
DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES APPROCHES POUR LE TRAITEMENT ET L'INTERPRÉTATION GÉOLOGIQUE DES LEVÉS AÉROMAGNÉTIQUES DE HAUTE RÉOLUTION

Projet 2017-01

Par : Jérôme Lavoie, Ing., M.Sc.A.
O.I.Q. #127 127
Et
Michel Allard
O.I.Q. #36 042
2018



CONSOREM

Consortium de recherche
en exploration minérale

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de recherche en exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Lavoie, J. et Allard, M., 2018. Développement de nouvelles approches pour le traitement et l'interprétation géologique des levés aéromagnétiques de haute résolution. Rapport, Projet CONSOREM 2017-01, 63 pages.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca

Site Web: www.consorem.ca

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Le Projet 2017-01 avait pour objectif de développer une nouvelle approche visant à interpréter et délimiter des domaines magnétiques à partir des données de levés aéromagnétiques. Ces données qui sont généralement présentées sous forme d'images se prêtent bien à l'utilisation des techniques d'analyse d'images communes à plusieurs autres domaines (vision artificielle, imagerie médicale, télédétection, etc.). Une de ces techniques dites de « segmentation » permet de partitionner une image en rassemblant des régions aux caractéristiques similaires. Cette technique a été testée pour définir les domaines d'une image magnétique de levés magnétométriques. L'originalité de ce projet repose sur un processus de segmentation d'image magnétique qui s'appuie, entre autres, sur les propriétés locales de l'énergie spectrale de l'intensité du champ magnétique.

La méthodologie développée se résume en trois grandes étapes : 1) discrétisation de l'image à l'étude en petites cellules ou fenêtres de dimension spécifique afin d'intégrer suffisamment de données ponctuelles (pixels) pour calculer les paramètres statistiquement valables; 2) paramétrage des cellules à partir d'un ensemble de propriétés du champ magnétique incluant l'énergie spectrale; 3) classification par segmentation en domaines.

La méthodologie a été testée principalement sur un secteur situé en majeure partie dans la portion ouest de la Sous-province d'Opatoca et en moindre proportion dans la portion nord de la Sous-province d'Abitibi et la partie sud de la Sous-province d'Opinaca.

La zone d'étude a été discrétisée, en premier lieu, en cellules de 5,0 x 5,0 km (2 484 cellules intégrant chacune 10 000 pixels de 50 x 50 m), puis en cellules de 2,5 x 2,5 km (9 936 cellules intégrant chacune 62 500 pixels de 50 x 50 m). L'ensemble des données ponctuelles (pixels) de chaque cellule a servi à déterminer des paramètres caractéristiques de chaque cellule en fonction de : (i) de l'énergie spectrale des cellules calculée par la transformée de Fourier discrète (DFT) ou la transformée de Cosinus discrète (DCT), (ii) l'analyse texturale, (iii) l'analyse statistique de l'intensité magnétique et finalement (iv) l'analyse des crêtes magnétiques. Cette dernière analyse a demandé le développement d'une méthodologie particulière pour permettre de reconnaître et de vectoriser les crêtes magnétiques selon un ensemble de critères spécifiques. Au total, 40 paramètres ont été déterminés et incorporés dans la matrice de cellules. Finalement, par des méthodes de segmentation, c'est-à-dire de regroupement et de classification statistique (*p. ex.* K-moyenne, hiérarchique, voisins proches, etc.), les cellules ont été regroupées en domaines magnétiques aux caractéristiques similaires.

Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de segmenter une image magnétique en plusieurs classes représentant différents domaines magnétiques. La méthode permet, entre autres, de reconnaître et de cibler des ceintures de roches volcano-sédimentaires autant à l'échelle régionale qu'à l'échelle locale. Une autre application possible de cette méthode est la reconnaissance des intrusions, également à l'échelle régionale et à l'échelle locale.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	ii
SOMMAIRE EXÉCUTIF	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ANNEXES	viii
1 INTRODUCTION	1
2 ZONE D'ÉTUDE	2
3 MÉTHODOLOGIE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	5
3.1 Introduction	5
3.2 Définitions	7
3.3 Discrétisation	7
3.4 Caractérisation des cellules	9
3.4.1 Caractérisation de l'intensité magnétique par l'énergie spectrale	10
3.4.2 Analyse texturale	18
3.4.3 Analyse statistique de l'intensité magnétique	19
3.4.4 Reconnaissance semi-automatique et analyse des crêtes magnétiques	21
3.5 Regroupement et classification (<i>Clustering</i>)	35
3.5.1 Introduction	35
3.5.2 Regroupement et classification par les algorithmes de type K-Moyennes	35
3.5.3 Regroupement et classification par les algorithmes de type hiérarchiques	38
3.5.4 Synthèse	42
4 DISCUSSION	43
5 CONCLUSIONS	45
LIVRABLES	46
REMERCIEMENTS	47
RÉFÉRENCES	48
ANNEXES	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Étendue de la zone d'étude du projet 2017-01 (rectangle gris pâle) et des infrastructures présentes (lignes rouges et noires).	2
Figure 2 : Levés magnétométriques utilisés dans le cadre de ce projet (données provenant de SIGEOM; Intissar et Benahmed, 2014; D'Amours et Intissar, 2012; D'Amours, 2011). Espacement des lignes de vol = 250 mètres; hauteur de vol = 80 à 100 mètres et direction du vol = Nord-Sud.	3
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude 2017-01 (cadre noir) par rapport aux limites des Sous-provinces géologiques (cf. SIGÉOM).	3
Figure 4 : Les différents segments de la ceinture de roches volcano-sédimentaire de Frotet-Evans (incluant les segments Obamsca et Colomb-Chaboullié) ainsi que la ceinture de la Sous-province d'Abitibi. Modifiée de Boily et Dion (2002) et du portail cartographique CONSOREM (2018).	4
Figure 6 : Organigramme de la méthodologie développée.	6
Figure 7 : Carte de l'intensité du champ magnétique discrétisée en 2 484 cellules de 5x5 km (Test #1).	8
Figure 8 : Carte de l'intensité du champ magnétique discrétisée en 9 936 cellules de 2,5 x 2,5 km (Test #2).	8
Figure 9 : Boîte de dialogue de l'outil <i>Create Fishnet</i> dans ArcGIS®-ESRI.	9
Figure 10 : Représentation graphique d'un spectre d'énergie en deux (2) dimensions. Mentionnons que pour des fins de représentation, il y a une symétrie gauche-droite (miroir) par rapport à l'axe des y. Les couleurs représentent l'intensité de l'énergie spectrale. Les basses fréquences spatiales (cycles/km) sont localisées au centre du graphique et à l'intérieur du cercle vert (teintes mauves) tandis que les hautes fréquences spatiales (cycles/km) sont localisées à l'intérieur du cercle noir (teintes roses). Les structures nord-sud sont localisées sur l'axe des « x » (ellipses bleues), les structures E-O sur l'axe des « y » (ellipse jaune) et les structures N135 et N235 sont représentées par les deux ellipses grises.	11
Figure 11 : Représentation des spectres d'énergie en fonction des caractéristiques de l'intensité du champ magnétique (effet sur le spectre d'énergie) : i) Effet de l'intensité de l'anomalie; ii) effet de la dimension (épaisseur) de l'anomalie; iii) effet de l'orientation de l'anomalie et iv) effet de la longueur de l'anomalie.	12
Figure 12 : A) Calcul de l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales (≤ 1 cycle/km) avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). B) Calcul de l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales (≤ 1 cycle/km) avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes) avec la représentation des domaines magnétiques (lignes noires) et des dykes de diabase/gabbro paléoprotérozoïques (traits bruns) interprétés manuellement dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). Remarquez la bonne correspondance générale entre les domaines magnétiques interprétés dans le cadre du projet 2016-01 et l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales.	14
Figure 13 : A) Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales intermédiaires (1 <> 2 cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). B) Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales intermédiaires (1 <> 2 cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes) avec la représentation des domaines magnétiques (lignes noires) et des dykes de diabase/gabbro paléoprotérozoïques (traits bruns) interprétés manuellement dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). Remarquez la bonne correspondance générale entre les domaines magnétiques et certains dykes tardifs orientés NE-SO interprétés dans le cadre du projet 2016-01 et l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales.	15
Figure 14 : A) Calcul de l'énergie spectrale des hautes fréquences spatiales (2 <> 10 cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). B) Calcul de l'énergie spectrale des hautes fréquences spatiales (2 <> 10 cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes) avec la représentation des domaines magnétiques (lignes noires) et des dykes de diabase/gabbro paléoprotérozoïques (traits bruns) interprétés manuellement dans le	

cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). Remarquez la bonne correspondance générale entre les domaines magnétiques et la majorité des dykes tardifs orientés NE-SO et certains dykes N-S et NO-SE interprétés dans le cadre du projet 2016-01 et l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales.....16

Figure 15 : Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales orientées nord-sud avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). Remarquez les domaines magnétiques nord-sud représentés par les anomalies magnétiques causées par les dykes paléoprotérozoïques orientés nord-sud.....17

Figure 16 : Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales orientées est-ouest avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). Les domaines magnétiques nord-sud représentés par les anomalies magnétiques causées par les dykes paléoprotérozoïques orientés nord-sud et bien visibles sur la figure 15, ne sont plus circonscrits sur cette figure.17

Figure 17 : Calcul du coefficient *GLCM_Contrast* au moyen de caractérisation par l'analyse texturale (classification par la méthode des bris naturels, Jenks, n = 10 classes). Les cellules représentées par les segments de roches volcano-sédimentaires de Storm-Evans, Evans-Ouagama et Rivière Obamsca et les roches volcaniques mafiques de la Sous-province d'Abitibi (Figure 4; Boily et Dion, 2002) ainsi que différentes familles de dykes tardifs paléoprotérozoïques sont bien délimités par ce coefficient.....18

Figure 18: Boîte de dialogue de l'outil *Zonal Statistics as Table* dans ArcGIS®-ESRI.....19

Figure 19 : Caractérisation de l'intensité magnétique calculée par la moyenne de chaque cellule avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes).....20

Figure 20 : Caractérisation de l'intensité magnétique calculée par l'écart-type de chaque cellule avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes).....20

Figure 21 : Représentation d'une crête magnétique avec deux creux magnétiques de part et d'autre de cette dernière.....21

Figure 22 : Interprétation manuelle des crêtes magnétiques (lignes simples bleues) effectuée sur la zone d'étude 2016-01 (lignes grasses bleues) dans le cadre du projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017).....22

Figure 23 : Figure synthèse de la méthodologie développée pour la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques à partir d'un levé magnétométrique. A) Création de points anomaliques (x,y) avec le logiciel Geosoft™. B) Création d'une couche matricielle à partir des points anomaliques (x,y) en A à l'aide du logiciel ArcGIS®-ESRI. C) Création d'une classe d'entité vectorielle à partir de la couche matricielle en B à l'aide du logiciel ArcGIS®-ESRI. D) Filtrage du bruit de fond pour avoir le rubanement magnétique « résiduel » à l'aide du logiciel ArcGIS®-ESRI.23

Figure 24 : A) Boîte de dialogue de l'outil *Grid Peaks (Grid and Image -> Utilities -> Grid Peaks)* du logiciel Geosoft™. B) Fichier de sortie dans le logiciel Geosoft™.24

Figure 25 : Exemple de points anomaliques détectés par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986) avec l'outil *Grid Peaks* à partir du logiciel Geosoft™ dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans.25

Figure 26: Boîte de dialogue de l'outil « *Point to Raster* » dans ArcGIS®-ESRI.26

Figure 27 : Exemple de couche matricielle générée avec une grosseur de recherche de cellule (*Cellsize*) de 125 mètres dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25).27

Figure 28: Boîte de dialogue de l'outil « *Raster to Polyline* » dans ArcGIS®-ESRI.....28

Figure 29 : Exemple de la classe d'entité spatiale vectorielle générée à partir de la couche matricielle de l'étape 3 (*Cellsize* de 125 mètres) dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25). Les vecteurs ont subi un lissage par la technique *PEAK* (voir texte pour les explications).....28

Figure 30: Algorithme d'atténuation des vecteurs disponible dans ArcGIS®-ESRI : 1) 1) par la méthode *PEAK* (acronyme pour *Polynomial Approximation with Exponential Kernel*) et 2) par la méthode d'interpolation de Bézier. Dans notre cas, la méthode *PEAK* a été utilisée. Source : ArcGIS®-ESRI.29

Figure 31 : Exemple de la classe d'entité spatiale vectorielle sans « bruit de fond » dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25). Les vecteurs de moins de 752 mètres (plus petits que 2 fois l'écart-type) ont été éliminés. Cette figure représente le rubanement magnétique utilisé pour calculer l'orientation moyenne et la densité moyenne pour chaque cellule de la matrice.30

Figure 32 : Comparaison entre A) l'interprétation manuelle des crêtes magnétiques effectuées dans le cadre du projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017) et B) la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25) dans le cadre du projet CONSOREM 2017-01.30

Figure 33 : Résultat de la reconnaissance semi-automatique des vecteurs représentant les crêtes magnétiques sur le secteur d'étude (*Cellsize* de 125 mètres et les vecteurs plus grands que 752 mètres). Remarquez les traces bien visibles des zones de déformation en décrochement dextre de la rivière Nottaway et du ruisseau Lucky Strike (ovales rouges). Le segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans ressort également très bien.31

Figure 34: Boîte de dialogue de l'outil « *Polyline To Raster* » dans ArcGIS®-ESRI. Il est très important d'utiliser la même dimension de recherche de cellule (*Cellsize*) utilisée à l'étape 3 (c.-à-d. 125 mètres dans notre cas).32

Figure 35: Orientation moyenne des crêtes magnétiques pour chaque cellule sur la zone d'étude. Plus les couleurs tendent vers le noir, plus l'orientation tend vers 0° ou vers 180°. Les zones en blancs correspondent avec des cellules avec absence de rubanement magnétique (*Null*). Classification par intervalle régulier, n = 10 classes.32

Figure 36: Variabilité (écart-type) de l'orientation moyenne des crêtes magnétiques pour chaque cellule sur la zone d'étude. Les couleurs froides représentent de faibles variabilités tandis que les couleurs chaudes représentent de fortes variabilités. Classification par la méthode des centiles, n = 10 classes.33

Figure 37: Densité moyenne des crêtes magnétiques pour chaque cellule sur la zone d'étude. Les couleurs froides représentent de faibles densités tandis que les couleurs chaudes représentent de fortes densités. La densité moyenne a été calculée à partir du compte de pixel (SUM) de la couche matricielle générée avec la classe d'entité spatiale vectorielle des crêtes magnétiques (*Cellsize* de 125 mètres et les vecteurs plus grands que 752 mètres). Classification par la méthode des centiles, n = 10 classes.33

Figure 38: Boîte de dialogue de l'outil « *Clustering* » (Regroupement-Classification) du logiciel JMP® avec l'option « *K-Means* » sélectionnée.36

