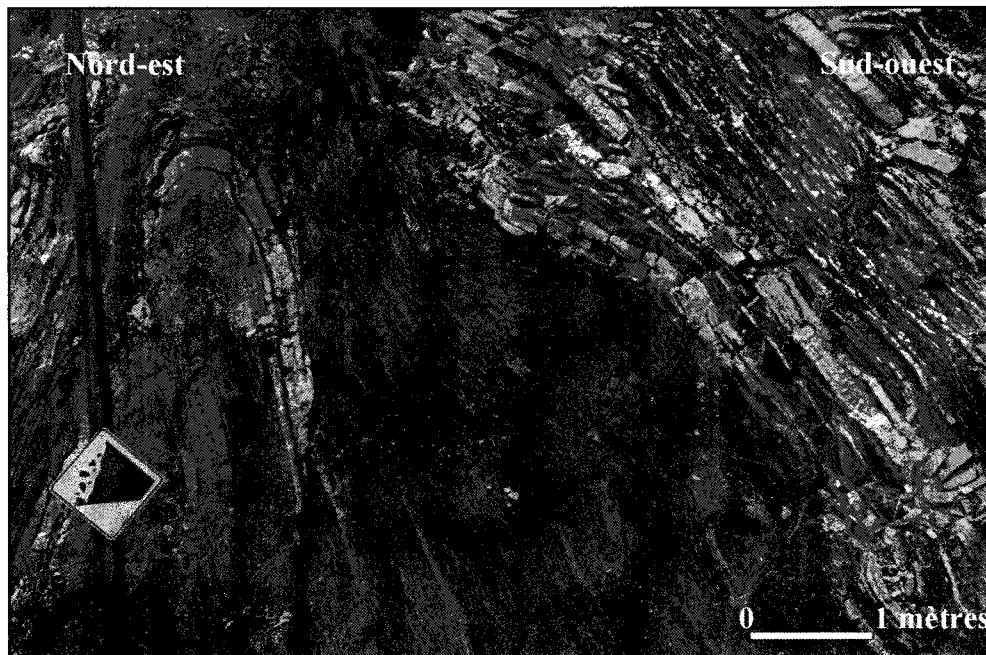


Figure 16 : Site d'étalonnage et affleurement 3 étudié à Lévis (Côte Fréchette). Pli anticlinal faillé, marqué par la présence de mudstones gris-vert interstratifiés avec des lits de calcaires détritiques.

4.3 Site d'analyse géologique et photogrammétrique : Moose Mountain (Alberta)

Situé à 50 kilomètres au sud-ouest de la ville de Calgary, dans la région "interne" des Foothills (Figures 1 et 17), Moose Mountain est une culmination structurale qui expose en son centre des carbonates d'âge Carbonifère. Cette structure en forme de dôme est un des éléments à relief accentué qui s'élèvent à certains endroits dans la zone à collines boisées ou à prairies des Foothills de l'Alberta. Son relief est similaire aux contreforts (*Front Ranges*) des Rocheuses où sont exposés clairement les plis et failles, représentant la ceinture de déformation d'avant-pays de la Cordillère canadienne [Price, 1981]. Ce dôme est entouré par les strates plus jeunes (Crétacé) du bassin d'avant-pays de la Cordillère, qui est composé essentiellement de shales et grès avec un peu de charbon. Le relief de Moose Mountain est très marqué et son point le plus élevé est localisé à 2440 m d'altitude, alors que le fond des vallées s'établit à 1600 m environ. Le climat est froid et semi-aride et la physiographie est de type alpin.

D'un point de vue lithostratigraphique, les carbonates exposés à Moose Mountain comprennent les formations suivantes : Pékisko, Shunda, Turner Valley et Mount Head. Ces quatre formations sont regroupées dans le Groupe de Rundle (Figures 19 et 20). Le Groupe de Rundle repose sur la Formation de Banff, composée principalement de shale et silicoclastique. Toutes ces unités stratigraphiques sont entourées par les roches clastiques, d'âge Jurassique et Crétacé précoce, de la Formation de Fernie, et des groupes de Kootenay et Blairmore [Richards *et al.*, 2000].

Du point de vue de la photogrammétrie, le site de Moose Mountain a été retenu en raison de son relief fort marqué, de ses formations géologiques, qui peuvent être suivies et identifiées facilement sur les différents versants de montagne et en raison de l'importance des structures pour la compréhension des réservoirs d'hydrocarbures.

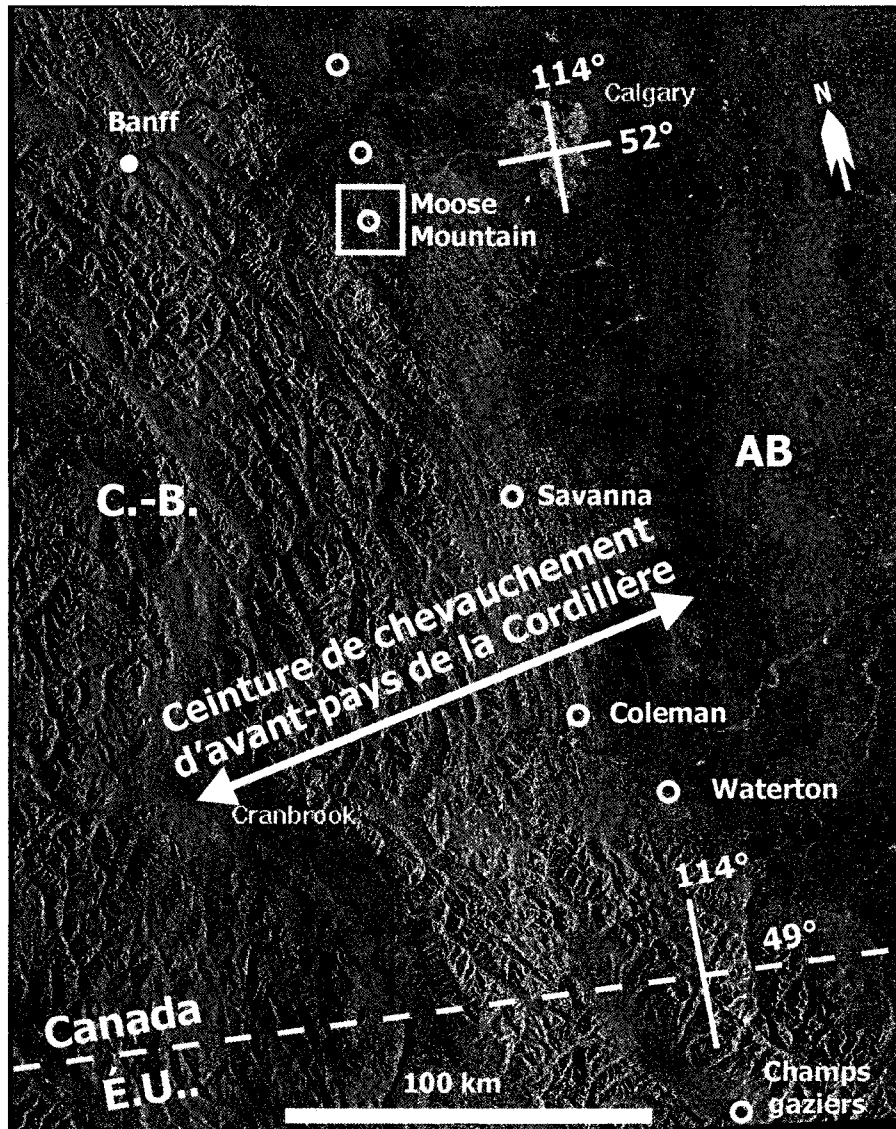


Figure 17 : Image satellite Radarsat SNB du sud de l'Alberta et de la Colombie-Britannique (8 novembre 1996, modifiée d'après © Radarsat International). À l'ouest : frontière avec les Montagnes Rocheuses ; au centre (en gris-clair) : région des Foothills de l'Alberta et à l'est (teinte sombre) : Plaines de l'Alberta.

Depuis le début des années 1960, onze puits ont été forés et mis en production pour le gaz naturel par les compagnies pétrolières, dans la culmination de Moose Mountain.

Les réserves potentielles de gaz en place ont été estimées à $2\,815 \times 10^6 \text{ m}^3$ par Newson et Sanderson (1999).

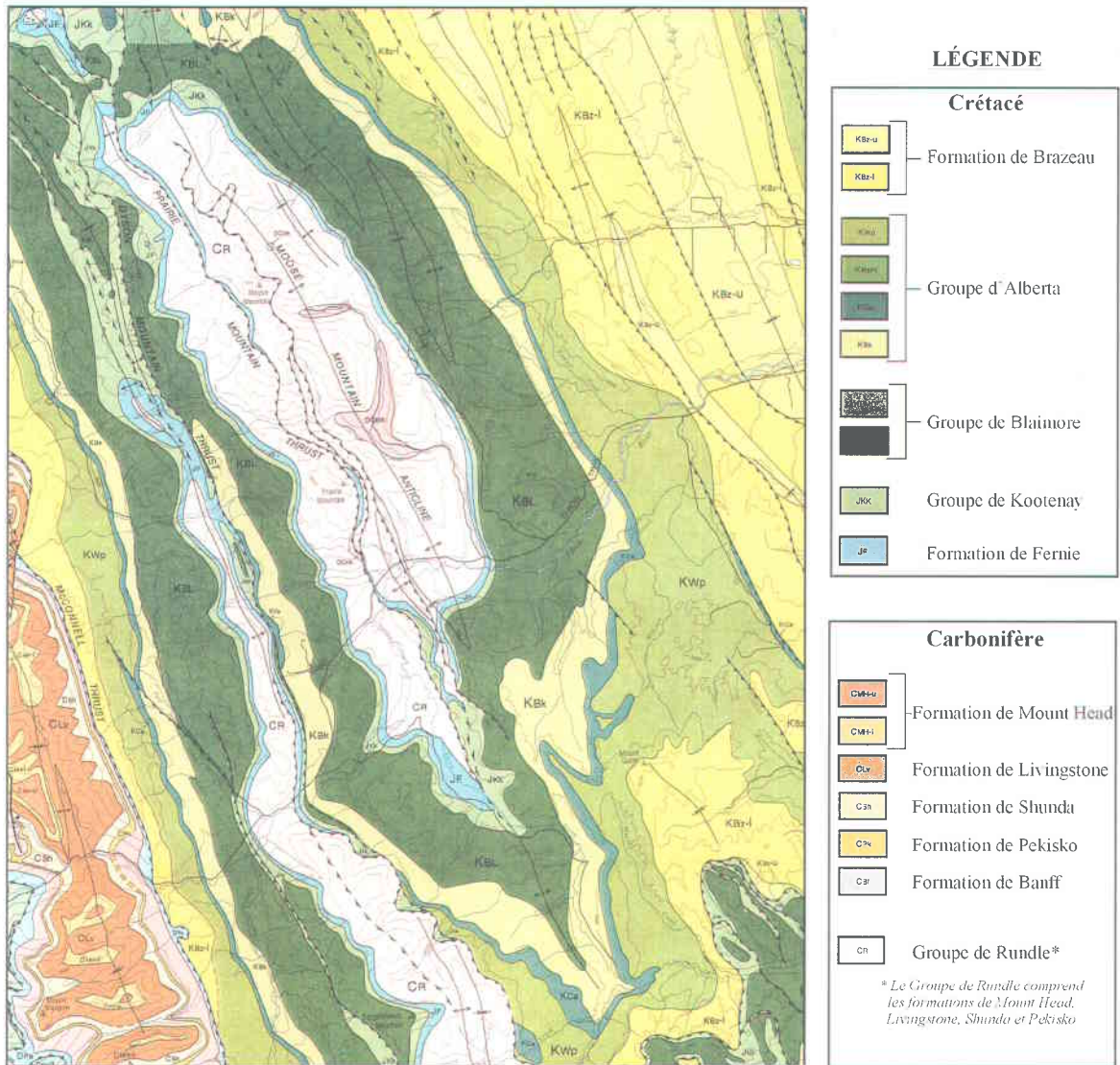


Figure 18 : Carte géologique de la région de Moose Mountain (d'après McMechan, 1995).

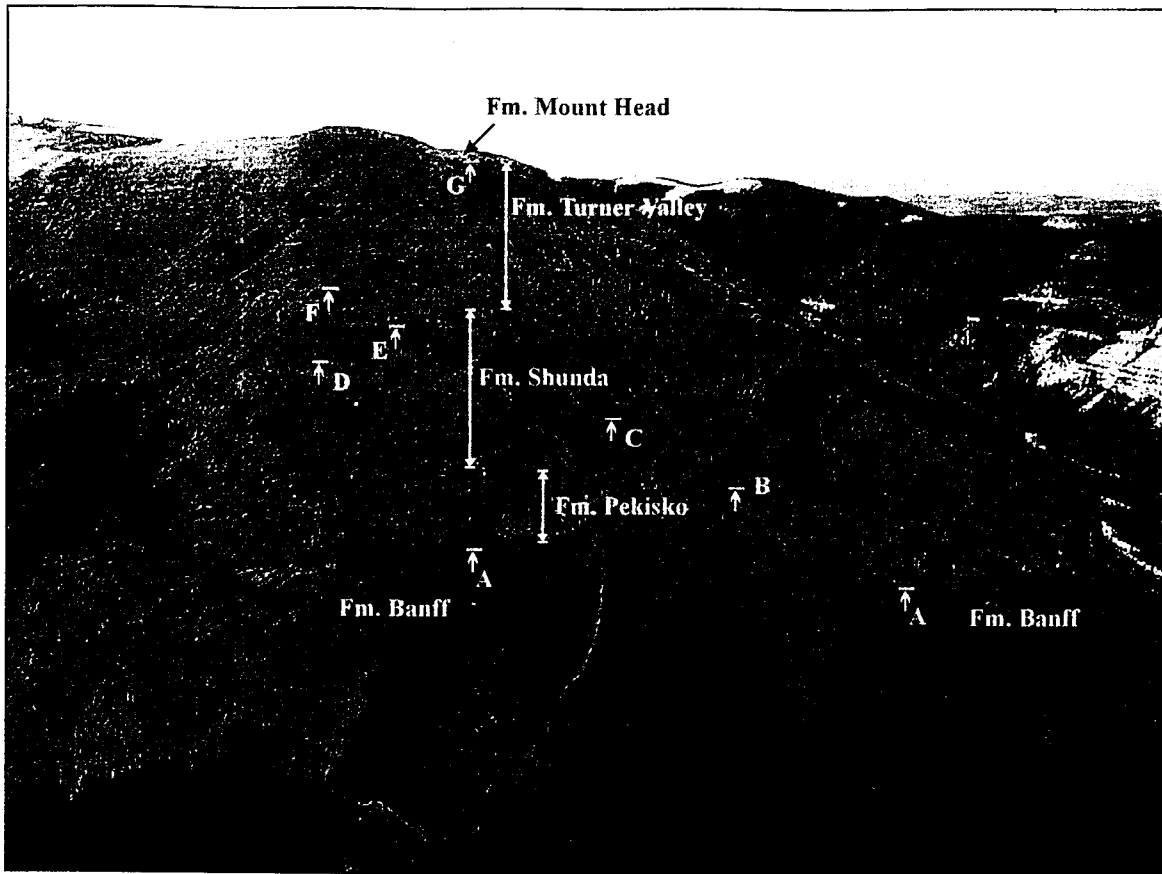


Figure 19 : Formations géologiques présentes dans la région de Moose Mountain (d'après Richards *et al.*, 2000). A : Contact entre la Formation de Banff et la Formation de Pekisko; B : Contact entre la Formation de Pekisko et le Membre D de la Formation de Shunda; C : Contact entre le Membre G et le Membre D de la Formation de Shunda; D : Sommet du Membre G ; E : Sommet du Membre F de la Formation de Shunda; F : Contact entre le Membre F et la Formation de Turner Valley ; G : Contact entre la Formation de Turner Valley et la Formation de Mount Head.

Les structures géologiques étudiées à Moose Mountain sont relativement plus simples que celles observées à Lévis et représentent généralement des plis ouverts, à l'échelle régionale et des plis serrés localement. Les strates sont très peu inclinées et leur pendage excède rarement 20 degrés.

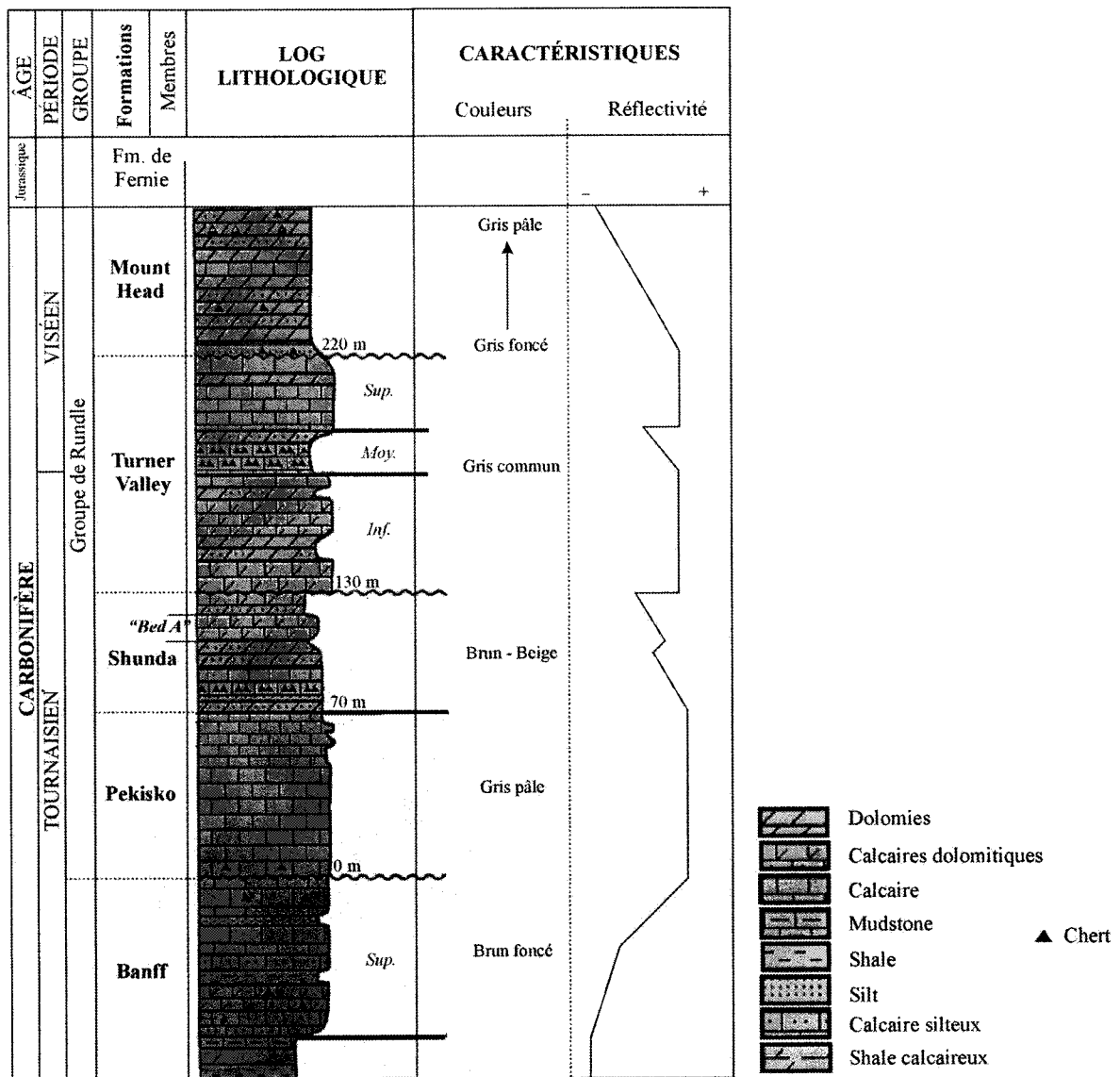


Figure 20 : Colonne stratigraphique et horizons marqueurs pour la photogrammétrie, localisés sur le versant sud-est de la culmination de Moose Mountain (modifié d'après Richards *et al.*, 2000).

Descriptions des unités stratigraphiques étudiées

Les informations géologiques suivantes sont tirées de Richards *et al.* (2000), et également de Newson et Sanderson (1999), où l'on peut retrouver une description approfondie de la sédimentologie et de la stratigraphie de Moose Mountain (Figure 20).

La Formation de Banff, d'âge Tournaisien, est constituée par des shales, des carbonates, des lits cherteux et des grès. Son épaisseur varie entre 100 et 150 m en moyenne. Dans les zones de chevauchement de la région de Moose Mountain, le contact supérieur avec la Formation de Pekisko est probablement une discordance mineure. De couleur brun-foncé, la Formation de Banff est divisée en sept membres informels, dont seul le membre A, principalement composé de shales, et le membre B, à dominance de carbonates, sont bien exposés à Moose Mountain. La technique de photogrammétrie n'a pas été employée sur la Formation de Banff en raison de la végétation et des éboulis qui masquent les affleurements.

Le Groupe de Rundle, sus-jacent à la Formation de Banff, comprend quatre formations, qui sont respectivement les formations de Pekisko, de Shunda, de Turner Valley et de Mount Head.

