

7  
Département de géographie et télédétection  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

INTERPRÉTATION STRUCTURALE DES LINÉAMENTS PAR  
TRAITEMENT D'IMAGE SATELLITAIRE : CAS DES SOUS-  
PROVINCES D'ABITIBI ET D'OPATICA (QUÉBEC)

Coulibaly Lacina, 1969 -

I-1462

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de maîtrise ès  
science en télédétection

Décembre 1996

BIBLIOTHÈQUE U.S.

## RÉSUMÉ

Plusieurs subdivisions de la Province structurale du Lac Supérieur en sous-provinces ont été proposées au cours des trente dernières années d'après les relations de terrain (contraste lithologique, métamorphique et structural), les datations absolues et l'interprétation de données géophysiques. La reconnaissance et l'interprétation des limites entre sous-provinces varient énormément en fonction de l'évolution des connaissances du territoire.

Cette étude présente les résultats de l'interprétation des linéaments des sous-provinces de l'Abitibi et d'Opatoca extraits par des méthodes de traitement d'image satellitaire et confrontés aux données géoscientifiques dans un système d'information géographique (SIG). L'approche méthodologique simple, basée sur le rehaussement et le filtrage directionnel de l'image Landsat-5 TM, a permis d'établir la carte de linéaments de la zone d'étude. L'analyse statistique de cette carte à l'aide de rosaces directionnelles, ainsi que l'analyse spatiale, ont permis de déceler une différence d'apparence morphologique au niveau du patron de linéaments de l'image. En effet, le secteur sud de la carte montre une faible densité de linéaments et présente une tendance EO dans leur orientation. Alors que, le centre et le nord de la zone d'étude, contrairement au sud, présentent une forte densité de linéaments et d'entrecroisements avec cette fois, une tendance NE-SO. Ceci a permis la subdivision du territoire en deux secteurs tectoniques. La confrontation des résultats aux données géoscientifiques (structurales, lithologiques, géochimiques et gîtes minéraux) dans un SIG, permet de confirmer cette différence d'apparence morphologique et la subdivision du territoire en deux secteurs tectoniques correspondant sur le terrain aux sous-provinces de l'Abitibi au sud et d'Opatoca au nord et de localiser par la même occasion la limite les séparant.

## ABSTRACT

Over the past 30 years, the Lake Superior Structural Province has been subdivided into subprovinces according to terrain relationships (lithological, metamorphic and structural contrasts), absolute dating, and geophysical data interpretation. The identification and interpretation of the boundaries between subprovinces varies widely following the increased knowledge of the region.

The following study presents the results of the interpretation of the lineaments within the Abitibi and Opatica Subprovinces. These results were extracted from processed satellite images and compared to geoscientific data in a geographic information system (GIS). The simple methodological approach, based on the enhancement and directional filtering of Landsat-5 TM images, helped establish the lineament map of the study area. Statistical analysis of the map using directional indicators, as well as a spatial analysis, helped detect morphological differences in the lineament patterns. The southern sector of the map shows a low density of lineaments and an E-W trend. The northern and central sectors of the map show a high density of lineaments and criss-crossings with a NE-SW trend. Accordingly, the terrain can be divided into two tectonic sectors. The comparison of the results with the geoscientific data (structural, lithological, geochemical and mineral sites) in a GIS, confirms the morphological difference and the territorial subdivision into two tectonic sectors corresponding to the Abitibi Subprovince in the south and Opatica Subprovince in the north, and also helped identify the boundary separating them.

## REMERCIEMENTS

Je remercie tous les confrères du CARTEL qui m'ont apporté, tant au plan professionnel qu'humain, de grandes motivations pour réaliser ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent particulièrement à Q. Hugh J. Gwyn, directeur du mémoire qui a témoigné d'un intérêt constant tout au long de mes travaux de recherche.

Je ne passe pas sous silence le soutien que m'ont apporté : le professeur Goze Bertin Benié pour ses conseils et remarques, Jean Daoust, Sylvain Deslandes, Daniel Bossé, Nguyen Minh-N et Paul André Chassé.

Finalement, je remercie mes amis et frères qui m'ont apporté leur soutien moral et personnel à savoir : Traoré Maly, Ouattara Tidiane, Sibiry Traoré, Diané Aboubacar et Akéboué Stanislas.

## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
ABSTRACT.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ANNEXES.....	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	3
1.2 Objectifs.....	5
1.3 Hypothèses.....	6
CHAPITRE 2 : SITE D'ÉTUDE.....	7
2.1 Cadre géographique.....	7
2.2 Cadre géologique.....	7
CHAPITRE 3 : DONNÉES ET PRÉTRAITEMENTS.....	10
3.1 Données utilisées.....	10
3.1.1 Données satellitaires.....	10
3.1.2 Données géoscientifiques.....	13
3.2 Correction géométrique.....	14
CHAPITRE 4 : TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES LINÉAMENTS.....	15
4.1 Analyse en composantes principales.....	15
4.2 Rehaussement des linéaments par filtrage.....	18
4.2.1 Filtrage spatial.....	18
4.2.2 Filtrage directionnel de SOBEL.....	19
4.3 Segmentation d'histogramme.....	22
4.4 Création d'image binaire de linéaments.....	27
4.5 Cartographie des linéaments.....	27
CHAPITRE 5 : RÉSULTATS.....	30
5.1 Observation et analyse statistique des linéaments.....	30
5.1.1 Analyse des linéaments de l'image entière.....	31
5.1.2 Découpage de l'image en secteurs tectoniques.....	36
5.1.2.1 Linéaments du secteur Sud.....	38
5.1.2.2 Linéaments du secteur Nord.....	39

5.2	Analyse spatiale des linéaments .....	40
5.2.1	Variation du nombre de linéaments.....	40
5.2.2	Variation du nombre d'entrecroisements .....	40
5.3	Confrontation des résultats avec les données géoscientifiques .....	44
5.3.1	Confrontation avec les données géologiques structurales .....	46
5.3.2	Confrontation avec les données lithostratigraphiques.....	51
5.3.3	Confrontation avec les données géochimiques.....	52
5.3.4	Confrontation avec les données de gîtes minéraux .....	56
CHAPITRE 6 : INTERPRÉTATION ET DISCUSSION SUR LA FRACTURATION .....		59
6.1	Échelle locale .....	59
6.2	Échelle régionale .....	64
CHAPITRE 7 : CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		66
7.1	Conclusion.....	66
7.2	Recommandations .....	68
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		70

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Expression d'un linéament en surface.....	3
Figure 2	Localisation de la zone d'étude.....	8
Figure 3	Image en composé coloré des bandes 4-5-3.....	12
Figure 4	Image en composé coloré des trois premières composantes principales.....	17
Figure 5	Méthodologie de création d'une image filtrée avec l'opérateur de Sobel.....	21
Figure 6	Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel NO.....	23
Figure 7	Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel O.....	24
Figure 8	Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel SO.....	25
Figure 9	Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel S.....	26
Figure 10	Carte de synthèse des linéaments.....	29
Figure 11	Rosaces directionnelles de la carte de synthèse des linéaments.....	32
Figure 12	Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement NO.....	33
Figure 13	Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement S.....	34
Figure 14	Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement O.....	35
Figure 15	Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement SO.....	35
Figure 16	Carte de découpage de l'image en secteurs tectoniques.....	37
Figure 17	Rosaces directionnelles des secteurs Sud et Nord.....	38
Figure 18	Grille constituée de cellules de 4 km x 4 km de côté superposée à la carte de synthèse de linéaments.....	41
Figure 19	Représentation 3 D de la variation du nombre de linéament par cellules.....	42
Figure 20	Représentation 3 D de la variation du nombre d'entrecroisements par cellules....	43
Figure 21	Organigramme de la confrontation des données multisources dans un SIG.....	45
Figure 22	Carte géologique de la région du lac Assinica.....	47
Figure 23	Carte des linéaments géologiques de la région du lac Assinica.....	48

Figure 24	Carte des linéaments géologiques et des linéaments extraits de l'image Landsat-TM.....	50
Figure 25	Carte de localisation des sites géochimiques.....	54
Figure 26	Carte des sites géochimiques et des linéaments extraits de l'image Landsat-TM.....	55
Figure 27	Carte de localisation des gîtes minéraux.....	57
Figure 28	Carte des gîtes minéraux et des linéaments extraits de l'image Landsat-TM.....	58

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1	Données géoscientifiques .....	13
Tableau 2	Résultats des calculs statistiques des composantes principales.....	16
Tableau 3	Structure des filtres de Sobel 5 x 5 .....	20
Tableau 4	Caractéristiques des cartes de linéaments .....	28
Tableau 5	Comparaison à l'échelle locale de l'orientation et de la fréquence des linéaments de la carte géologique et d'image satellitaire .....	49

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1	Applications et propriétés des bandes du satellite Landsat-5 TM en géologie .....	79
Annexe 2	Filtres spatiaux 3 x 3 de rehaussement de linéaments .....	81
Annexe 3	Histogrammes des images filtrées avant et après la segmentation.....	83
Annexe 4	Images binaires de linéaments.....	88
Annexe 5	Cartes des linéaments issues des rehaussements et filtrages directionnels de Sobel.....	93
Annexe 6	Calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation.....	96
Annexe 7	Représentation graphique de l'orientation générale et préférentielle des linéaments à l'échelle locale.....	101
Annexe 8	Principaux paramètres statistiques de base des éléments géochimiques de la région d'étude .....	104

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

Au cours de l'évolution géologique, l'écorce terrestre a subi des déplacements complexes dans diverses directions. Les roches qui la composent sont comprimées en plis, se chevauchent les unes sur les autres, subissent des ruptures, etc. Il en résulte que le relief de la surface terrestre change avec la formation de montagnes et de dépressions profondes. Aussi, les renseignements les plus exhaustifs sur le signe, la durée et la vitesse des mouvements tectoniques peuvent être fournis par l'analyse des données géologiques. Les plus importants parmi ces derniers sont apportés d'une part, par la lithologie et d'autre part, par les linéaments géologiques (Milnitchouk et Arabadji, 1979). C'est sur ces linéaments que portera notre étude. Leur formation est reliée aux forces tectoniques qui contrôlent la dynamique interne de notre planète. Lorsque ces forces entrent en activité d'une manière intense, des mouvements tectoniques se créent entre l'asthénosphère et la lithosphère. Et, d'après le domaine de leur manifestation, on distinguera les mouvements de surface (de couverture) associés aux processus qui se déroulent dans la gaine sédimentaire (par exemple, plis diapirs salifères), les mouvements de l'écorce, qui interviennent pratiquement dans tout le volume de l'écorce solide, et les mouvements profonds, conditionnés par les processus qui siègent dans le manteau supérieur. Il en résulte des mouvements plicatifs, de blocs, de massifs, des séismes, des fractures, etc.

Selon O'Leary et al. (1976), un linéament est un trait linéaire simple ou composé, décelé en surface, dont les différentes parties, alignées selon une droite ou une courbe, ressortent distinctement de leur entourage et reflètent possiblement un phénomène engendré sous la surface. Ces linéaments s'associent à des éléments structuraux comme les failles, les fractures, les axes de plissements et les contacts lithologiques. Ils se traduisent par des dépressions

topographiques, par le réseau hydrographique et par des anomalies de végétation (Yatabe and Howarth, 1984; Soesilo and Hoppin, 1986) (figure 1).

Ce projet d'étude vise donc à approfondir davantage les connaissances sur les linéaments à travers leur comportement spatial. Toutefois, leur analyse et leur cartographie pour des fins de recherches géologiques ou minières est complexe (localisation, techniques de détection). Dans le cadre de ce projet, nous aborderons l'étude des linéaments en quatre grandes étapes :

1 - Dans une première étape, nous procéderons à la localisation et à l'extraction des linéaments à partir de techniques de traitements d'image (rehaussement d'image à l'aide de composé coloré et d'analyse en composantes principales, filtrage d'image à l'aide de filtres directionnels de Sobel  $5 \times 5$  et de filtres spatiaux  $3 \times 3$  et création d'images binaires). Ceci permettra de tracer et d'établir une carte de linéaments de la zone d'étude.

2 - Dans une deuxième étape, nous procéderons d'une part, à l'analyse statistique des linéaments à l'aide de rosaces directionnelles de  $10^\circ$  d'intervalle et d'autre part, à l'analyse spatiale en subdivisant la zone d'étude en cellules de  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  de côté. Ceci permettra de déterminer les orientations structurales, la densité de fracturation et les variations spatiales des linéaments par cellules (variations du nombre de linéaments et du nombre d'entrecroisements par cellules).

3 - Dans une troisième étape, nous procéderons à la confrontation des résultats aux données géoscientifiques existantes (structurales, lithostratigraphiques, géochimiques, et gîtes minéraux) dans un SIG. Ceci permettra d'une part, l'identification des linéaments déjà connus et, d'autre part, l'interprétation des linéaments nouveaux et de faire un lien géologique avec les données structurales de terrain.

4 - Dans la quatrième étape, nous procéderons enfin à l'interprétation des résultats et à la discussion sur la fracturation.

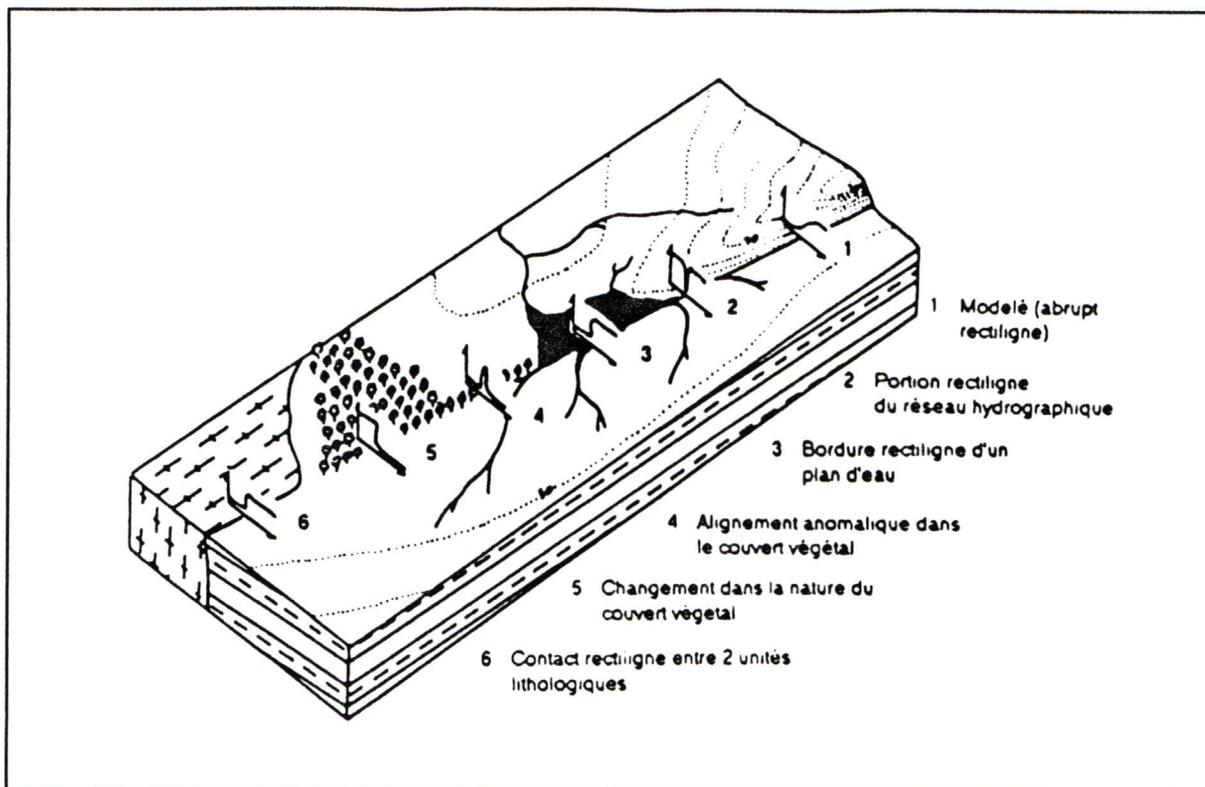


Figure 1. Expression d'un linéament en surface (tiré de Fraipont et Hirsch, 1984)

## 1.1 PROBLÉMATIQUE

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet Lithoprobe qui a pour objectif d'étudier la structure interne de la croûte terrestre et sa stratification sur 30 à 35 km de profondeur. Le projet Lithoprobe nécessite des cartes structurales rigoureuses à grandes échelles, tant lors des travaux de reconnaissance (définition des transects géophysiques) que lors de l'interprétation des profils sismiques. Les travaux antérieurs montrent qu'il existe une relation entre les indices de surface (failles) et les traces de la géologie sous-jacente (Scanvic, 1981; Yésou et Gwyn, 1988). En effet, une faille en surface se projette parfois jusqu'à 20 km sous le sol et est déviée en profondeur à cause de la réfraction. L'étude de ces failles en surface sur plusieurs dizaines de kilomètres peut donc aider à comprendre certains phénomènes géologiques de profondeur.

Cependant, l'étude et la cartographie des linéaments géologiques, sources d'informations sur l'évolution structurale de la région, pose un réel problème à cause de la distribution, parfois sporadique des affleurements rocheux, de la couverture végétale qui les couvre (moins de 5% des affleurements sont perceptibles) et de l'altération superficielle de la surface exposée des affleurements. Par ailleurs, les méthodes de cartographie traditionnelle par photographie aérienne ne facilitent pas une étude précise des structures géologiques sur de grandes superficies.

L'étude et la cartographie des linéaments nécessitent d'autres sources de données : géophysiques (aéromagnétiques, gravimétriques, résistivité), géochimiques, géologiques (stratigraphiques, lithologiques, structurales), hydrogéologiques, topographiques, dont la collecte sur le terrain est relativement lente. Dans la plupart des cas, ces données sont sous-utilisées, à cause de la grande quantité et de la complexité des données disponibles d'une part, et d'autre part du manque de méthodes d'analyse systématique permettant de les intégrer pour en tirer le maximum d'informations. Ce projet s'adresse donc au problème central de l'étude et de la cartographie des linéaments à partir des données géoscientifiques. À savoir : d'une part, comment extraire d'une façon systématique et efficace les linéaments, et d'autre part, comment intégrer les données multisources pour mener à bien ce projet .

De nombreuses études ont montré que la télédétection, de par le caractère synoptique des images satellitaires, a révélé l'abondance des structures linéamentaires et amélioré de façon significative les connaissances sur la localisation des zones à potentialité minière (Howan and Welanfer, 1973; Pouliot et Gwyn, 1987; Deslandes, 1989).

La perception des linéaments est d'autant plus accentuée lorsque l'élévation solaire est faible (Sabins, 1986). Les travaux de Drury (1986), et Singhroy et al. (1993) démontrent que les éléments linéaires d'orientation perpendiculaire à la source d'éclairage sont très bien rehaussés

alors que ceux situés à un angle de  $\pm 20^\circ$  de cette même source n'apparaissent pas sur l'image. Le choix d'une méthode de rehaussement des linéaments doit donc tenir compte de sa capacité à rehausser les hautes fréquences spatiales associées aux linéaments et cela dans toutes les directions, même celles qui sont très peu privilégiées par la source d'éclairage. A cette fin, les filtres directionnels se sont avérés depuis longtemps comme étant des outils efficaces (Gillespie, 1976; Seidman, 1972). Parmi les filtres directionnels, le filtre de Sobel offre la possibilité de rehausser les linéaments dans les directions autres que celles du rehaussement préférentiel en introduisant des attributs directionnels dans le processus de filtrage (Deslande et Gwyn, 1991; Saint-Jean, 1992).

L'utilisation des images satellitaires en géologie nécessite une approche particulière axée entre autre sur l'étude des linéaments. Le recours à la télédétection, assistée par des méthodes d'analyse numérique d'images, couplée aux données géoscientifiques intégrées dans un système d'information géographique, permettra d'apporter de nouvelles méthodes d'applications susceptibles de valider ou d'améliorer le modèle géologique existant.

## **1.2 OBJECTIFS**

L'objectif principal de cette étude est d'interpréter une carte de linéaments de la région du lac Assinica extraite par des méthodes de traitement et d'analyse d'image Landsat-TM.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- adapter et utiliser des techniques d'extraction des structures linéaires dans une région à couverture végétale dense et à relief peu marqué;

- développer la méthodologie de confrontation de données multisources dans un système d'information géographique à partir des technologies existantes;
- produire une carte de linéaments de la région;
- étudier les caractéristiques spatiales des linéaments à partir d'une image satellitaire.

### **1.3 HYPOTHÈSES**

Deux hypothèses principales sont sous-jacentes à ce projet :

- 1 - l'étude du comportement spatial des failles (longueurs, orientations, densités) à partir d'une image satellite nous informe sur leur origine, leur signification géologique, structurale et leur incidence sur la minéralisation;
- 2 - les techniques de la télédétection améliorent la localisation des structures géologiques et permettent la cartographie des linéaments de façon raffinée et précise.

## CHAPITRE 2

### SITE D'ÉTUDE

#### 2.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE

La zone d'étude se situe dans la région du lac Assinica, près de Chibougamau, en Abitibi (Québec). Elle se trouve délimitée par les latitudes  $49^{\circ} 47' N$  et  $51^{\circ} 12' N$ , et par les longitudes  $74^{\circ} W$  et  $75^{\circ} 50' W$  (figure 2). Elle est couverte par les feuillets topographiques 32G, 32J et 32O à l'échelle de 1/ 250 000. La surface de la région est dentelée de crêtes rocheuses discontinues, qui ont une direction est-nord-est (Gillett, 1966). Très peu accidentée, elle présente un relief peu marqué, variant de 120 à 370 m d'altitude. Le point culminant se trouve à l'est du Lac Opataca, à une altitude d'environ 600 m.

La région se situe dans le bassin-versant de la rivière Broadback. Le réseau hydrographique est orienté nord-est. Il est formé d'un ensemble de rivières et de lacs dont les plus importants sont : le lac Assinica, le lac Opataca, le lac Opémisca, le lac Troilus, le lac Frotet, la rivière Broadback et la rivière Chibougamau. La végétation est très importante (peuplements de résineux et pins) puisque les aires d'affleurements rocheux ne dépassent pas 5%.

#### 2.2 CADRE GÉOLOGIQUE

On note une concordance entre la géologie et les grands traits topographiques de la région. Ainsi, des crêtes discontinues coïncident avec deux grandes bandes de roches métavolcaniques qui traversent la partie centrale en direction générale est-ouest de même que la partie sud de la

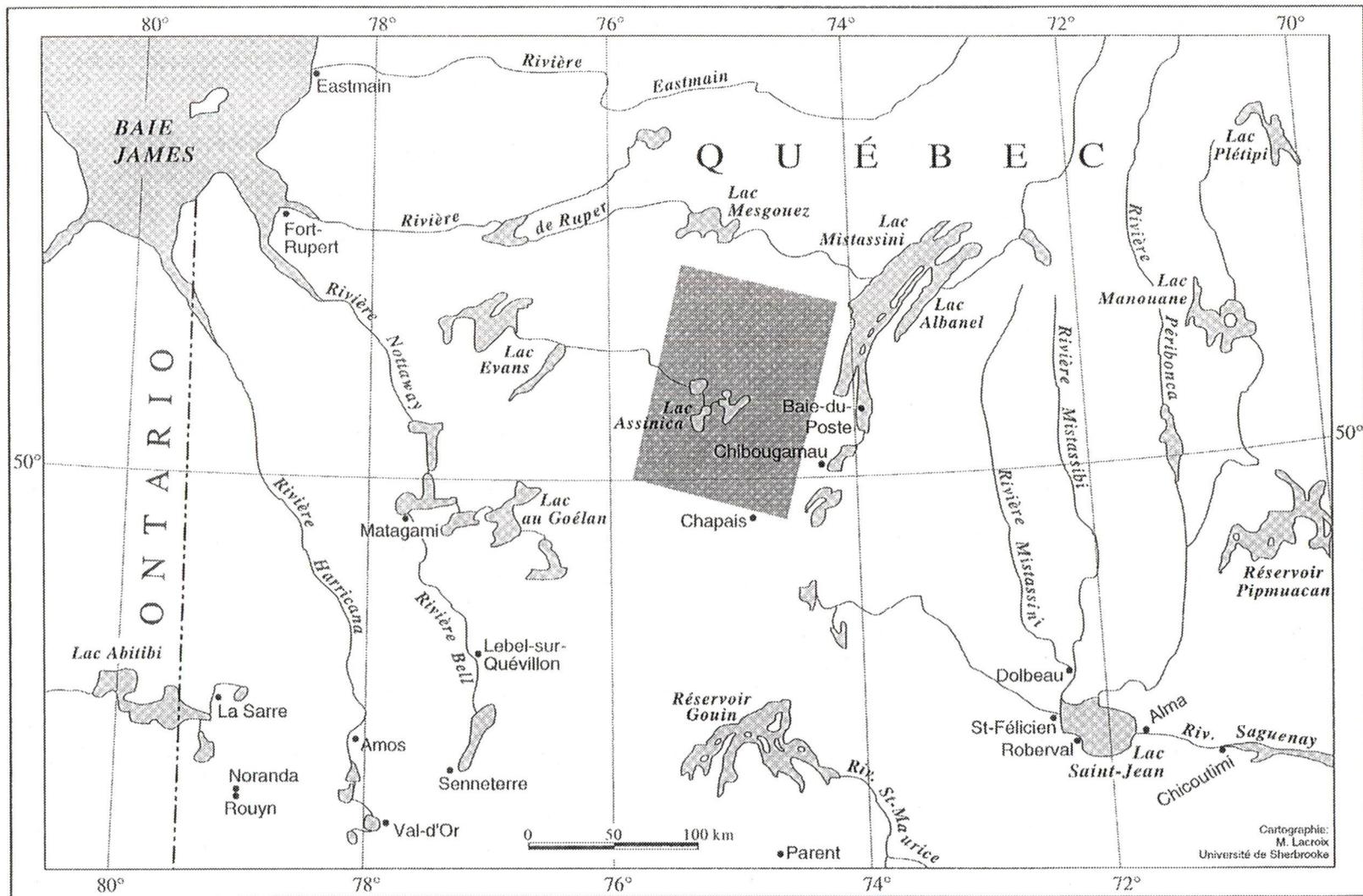


Figure 2. Localisation de la zone d'étude

région. Le commandement de ces crêtes, formées de roches métasédimentaires, est en moyenne à peu près de 150 m au-dessus du niveau des basses terres environnantes. Toutes les roches consolidées de la région datent de l'Archéen (Précambrien). Les unités lithologiques sont essentiellement constituées d'assemblages volcano-sédimentaires recoupés par des intrusions ultramafiques à felsiques et d'importantes zones de gneiss. Ces assemblages ont été métamorphisés au faciès schiste vert ou, plus rarement au faciès amphibolite (Gobeil et Racicot, 1983).

La tectonique de la région laisse voir un immense synclinal orienté est-ouest avec une série de plissements presque isoclinaux dans la bande volcano-sédimentaire près du lac Assinica et des synclinaux et anticlinaux près de la région de Chibougamau (Daigneault et al., 1983). Plusieurs failles ont été localisées par les travaux antérieurs à travers la région :

- dans les zones volcano-sédimentaires au sud, on note la présence de grandes failles obliques de directions NE à NNE comme la faille du Lac Gwillim (Daigneault et al., 1990);
- des failles importantes de direction EO telle la faille du Lac Sauvage sont également soulignées dans cette même zone par les mêmes auteurs;
- des failles NS au nord de Chibougamau sont bien développées dans le complexe de Cumming et les roches volcaniques;
- près de la limite est de la région, on note également l'existence d'une faille de direction NNE;
- plusieurs failles directionnelles sont cartographiées dans le synclinal de Chibougamau (Gobeil et Racicot, 1983);
- dans le nord de la région, on note une faille NNE à rejet senestre localisée au nord-est du Lac Assinica (Gillet, 1966; Simard, 1987);
- une faille ductile EO et des failles NNE à NO apparaissent dans le domaine des Lacs Troilus et Frotet plus au nord (Simard, 1987).

## CHAPITRE 3

### DONNÉES ET PRÉTRAITEMENTS

#### 3.1 DONNÉES UTILISÉES

##### 3.1.1 Données satellitaires

La détection des linéaments sur des images satellitaires peut être influencée par certains facteurs d'ordre climatique, phénologique, hydrique ainsi que par la source d'éclairement au moment de l'acquisition des données. Il faut également noter que la qualité visuelle d'une image dépend des bandes spectrales utilisées, de la date de prise de vue et de l'échelle (Tanguay et Seuthé, 1983). À cela, il faut ajouter l'étalonnage du capteur, les effets atmosphériques, et la géométrie de visée dont nous avons tenu compte.

Les données utilisées proviennent du satellite Landsat-5 TM dont la diversité des canaux fournit à l'interprète une multitude d'informations à manipuler (7 bandes spectrales). L'image utilisée a été prise le 4 Juillet 1985 à 10 heures et l'éclairement solaire provenait du sud-est. Le mois de juillet correspond à la période où l'activité végétale est développée, et où la structure du socle influence beaucoup la végétation. Le rehaussement des linéaments est donc plus aisé. De plus, les données Landsat présentent l'avantage de bien faire ressortir les linéaments à cause de la basse valeur de l'angle solaire, de la suppression des détails spatiaux gênants et la couverture régionale (Sabins, 1986).

Les bandes 3, 4 et 5 ont été choisies pour former le composé coloré 4-5-3 (RVB) permettant une étude plus aisée des linéaments car elles mettent bien en évidence les ombrages, qui définissent

la topographie, et le réseau de drainage souvent contrôlé par les structures géologiques (figure3). Les applications et propriétés de ces différentes bandes sont données dans l' annexe 1. Sur la figure 3, les surfaces en vert foncé correspondent à des résineux jeunes, le vert clair à des résineux en régénération et le vert bleuâtre à des résineux mûrs. Les surfaces en rouge correspondent à des pins (pinède à pin blanc et gris), tandis que les parcelles roses pâles et jaunes correspondent à des coupes récentes et des brûlis. Les traits qui traversent l'image de haut en bas vers la gauche, correspondent à des lignes électriques. Les différentes surfaces noires à travers toute l'image représentent le réseau hydrographique (lacs, rivières etc.)