Figure 39: Résultat d'un regroupement/classification obtenu avec le logiciel JMP® par les algorithmes des K-Moyennes en utilisant l'option 1 (*K-Means Clustering*), 14 paramètres et 8 classes (test #14b). Remarquez que les différents domaines magnétiques sont bien délimités par cette méthode de regroupement/classification.37

Figure 40: Unités stratiformes de formations de fer oxydées riches en magnétite, appartenant à la Formation de Rabbit (polygones rouges) interprétée dans le segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) et bien circonscrites par la classe 2 (encadrés noirs). Source géologie : SIGÉOM.37

Figure 41: Boîte de dialogue de l'outil « *Clustering* » (Regroupement-Classification) du logiciel JMP® avec la méthode « *Hierarchical* » sélectionnée. Les six (6) options disponibles sont montrées par le rectangle rouge inférieur.39

Figure 42: Exemple de dendrogramme calculé par le logiciel JMP® avec la méthode « *Hierarchical* » (« option *Ward* »). Les couleurs représentent les différentes classes (N = 8 classes dans cet exemple).39

Figure 43: Résultat d'un regroupement/classification obtenu avec le logiciel JMP® par les algorithmes hiérarchiques en utilisant l'option 3 (*Ward*), 4 paramètres et N = 8 classes (Test #25). Remarquez que les différents domaines magnétiques sont bien délimités par cette méthode de regroupement/classification.41

Figure 44: Reconnaissance, partielle ou en totalité, des différents segments de ceintures de roches volcano-sédimentaires (classes 1 à 5, test #25) sur la zone d'étude. Les différents segments de ceintures de roches volcano-sédimentaires sont délimités par les polygones blancs.42

LITE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Exemples de domaines de mesure et de domaines d'analyse après transformation (tableau tiré et modifié de Allard et Bois, 1999).10

Tableau 2 – Quatre niveaux de sensibilité pour le calcul des anomalies par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986) avec l'outil *Grid Peaks* du logiciel Geosoft™. Source : Geosoft™.24

Tableau 3 – Liste des paramètres utilisés pour le test 14b.38

LITE DES ANNEXES

Annexe 1 – Liste des feuillets SNRC 1:50 000 couvrant la zone d'étude 2017-0151

Annexe 2 – Liste des 40 paramètres calculés pour la caractérisation des cellules de 2,5 x 2,5 km.54

1 INTRODUCTION

La magnétométrie (au sol ou aérienne) est un outil essentiel à la compréhension de la géologie d'une région et joue un rôle prédominant en exploration minérale. L'analyse des données magnétométriques aide de plus en plus à sélectionner des territoires de cartographie régionale, à délimiter des zones prospectives et à préciser des cibles de forage plus locales (Clark, 1997). L'amélioration continue des techniques d'acquisition et de traitement a permis d'accroître considérablement la qualité des données aéromagnétiques et de maintenir les levés à des prix abordables. Parmi les diverses techniques de traitement de données, celle fondée sur la transformée de Fourier est particulièrement efficace. Elle comprend les étapes suivantes :

- (i) Application de la transformée de Fourier pour effectuer un passage du domaine spatial au domaine des nombres d'onde ;
- (ii) Analyse du spectre des fréquences spatiales ;
- (iii) Rehaussement par filtrage des nombres d'onde indésirables. Différents filtres permettent de rehausser les images du champ magnétique : première dérivée verticale, première dérivée horizontale en « X », première dérivée horizontale en « Y », première dérivée horizontale totale, le tilt magnétique (« *tilt derivative* »), le signal analytique, la réduction aux pôles, la susceptibilité apparentes, etc.);
- (iv) Application de la transformée inverse de Fourier pour effectuer un retour au domaine spatial. Le résultat final est une image rehaussée des données magnétométriques.

Toutefois, la méthodologie pour l'interprétation des levés magnétométriques demeure relativement classique. Même si la table à dessin a laissé place à l'ordinateur, les levés magnétométriques sont interprétés manuellement et subjectivement en fonction de l'expérience de l'utilisateur. Chaque entreprise de consultation ou d'exploration procède généralement plus ou moins de la même manière lors de l'interprétation de ces levés.

Le Projet 2017-01 a pour objectif de développer une nouvelle approche visant à interpréter et délimiter des domaines magnétiques à partir de levés magnétométriques de haute résolution, et ce, de manière semi-automatique. Autrement dit, ce projet cherche à améliorer le processus d'analyse des données par le développement d'un algorithme d'interprétation pseudo-géologique. La technique d'analyse d'images par «segmentation» fondée sur la classification est l'approche privilégiée. Bien que cette technique dite de «segmentation» soit largement utilisée dans plusieurs autres domaines, elle n'a apparemment jamais été testée pour délimiter les domaines magnétiques sur des images obtenues des données magnétométriques aéroportées.

2 ZONE D'ÉTUDE

Le secteur choisi pour l'étude se situe en majeure partie dans la portion ouest de la Sous-province d'Opatica et en moindre proportion dans la portion nord de la Sous-province d'Abitibi et la partie sud de la Sous-province d'Opinaca. La zone de 345 kilomètres de longueur par 180 kilomètres de hauteur, couvre une superficie de 62 121 km² et se trouve sur les territoires du Plan Nord (**Figures 1 à 5**). Elle couvre partiellement la zone délimitée dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). La géologie du secteur est dominée par des roches métaplutoniques (TTG mésoarchéens). La zone comprend la majeure partie de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (en incluant les segments de Colomb-Chabouillé et de la rivière Obmasca). Les roches sont poly-déformées et métamorphisées au faciès des amphibolites avec quelques fenêtres locales préservées aux faciès des schistes verts ou au faciès des granulites pour les Sous-provinces d'Opatica et d'Opinaca et métamorphisée au faciès des schistes verts pour la Sous-province d'Abitibi. On observe de grands cisaillements majeurs ± E-O surtout au contact de la ceinture de roches volcano-sédimentaires et des décrochements plus tardifs NO-SE / NE-SO (*p. ex.* zone de déformation de la rivière Nottaway et du ruisseau Lucky Strike). La zone couvre, en totalité ou partiellement, les feuillets SNRC 32/E, 32/F, 32/G, 32/J, 32/K, 32/L, 32/M, 32/N et 32/O. La liste des feuillets SNRC 1:50 000 touchant la zone d'étude, sont listés en Annexe 1. Les lecteurs peuvent se référer au Projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017) pour une description plus complète du contexte géologique et métallogénique du secteur d'étude.

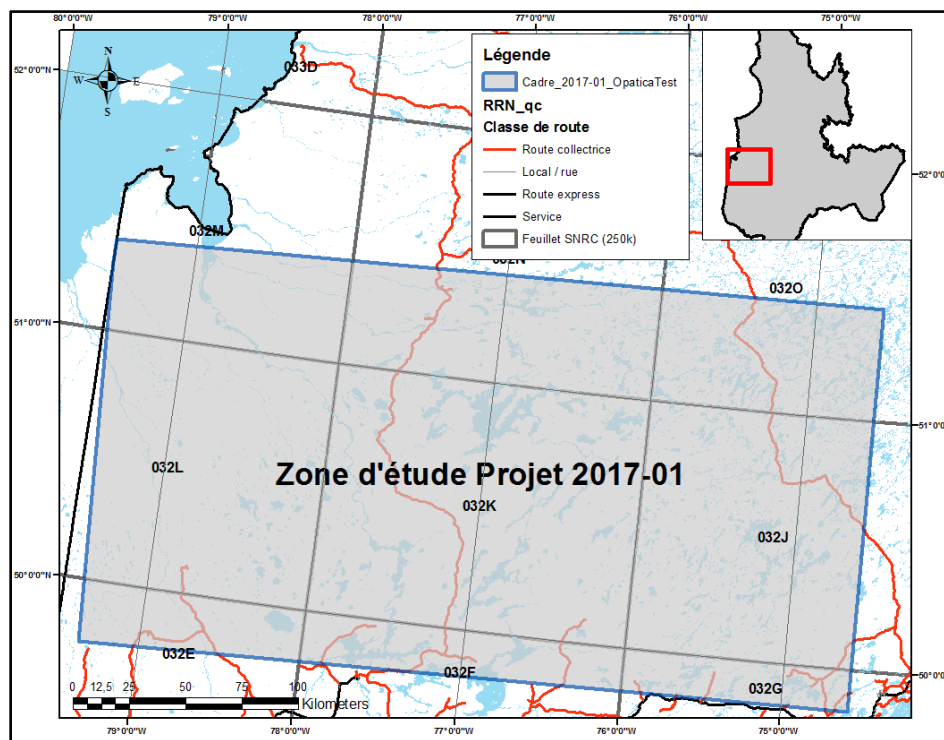


Figure 1 : Étendue de la zone d'étude du projet 2017-01 (rectangle gris pâle) et des infrastructures présentes (lignes rouges et noires).

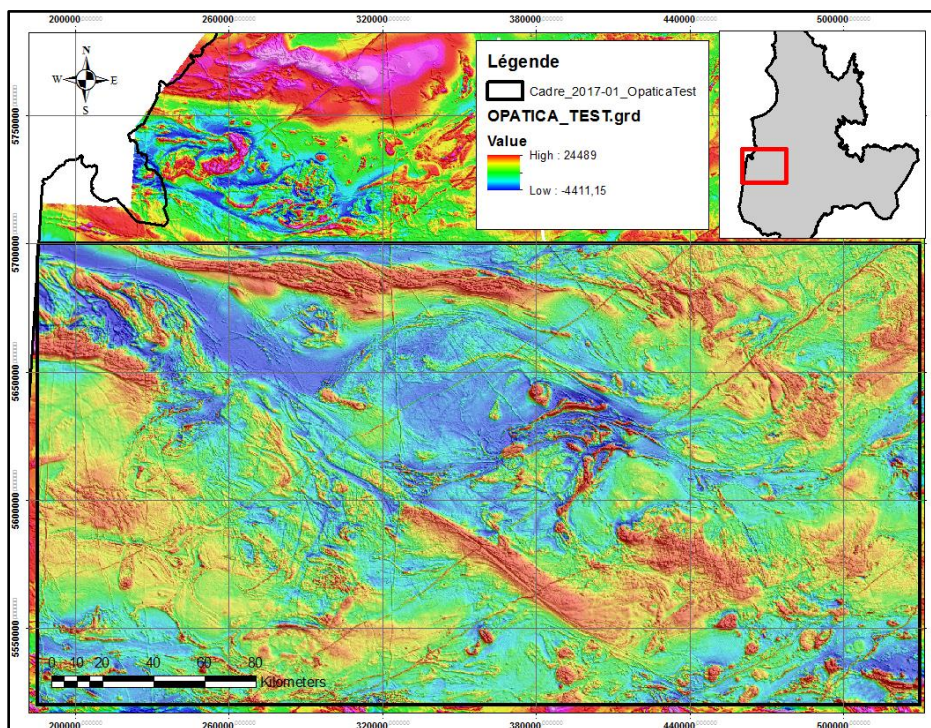


Figure 2 : Levés magnétiques utilisés dans le cadre de ce projet (données provenant de SIGEOM; Intissar et Benahmed, 2014; D'Amours et Intissar, 2012; D'Amours, 2011). Espacement des lignes de vol = 250 mètres; hauteur de vol = 80 à 100 mètres et direction du vol = Nord-Sud.

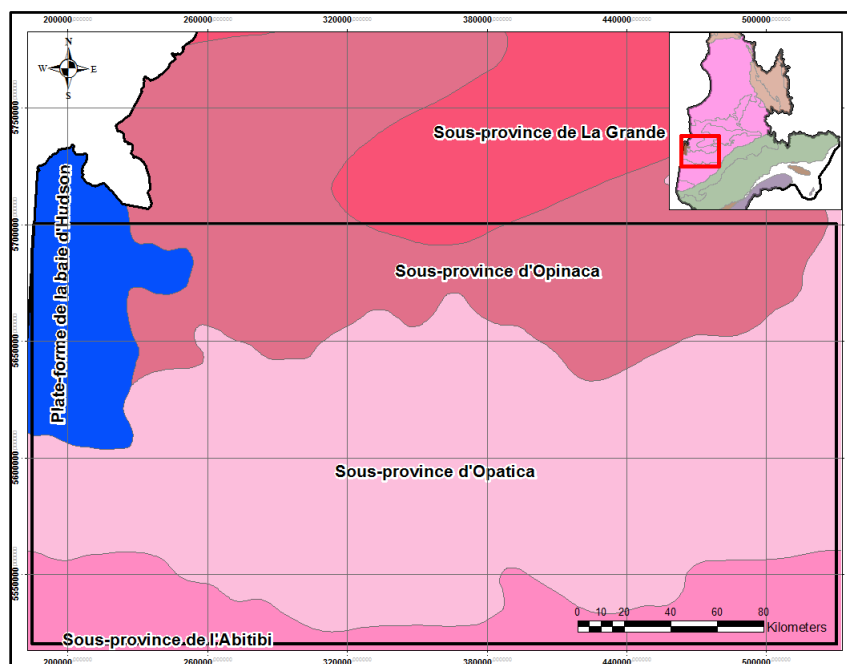


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude 2017-01 (cadre noir) par rapport aux limites des Sous-provinces géologiques (cf. SIGÉOM).

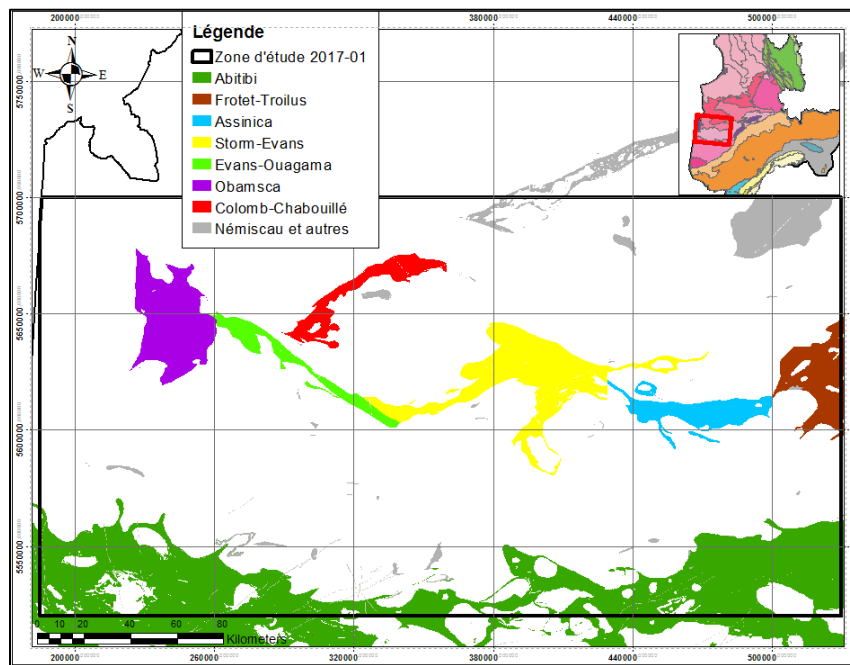


Figure 4 : Les différents segments de la ceinture de roches volcano-sédimentaire de Frotet-Evans (incluant les segments Obamsca et Colomb-Chaboullié) ainsi que la ceinture de la Sous-province d'Abitibi. Modifiée de Boily et Dion (2002) et du portail cartographique CONSOREM (2018).