La Formation de Pekisko, d'une épaisseur moyenne comprise entre 40 et 120 m à l'échelle régionale, est composée principalement de calcaires, d'âge Tournaisien, et en moindre importance de dolomies et d'anhydrites. La base du Pekisko comprend un lit très chertueux, qui est similaire à la partie supérieure de la Formation de Banff. La Formation de Pekisko est typiquement caractérisée par une importante falaise, généralement constituée par une association de lithofaciès dont la granulométrie diminue vers le haut et, de ce fait, développe une unité moins résistante vers le sommet. Ces falaises sont facilement identifiables sur les photographies aériennes car elles s'élèvent souvent de plus de 50 mètres, quasi-verticalement (Figures 19 et 21).

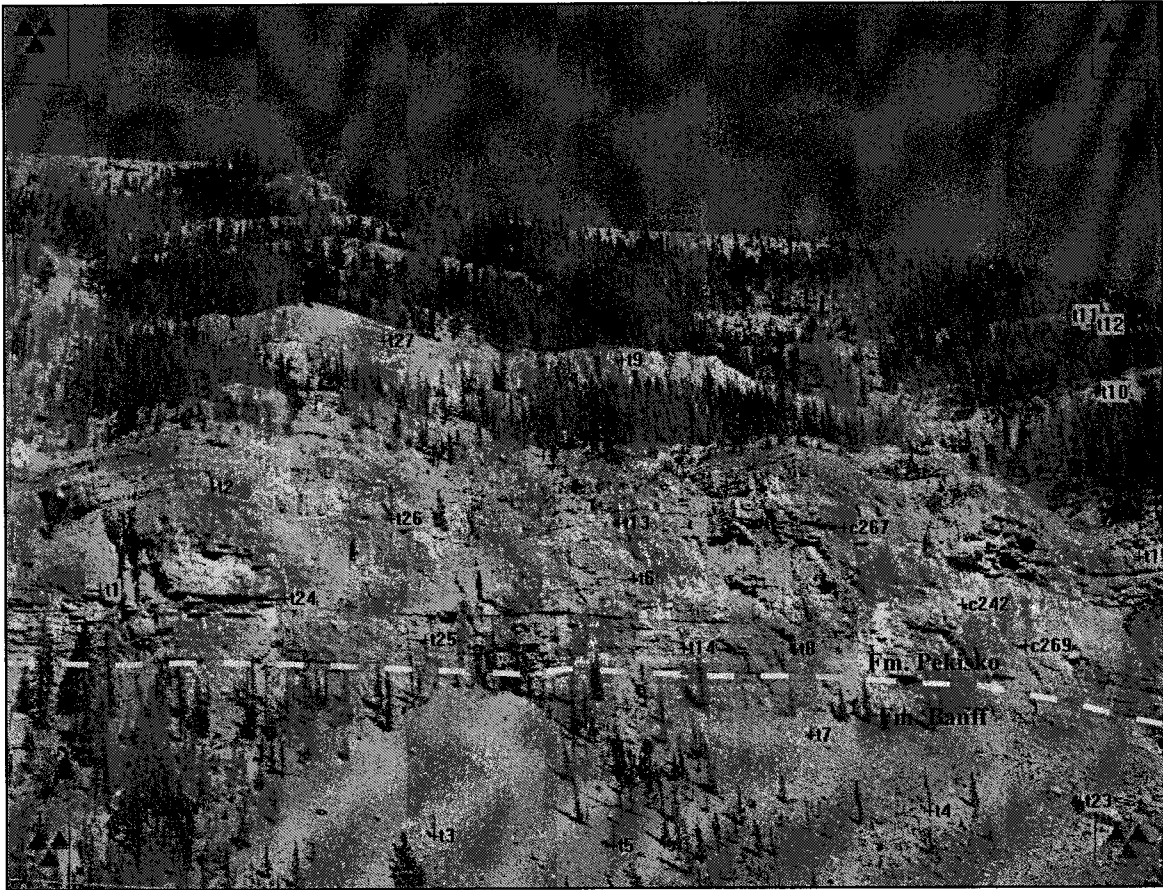


Figure 21 : Falaise caractérisant la Formation de Pekisko (juin 2000). Le symbole c correspond à des points de contrôle et t à des points de rattachement ; les triangles noirs dans les quatre coins de l'image représentent des marques fiduciaires ; le trait en pointillé montre le contact entre la Formation de Pekisko et la Formation de Banff sous-jacente.

La Formation de Pekisko est l'unité la plus réfléchive en photogrammétrie et sa couleur gris-pâle est très caractéristique dans la région de Moose Mountain.

Les trois formations suivantes n'ont été étudiées que selon les techniques de l'imagerie aérienne (Figure 22). La Formation de Shunda, d'âge Tournaisien supérieur, est constituée principalement par des carbonates argileux, mais contient en moindre quantité du shale, des évaporites et des grainstones. L'épaisseur moyenne du Shunda est d'environ 100 m.

La Formation de Shunda est typiquement récessive à l'érosion et en concordance avec la Formation de Pekisko. Sur le terrain comme au laboratoire, les contacts des Membres F et G de la Formation de Shunda sont faciles à cartographier dans la zone d'étude (Figure 22). Ils sont généralement libres de végétation et sont caractérisés par des bancs carbonatés, qui forment des reliefs d'environ 100 m de hauteur, résistants à l'érosion. Ces bancs sont les éléments ayant la plus forte réflectance de l'unité, cependant si nous considérons l'ensemble de la Formation de Shunda, de couleur brun-beige, nous pouvons dire que la réflectance est moyenne. La Formation de Turner Valley repose en discordance sur la Formation de Shunda.

La Formation de Turner Valley, d'âge Viséen précoce, comprend principalement des calcaires et des dolomies, déposés dans un environnement de forte énergie sur une plateforme cratonique. D'une épaisseur moyenne de 100 m, cette formation est bien exposée dans la région de Moose Mountain. En profondeur, dans les écailles de chevauchement, et à l'échelle régionale, elle est la principale unité réservoir des champs d'hydrocarbures. Comme la Formation de Shunda, la Formation de Turner Valley ressort du paysage boisé. Sa base est caractérisée par des bancs carbonatés, ayant une forte réflectance (Figure 22), comme c'est le cas pour les couches de la partie supérieure de l'unité.

Des carbonates et quelques roches silicoclastiques, d'âge Viséen précoce à tardif, composent la Formation de Mount Head. Cette dernière, d'une épaisseur inférieure à 75 m dans la région de Moose Mountain, est généralement récessive à l'érosion. La Formation de Mount Head recouvre la Formation de Turner Valley. On la retrouve en général sur toutes les crêtes et sommets de Moose Mountain et est généralement libre de végétation, dû à l'altitude et aux effets climatiques. La base de la Formation de Mount Head est très réfléchive, contrairement au reste de l'unité.

En général, les contrastes entre les différentes unités du Groupe de Rundle sont très marqués et peuvent facilement être cartographiés suivant les diverses techniques de photogrammétrie.



Figure 22 : Contacts géologiques cartographiés dans la vallée de Moose Dome Creek.
 Fm. Bf. : la Formation de Banff ; Fm. PK. : Formation de Pekisko ; Fm. Sh. :
 Formation de Shunda ; Fm. Tv. : Formation de Turner Valley et Fm. Mh. :
 Formation de Mount Head.

Dans le cadre du présent document, les formations géologiques présentes à l'ouest et à l'est de la vallée de Moose Dome Creek (Figure 22) ont été cartographiées. Les couleurs attribuées aux formations géologiques décrites sur la figure 22 ci-dessus, correspondront aux mêmes formations dans le chapitre VII.



CHAPITRE V

L'IMAGERIE AÉRIENNE

5.1 Avant-propos

Bien que l'imagerie numérique aérienne et satellitaire est de plus en plus utilisée et son efficacité reconnue depuis une dizaine d'années, elle n'a pas encore connu de réel essor au sein des commissions géologiques et des compagnies d'exploration au Canada [Larouche *et al.*, 1994 ; Lebel et Da Roza, 1999 ; Paradis, 2000]. Le manque de connaissance de l'approche et le coût important engendré par l'achat d'un équipement spécialisé limite un essor plus large. Cependant, afin de mettre à jour les données topographiques ou simplement ajouter de l'information sur les cartes actuelles, les services de cadastre ont maintenant couramment recours à cette technique. De ce fait, il est à espérer que de nouveaux couples stéréoscopiques numériques soient de plus en plus disponibles. Les images aériennes à haute-résolution sont des produits très attrayants, avec une qualité de résolution sans cesse croissante, en raison de la compétition entre plusieurs entreprises de fourniture de données (Citipix, USGS). Dans la présente étude, trois techniques faisant appel à l'imagerie aérienne ont été utilisées : (1) la stéréo-imagerie numérique, (2) l'orthophoto haute-résolution et (3) le rendu de terrain (application d'une orthophoto comme texture sur la surface d'un TIN – *Triangular Irregular Network*)

5.2 L'imagerie numérique stéréoscopique

Le principe de la stéréoscopie est certainement le plus important de la photogrammétrie. Il permet de récupérer de l'information sur la profondeur présente dans une scène, pourvu que cette dernière ait été photographiée sous deux points de vue différents, grâce à la vision stéréoscopique (Figure 23). Cette vision permet aussi de faciliter l'identification des objets [Boulianne, 1998].

Dans le cadre du projet Moose Mountain, le système ISM DiAP Viewer^{MC} a été utilisé pour cartographier les éléments géologiques. C'est un produit qui combine un logiciel et la technologie NuVision (lunettes à cristaux liquides, sans fil d'affichage ; Figure 24) pour accéder à un monde stéréoscopique. Plusieurs autres systèmes comparables ont également été développés sur le marché, comme DVP (Géomatique EMCO), ImageStation Z (Z/I), IMAGINE OrthoBASE, Ortho-MAX (ERDAS) ou OrthoEngine (PCI). Le système DiAP accepte et lit les stéréo-modèles pré-orientés et leurs fichiers d'image correspondants. Le logiciel incorpore les modèles stéréos en utilisant les paramètres d'orientation interne/externe (cf. chapitre VI), dérivés de la triangulation aérienne. Il fonctionne en tant que module adjoint à Microstation SE^{MC}, et représente une version simplifiée d'un système de stéréorestitution complet, mis en marché par ISM Corp. (Vancouver), nécessaire pour orienter les modèles utilisés par DiAP Viewer^{MC}.

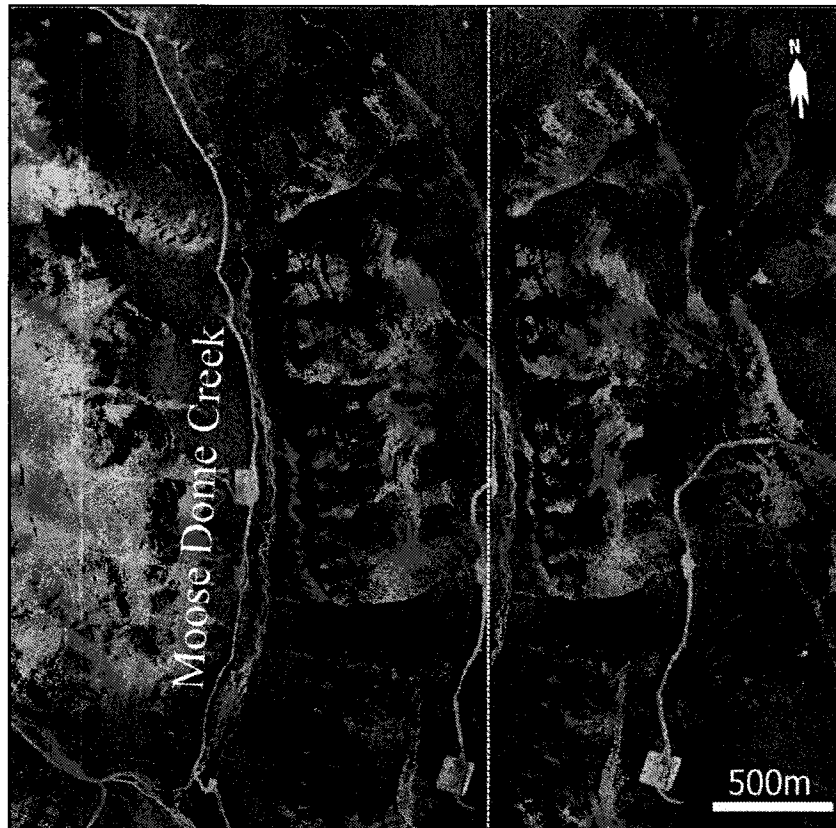


Figure 23 : Couple stéréoscopique généré à partir de photographies aériennes de *Alberta Environment*, dans la région de Moose Dome Creek, Moose Mountain.



Figure 24 : DiAP Viewer^{MC} et la technologie NuVision.

DiAP Viewer^{MC} permet de numériser les éléments en 3-D, le long d'une surface triangulée, ou TIN (Figures 24 et 25), couplée avec un modèle stéréoscopique, réalisé à partir de photographies aériennes.

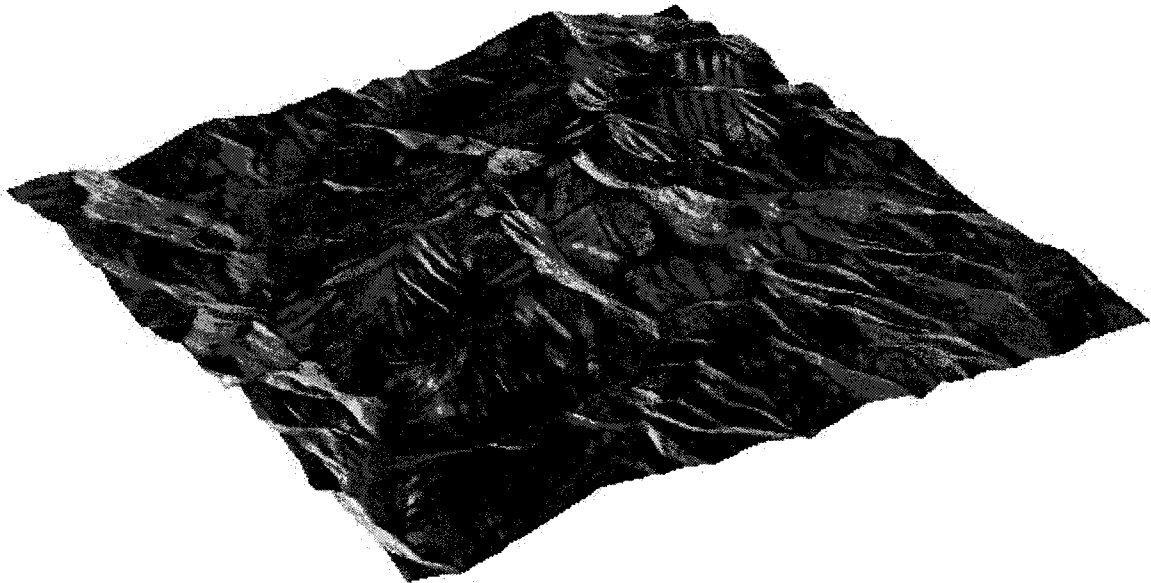


Figure 25 : TIN de la région de Moose Mountain, généré à partir des données d'*Alberta Environment* sous le logiciel GOCAD (précision 100 mètres, mais extrapolés à 25 mètres).

La surface triangulée a été générée à partir du MNT fourni par *Alberta Environment* (feuille NTS 82J/15). La projection visuelle de ce système est uniquement verticale.

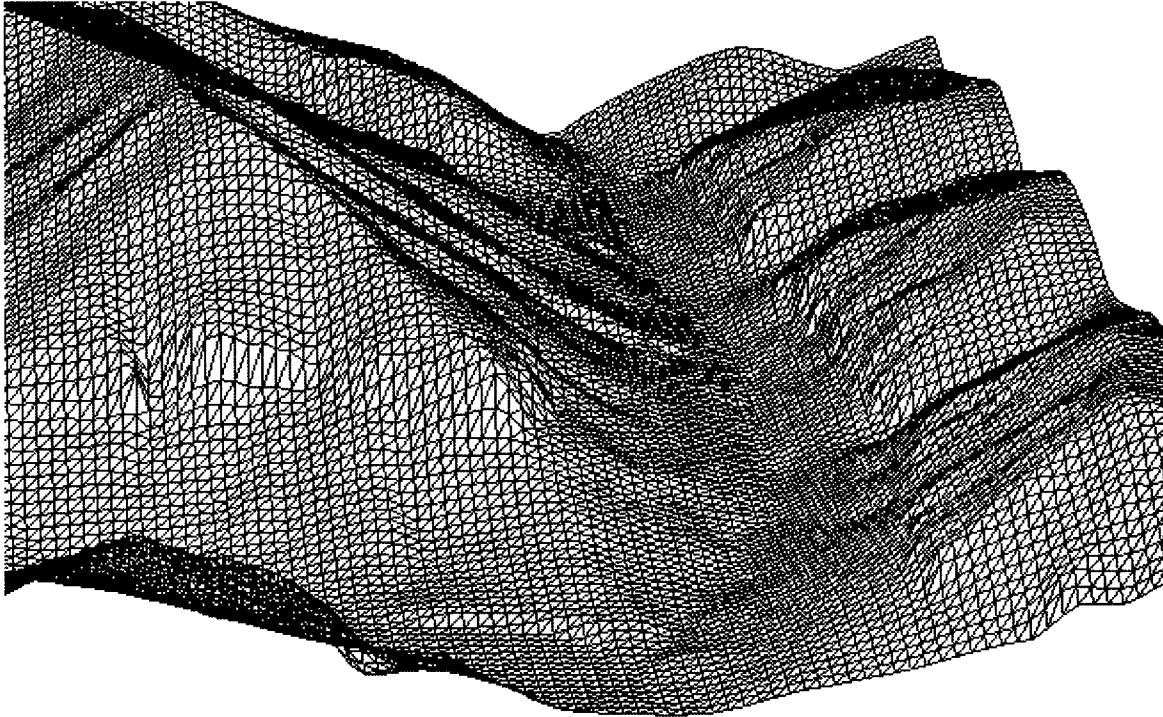


Figure 26 : Vue rapprochée d'une portion du TIN de la Figure 25. Notez les triangles allongés qui marquent les fortes pentes.

Une fois familiarisé avec les fonctionnalités du système DiAP Viewer^{MC}, il était possible de tracer rapidement les éléments géologiques, tels les contacts, les failles et les axes de pli.

5.3 Les orthophotos haute-résolution

Des orthophotos ont été générées par la Commission géologique du Canada (Calgary) à partir de photographies aériennes monochromes obtenues d'*Alberta Environment*, à l'échelle 1 : 60 000 de la région de Moose Mountain, en utilisant le système DiAP (ISM Corp.).

Elles ont été scannées à 2000 ppp soit une résolution de 0.78 m/pixel, et orientées par un photogrammètre, utilisant la procédure standard décrite par Lebel et Da Roza (1999) et Manzer et Tiffin (1997).

Une orthophoto noir et blanc, au 1 : 10 000 (Figure 27), a été produite à l'aide du MNT identifié sur la Figure 25. Toutefois, une orthophoto couleur a aussi été réalisée avec une résolution similaire (Figure 28), mais à l'échelle 1 : 5 000. Toutes les orthophotos ont été importées dans le module d'imagerie numérique Descartes de Microstation SE et la taille de chaque fichier numérique est de l'ordre de 100 Mb. Comparée au système stéréoscopique, cette méthode requiert un investissement modeste. Grâce aux outils ISM Sysimage et AutoZ, développés par la compagnie ISM Corp., les coordonnées xyz associées à une surface triangulée correspondante peut aussi être combinée à l'orthophoto.

L'inconvénient majeur de la méthode utilisant l'orthophoto numérique est qu'elle ne fournit aucune notion directe de relief au géologue. Toutefois, le curseur de la souris interpole la valeur de Z pour la surface du MNT et suit les variations de terrain automatiquement, pendant que l'opérateur déplace la souris au-dessus de la vue verticale. L'utilisation de ces données et outils n'est optimale que pour la cartographie géologique dans les zones où le relief est faible ou modéré.



Figure 27 : Orthophoto noir et blanc de la région de Moose Mountain (échelle originale de 1 : 10 000 et balayée à 2000 ppp).



Figure 28 : Orthophoto couleur illustrant la région centrale de Moose Mountain (échelle originale de 1 : 5 000 et balayée à 2000 ppp).

5.4 Le rendu de terrain

Le « rendu de terrain » s'obtient en appliquant une orthophoto, comme objet de texture (*terrain rendering* en anglais), sur la surface d'un MNT. On peut aussi obtenir une vue en perspective de l'image, qui donne une illusion tri-dimensionnelle du terrain très réaliste (Figure 29). Même si cet outil s'apparente plus à une méthode de visualisation qu'à une technique photogrammétrique proprement dite, il a malgré tout été inclus dans ce chapitre, car il fait appel à l'orthoimage aérienne.

Cette technique permet de visualiser n'importe quelle portion de l'image sous des angles de perspective différents, contrairement à une orthophoto aérienne, où seule une vue verticale est possible.

Le TIN a été construit grâce aux outils disponibles dans le module Geopak de Microstation SE. Un ordinateur de type Pentium III avec 128 Mb de mémoire vive (RAM) permet d'afficher une image de 100 Mb recouvrant un TIN composé d'un million de triangles en moins d'une minute. La vitesse d'affichage est proportionnelle au nombre de triangles ajoutés sur le TIN. Pour cette raison, les orthophotos ont été divisées en plusieurs « tuiles », de 2.25 km² et d'une taille de 13 Mb.