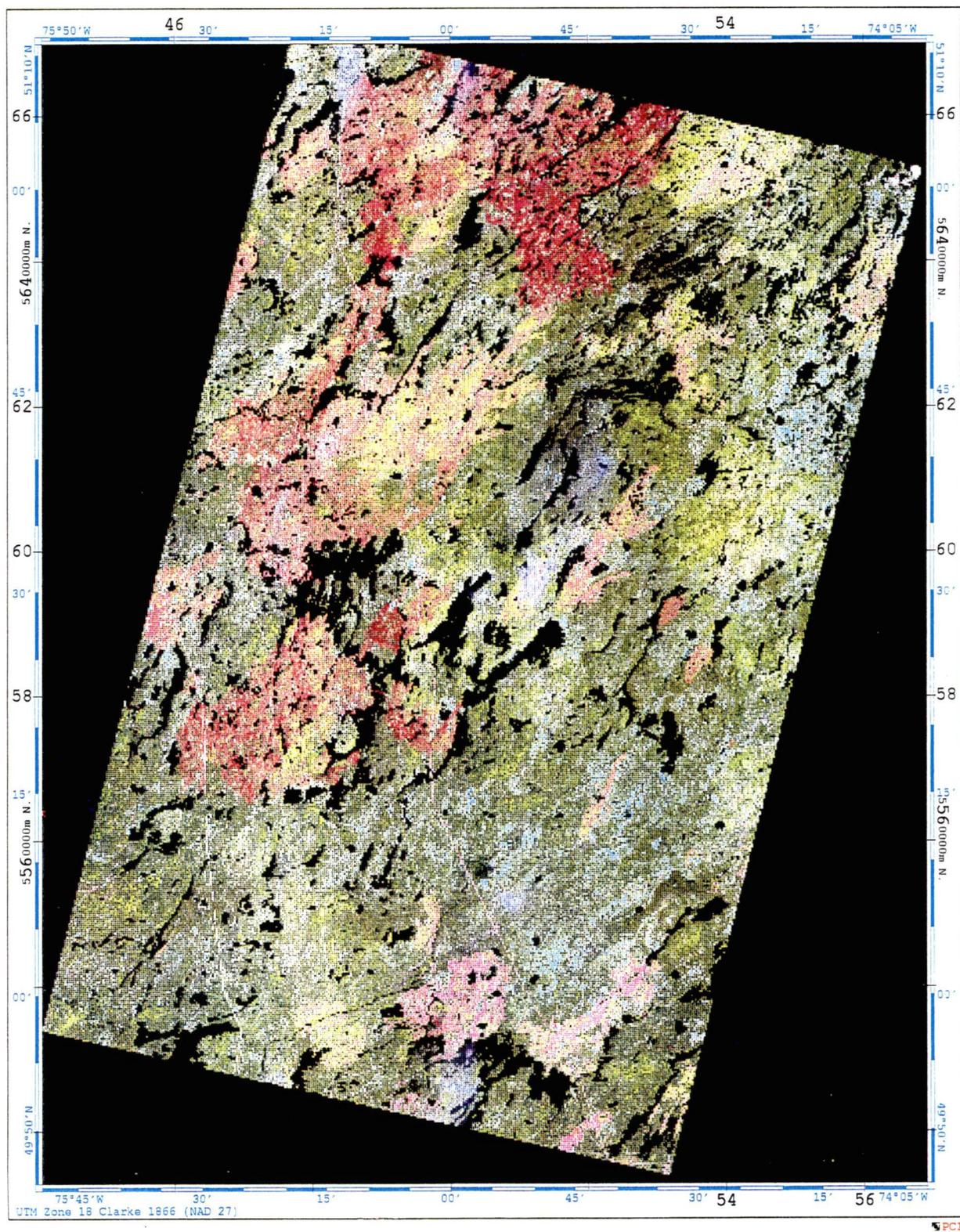


Figure 3. Image en composé coloré des bandes 4-5-3

### 3.1.2 Données géoscientifiques

Les données géoscientifiques utilisées comprennent les données géologiques (structurales, lithostratigraphiques, gîtes minéraux), géochimiques et topographiques de la région. Ces données sont sous des formes et supports différents (tableau 1).

Tableau 1. Données géoscientifiques

Types de données	Support	Caractéristiques
Géochimique	Numérique	* Analyse de sédiments de ruisseaux * Analyse de 6 éléments: Cu, Zn, Pb, Ni, Au, Ag
Topographique	Analogique	* Carte topographique à l'échelle 1/ 250 000 et 1/ 50 000 . feuillet de Chibougamau . feuillet du lac Assinica . feuillet du lac Mesgouez
Géologique * gîtes minéraux * lithostratigraphique * structurale	Analogique	* Cartes de gîtes minéraux au 1/ 250 000 . feuillet de Chibougamau . feuillet du lac Assinica . feuillet du lac Mesgouez

### 3.2 CORRECTION GÉOMÉTRIQUE

Au cours de l'enregistrement des images par les capteurs, celles-ci sont sujettes à des déformations causées par la courbure de la terre, la variation d'altitude du sol, la réfraction atmosphérique, les erreurs des systèmes de mesure et les mouvements de la plate-forme (Bonn, 1992). Il est donc nécessaire de procéder à une correction géométrique afin de ramener l'image à une réalité planimétrique.

Nous avons effectué une correction géométrique d'image-à-carte, c'est à dire par calage de l'image aux feuillets topographiques au 1/ 50 000 couvrant la région de Chibougamau et les lacs Assinica et Mesgouez. La méthode consiste à choisir une série de points de référence sur la carte topographique. Les intersections de routes, de ponts, les cours d'eaux et les bordures de lacs s'avèrent d'excellents points de contrôle. Nous avons sélectionné 30 points uniformément répartis sur l'image. L'acquisition de ces points de contrôle communs aux cartes et à l'image est faite via une table de numérisation qui enregistre de façon automatique les coordonnées UTM.

L'équation de transfert est calculée à partir des points de contrôle, et elle détermine la translation que chaque point devra subir afin de ramener l'image à la réalité cartographique. Une transformation basée sur une équation polynomiale du second degré a été effectuée, donnant une valeur résiduelle de 1 pixel. Cette valeur résiduelle globale est considérée comme acceptable, n'affectant que très peu les résultats. Un rééchantillonnage à la taille de 30 m par 30 m a été effectué à l'aide d'un algorithme de calcul faisant une interpolation bilinéaire prenant en compte les quatre pixels les plus proches du pixel central. La valeur du pixel est donnée par une moyenne pondérée des quatre voisins immédiats autour du point transformé.

## CHAPITRE 4

### TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES LINÉAMENTS

#### 4.1 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

L'analyse en composantes principales est une technique efficace pour accentuer une image multispectrale pour des fins d'interprétation géologique (Biémi et al, 1991). Elle permet de réduire l'information contenue dans plusieurs bandes, parfois hautement corrélées (d'où redondance de l'information) en un nombre plus restreint de composantes. Celles-ci représentent généralement jusqu'à 97% de la variance totale de l'ensemble des données originales (Deslandes, 1989). Parfois l'information comprise dans 5 ou 6 bandes est réduite par l'analyse en composantes principales en seulement 3 composantes. Cette analyse permet, entre autres, de créer des composés colorés des trois premières composantes qui constituent un excellent produit d'interprétation visuelle, augmentant ainsi le contraste entre les divers objets au sol.

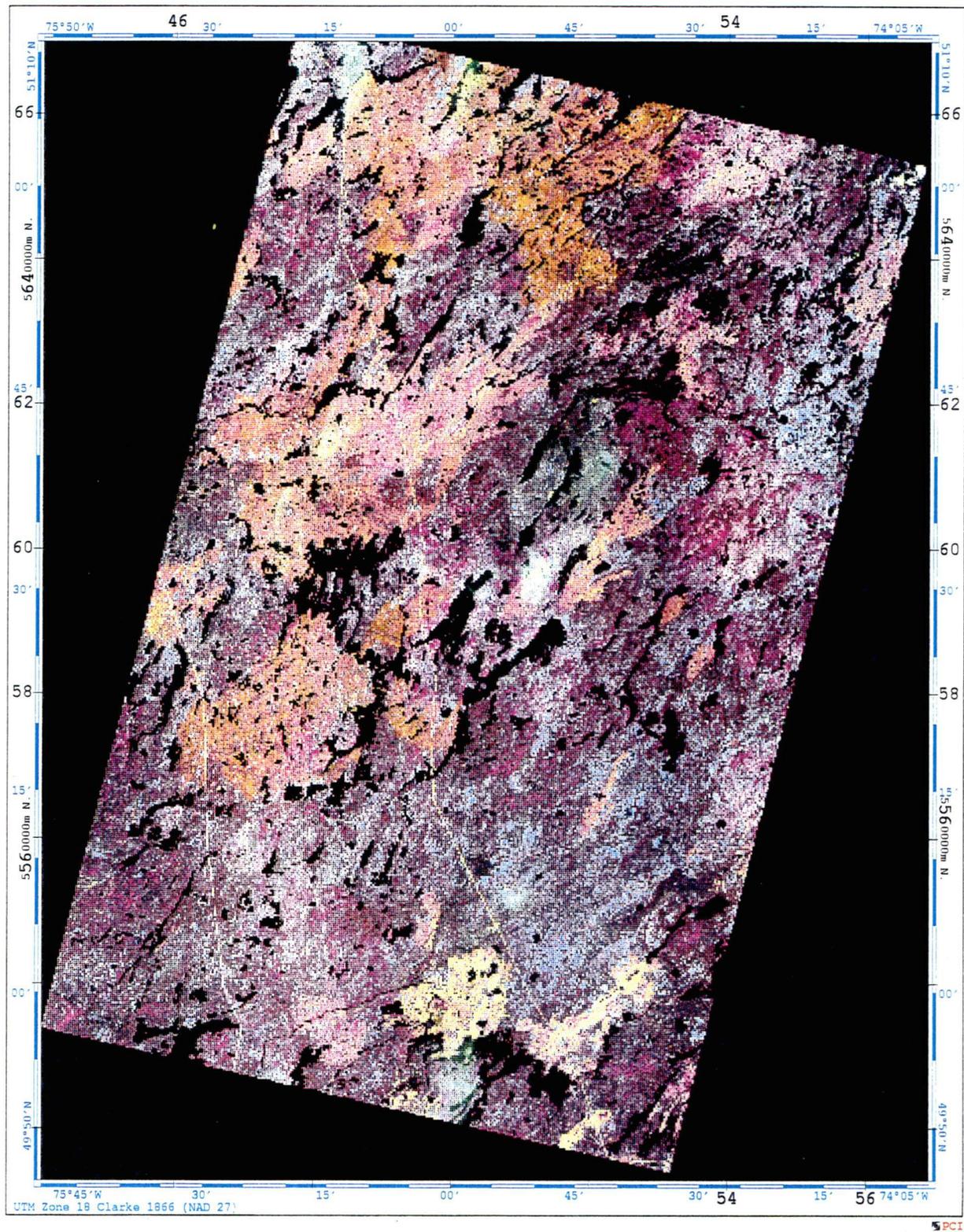
Nous avons donc calculé les composantes principales à partir de 6 bandes spectrales TM. La bande thermique TM6, compte tenu de sa résolution spatiale de 120 m, a été exclue parce que sa résolution est inférieure à celle des autres bandes (30 m). Les calculs statistiques des composantes principales montrent que les trois premières composantes représentent près de 99% de la variance totale de l'ensemble des 6 bandes (tableau 2).

Les trois premières composantes sont par la suite affichées respectivement dans le rouge, le vert et le bleu pour créer un composé coloré qui sera par la suite rehaussé par des fonctions linéaires permettant d'augmenter le contraste. L'image en composé coloré des trois composantes principales est représentée à la figure 4. L'image obtenue à l'aide de composé coloré des bandes

4-5-3 de même que celle résultant de l'analyse en composantes principales, seront par la suite utilisées conjointement avec les images filtrées et binaires pour la localisation et l'extraction des linéaments.

Tableau 2 . Résultats des calculs statistiques des composantes principales.

Composantes principales	Valeur-propre	Ecart-type	pourcentage d'information
1er	1250,06	35,35	86,42
2e	115,88	10,76	8,01
3e	71,85	8,47	4,97
4e	5,74	2,39	0,40
5e	2,03	1,42	0,14
6e	0,91	0,95	0,06



## 4.2 REHAUSSEMENT DES LINÉAMENTS PAR FILTRAGE

### 4.2.1 Filtrage spatial

Le filtrage est une technique visant à éliminer le bruit contenu dans les données, le bruit étant défini comme toute donnée non utile qui masque l'information. En géologie, on s'intéresse à la découverte dans l'image, des discontinuités dans les textures comme par exemple les contours de zones relativement homogènes, ce qui peut révéler la présence de failles ou de fractures. Le rehaussement des linéaments revient à mettre en évidence les fortes transitions de réflectance dans l'image et les hautes fréquences spatiales qui leur sont généralement associées.

Le filtrage spatial par convolution permet de modifier la valeur numérique d'un pixel selon sa relation avec les valeurs des pixels voisins. Le niveau de gris de chaque pixel à l'intérieur de la fenêtre mobile sur l'image est multipliée par la valeur correspondante de la matrice de convolution. La valeur finale attribuée au pixel central représente la somme de ces produits divisée par le nombre d'éléments de la fenêtre. L'image résultante provient de la convolution de la fenêtre sur l'image entière (Moore, 1986).

La dimension de la fenêtre, en pixels, est directement proportionnelle à l'ordre de grandeur des changements spatiaux reliés aux linéaments à détecter. Plusieurs auteurs tels que Hornsby et Bruce (1985), ont retenu des fenêtres de 5 x 5 sur les images Landsat-TM dont la résolution au sol est de 30 m x 30 m pour des études structurales à l'échelle régionale. Compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et l'ordre de grandeur des structures, nous retiendrons une fenêtre de 5 x 5 pour détecter les linéaments majeurs et une fenêtre de 3 x 3 pour générer les structures plus fines. Les filtres 3 x 3 utilisés sont donnés à l'annexe 2.

#### 4.2.2 Filtre directionnel de SOBEL

Les filtres directionnels améliorent la perception des linéaments en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image comme si elle était éclairée par une lumière rasante (Marion, 1987). De plus, ce type de filtre permet de rehausser les linéaments qui ne sont pas favorisés par la source d'éclairage (Drury, 1986).

Le rehaussement des linéaments a donc été effectué à partir de filtres directionnels utilisant l'opérateur de Sobel. L'image utilisée pour les filtrages est celle de la bande 4 qui se trouve dans la zone du proche infrarouge permettant ainsi de voir les détails structuraux importants (Shupe and Akha, 1989). Le filtre de Sobel est une variété plus sélective de filtres directionnels où les valeurs de la matrice de convolution sont déterminées selon la distance par rapport au pixel central. En d'autres termes, les points les plus près du centre dans la matrice (en ligne ou en colonne) interviennent avec un poids supérieur à ceux des extrémités dans la mesure du gradient directionnel (Deslandes, 1986). Il a été démontré par Abdou et Pratt (1979) que la réponse de l'impulsion de ce filtre était relativement indépendante de l'orientation des linéaments. Celui-ci peut détecter aussi bien les linéaments orientés verticalement, horizontalement et à  $45^\circ$  par rapport au gradient du filtre.

La dimension des filtres varie selon les besoins. Seuls les linéaments dont la dimension est supérieure à la moitié de la fenêtre de convolution sont détectés (Colwell, 1983). Dans le cadre de cette étude, les dimensions du terrain étant de 93 km par 143 km, nous avons privilégié une fenêtre de convolution de 5 par 5, ce qui permet de détecter les linéaments supérieurs à 75 m. Les linéaments inférieurs à 75 m (c'est-à-dire environ deux pixels) se confondent facilement avec le bruit de l'image.

Compte tenu de la portée angulaire de  $\pm 45^\circ$  des filtres directionnels autour de la direction principale de rehaussement, quatre images de dérivée ont été générées à partir de quatre filtres directionnels de Sobel (NO, O, SO et S). Ceci permet de détecter les linéaments dans toutes les directions possibles. La structure des filtres de Sobel utilisés est donnée dans le tableau 3. La figure 5 décrit la méthodologie utilisée pour la création d'une image filtrée.

Tableau 3. Structures des filtres de Sobel 5 x 5.

nord-ouest	ouest	sud-ouest	sud
3 2 2 1 0	1 1 0 -1 -1	0 -1 -2 -2 -3	-1 -2 -3 -2 -1
2 4 3 0 -1	2 3 0 -3 -2	1 0 -3 -4 -2	-1 -3 -4 -3 -2
2 3 0 -3 -2	3 4 0 -4 -3	2 3 0 -3 -2	0 0 0 0 0
1 0 -3 -4 -2	2 3 0 -3 -2	2 4 3 0 -1	1 3 4 3 2
0 -1 -2 -2 -3	1 1 0 -1 -1	3 2 2 1 0	1 2 3 2 1

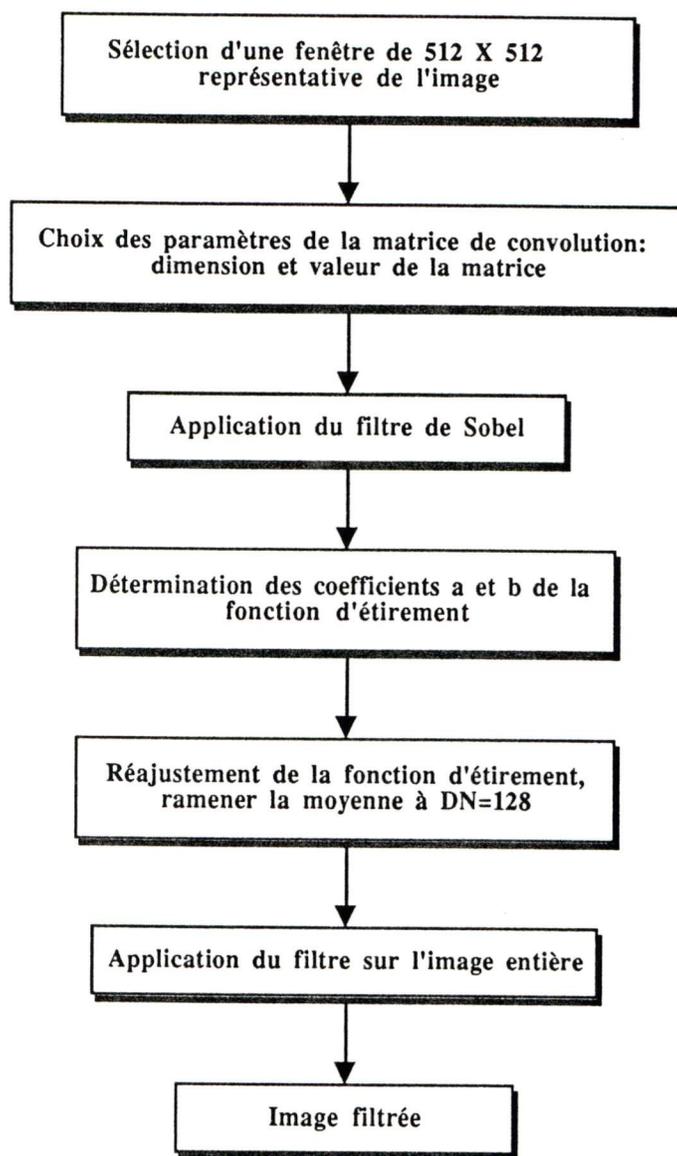


Figure 5. Méthodologie de création d'une image filtrée avec l'opérateur de Sobel

### 4.3 SEGMENTATION D'HISTOGRAMME

La distribution des histogrammes des images obtenues après les filtrages directionnels se présente sous la forme de courbes normales divisées en 2 parties. La première partie centrale, représente la fréquence des pixels associés aux secteurs homogènes de l'image et correspond à de faibles variations du gradient de la brillance. La deuxième partie, représentée par les extrémités de la distribution, correspond à la fréquence des pixels pour lesquels le filtre a détecté une forte transition de niveau de gris dans l'image (présence de linéaments).

Pour dégager les orientations préférentielles dans la zone d'étude, nous avons créé des histogrammes à partir des données brutes d'images filtrées. Ces histogrammes sont rehaussés de sorte à ramener les pixels situés aux extrémités de la distribution aux valeurs 0 et 255. Nous avons par la suite, effectué une série de test afin de déterminer les valeurs de coupure permettant de mieux cerner les éléments linéaires sur les images filtrées.

Ces tests ont montré qu'une coupure de 5% aux extrémités gauche et droite de la distribution permettait de mettre en évidence la texture rugueuse de l'image et donc de mieux cerner les linéaments. Les images filtrées rehaussées sont représentées par les figures 6, 7, 8 et 9. Les histogrammes correspondants sont données à l'annexe 3.

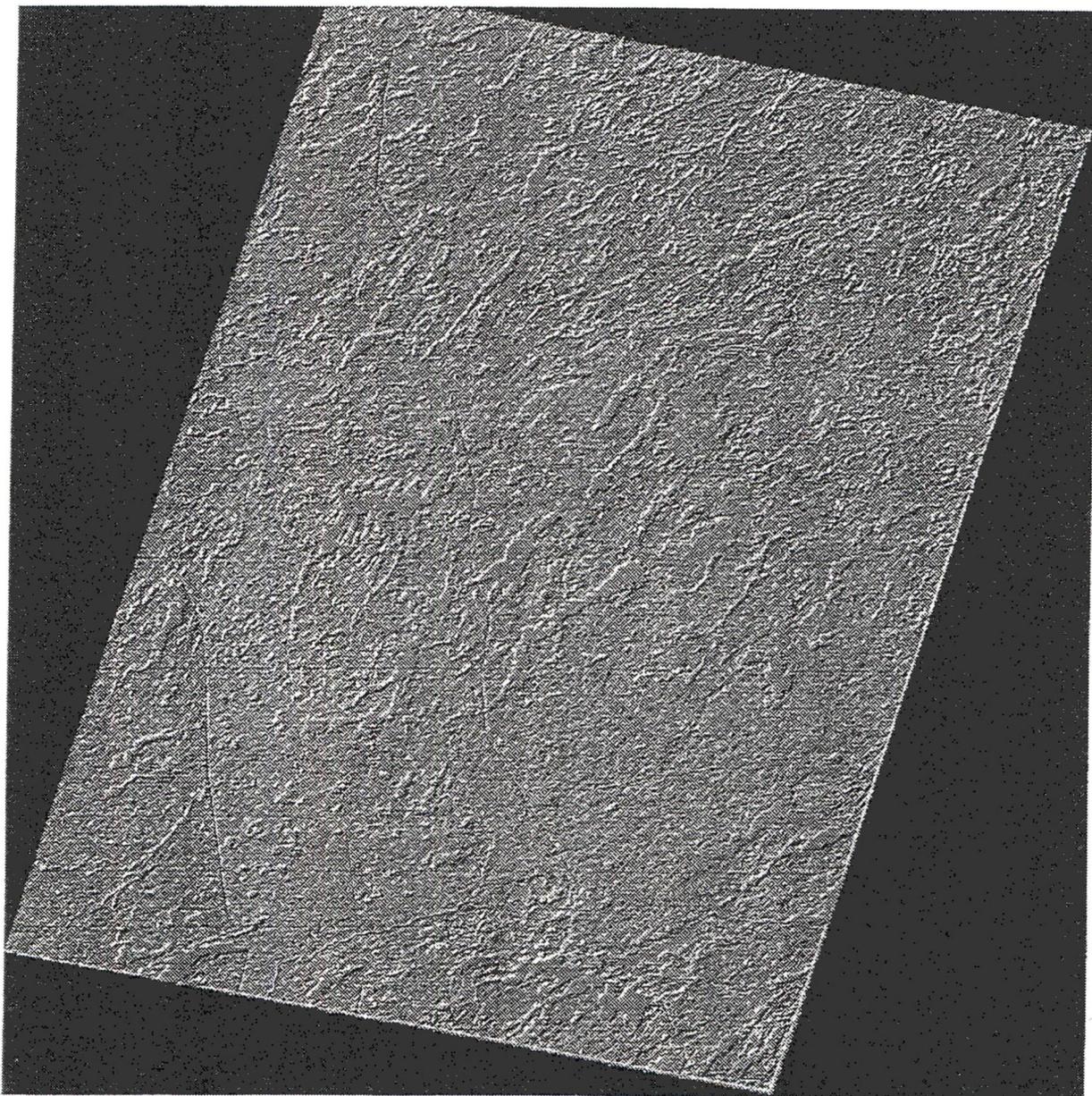


Figure 6. Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel NO

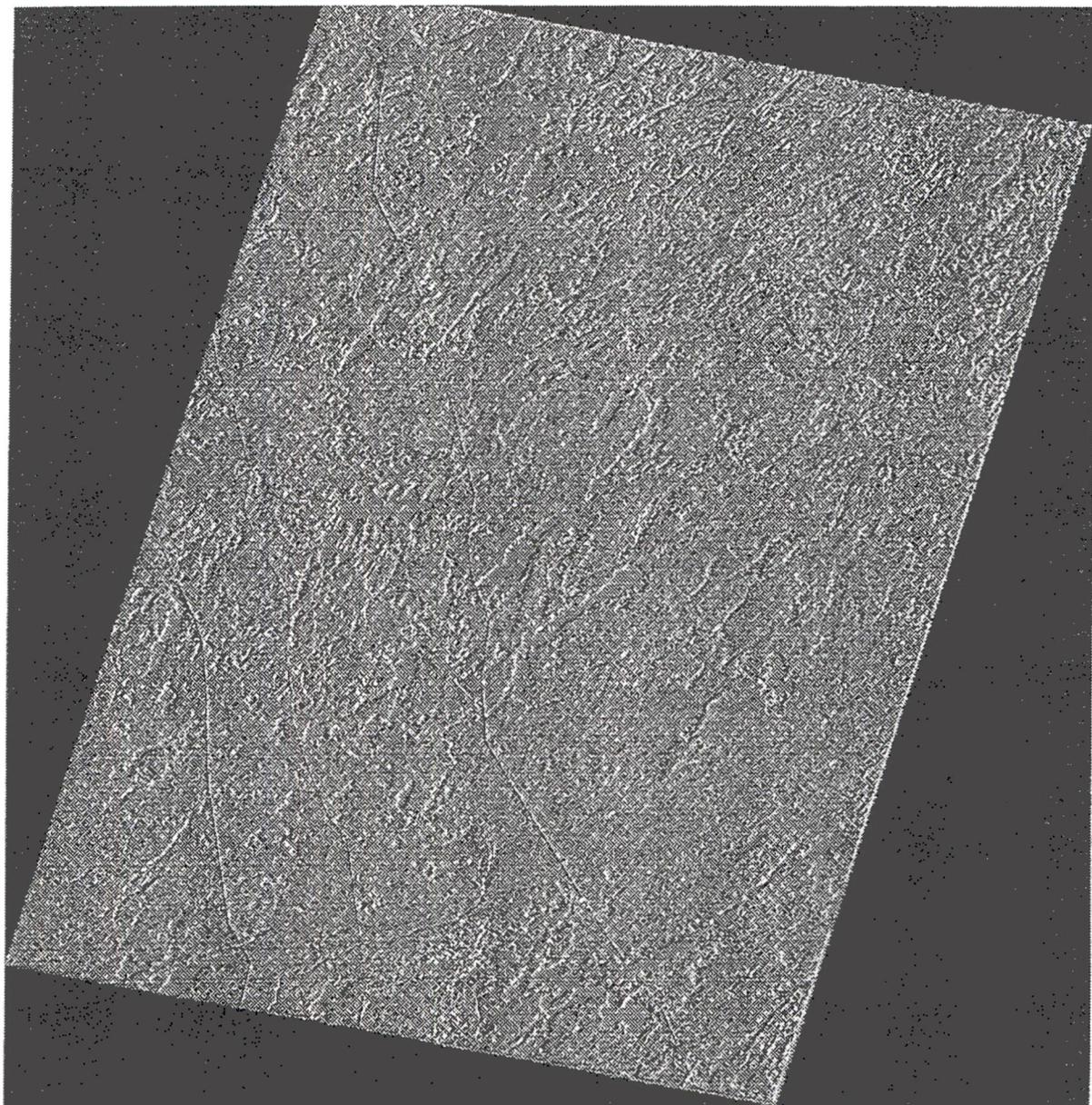


Figure 7. Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel O



Figure 8. Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel SO

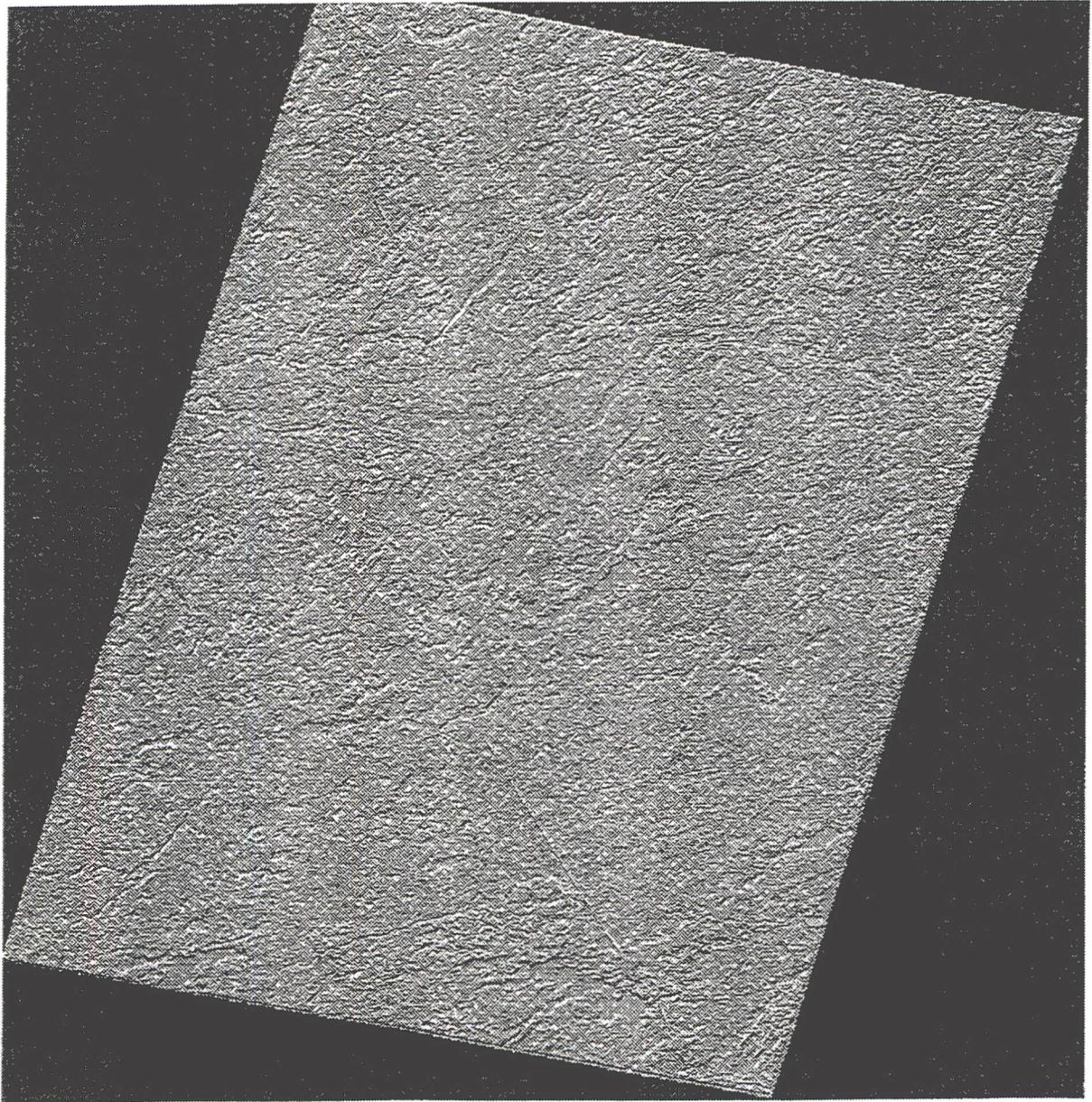


Figure 9. Image issue du rehaussement et du filtrage directionnel S

#### 4.4 CRÉATION D'IMAGE BINAIRE DE LINÉAMENTS

Les images obtenues après applications du filtre de Sobel présentent des valeurs uniformes qui se traduisent visuellement par une teinte de gris. Les structures linéamentaires se trouvent donc confondues dans ce fond de gris. De ce fait, nous avons effectué une "binarisation" des images afin d'optimiser le contraste en éliminant cette teinte et en conservant seulement les éléments détectés par les filtres de Sobel. Notons que cette approche a aussi été utilisée par plusieurs chercheurs pour mettre en évidence les linéaments (Moore, 1986; Deslandes et Gwyn, 1991). La série de tests a montré que les seuils de 5 % de la section inférieure et supérieure de l'histogramme des niveaux de gris représentent des limites significatives pour la création d'image binaire de linéaments.