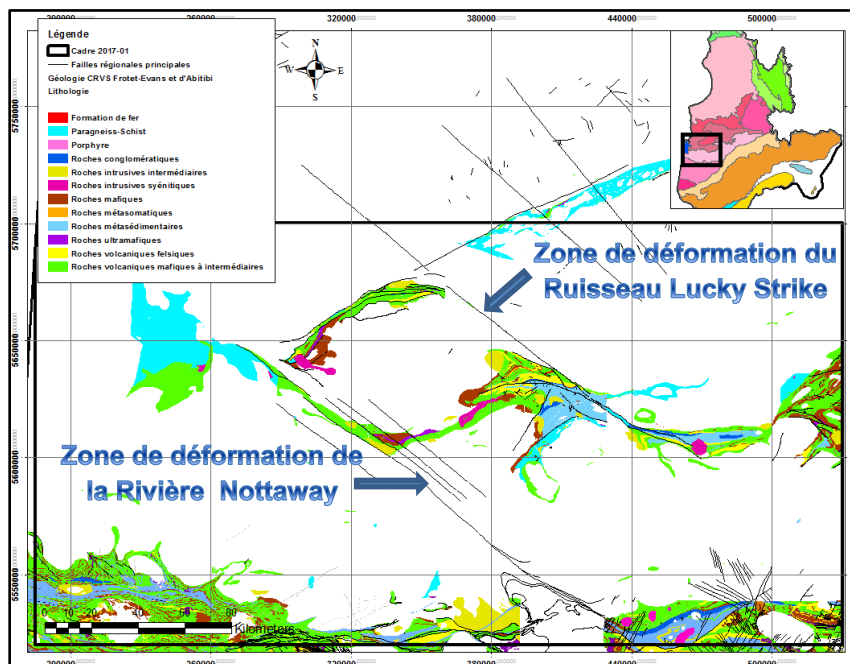


Figure 5 : Géologie de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans en incluant les segments Obamsca et Colomb-Chaboullié (modifiée de Thériault et Beauséjour, 2012; Leclerc et al., 2016) et de la ceinture de roches volcano-sédimentaire de la partie septentrionale d'Abitibi (portail CONSOREM, 2018).

3 MÉTHODOLOGIE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

3.1 Introduction

La technique d'analyse d'images par «segmentation» fondée sur une classification non supervisée fut l'approche privilégiée pour discrétiser la zone d'étude en différents domaines magnétiques. La classification se fonde sur différents paramètres calculés au moyen de:

- (1) la caractérisation de l'énergie spectrale
- (2) l'analyse texturale de l'intensité magnétique;
- (3) la reconnaissance et la caractérisation des crêtes magnétiques;
- (4) l'analyse statistique des données.

Ces paramètres sont attachés à chacune des cellules d'une matrice couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Cette approche ne semble jamais avoir été testée auparavant dans la littérature même si l'analyse par « segmentation » fondée sur la classification est largement utilisée dans de nombreux domaines, tels que la vision artificielle pour les robots ou les automobiles, l'imagerie médicale, la télédétection, la gestion du trafic routier en temps réel, en transport, pour la reconnaissance d'empreintes digitales et faciales, etc. (*p. ex.* Fu et Mui, 1981; Pal et Pal, 1993; Dass et *al.*, 2012; Mageswari et *al.*, 2013; Dhanachandra et *al.*, 2015). Les auteurs de ce rapport considèrent la méthodologie développée dans le cadre de ce projet comme un « *Proof of concept* ». Les avantages d'utiliser cette méthode sont nombreux et les deux principaux sont : 1) le gain d'information pour délimiter les domaines magnétiques et 2) l'élimination du biais de l'observateur.

La **figure 6** présente un organigramme de la méthodologie développée. L'organigramme se divise en trois principales étapes : (1) la discrétisation de la zone d'étude en « M x N » cellules (fenestration); (2) la caractérisation de chaque cellule par les méthodes d'analyses suivantes : (i) l'énergie spectrale et l'analyse texturale de l'intensité magnétique calculée par des Transformées de Cosinus Discrete (DCT; *ex.* Pun et Zhu, 2009); (ii) par l'analyse des crêtes magnétiques et (iii) par l'analyse statistique de l'intensité magnétique; et finalement (3) le regroupement et la classification statistique non supervisé. Ces trois grandes étapes mèneront à la création d'une carte de domaines magnétiques qui couvrira l'ensemble de la zone d'étude. Ce chapitre présente en détail chaque étape de cette méthodologie ainsi que les résultats obtenus.

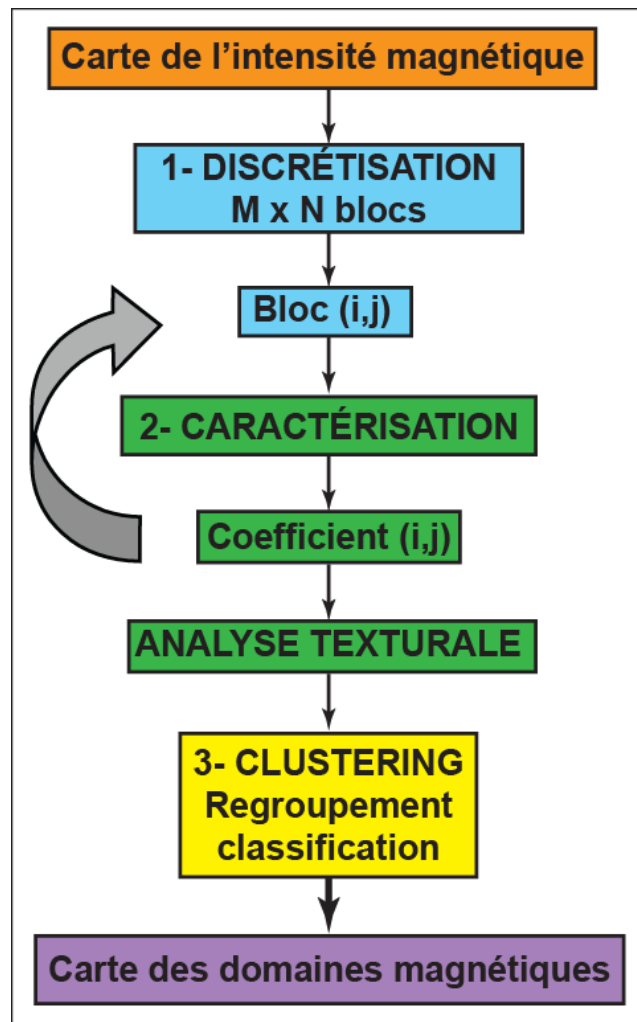


Figure 6 : Organigramme de la méthodologie développée.

3.2 Définitions

Avant d'entrer dans le cœur de ce chapitre, il est approprié de définir quelques notions fondamentales de la segmentation d'images. Selon Pal et Pal (1993), la segmentation est le processus par lequel on partitionne une image en plusieurs régions contiguës de telle sorte que chaque région est homogène et que l'union de 2 régions non contiguës est homogène. Selon Horowitz et Pavlidis (1974), la segmentation peut alors être définie comme suit : si F est le nombre de pixels totaux et P() est l'uniformité (homogénéité) prédite définie sur un groupe de pixels contigus, alors la segmentation est le partitionnement d'un ensemble de pixels F en un ensemble de sous-ensembles connectés ou régions (S_1, S_2, \dots, S_n) telles que :

$$6) \quad \bigcup_{i=1}^n S_i = F \quad \text{avec} \quad S_i \cap S_j = \emptyset, \quad i \neq j.$$

L'uniformité prédite $P(S_i) = \text{vraie}$ pour toutes les régions (S_i) et $P(S_i \cup S_j) = \text{faux}$ quand S_i est adjacent à S_j . La qualité du résultat final dépendra largement de la qualité du processus de segmentation (Pal et Pal, 1993). De nombreuses techniques de segmentation d'images ont été développées récemment. C'est pourquoi il est très important de choisir la bonne technique pour obtenir le meilleur résultat.

3.3 Discrétisation

La première étape de la méthodologie développée consiste à discrétiser la carte de l'intensité du champ magnétique en $M \times N$ « cellules ». Dans le cadre du projet, deux dimensions distinctes de cellule ont été testées : (1) des cellules de 5,0 x 5,0 km (**Figure 7**); et (2) des cellules de 2,5 x 2,5 km (**Figure 8**). Dans le premier cas, la zone d'étude a été discrétisée en 2 484 cellules dans une matrice de 36 lignes par 69 colonnes (**Figure 7**). Chaque cellule, d'une surface de 25 km², se subdivise en 100 x 100 pixels de 50 x 50 mètres chacun. Dans le deuxième cas, la zone d'étude a été discrétisée en 9 936 cellules dans une matrice de 72 lignes par 138 colonnes (**Figure 8**). Chaque cellule, d'une surface de 6,25 km², est subdivisée en 250 x 250 pixels de 50 x 50 mètres chacun. La discrétisation est facilement réalisable avec le logiciel ArcGIS®-ESRI au moyen de l'outil « *Create Fishnet* » (**Figure 9** : « *Data Management -> Sampling -> Create Fishnet* »). Il est par contre très important que la classe d'entité spatiale créée ait la même projection que le fichier matriciel en format .GRD du levé aéroporté (généralement le géoïde WGS84 et la projection UTM). De plus, lors de la création de la matrice, il est impératif de créer un champ dont la variable est de type Entier (« *Integer* ») et de peupler ce champ par le chiffre «1». Cette étape est importante lors de l'application de la méthodologie pour la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques.

Nous présenterons dans ce rapport seulement les résultats obtenus avec la discrétisation de la carte de l'intensité du champ magnétique de la matrice de cellules de 2,5 x 2,5 km (**Test #2**).

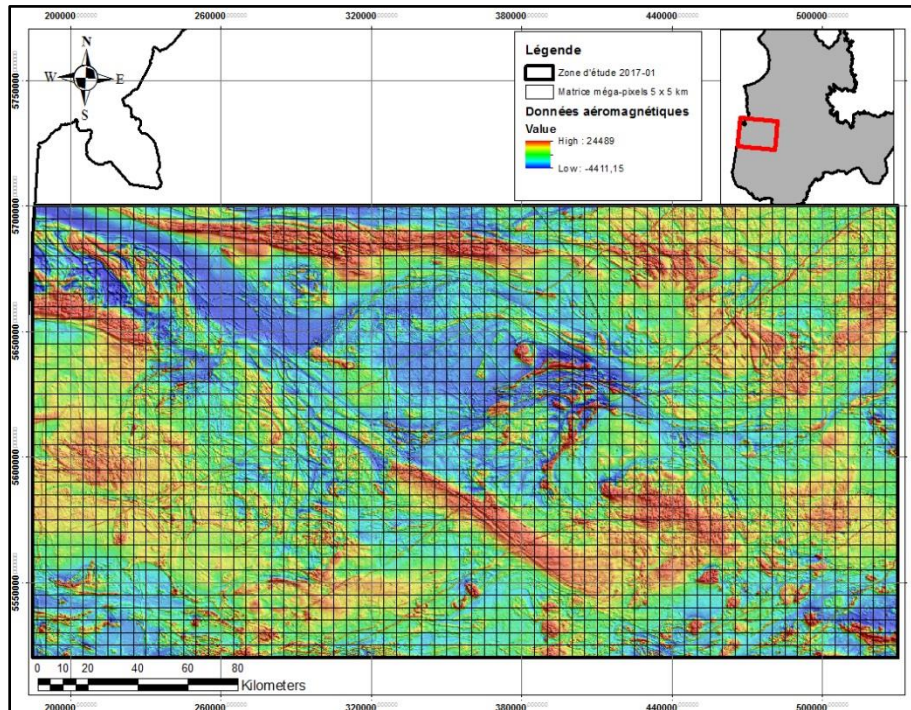


Figure 7 : Carte de l'intensité du champ magnétique discrétisée en 2 484 cellules de 5x5 km (**Test #1**).

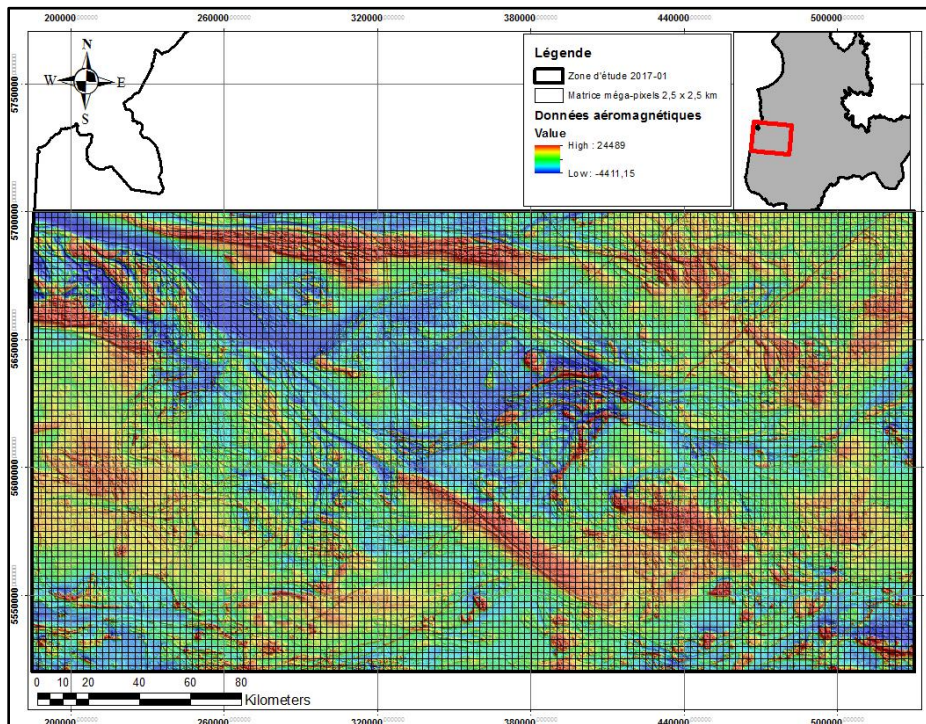


Figure 8 : Carte de l'intensité du champ magnétique discrétisée en 9 36 cellules de 2,5 x 2,5 km (**Test #2**).