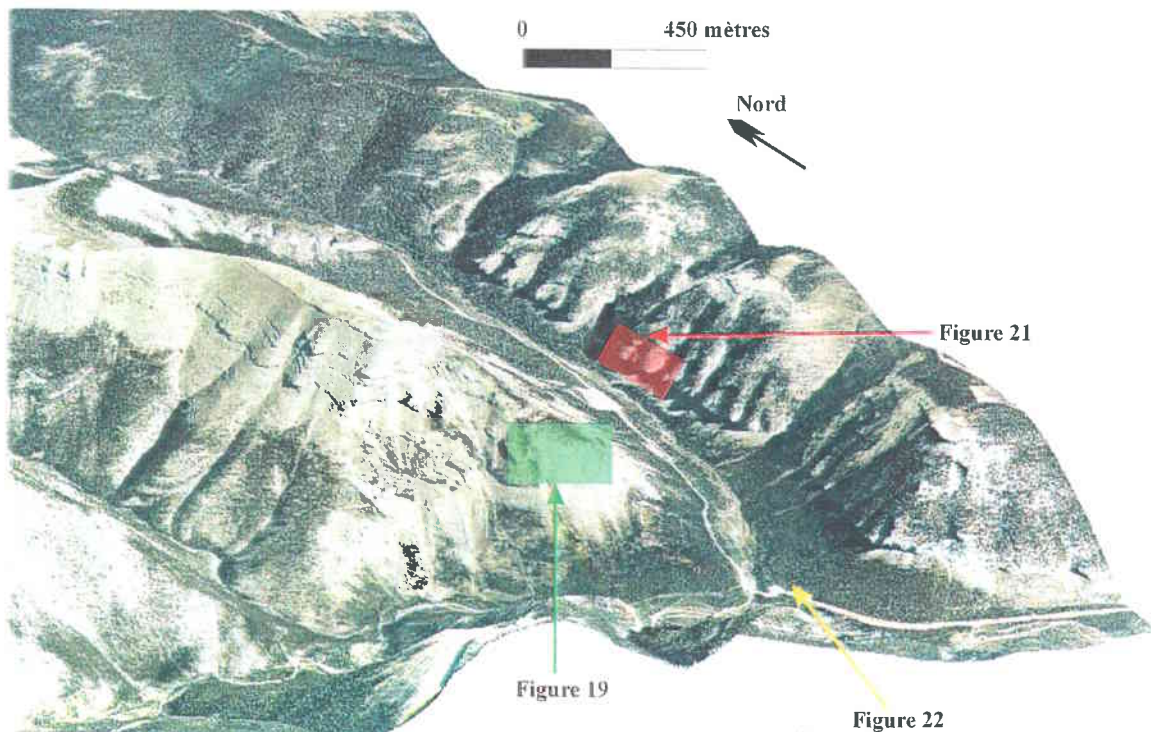


Figure 29 : Orthophoto appliquée sur la surface d'un TIN, région sud-est de Moose Mountain, qui permet d'obtenir une vue en perspective ou rendu de terrain.

En comparant les figures 19, 21 et 22 à la Figure 29, on peut constater que la technique du rendu de terrain, comme les deux méthodes d'imagerie aérienne décrites précédemment, ne permet pas de distinguer nettement les zones à fort relief. Ceci est causé en grande partie par la qualité de l'orthophoto, dont la prise de vue est verticale.

Dans la dernière décennie, l'utilisation de cette technique [Moller *et al.* 1999], au départ pour simuler des environnements virtuels ou visualiser de vastes étendues naturelles, a évolué et fait naître de nombreuses applications, aussi bien pour les simulateurs de vol dans les domaines civil et militaire, que dans les secteurs scientifique et du génie, et aujourd'hui même pour le grand public avec les logiciels de jeu 3-D. Le progrès de cette technique va de pair avec celui des ordinateurs, et en particulier de leurs performances (carte graphique accélératrice, outils de visualisation et de modélisation puissants). La production de telles images est rapide. Le réalisme des scènes rendues est parfois impressionnant. À partir d'un ensemble d'images similaires, vues sous des perspectives différentes, nous pouvons alors simuler le vol d'un hélicoptère ou préparer une campagne de terrain.

Cette méthode permet de tracer rapidement et de représenter avec précision des éléments géologiques dans un espace à trois dimensions. Toutes les étapes permettant d'aboutir à un rendu de l'image requièrent ou nécessitent des compétences de base avec les logiciels de DAO.

5.5 Les avantages et les limites des techniques d'imagerie aérienne numérique

5.5.1 L'imagerie numérique stéréoscopique

Le logiciel DiAP Viewer^{MC} s'est avéré bénéfique pour la région de Moose Mountain en raison d'un relief fort marqué. Les contacts géologiques, caractérisés par des roches carbonatées, sont facilement identifiables. La vision stéréoscopique était utile car elle a permis de mieux percevoir les éléments du relief qui soulignent les unités et les structures géologiques.

Nous avons été à même de constater les avantages de la cartographie stéréo-numérique pour la géologie. Par rapport à la méthode stéréo sur papier photo habituellement utilisée par les géologues, les principaux avantages résident dans la compilation de toutes les données référencées en format numérique et l'intégration de tous les outils cartographiques dans un même environnement de travail. En effet, les modèles stéréoscopiques étant pré-orientés et numérisés, il ne reste donc plus qu'à tracer les éléments géologiques directement à l'ordinateur. Ceci sauve énormément de temps et permet une représentation plus précise de la géologie. Cependant, il convient de garder à l'esprit qu'un couple stéréoscopique n'est pas toujours parfait et que certaines incertitudes peuvent survenir quant à la précision de l'élévation (z) de certains contacts géologiques.

La qualité de la perception visuelle en trois dimensions dépend également des connaissances et de l'entraînement propres au géologue-photointerpréteur. Quelques imprécisions, causées principalement par les falaises, la qualité du MNT, la végétation et les effets d'ombrage, peuvent également se produire. Les figures 30 et 31 permettent d'illustrer deux de ces problèmes. La Figure 30 illustre les erreurs de localisation commises lors de la détermination des contacts géologiques identifiant la base et le sommet de la Formation de Pekisko, dans la vallée de Moose Dome Creek, principalement caractérisée par une zone de falaises. Ces erreurs sont causées par l'imprécision des données d'élévation utilisées (MNT).

Le problème du manque de précision du MNT est illustré en comparant les courbes de niveau extraites de la BNDT (Banque nationale de données topographiques) avec celles extraites du MNT d'*Alberta Environment*, dans la région sud-est de Moose Dome Creek (Figure 30a). Dans le cas du MNT, la densité des données est d'environ un point par 280 m². Force est de constater que les données ne reflètent pas précisément le terrain.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une coupe transversale, noté AB sur le flanc Est de la vallée de Moose Dome Creek (Figure 30b). Nous avons ainsi pu comparer les deux coupes verticales extraites des courbes de niveau avec le profil dressé par imagerie terrestre en utilisant le logiciel FotoG, qui reflète bien la réalité du terrain.

Ces trois courbes, et plus particulièrement dans les zones où le relief est très accentué, comme c'est le cas pour la Formation de Pekisko, montrent un tracé topographique très différent. En effet, les ruptures de pente sont beaucoup moins marquées pour les coupes verticales générées à partir des données de la BNDT et du MNT, un phénomène essentiellement lié à la faible densité spatiale de ces données. Il est facile d'observer que cette erreur de localisation entraîne des imprécisions lors de la cartographie de la Formation de Pekisko, qui peut conduire à une évaluation imprécise de son épaisseur (entre 10 et 20 mètres de différence par rapport à la position ou l'épaisseur réelle) et du pendage.

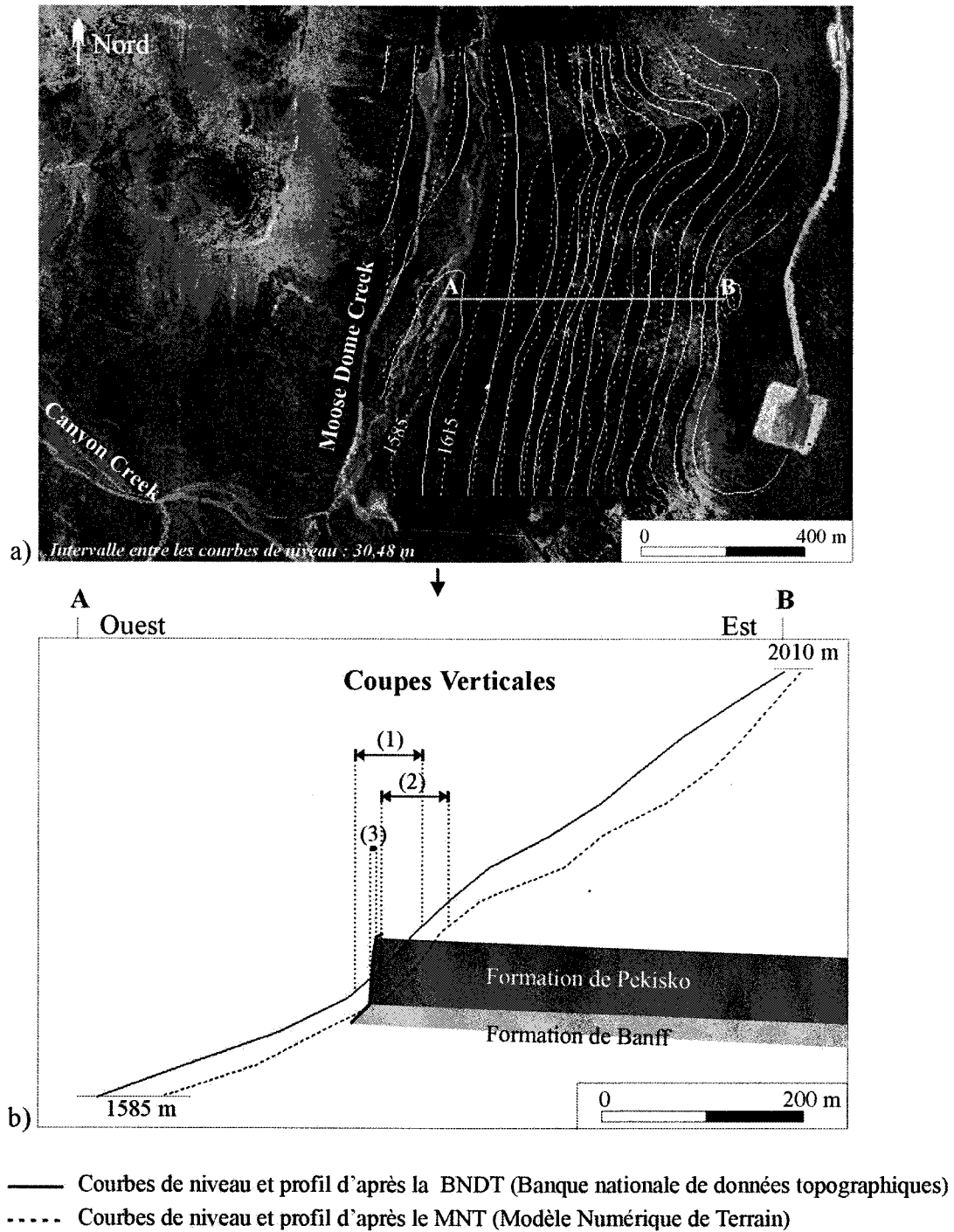


Figure 30 : Comparaison entre les données extraites de la BNDT, du MNT et les mesures relevées par imagerie terrestre. a) : Vue en carte de l'orthophoto et des courbes de niveaux, intervalle de 30,48 m (100 pieds) ;

b) : Vue en coupe agrandie du flanc est de la vallée, montrant la variation de positionnement de la base et du sommet de la Formation de Pekisko, dépendant des données et des méthodes utilisées ; (1) : Formation de Pekisko d'après le profil de la BNDT ; (2) : Formation de Pekisko d'après le profil du MNT ; (3) : Formation de Pekisko d'après l'imagerie terrestre, telle qu'extraite de FotoG.

La Figure 31 illustre les problèmes liés aux effets d'ombrage et de couvert végétal.

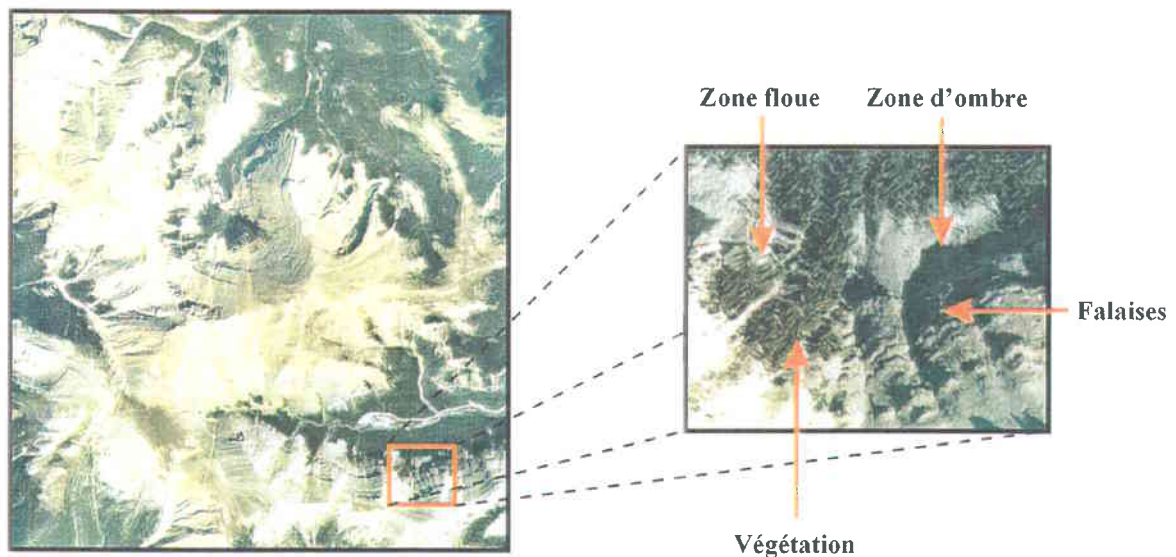


Figure 31 : Effets d'ombrage et problèmes liés aux parois verticales et au couvert végétal.

La zone floue observée sur la Figure 31 est due à l'orthorectification des images aériennes, qui devaient offrir peu d'aspects dans cette zone à forte pente. De façon similaire, les zones d'ombre ne permettent pas de délimiter les contacts géologiques. Malheureusement, en imagerie aérienne, il est difficile de s'affranchir de ce problème.

Les falaises ne peuvent être perçues comme telles car elles sont presque parallèles à la prise de vue aérienne, ce qui est différent pour l'imagerie oblique.

Enfin la végétation est un obstacle fréquent dans les portions basses de Moose Mountain, sous la limite de croissance des arbres, dictée par le climat et l'altitude.

5.5.2 Les orthophotos haute-résolution

Les orthophotos ne permettent pas la perception de profondeur. Dans les régions alpines à relief accentué, ceci restreint la précision des contacts géologiques. Les orthophotos sont très faciles à maîtriser et nous avons pu rapidement travailler avec les images pour produire notre carte géologique. Cependant, nous avons aussi observé que l'on peut arriver à de mauvaises interprétations par manque de connaissance du terrain et des formations géologiques.

Les erreurs les plus fréquentes sont liées à la détermination et au suivi des limites des formations géologiques, dans les endroits où l'image est floue et lorsque les éléments sont cachés par le couvert végétal ou les effets d'ombrage. Comme pour l'utilisation des stéréo-modèles, certaines incertitudes se retrouvent dans l'élévation de certains contacts géologiques et la précision de la cartographie est encore une fois influencée par les compétences et connaissances du géologue-photointerpréteur.

5.5.3 Le rendu de terrain

La technique du rendu de terrain a été très utile à Moose Mountain pour suivre des contacts géologiques et des structures.

En comparaison avec les deux techniques précédentes, cette méthode est efficace pour délimiter des contacts dans les régions ombragées, causées par la présence de végétation ou de débris. Proche de la réalité terrain, elle donne une idée plus claire des éléments en place (Figure 32).

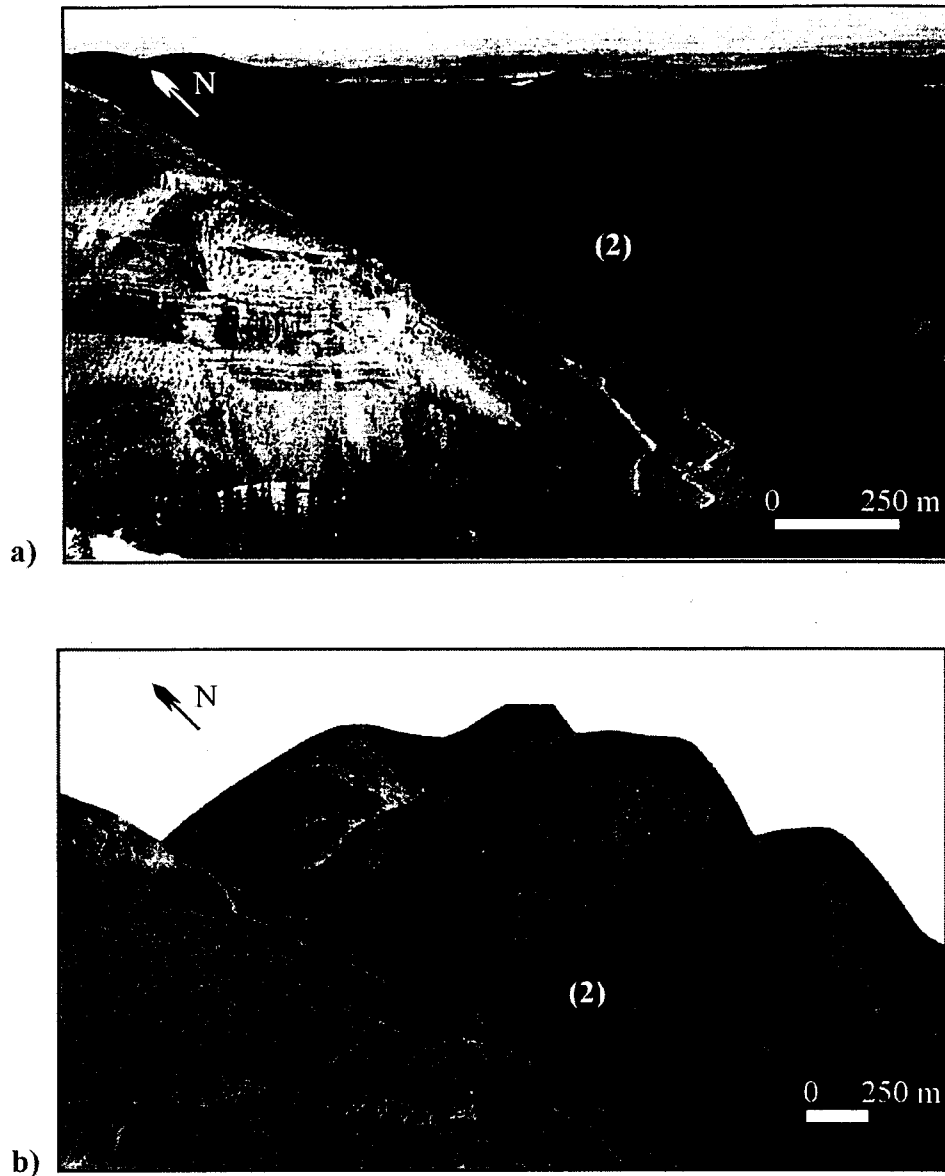


Figure 32 : Comparaison d'une photographie réelle (a) avec une image extraite de l'orthophoto noir et blanc, appliquée sur le TIN (b). Sur la Figure 32b, les falaises apparaissent beaucoup moins verticales que dans la réalité, notées (1), et sont cachées par les effets d'ombrage, notés (2). Les Figures 30 et 31 appuient cette observation.

La technique du rendu de terrain permet de cartographier les contacts géologiques dans les zones très abruptes (Figure 33), mais encore une fois, la précision du tracé dépend de la qualité du TIN.

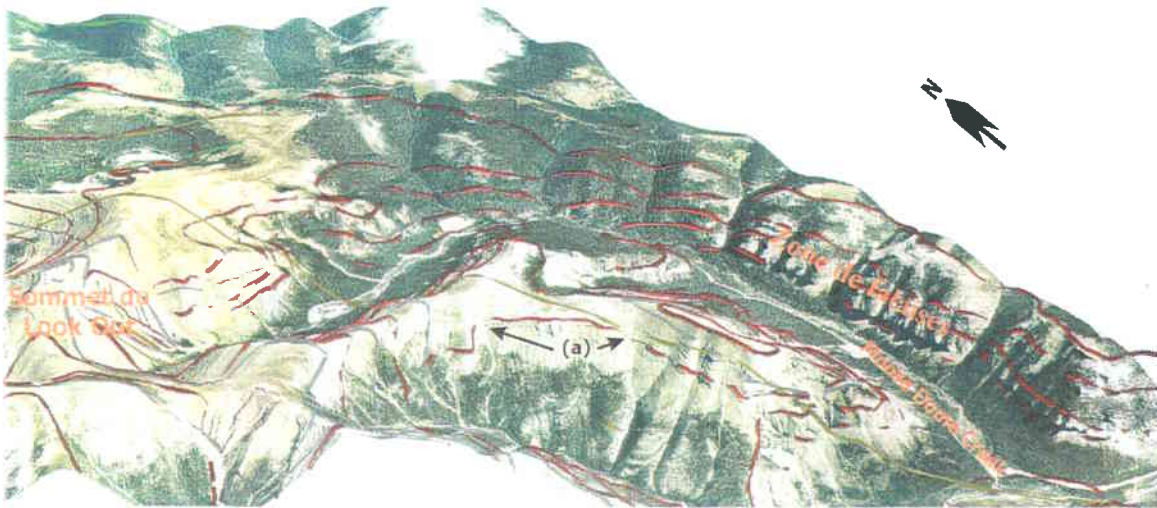


Figure 33 : Tracé des contours géologiques par la technique du rendu de terrain dans la région de Moose Dome Creek, à Moose Mountain.