On crée donc les images binaires en attribuant la valeur 0 aux pixels dont le niveau de gradient est inférieur au seuil et la valeur 255 aux autres pixels de l'image. Ce qui nous donne une image à deux niveaux de gris : les linéaments en noir (0) et le fond de l'image en blanc (255). Les images binaires sont représentées à l'annexe 4.

#### 4.5 CARTOGRAPHIE DES LINÉAMENTS

La cartographie des linéaments est réalisée en traçant directement les structures linéaires et circulaires sur les divers images filtrées, les images binaires, l'image en composé coloré et l'image des trois composantes principales. Les linéaments tracés sur les fonds d'images filtrées (4 images) sont systématiquement vérifiés sur les autres images avant d'être retenus. Ceci a pour but d'éviter de rajouter des éléments susceptibles d'être des linéaments (route, limites boisées et lignes électriques). La dernière étape sera la superposition des quatre cartes de linéaments obtenues dans les quatre directions afin de créer une carte de synthèse des

linéaments. Pour éviter la répétition de segments sur cette carte de synthèse, on procède à une élimination de tous les linéaments qui se répètent plus d'une fois. Les cartes de linéaments issues des quatre images filtrées-rehaussées sont représentées à l'annexe 5. La carte de synthèse est, quant à elle, donnée à la figure 10. Le tableau 4 nous montre les caractéristiques des différentes cartes obtenues.

Tableau 4. Caractéristiques des cartes de linéaments.

Cartes de linéaments	Nombre de linéaments <sup>1</sup>	Nombre de segments <sup>2</sup>	longueurs en km
NO	484	792	3105.7
O	190	365	1574.7
SO	130	312	3238.9
S	139	399	3112.2
Carte de synthèse	634	1022	7212

1 : Constitué de un ou plusieurs segments

2 : Éléments rectilignes d'un linéament

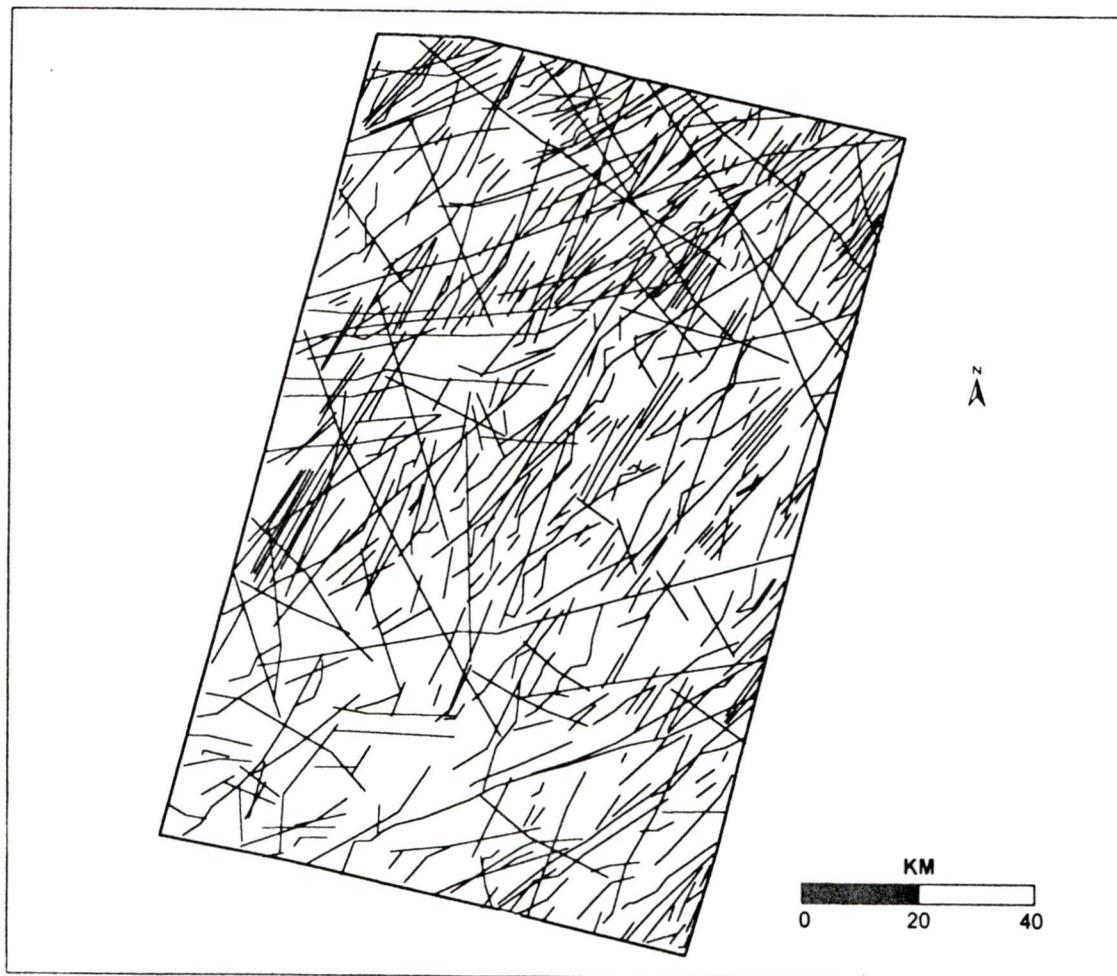


Figure 10. Carte de synthèse des linéaments

## CHAPITRE 5

### RÉSULTATS

#### 5.1 OBSERVATION ET ANALYSE STATISTIQUE DES LINÉAMENTS

L'analyse statistique des linéaments a été explorée par plusieurs auteurs afin d'étudier la géométrie du réseau de linéaments et d'en dégager les directions dominantes à l'échelle régionale (Pretorius and Partridge, 1974; Deslandes et Gwyn, 1991). La méthode conventionnelle consiste à produire des rosaces directionnelles proportionnelles à la longueur cumulative des linéaments par classes de 10° d'orientation. Nous avons généré ces rosaces grâce à un programme en langage AutoLisp du logiciel AutoCAD (Deslandes, communication personnelle).

Afin de mieux cerner la répartition des linéaments, l'analyse de l'information se fera en deux étapes :

- une première étape où nous procéderons à une analyse des linéaments sur toute l'étendue du territoire c'est-à-dire sur l'image entière;
- une deuxième étape où nous allons diviser notre image en "secteurs tectoniques" où l'apparence morphologique sur l'image Landsat est homogène et où les tendances des linéaments semblent appartenir au même système tectonique.

### 5.1.1 Analyse des linéaments de l'image entière

La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments uniques résultant de la superposition de l'information contenue dans les quatre images filtrées. Elle regroupe au total 634 linéaments, soit une longueur totale de 7212 km. Cette carte de linéaments à la figure 11 apparaît polymodale. En effet, elle nous révèle quatre familles importantes d'orientation de linéaments soient : NS ( $0^\circ$  à  $9^\circ$  et de  $170^\circ$  à  $180^\circ$ ), NE-SO ( $10^\circ$  à  $79^\circ$ ), EO ( $80^\circ$  à  $99^\circ$ ) et NO-SE ( $100^\circ$  à  $169^\circ$ ) (figure 11). L'orientation NE-SO est prédominante, regroupant à elle seule 75% de l'information, pour ce qui est des longueurs et un pourcentage de 80% pour ce qui est des fréquences. Les linéaments appartenant à la famille NS, regroupent 3% de la longueur totale et 4% des fréquences. Quant aux orientations EO et NO-SE, elles représentent respectivement 8% et 14% de l'information en ce qui concerne les longueurs, et un effectif de 7% et 9% pour les fréquences. Finalement, les linéaments appartenant aux familles NS et, dans une moindre mesure, aux familles NO-SE et EO sont faiblement représentés, comparativement à ceux identifiés dans la direction NE-SO (80%). D'une façon générale, on constate que cette direction NE-SO est majoritaire sur les quatre cartes de linéaments. Sur la carte de synthèse (figure 11), Les linéaments ont des longueurs variables allant de l'ordre hectométrique à plurikilométrique (107 km). Leur répartition sur l'image n'est pas homogène et se fait dans toutes les directions. Quelques éléments linéaires forment de fines trames rapprochées, orientées généralement dans la même direction formant ainsi des essaims de linéaments.

La figure 11 laisse voir une région à faible densité de linéaments dans le sud de la carte, alors que le centre et surtout le nord sont fortement peuplés. Quelques faisceaux continus et bien visibles émergent dans la partie axiale. Compte-tenu de la densité des éléments linéaires et de leurs entrecroisements élevés, les structures géologiques liés à la tectonique sont difficilement perceptibles. Aussi, l'observation et l'analyse de chacune des quatre images permettront d'avoir des informations plus détaillées.

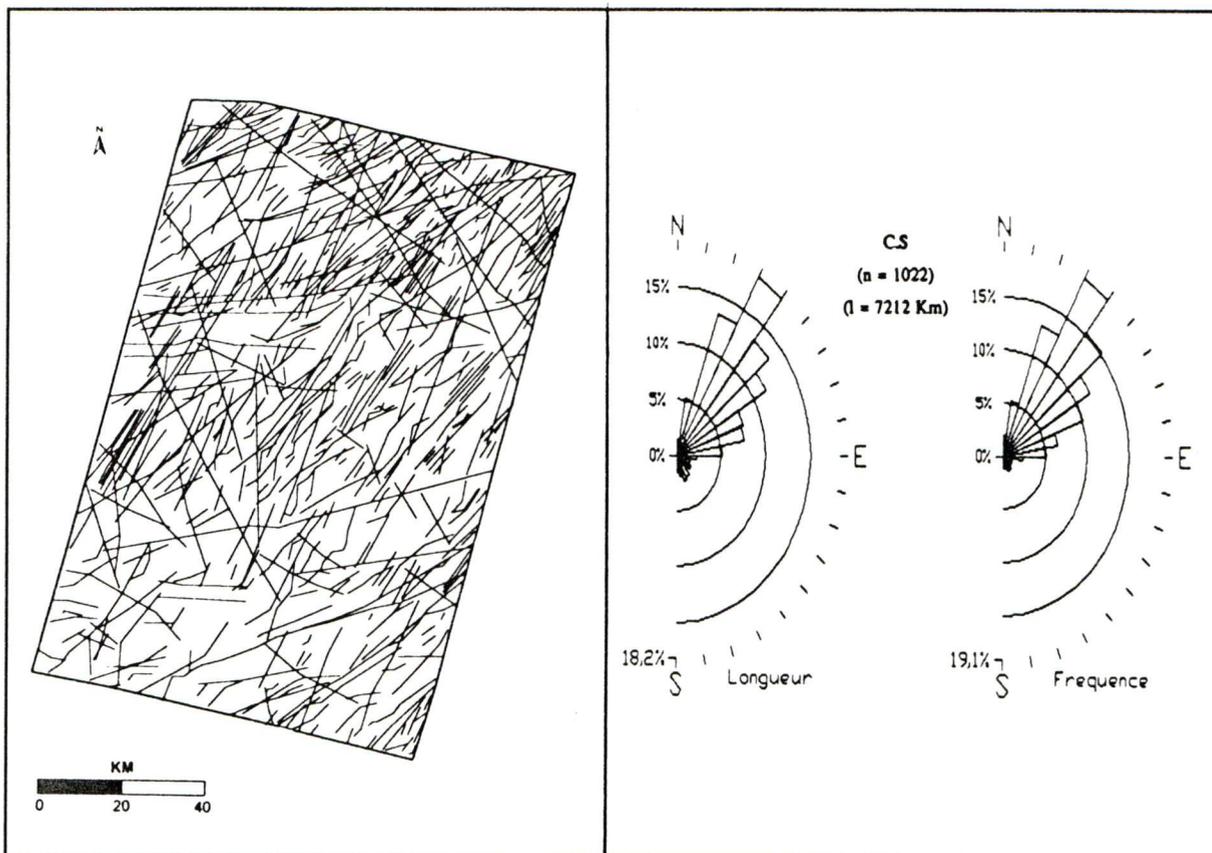


Figure 11. Rosaces directionnelles de la carte de synthèse des linéaments

La rosace de la carte NO montre une dispersion des valeurs, avec un pic important dans la direction  $N30^{\circ}-40^{\circ}$  (figure 12). On note une prédominance de linéaments de tendance NE-SO avec plus de 90% des longueurs et 90% des fréquences. Cette famille NE-SO apparaît polymodale à la figure 12 contrairement aux autres qui sont unimodales. On observe dans l'ouest et le nord de l'image, de fines trames de failles régulières, parallèles et rapprochées. Les accidents orientés NE-SO, sur cette image, se trouvent dans certains cas décalés de façon dextre par des structures orientées est-ouest ou nord-sud.

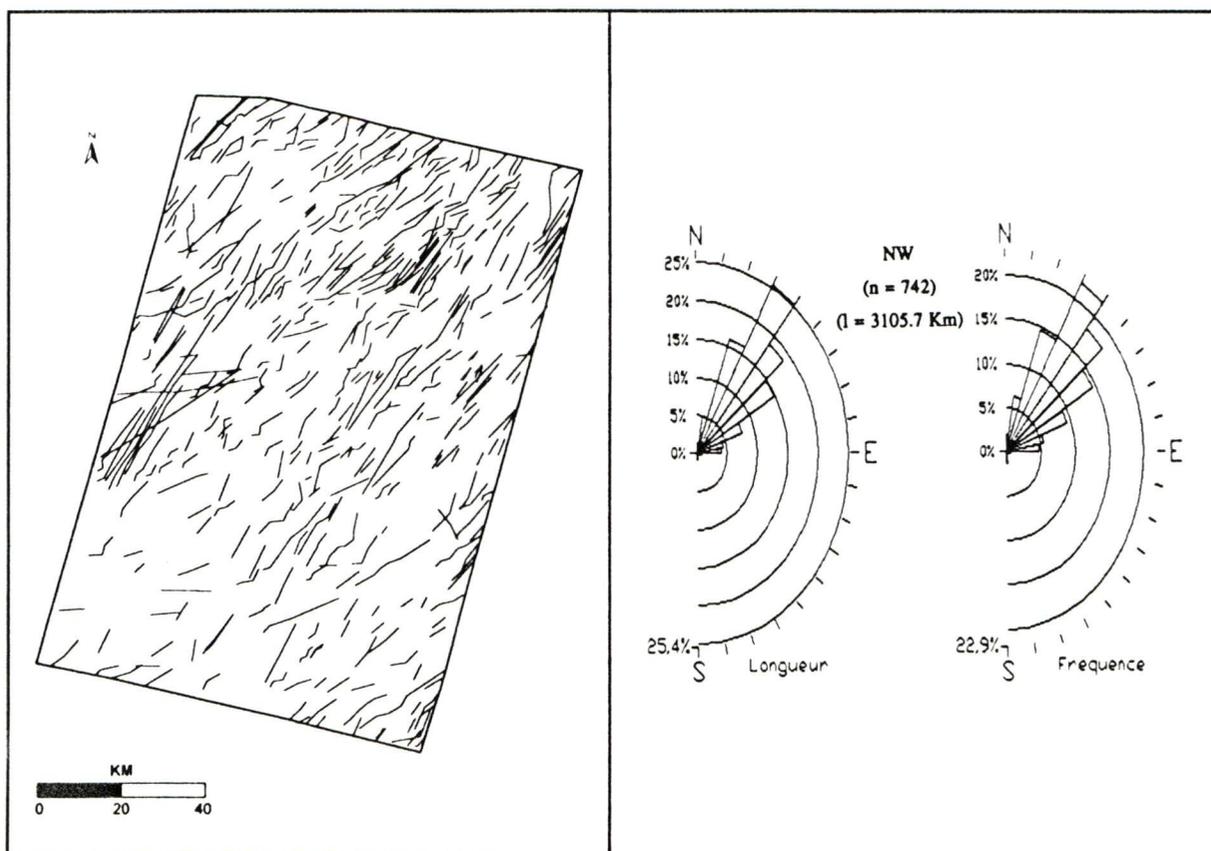


Figure 12. Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement NO

La rosace de la carte S présente deux orientations principales : NE-SO (77% des longueurs et 75% des fréquences) polymodale et EO (11% des longueurs et 8% des fréquences) unimodale (figure 13). Les orientations NS et NO-SE sont également unimodales et faiblement représentées (2% des longueurs et 1% des fréquences pour le NS et 6% des longueurs pour 2% des fréquences pour le NO-SE). Les linéaments, quant à eux, sont continus et beaucoup plus allongés. Certains d'entre-eux, orientés NE-SO sont décalés les uns par rapport aux autres soit par les orientations EO ou encore par des orientations NE-SO proches de N80°. De petits ensembles de linéaments réguliers et parallèles émergent dans les parties nord, ouest et sud-est de cette carte.

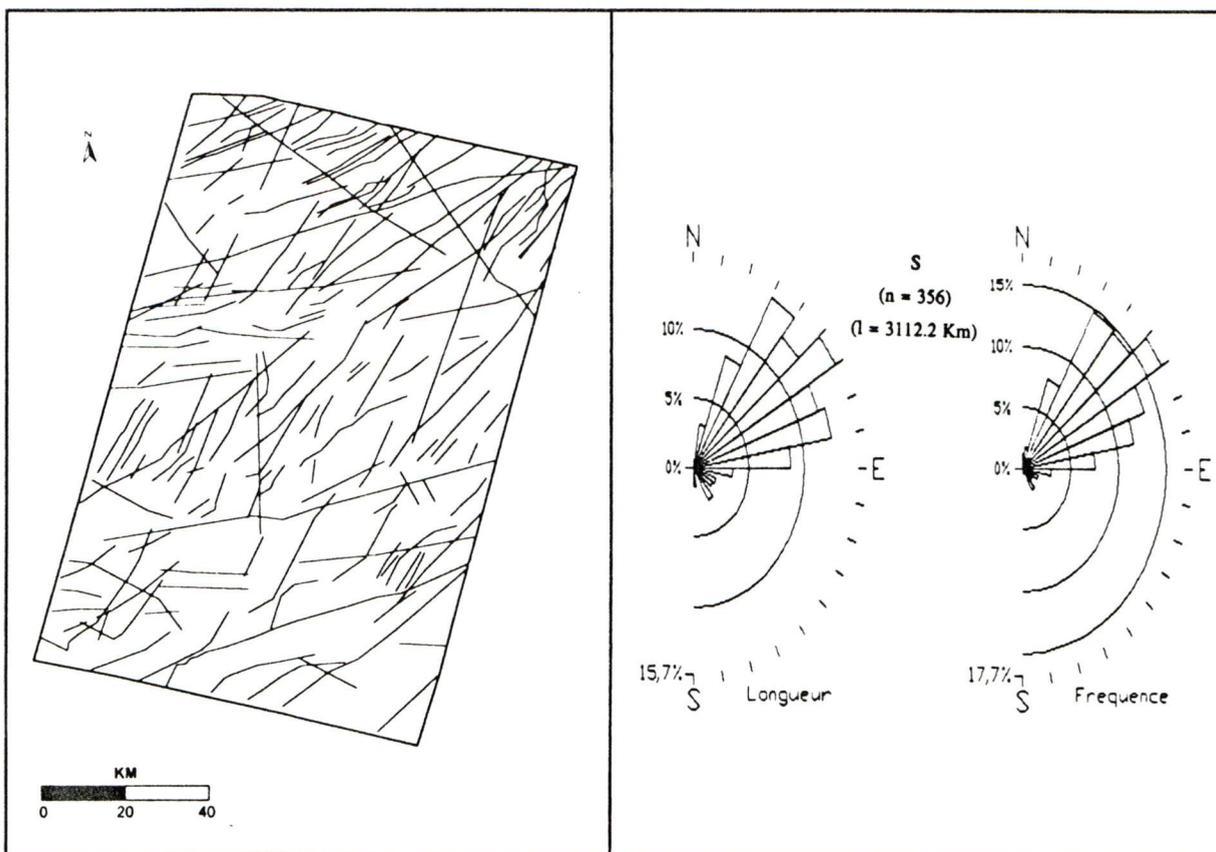


Figure 13. Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement S

La carte O, quant à elle, est moins dense. Sa rosace présente également des valeurs dispersées, regroupées en deux directions principales : NS (7% des longueurs et 9% des fréquences) unimodale et NE-SO (93% des longueurs et 81% des fréquences) polymodale (figure 14). Les structures orientées NE-SO sont parfois décalées de façon sénestre les unes par rapport aux autres par des orientations NS.

La carte SO a une rosace fortement dispersée avec deux directions prédominantes et polymodale: NO-SE (25% des longueurs et 26% des fréquences) et NE-SO (55% des longueurs et 56% des fréquences) (figure 15). Les linéaments sur cette carte sont beaucoup plus continus et plus allongés. Cependant, on observe moins de décalage entre les structures d'une même orientation.

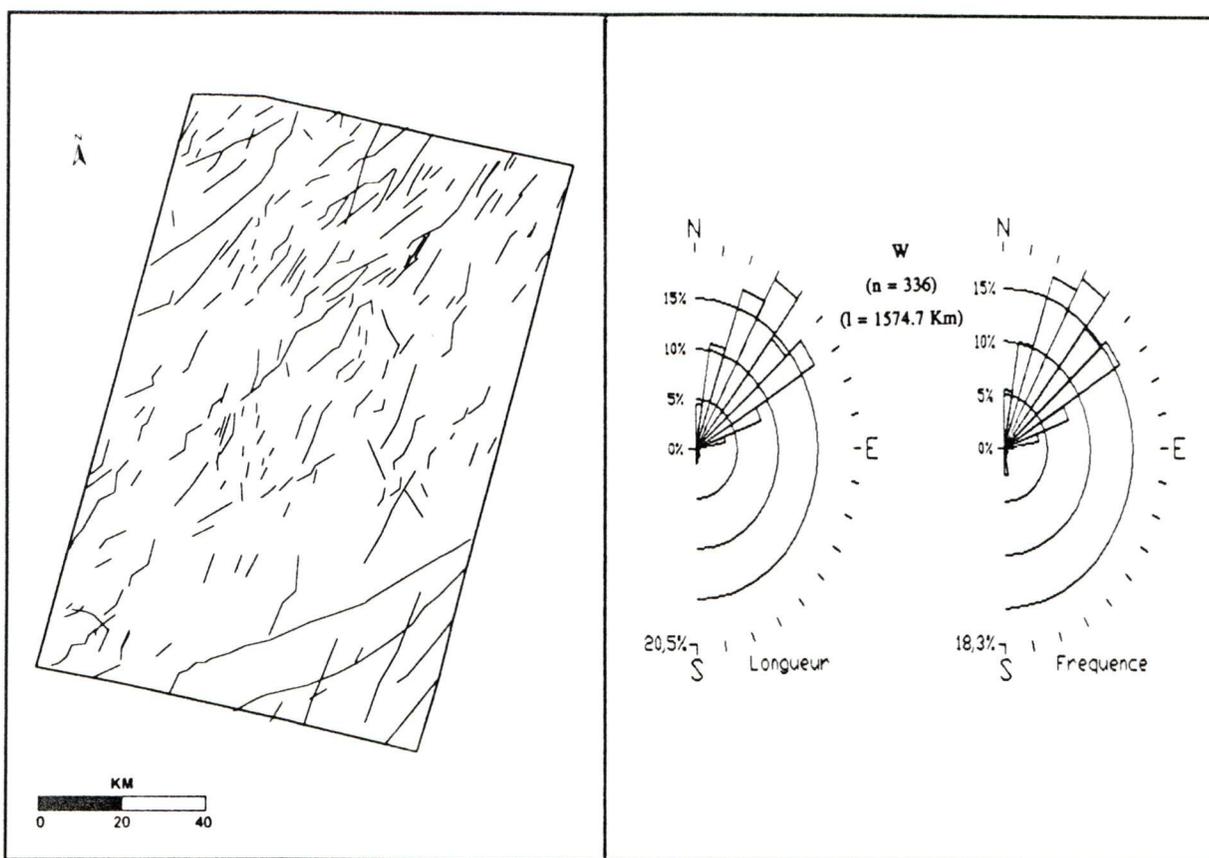


Figure 14. Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement O

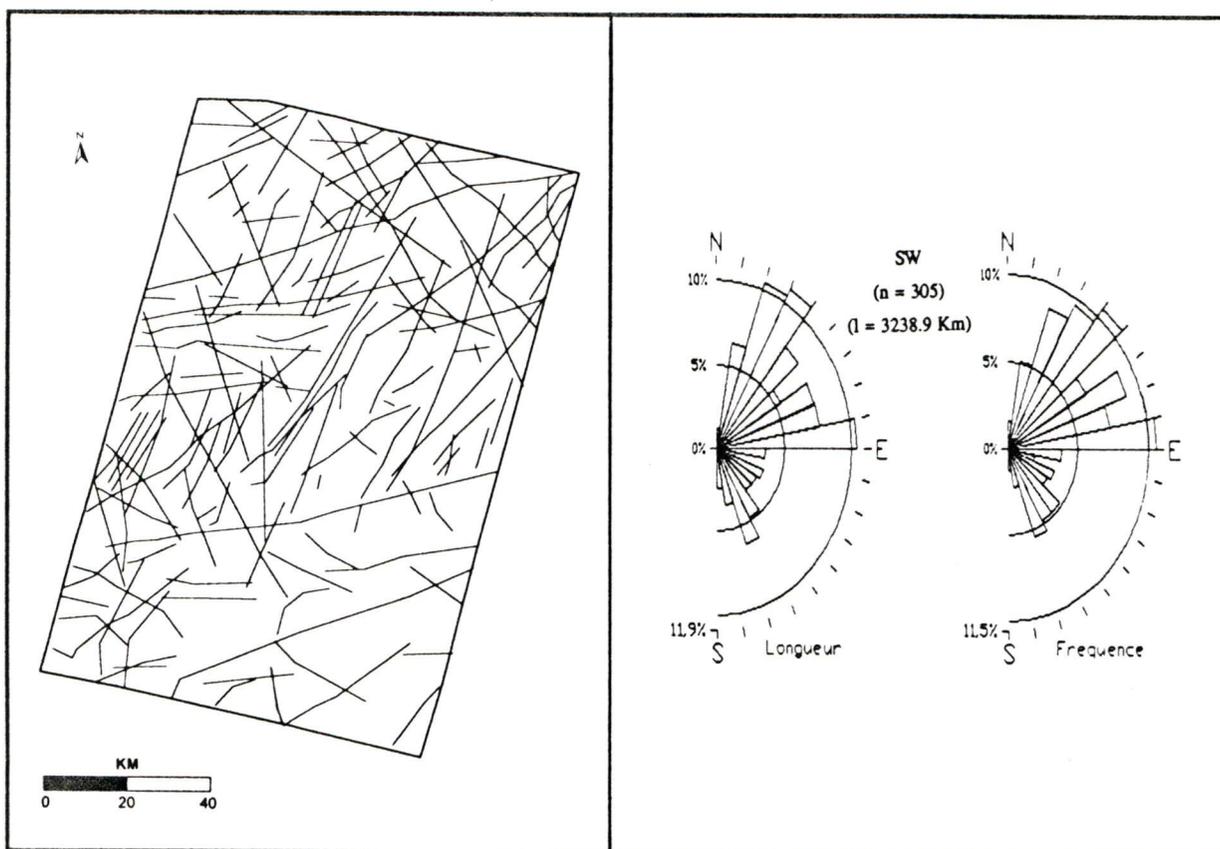


Figure 15. Rosaces directionnelles de la carte issue du filtrage et du rehaussement SO

Le calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation à l'annexe 6, montre clairement les variations importantes dans les longueurs moyennes entre les diverses classes d'orientation. Ces variations sont confirmées par les représentations graphiques des histogrammes de l'orientation générale et préférentielle des linéaments du territoire à l'annexe 7. L'examen des figures 12,13,14 et 15 suggère que les linéaments de la famille NE-SO sont relativement courts alors que ceux des autres familles seraient nettement plus longs.