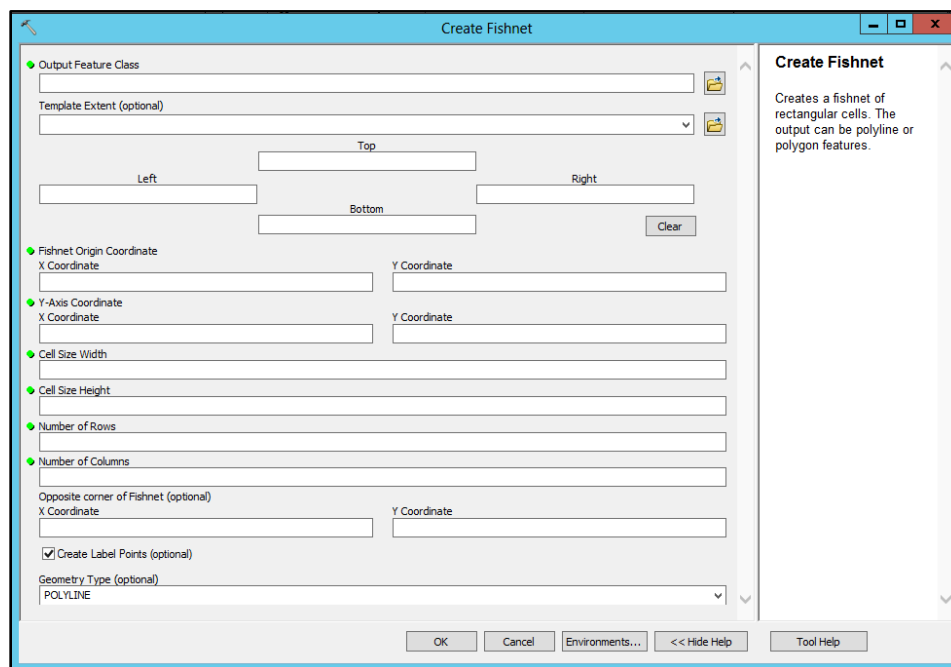


Figure 9: Boîte de dialogue de l'outil *Create Fishnet* dans ArcGIS®-ESRI.

3.4 Caractérisation des cellules

Plusieurs paramètres caractéristiques des cellules (couleurs, textures, niveau de gris, etc.) peuvent être calculés et utilisés par les techniques de segmentation d'images. Dans le cadre de ce projet, quatre types de méthodes d'analyses ont servi à paramétrer chaque cellule (**Annexe 2**):

- (1) l'analyse spectrale calculée au moyen des **T**ransformées de **C**osinus **D**iscrètes (DCT; ex. Pun et Zhu, 2009);
- (2) l'analyse texturale;
- (3) la reconnaissance semi-automatique et la caractérisation des crêtes magnétiques;
- (4) l'analyse statistique des données (c.-à-d. la moyenne, l'écart-type, minimum, maximum, médiane, etc.).

Au total, 40 paramètres de caractérisation sont attachés à chaque cellule. Ces différents paramètres sont présentés en **Annexe 2**.

3.4.1 Caractérisation de l'intensité magnétique par l'énergie spectrale

3.4.1.1 Définition de l'énergie spectrale

Les mesures géophysiques couvrent habituellement un certain territoire donné. Selon Allard et Bois (1999), la représentation et l'analyse de ces mesures en fonction de leur position se font dans le domaine spatial (**Tableau 1**; Allard et Bois, 1999). Par contre, l'analyse spectrale d'un signal (p. ex. l'intensité magnétique) consiste à calculer la quantité d'énergie (ou de puissance) contenue dans les différentes composantes fréquentielles de ce signal. On pourra, par exemple, définir la puissance spectrale du signal (c.-à-d. l'intensité magnétique) directement à partir de différentes méthodes comme la transformée discrète de Fourier (DFT ou FFT) ou dans notre cas, par la transformée discrète en Cosinus (DCT; p. ex. Pun et Zhu, 2009). Après l'application de ces méthodes (DCT, FFT ou DCT), la représentation et l'analyse de ces mêmes mesures se font en fonction de leurs fréquences spatiales (Allard et Bois, 1999). On parlera alors du domaine des nombres d'onde. En d'autres termes, ces techniques d'analyse permettent de transformer des données à références spatiales en valeurs d'amplitude et de phase de fréquences spatiales (**Tableau 1**; Allard et Bois, 1999). L'énergie spectrale est ainsi calculée pour chaque cellule de 2.5 x 2.5 km à partir d'un code maison élaboré avec le logiciel MATLAB™. Le code permet alors de calculer les paramètres de l'énergie spectrale pour chacune des cellules de la matrice (**Annexe 2**). Les spectres d'énergie de chaque cellule sont alors représentés en 2 dimensions (x,y), où une partie est réelle et l'autre partie est imaginaire (**Figure 10 et équation 1**). Comme montré à l'annexe 2, le code MATLAB™ développé calcule 5 paramètres à partir de l'énergie spectrale (c.-à-d. basses fréquences spatiales, fréquences spatiales intermédiaires, hautes fréquences spatiales, fréquences spatiales d'orientation N-S et fréquences spatiales d'orientation E-O). Les valeurs de coupures utilisées pour déterminer les fréquences spatiales sont : basses fréquences spatiales ≤ 1 cycle/km; fréquences spatiales intermédiaires entre 1 et 2 cycles/km et hautes fréquences spatiales entre 2 cycles/km et la fréquence de Nyquist (10 cycles/km). Le fichier de sortie des données calculées est de type ASCII. La matrice peut être alors peuplée avec ce fichier ASCII (transformé préalablement en fichier de type *shapefile*) en effectuant un joint spatial entre les deux tables. Il est important de mentionner que l'énergie spectrale se calcule sur des données ayant déjà subi un traitement d'interpolation et non sur les données brutes.

$$\text{Équation 1 : Spectre d'énergie} = (\text{Partie réelle})^2 + (\text{Partie imaginaire})^2$$

Tableau 1 : Exemples de domaines de mesure et de domaines d'analyse après transformation (tableau tiré et modifié de Allard et Bois, 1999).

Phénomènes	Domaine de mesure	Fonction mesurée	Fonction après transformation	Domaine après transformation
Enregistrement d'un son par un appareil	Temporel	$u(t)$	$v(f)$ et $F(\emptyset)$	Fréquentiel
Diffusion d'une musique dans une salle	Spatio-temporel	$u(x,y,z,t)$	$v(k_x, k_y, k_z, f)$ et $F(\emptyset_x, \emptyset_y, \emptyset_z, \emptyset_f)$	Fréquentiel et nombres d'onde
Mesures géophysiques le long d'un profil	Spatial	$u(x)$	$v(k_x)$ et $F(\emptyset_x)$	Nombres d'onde
Mesures géophysiques sur un territoire	Spatial	$u(x,y)$	$v(k_x, k_y)$ et $F(\emptyset_x, \emptyset_y)$	Nombres d'onde

Les avantages d'utiliser l'énergie spectrale, et non seulement la mesure de l'intensité magnétique pour caractériser les cellules de la matrice sont que le spectre d'énergie décrit intégralement les caractéristiques de l'intensité du champ magnétique de chacune des cellules, c.-à-d. l'orientation, la largeur ou la profondeur, l'intensité, la dimension/longueur des anomalies magnétiques (**Figure 11**). Toutes les cellules étant de forme et de dimension égale, les spectres d'énergie ne contiennent peu ou pas d'artefact ou de variabilité liées au processus de la transformée de Fourier (DFT ou FFT) ou de la transformée discrète en cosinus (DCT). Ainsi, l'analyse spectrale permet de paramétrer l'empreinte magnétique de chaque cellule qui, ultimement, sera à la base utilisée pour délimiter les différents domaines magnétiques.

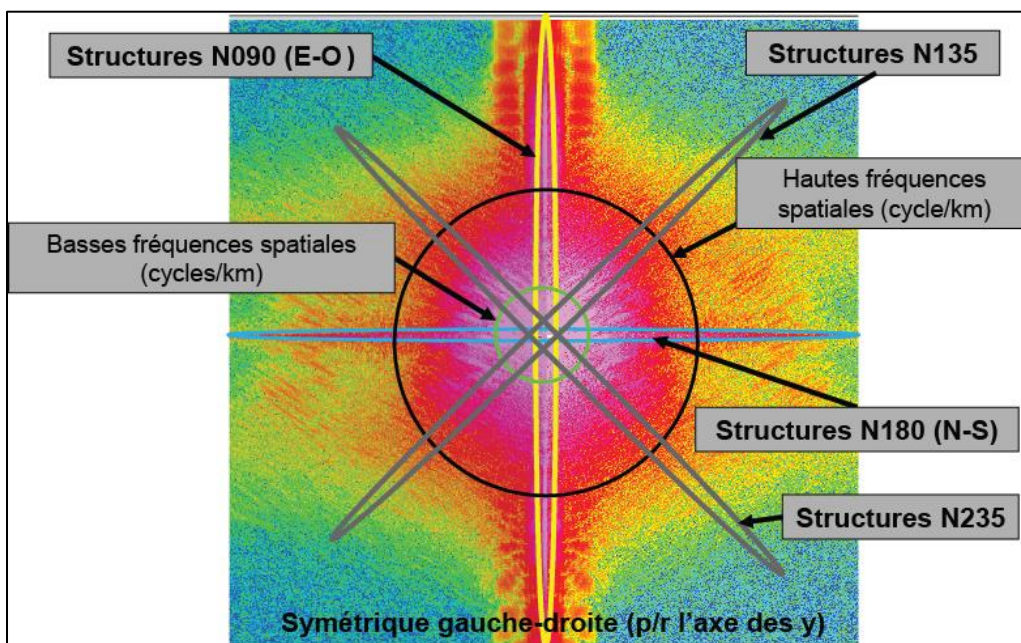


Figure 10 : Représentation graphique d'un spectre d'énergie en deux (2) dimensions. Mentionnons que pour des fins de représentation, il y a une symétrie gauche-droite (miroir) par rapport à l'axe des y. Les couleurs représentent l'intensité de l'énergie spectrale. Les basses fréquences spatiales (cycles/km) sont localisées au centre du graphique et à l'intérieur du cercle vert (teintes mauves) tandis que les hautes fréquences spatiales (cycles/km) sont localisées à l'intérieur du cercle noir (teintes roses). Les structures nord-sud sont localisées sur l'axe des « x » (ellipses bleues), les structures E-O sur l'axe des « y » (ellipse jaune) et les structures N135 et N235 sont représentées par les deux ellipses grises.

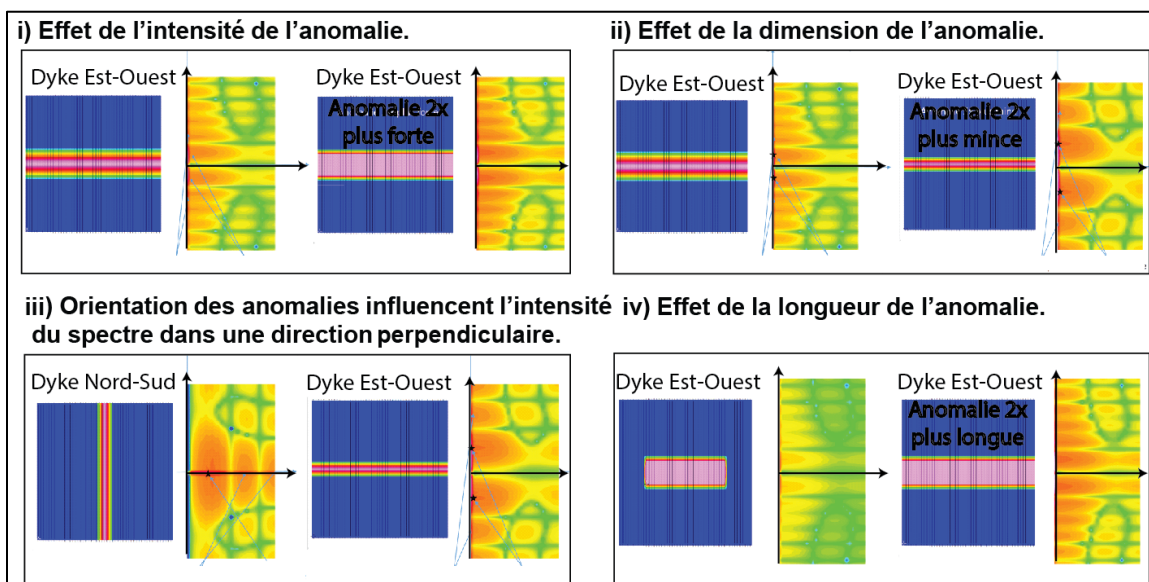


Figure 11 : Représentation des spectres d'énergie en fonction des caractéristiques de l'intensité du champ magnétique (effet sur le spectre d'énergie) : i) Effet de l'intensité de l'anomalie; ii) effet de la dimension (épaisseur) de l'anomalie; iii) effet de l'orientation de l'anomalie et iv) effet de la longueur de l'anomalie.

3.4.1.2 Présentation des résultats de la caractérisation de l'intensité magnétique par le calcul de l'énergie spectrale

Cette section présente les résultats en carte du calcul de l'énergie spectrale par la méthode de la transformée discrète en cosinus (DCT ; e.g. Pun et Zhu, 2009). Les 5 paramètres calculés par cette méthode, c.-à-d. l'énergie des basses fréquences spatiales, l'énergie des fréquences spatiales intermédiaires, l'énergie des hautes fréquences spatiales, l'énergie des fréquences spatiales d'orientation N-S et l'énergie des fréquences spatiales d'orientation E-O qui sont présentées aux **figures 12 à 16**. Pour fin de visualisation sur les figures 12 à 16, les valeurs de l'intensité de l'énergie spectrale par cellule sont classifiées par la méthode des centiles avec un nombre de classes $n = 10$.

Les figures 12a, 13a et 14a montrent les différentes classes définies par le calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales. Les cellules circonscrites par les hautes énergies et représentées par les couleurs chaudes (autant par l'énergie calculée des basses fréquences spatiales, l'énergie des fréquences spatiales intermédiaires et l'énergie des hautes fréquences spatiales) semblent correspondre en général avec une interprétation géologique basée sur le SIGEOM à des ceintures de roches volcano-sédimentaires avec dominance de roches volcaniques mafiques/ultramafiques à intermédiaires (*p. ex.* segment Storm-Evans de la ceinture de Frotet-Evans représenté à la figure 4; Boily et Dion, 2002) et/ou à des roches plutoniques felsiques plus ou moins gneissiques et migmatisées ainsi qu'aux différentes familles de dykes de diabase/gabbro du paléoprotérozoïque. Les cellules circonscrites par les énergies spectrales intermédiaires et représentées par les couleurs jaunes et turquoise semblent correspondre en général avec une interprétation géologique basée sur le SIGEOM aux intrusions mésoarchéennes de Tonalite-Trondhjemite-Granite (TTG), foliées à gneissiques.

Finalement, les cellules circonscrites par les faibles énergies spectrales et représentées par les couleurs froides semblent correspondre en général avec une interprétation géologique basée sur le SIGEOM à des bassins de roches métasédimentaires, associés ou non à des ceintures de roches volcano-sédimentaires ou à des intrusions et/ou des orthogneiss de la suite des TTG mésoarchéennes (Tonalite-Trondhémite-Granite) et possiblement migmatisées. Ceci pourrait s'expliquer par le paroxysme du métamorphisme de ces roches. Les roches de hautes pressions et les éclogites sont généralement des roches paramagnétiques. La magnétite cesse de se former à des pressions généralement comprises entre 10-20 kbar (Clark, 1997).