Un des problèmes fréquents du traçage d'éléments sur un rendu de terrain est la disparition de certains contours géologiques sous la surface du modèle, ce qui donne un aperçu de discontinuité du tracé, noté (a) sur la Figure 33. Ceci est dû à une faible densité de points de traçage, qui provoque un effet de « piquage » des éléments au travers des formes concaves du relief.

La Figure 34 illustre la projection d'une image oblique sur le TIN. Cette opération a été réalisée sous GOCAD, un logiciel de modélisation 3-D, à l'aide des données de calibrage des caméras. Elle nous démontre que c'est réellement la qualité du TIN qui empêche d'appliquer avec précision l'image oblique dans des zones très abruptes. D'importantes distorsions de la photographie et des itérations des motifs apparaissent à l'écran.

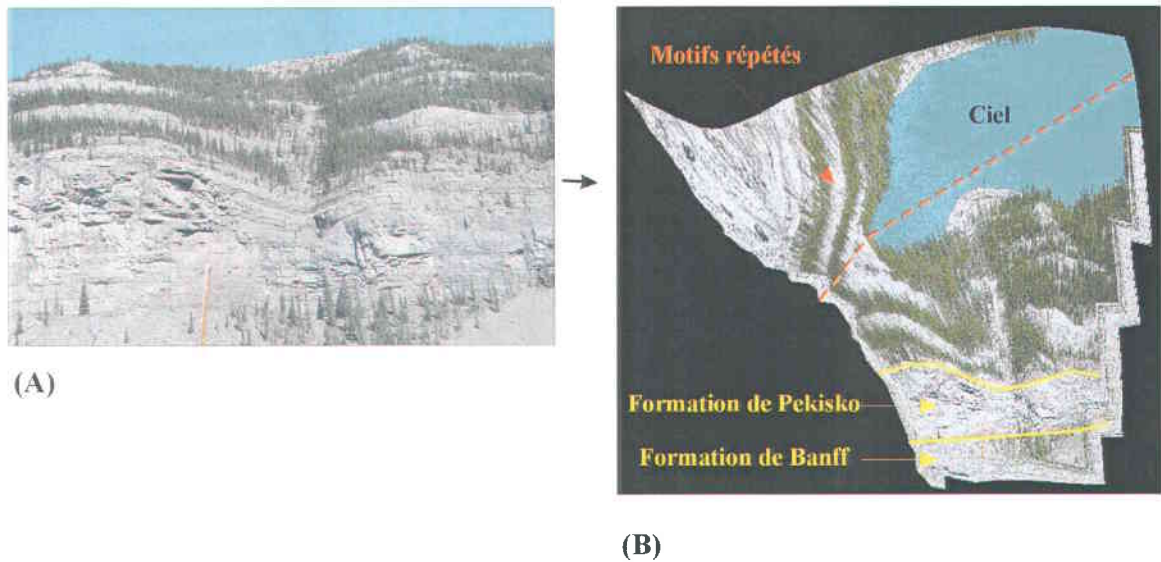
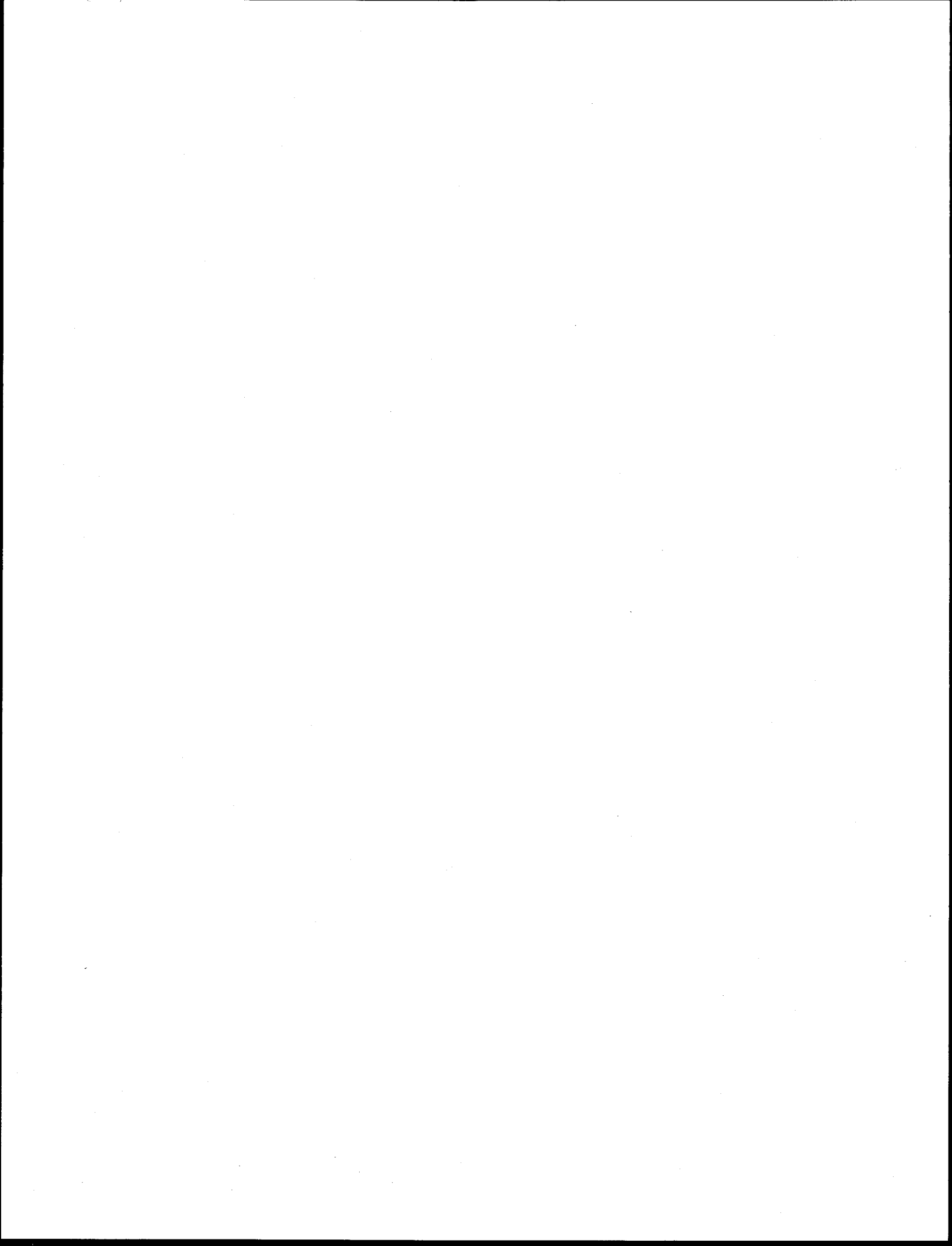


Figure 34 : Exemple de projection d'une image oblique sur le TIN. (A) : Image réelle I et (B) Projeté de l'image I sur le TIN.



CHAPITRE VI

PRINCIPES DE L'IMAGERIE TERRESTRE ET COMPARAISON DE LOGICIELS DE PHOTOGRAMMÉTRIE TERRESTRE

6.1 Avant-propos

Dans la littérature scientifique, plusieurs termes sont couramment utilisés pour définir le mot « Photogrammétrie Terrestre ». Kraus et Waldhäusl (1998) parlent de photogrammétrie rapprochée. Slama (1980) et Karara (1989) emploient respectivement le mot « *close-range photogrammetry* » et « *non-topographic photogrammetry* ». Selon l'*American Society of Photogrammetry* [Wolf, 1980] et selon Karara (1989), la photogrammétrie terrestre appartient à une branche de la photogrammétrie où les distances objet-caméra n'excèdent pas 300 m. Selon Kraus et Waldhäusl (1998), cette distance est comprise entre 1 m et 100 m. Moffitt et Mikhail (1980) vont plus loin et estiment cette distance entre 0,1 m et 100 m. En dessous de 0,1 m, ils définissent la macrophotogrammétrie (0,01 à 0,1 m) et la microphotogrammétrie (microscope).

Comme la photogrammétrie aérienne, la photogrammétrie terrestre fait appel aux mêmes principes de restitution stéréoscopique et d'étalonnage des caméras. Cependant cette technique nous permet d'étudier et de définir avec plus de précision les formes, les dimensions et la position dans l'espace d'un objet quelconque, en utilisant essentiellement des mesures faites sur une ou plusieurs photographies de cet objet, prises selon des angles variés.

6.2 Les paramètres d'étalonnage

La construction d'un modèle en photogrammétrie terrestre passe par différentes étapes de restitution : (1) l'orientation interne ou étalonnage, (2) l'orientation relative, (3) l'orientation absolue. Les paramètres physiques déterminés lors de l'étalonnage sont les suivants :

- X et Y les coordonnées X_p et Y_p du point principal (Figure 9),
- Distance focale (f),
- Coefficients de distorsion radiale (K_0, K_1, K_2, K_3, K_4 et K_5),
- Rotations ω, ϕ et κ entre le système optique de la caméra numérique et les coordonnées terrain (Figure 35),
- Coordonnées terrain X_0, Y_0 et Z_0 du centre de perspective de la lentille de la caméra numérique.

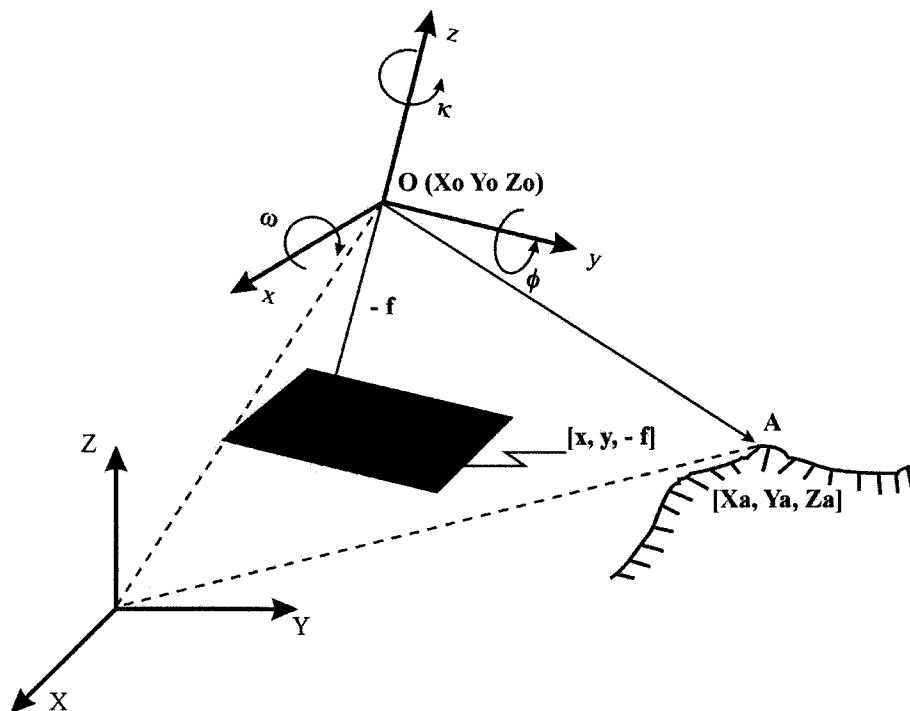


Figure 35 : Transformation projective 3-D pour l'orientation relative (modifiée d'après Boulianne, 1998).

Sur la Figure 35, la signification des symboles est la suivante :

f	: focale de la caméra,
X_o, Y_o, Z_o	: coordonnées objet (ou terrain) du centre de perspective de la caméra,
$x, y, -f$: coordonnées image d'un point A quelconque,
X_a, Y_a, Z_a	: coordonnées terrain d'un point A donné,
ω, ϕ, κ	: angles de rotation entre le système optique de la caméra et le système terrain.

L'orientation interne regroupe l'ensemble des paramètres définissant les caractéristiques géométriques de la caméra. Le système de coordonnées photographiques, dont l'origine se trouve au point principal, est établi à partir des coordonnées calibrées des repères de centrage. Les appareils ou logiciels photogrammétriques possèdent un système de coordonnées qui leur est propre, ce qui explique le fait que l'on doive faire appel à une transformation de coordonnées pour traduire les coordonnées observées en coordonnées photographiques.

Le but de l'orientation relative est de faire en sorte que les gerbes de rayons homologues d'un couple stéréoscopique s'intersectent comme lors d'une prise de vues [Bonneval, 1974; Karara, 1989]. Les coordonnées d'un point inconnu seront déterminées à partir de la méthode d'intersection spatiale décrite par Gravel *et al.* (1999) et Slama (1980), non pas dans le référentiel de l'objet mais dans un référentiel lié à l'une des deux caméras.

Dans la pratique, la résolution du système est effectuée sur un grand nombre de points (entre 20 et plus) selon le critère des moindres carrés par un calcul itératif.

En réalité, à cause d'erreurs diverses (perspective non centrale, distorsion, défaut mécanique de la caméra, etc.), deux gerbes de rayons homologues ne se coupent jamais dans l'espace. La différence en Z est inversement proportionnelle à la qualité de l'intersection [Gravel *et al.*, 1999]. Afin d'obtenir une meilleure précision en Z, il est recommandé d'utiliser les lignes épipolaires à partir de la méthode de dérivation présentée par Wong et Ho (1986).

L'orientation absolue consiste à transformer les coordonnées des points, mesurés dans le modèle stéréoscopique, en coordonnées terrain. Pour effectuer l'orientation absolue, un ensemble de points connus dans le système objet et dans le système du modèle requis. De tels points sont appelés des points de contrôle. Un minimum de trois points est en théorie nécessaire pour résoudre le système. Il est toujours judicieux d'introduire des points de contrôles supplémentaires qui permettent d'estimer l'incertitude liée à la chaîne de mesures et de traitement.

La technique de photogrammétrie terrestre appliquée à Moose Mountain s'apparente à la méthode de photogrammétrie multi-modèles décrite par Duelholm *et al.* (1993b). Elle a été utilisée dans des régions inaccessibles (falaises) et fait intervenir des formats d'image et des focales différentes. Elle a été employée pour caractériser la distribution des fractures et analyser avec précision les structures géologiques. Cette méthode est plus rapide que celle traditionnelle pour collecter les données sur le terrain, cependant elle demande beaucoup de temps de travail au laboratoire pour orienter les modèles photogrammétriques.

Pour répondre à nos besoins de cartographie, les trois logiciels de photogrammétrie suivants ont été testés : (1) AutoCAP, (2) FotoG-FMS et (3) PhotoModeler.

6.3 AutoCAP

Le système AutoCAP est un dispositif permettant d'intégrer les opérations topographiques aux opérations photogrammétriques et de rendre ainsi possible l'exploitation des données produites par une caméra numérique fixée sur une station-totale [Gravel *et al.*, 1999]. Le prototype présenté à la Figure 36 a été développé par le Département des sciences géomatiques de l'Université Laval (Québec). Le couplage a été réalisé au moyen d'un support en aluminium, composant la partie supérieure de la station-totale, sur lequel est fixée la caméra. Le poids du support, combiné à celui de la caméra numérique est relativement faible, de sorte qu'il ne cause pas de dommage à la station-totale. La station-totale permet d'établir la position de même que l'attitude (orientation dans l'espace) de la station de prise de vue, de sorte que le stéréomodèle peut être exploité directement, sans nécessiter l'établissement de points de contrôle [Boulianne *et al.*, 1995b].

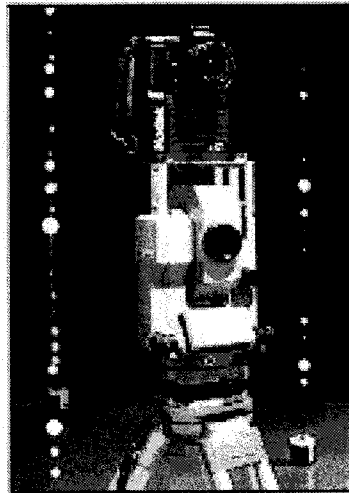


Figure 36 : Ensemble caméra numérique (Kodak DCS420) et station-totale (Leica TC 1600), d'après Gravel *et al.* (1999).

Ceci implique qu'il y ait une opération d'étalonnage du montage avant l'exploitation du stéréomodèle. En plus de donner la position et l'orientation de la caméra par rapport à la station-totale, l'étalonnage fournit aussi les paramètres relatifs à la géométrie de la caméra, nécessaires pour réaliser l'orientation intérieure au moment de la restitution [Gravel *et al.*, 1999].

Les données recueillies au moyen du montage caméra numérique / station-totale (Figure 36) peuvent ensuite être traitées dans le logiciel AutoCAP (Figure 37). Les coordonnées-terrain des points sont déterminées à partir de la méthode d'intersection spatiale.

Le logiciel AutoCAP est un logiciel en développement. Des modules supplémentaires ont été développés pour le présent projet, et notamment la mesure de l'attitude d'un plan (azimuth, pendage).

AutoCAP est un module développé dans l'environnement d'AutoCAD, mais il fonctionne de manière indépendante. En effet, le tracé des éléments géologiques sous AutoCAP n'a aucun lien direct avec le logiciel AutoCAD. Il convient donc d'exporter toutes les données au format *.dxf avant de quitter l'interface d'AutoCAP et de les importer dans un logiciel de DAO quelconque. Sur la version du prototype employé, l'absence de lignes épipolaires à l'écran rend plus difficile la détermination du point homologue sur la seconde image du couple stéréoscopique. Il est également impossible de connaître directement, c'est-à-dire sans exporter les données, la distance entre deux points de l'image.

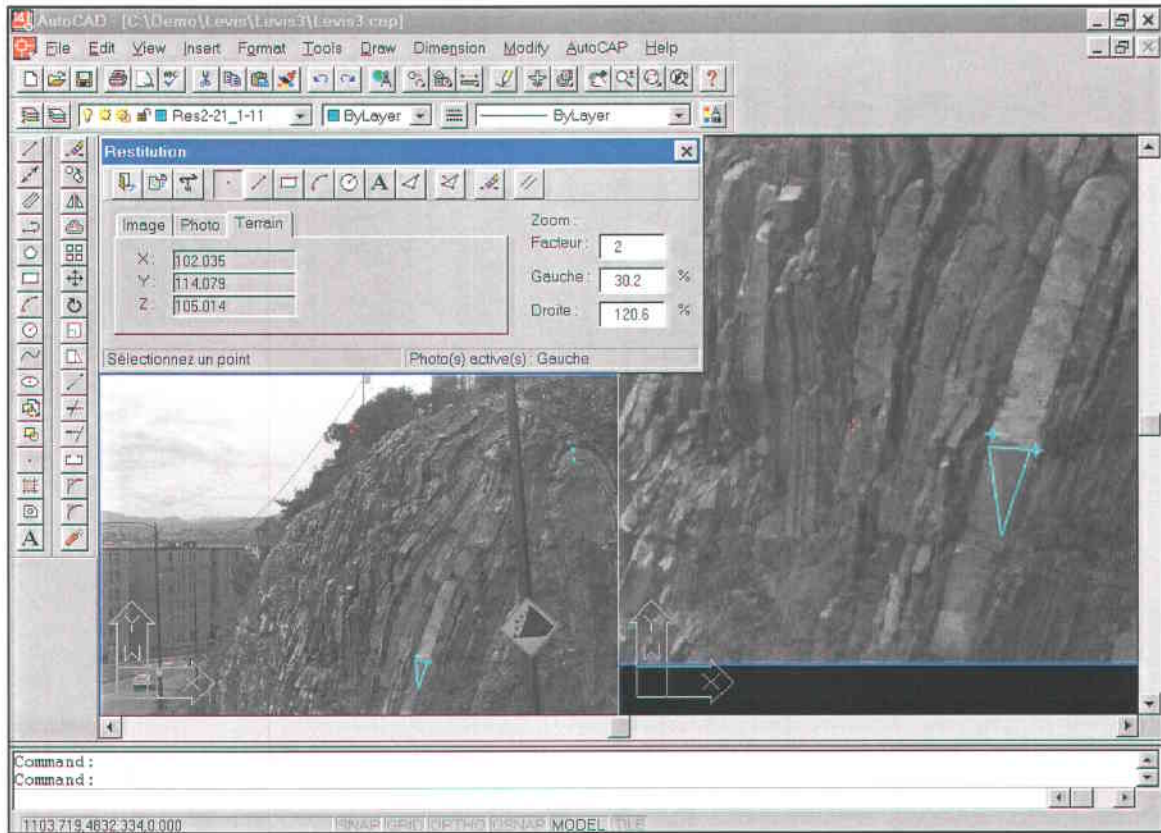


Figure 37 : Session de travail dans le logiciel AutoCAP.

Sur la Figure 37, la fenêtre principale est divisée en deux portions, qui correspondent à la paire d'images à analyser. Le triangle bleu visible à droite représente un plan de fracture mesuré.