### **5.1.2 Découpage de l'image en secteurs tectoniques**

Étant donné l'étendue considérable du territoire couvert par l'image entière d'une part et le nombre important de linéaments et leur densité d'entrecroisement élevée d'autre part, nous avons décidé de découper l'image en secteurs où l'apparence morphologique des linéaments est homogène afin de faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats.

L'observation du patron de linéaments de la carte de synthèse à la figure 10 fait ressortir une différence dans l'agencement et la concentration des éléments linéaires du territoire. En effet, le secteur sud de la carte montre une faible densité de linéaments et présente une tendance est-ouest dans son orientation. Le centre et le nord du territoire, quant à eux, présentent une forte densité de linéaments et d'entrecroisements avec cette fois-ci, une tendance nord-est. Cette différence est observée de part et d'autre du linéament majeur orienté  $N80^\circ$ , traversant le territoire d'est en ouest. Suite à cette observation, nous avons divisé l'image en deux secteurs : un secteur sud situé au sud du territoire et un secteur nord, dans la partie nord. Ces deux secteurs sont limités par le linéament  $N80^\circ$  qui s'étend de l'est à l'ouest, découpant ainsi le territoire en deux zones distinctes (figure 16).

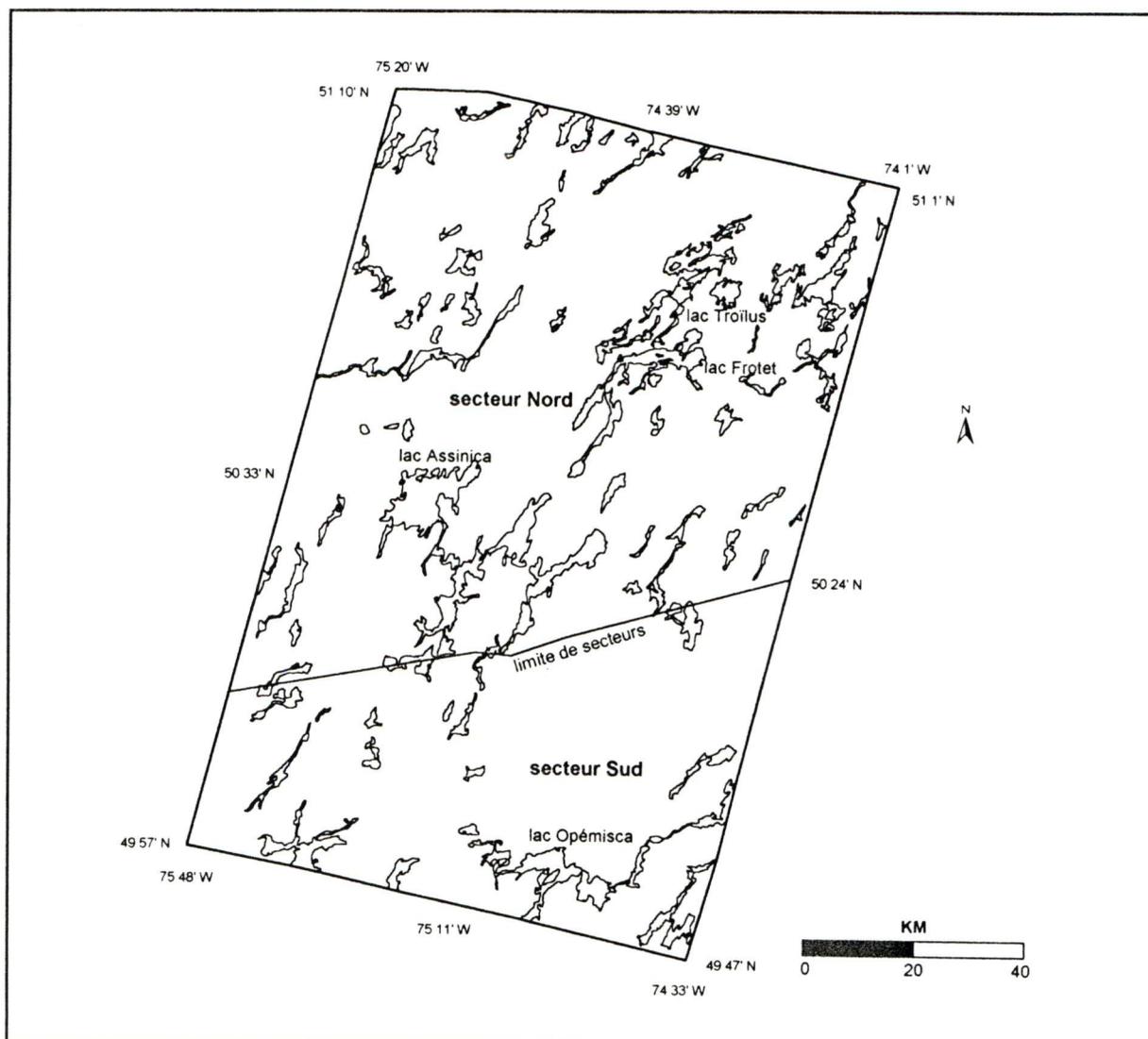


Figure 16. Carte de découpage de l'image en secteurs tectoniques

Suite à cette division de l'image en deux secteurs, on procède à l'analyse statistique de chaque zone à l'aide de rosaces directionnelles comme pour l'image entière. Certains éléments structuraux ont été subdivisés par le découpage. De ce fait, le nombre total de segments des deux secteurs reste supérieur à celui de l'image entière. Quant à la longueur cumulative des linéaments des deux secteurs, elle reste inférieure à celle de l'image entière. Les rosaces directionnelles de la figure 17 permettent de définir et de mieux comprendre chacun des secteurs.

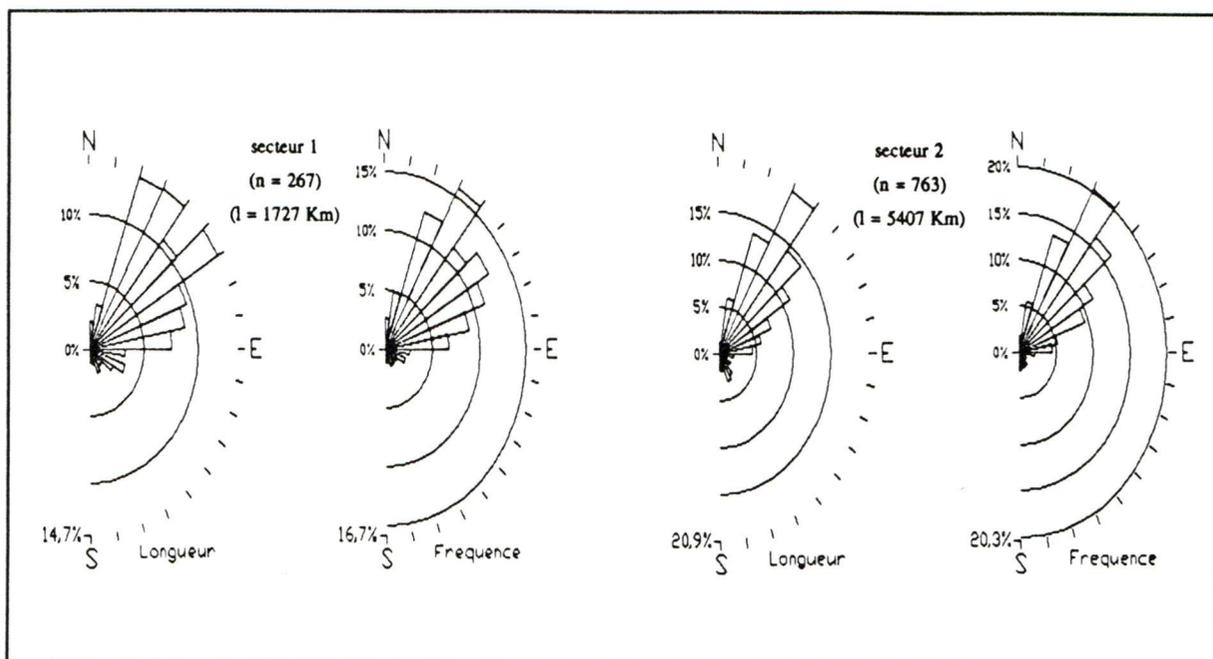


Figure 17. Rosace directionnelle des secteurs sud et nord

Secteur 1 = secteur sud

Secteur 2 = secteur nord

### 5.1.2.1 Linéaments du secteur sud

Le secteur sud montre une dispersion des valeurs sur ses rosaces avec plusieurs pics importants. Il comporte 267 segments avec une longueur totale de 1727 km. Le nombre d'entre-croisements des linéaments (118 entrecroisements) est inférieur à celui du secteur nord. Les principaux pics se distinguant sont les suivants : N20°-30° (14% des longueurs pour 12% des fréquences), N30°-40° (15% des longueurs pour 17% des fréquences), N40°-50° (10% des longueurs pour 10% des fréquences) et enfin N50°-60° (15% des longueurs pour 12% des fréquences) (figure 17). L'ensemble de ces pics d'orientation s'inscrit dans la grande famille NE-SO avec une longueur cumulative de 74% pour une fréquence de 74%. Les orientations EO et NO-SE

suivent en importance avec respectivement 10% et 13% des longueurs, pour des fréquences de 8% et 9%. La direction NS quant à elle, est très faiblement représentée dans le secteur sud avec 3% des longueurs pour 4% des fréquences.

### 5.1.2.2 Linéaments du secteur nord

Le secteur nord montre une répartition des rosaces beaucoup plus concentrée dans la direction NE-SO. Il compte 763 segments pour une longueur cumulative de 5407 km, et un nombre de 548 entrecroisements de linéaments (figure 17). On note un pic prédominant dans la direction N30°-40° (21% des longueurs pour 20% des fréquences). Il est suivi des pics N20°-30° (14% des longueurs pour 14% des fréquences), N40°-50° (14% des longueurs pour 16% des fréquences) et N50°-60° (10% des longueurs pour 11% des fréquences). Ces différents pics s'inscrivent avec ceux des directions faiblement représentées (N10°-20°, N60°-70°, N70°-80°) dans la grande famille d'orientation NE-SO constituant ainsi 78% des longueurs cumulatives avec un effectif de présence de 81%. Les autres familles d'orientations sont moins importantes: NO-SE (12% des longueurs pour 8% des fréquences), EO (6% des longueurs pour 6% des fréquences) et NS (3% des longueurs pour 4% des fréquences). Les linéaments dans le secteur nord sont réguliers et plus rapprochés. Le nombre élevé d'entrecroisements des différents éléments structuraux leur donne un aspect d'enchevêtrement, rendant ainsi la zone plus dense.

Contrairement au secteur nord de l'image où la densité des linéaments est élevée, le secteur sud a une distribution moins concentrée (rosace beaucoup plus éparse) et montre une tendance est-ouest beaucoup plus importante (figure 17). La classe d'orientation NE-SO apparaît polymodale sur les rosaces des deux secteurs (figure 17) contrairement aux autres classes.

## **5.2 ANALYSE SPATIALE DES LINÉAMENTS**

Afin de procéder à l'analyse spatiale des linéaments, nous avons découpé l'image en une grille constituée de cellules de 4 km par 4 km de côté. Ce qui nous permettra d'apprécier à un niveau plus petit la variation du nombre des linéaments d'une part, et la variation de leur densité d'entrecroisements d'autre part. Nous avons utilisé divers programmes en langage AutoLisp du logiciel AutoCad pour tracer la grille et calculer pour chaque cellule, la longueur des linéaments, le nombre de linéaments et le nombre d'entrecroisements. La grille superposée à la carte de linéaments est donnée à la figure 18.

### **5.2.1 Variation du nombre de linéaments**

Nous avons étudié la variation du nombre de linéaments pour chaque cellule de 4 km par 4 km sur l'image entière. Les résultats obtenus donnent une moyenne de 3,65 éléments par cellule sur un total de 1320 cellules. On constate que cette variation du nombre d'éléments augmente au fur et à mesure que l'on passe du sud vers le nord de l'image (figure 19). Le nombre important de linéaments dans le secteur nord par rapport au secteur sud, pourrait être lié à la répartition du peuplement sur deux zones tectoniques différentes.

### **5.2.2 Variation de la densité d'entrecroisements**

La variation de la densité d'entrecroisement a été étudiée pour chaque cellule de 4 km par 4 km. Les résultats nous donnent une moyenne de 3,06 entrecroisements par cellule sur un total de 1320 cellules. Le nombre d'entrecroisements, tout comme le nombre de linéaments, devient de plus en plus important quant on passe du secteur sud vers le secteur nord (figure 20). La raison évoquée dans le cas précédent, à savoir l'existence de deux secteurs tectoniques pourrait également expliquer cette constatation.

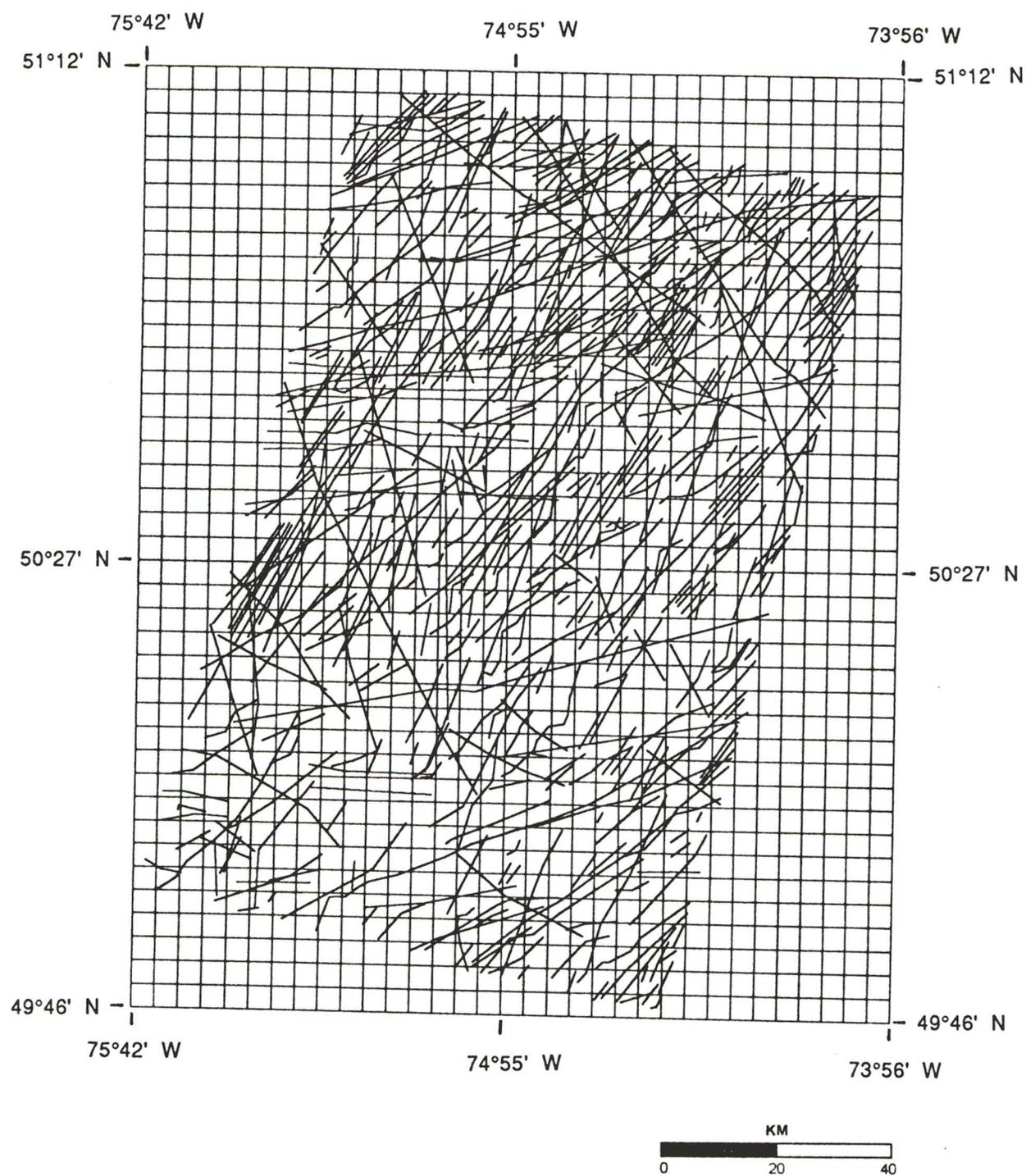


Figure 18. Grille constituée de cellules de 4 km x 4 km de côté superposée à la carte de synthèse de linéaments

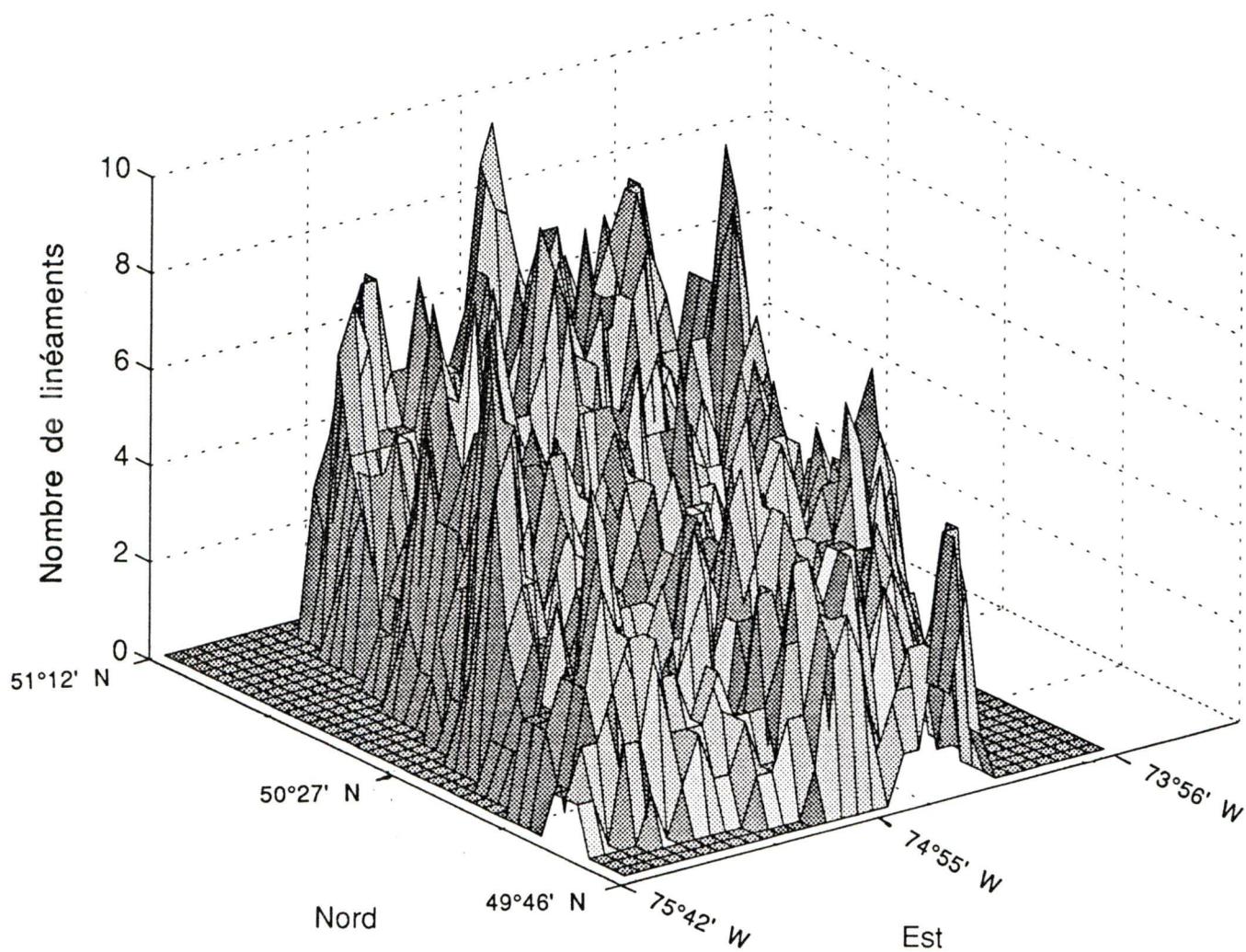


Figure 19. Représentation 3 D de la variation du nombre de linéament par cellules.

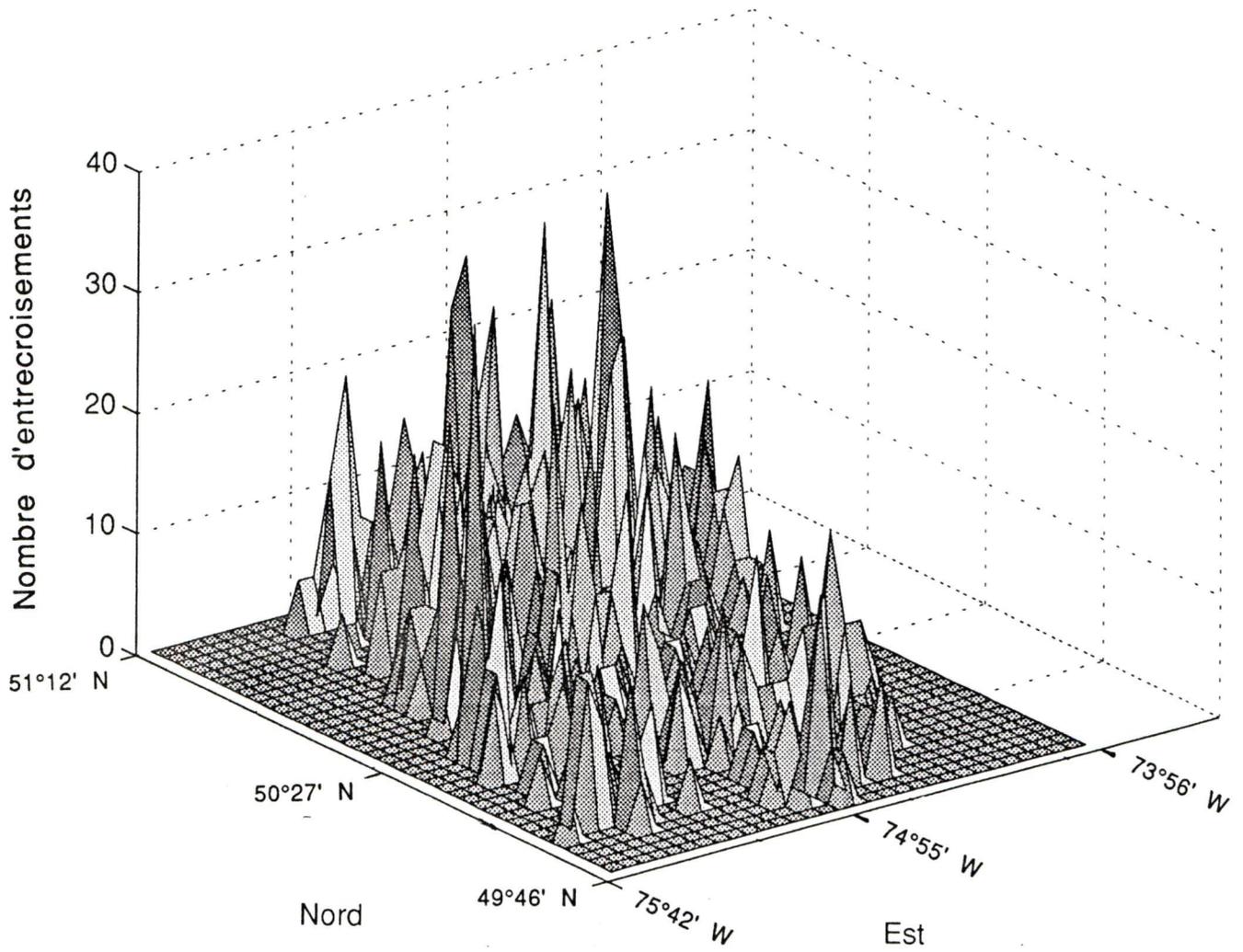


Figure 20. Représentation 3 D de la variation du nombre d'entrecroisements par cellules

### **5.3 CONFRONTATION DES RÉSULTATS AVEC LES DONNÉES GÉOSCIENTIFIQUES**

Afin de mieux cerner la cartographie, l'analyse et l'interprétation géostructurale du territoire, on procède à une confrontation des résultats avec les cartes géologiques et lithostratigraphiques existantes de même qu'avec les données géochimiques et les cartes de gîtes minéraux de la région.

Toutes les informations essentielles à la cartographie et à l'analyse géologique structurale de la région sont intégrées dans un système d'information géographique (S.I.G) afin de permettre d'une part, l'identification des linéaments déjà connus et d'autre part, l'interprétation des linéaments nouveaux et de faire le lien avec la géologie du terrain. La figure 21 décrit la méthodologie de confrontation des données dans un S.I.G.

Les données provenant de supports différents (analogiques et numériques) sont ramenées à des échelles compatibles afin de ne pas perdre d'information. Les données images Landsat-5 TM sont converties en format vectoriel avec l'extension DXF à l'aide du logiciel PCI. Puis elles sont transportées vers un logiciel de système d'information géographique (ATLAS-GIS). Les données géochimiques (numériques) sont acheminées vers le SIG avec l'extension BNA. Quant aux autres données analogiques (carte géologique, lithostratigraphique et de gîtes minéraux), elles sont directement numérisées à l'aide du même logiciel.

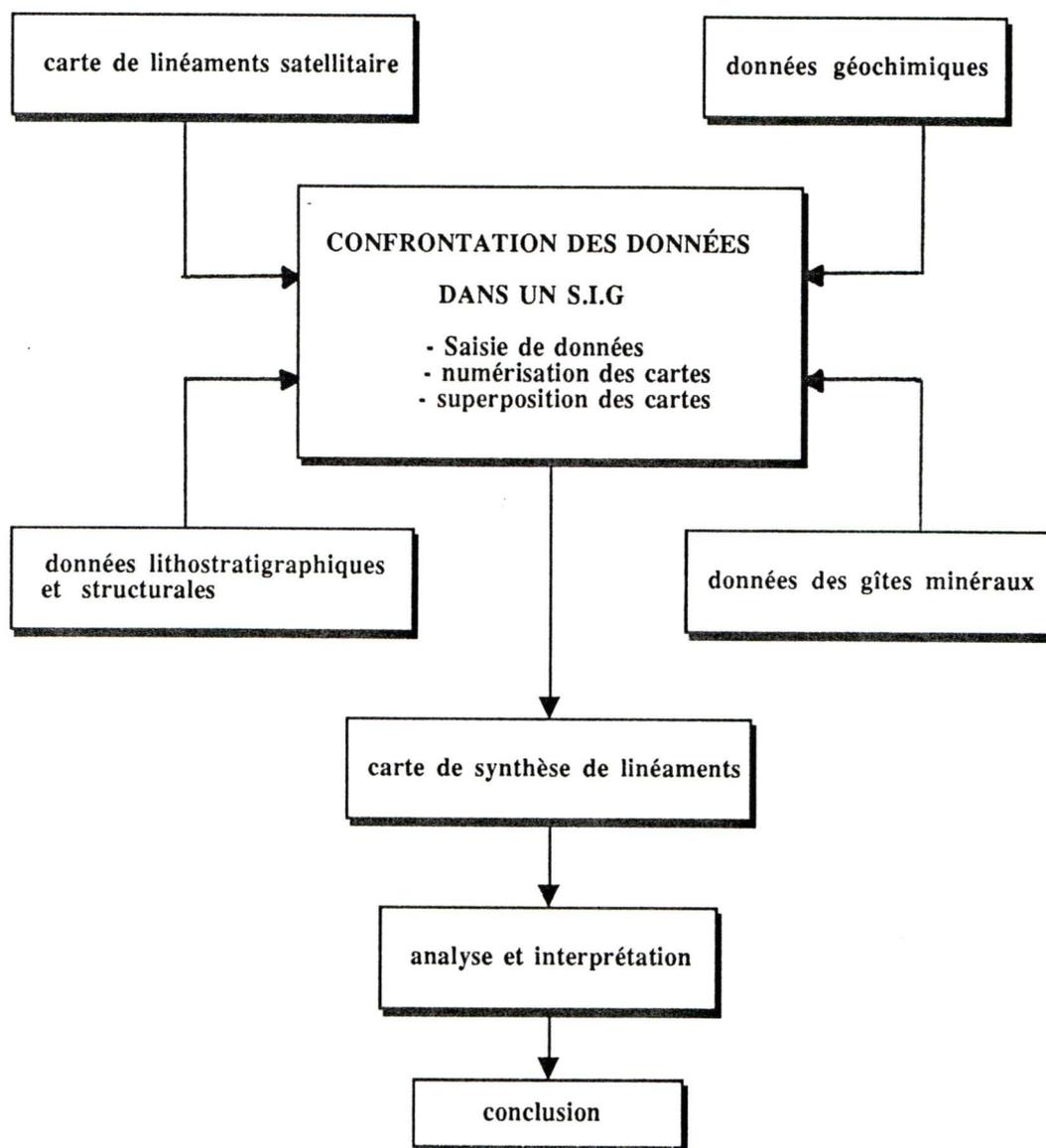


Figure 21. Organigramme de la confrontation des données multisources dans un SIG

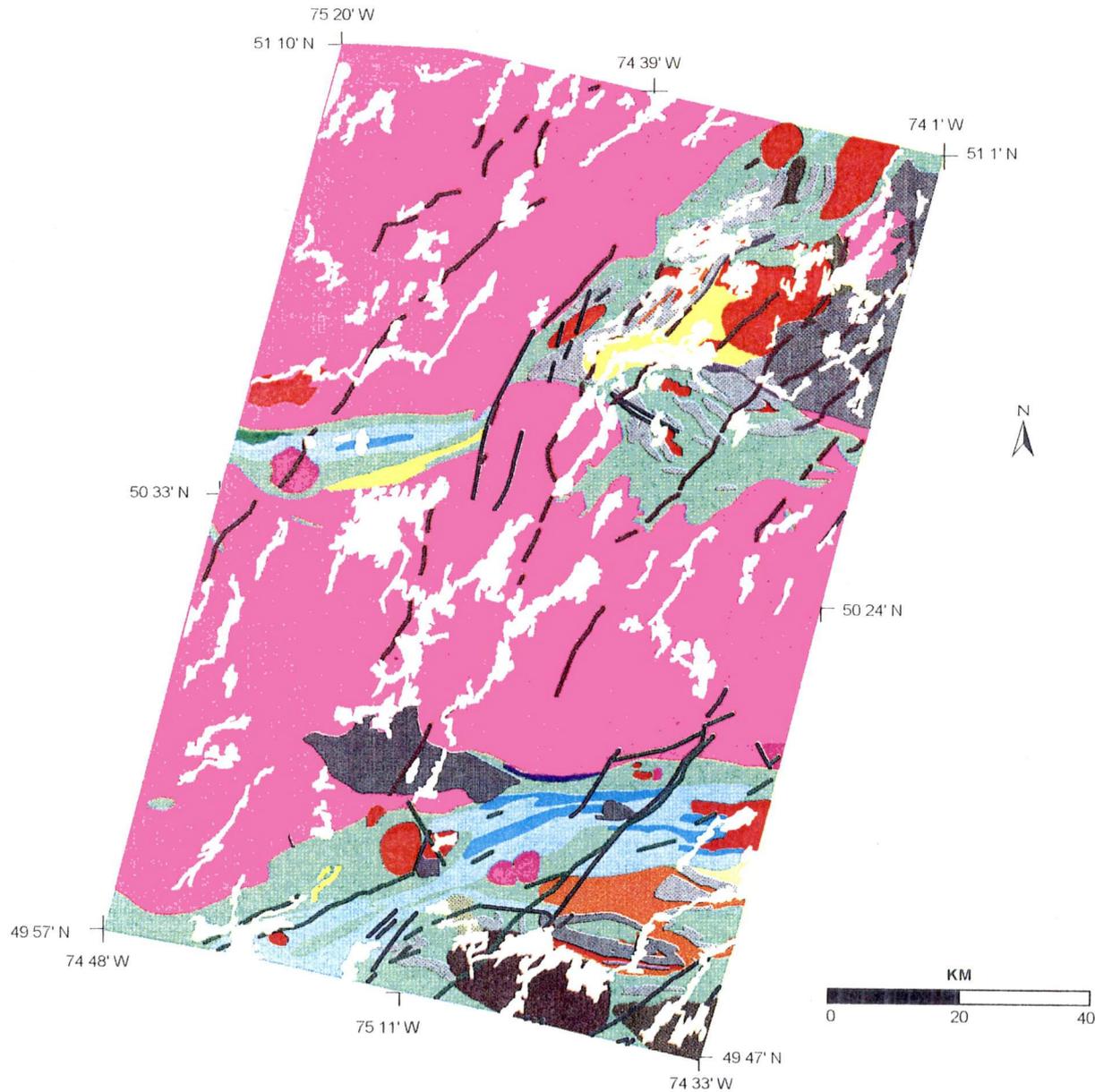
### 5.3.1 Confrontation avec les données géologiques structurales

La carte géologique du territoire montre une grande variété aussi bien dans sa composition lithologique que structurale (figure 22). Les linéaments géologiques, issus de cette carte sont constitués de linéaments liés aux socles rocheux et aux accidents tectoniques (25 failles et 19 dykes) et de linéaments d'origine glaciaire (48 eskers principalement) (figures 22 et 23). Ces linéaments connus sont repartis selon 4 directions :

- la direction NNE-SSO à NE-SO la plus importante, est la direction d'orientation de 85% des eskers, de 80% des failles et de 95% des dykes;
- la direction EO, est l'orientation du dyke N80° près du lac du Sauvage au sud-est du territoire et de la faille N95° au dessus du lac Opémisca;
- la direction NO-SE, quant à elle est la direction d'orientation des failles N118° et N125° entre les lacs Regnault et Frotet au nord du territoire et de la faille N150° au sud-est près du lac du Sauvage. Cette direction est également celle du dyke N148° au sud près du lac à l'eau noire;
- la direction NS, est représentée par une portion de la faille du lac Assinica orienté N8° séparant en deux les formations volcano-sédimentaires au nord du territoire et par la faille N-0° près du lac Barlow au sud-est. Cette direction est également celle de 15% des eskers.