Dans le cadre du projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017), les domaines magnétiques et les dykes de diabase/gabbro paléoprotérozoïques d'une partie de la zone d'étude de ce projet ont été interprétés manuellement. Les figures 12b, 13b et 14b illustrent respectivement l'énergie des basses fréquences spatiales, l'énergie des fréquences spatiales intermédiaires et l'énergie des hautes fréquences spatiales avec une superposition de ces domaines magnétiques et de dykes paléoprotérozoïques. Généralement, une bonne correspondance peut être observée entre les domaines magnétiques interprétés dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017) et les cellules classifiées à partir de l'énergie spectrale dans le cadre de ce projet. De plus, les différentes familles de dykes de diabase/gabbro du paléoprotérozoïques peuvent également être discriminées selon leurs orientations avec le calcul de l'énergie spectral des fréquences spatiales d'orientation N-S et d'orientation E-O (**Figures 15 et 16**).

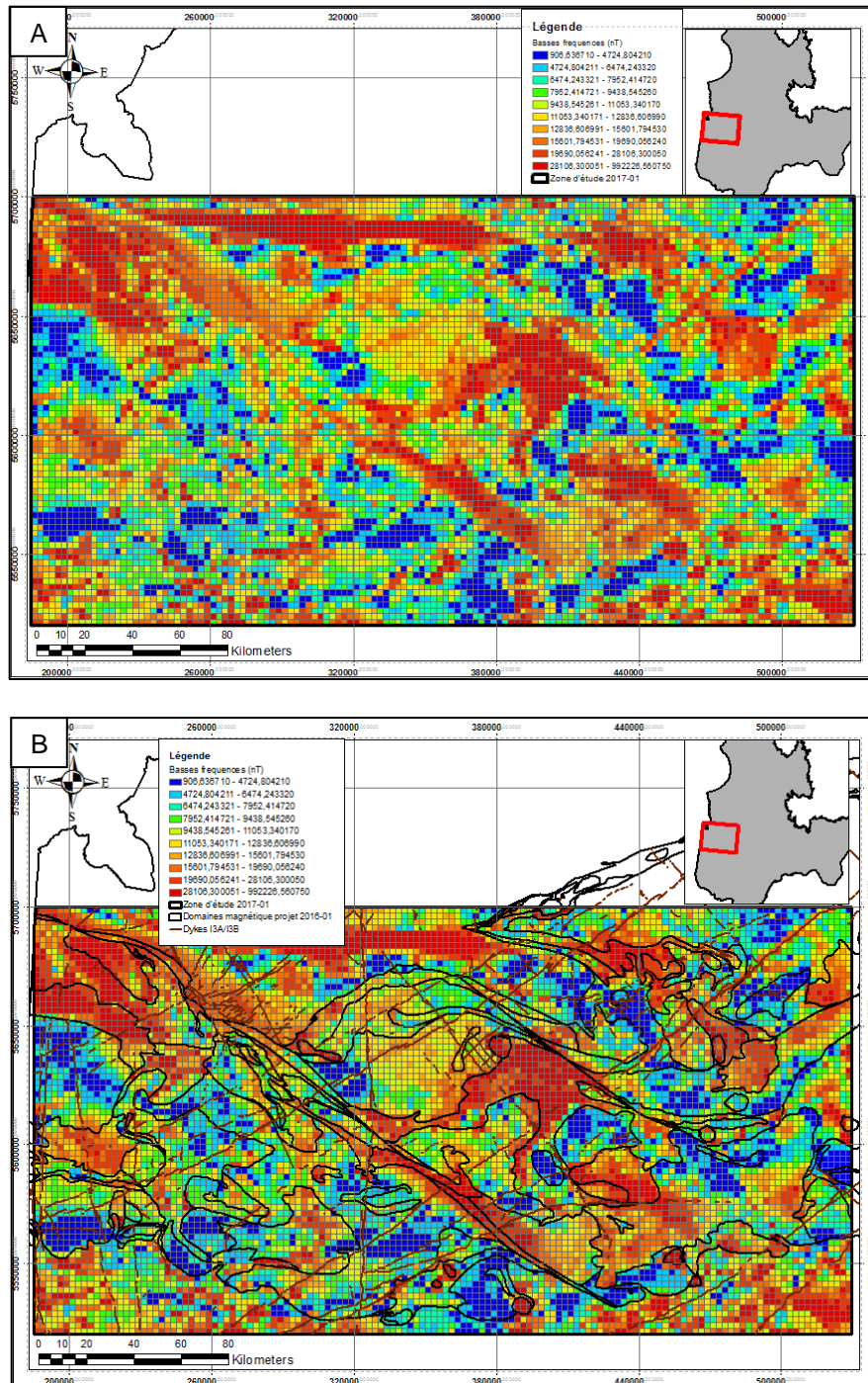


Figure 12 : A) Calcul de l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales (≤ 1 cycle/km) avec une classification par la méthode des centiles ($n = 10$ classes). B) Calcul de l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales (≤ 1 cycle/km) avec une classification par la méthode des centiles ($n = 10$ classes) avec la représentation des domaines magnétiques (lignes noires) et des dykes de diabase/gabbro paléoprotérozoïques (traits bruns) interprétés manuellement dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). Remarquez la bonne correspondance générale entre les domaines magnétiques interprétés dans le cadre du projet 2016-01 et l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales.

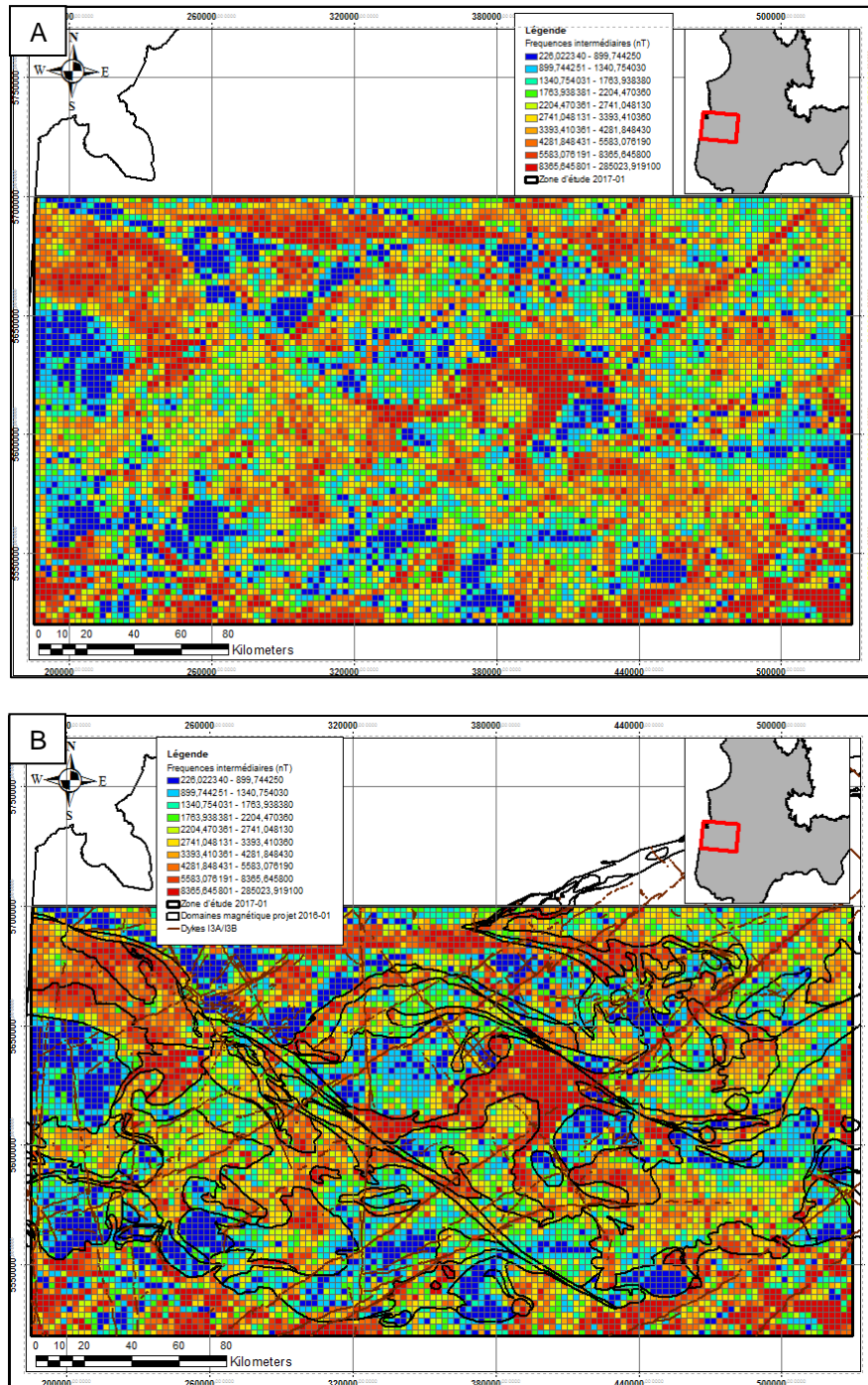


Figure 13 : A) Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales intermédiaires ($1 <> 2$ cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles ($n = 10$ classes). B) Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales intermédiaires ($1 <> 2$ cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles ($n = 10$ classes) avec la représentation des domaines magnétiques (lignes noires) et des dykes de diabase/gabbro paléoprotérozoïques (traits bruns) interprétés manuellement dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). Remarquez la bonne correspondance générale entre les domaines magnétiques et certains dykes tardifs orientés NE-SO interprétés dans le cadre du projet 2016-01 et l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales.

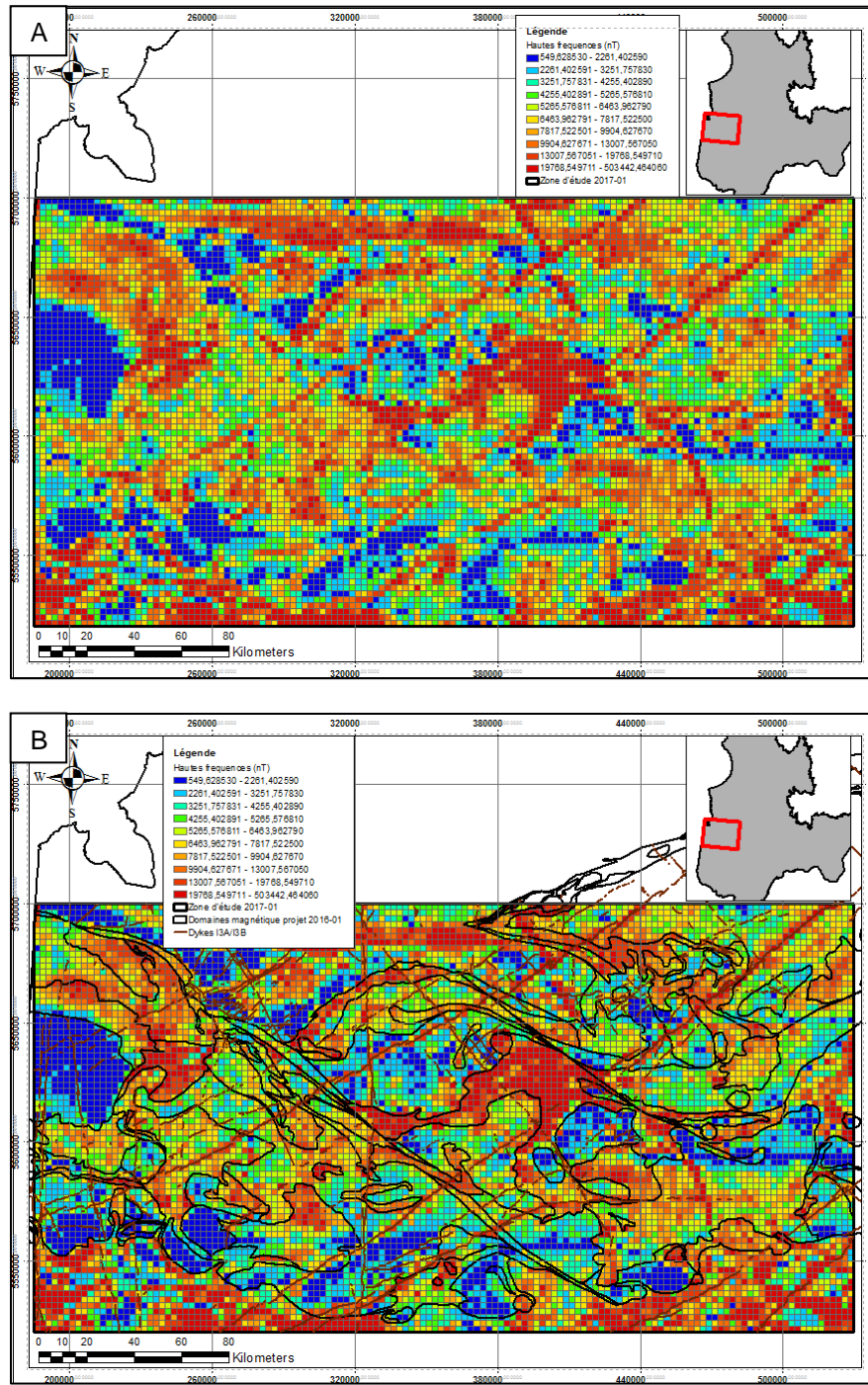


Figure 14 : A) Calcul de l'énergie spectrale des hautes fréquences spatiales ($2 < 10$ cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles ($n = 10$ classes). B) Calcul de l'énergie spectrale des hautes fréquences spatiales ($2 < 10$ cycles/km) avec une classification par la méthode des centiles ($n = 10$ classes) avec la représentation des domaines magnétiques (lignes noires) et des dykes de diabase/gabbro paléoproterozoïques (traits bruns) interprétés manuellement dans le cadre du projet 2016-01 (Lavoie, 2017). Remarquez la bonne correspondance générale entre les domaines magnétiques et la majorité des dykes tardifs orientés NE-SO et certains dykes N-S et NO-SE interprétés dans le cadre du projet 2016-01 et l'énergie spectrale des basses fréquences spatiales.