6.4 PhotoModeler^{MC}

PhotoModeler est un logiciel développé par la Compagnie EOS Systems Inc. de Vancouver (Figure 38). Il est indépendant d'un logiciel de DAO. Cependant, il est nécessaire d'exporter les données (lignes, plans, etc.) dans un logiciel comme Microstation ou AutoCAD, afin de permettre les mesures de pendage, direction et longueur des éléments. Un réseau de points de contrôle doit être fourni à partir des données de terrain.

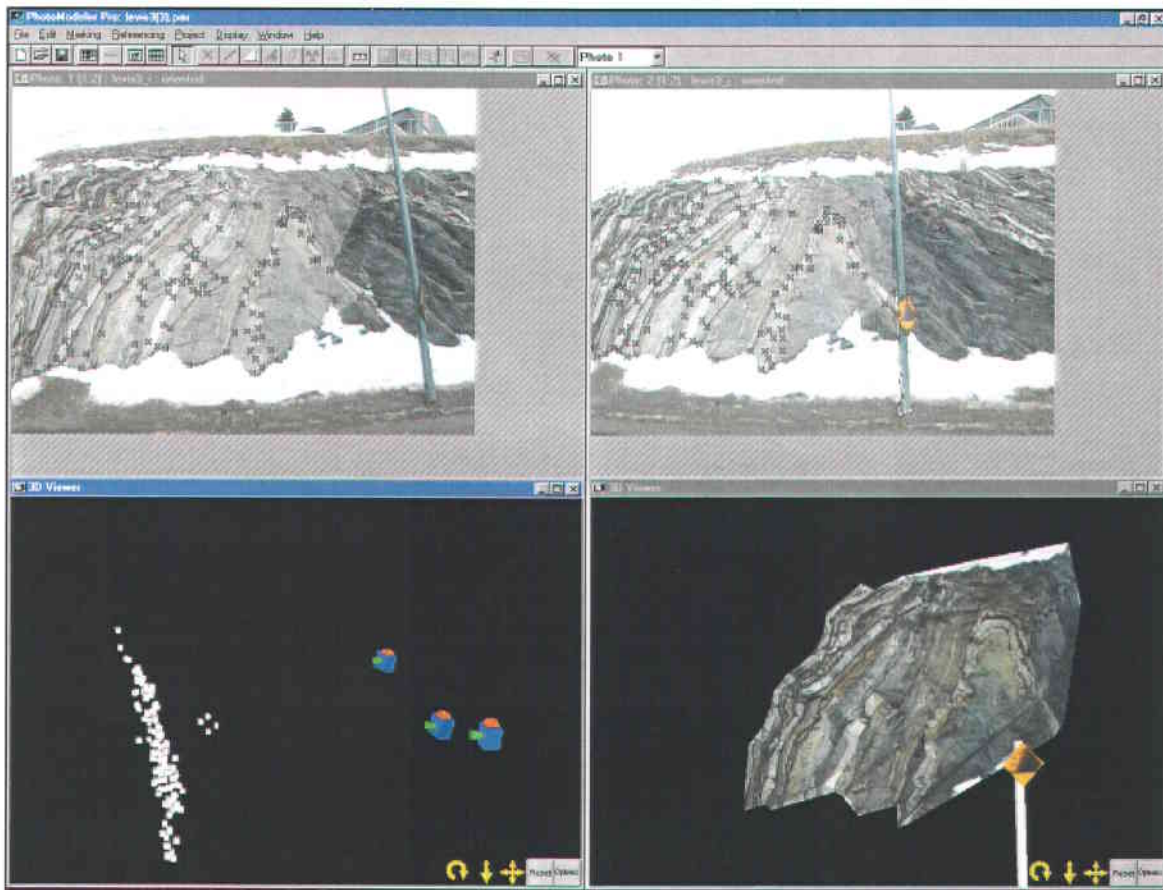


Figure 38 : Session de travail dans le logiciel PhotoModeler.

Sur la Figure 38, les deux fenêtres du haut, représentant un couple d'images, servent d'abord à la définition des points de contrôle et d'attache pour l'orientation du modèle photogrammétrique. Ensuite des points correspondant à la géologie peuvent être extraits et visualisés interactivement en 3-D (fenêtre inférieure gauche). De même, des plans de la surface du terrain peuvent être extraits et texturés (fenêtre inférieure droite).

L'interface de ce logiciel est très conviviale (Figure 38) et des fonctions d'exportation des plans en VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) sont disponibles, ce qui permet ainsi à différents utilisateurs disposant d'un logiciel comme Internet Explorer ou Netscape Navigator de visualiser et de manipuler les données extraites dans un espace à trois dimensions. Le guide d'utilisateur est très explicite. Il est également possible de connaître instantanément la distance entre deux points (une fois le modèle construit).

Pour de plus amples informations sur les caractéristiques et atouts du logiciel PhotoModeler, il convient de se rapporter au document écrit par Deng (1999).

6.5 FotoG-FMS^{MC}

Le logiciel FotoG-FMS^{MC} a été développé par la compagnie Vexcel Corp. (Boulder, Colorado) pour application dans le domaine industriel (Figure 39). Il a les mêmes fonctionnalités que PhotoModeler, à quelques modules près (par exemple, on ne peut pas exporter les données en VRML). Cependant, il a l'avantage de permettre la manipulation des données directement sous un logiciel de DAO (AutoCAD ou Microstation SE) et permet ainsi d'interagir avec le monde 3-D. Pour la restitution, il est beaucoup plus exigeant en terme de position des stations et des angles de vue comparativement au logiciel PhotoModeler, mais les résultats de mesures sont beaucoup plus précis. De plus ce logiciel permet de travailler avec des coordonnées UTM. Malgré tout, son interface est peu conviviale et quelques erreurs de processus subsistent. Le manuel d'utilisateur n'est pas très détaillé et s'adresse d'abord à des spécialistes de la photogrammétrie.

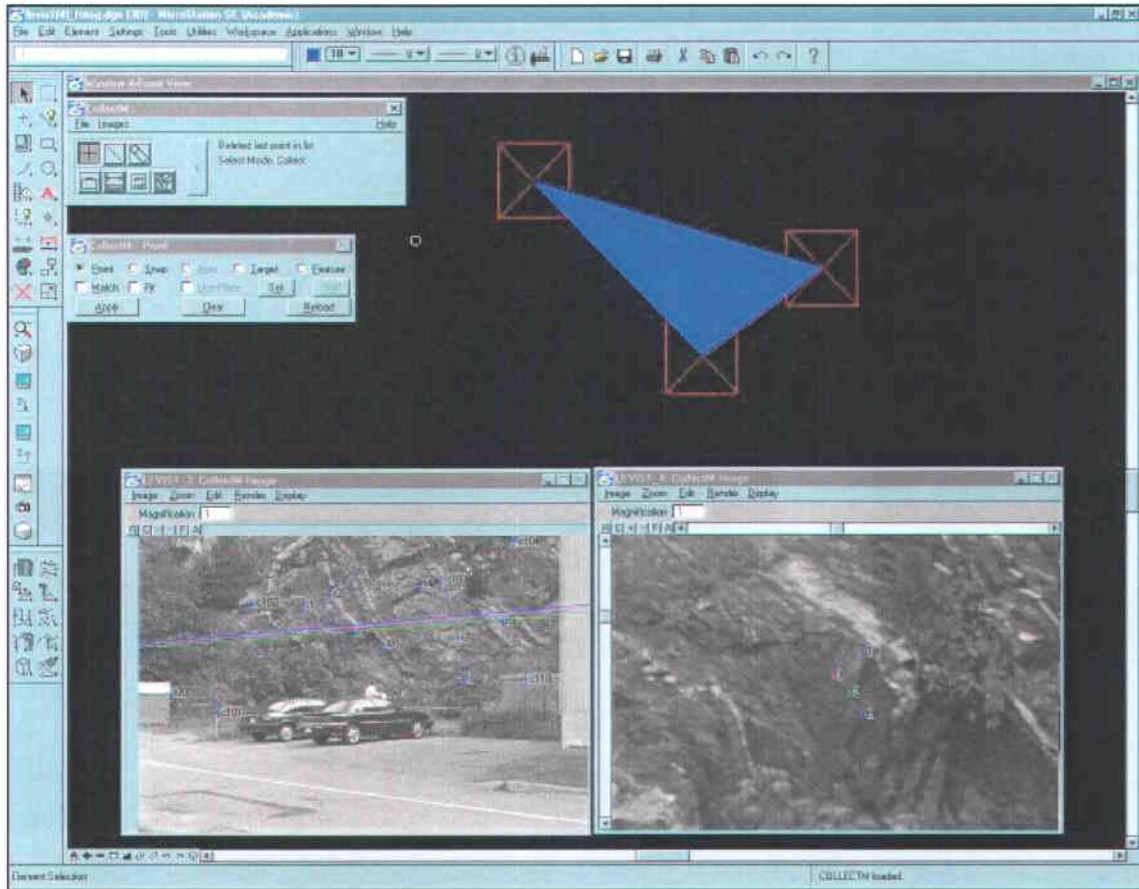


Figure 39 : Session de travail dans le logiciel FotoG-FMS^{MC}.

Sur la Figure 39, on aperçoit en bas une paire d'images utilisées pour cartographier des éléments géologiques. En haut, dans la fenêtre du logiciel de DAO, trois points tirés du terrain servent à mesurer l'orientation d'un plan géologique.

6.6 Les avantages et les limites des techniques d'imagerie terrestre

La technique de photogrammétrie terrestre a permis de modéliser la Formation de Pékisko (Figure 21). La Figure 40 montre les positions des stations de prise de vue dans la vallée de Moose Dome Creek. Ces positions ont été reconstruites à partir des modèles photogrammétriques, établis avec les logiciels PhotoModeler et FotoG, par la méthode d'intersection spatiale. Toutes les visées ont été dirigées vers l'est, en particulier sur la Formation de Pékisko.

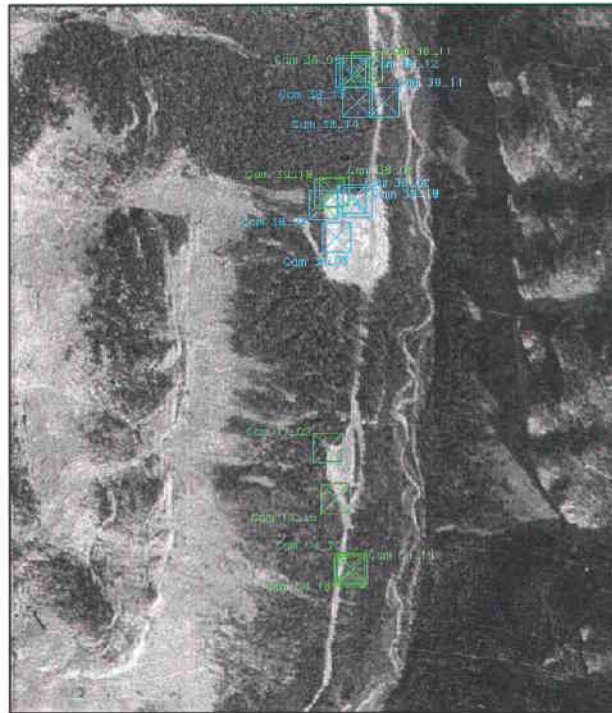
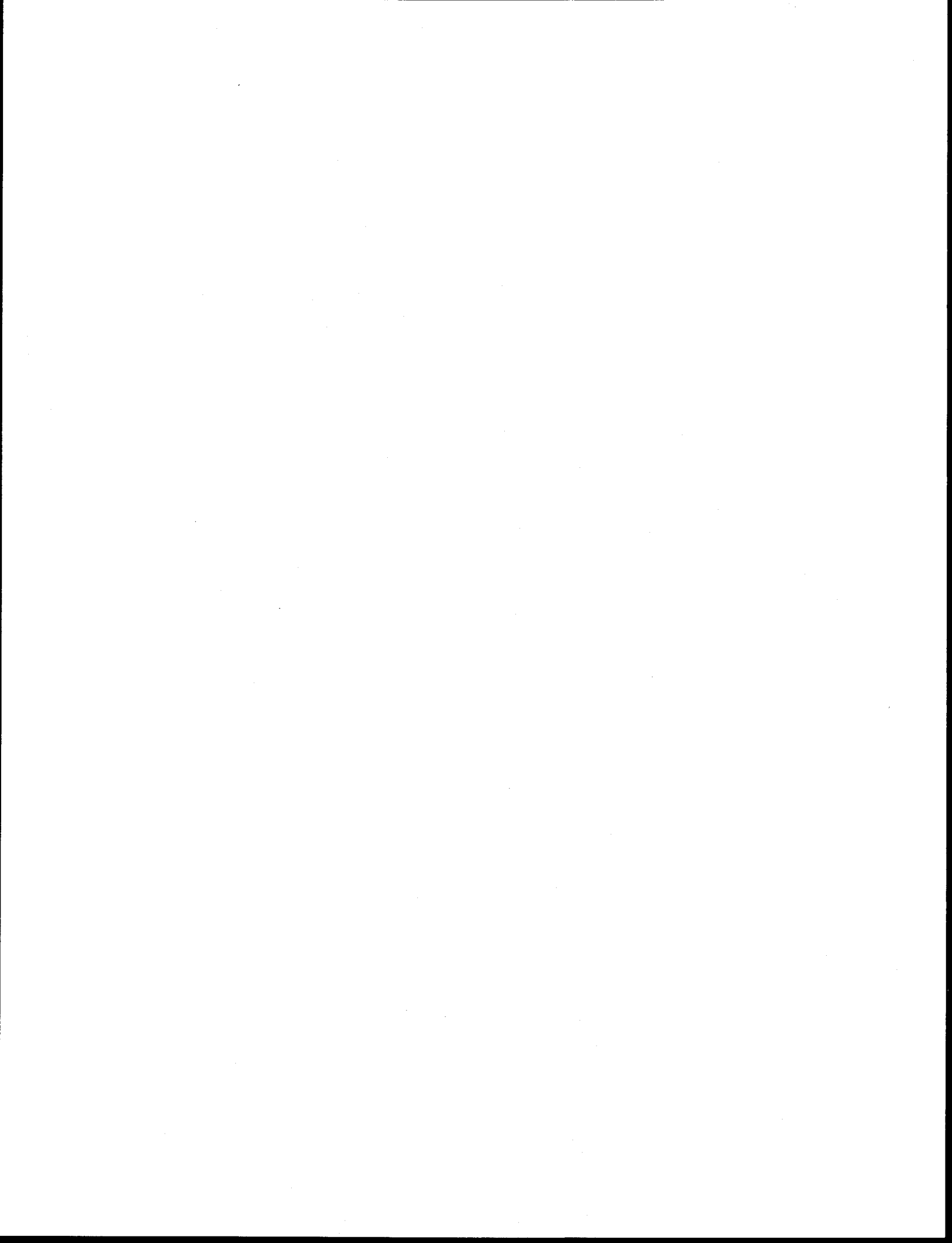


Figure 40 : Positions des stations de prise de vue dans la vallée de Moose Dome Creek.
 En vert : positions déterminées avec PhotoModeler et en bleu clair :
 positions déterminées avec FotoG.

Toutefois, certaines difficultés ont été rencontrées concernant la position des prises de vue, afin de respecter les conditions énumérées dans le chapitre III. Les arbres situés le long de la route de Moose Dome Creek nous ont parfois contraints à déplacer nos stations à des endroits moins stratégiques. Il n'était pas toujours possible d'avoir le recul nécessaire à une bonne prise de vue, encore une fois due à la végétation. La meilleure solution pour palier à ce problème aurait été de photographier l'affleurement par hélicoptère.



CHAPITRE VII

GÉOLOGIE, MODÉLISATION ET VISUALISATION 3-D ASSISTÉE PAR PHOTOGRAMMÉTRIE

7.1 Avant-propos

Ce chapitre expose les résultats obtenus par photogrammétrie terrestre dans la région de Lévis et de Moose Mountain. Ces résultats sont comparés aux données de terrain afin de démontrer la fiabilité et le taux de confiance de la méthode.

Ègalement, la procédure permettant de générer et d'extraire les informations géologiques pertinentes, comme l'épaisseur et l'attitude des surfaces, est détaillée.

7.2 Le site d'essais : Lévis

Lors de la campagne de terrain menée sur le site d'essais de Lévis, les informations suivantes ont été recueillies :

- (1) 30 mesures structurales (attitude des plans S_0 et des joints) et 18 mesures de longueur par méthode traditionnelle,
- (2) 25 points de contrôle ont été implantés et référencés dans un système local, et
- (3) 50 photographies terrestres ont été prises.

Les mesures structurales relevées sur le terrain ont été comparées aux résultats obtenus avec les logiciels AutoCAP, FotoG et PhotoModeler lors des essais en laboratoire (Tableau 3).

Dans l'ensemble, les résultats du tableau 3, illustrés en détails aux Figures 41 et 42, attestent de l'efficacité et de la précision de la technique. Ils valident la précision de la méthode de photogrammétrie terrestre dans le contexte géologique de Lévis décrit plus haut. Les écarts entre les mesures photogrammétriques et les mesures de terrain varient de :

- 09-25 degrés pour les mesures de direction,
- 3-9 degrés pour les mesures de pendage, et
- 1,2-2,4 cm pour les mesures de longueur entre deux points.

Ces évaluations ont été faites pour une distance à l'affleurement d'environ 50 mètres.

Valeurs de comparaison	Moyennes arrondies des différences mesurées par rapport aux données de terrain			
	AutoCAP	FotoG	PhotoModeler	
Direction (degrés)	17	9	25	Échantillon de 20 mesures
Pendage (degrés)	7	3	9	
Longueur (cm)	2,4	2,4	1,2	Échantillon de 18 mesures

Tableau 3 : Comparaison des valeurs de direction, pendage et longueur entre les données terrain et les logiciels de photogrammétrie terrestre, à Lévis pour des distances caméra-terrain d'environ 50 mètres.

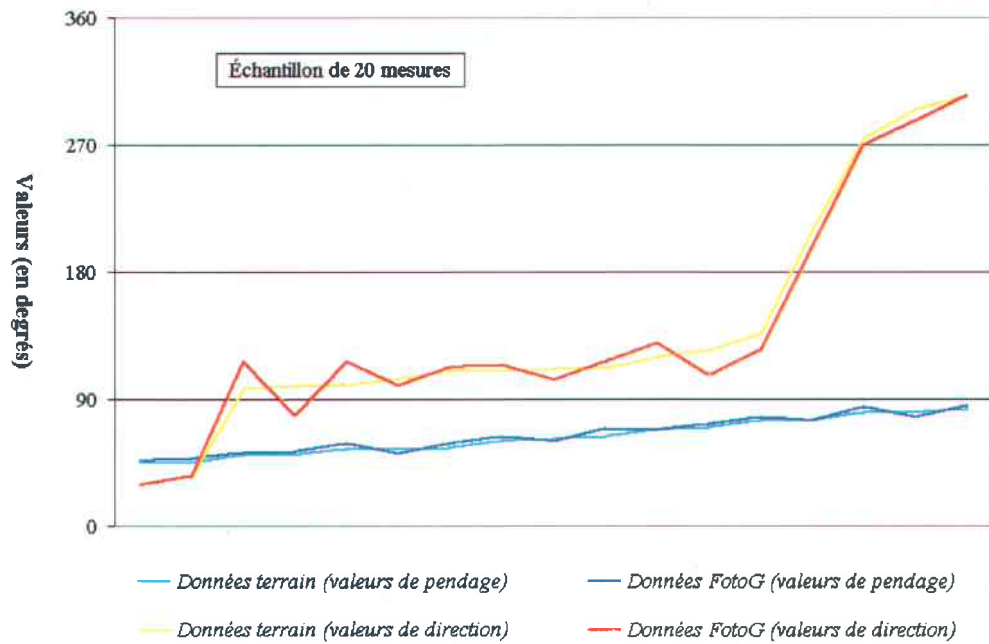


Figure 41 : Comparaison entre les valeurs de direction et de pendage collectées sur le terrain et celles obtenues avec le logiciel FotoG.

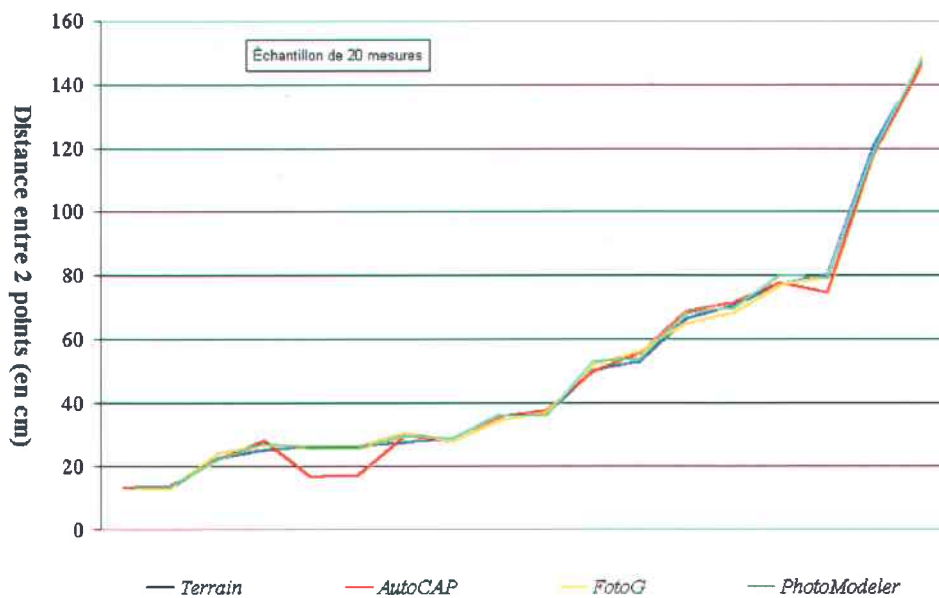


Figure 42 : Comparaison entre les valeurs de longueur obtenues sur le terrain et celles mesurées avec les logiciels de photogrammétrie.