Les quatre directions d'orientation des linéaments géologiques structurales se retrouvent également au niveau des données d'images satellitaires mais dans des proportions différentes (tableau 5).

Figure 22. Carte géologique de la région du lac Assinica



## LEGENDE

- Roche volcanique et mafique
- Granite, granodiorite, monzonite, tonalite, pegmatite
- Granodiorite, tonalite, diorite, pegmatite
- Syénite, monzonite
- Roche volcanique felsique indifférenciée
- Rhyolite, rhyodacite, dacite, roche pyroclastique
- Roche pyroclastique felsique, lave felsique
- Roche pyroclastique felsique et mafique, lave felsique
- Roche sédimentaire elastique indifférenciée
- Conglomérat prédominant
- Schiste et gneiss à biotite, andalousite, sillimanite,
- Périodite, pyroxénite, dunite, serpentinite, hornblendite
- Anorthosite, gabbro, pyroxénite, granophyre
- Trondhjémite, diorite quartzifère
- Gabbro
- Intrusion mafique différenciée, gabbro, diorite
- Pyroxénite, gabbro, complexe de carbonate
- Filons-couches ultramafiques-mafiques
- Diorite
- Migmatite indifférenciée
- Roches granitoides de composition granitique à dioritique
- Argile, silt, sable, gravier, bloc, tourbière
- Failles
- Dykes
- Eskers

Figure 23. Carte des linéaments géologiques de la région du lac Assinica

LEGENDE

— Dykes

— Eskers

— Failles

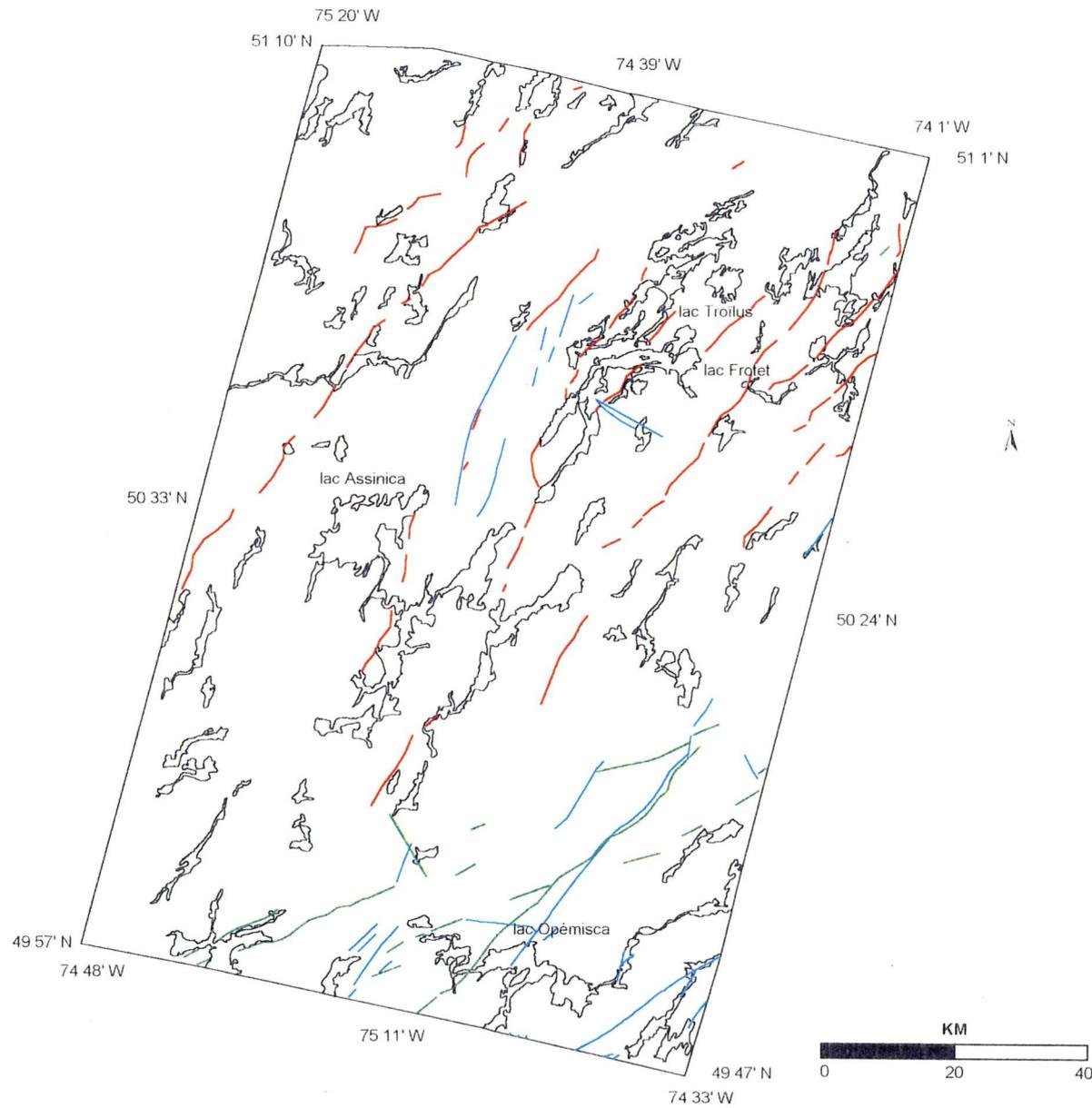


Tableau 5 . Comparaison à l'échelle locale de l'orientation et de la fréquence des linéaments géologiques et d'images satellitaires

Direction d'orientation		NE-SO	E O	NO-SE	N S	Nombres de linéaments
Linéaments géologiques	liés aux socles rocheux	82%	4%	9%	5%	44
	d'origine glaciaire	85%	0%	0%	15%	48
Linéaments d'images satellitaires		80%	7%	9%	4%	634

La superposition des données d'image satellitaire et des données de la carte géologique permet d'identifier un certain nombre de linéaments tracés comme étant des failles, des dykes ou encore des eskers déjà reconnus sur le terrain. Ces linéaments issus de l'image satellite sont souvent parfaitement superposés ou légèrement décalés par rapport aux éléments structuraux du terrain ou encore sont dans le prolongement de ces derniers (figure 24). Ainsi, 13 failles sur 25 sur le terrain sont parfaitement identifiées, de même que 32 eskers sur 48 et 11 dykes sur 19.

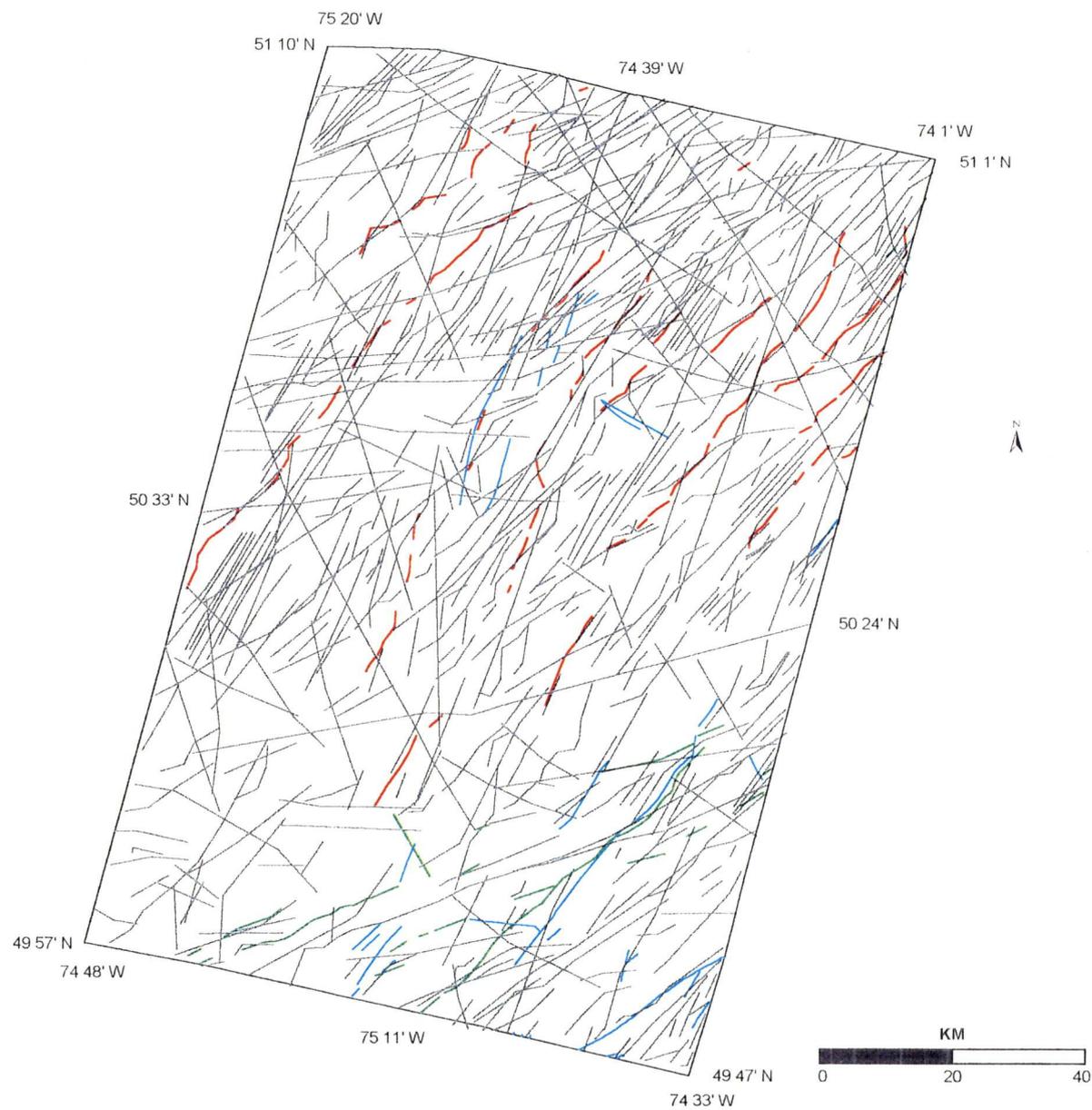
Étant donnée la précision de l'image satellite (inférieure à 70 m, de l'ordre de 2 pixels), le décalage entre les linéaments satellitaires et géologiques peut s'expliquer d'une part, par le géocodage et le rééchantillonnage qui introduisent de l'imprécision dans l'image traitée. D'autre part, les cartes géologiques de compilation introduisent de l'imprécision par l'interprétation des contacts, les changements d'échelle (et parfois de système de projection) et la largeur des lignes .

L'observation de la carte de linéaments géologiques (figure 23), permet de constater également une tendance est-ouest dans l'orientation des dykes et failles au sud du territoire, alors que cette tendance est plutôt nord-est pour les eskers et failles dans partie nord. De plus, on observe

Figure 24. Carte des linéaments géologiques et des linéaments extraits de l'image Landsat-TM

LEGENDE

- Dykes
- Eskers
- Failles
- Linéaments



beaucoup plus de failles et d'eskers dans le nord que de failles et de dykes dans le sud de la région. Cette constatation confirmerait la répartition des éléments structuraux selon deux secteurs tectoniques d'apparence morphologique différente.

De ces analyses, il en ressort que nous pouvons associer une bonne partie de nos observations à des structures déjà existantes avec une plus grande précision. Il faut noter que l'orientation préférentielle NE-SO remarquée sur l'image satellitaire (80% des fréquences) s'avère être également celle des linéaments d'origine glaciaire (85% des fréquences) et des linéaments liés aux socles rocheux (82% des fréquences).

### **5.3.2 Confrontation avec les données lithostratigraphiques**

Les données lithostratigraphiques de la région montrent une grande diversité de formations lithologiques constituées d'alternance de bandes volcano-sédimentaire, plutonique et gneissique d'âge archéen (Gobeil et Racicot, 1983) (figure 22). L'analyse de cette carte à la figure 22 fait ressortir un contraste lithologique entre la partie sud et la partie nord. En effet, le secteur sud a une dominance volcano-sédimentaire et est composé surtout de roches volcaniques. Ce secteur a été divisé par Allard (1979) en deux groupes : le groupe de Roy, à la base à dominance volcanique (basaltes, roches volcaniques felsiques d'origine diverse, rhyolites, pyroclastites felsiques, quelques coulées mafiques, andésites, filons couches comagmatiques de gabbro etc) et le groupe d'Opémisca au sommet à dominance sédimentaire (roches sédimentaires clastiques, grauwackes, argilites etc). Le grain tectonique des roches volcano-sédimentaires est généralement EO dans le sud du territoire. En effet, l'anticlinal de Chibougamau dont l'axe passe au coeur du pluton de Chibougamau, le synclinal de Chibougamau plus au nord qui replisse sur lui-même le complexe de Cummings et plus au sud le synclinal de Chapais sont tous orientés EO (Daigneault et Allard, 1983).

Le secteur nord de la zone d'étude, quant à lui, est constitué dans ses 3/4 de granitoïdes (granites, granodiorites, monzonites, tonalites, pegmatites, syénites etc) et de gneiss (figure 22). Cependant, dans ce secteur nord, on note une bande de roche volcano-sédimentaire s'étendant depuis la région du lac Assinica jusqu'au delà des lacs Frotet et Troilus. Cette bande de roches volcano-sédimentaires selon Simard (1983) a été métamorphisée au faciès schiste vert et au faciès amphibolite. Elle est constituée de laves mafiques, de filons-couches gabbro / diorite, de tufs à minéraux (plagioclase) et de roches sédimentaires (conglomérats, argilites, silts, sables etc) (Simard, 1983). Un pli serré orienté EO apparaît dans la portion sud de cette bande au nord du lac Assinica, tandis que le long du contact nord, le groupe de Troilus est plissé en synclinal serré, déversé vers le nord-ouest et orienté NE-SO (Hocq, 1994). Une structure anticlinale, à plongement vers l'ouest et tronquée par une faille ductile EO, occupe le centre du domaine.

Outre le contraste lithologique entre le nord et le sud du territoire, on note également une différence dans l'orientation générale des formations rocheuses dans les deux secteurs (figure 22). En effet, les formations au sud du territoire ont une tendance ENE-OSO à EO tandis qu'au nord, elles présentent plutôt une tendance ENE-OSO à NE-SO.

Ces contrastes tant au niveau lithostratigraphique qu'au niveau de l'orientation générale des formations rocheuses entre le sud et le nord de la zone d'étude pourraient justifier le patron de linéament de l'image satellite et donc l'existence de deux secteurs tectoniques différents.

### **5.3.3 Confrontation avec les données géochimiques**

Les données géochimiques du territoire sont les résultats d'analyses de prélèvement de sédiments de ruisseaux. Ces analyses ont été faites pour les éléments suivants : cuivre, zinc, plomb, nickel, argent et cobalt. Les données numériques sont fournies par le Ministère des

ressources naturelles. Les prélèvements ont été effectués au niveau du Canton de Lamarck, du Canton d'Opémisca et Cuvier, de la région sud Cuvier, de la région du Lac Frotet et de la région du Lac Troilus (figure 25).

Les divers éléments géochimiques sont essentiellement localisés au niveau des bandes volcano-sédimentaires archéennes au sud du territoire près de Chibougamau et au nord dans la région des lacs Frotet et Troilus. La superposition des linéaments d'images satellitaires et des données géochimiques nous montre que ces derniers se situent dans des zones à concentration d'entrecroisements des linéaments (figure 26). Les principaux paramètres statistiques de base pour chacun des éléments géochimiques sont donnés à l'annexe 8 (teneurs minimale, maximale et moyenne). D'après les tableaux de cette annexe, les concentrations moyennes des éléments géochimiques au sud, principalement celles des sites 3 (cantons d'Opémisca et Cuvier : 23.36 dpm de Ag et 30.51 ppm de Zn) et 4 (région sud Cuvier : 3.54 dpm de Ag et 51.94 ppm de Zn), sont nettement supérieures à celles des sites 2 (région du lac Frotet : 2 dpm de Ag et 25.10 ppm de Zn) et 5 (région du lac Troilus : 2.94 dpm de Ag et 24.17 ppm de Zn). Cette analyse ne se corrèle pas avec quelque particularité évidente ou démontrée de la distribution des linéaments. Toute fois, l'observation de la figure 26 nous permet de montrer que les éléments géochimiques s'agencent selon des axes principaux qui pourraient être associés à des phénomènes structuraux au sud et au nord du territoire.

Figure 25. Carte de localisation des sites géochimiques

LEGENDE

- site 1 (canton Lamarck)
- site 2 (région du lac Frotet)
- site 3 (cantons d'Opémisca et Cuvier)
- site 4 (région Sud Cuvier)
- site 5 (région du lac Troilus)

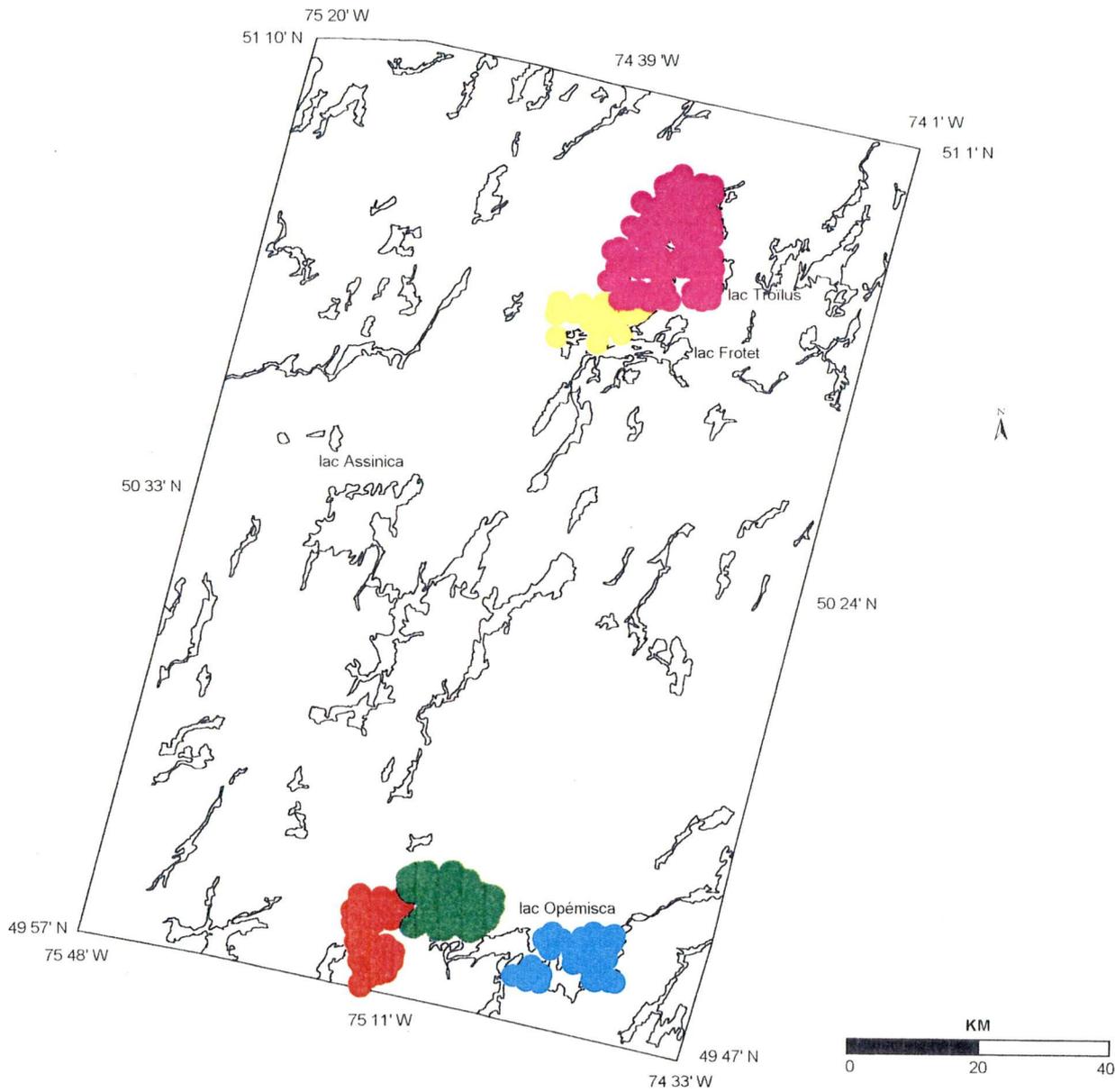
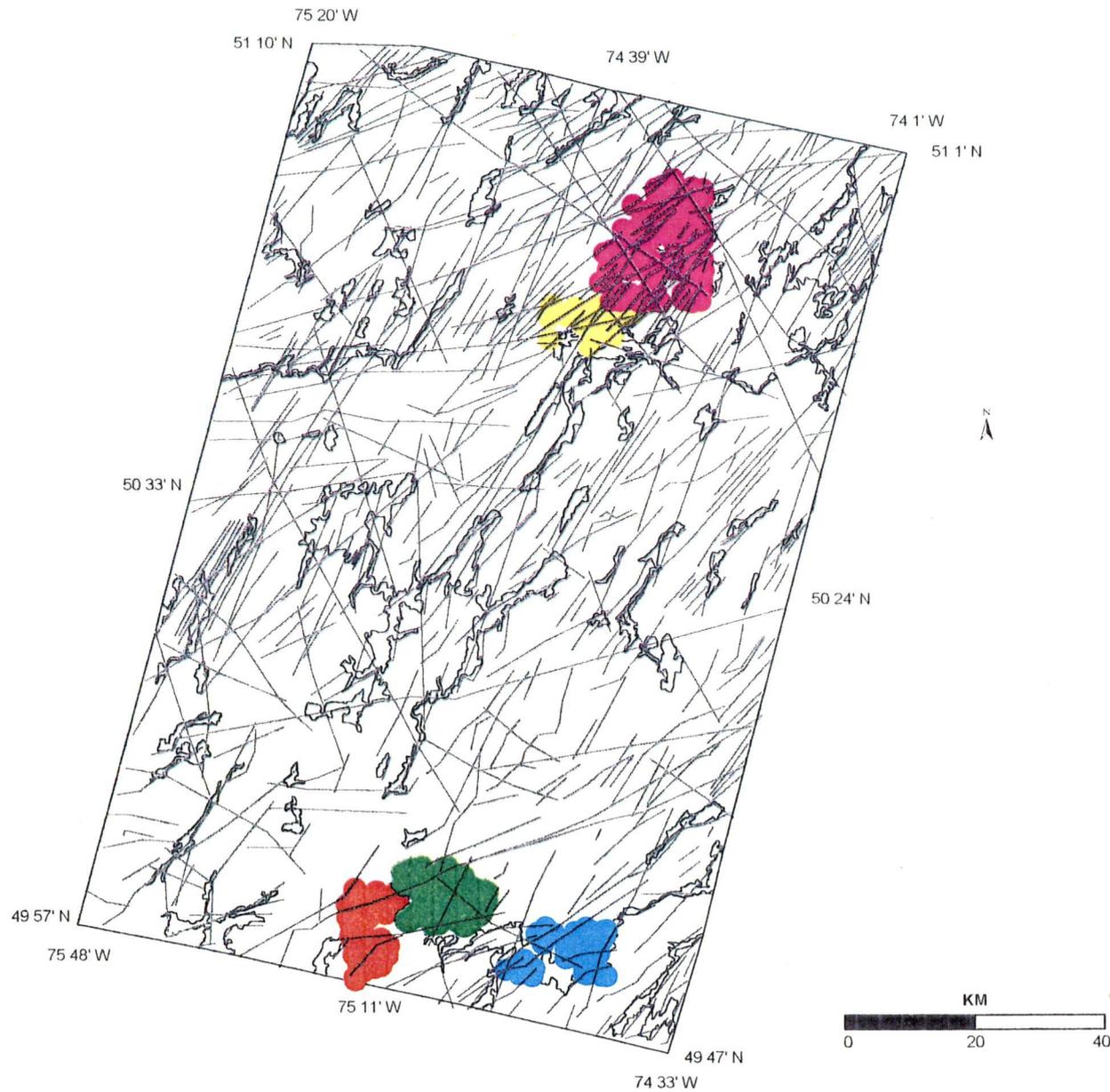


Figure 26. Carte des sites géochimiques et des linéaments  
extraits de l'image Landsat-TM

LEGENDE

- site 1 (canton Lamarck)
- site 2 (région du lac Frotet)
- site 3 (cantons d'Openisca et Cuvier)
- site 4 (région Sud Cuvier)
- site 5 (région du lac Troilus)
- Linéaments



### 5.3.4 Confrontation avec les données de gîtes minéraux

Les données de gîtes minéraux proviennent de la carte de localisation des gîtes minéraux. Tout comme les données géochimiques, les gîtes minéraux sont essentiellement localisés dans les bandes volcano-sédimentaires au sud et au nord du territoire (figure 27).

La superposition des linéaments d'image satellitaire à la carte de gîtes minéraux nous montre que ces derniers se situent dans la plupart des cas soit, le long des linéaments soit, tout près de ces derniers (figure 28). Dans la partie sud de la carte, ces gîtes forment un nuage de points autour d'un axe orienté EO, tandis que dans le nord, cet axe est plutôt orienté NE-SO. Ceci pourrait justifier leur répartition sur des secteurs différents (secteurs nord et sud).