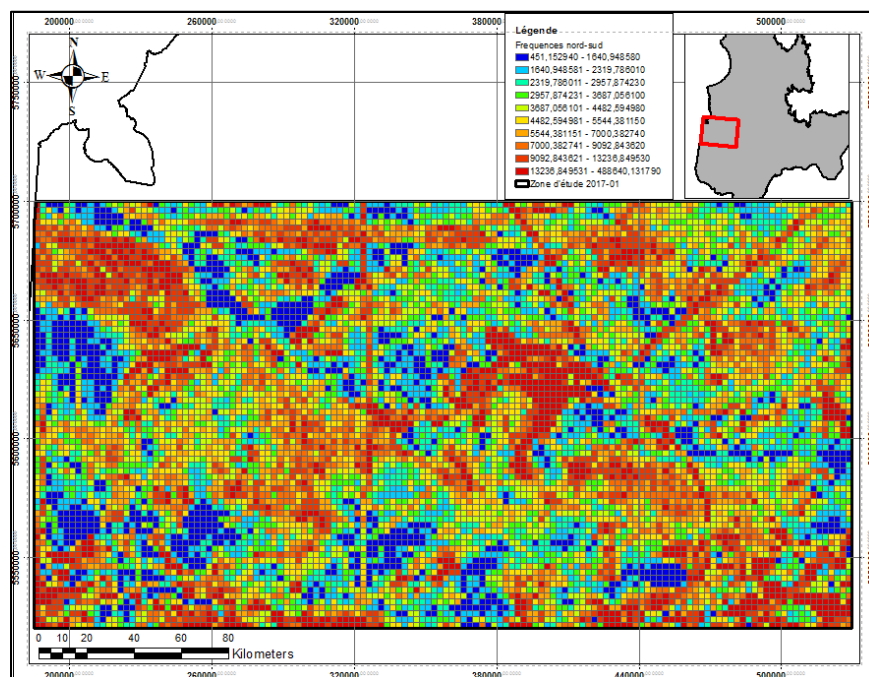


Figure 15 : Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales orientées nord-sud avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). Remarquez les domaines magnétiques nord-sud représentés par les anomalies magnétiques causées par les dykes paléoprotérozoïques orientés nord-sud.

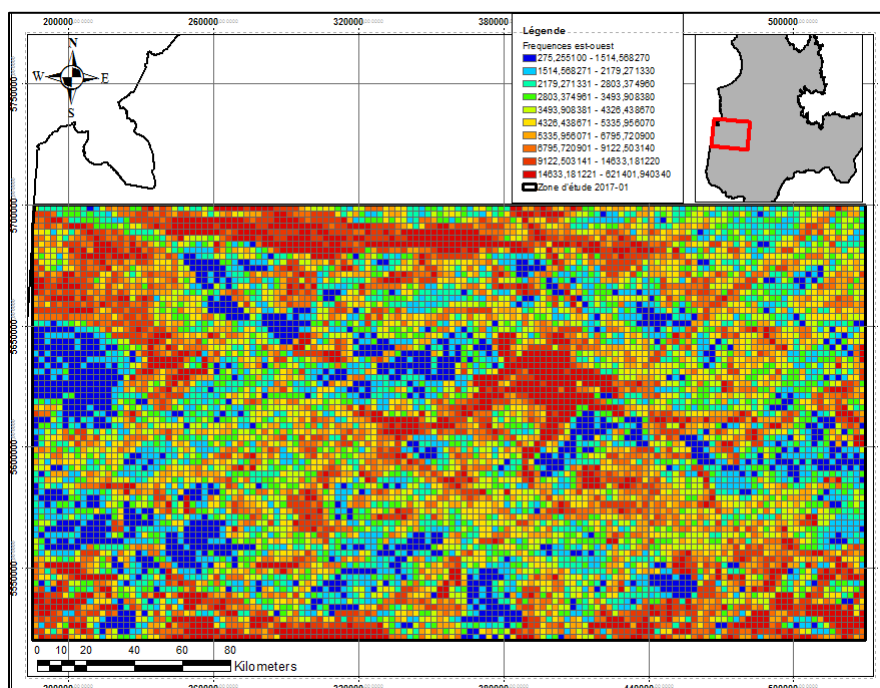


Figure 16 : Calcul de l'énergie spectrale des fréquences spatiales orientées est-ouest avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes). Les domaines magnétiques nord-sud représentés par les anomalies magnétiques causées par les dykes paléoprotérozoïques orientés nord-sud et bien visibles sur la figure 15, ne sont plus circonscrits sur cette figure.

3.4.2 Analyse texturale

L'analyse texturale est souvent utilisée en segmentation d'images. Pour les paramètres texturaux (**Annexe 2**), une égalisation d'histogramme est appliquée sur l'image initiale pour obtenir une image à 64 niveaux d'intensité de gris. L'analyse texturale est produite sur les valeurs d'intensité résultantes. En pratique, les valeurs d'intensité sont d'abord rééquilibrées entre 0 et 1 (re-normalisé par la valeur maximale d'intensité dans l'image). Cette étape permet à l'égalisation de l'histogramme de mieux fonctionner lors des calculs. Mais ce qu'il faut comprendre dans l'analyse texturale, c'est que cette méthode se fait directement sur l'intensité magnétique de chaque cellule. Le nombre de cellules est le même que pour le calcul de l'énergie spectrale ($n = 9\ 936$).

Dans le cadre de cette phase du projet, les données calculées de l'analyse texturale n'ont pu faire l'objet de vérification. Les auteurs recommandent fortement de continuer les tests avec ces nombreuses données disponibles. Pour les besoins du rapport, seulement un exemple d'un coefficient calculé est présenté à la **figure 17** (ex. *GLCM_Contrast*). Pour une meilleure visualisation des données, une classification par la méthode des bris naturels (*Jenks*) avec $n = 10$ classes ont été utilisées pour cette figure.

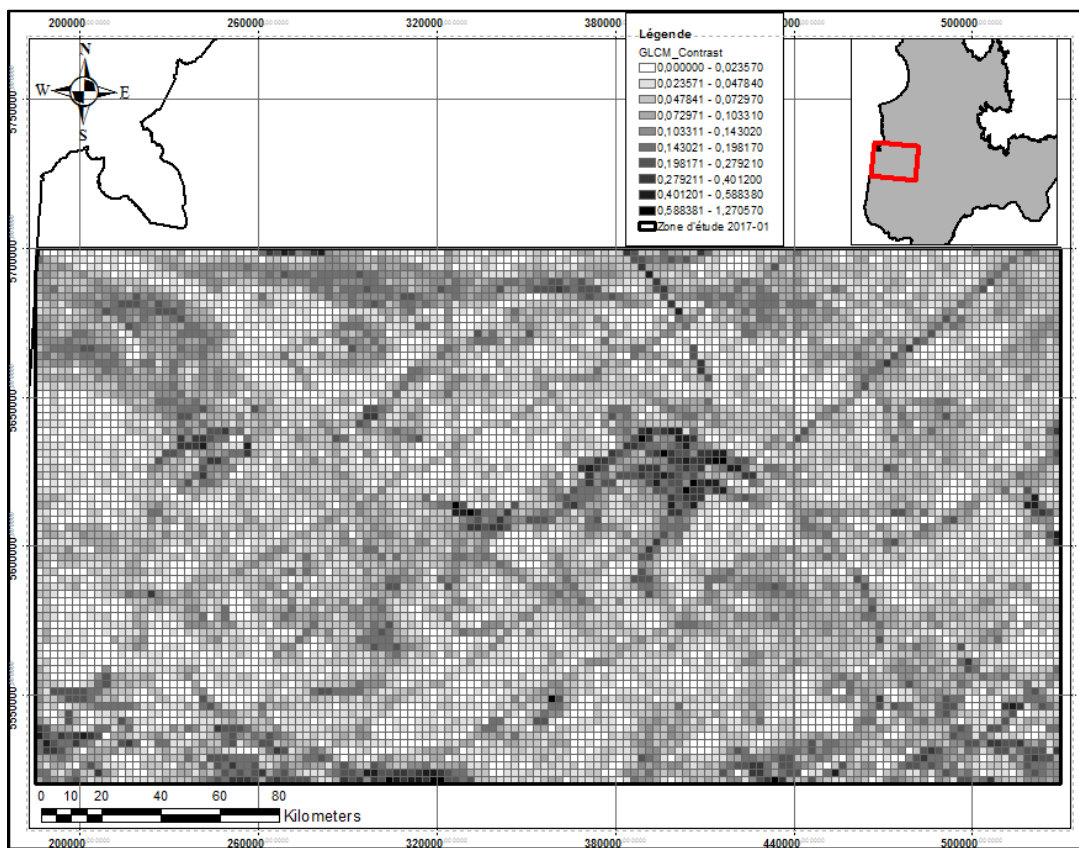


Figure 17 : Calcul du coefficient *GLCM_Contrast* au moyen de caractérisation par l'analyse texturale (classification par la méthode des bris naturels, Jenks, $n = 10$ classes). Les cellules représentées par les segments de roches volcano-sédimentaires de Storm-Evans, Evans-Ouagama et Rivière Obamsca et les roches volcaniques mafiques de la Sous-province d'Abitibi (Figure 4; Boily et Dion, 2002) ainsi que différentes familles de dykes tardifs paléoprotérozoïques sont bien délimités par ce coefficient.

3.4.3 Analyse statistique de l'intensité magnétique

3.4.3.1 Méthodologie

Dans la conception du code MATLAB™ utilisé pour le calcul de l'énergie spectacle et de l'analyse texturale, des lignes de codes ont été insérées pour calculer les statistiques classiques de l'intensité magnétique (c.-à-d. le compte de pixel, les valeurs minimales et maximales, la somme, la moyenne, l'écart-type et la gamme de l'intensité magnétique) et ce, sur chaque cellule (**Annexe 2, volet 2**). Ces paramètres peuvent également être calculés avec le logiciel ArcGIS®-ESRI avec l'outil « *Zonal Statistics as Table* » dans l'outil de calcul « *Spatial Analyst* » (**Figure 18**). Cette opération ne peut être effectuée que sur une couche matricielle de l'intensité magnétique (« *Raster* »). Le fichier de sortie des données calculées est de type ASCII. La matrice peut être alors peuplée avec ce fichier ASCII en effectuant un joint spatial entre les deux tables. Il est important de mentionner que l'analyse statistique de l'intensité magnétique est effectuée sur des données ayant déjà subi un traitement d'interpolation et non sur les données brutes.

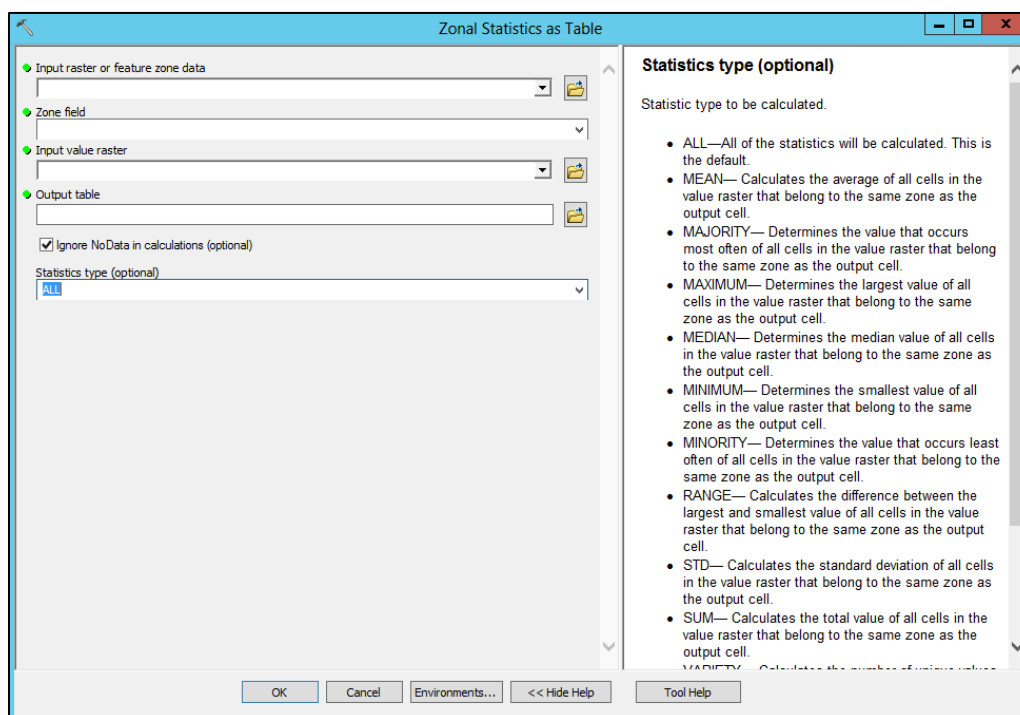


Figure 18: Boîte de dialogue de l'outil *Zonal Statistics as Table* dans ArcGIS®-ESRI.

3.4.3.2 Présentation des résultats de l'analyse statistique

Seuls les résultats de la caractérisation de l'intensité magnétique calculée par la moyenne (**Figure 19**) et l'écart-type (**Figure 20**) seront présentés dans cette section. Ces deux paramètres ont été utilisés pour les tests effectués lors de la segmentation et le regroupement des domaines magnétiques.

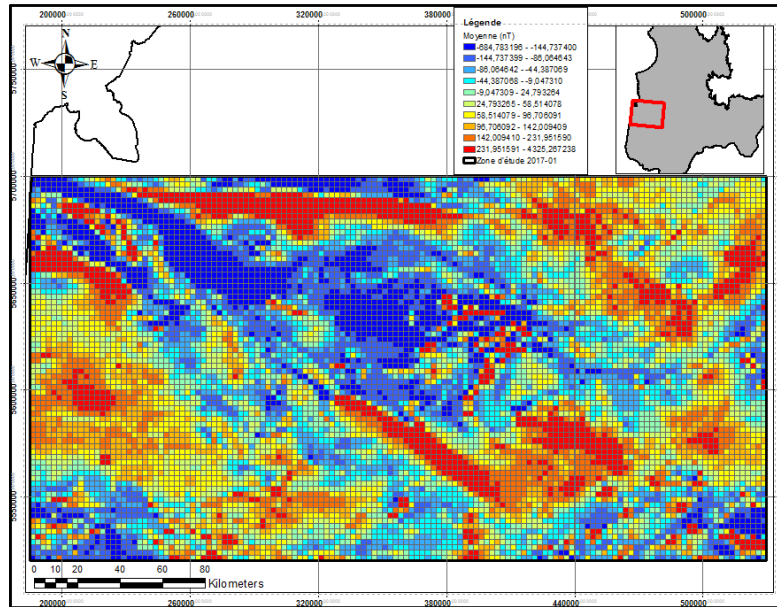


Figure 19 : Caractérisation de l'intensité magnétique calculée par la moyenne de chaque cellule avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes).