Compte tenu des erreurs de prise de mesure du géologue avec la boussole (± 5 degrés), les valeurs de pendage obtenues avec les logiciels de photogrammétrie terrestre sont comparables aux mesures collectées sur le terrain. Toutefois, des erreurs importantes sont apparues avec certaines valeurs de direction pour les logiciels AutoCAP et PhotoModeler. Ces erreurs sont généralement dues à une mauvaise restitution photogrammétrique, causée par l'imprécision des points homologues présents sur un couple d'images. Ces erreurs sont plus marquées pour les valeurs de direction que de pendage. Nous avons pu diminuer ces erreurs avec le logiciel FotoG grâce à la disponibilité d'une fonction d'affichage des lignes épipolaires. Une ligne épipolaire est définie comme une ligne passant par le plan contenant le point homologue d'une image par rapport au point de contrôle déterminé précédemment sur l'autre image.

7.3 Le site d'analyse géologique et photogrammétrique : Moose Mountain

Lors de la campagne de terrain menée dans les vallées de Moose Dome Creek et Canyon Creek de la région de Moose Mountain, les informations suivantes ont été recueillies :

- (1) plus de 100 données structurales (attitude des plans S_0 et des joints) par méthode traditionnelle (boussole),
- (2) 80 points de contrôle ont été implantés et rattachés au réseau géodésique, principalement sur les falaises caractérisant la Formation de Pekisko, et
- (3) plus de 200 clichés ont été pris.

7.3.1 Modélisation et visualisation des surfaces géologiques

En vue de tirer partie des quatre techniques de photogrammétrie numérique décrites dans les chapitres V et VI, l'étude de la région de Moose Dome Creek a été plus approfondie. Afin d'évaluer et de modéliser la géologie, le logiciel GOCAD a été utilisé pour extraire des surfaces géologiques à partir de contacts, et ainsi déterminer :

- l'attitude d'un plan, représentant la surface d'une formation géologique,
- l'épaisseur entre deux plans ou deux surfaces géologiques, et
- la longueur, la direction et la plongée d'un joint, illustré par un segment de droite.

Le logiciel GOCAD (Figure 43), développé à l'École de Géologie de Nancy (I.N.P.L.) par les équipes du L.I.A.D. (ENSG) et Infographie du C.R.I.N., sous la direction du Professeur Mallet, est un produit permettant de modéliser et de visualiser des éléments de géologie en trois dimensions. GOCAD est actuellement un outil de visualisation en expansion pour l'industrie minière et pétrolière [Moller *et al.*, 1999]. Il comporte de nombreux modules nécessaires à la construction de modèles géologiques d'exploration respectant toute l'information disponible. Ces modèles sont aussi utilisés pour les études de simulation de production des réservoirs pétroliers.

Plusieurs modules ont été développés par M.A. Vallée (INRS-Géoressources) pour répondre à nos besoins de cartographie. Ceux-ci sont :

- *Compute Strike & Dip on Surface* : calcul de l'orientation (direction et pendage) à chaque nœud d'une surface.
- *Compute Thickness* : Calcul de l'épaisseur vraie (le long de la normale du plan supérieur) entre deux plans.
- *Compute Joint Properties* : Calcul de la longueur, direction et plongée de doublets de points, correspondant à un joint.

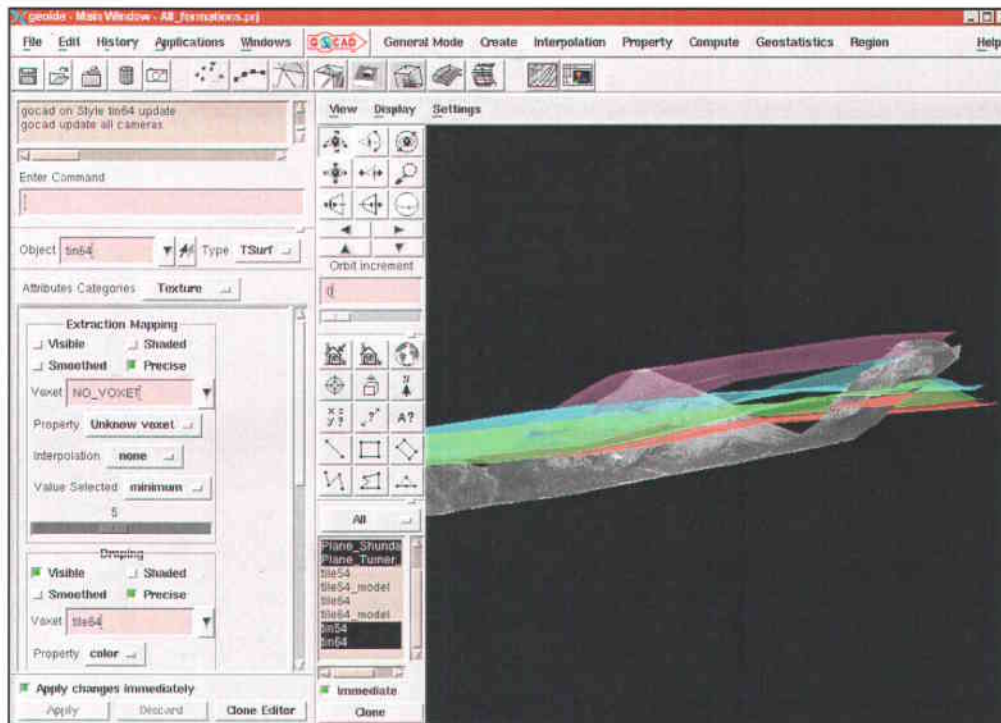


Figure 43 : Session de travail dans le logiciel GOCAD. La fenêtre de droite (fond noir) représente une vue en perspective d'une tuile sur laquelle a été appliquée une portion de l'orthophoto noir et blanc et cartographiée les formations géologiques, caractérisées par les surfaces transparentes colorées.

De Kemp (2000) avait déjà développé des outils similaires pour un projet de modélisation 3-D des structures géologiques en Abitibi, mais dans un langage informatique différent (Awk) et dans une zone où le relief était très faible, contrairement à Moose Mountain.

La Figure 44 montre le tracé des contacts géologiques selon la technique de rendu de terrain. Afin de limiter le temps de chargement des objets de GOCAD, il a fallu procéder tuile par tuile.

Puis nous avons délimité les contacts des unités géologiques dont les contrastes sont les plus marquants (Figure 20), soient :

- Formation de Pekisko / Formation de Shunda,
- Membre G / Membre F de la Formation de Shunda,
- Membre F de la Formation de Shunda / Formation de Turner Valley,
- Formation de Turner Valley / Formation de Mount Head.

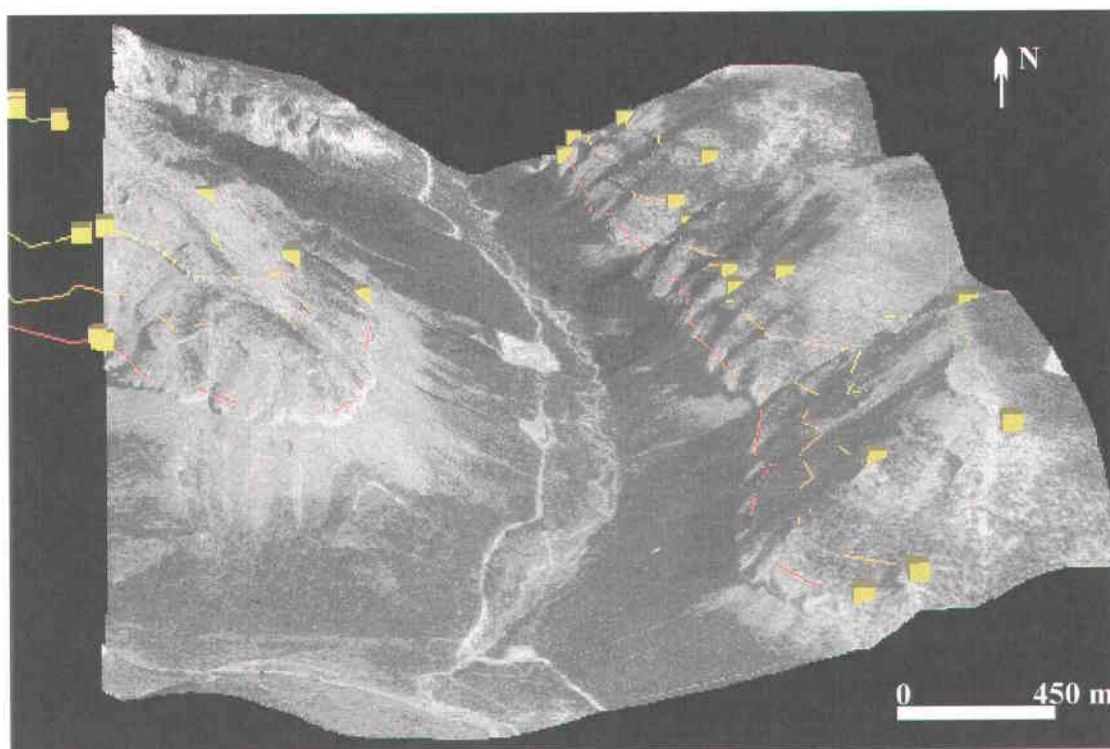


Figure 44 : Contacts géologiques déterminés selon la technique de rendu de terrain. (Les cubes jaunes représentent les extrémités des lignes de contacts).

Les Figures 45 et 46 représentent respectivement les surfaces géologiques déterminées selon le tracé des contacts géologiques (Figure 44) et le calcul de l'épaisseur entre deux formations.

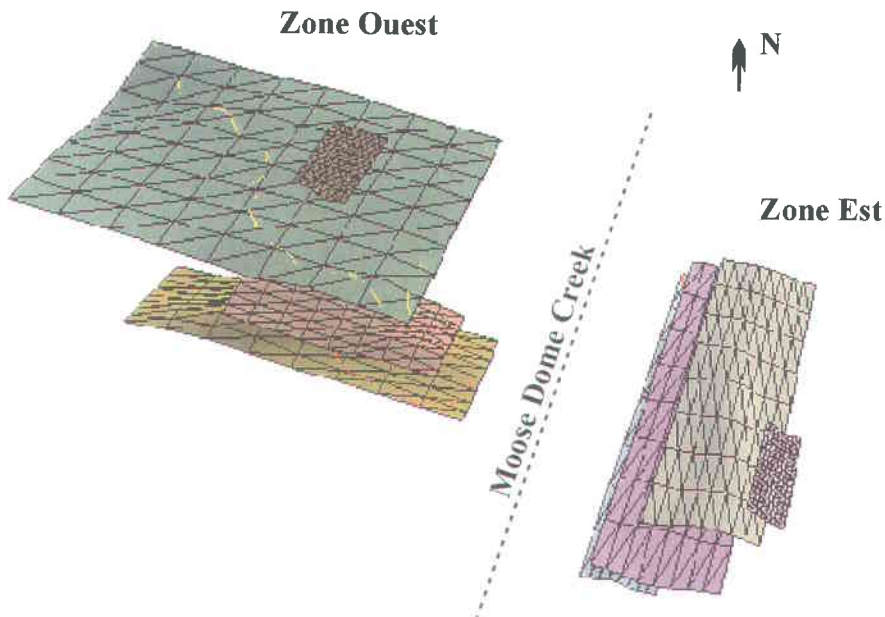


Figure 45 : Surfaces géologiques déterminées à partir du tracé des contacts géologiques dans la vallée de Moose Dome Creek, Moose Mountain.

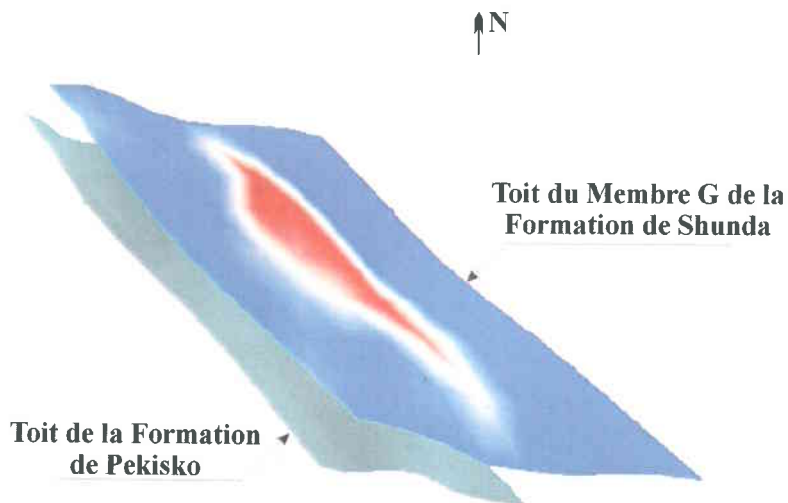


Figure 46 : Calcul de l'épaisseur d'une formation géologique entre deux surfaces.

Le tableau 4 montre les résultats obtenus lors du calcul des épaisseurs entre les formations géologiques, selon les quatre méthodes de photogrammétrie numérique. La fonction « *Compute Thickness* » a été utilisée pour mesurer les épaisseurs de ces unités. Chaque épaisseur est en fait une moyenne calculée des longueurs des segments, projetés perpendiculairement à chaque nœud de la couche supérieure sur la surface inférieure. Sur la Figure 46, le Membre G de la Formation de Shunda est la surface supérieure et le toit de la Formation de Pekisko, la surface inférieure. Dans le tableau 4, les valeurs mesurées par Richards *et al.* (2000) sont ici inscrites à titre indicatif car les épaisseurs de ces formations géologiques n'ont pas été déterminées dans la même région de Moose Mountain. Cependant, elles sont une bonne référence. L'écart moyen des valeurs mesurées, sur le terrain ou par méthode photogrammétrique, varie entre 0 et de 10 mètres, excepté pour le Membre G de la Formation de Shunda dans la zone ouest, où il atteint 42 mètres avec la technique DiAP. Ceci est dû principalement à un effet de flou du couple stéréoscopique dans cette zone qui gêne le suivi précis du contact géologique.

Épaisseur (en m)										
Formations	Rendu de terrain		Orihophoto haute-résolution		DiAP Viewer		Photog. Terrestre	Moy. Zone Ouest	Moy. Zone Est	Mesures de terrain (Richards <i>et al.</i> , 2000)
	Zone Ouest	Zone Est	Zone Ouest	Zone Est	Zone Ouest	Zone Est	Zone Est			
<i>Pekisko</i>	?	?	?	?	?	?	55	55	?	40-120
<i>Shunda, Mb. G</i>	74	53	68	55	42	51	?	62	53	104
<i>Shunda, Mb. F</i>	57	57	63	60	61	60	?	60	59	
<i>Turner Valley</i>	134	119	132	124	132	122	?	133	122	100

Tableau 4 : Épaisseurs des formations géologiques évaluées selon les quatre méthodes de photogrammétrie numérique et comparées aux mesures de Richards *et al.* (2000).

Les résultats obtenus sont très satisfaisants, et nous pouvons également conclure que les formations sont plus épaisses à l'ouest de Moose Dome Creek qu'à l'est.

Les tableaux 5 et 6 correspondent aux valeurs de pendage et de direction mesurées encore une fois selon les quatre méthodes et comparées aux données collectées par Beach (1943). Comme le calcul des épaisseurs, les mesures de pendage et de direction correspondent en fait à une moyenne des valeurs enregistrées à chacun des nœuds de la surface géologique. Pour ce faire, la fonction « *Compute Strike & Dip on Surface* » a été appliquée afin de calculer le pendage, à partir de la normale déterminée par GOCAD. L'écart moyen des valeurs mesurées est de l'ordre de 10 degrés.

Pendage (deg.)											
Formations	Rendu de terrain		Orthophoto haute-resolution		DiAP Viewer		Photog. Terrestre	Moy. Zone	Moy. Zone	Selon Beach Zone	Selon Beach Zone
	Zone Ouest	Zone Est	Zone Ouest	Zone Est	Zone Ouest	Zone Est	Zone Est	Ouest	Est	Ouest (1943)	Est (1943)
<i>Pekisko</i>	5	3	10	7	4	12	4	6	7	9	9
<i>Shunda, Mb. G</i>	2	7	2	10	3	8	?	2	8	10-13	6-9
<i>Shunda, Mb. F</i>	4	6	8	8	6	6	?	6	6		
<i>Turner Valley</i>	18	9	9	19	11	14	?	13	14	10-11	9

Tableau 5 : Pendages des surfaces géologiques évalués selon les quatre méthodes de photogrammétrie numérique et comparés aux mesures de Beach (1943).

Azimuth (deg.)											
Formations	Rendu de terrain		Orthophoto haute-résolution		DiAP Viewer		Photog. Terrestre	Moy. Zone Ouest	Moy. Zone Est	Selon Beach Zone Ouest (1943)	Selon Beach Zone Est (1943)
	Zone Ouest	Zone Est	Zone Ouest	Zone Est	Zone Ouest	Zone Est	Zone Est				
<i>Pekisko</i>	5	13	4	2	10	5	355	4	7	355	5
<i>Shunda, Mb. G</i>	8	355	357	3	10	10	?	5	3	350-355	0-5
<i>Shunda, Mb. F</i>	4	356	355	4	356	15	?	357	5		
<i>Turner Valley</i>	6	14	358	2	359	5	?	1	7	350-355	10

Tableau 6 : Azimuth moyen des surfaces géologiques évalués selon les quatre méthodes de photogrammétrie numérique et comparés aux mesures de Beach (1943).

Les résultats des tableaux 5 et 6 démontrent que les méthodes de photogrammétrie employées dans le cadre du projet Moose Mountain pour la cartographie des éléments structuraux sont très proches de la réalité du terrain.

Les différences de pendage n'excèdent pas 5 degrés, excepté pour le Membre G de la Formation de Shunda dans la zone est, où elles atteignent 10 degrés. Concernant les valeurs de direction, les écarts sont un peu plus importants. Ils varient entre 0 et 20 degrés.

7.3.2 La géométrie d'un réseau de fractures

Afin d'exploiter tous les outils de modélisation et de photogrammétrie disponibles, l'attitude et la longueur des joints présents dans un réseau de fractures ont été caractérisées. Ces joints coupent ou sont localisés à proximité d'une ligne de référence établie arbitrairement (Figure 47), sur la paroi sub-verticale de la Formation de Pekisko, sur le flanc est de Moose Dome Creek.

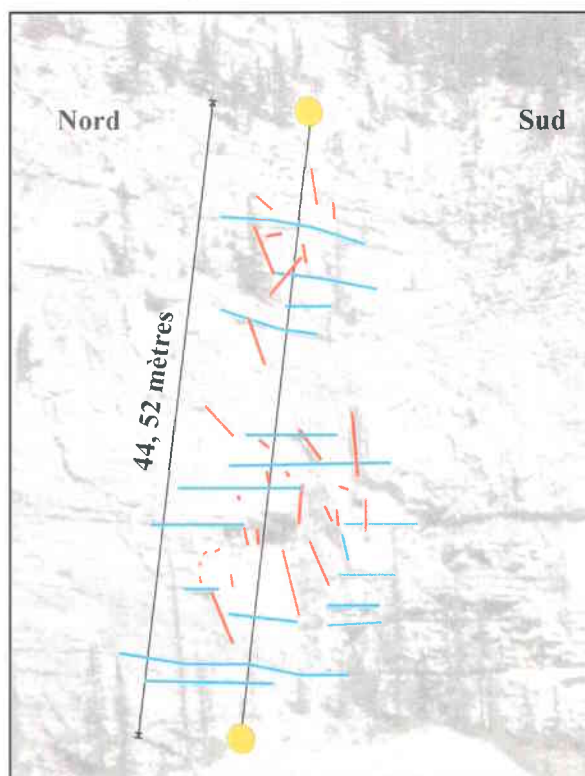


Figure 47 : Exemple de la géométrie d'un réseau de fracture déterminé sur la Formation de Pekisko (vue verticale vers l'est). En noir : ligne de référence ; en bleu : plans de litage et en rouge : joints.

La ligne de référence a une longueur de 44.52 mètres. Elle est orientée selon un axe de plongée [218/69], et suit la topographie de la Formation de Pekisko, caractérisée par une falaise.

Quatorze plans de litage ont été mesurés et leur attitude moyenne est [004/04]. Les écart moyens entre les valeurs calculées sont de 12 degrés pour l'orientation et de 4 degrés pour le pendage.

Le tableau 7 montre les résultats obtenus pour la caractérisation des joints.

Joints (28 mesures)	
Longueur moy. (en m)	Moyenne des différences de longueur (en m)
2	1.58
Orientation	Fréquence (nombre de mesures)
85 - 95°	11
0 - 10°	6
11 - 84°	11
Pendage	Fréquence (nombre de mesures)
61 - 75°	16
80 - 90°	3
0 - 60°	9

Tableau 7 : Caractérisation des joints le long d'une ligne de référence.

Au vu des résultats précédents et des notes de terrain, nous pouvons conclure qu'il existe une famille de joints à pendage apparent sub-vertical et une famille de joints d'orientation est, le long de la ligne de référence, dans la Formation de Pekisko.