Figure 27. Carte de localisation des gîtes minéraux

LEGENDE

- Cu
- Zn
- Au
- Li
- Py et Po
- Fe
- Ni et Cu
- AsB

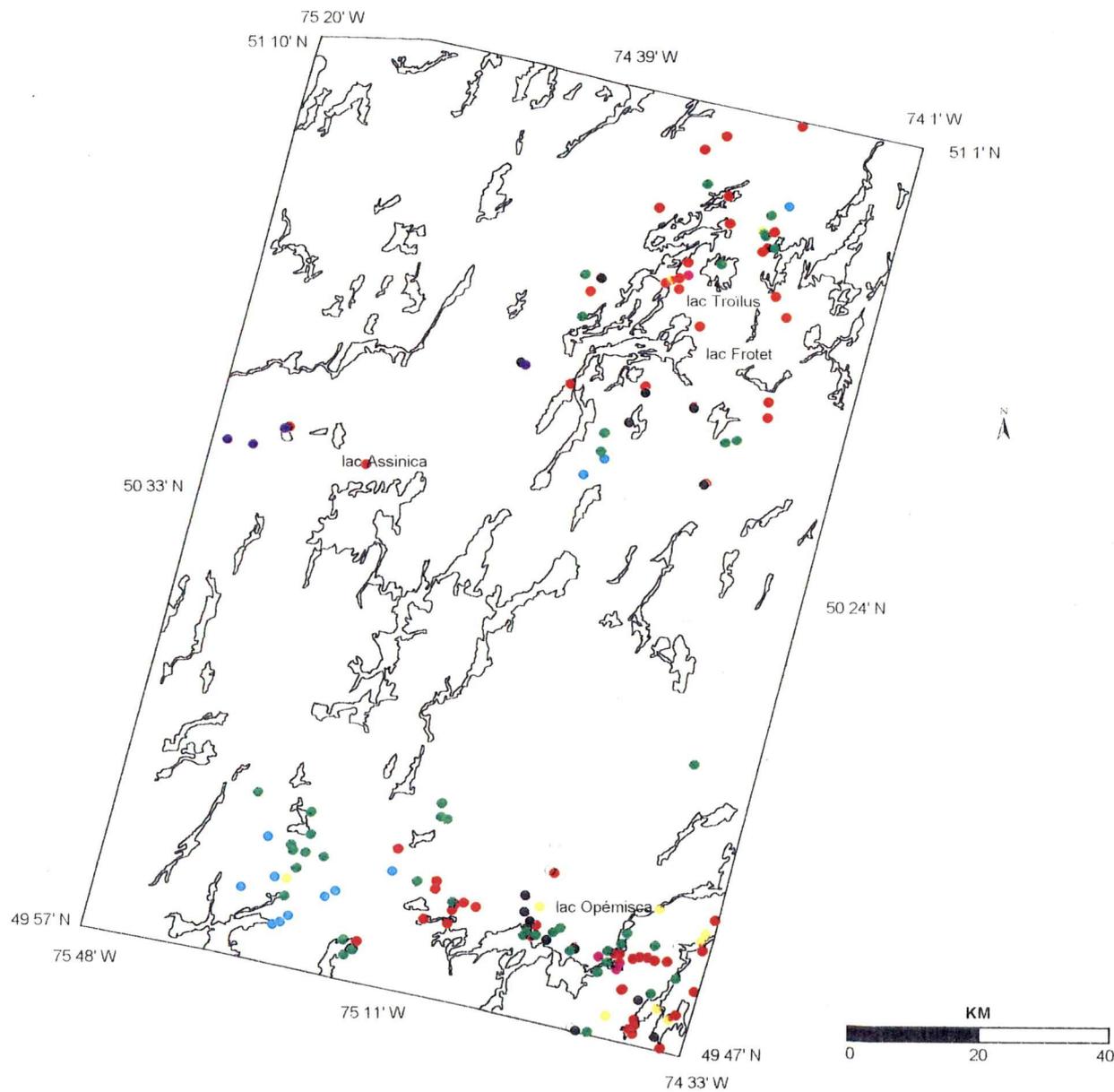


Figure 28. Carte des gîtes minéraux et des linéaments  
extraits de l'image Landsat-TM

LEGENDE

— Linéaments

● Cu

● Zn

● Au

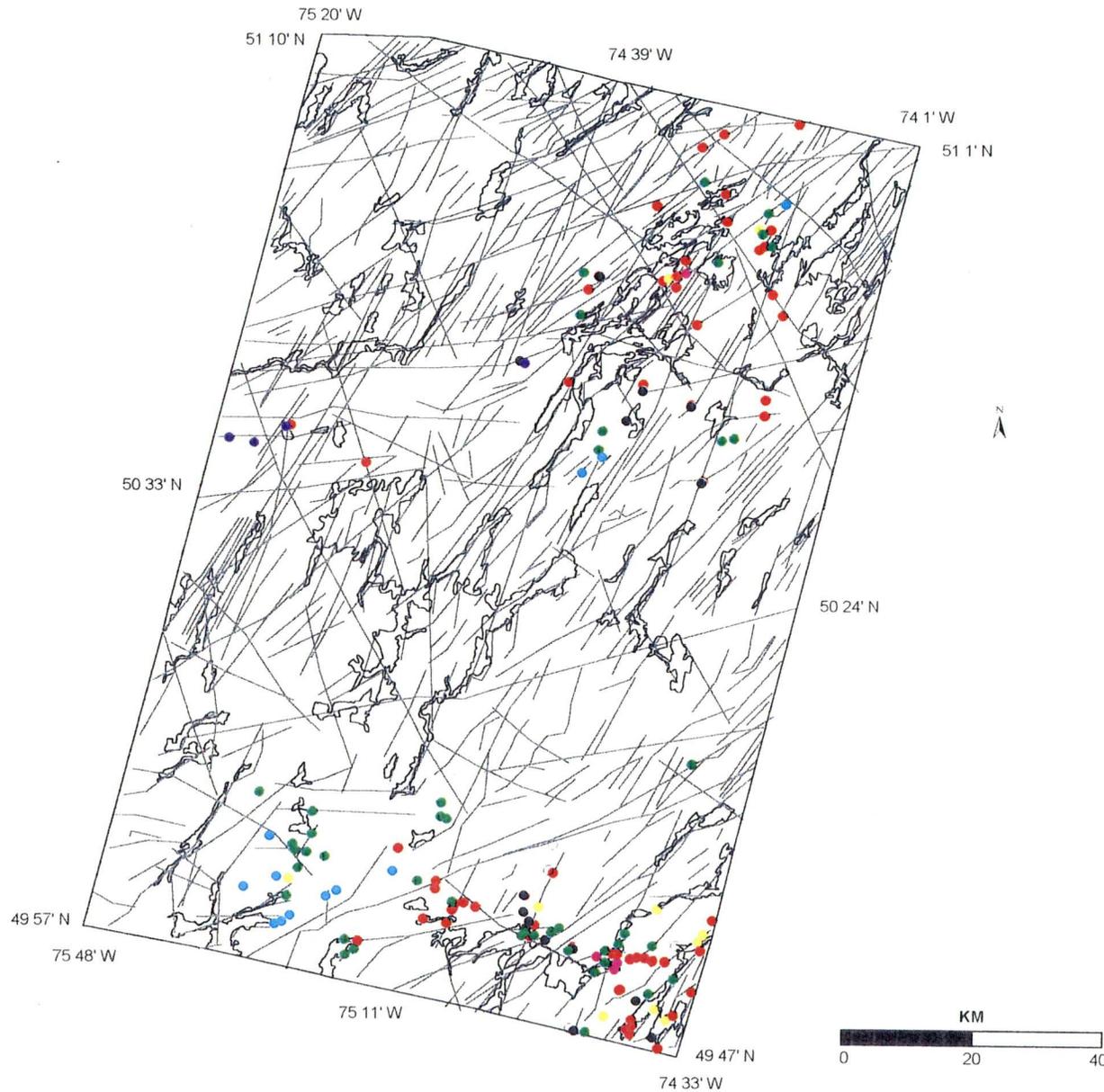
● Li

● Py et Po

○ Fe

● Ni et Cu

● AsB



## CHAPITRE 6

### INTERPRÉTATION ET DISCUSSION SUR LA FRACTURATION

#### 6.1 ÉCHELLE LOCALE

A l'échelle locale, l'analyse statistique et l'observation du patron de la carte de linéaments montrent que ces derniers sont repartis sur deux secteurs différents (nord et sud). La confrontation des résultats avec les données géoscientifiques du terrain permet de confirmer l'existence de deux secteurs différents tant au niveau structural qu'au niveau lithostratigraphique. En effet, le secteur sud de la carte de linéaments de l'image satellitaire, à faible densité et à tendance est-ouest, correspond sur le terrain à la zone sud à dominance volcano-sédimentaire dont les formations lithostratigraphiques et quelques failles et dykes sont orientés selon la direction est-ouest (figure 22). Ce secteur sud, sur le terrain est interprété par Hocq (1990) comme étant la Sous-province volcano-plutonique complexe de l'Abitibi renfermant une portion non négligeable de roches sédimentaires volcanogènes. Elle est subdivisée en terrains et domaines lithotectoniques orientés est-ouest (Hocq, 1990) tout comme les linéaments du secteur sud de la carte de synthèse (figure 10).

Le secteur nord de la carte de linéaments de l'image satellitaire à forte densité et à orientation majeure NE-SO, correspond sur le terrain à la partie nord (figure 22). Ce secteur à dominance de roches granitoïdes et gneissiques présente une bande volcano-sédimentaire qui s'étend de la région du lac Assinica aux lac Troilus et Frotet (figure 22). Les formations lithostratigraphiques de même que les failles et eskers de ce secteur (figures 22 et 23) sont orientés selon la direction dominante NE-SO tout comme les linéaments de la carte de synthèse à la figure 10. Ce secteur nord est interprété par Ciesielski (1986) comme étant la Sous-province tectonique d'Opatica

constituant l'ensemble des terrains qui s'étendent au nord des dernières roches vertes de l'Abitibi jusqu'à la limite des paragneiss qui constituent la majeure partie des Sous-provinces de Nemiscau et d'Opinaca . Les formations lithotectoniques de cette Sous-province ont une tendance NE-SO (Hocq, 1994).

La limite N80° à la figure 16, traversant le territoire d'est en ouest, détectée sur l'image satellite correspond sur le terrain à la limite tectonique entre les deux sous-provinces. Cette limite est interprétée comme un rétrocharriage éventuel de la partie septentrionale de l'Abitibi sur l'Opatica (Sawyer et al, 1990; Hocq, 1990). La présence de deux sous-provinces tectoniques présentant un contraste lithostructural de part et d'autre de la limite, explique donc la différence d'apparence morphologique observée au niveau du patron de linéaments de la carte de synthèse issue de l'image satellite.

L'analyse statistique et l'observation de la carte de linéaments a également révélé quatre grandes familles d'orientation à l'échelle locale (NE-SO, EO, NO-SE et NS). L'interprétation de ces quatre familles est faite en établissant un lien avec les phénomènes géologiques de la région.

La direction NE-SO, la plus importante dans les deux secteurs, représente l'orientation principale du réseau de drainage. Elle se rattache à la direction de la limite tectonique du front de Grenville à déplacement sénestre tout comme d'autres failles importantes de la région (failles de Mistassini, faille de Gwillim, faille du Lac Doré, faille du Lac Taché). Une partie prépondérante des linéaments de cette famille NE-SO (classe d'orientation N30°-N39°) apparaît être d'origine glaciaire, soit des eskers, soit des auges ou des ombilics de surcreusement. Le surcreusement glaciaire qui contrôle l'hydrographie (Vincent, 1989) semble se manifester par des linéaments relativement courts (~20 Km). Cette orientation pourrait aussi être accentuée par l'éclairage solaire sud-est qui lui est perpendiculaire. Tout ceci justifie la distribution polymodale des linéaments de cette classe d'orientation.

La direction EO dans le secteur sud constituée d'assemblages volcano-sédimentaires (roches volcaniques : groupe de Roy et roches volcano-sédimentaires : groupe d'Opémisca) avec une portion de granitoïdes au nord, s'expliquerait par trois axes de plis régionaux : l'anticlinal de Chibougamau qui est la structure la plus importante; un peu plus au nord, le synclinal de Chibougamau qui replisse sur lui-même le complexe de Cumings; et enfin au sud, le synclinal de Chapais. Il existe également une schistosité régionale généralement EO dans ce secteur. Dans le secteur nord, Gillett (1966) explique cette orientation par l'existence dans la zone volcano-sédimentaire au centre-ouest de la région, d'un synclinal dont le plissement est presque isoclinal. En effet les plans de stratification dans cette zone sont caractéristiquement très inclinés et la foliation, généralement EO, est parallèle à la stratification.

La direction NS, la plus faiblement représentée dans la zone entière, serait liée à un système de plis ouverts NS qui sont qualifiés par Daigneault et Allard (1990) de plis précosses ou plis prédéformation régionale.

La direction NO-SE d'après Gobeil et Racicot (1983), correspondrait à une série de cisaillements intenses accompagnés de carbonisation, de silification et de sulfure dans le secteur sud (la plupart des gîtes de cuivre, d'or et d'argent logés dans le complexe du lac Doré sont localisés dans de telles zones). Dans le secteur nord, ces zones de cisaillement s'expliquent par de brusques changements dans la foliation (Murphy, 1962)). Notons également que dans la partie centrale, d'importantes moraines ridées relevées à intervalles arbitraires suivent cette direction NO-SE et sont perpendiculaires aux eskers.

L'abondance de linéaments dans le secteur nord par rapport au secteur sud pourrait s'expliquer d'une part, par l'importance du réseau de drainage dans la partie nord et, d'autre part, par la prédominance des linéaments d'origine glaciaire dans la majeure partie de cette zone.

La confrontation des résultats aux données géologiques du terrain permet de relier les linéaments d'images satellitaires à plusieurs types de linéaments géologiques : i) les phénomènes glaciaires qui incluent non seulement des crêtes morainiques et les eskers, mais aussi les auges et les ombilics de surcreusement, ii) les accidents tectoniques tels que les failles et les dykes.

Un troisième type de linéaments liés au rubanement lithologique qui résulte des différences de résistance à l'érosion liées aux variations de composition des unités géologiques n'a pu être observé du fait de l'abondance de dépôts quaternaires et de la couverture végétale de la région.

Une partie prépondérante des linéaments (en particulier la classe NE-SO) apparaît être d'origine glaciaire, soit particulièrement des eskers (figure 23). De part leur processus de mis en place, ces eskers correspondent à des crêtes allongées, étroites et sinueuses, formées de sédiments glaciaires stratifiés déposés dans des chenaux ou tunnels sous-glaciaires par un cours d'eau s'écoulant sous un glacier stagnant ou en retrait (Cormier, 1992). Ces crêtes sont visibles à la suite de la disparition du glacier. Mis en place après la dernière glaciation wisconsienne, ces eskers indiquent la direction d'un cours d'eau sous-glaciaire et sont, par le fait même, plus influencés par la pente du substratum rocheux et aussi sa topographie (Tremblay, 1973; Vincent, 1989). Toute fois, pour un même esker, ces orientations changent au cours de leur parcours. L'orientation de la totalité des eskers dans la direction NE-SO correspond également sur le terrain à celle du réseau de drainage et de plusieurs failles importantes dans la région telle la faille de Mistassini, la faille de Gwillim, la faille du lac Doré etc. C'est aussi la direction de la limite tectonique du front de Grenville. Le surcreusement glaciaire accentue normalement les faiblesses géologiques préexistantes favorablement orientées et atténue celles qui sont transverses au mouvement glaciaire. La surprise est que les linéaments courts NE-SO correspondant aux eskers sont abondants au nord du territoire étudié qu'à proximité du front de Grenville au sud de Chibougamau où les failles "Grenville" sont nombreuses et bien documentées. Faut-il y voir des structures d'extension pré-Grenville contemporaines de la dispersion d'un mégacontinent tardi-Archéen ou tardi-Protérozoïque inférieur ? Alors, selon cette hypothèse, l'orientation plutôt

NNE que NE du front de Grenville au sud du secteur de Chibougamau pourrait reprendre ces structures d'extension. La répartition spatiale des dykes dans la direction NE-SO au nord-ouest du territoire (au delà des limites de la zone d'étude) d'âge protorozoïque inférieur (Avramtchev, 1985; Fahrig and West, 1986) pourrait étayer cette hypothèse. L'interprétation de certains linéaments comme étant des eskers vient appuyer les résultats et analyses dans la mesure où, ces derniers confirment la tectonique en place.

La distribution des orientations des linéaments longs se fait dans les directions NE-SO, EO et NO-SE. Ces linéaments s'expriment malgré souvent une érosion glaciaire (et peut-être un éclairage) défavorable. Ces linéaments longs, en dépit du léger décalage entre certains éléments linéaires de données satellitaires et de terrain, se corrèlent avec les accidents tectoniques tels que les failles et dykes de la région (figure 24).

La confrontation des résultats aux données géologiques, lithostratigraphiques, géochimiques et gîtes minéraux montre que nous pouvons associer une bonne partie de nos résultats aux structures existantes. Les données satellitaires comparées aux données géologiques ont montré que la direction NE-SO (direction du réseau de drainage) est la direction préférentielle et majeure. Cette direction est suivie des trois autres à savoir : NO-SE, EO et NS dans l'ordre décroissant. Quant aux données géochimiques et de gîtes minéraux, nos résultats nous permettent de montrer qu'elles sont agencées le long des axes de linéaments et dans les zones d'entrecroisements de ces derniers. Par ailleurs, l'occurrence de ces données dans les bandes volcano-sédimentaires au sud et au nord du territoire pourrait s'expliquer par deux phénomènes géologiques : soit que ces concentrations seraient liées au métamorphisme soit qu'elles seraient liées au volcanisme ou souvent à la déformation-cisaillement ductile. Le fait d'avoir des concentrations géochimiques moyennes élevées au sud du territoire par rapport au nord s'explique par le fait qu'une partie importante des linéaments de ce secteur nord sont liés au phénomène glaciaire, soit des eskers qui n'ont aucune incidence sur la minéralisation.

## 6.2 ÉCHELLE RÉGIONALE

A l'échelle régionale, la zone d'étude se situe dans la Province du Supérieur qui constitue le coeur du Bouclier canadien, s'étendant dans la partie occidentale du Québec sur environ 630 000 km<sup>2</sup>. Elle est constituée de terrains d'âge Archéen tardif (2,90 à 2,65 Ga) (Hocq, 1994). Elle est bordée au nord et à l'est par l'orogénèse Trans-Hudson (Province de Churchill) et au sud-est par la Province de Grenville, de laquelle elle est séparée par le Front de Grenville. Au sud, elle est limitée par la Province de Southern et par le rift continental du Keweenaw.

À partir de la carte géologique du Québec au 1/ 1 500 000 (Avramtchev, 1985), nous avons dénombré dans cette Province du Supérieur environ 251 éléments linéaires formés essentiellement de failles et de dykes. Ces éléments linéaires sont regroupés en quatre grandes familles d'orientations dans les proportions suivantes : NE-SO (58%), EO (14%), NO-SE (24%) et NS (4%). Ces proportions vont dans le même ordre d'importance que celles obtenues à partir de l'image satellitaire à savoir : NE-SO (80%), EO (7%), NO-SE (9%) et NS (4%).

En examinant ces résultats, nous nous rendons compte de l'influence de l'organisation structurale régionale de la Province du Supérieur. Cette Province, après l'orogénèse Kénoréenne a été l'objet de plusieurs épisodes tectoniques et orogéniques, suivies d'érosions intenses, de sédimentations et enfin de glaciations au cours des temps géologiques. En effet, à peine constitué à la fin de l'orogénèse Kénoréenne, le Supérieur a été soumis à une érosion intense et a été démembré en plusieurs blocs, mettant en place ces différentes failles ductiles à ductiles-fragiles orientées chronologiquement EO, NO, N-E et NS, dont l'âge varie vraisemblablement d'Archéen à Protérozoïque supérieur (Hocq, 1994).

Outre ces failles, des essaims de dykes de diabase et de gabbro d'âges Protérozoïque inférieur à Cambrien recoupent le Supérieur en tous sens (NS, NO, N-E, EO; Fahrig and West, 1986) et

témoignent de phases d'extension qui ont affecté cette partie de la croûte. À cela, il faut ajouter les différentes phases de glaciation du Quaternaire, dont la dernière (glaciation Wisconsinienne) est responsable des dépôts meubles portant les traces de nombreux eskers, des auges et des ombilics de surcreusement dans le nord du territoire.

## CHAPITRE 7

### CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

#### 6.1 CONCLUSION

L'étude de la région du lac Assinica au nord de Chibougamau, constitue une étape dans l'élaboration du projet Lithoprobe qui a pour objectif d'étudier l'évolution structurale de la croûte terrestre sur 30 à 35 km d'épaisseur.

Pour se faire, il nous fallait une carte de linéaments précise et raffinée. L'apport des données du satellite Landsat-5 TM s'est avéré mesurable en ce sens que nous avons obtenu une vision synoptique du territoire et détecté 634 linéaments contrairement à ceux mis en relief par les travaux de terrain (92 linéaments) avec une précision beaucoup plus nette inférieure à 100 m. Ce qui a permis de combler le vide d'information et de reconnaître de nouveaux linéaments structuraux inconnus jusqu'à maintenant. En outre, nous avons pu détecter grâce à l'image Landsat-TM, la limite tectonique entre les sous-provinces d'Abitibi et d'Opatika.

L'approche méthodologique simple basée sur l'utilisation d'image corrigée géométriquement, le rehaussement d'image (composé coloré, analyse en composantes principales), le filtrage directionnel (filtre de Sobel), la segmentation des histogrammes de fréquences et la "binarisation" d'images filtrées a contribué à l'élaboration d'une carte de linéaments précise et raffinée du territoire. L'analyse statistique des linéaments à l'aide de rosaces directionnelles de 10° d'intervalle a démontré une répartition particulière de l'orientation de ces derniers selon la direction préférentielle NE-SO avec 80% de fréquence.

La confrontation de nos résultats avec les données géoscientifiques à partir d'un système d'information géographique, a permis de faire un lien géologique entre les différents éléments et faciliter leur interprétation en ce sens que :

- nos linéaments d'images satellitaires ont pu être identifiés et reconnus sur le terrain comme étant des failles, des dykes et des eskers;
- les zones d'entrecroisements et de densité élevées de linéaments sont directement reliées aux fortes concentrations d'éléments géochimiques et de gîtes minéraux;
- les linéaments majeurs sont liés à des failles logées en profondeur reliées à de grands mouvements tectoniques à l'échelle du bouclier canadien, quant aux linéaments mineurs, ils sont liés à des phénomènes géologiques locaux (mise en place d'intrusions rocheuses, déformations et plissements locaux) et le plus souvent à des phénomènes glaciaires (eskers, auges et ombilics de surcreusement);
- La disposition des linéaments en quatre familles d'orientations majeures avec une prédominance dans la direction NE-SO aussi bien à l'échelle locale que régionale.

Les objectifs et les hypothèses ont été atteints dans la mesure où grâce aux techniques de la télédétection, nous avons dressé une carte raffinée de linéaments du territoire et montré qu'à partir du comportement spatial d'un linéament sur une image satellite (longueur, structure, orientation, densité), il était possible de fournir des informations sur son origine, sa signification géologique et structurale et son incidence sur la minéralisation.

Toutefois, le manque de cartes géologiques beaucoup plus précises au 50 000 et de données aéromagnétiques couvrant toute l'étendue du territoire n'a pas permis de cerner toute l'information du terrain. Cette étude pourra donc être complétée avec de futures investigations de terrain et des images radars. Cependant, les questions qu'elle soulève (principalement l'abondance de linéaments courts NNE à NE éloignés du front de Grenville et les contrôles de la

distribution des linéaments longs d'autres orientations) peuvent conduire à une meilleure compréhension de la région qui, à son tour, aura un effet positif sur les modèles métallogéniques de la région.

## 7.2 RECOMMANDATIONS

L'utilisation de l'image Landsat pour la cartographie des linéaments s'avère être un outil très riche en informations géologiques. Pour en tirer le maximum de profits, nous formulons un certain nombre de recommandations.

L'observation visuelle comme technique d'identification des linéaments doit être complétée par des techniques de rehaussements par ordinateur (filtrage directionnel à l'aide de filtre de Sobel, rehaussement de contraste). Cependant, certains linéaments sont omis par cette méthode numérique lorsque le gradient directionnel qui les caractérise subit des changements selon les variations subtiles de la topographie, du couvert végétal, de la teneur en eau ou de la lithologie. Ce qui engendre des discontinuités dans le tracé des linéaments. De ce fait, dans ce type d'environnement, la photographie aérienne et surtout les observations de terrain demeurent des approches pertinentes à combiner avec l'analyse numérique.

L'utilisation de quatre images filtrées générées à partir des quatre filtres directionnels de Sobel, permet de détecter les linéaments selon des plages de  $45^\circ$  et donc de les cerner dans toutes les directions possibles.

Il est toujours important de confronter les résultats d'images satellitaires aux données géoscientifiques à l'aide d'un système d'information à références spatiale afin de faire une corrélation et un lien géologique significatif entre les divers éléments et d'améliorer l'analyse et

l'interprétation des résultats.

La division de la zone d'étude en secteurs tectoniques où les structures géologiques ont les mêmes tendances et la même morphologie s'avère une approche intéressante dans la mesure où elle permet une bonne catégorisation des linéaments et facilite leur analyse et leur interprétation .

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdou, I.E and Pratt, W.K (1979) Quantitative Design and Evaluation of Enhancement / Thresholding Edge Detectors. Proceeding of the IEEE, vol. 67, no. 5, pp. 753-763.

Allard, G.O. et al (1979) Stratigraphie et métallogénie de la région de Chibougamau. Association géologique du Canada, Association minéralogique du Canada; Congrès de 1979, à l'université Laval, Québec; livret-guide pour l'excursion B-1, 95 p.

Avramtchev, L. (1985) Carte géologique du Québec au 1/ 500 000. Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale. Carte No. 2000 du DV 84-20.

Biémi, J. et al. (1991) Géologie et réseaux de linéaments, région du bassin versant de la Marahoué, Côte d'Ivoire : cartographie à l'aide des données Landsat-TM et du champ magnétique total. Télédétection et gestion des ressources, vol. vii, Paul Gagnon (éd), Association québécoise de télédétection 1991, pp. 134-145.

Blusson, A., Masson, P. et Nguyen, P.T. (1985) Détermination automatique de rosaces directionnelles à partir de données de télédétection, apport à une étude classique de la tectonique régionale (Cévennes), résultats préliminaires. Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, no.98-2, pp. 7-21.

Burdick, R.G. and Spirer R.A. (1980) Development of a method to detect geological faults and features from Landsat images. U.S Bureau of Mines Rpt.Inv. 843 : 74.

Card, K.D., and Ciesielski, A. (1986) Subdivisions of the Superior Province of the Canadian Shield. Geoscience Canada, DNAG no. 1, vol. 13, pp. 5-13.

Colwell, R. (1983) Manual of Remote Sensing, vol. I et II. Falls Church, VA. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 21-23.

Cormier, C (1992) Vocabulaire canadien du quaternaire. Bulletin de terminologie 209. Ministère des Approvisionnements et Services Canada, Groupe Communication Canada, Édition Ottawa, 26 p.

Daigneault, R. et Allard, G.O. (1983) Stratigraphie et structure de la région de Chibougamau, Stratigraphie des ensembles volcano-sédimentaires archéens de l'Abitibi : état des connaissances. Ministère de l'énergie et des ressources, DV 83-11, pp.1-17.

Daigneault, R. et Allard, G.O. (1990) Le complexe du Lac Doré et son environnement géologique (Région de Chibougamau - sous-province de l'Abitibi). Ministère de l'énergie et des ressources, Direction générale de l'exploration géologique et minérale, MM 89-03, pp.1-275.

Daoust, J., Gwyn, Q.H.J. et Roux, C. (1989) Méthode assistée par ordinateur d'identification et d'analyse des linéaments géologiques à l'aide d'une image ROS, résultats préliminaires. Proceedings of IGARSS 1989, Vancouver, B.C., p. 101-104.

Deslandes, S. (1986) Évaluation des images Spot et Seasat pour la cartographie des linéaments du secteur des Monts Stoke, au Québec: une comparaison basée sur l'analyse du spectre de Fourier. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 62 p.

Deslandes, S. (1990) Initiation aux méthodes de traitement numérique des images satellites, sur le système PCI Inc., EASI/PACE . CARTEL, 32 p.

Deslandes, S. et Gwyn, Q.H.J. (1991) Évaluation de SPOT et SEASAT pour la cartographie des linéaments : comparaison basée sur l'analyse de spectres de Fourier. *Journal canadien de télédétection*, vol. 17, no. 2, p. 98-110.

Douglas, R.J.W. et Tremblay, L.P. (1972) Géologie et ressources minérales du Canada. Série de la géologie économique no. 1 et 2, Commission géologique du Canada, Ministère de l'énergie, des mines et ressources, Canada, 934 p.

Drury, S.A (1986) Remote Sensing of Geological Structure in Temperate Agricultural Terrain. *Geological Magazine*, vol. 123, no. 2, pp. 113-121.

Duquette, G. (1970) Stratigraphie de l'Archéen et relations métallogéniques dans la région de Chibougamau. Ministère des richesses naturelles, Québec; ES-8, 18 p.

Fahrig, W.F. et West, T.D. (1986) Essaims de dykes diabases du bouclier canadien. Commission géologique du Canada; carte 1627 A.

Fontanal, A. and Lallemand, B.C. (1975) Enhancement of Landsat imagery by combination of multispectral classification and principal component analysis. *Proceedings of the NASA Earth Resource Survey Symposium*, IB, pp. 991-1012.

Fraipont, P. et Hirsch, J. (1986) Analyse linéamentaire : Procédure de traitement automatique de données télédétectées. *Colloque int. : Computers in earth sciences for natural resources characterization*. J.J. Royer ed., Nancy, France, 9-13 Avril, p. 399-412.

Gillespie, A.R. (1976) Directional fabrics introduced by digital filtering of images. Proceedings of the second international conference on tectonics, Delaware, pp.500-507.

Gillett, L.B. (1966) Géologie de la région du lac Assinica, Territoire d'Abitibi, Rapport préliminaire. Ministère des richesses naturelles, Québec, R.P. no. 550.

Gobeil, A. et Raciot, D. (1983) Carte lithostratigraphique de la région de Chibougamau. Ministère de l'énergie et des ressources du Québec, MM 83-02, 14 p.

Hocq, M. (1990) Carte lithotectonique des Sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Québec; DV 89-04.

Hocq, M. (1994) La Province du Supérieur. Géologie du Québec, Les publications du Québec, MM 94-01, pp. 7-19.

Hocq, M. et Verpaels, P. (1994) Les Sous-provinces de l'Abitibi et du Pontiac. Géologie du Québec, Les publications du Québec, MM 94-01, pp. 21-37.

Hornsby, J. and Bruce B. (1985) A preliminary analysis of Landsat MSS and TM data in the Levack area, sudbury, Canada. IGARSS Remote sensing instrumentation : technology for science and application, oct 7-9 , University of Massachusets, Amherst, pp. 131-140.