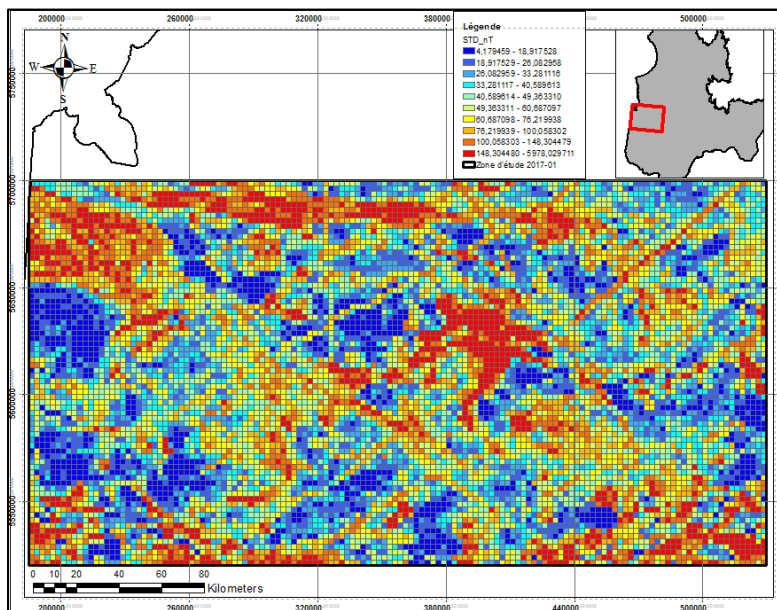


Figure 20 : Caractérisation de l'intensité magnétique calculée par l'écart-type de chaque cellule avec une classification par la méthode des centiles (n = 10 classes).

3.4.4 Reconnaissance semi-automatique et analyse des crêtes magnétiques

3.4.4.1 Définition

Une crête magnétique est représentée par une anomalie linéaire positive de plus forte intensité que son environnement immédiat. Cette crête magnétique est accompagnée de deux creux magnétiques localisés de part et d'autre de celle-ci (**Figure 21**). L'interprétation des crêtes magnétiques est importante lors de l'interprétation des domaines magnétiques. Les domaines magnétiques peuvent être interprétés au moyen du contraste magnétique entre deux domaines (interprétation manuelle; p. ex. projet 2016-01; Lavoie, 2017) ou au moyen de l'énergie spectrale, de l'analyse texturale et de l'analyse statistique de l'intensité magnétique (présent rapport). Un paramètre vient souvent appuyer l'interprétation des domaines magnétiques : la caractérisation du rubanement magnétique (crête magnétique) observé dans chaque domaine magnétique (**Figure 22**; projet 2016-01). Selon Chardon et *al.* (2008), l'analyse géométrique du motif structural des fabriques tectoniques (c.-à-d. crête magnétique) peut se faire par : 1) la forme des trajectoires; 2) la déflexion (orientation); 3) le regroupement (densité) et 4) la linéarité. Dans le cadre de ce projet, un volet s'est attaqué au développement d'une méthodologie de reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques pour définir deux des quatre paramètres mentionnés ci-haut, soit l'orientation et la densité. Le développement de cette méthodologie permet d'éliminer le biais d'interprétation engendré par l'interprétation manuelle des crêtes magnétiques. Cette interprétation sera variable en fonction de l'observateur, de la limite de l'œil humain, des traitements géophysiques effectués sur le levé aéromagnétique (filtre), par des paramètres externes, etc. La méthodologie est présentée à la section 3.4.4.2.

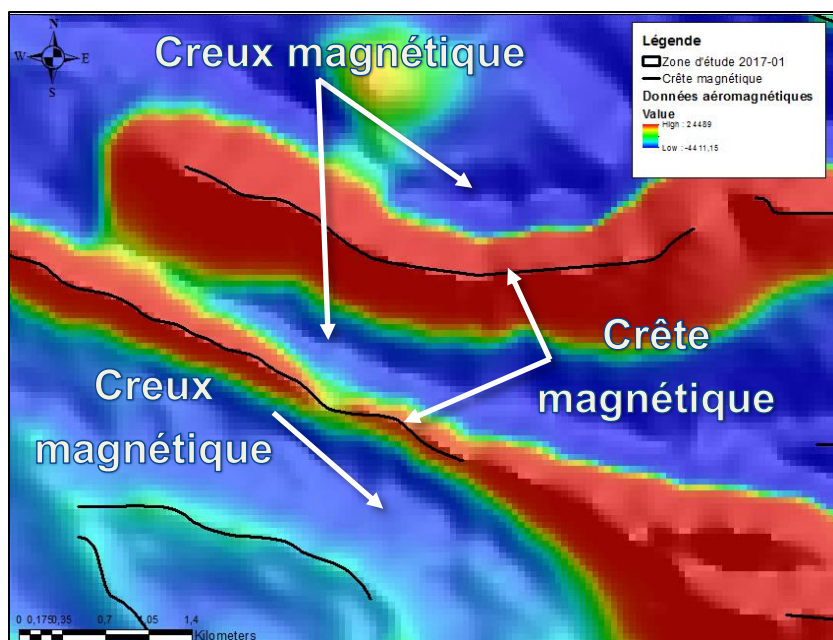


Figure 21 : Représentation d'une crête magnétique avec deux creux magnétiques de part et d'autre de cette dernière.

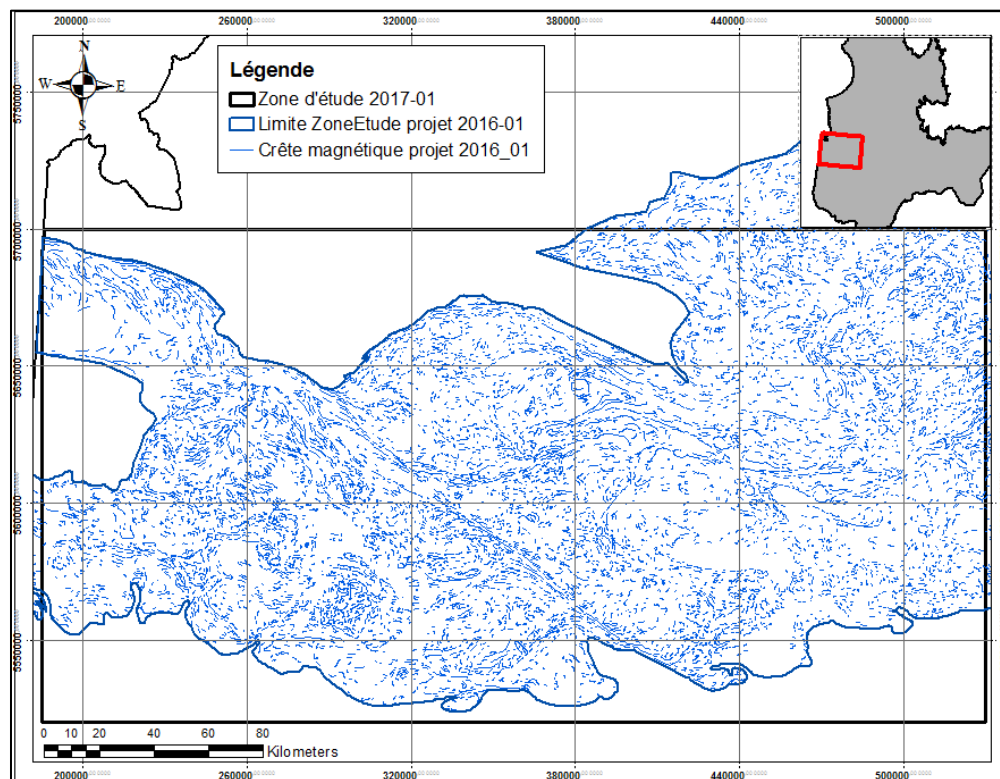


Figure 22 : Interprétation manuelle des crêtes magnétiques (lignes simples bleues) effectuée sur la zone d'étude 2016-01 (lignes grasses bleues) dans le cadre du projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017).

3.4.4.2 Méthodologie pour la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques

La méthodologie développée pour la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques dans le cadre de ce projet se veut simple et peut être effectuée en quelques étapes seulement (**Figure 23**). Comme mentionné précédemment, la méthodologie élimine les biais de l'observateur et augmente l'efficacité lors de l'interprétation structurale des levés magnétométriques. Par contre, elle nécessite les logiciels Geosoft™ et ArcGIS®-ESRI. À l'image de la classe d'entité créée à la section 3.3 (matrice), il est très important de s'assurer que la classe d'entité créée pour les crêtes magnétiques (classe d'entités vectorielles) ait la même projection que le fichier matriciel format .GRD du levé aéroporté (généralement le géoïde WGS84 et la projection UTM).

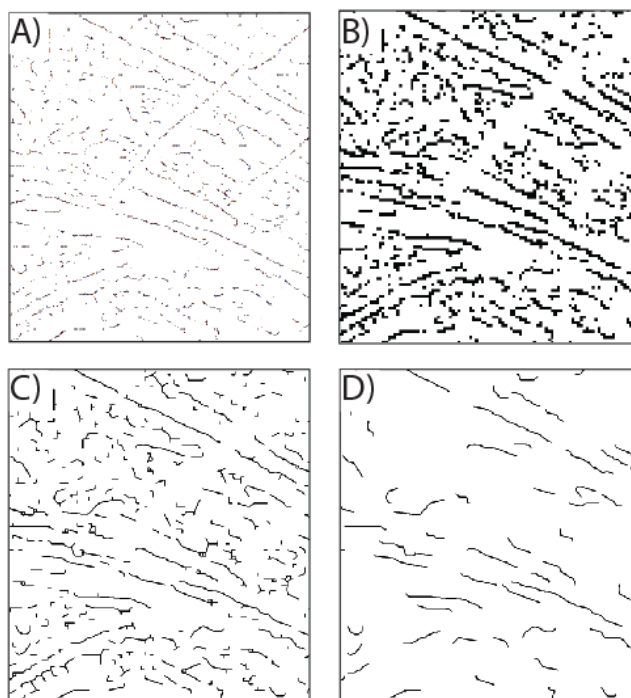


Figure 23 : Figure synthèse de la méthodologie développée pour la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques à partir d'un levé magnétométrique. A) Création de points anomaux (x,y) avec le logiciel Geosoft™. B) Création d'une couche matricielle à partir des points anomaux (x,y) en A à l'aide du logiciel ArcGIS®-ESRI. C) Création d'une classe d'entité vectorielle à partir de la couche matricielle en B à l'aide du logiciel ArcGIS®-ESRI. D) Filtrage du bruit de fond pour avoir le rubanement magnétique « résiduel » à l'aide du logiciel ArcGIS®-ESRI.

Les paragraphes suivants présentent les principales étapes de la méthodologie.

Étape 1

La première étape est effectuée avec le logiciel Geosoft™. Il s'agit de calculer spatialement des points anomaux (x,y) à partir du fichier matriciel en format .GRD Geosoft™ avec la fonction *Grid Peaks* (**Figure 24**; « *Grid and Image -> Utilities -> Grid Peaks* »). Cet outil permet de détecter et de trouver des anomalies magnétiques par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986) dans un fichier matriciel en format .GRD Geosoft™. Pour chaque cellule considérée, l'outil compare une valeur avec huit valeurs de voisins naturels dans quatre directions (selon les colonnes, les rangées et les 2 diagonales). L'outil permet de détecter les anomalies avec quatre niveaux de sensibilité (**Tableau 2**). Pour détecter et trouver une faible quantité d'anomalies, il faut utiliser le niveau de sensibilité *normal* (4) qui est le niveau par défaut. Par contre, pour détecter et trouver toutes les crêtes magnétiques, il faut utiliser le niveau de sensibilité 1 « *All ridge peaks* ». Pour le projet en cours, les anomalies ont été détectées avec le niveau de sensibilité 2 et qui se nomme « *Even more peaks* » dans l'outil (**Tableau 2**) et qui donnait un bon équilibre entre un nombre trop faible de points anomaux et un nombre trop élevé de points anomaux (trop de bruit de fond). Aucune valeur de coupure n'a été utilisée (option « *Grid value cutoff level* ») et l'option « *No. of passes of smoothing filter* » a été laissée à 0 (valeur par défaut). La **figure 25** montre un exemple de résultat des anomalies calculées par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986) sur un secteur de la zone d'étude 2017-01.

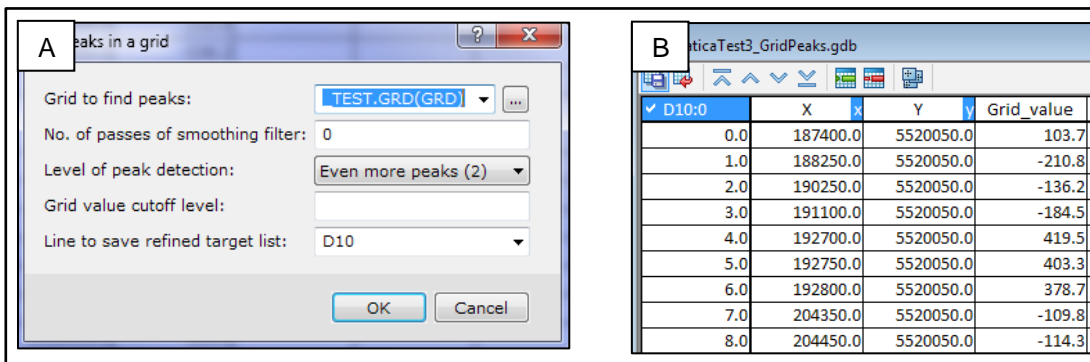


Figure 24 : A) Boîte de dialogue de l'outil *Grid Peaks* (*Grid and Image -> Utilities -> Grid Peaks*) du logiciel Geosoft™. B) Fichier de sortie dans le logiciel Geosoft™.

Tableau 2 – Quatre niveaux de sensibilité pour le calcul des anomalies par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986) avec l'outil *Grid Peaks* du logiciel Geosoft™. Source : Geosoft™.

Niveau de sensibilité	Description
Normal (4)	<i>Grid values in all nearest grid cells are lower.</i>
More peaks (3)	<i>Grid values in any three directions are lower.</i>
Even more peaks (2)	<i>Grid values in any two directions are lower.</i>
All ridge peaks (1)	<i>Grid values in one direction are lower</i>

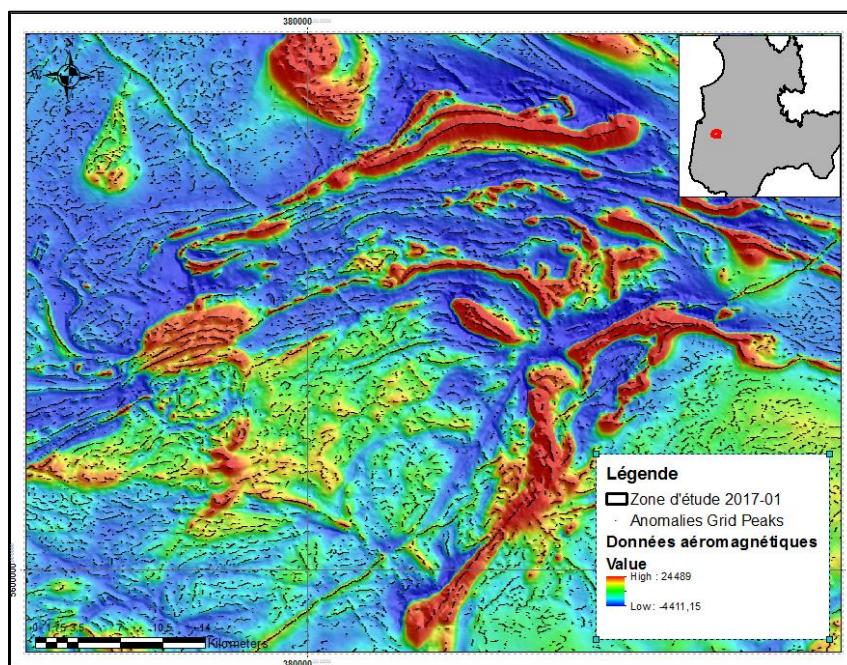


Figure 25 : Exemple de points anomaliques détectés par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986) avec l'outil *Grid Peaks* à partir du logiciel Geosoft™ dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans.