7.4 Résumé

Les résultats obtenus sont très satisfaisants et prometteurs. Ils attestent de l'efficacité, de la fiabilité et de l'utilité de la photogrammétrie en région accidentée et difficile d'accès pour le géologue.

Les différences entre l'élément structural réel et celui déterminé par photogrammétrie indiquent des valeurs comprises entre 5 et 10 mètres pour l'ortho-image et le MNT utilisés, et 10-50 cm en photogrammétrie terrestre, selon la résolution de la caméra ou l'éloignement de l'affleurement. Également, des résultats probants concernant la précision des pendages et des directions de plan (écarts compris entre 0 et 10 degrés en moyenne) ont été obtenus. Concernant la détermination d'un réseau de fractures préférentiel par photogrammétrie terrestre, nous avons pu identifier différentes familles de joints.

La Figure 48 montre en exemple les trois formations géologiques étudiées par photogrammétrie (Formations de Pekisko, de Shunda et de Turner Valley). Cette figure est extraite d'un VRML et, à la différence d'une carte géologique traditionnelle, elle ajoute une troisième dimension et fait ressortir la notion de volume. Elle a été construite par intersection des surfaces géologiques avec le MNT.

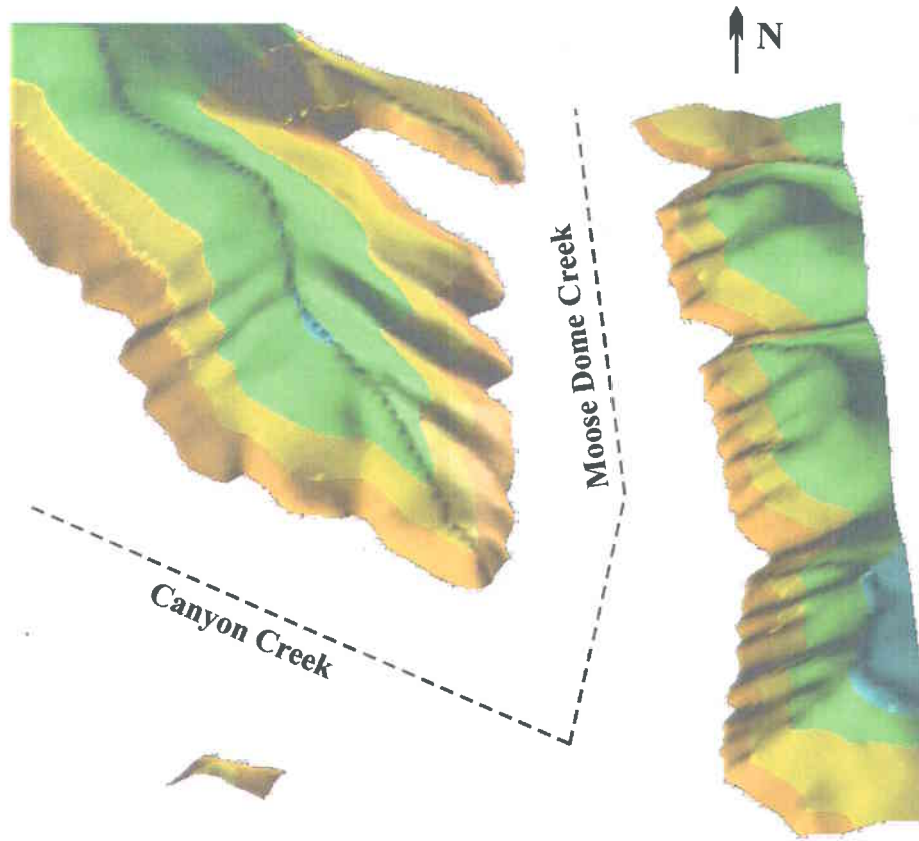


Figure 48 : Formations géologiques identifiées par photogrammétrie et reproduites par la technique du rendu de terrain. En orangé : Membre G de la Formation de Shunda ; en jaune : Membre F de la Formation de Shunda ; en vert : Formation de Turner Valley et en bleu : Formation de Mount Head.



CHAPITRE VIII

CONCLUSIONS

8.1 Avant-propos

La présente recherche décrit quatre techniques de photogrammétrie numérique, et insiste sur l'utilité de chacune pour la cartographie géologique. Toutefois, il convient de garder à l'esprit que certains problèmes existent et que la qualité des résultats dépend de plusieurs facteurs, comme la précision des données, des différentes étapes de modélisation et des analyses interprétatives du géologue photo-interpréteur.

L'emploi de chacune des méthodes de photogrammétrie sera également fonction d'autres paramètres, tels le coût d'investigation ou encore la physiographie du site d'étude (terrain plat / relief accentué, végétation ...).

8.2 Problèmes rencontrés

Lorsque les éléments cartographiques sont trop linéaires, c'est-à-dire que les vertex (ou nœuds) formant l'ensemble d'un contact géologique ressemblent à une droite, le calcul du pendage devient très imprécis. Il convient donc de prendre conscience de ce problème lors de l'interprétation des résultats.

Le tableau 8 illustre les différents problèmes existants lors de la caractérisation des formations géologiques et de l'utilisation des logiciels. Il ne dresse pas une liste exhaustive des inconvénients, mais donne un aperçu de l'utilisation de ces techniques pour les géologues photo-interpréteurs.

Orthophoto haute-résolution	Stéréo-imagerie numérique	Rendu de terrain	Photogrammétrie terrestre
<p>1- Aucune notion de relief.</p> <p>2- Difficultés pour cartographier dans des régions très abruptes (ex. : falaises).</p> <p>3- Le MNT (ou TIN), précis au 100 mètres, mais extrapolés au 25 mètres, est tellement penté dans les zones très abruptes qu'il est difficile de pointer correctement un contact géologique avec le curseur.</p>	<p>1- Temps d'adaptation de la vision humaine.</p> <p>2- Difficulté à voir en 3-D lorsque le zoom est trop important.</p> <p>3- Difficultés pour cartographier dans des régions très abruptes (ex. : falaises).</p> <p>4- Le MNT (ou TIN), précis au 100 mètres, mais extrapolé au 25 mètres, est tellement penté dans les zones très abruptes qu'il est difficile de pointer correctement un contact géologique avec le curseur.</p> <p>5- Fatigant pour les yeux.</p>	<p>1- Le MNT (ou TIN), précis au 100 mètres, mais extrapolés au 25 mètres, est tellement penté dans les zones très abruptes qu'il est difficile de pointer correctement un contact géologique avec le curseur.</p> <p>2- Le temps de chargement de l'orthophoto appliquée sur le MNT peut s'avérer très long, ainsi que son changement d'orientation en rapport avec l'angle de visée.</p>	<p>1- PhotoModeler n'accepte pas d'orienter un modèle dont les coordonnées des points de contrôle sont trop longues (en UTM par exemple).</p> <p>2- L'espace disponible pour prendre les photos sous les meilleurs angles.</p> <p>3- La végétation au sol.</p>

Tableau 8 : Problèmes rencontrés.

La Figure 49 est une synthèse des erreurs éventuelles que l'on peut rencontrer lors de la construction d'un modèle 3-D, en photogrammétrie terrestre. Encore un fois, il convient d'être attentif lors des différentes étapes des processus photogrammétriques, et précis lors de l'acquisition des points de contrôle sur le terrain et de l'étalonnage des caméras.

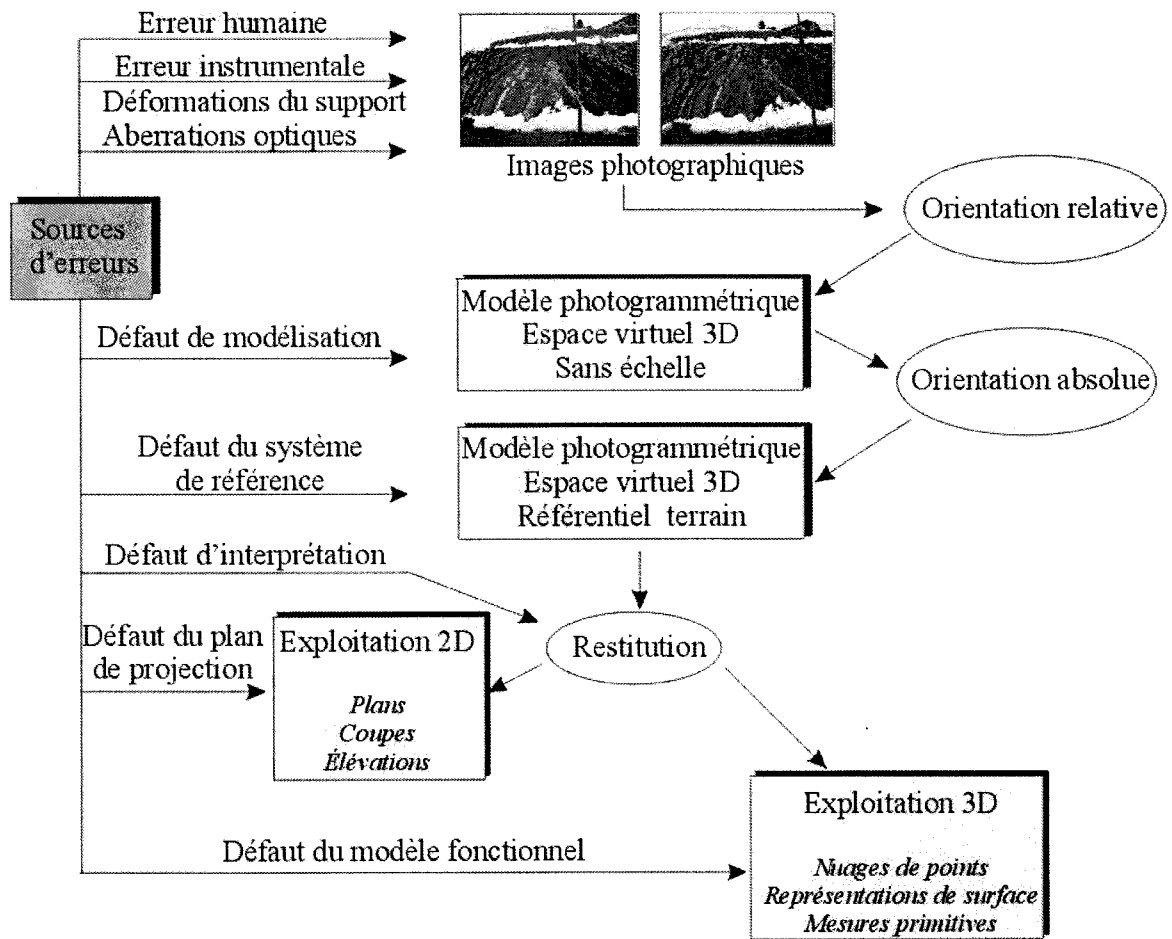
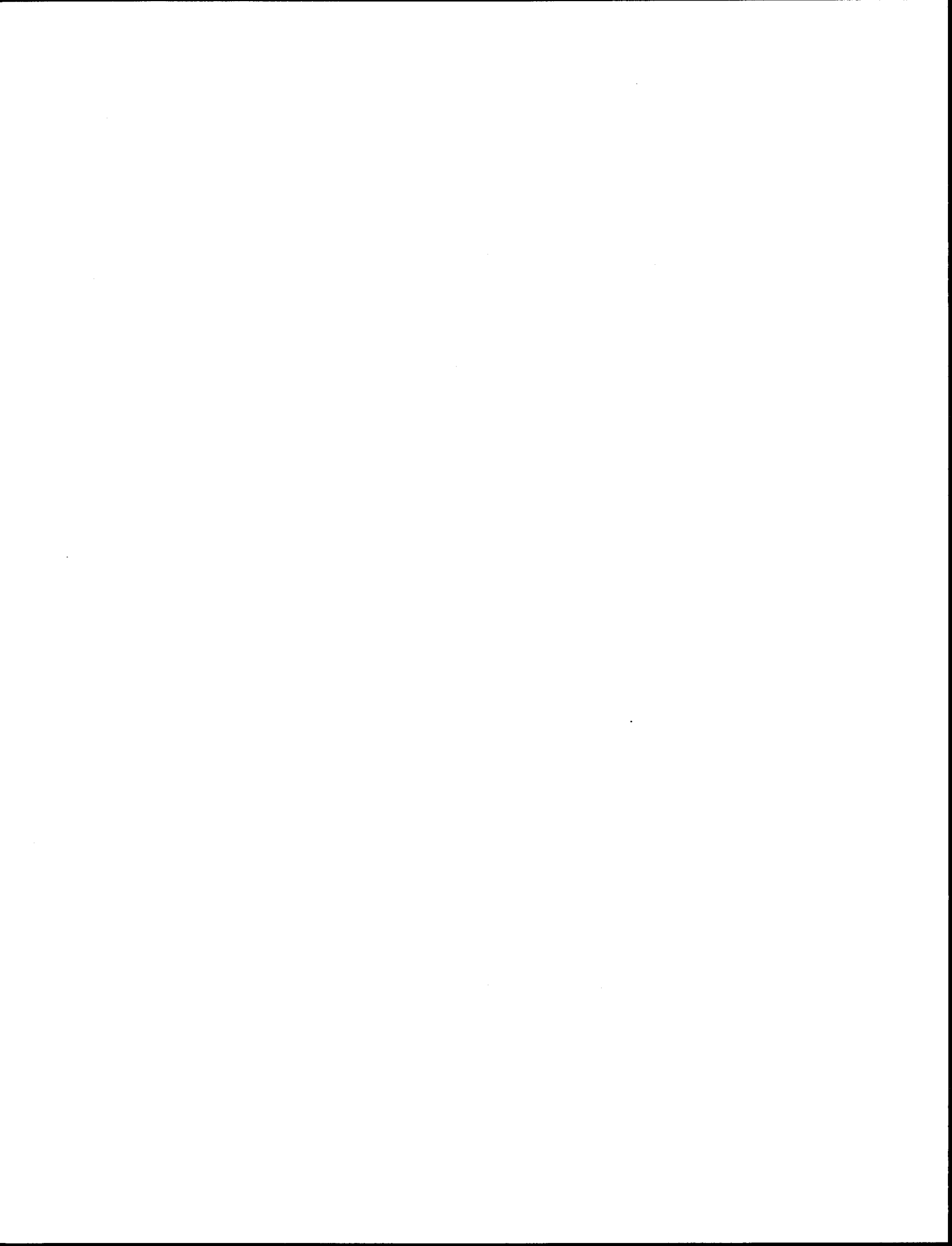


Figure 49 : Sources d'erreurs potentielles lors de la restitution photogrammétrique.

8.3 Comparaison des quatre méthodes de photogrammétrie

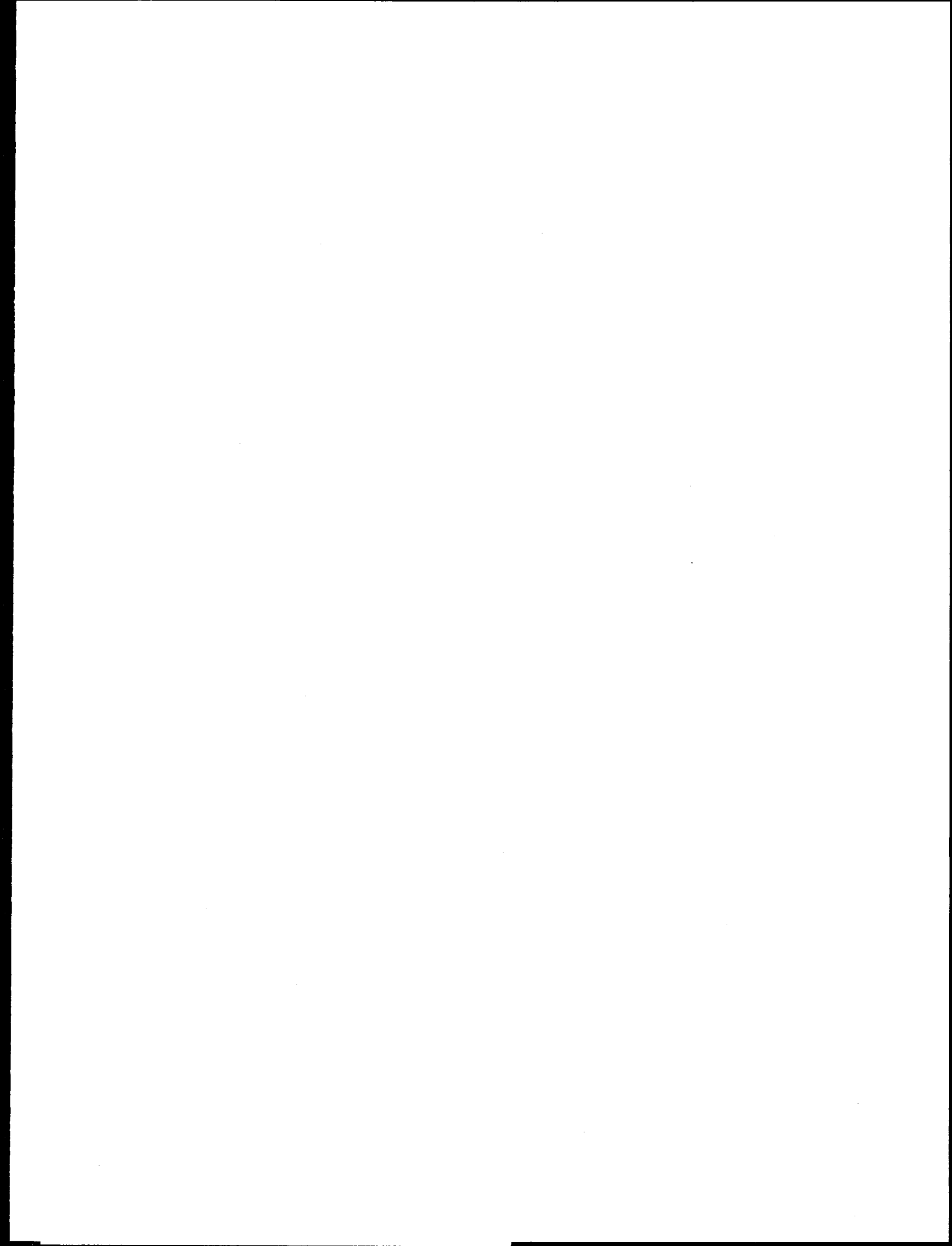
Le tableau 9 est un résumé condensé des chapitres V et VI, dans lequel sont comparées les techniques de photogrammétrie selon différents critères.



	Orthophoto haute-résolution	Stéréo-imagerie numérique	Rendu de terrain	Photogrammétrie terrestre
Source de ou des images	Photographie aérienne, corrigée géométriquement. Cette orthophoto a été transformée au format *.hmr de Microstation SE. Un MNT (format *.sdt) a été intégré au fichier par l'intermédiaire de l'application AutoZ	Photographies aériennes transformées au format *.sis avec le logiciel DiAP [®] à la Commission géologique de Calgary, par R. Da Rosa. Elles sont orthoréférences. Afin d'éditionner un couple stéréoscopique à partir de ces images, il convient de créer un modèle (format *.mod) et une surface de couverture (format *.sdt)	Photographie aérienne, corrigée géométriquement. Cette orthophoto a été subdivisée, afin d'éviter un temps de chargement trop long, en plusieurs tuiles. Ces tuiles ont été transformées au format *.hmr de Microstation SE et chaque image épouse la surface de son propre MNT, sous la forme d'une texture (ou rendu)	Photographies prises avec des appareils photos non-métriques, de type commercial (sur film ou numérique) ou professionnel
Taille du ou des fichiers	Au format *.hmr : 170 Mo Au format *.sdt : 13 Mo	Au format *.sis : 450 Mo Au format *.sdt : 13 Mo Au format *.mod : 10 Ko	Au format *.hmr : 13 Mo Au format *.sdt : 1 Mo	Au format *.tif : 50 Mo
Échelle	1 : 10 000	1 : 10 000	1 : 10 000	Les clichés ont été pris à une distance comprise entre 100 et 300 mètres de l'objet à Moose Mountain et environ 50 mètres à Lévis
Résolution spatiale	Haute-Résolution (image scannée à 2000 dpi)	Haute-Résolution (image scannée à 2000 dpi)	Résolution 300 dpi, encore une fois pour soulager le temps de chargement des blocs	Haute-Résolution (image scannée à 2000 dpi)
Précision	10-20 mètres en terrain peu accidenté	10-20 mètres en terrain peu accidenté	10-20 mètres en terrain peu accidenté	5-10 cm à 50 mètres de l'objet et 20-50 cm à 300 mètres. Elle est fonction de la qualité de l'étalement de la caméra, de la précision des points de contrôle et de l'ajustement des faisceaux (ou Bundle Adjustment)
Temps d'investigation	Rapide	Rapide (si l'on considère que les stéréomodèles ont été montés)	Dépend de la performance de l'ordinateur pour orienter le modèle	Long car nécessité d'orienter préalablement, avec précision, les photos dans un modèle
Acquisition des points de contrôle	Non	Non	Non	Oui. Ils sont déterminés avec une station totale, par intersection spatiale ou à l'aide d'un prisme. Il est important de prendre le maximum de points pour avoir la meilleure restitution finale (au moins 6 par couple d'images)
Nécessité d'un MNT	Oui	Oui	Oui	Non
Logiciels ou modules utilisés	Microstation SE Module AutoZ (ISM Sysimage)	Microstation SE DiAP Viewer (ISM Corp.)	Microstation SE avec les modules Geopak et Imagemanager de Descartes	FotoG avec Microstation SE AutoCAP PhotoModeler
Interface / Convivialité	Très bonne interface et convivialité	Très bonne interface. La convivialité du logiciel dépend de l'aptitude de l'utilisateur à percevoir la notion de relief	Très bonne interface et convivialité	Très bonne interface et convivialité pour AutoCAP et PhotoModeler, contrairement à FotoG
Coût approximatif *	2500 \$ CAN	2000 \$ CAN	2600 \$ CAN	Dépend du logiciel utilisé. Entre 1 500 (PhotoModeler) et 15 000 \$ CAN (FotoG)
Avantages	Manipulation très agréable et rapidité d'exécution	Suivre un contact géologique avec le relief Meilleure vision des effets d'ombrage	Suivre les contacts géologiques sur des zones très abruptes, non identifiables par projection verticale	Cartographier dans des zones où le relief est très abrupte Très grande précision

* Ne prend pas en compte les frais d'acquisition des données et le temps d'opérateur

Tableau 9 : Critères comparatifs entre les différentes techniques de photogrammétrie numérique.