Hornsby, J., Rencz, A.N. and Bonham-Carter, G.F. (1984) Comparison of techniques for enhancing geological lineaments from Landsat data, with application to Nahanni river, Yukon territory. Proceedings of the 9th Canadian Symposium on Remote Sensing, St-John's, Newfoundland, Aug 14-17, 1984, pp. 387-395.

Marion, A. (1987) Introduction aux techniques de traitement d'image. Paris, Éditions Eyrolles, 278 p.

Milnitchouk, V. et Arabadji, M. (1979) Géologie générale. Traduction française, Édition Mir-Moscou, 1983, 447 p.

Moore, G. and Frederick, W. (1983) Objective procedure for lineament enhancement and extraction. Photogrammetrie Engineering and Remote Sensing, vol. 49, p. 461-647.

Murphy, D.L. (1962) Géologie de la région du lac Frotet, Territoires d'Abitibi et de Mistassini, Rapport préliminaire. Ministère des richesses naturelles, Québec, R.P. no. 476.

Murphy, D.L. (1963) Géologie de la région du lac Troilus, Territoire d'Abitibi, Rapport préliminaire. Ministère des richesses naturelles, Québec, R.P. no. 508.

O'Leary, D.W., Frieddman, J.D. and Pohn H.A. (1976) Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. Geological Society of America Bulletin, vol. 87, pp. 1463-1469.

Picard, C. (1986) Pétrographie et géochimie des roches volcaniques archéennes à l'ouest de Chapais, Sillon de Matagami-Chibougamau. Ministère de l'énergie et des ressources du Québec, MM 85-01, 95 p.

Pouliot, G. (1986) Intégration de données satellites dans l'évaluation de cibles de prospection minière dans la bande volcano-sédimentaire Ascoot-Weedon, cantons de l'est, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 64 p.

Premmanee, J. (1989) Lineament mapping from Landsat TM and C-SAR of part of the sudbury structure. Proceedings of the 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Alberta, Canada, Oct 2-6, 1989, pp. 997-1010.

Pretorius, J.P.G and Partridge, T.C (1974) Analysis of angular atypicality of lineaments as aid to mineral exploration. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 74, no. 10, may 1974, pp. 367-369.

Rolet, J., Yésou, H. et Besnus, Y. (1991) Structures circulaires et réseaux de fractures en pays granitique (Massif Armonicaïn), Analyse de données SPOT, Landsat et SEASAT . Soumis pour publication au Bulletin de la Société Géologique de France , déc. 1991.

Sabins, F.F. Jr. (1986) Remote sensing principles and interpretation. Second edition, Freeman, 441 p.

Saint-Jean, R. (1992) Analyse structurale et lithologique d'une image radar en bande C, Région de l'Inlet de Bathurst, T.N.O (Nunavut), Canada. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 109 p.

Salman, W.P. and Solotareff, M.S. (1982) Le filtrage numérique. Éditions Eyroles, Paris, 174

Sawyer, E.W. and al. (1990) Structural relationship in the Opatica Subprovince. In : Lithoprobe, projet Abitibi-Grenville project, rapport d'atelier III, Montréal, pp. 13-16.

Scanvic, J.L. (1993) Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre, Manuels et méthodes, no. 7, B.R.G.M., 158 p.

Seidman, J.B. (1972) Some practical applications of digital filtering in image processing: Proceedings in image processing. Proceedings of the computer image processing and recognition symposium, University of Missouri, Missouri, pp.9-1-1 - 9-1-12

Shupe, S.M. and Akha V. (1989) Integration of remotely sensed and G.I.S Data for mineral exploration : Halifax area, Nova Scotia, Canada. Geocarto international, A multi-disciplinary journal of remote sensing, pp. 49-54.

Simard, A. (1983) Stratigraphie de la région des lacs Frotet et Troilus, bandes Frotet-Evans, Stratigraphie des ensembles volcano-sédimentaires archéens de l'Abitibi : état des connaissances. Ministère de l'énergie et des ressources, Québec, DV 83-11, pp. 83-91.

Simard, A. (1987) Stratigraphie et volcanisme dans la la partie orientale de la bande volcano-sédimentaire archéenne Frotet-Evans. Ministère de l'énergie et des ressources, Québec, MB 87-17, 320 p.

Singhroy, V.H., Lowman, P.D. and Morasse, C. (1993) ERS-1 of the Sudbury Bassin: initials results. xvi<sup>e</sup> Symposium canadien sur la télédétection, viii<sup>e</sup> Congrès de l'Association québécoise de télédétection, P.Gagnon et N.O'Neill (eds.), Sherbrooke, pp.277-282.

Soesilo, I. and Hoppin, R.A. (1986) Evaluation of digitally processed Landsat imagery and SIR-A imagery for geological analysis of West Java region, Indonesia. Symopisum on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management, pp. 173-182.

Tanguay, M.G. et Seuthé, C. (1983) Base d'un guide d'utilisation des images Landsat en géologie. 8e Symposium canadien de télédétection et 4e Congrès de L'Association québécoise de télédétection, 3-6 Mai 1983, Montréal, Québec, p. 733-745.

Tremblay, G. (1973) Géologie du quaternaire, Région d'Abitibi, Centre-Ouest, Comtés d'Abitibi-Ouest, d'Abitibi-Est et de Rouyn-Noranda. Ministère des richesses naturelles, Direction Générale des Mines, Service de l'exploration géologique; D.P-123, 39 p.

Vincent, J.S. (1989) Le Quaternaire du sud-est du bouclier canadien. Le Quaternaire du Canada et du Groenland, chap.3, sous la direction de R.J. Fulton. Commission géologique du Canada, Vol.1, pp.266-340.

Weecksteen, G. (1980) Exemples d'application de la télédétection à la cartographie minière et à la recherche géologique. Société française de photogrammétrie, no. 77, pp. 5-20.

Yatabe, S. and Howarth, P.H. (1984) Lineament enhancement and interpretation in northern Ontario from airborne, multispectral scanner data. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing, 3d Thematic conference, Remote Sensing for exploration Geology, pp. 1-8

**ANNEXES**

## Annexe 1

Applications et propriétés des bandes du satellite Landsat-5 TM

Bande du CT	Micromètre(s)	Portion du spectre	Applications
1	0,45 - 0,52	Bleu	À ne pas utiliser seule étant donné le faible contraste obtenu et sa sensibilité à la brume.
2	0,52 - 0,57	Vert	À ne pas utiliser seule étant donné le faible contraste obtenu et sa sensibilité à la brume.
3	0,63 - 0,69	Rouge	Parfait pour distinguer les routes et les autres éléments non couverts de végétation comme les affleurements et les régions d'agrégats à découvert. Pas particulièrement utile pour identifier les nappes d'eau ou les relations entre la géologie et la végétation.
4	0,76-0,90	Proche infrarouge	Meilleure bande pour la délimitation des variations dans une couverture végétale se composant de feuillus et de conifères. Les relations entre les espèces végétales (associations végétales — géologie régionale) indiquent souvent des variations dans la lithologie, la structure ou la géologie des formations superficielles. Enfin, cette bande est utile pour délimiter les nappes d'eau.
5	1,55 - 1,75	Infrarouge à ondes courtes (IROC)	Peut-être la meilleure bande à utiliser seule pour obtenir des images afin d'interpréter la géologie de terrains couverts de végétation. Produit un contraste entre les chemins et les affleurements, d'une part, et le couvert forestier environnant, d'autre part. Permet de distinguer les nappes d'eau et les variations dans la composition des forêts. Pénètre bien la brume et produit en général un bon contraste sur l'ensemble de l'image.
6	10,8 - 12,5	Infrarouge thermique (émission)	Cette bande spectrale réagit au rayonnement thermique (chaleur émise par la matière). La résolution spatiale de cette bande (120 m) est toutefois moins bonne que celle des autres bandes (30 m), ce qui cause des difficultés dans l'analyse multispectrale et la combinaison des bandes. Cette bande pourrait être utilisée dans des applications géothermiques et hydrogéologiques.
7	2,08 - 2,35	Infrarouge à ondes courtes (IROC)	Cette bande pénètre mieux la brume que la bande 5, qui est aussi une bande de l'infrarouge réfléchi. Toutefois, la qualité de l'image est en général moins bonne que dans le cas de la bande 5, parce que le rapport signal-bruit est ici moins élevé. La bande 7 peut s'avérer utile pour détecter des minéraux argileux (altération) dans des terrains non couverts de végétation, en raison de l'absorption dans ces longueurs d'onde.

Applications et propriétés des bandes du satellite Landsat-5 TM en géologie  
(Centre canadien de télédétection)

**Annexe 2**

Filtres spatiaux 3 x 3 de rehaussement de linéaments

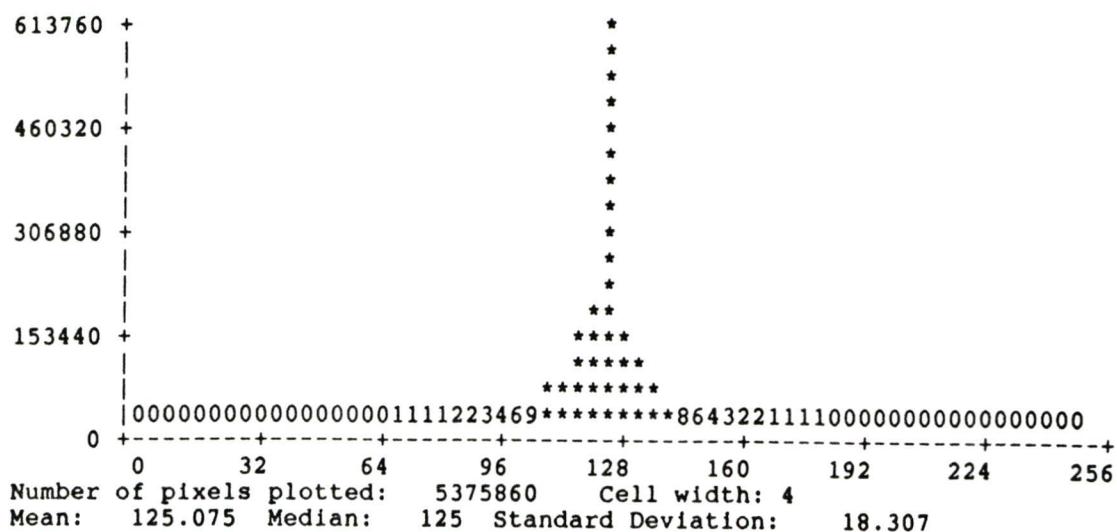
Comme filtres 3 x 3, nous avons utilisé les filtres passe-haut et Laplacien qui ont pour effet d'accentuer les arêtes et le filtre directionnel (gradient directionnel dans une direction donnée). Le filtre directionnel permet de contourner le biais de rehaussement préférentiel causé par la direction d'éclairage en introduisant des attributs directionnels dans la matrice de convolution (Drudy, 1986). La direction du filtre se manifeste par l'opposition des signes selon un des axes de la matrice. Ainsi, la dérivée NS accentue les linéaments orientés EO, provoquant un effet d'ombrage sur l'image filtrée, comme si elle était éclairé par une source de rayonnement provenant du nord (Deslandes, 1989).

#### Filtres spatiaux 3 x 3 de rehaussement des linéaments

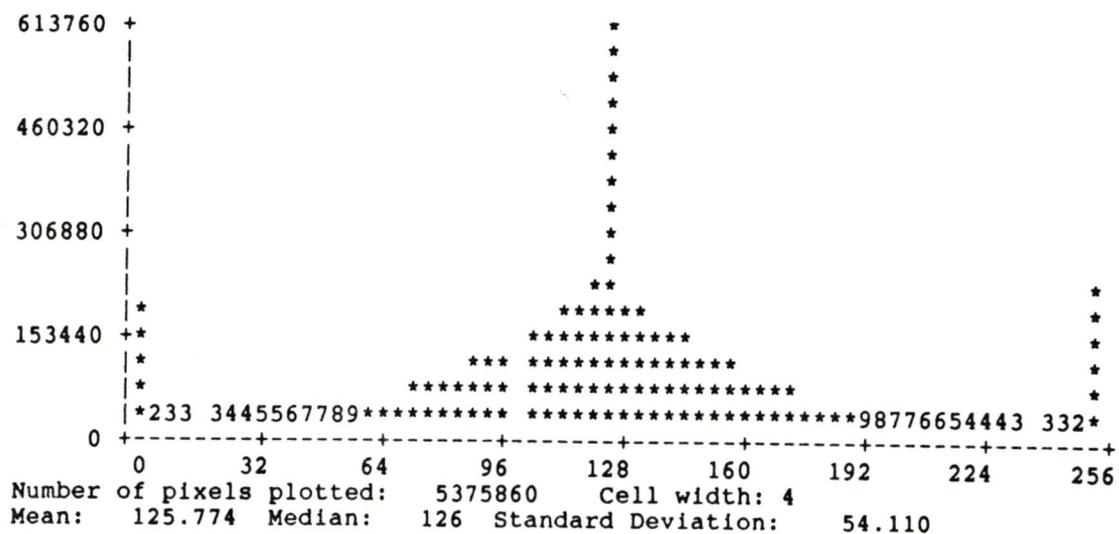
Passe-haut	Laplacien	est	Directionnel nord-est	nord
$\begin{vmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 9 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{vmatrix}$	$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{vmatrix}$

### Annexe 3

Histogrammes des images filtrées avant et après la segmentation

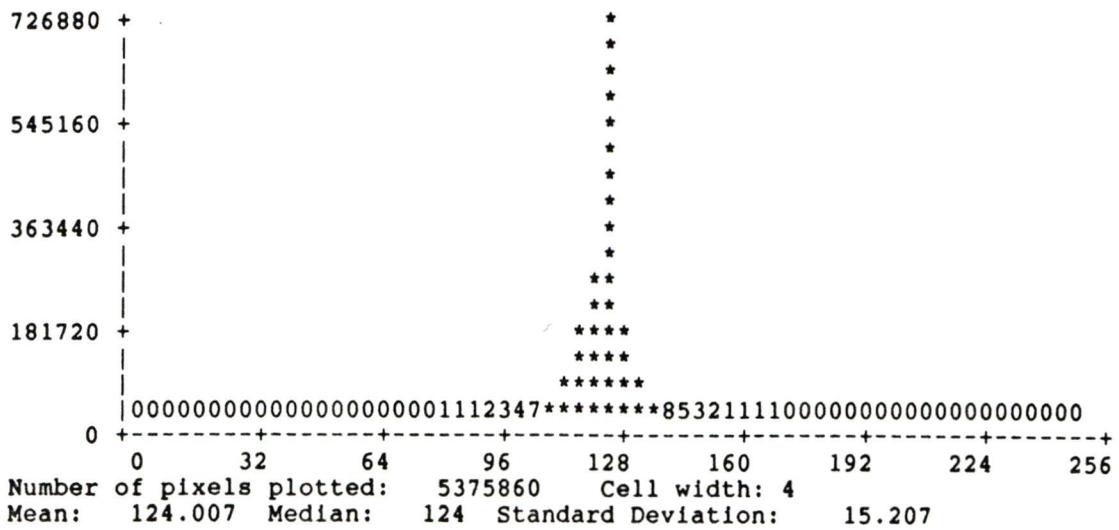


Histogramme de l'image du filtre N O non rehaussée

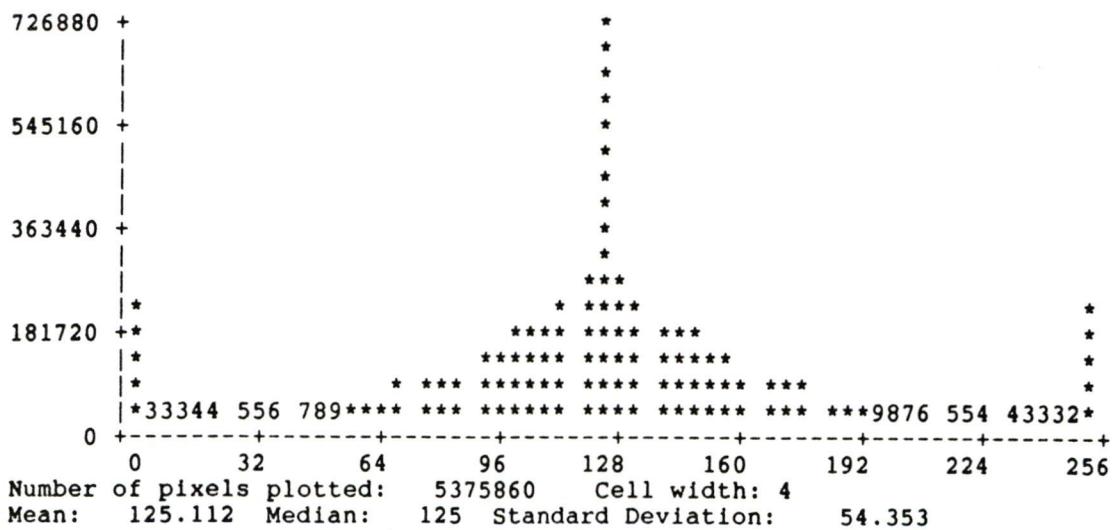


Histogramme de l'image du filtre N O rehaussée

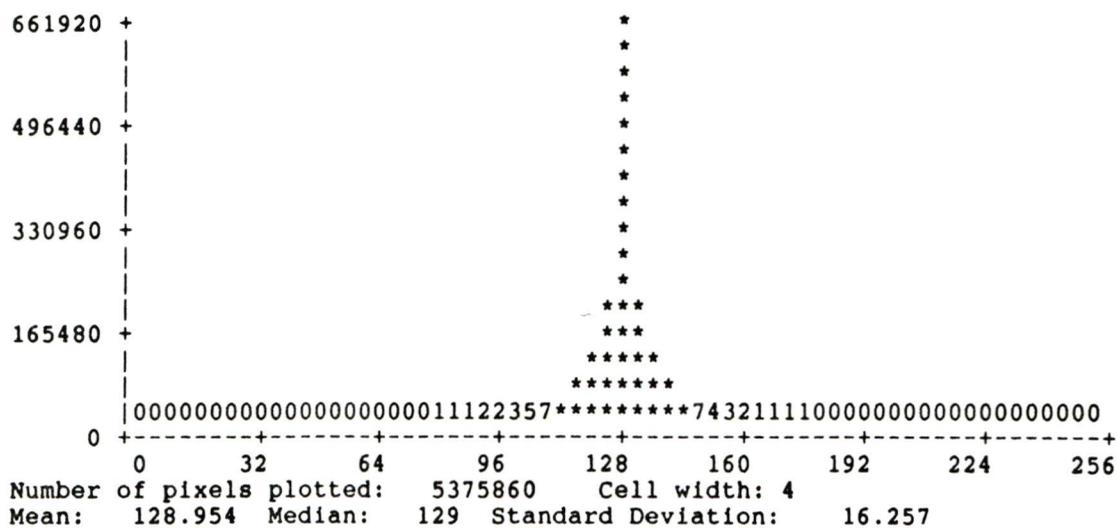




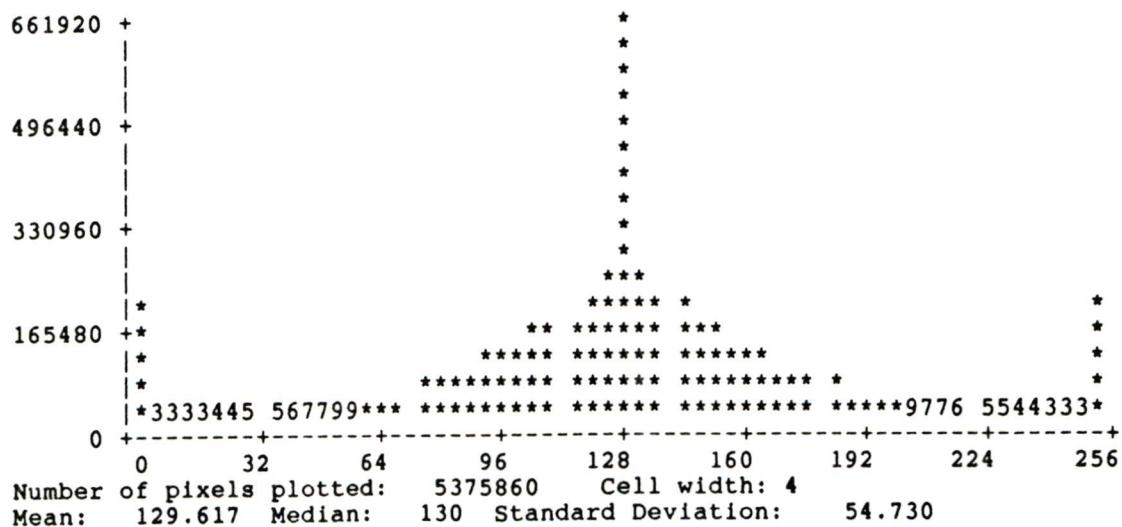
Histogramme de l'image du filtre S O non rehaussée



Histogramme de l'image du filtre S O rehaussée



Histogramme de l'image du filtre S non rehaussée



Histogramme de l'image du filtre S rehaussée

#### **Annexe 4**

Images binaires de linéaments

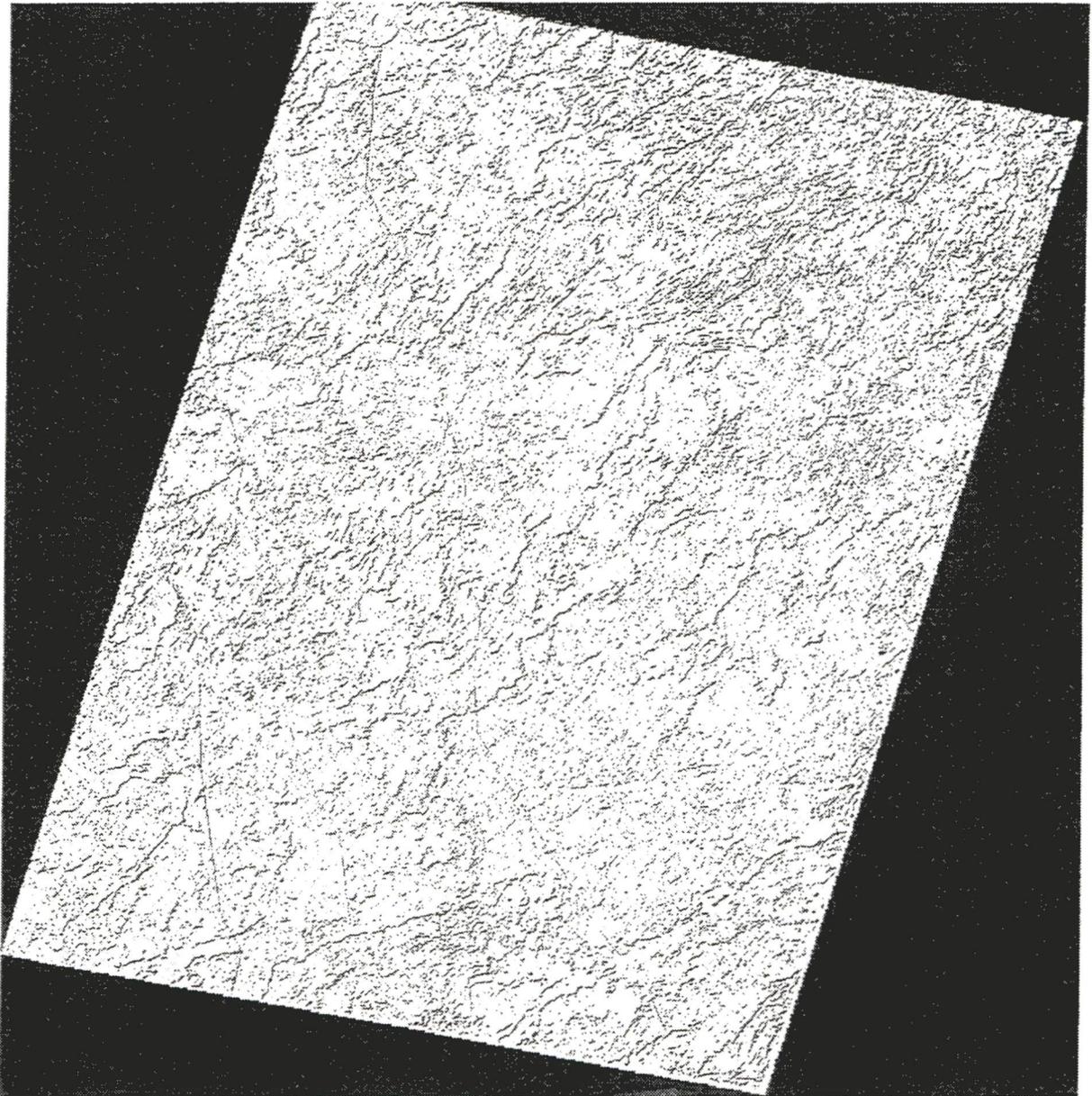


Image binaire de linéaments issue de l'image du filtre directionnel NO

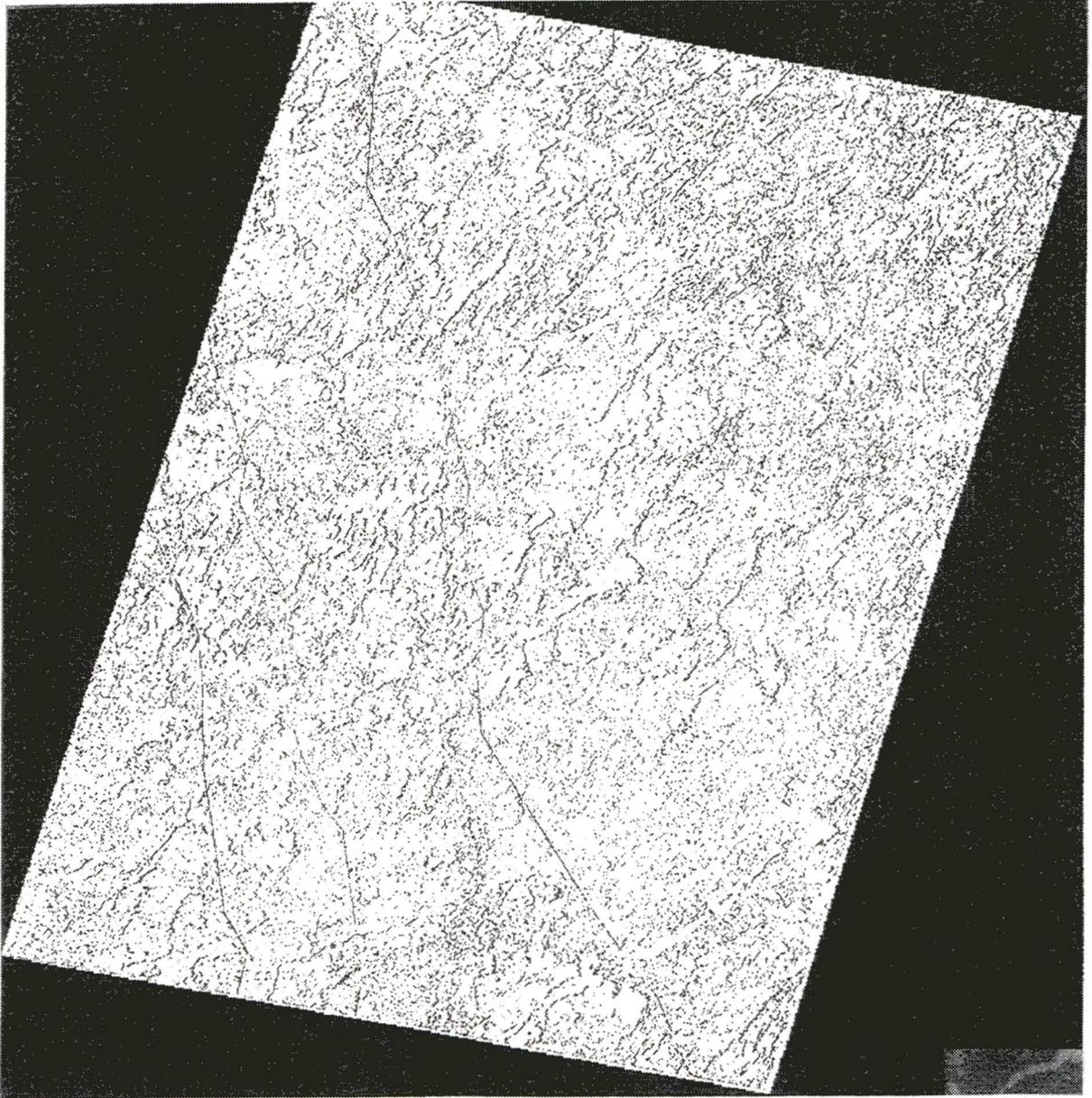


Image binaire de linéaments issue de l'image du filtre directionnel O

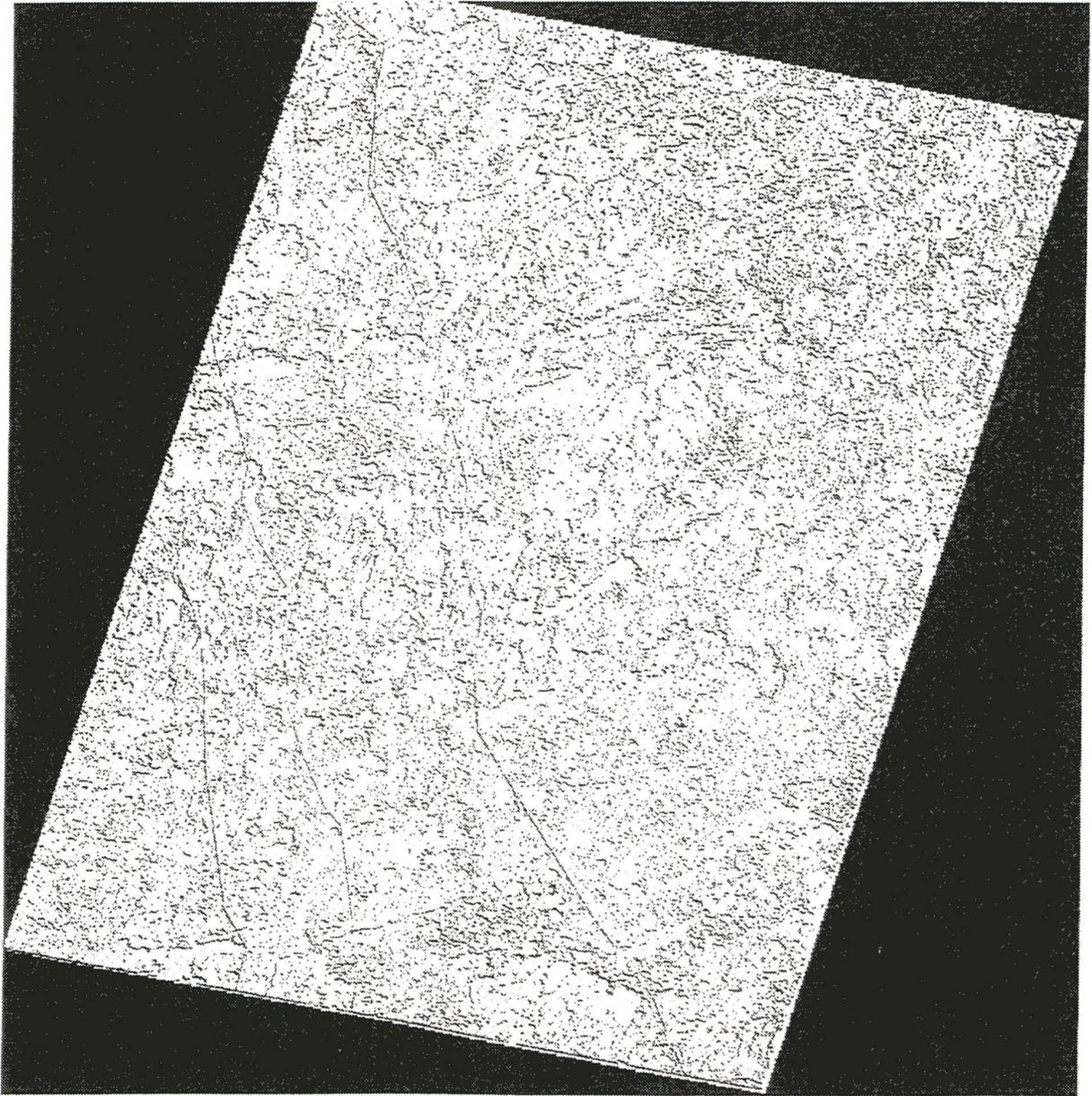


Image binaire de linéaments issue de l'image du filtre directionnel SO

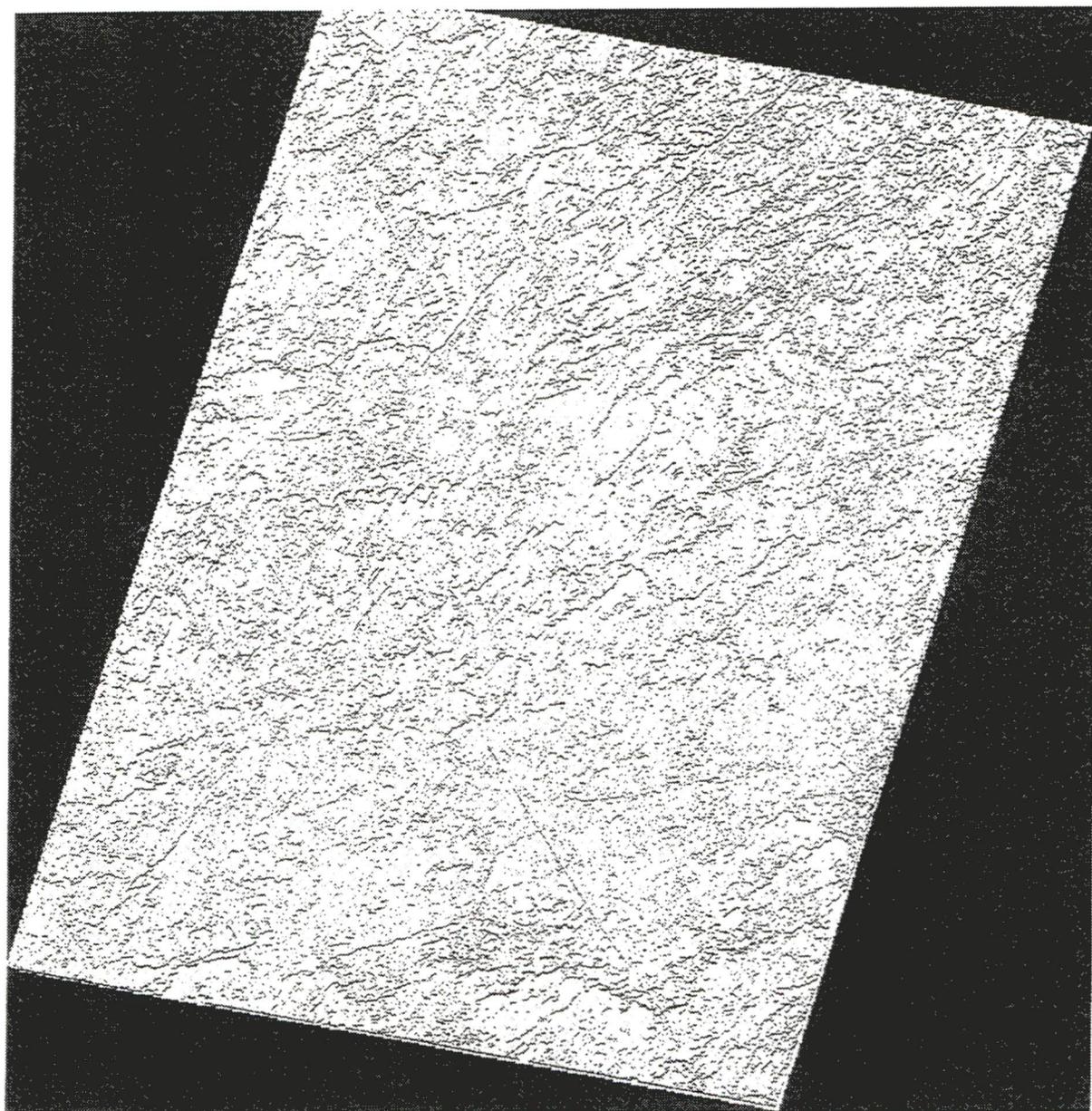
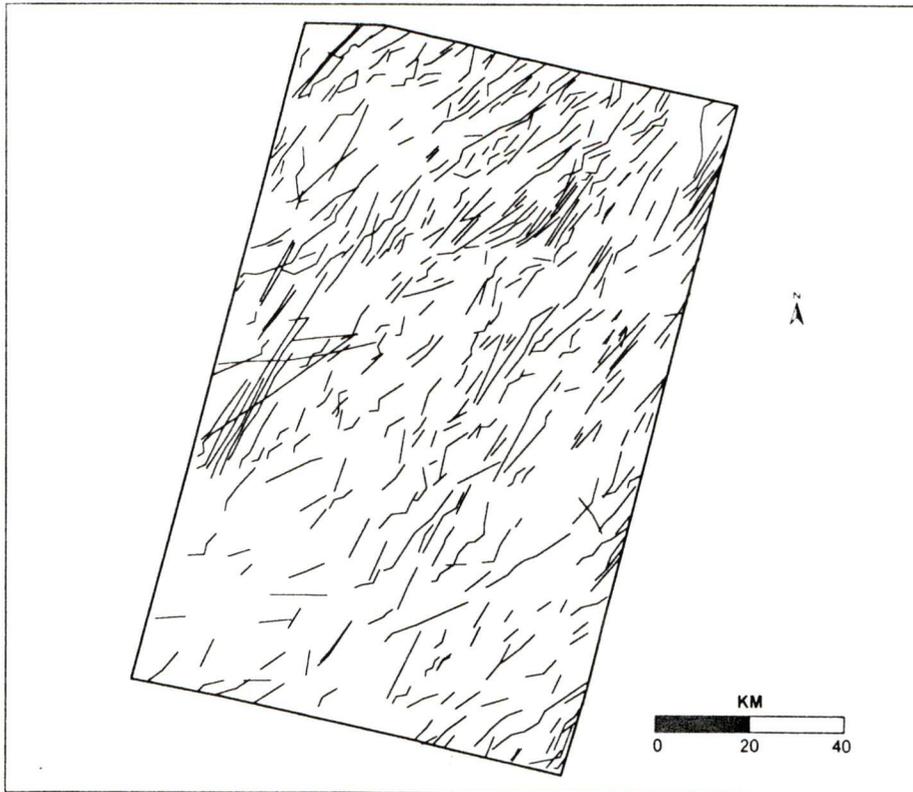


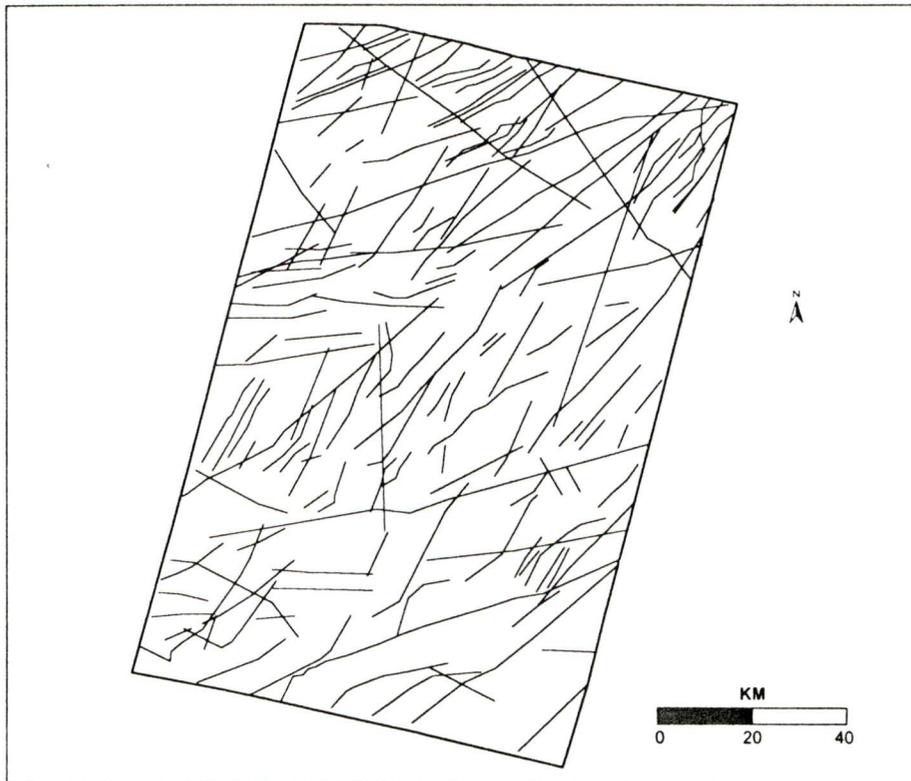
Image binaire de linéaments issue de l'image du filtre directionnel S

**Annexe 5**

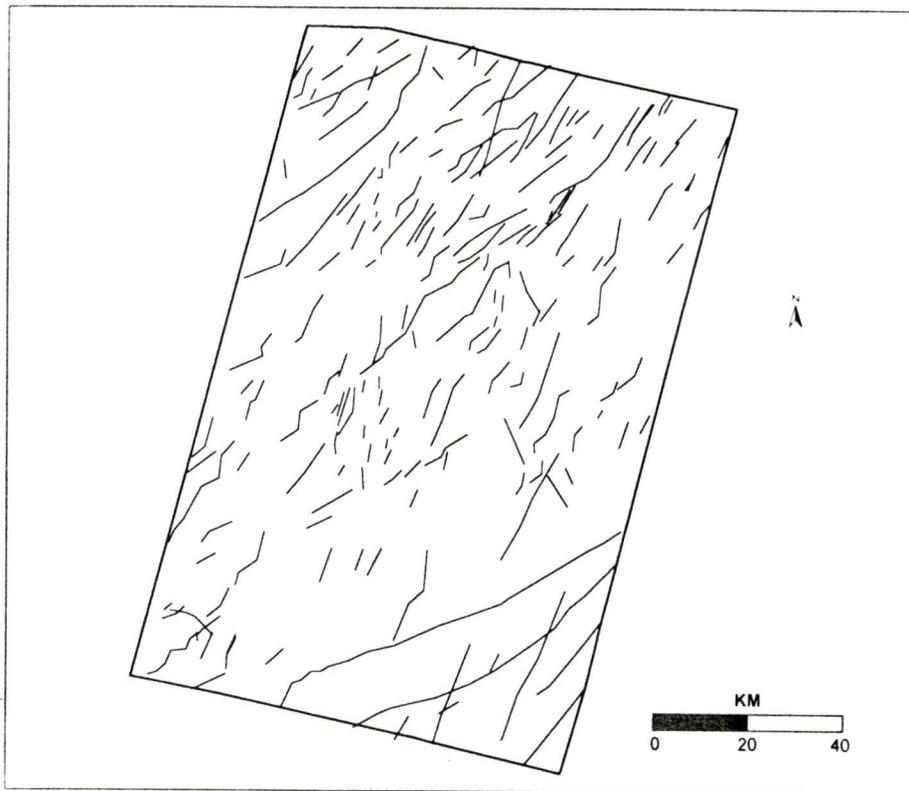
Cartes des linéaments issues des rehaussements et filtrages directionnels de Sobel



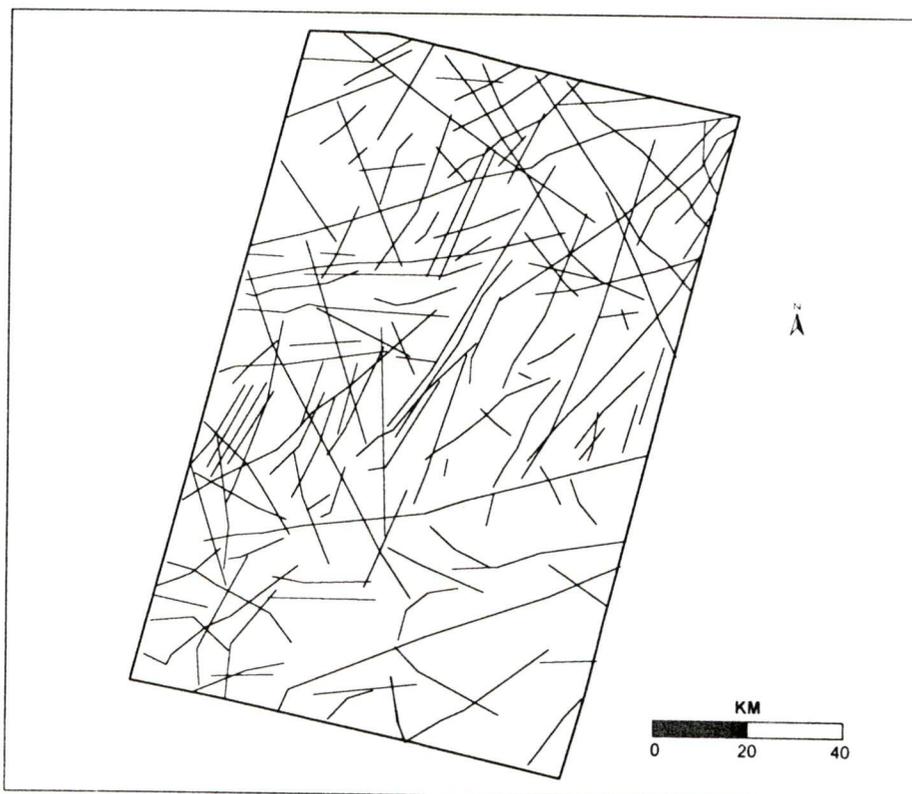
Carte de linéaments issue du filtrage et du rehaussement directionnel NO



Carte de linéaments issue du filtrage et du rehaussement directionnel S



Carte de linéaments issue du filtrage et du rehaussement directionnel O



Carte de linéaments issue du filtrage et du rehaussement directionnel SO

**Annexe 6**

Calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation

Calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation de la carte de linéaments Nord Ouest (NO).

Classe d'orientation	Longueur cumulée		Fréquence		Longueur moyenne
	Degré	km (a)	% (b)	Nombre (c)	% (d)
000-009	044.3	01	015	02	2.9
010-019	162.7	05	049	07	3.3
020-029	517.4	17	113	15	4.6
030-039	813.5	26	181	24	4.5
040-049	576.9	19	137	19	4.2
050-059	488.1	16	104	14	4.7
060-069	236.6	08	067	09	3.5
070-079	133.1	04	037	05	3.6
080-089	103.5	03	030	04	3.5
090-099	000.0	00	00	00	
100-109	000.0	00	00	00	
110-119	000.0	00	00	00	
120-129	000.0	00	00	00	
130-139	000.0	00	00	00	
140-149	000.0	00	00	00	
150-159	000.0	00	00	00	
160-169	000.0	00	00	00	
170-179	029.6	01	09	01	3.3
Total	3105.7	100%	742	100%	38.1

Calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation de la carte de linéaments Ouest (O).

Classe d'orientation	Longueur cumulée		Fréquence		Longueur moyenne
	km (a)	% (b)	Nombre (c)	% (d)	km e = a/c
000-009	079.1	05	21	06	3.8
010-019	186.2	12	37	11	5.0
020-029	282.2	18	62	18	4.6
030-039	321.7	20	65	19	4.9
040-049	231.4	15	51	15	4.5
050-059	265.3	17	52	16	5.1
060-069	124.1	08	26	08	4.8
070-079	056.4	04	13	04	4.3
080-089	000.0	00	00	00	
090-099	000.0	00	00	00	
100-109	000.0	00	00	00	
110-119	000.0	00	00	00	
120-129	000.0	00	00	00	
130-139	000.0	00	00	00	
140-149	000.0	00	00	00	
150-159	000.0	00	00	00	
160-169	000.0	00	00	00	
170-179	028.3	02	09	0.3	3.1
Total	1574.7	100%	336	100%	40.1

Calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation de la carte de linéaments Sud Ouest (SO).

Classe d'orientation	Longueur cumulée		Fréquence		Longueur moyenne
	Degré	km (a)	% (b)	Nombre (c)	% (d)
000-009	040.1	01	05	02	08.0
010-019	207.4	05	16	05	13.0
020-029	334.5	10	27	09	12.4
030-039	398.1	12	30	10	13.3
040-049	234.2	08	36	12	06.5
050-059	187.9	06	19	06	09.9
060-069	220.8	07	25	08	08.8
070-079	227.5	07	21	07	10.8
080-089	398.1	12	36	12	11.1
090-099	100.4	03	07	02	14.3
100-109	033.5	01	06	02	05.6
110-119	107.0	03	10	03	10.7
120-129	100.4	03	09	03	11.2
130-139	100.4	03	15	05	06.7
140-149	153.9	05	15	05	10.3
150-159	200.7	06	17	06	11.8
160-169	113.7	04	07	02	16.2
170-179	080.3	03	04	01	20.1
Total	3238.9	100%	305	100%	200.7

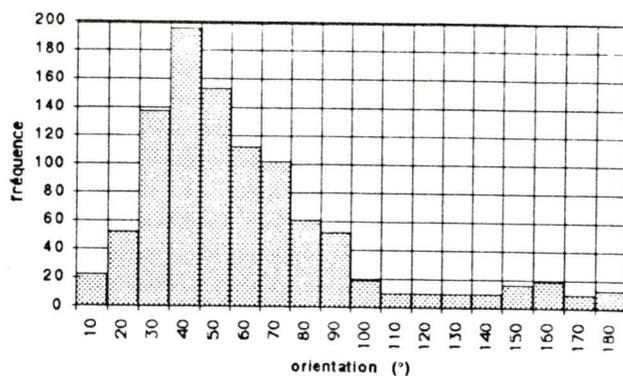
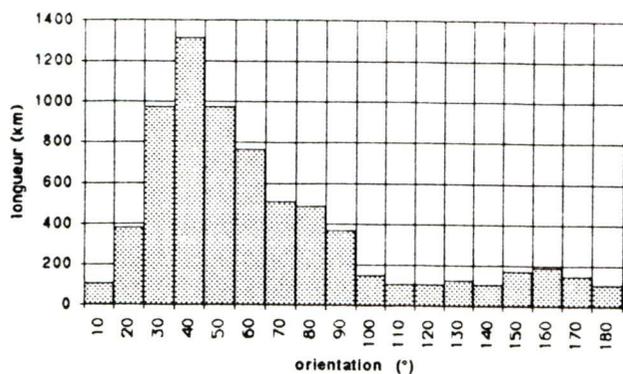
Calcul des longueurs cumulées et des fréquences par classe d'orientation de la carte de linéaments Sud (S).

Classe d'orientation	Longueur cumulée		Fréquence		Longueur moyenne
	Degré	km (a)	% (b)	Nombre (c)	% (d)
000-009	023.2	01	04	01	05.8
010-019	108.1	04	07	02	15.4
020-029	278.1	09	29	08	09.6
030-039	509.5	16	56	16	09.1
040-049	386.2	12	53	15	07.3
050-059	509.5	16	71	19	07.2
060-069	347.5	11	45	13	07.7
070-079	355.3	11	39	11	09.1
080-089	247.3	08	24	06	10.3
090-099	092.8	03	09	03	10.3
100-109	000.0	00	00	00	
110-119	061.7	02	06	02	10.3
120-129	061.7	02	04	01	15.4
130-139	000.0	00	00	00	
140-149	085.0	03	07	02	12.1
150-159	000.0	00	00	00	
160-169	000.0	00	00	00	
170-179	046.4	02	02	01	23.2
Total	3112.2	100%	356	100%	152.8

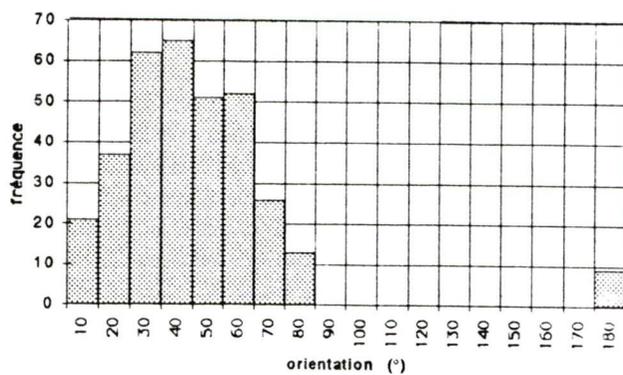
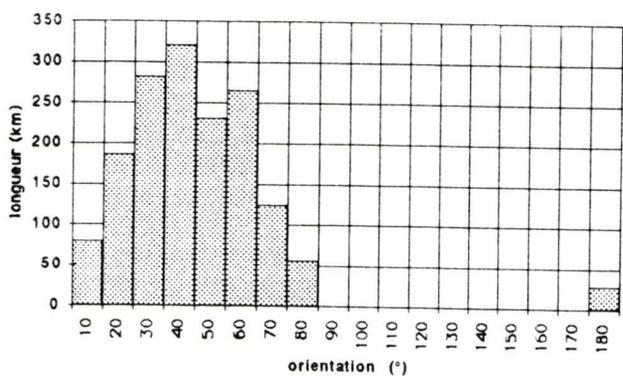
**Annexe 7**

Représentation graphique de l'orientation générale et préférentielle des linéaments à l'échelle locale

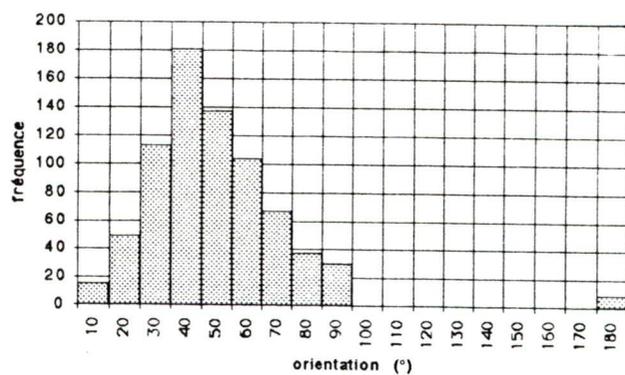
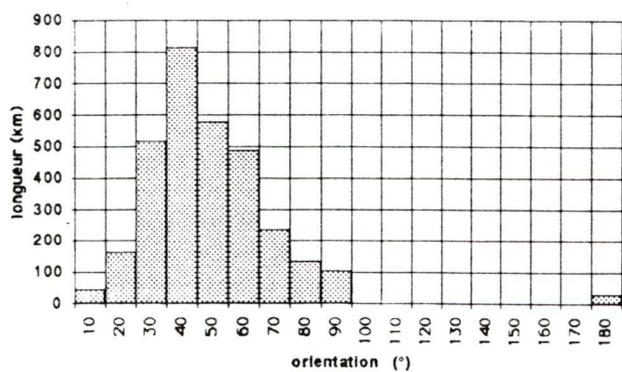
### Histogrammes de la carte de synthèse



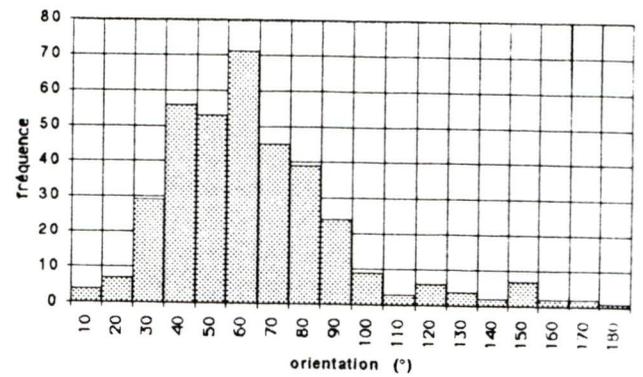
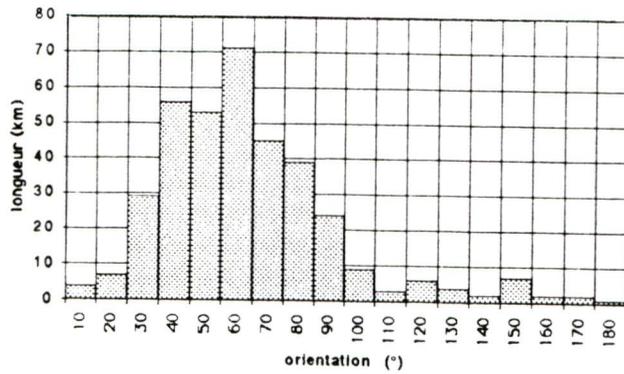
### Histogrammes de la carte issue du filtrage directionnelle O



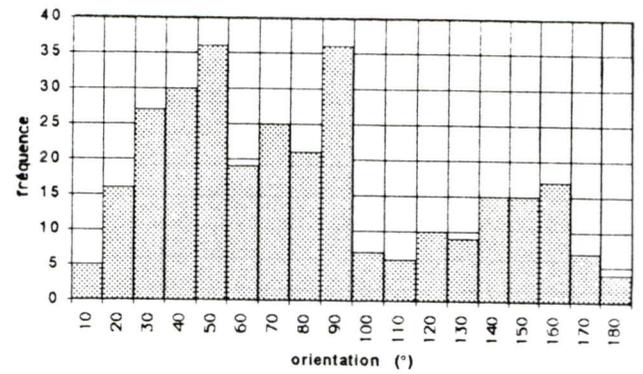
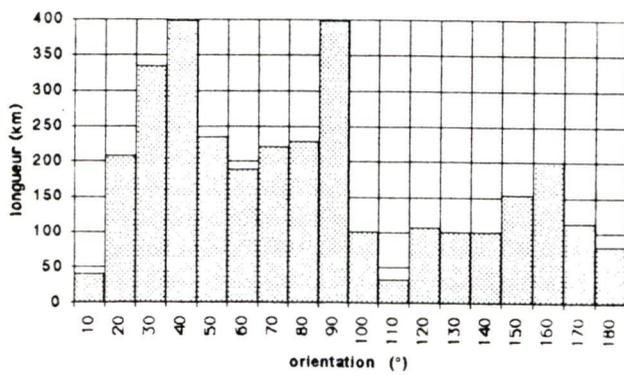
### Histogrammes de la carte issue du filtrage directionnelle N O



Histogrammes de la carte issue du filtrage directionnelle S



Histogrammes de la carte issue du filtrage directionnelle S O



Représentation graphique de l'orientation générale et préférentielle des linéaments à l'échelle locale

### **Annexe 8**

Principaux paramètres statistiques de base des éléments géochimiques de la région d'étude.

## Principaux paramètres statistiques de base (région des cantons d'Opémisca et Cuvier)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre d'échantillons
Ag	1	150	23.36	22.13	187
Co	2	97	12.50	13.27	187
Cu	2	58	8.68	6.52	187
Ni	2	29	8.29	4.22	187
Pb	3	45	12.16	9.14	187
Zn	6	94	30.51	17.22	187

## Principaux paramètres statistiques de base (région du sud Cuvier)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre d'échantillons
Ag	1	13	3.54	2.55	61
Co	2	32	9.47	7.33	62
Cu	3	23	7.77	5.21	62
Ni	3	275	20.5	43.04	62
Pb	2	47	12.74	10.31	62
Zn	10	214	51.94	44.24	62

## Principaux paramètres statistiques de base (région du canton de Lamarck)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre d'échantillons
Ag	2	2	2	0	62
Co	2	120	6.60	15.66	62
Cu	5	220	12.79	27.21	62
Ni	2	88	6.11	11.29	62
Pb	2	40	8.31	8.23	62
Zn	6	120	31.84	21.01	62

## Principaux paramètres statistiques de base (région du lacTroilus)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre d'échantillons
Ag	2	6	2.94	1.04	96
Co	2	38	3.49	4.94	96
Cu	1	83	10.75	10.84	96
Ni	1	63	5.24	6.75	96
Pb	2	58	13.18	10.54	96
Zn	4	104	24.17	15.67	96

## Principaux paramètres statistiques de base (région du lac Frotet)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	Nombre d'échantillons
Ag	2	2	2	0	29
Co	2	135	8.72	24.62	29
Cu	4	49	11.21	10.11	29
Ni	2	92	7.52	16.42	29
Pb	2	46	10.10	11.28	29
Zn	6	72	25.10	16.82	29

Les unités de teneurs utilisées sont les suivantes:

dpm = dixième de parties par million ( pour l'Ag )

ppm = partie par million ( pour les autres )