8.4 Choix d'une méthode de photogrammétrie numérique suivant le contexte géologique

À la lecture du présent document, il est difficile d'affirmer que telle méthode de photogrammétrie est meilleure qu'une autre. Chacune a ses avantages et ses inconvénients (ou limites) et leur utilisation peut dépendre de nombreux facteurs, comme le coût d'investigation ou le site d'étude (terrain plat / relief accentué) etc. Il devient alors difficile de proposer la meilleure méthode de photogrammétrie à entreprendre pour un géologue. Et il convient de garder toujours à l'esprit que cette technique ne remplacera jamais les travaux sur le terrain.

En région montagneuse et à faible couverture végétale ou forestière, l'imagerie aérienne et l'imagerie terrestre sont très utiles et peuvent même devenir un outil puissant lorsqu'elles sont combinées. L'imagerie aérienne permet une approche plus régionale, à l'inverse de la photogrammétrie terrestre qui apportera des informations complémentaires et plus détaillées sur des zones également difficiles d'accès, comme la région de Moose Mountain. Cependant, certains facteurs peuvent empêcher la collecte de données par photogrammétrie, et notamment la végétation. Le couvert végétal, présent avec abondance le long de la ceinture appalachienne par exemple, ne permet pas de visualiser les éléments structuraux par photographie aérienne ou satellitaire. Dans des zones très abruptes, mais plus localisées, telles les carrières par exemple, l'imagerie aérienne est inutile comme nous l'avons démontré pour les zones de falaise, caractérisant la Formation de Pekisko, à Moose Mountain. Toutefois, la photogrammétrie terrestre serait une très bonne technique pour extraire des mesures structurales le long des parois à des hauteurs trop importantes.

Le prix de l'équipement peut également devenir un frein à l'utilisation de la photogrammétrie. Cependant, il faut garder à l'esprit que cette dernière peut, sous certaines conditions, réduire le temps de travail sur le terrain (préparation et établissement des sites d'échantillonnage avant le début de chaque campagne,) et affiner les résultats déjà recueillis par les méthodes traditionnelles, particulièrement dans des zones inaccessibles.

La photogrammétrie, employée comme technologie de l'information, peut donc apporter de nouvelles connaissances et aider les secteurs de l'industrie minière et pétrolière, les commissions géologiques dans le cadre de l'exploitation des ressources, et contribuer à l'évaluation des risques, dans le cas des instabilités de pente par exemple.

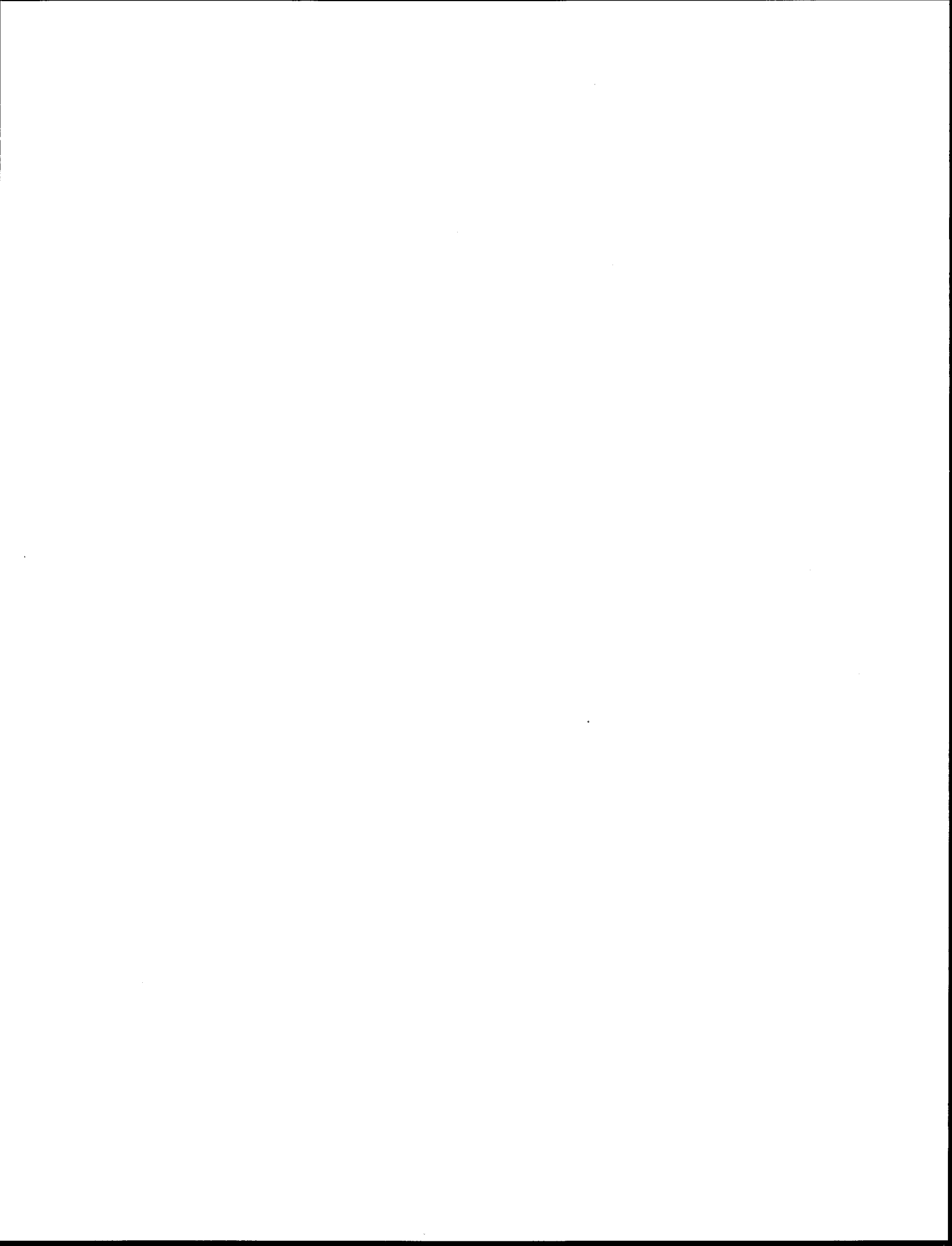
8.5 Résumé et perspectives géologiques

Les quatre techniques de photogrammétrie numérique, présentées dans ce document, ont confirmé leur potentiel d'utilisation pour la cartographie géologique et l'interprétation des éléments structuraux dans des sites inaccessibles. Elles permettront de mieux comprendre le développement des ceintures de plis et chevauchements pour déchiffrer les histoires cinématiques régionales et affiner les modèles d'exploration géologique, comme c'est le cas pour les structures observées à Moose Mountain.

Le projet de recherche mené à Moose Mountain est le premier exemple de liens entre les données collectées sur le terrain d'éléments structuraux complexes, faillés et plissés, et les informations spatiales déduites des orthophotographies numériques (appliquées sur un MNT ou non) et des clichés de photogrammétrie terrestre.

Au Canada, mis à part les photographies aériennes traditionnelles et les cartes topographiques, les méthodes satellitaires et de photogrammétrie terrestre sont généralement peu employées pour la cartographie géologique ; c'est-à-dire les MNT, les orthophotos etc. Ceci continuera à s'accroître à moins que des efforts importants soient faits pour faciliter une intégration de ces techniques. Les progrès considérables réalisés dans le développement d'outils de modélisation et de visualisation des objets en 3-D, aideront le géologue à mieux percevoir et interpréter la géométrie des structures géologiques. Les précisions et les résolutions sans cesse croissante de l'imagerie via des systèmes hautement performants (Star-3i, LIDAR, ...) contribueront également à améliorer les modèles.

La vidéogrammétrie (ou vidéographie numérique géoréférencée) est une autre technologie démontrant un fort potentiel pour ce genre d'application.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agnard, J.P., C. Gravel et P.-A. Gagnon** [1998] : *Realization of a Digital Phototheodolite*. In : International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission V, ISPRS, Okodate, Japon, 2-5 juin 1998, vol. XXXII, Part 5, pp. 498-501.
- Beach, H.H.** [1943] : *Moose Mountain and Morley map-areas, Alberta*. Ottawa, King's Printer, 74 p.
- Berger, Z., T.H. Williams et D.W. Anderson** [1992] : *Geologic stereo mapping of geologic structures with SPOT satellite data*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, U.S.A. , vol. 76, no.1, pp. 101-120.
- Bethesda, M.D.** [1990] : *Protecting natural resources with remote sensing*. ASPRS, Proceedings of the Third Forest Service Remote Sensing Applications Conference, April 9-13, 1990, Tucson, Arizona, 488 p.
- Billoti, F., J.H. Shaw et P.A. Brennan** [2000] : *Quantitative Structural Analysis with Stereoscopic Remote Sensing Imagery*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, U.S.A., vol. 84, no. 6, pp. 727-740.
- Bonneval, H.** [1972] : *Photogrammétrie générale*. IGN, Paris, éd. Eyrolles, tome 1.
- Boulianne, M.** [1998] : *Photogrammétrie fondamentale*. Note de cours, GMT-18102, Faculté de Foresterie et de Géomatique, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 140 p.
- Boulianne, M., L. Pigeon et M. Côté** [1995a] : *Croquis d'accidents routiers réalisés par redressement d'images*. GEOMATICA, vol. 49, no.3, pp. 289-299.
- Boulianne, M., R. Santerre et M.J.V. Zoej** [1995b] : *Photogrammétrie terrestre sans point d'appui*. Geomatica, vol. 49, no.2, pp. 169-178 .
- Breakey E.C.** [1975] : *Sedimentology of the Lower Paleozoic Shelf Slope transition, Lévis, Québec*. Thèse de Maîtrise, McGill University, 190 p.
- Coe, J.A. et E.P. Nelson** [1997] : *Characterization of Fracture Networks Using Close-Range Photogrammetric Mapping and GIS Analysis*. *In* : Fractured Reservoirs - Characterization and Modeling, T.E. Hoak, A.L. Klawitter et P. K. Blomquist (éd.), The Rocky Mountain Association of Geologists, Colorado, U.S.A., pp. 43-55.

- De Gunst, M.** [1996] : *Knowledge-based interpretation of aerial images for updating of road maps*. Nederlandse Commissie voor Geodesie, Delft, no. 44, 184 p.
- De Kemp, E.** [2000] : *3D visualization of structural field data : examples from the Archean Caopatina Formation, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada*. Computer Geosciences, vol. 26, pp. 509-530.
- Deng, G.** [1999] : *Practical testing and evaluating of the EOS PhotoModeler® an off the shelf digital close-range photogrammetric software package*. Rapport, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 93 p.
- Dueholm, K.S.** [1992] : *Geologic photogrammetry using standard small-frame cameras*. *In* : Geological analysis and mapping using multi-model photogrammetry, K.S. Dueholm et A.K. Pedersen (éd.), Greenland Geological Survey, Rapport 156, pp. 7-17.
- Dueholm, K.S. et T. Olsen** [1993a] : *Reservoir analog studies using multimodel photogrammetry : a new tool for the petroleum industry*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 77, pp. 2023-2031.
- Dueholm, K.S., A.A. Garde et A.K. Pedersen** [1993b] : *Preparation of accurate geological and structural maps, cross-sections or block diagrams from colour slides, using multi-model photogrammetry*. Journal of Structural Geology, vol. 15, no. 7, pp. 933-937.
- Dueholm, K.S et C.L. Pillmore** [1989] : *Computer-assisted geologic photogrammetry*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 55, p. 1191-1196.
- Feininger, T., P. St-Julien et A. Bolduc** [1995] : *Géologie pour tous – Québec*. Carte de compilation, Centre géoscientifique de Québec, Commission géologique du Canada et Ministère des ressources naturelles du Canada.
- Fermor, P.** [1999] : *Aspects of the three-dimensional structure of the Alberta Foothills and Front Ranges*. Geological Society of America Bulletin, vol. 111, pp. 317-346.
- FotoGTM** [1999] : *User's Manual*. Vexcel Cie, Boulder, Colorado, U.S.A., 104 p.
- Fryer, J.G.** [1992] : *Recent Developments in Camera Calibration for Close-Range Applications*. *In* : International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission V, ISPRS, Washington, D.C., États-Unis, 2-14 août 1992, vol. XXIX, Part B5, pp. 594-599.

- Gravel, C., C. Larouche et P.-A. Gagnon** [1999] : *Extending Terrestrial Photogrammetry to Surveying Operations Using the CAP System*. ASPRS Annual Conference Proceedings, Portland (Oregon), United States, May 17-21 1999, pp. 918-927.
- Grussenmeyer, P., Drap P., Koehl M. et J.-Y. Blaise** [1999] : *Tiphon and Arpenteur : Simple Photogrammetric software packages for stereoplotting*. ISPRS Comm. V/5 et V/2 International Workshop, Thessaloniki, 7-9 juillet, Grèce, Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing, ISBN 960-431-535-8, pp. 51-57.
- Guillotin, X.** [1997] : *Mise au point d'une méthode photogrammétrique rapide appliquée à l'archéologie*. Thèse de doctorat, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, CNAM, 70 p.
- Huang, Y. D.** [1998] : *Capturing the Third Dimension by Terrestrial Photogrammetry*. GIM International, vol. 12, no. 6, pp. 25-27.
- Kraus, K. et P. Waldhäusl** [1998] : *Manuel de photogrammétrie : principes et procédés fondamentaux*. HERMES, Paris, 416 p.
- Karara, H.M.** [1989] : *Non-Topographic Photogrammetry*. American Society For Photogrammetry and Remote Sensing, Second Edition, Falls Church, Virginie, 445 p.
- Landing, E., A.P. Benus et P.R. Whitney** [1992] : *Early and early Middle Ordovician slope deposition : Shale cycles and sandstones in the New York Promontory and Quebec re-entrant region*. New York Geological Survey Bulletin 474, 40 p.
- Lang, H.R., S.L. Adams, J.E. Conel, B.A. McGuffie, E.D. Paylor et R.E. Walker** [1987] : *Multispectral remote sensing as a stratigraphic and structural tool, Wind Rive Bighorn Basin area, Wyoming*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, U.S.A., vol. 71, pp. 389-402.
- Lang, H.R. et E.D. Paylor** [1994] : *Spectral stratigraphy : remote sensing lithostratigraphic procedures for basin analysis, central Wyoming examples*. Journal of Nonrenewable Resources, Oxford Press, vol. 3, pp. 25-45.

- Larouche, C., J.A.R Blais et J.C. Harrison** [1994] : Digital geological map production with a PC-based photogrammetric stereoplotter. *In* : Proceedings-Canadian Conference on GIS, Ottawa, Ontario, Survey, Mapping and Remote Sensing Sector, Natural Resource Canada and Canadian Institute of Geomatics and the Inter-Agency Committee on Geomatics (éd.), vol.1, pp.549-564.
- Lebel, D. et R. Da Roza** [1999] : *An Innovative Approach Using Digital Photogrammetry to Map Geology in the Porcupine Hills, Southern Alberta, Canada*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 65, no. 3, pp. 281-288.
- Lebel, D., R. Vuitton, C. Deblonde, M.A. Vallée, D. Kirkwood, C.V. Tao, R. Da Roza, J.-S. Marcil et M. Malo** [sous presse] : *Comparison of high-resolution digital photogrammetry methods for geological mapping, Moose Mountain gas field, Alberta*. Geomatica, ACSG, Québec, Canada, 22 p.
- Lebel, D. et D. Kirkwood** [1998] : *Nappes and melanges in the Québec Bellechasse area : Their regional tectonic and stratigraphic significance in the Humber Zone*. Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada, Joint Annual Meeting, Québec 1998, Field Trip A5 Guidebook, 64 p.
- Lebel, D., W. Langenberg et E.W. Mountjoy** [1996] : *Structure of the central Canadian Cordilleran thrust-and-fold belt, Athabasca-Brazeau area, Alberta : a large, complex intercutaneous wedge*. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, vol. 44, no.2, pp. 282-298.
- Lebel, D., G.S. Stockmal, B. Richards, B. Rivard, D. Kirkwood, T. Toutin, C.V. Tao and M. Malo** [2000] : *Geomatics for 3D Geology Exploration : Introduction to the Moose Mountain GEOIDE Project*. Conférence Géomatique 2000, Montréal, 8-10 mars 2000, 10 p.
- Li, X.** [1999] : *Photogrammetric investigation into low-resolution digital camera systems*. Rapport, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, 180 p.

- McGuffie, B.A., L.F. Johnson, R.E. Alley et H.R. Lang** [1989] : *IGIS-computer-aided photogeologic mapping with imaging processing, graphics an CAD/CAM capabilities*. Geobyte, v. 4, no.10, pp. 8-14.
- McMahon, M.J. et C.P. North** [1993] : *Three-dimensional integration of remotely sensed geological data : A methodology for petroleum exploration*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 59, pp.1251-1256.
- Manzer, G. and K. Tiffin** [1997] : *How To Design a Quality Digital Orthophoto*. EOM, vol. 6, no. 12, pp. 33-36.
- Mausel, P.W.** [1995] : *Videography & Color Photography in Resource Assessment*. Proceedings, *15th biennial Workshop, ASPRS*, Department of Geography, Geology and Anthropology, Indiana State University, Terre Haute, Indiana, 1-3 May, 1995, 374 p.
- McMechan, M. E.** [1995] : *Geology, Rocky Mountain Foothills and Front Ranges in Kananaskis Country, Alberta*. Geological Survey of Canada, Map 1865A, scale 1:100 00.
- Mikhail, E.M. and G. Gracie** [1981] : *Analysis and adjustment of survey measurements*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 340 p.
- Moffitt, F.H. and E.M. Mikhail** [1980] : *Photogrammetry*. Harper & Row, New York, 3^{ième} édition, pp.538-553.
- Moller, T., E. Haines et A.K. Peters** [1999] : *Real-Time Rendering*. Natick, MA, U.S.A., ISBN 1-568-81101-2, 482 p.
- Newson, A. and D. Sanderson** [1999] : *Moose Mountain detachment fold, an example of a third generation target in the Alberta Foothills. Exploration targets in the Canadian Rocky Mountain Foothills*. Canadian Society of Petroleum Geologists. 1999 CSPG and Petroleum Society Convention pre-conference field trip no. 4.
- Paradis, S.** [2000] : *L'utilisation d'un vidéorestituteur numérique comme outil de cartographie détaillée (Saguenay, Québec)*. Commission géologique du Canada (Québec), recherche en cours 2000-D13, <http://www.nrcan.gc.ca/gsc/bookstore>, 8p.
- Pillmore, C.L.** [1989] : *Geologic photogrammetry in the U.S. Geological Survey*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 55, pp. 1185-1189.

- Price, R.A.** [1981] : *The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky Mountains*. In : McClay, K.R., and Price, N.J. (éd.), Thrust and nappe tectonics, Geological Society of London, Publication Spéciale no.9, pp. 427-448.
- Richards, B.C., B.L Mamet et E.W. Bamber** [2000] : *Carboniferous Sequence Stratigraphy, Biostratigraphy and Basin Development in the Vicinity of the Bow Corridor, Southwestern Alberta*. Field Trip Guidebook, no. 7, Conférence GéoCanada 2000, 3-5 juin 2000, Calgary, Canada, 182 p.
- Slama, C.C.** [1980] : *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, 4^{ième} édition, Falls Church, Virginie, 1056 p.
- Streilein, A. et M. Niederöst** [1998] : *Reconstruction of the Disentis monastery from high resolution still video imagery with object oriented measurement routines*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXII, Part 5, Hakodate 1998, pp. 271-277.
- Wolf, P.R.** [1980] : *Definitions of terms and symbols used in photogrammetry*. In : Manual of Photogrammetry, C.C. Slama (éd.), American Society of Photogrammetry, 4^{ième} édition, Falls Church, Virginie, pp. 995-1048.
- Wong, K.W. et W.H. Ho** [1986] : *Close-Range Mapping with a Solid State Camera*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, no. 1, pp. 67-74.

Références Internet :

Banque nationale de données topographiques (BNDT). <http://www.ccg.rncan.gc.ca/ext/html/>

Français\produits\bndt\bndt.html

Citipix. http://www.citipix.com/about_citipix/default.htm

Produits Kodak. <http://www.kodak.com/global/en/professional/products/cameras/dcs420/dcs420.shtml>

Projet Moose Mountain. <http://www.inrs.quebec.ca/moose-geoide/>