Étape 2

Une fois les points anomaliques détectés par la méthode de Blakely (Blakely et Simpson, 1986), la deuxième étape est de les importer du format GEOSOFT (**Figure 24b**) au format ASCII (*p. ex.* fichier Excel) pour pouvoir ultimement l'importer dans le logiciel ArcGIS®-ESRI dans une classe d'entité spatiale vectorielle (*Shapefile* ou Géodatabase). Une fois les points anomaliques importés dans ArcGIS®-ESRI, un champ dont la variable est de type Entier (*Integer*) doit être créé dans cette classe d'entité. Par la suite, ce champ doit être peuplé par le chiffre « 1 » dans chaque ligne. Cette manipulation est importante lors de la création de la couche matricielle qui sera effectuée à la prochaine étape.

Étape 3

La troisième étape consiste à créer une couche matricielle à partir de la classe d'entité spatiale vectorielle de l'étape 2. Cette étape est effectuée avec le logiciel ArcGIS®-ESRI avec l'outil « *Point to Raster* » (**Figure 26** : « *Conversion Tools -> To Raster -> Point to Raster* ») qui permet de convertir un ensemble de points (x, y) en une couche matricielle. Lors de la création de la couche matricielle, il est très important de sélectionner le champ de type Entier (*Integer*) créé à l'étape 2 dans l'option « *Value Field* ». La couche matricielle peut être créée avec plusieurs grosseurs de recherche de cellule (**Figure 26** ; option *Cellsize*). Dans le cadre de ce projet, six (6) grosseurs de recherche de cellule (*Cellsize*) ont été testées soit : i) 50 mètres, ii) 75 mètres, iii) 100 mètres, iv) 125 mètres, v) 150 mètres et finalement, vi) 200 mètres. Si la grosseur de recherche de cellule est trop petite, les pixels créés à partir des points anomaliques ne se toucheront pas. Dans ce cas, la couche matricielle ne sera pas représentative du rubanement magnétique réel du socle rocheux.

De la même manière, si la grosseur de recherche de cellule est trop grande, les pixels créés à partir des points anomaux généreront trop d'artefacts. Ces artefacts ne représenteront aucunement le rubanement magnétique réel du socle rocheux. Il faut alors trouver un juste équilibre entre les deux pour avoir la meilleure représentation possible du rubanement magnétique réel du socle rocheux et représenté par les crêtes magnétiques. Il va s'en dire que cette étape est cruciale pour obtenir un résultat qui se rapproche le plus possible de la réalité terrain en termes de rubanement magnétique. La moyenne par cellule qui sera calculée de la déflexion (orientation) et du regroupement (densité) dépendra directement du choix qui sera effectué à cette étape. Pour le projet en cours, les grosseurs de recherche de cellule (*Cellsize*) de 50 mètres et de 75 mètres furent éliminées, car les vecteurs générés sont généralement trop courts. Les grosseurs de recherche de cellule (*Cellsize*) de 150 mètres et de 200 mètres furent également éliminées, car il y avait trop d'artefacts générés par la transformation de la couche matricielle à la classe d'entité spatiale vectorielle (étape suivante). Les couches matricielles générées par les grosseurs de recherche de cellule (*Cellsize*) de 100 mètres et de 125 mètres semblent représenter avec le plus d'exactitude le rubanement magnétique réel du socle rocheux. Pour la suite du rapport, seulement les résultats générés par les grosseurs de recherche de cellule (*Cellsize*) de 125 mètres seront présentés (**Figure 27**).

Les auteurs croient par contre que le résultat pourrait différer d'un levé magnétométrique à l'autre selon le secteur étudié. Il se peut que sur un secteur donné, une couche matricielle générée par une grosseur de recherche de cellule (*Cellsize*) de 75 mètres donne des résultats de meilleure qualité sur le rubanement magnétique réel qu'une couche matricielle générée par une grosseur de recherche de cellule (*Cellsize*) de 125 mètres. Il est alors important de faire les tests appropriés sur chaque terrain et de comparer avec les informations disponibles dans les bases de données.

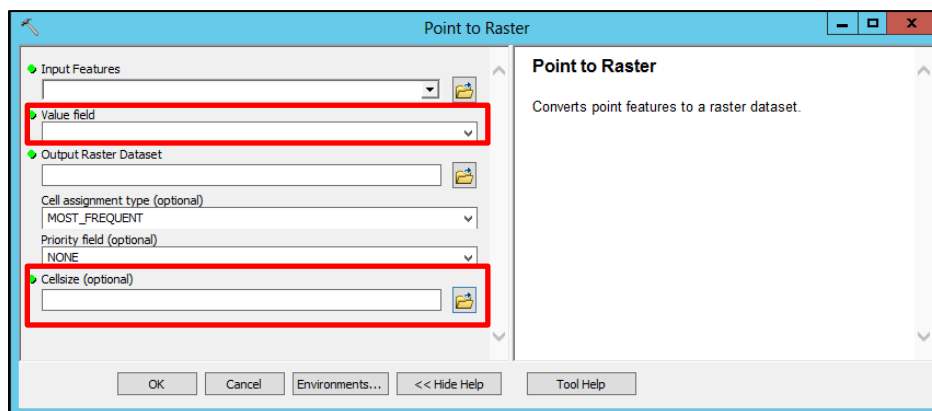


Figure 26: Boîte de dialogue de l'outil « *Point to Raster* » dans ArcGIS®-ESRI.

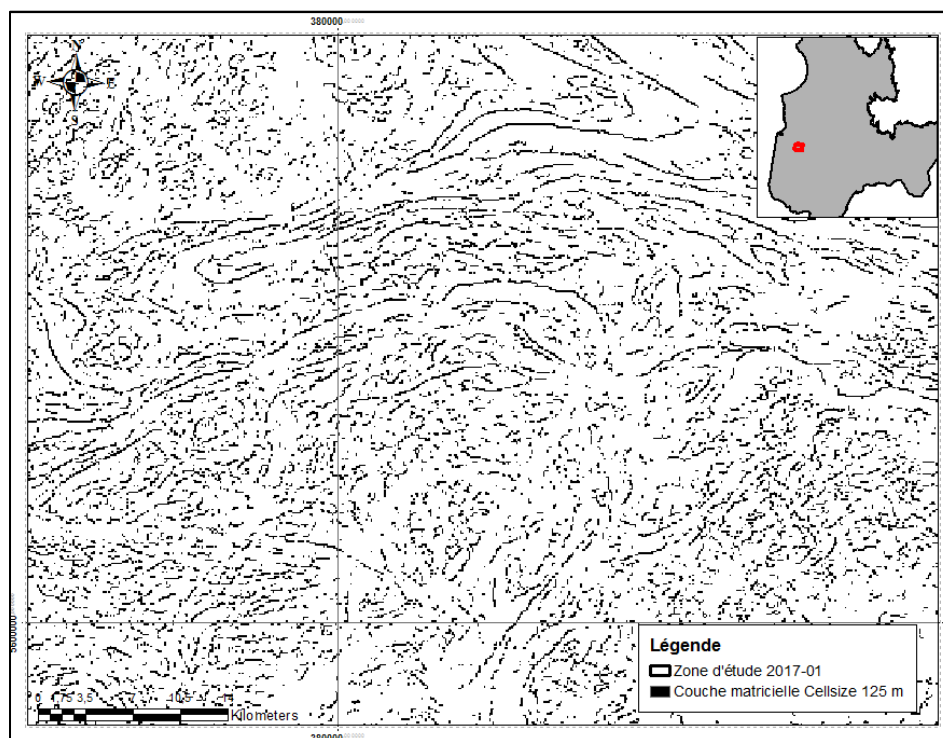


Figure 27 : Exemple de couche matricielle générée avec une grosseur de recherche de cellule (*Cellsize*) de 125 mètres dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25).

Étape 4

La quatrième étape consiste à transformer la couche matricielle en une classe d'entité spatiale vectorielle. Cette étape est effectuée avec le logiciel ArcGIS®-ESRI avec l'outil « *Raster to Polyline* » (**Figure 28** : « *Conversion Tools -> From Raster -> Raster to Polylin* »). Lors de la création de classe d'entité spatiale vectorielle représentant les crêtes magnétiques, il est important de sélectionner le champ de type Entier (*Integer*) créé à l'étape 2 dans l'option « *Value Field* » (**Figure 28**). À cette étape, il est nécessaire d'ajouter quelques champs dans notre classe d'entité spatiale vectorielle. Les champs qui doivent être ajoutés sont : 1) Longueur (m), 2) Orientation (°) et 3) Densité. La densité du rubanement magnétique sera calculée par le compte de pixel contenu dans chaque cellule une fois le bruit de fond du rubanement magnétique éliminé (étape suivante). La **figure 29** montre le résultat dans le secteur du segment de Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans à partir de la couche matricielle générée avec une grosseur de recherche de cellule (*Cellsize*) de 125 mètres. Sur cette figure, les vecteurs ont subi un traitement avec l'outil « *Smooth Line* » (« *Cartography -> Smooth Line* ») qui permet d'atténuer les vecteurs. Deux méthodes d'atténuation (algorithmes) sont disponibles avec le logiciel ArcGIS®-ESRI (**Figure 30**): 1) la méthode « *PEAK* » (acronyme pour « *Polynomial Approximation with Exponential Kernel* ») et 2) la méthode d'interpolation de Bézier. Pour l'étude en cours, la méthode « *PEAK* » a été utilisée avec une tolérance (*Smoothing Tolerance*) de 500 mètres.

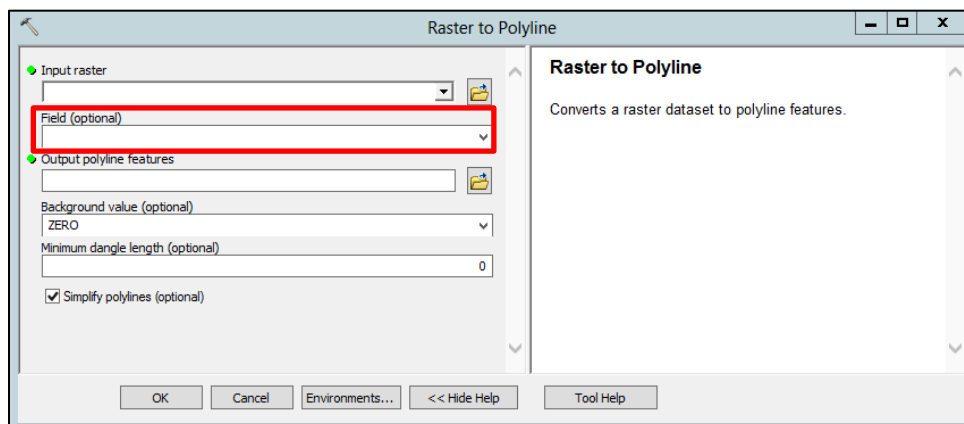


Figure 28: Boîte de dialogue de l'outil « *Raster to Polyline* » dans ArcGIS®-ESRI.

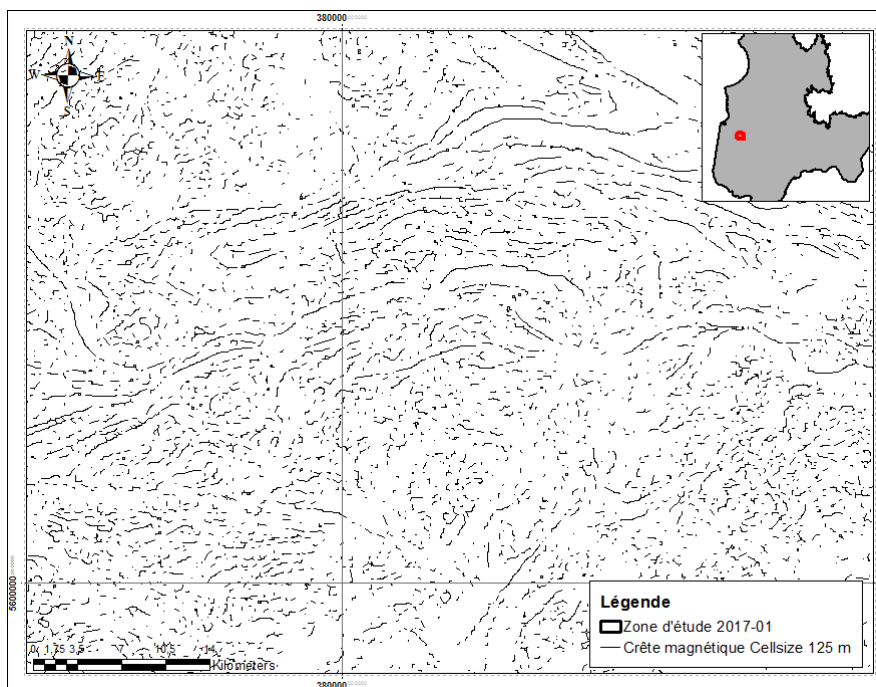


Figure 29 : Exemple de la classe d'entité spatiale vectorielle générée à partir de la couche matricielle de l'étape 3 (*Cellsize* de 125 mètres) dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25). Les vecteurs ont subi un lissage par la technique *PEAK* (voir texte pour les explications).

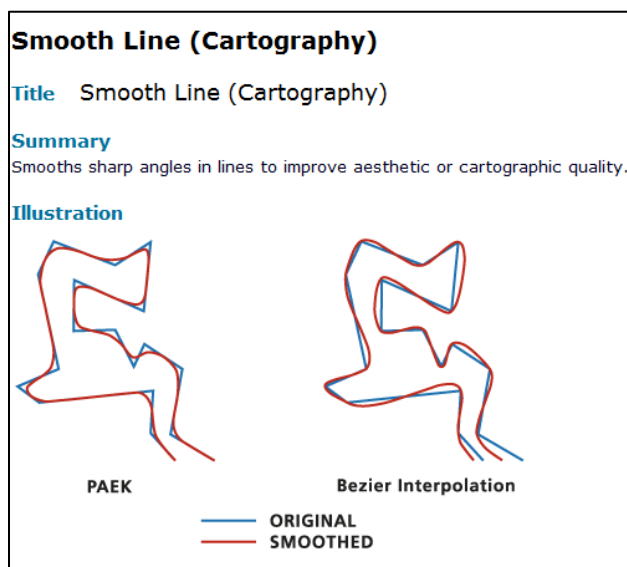


Figure 30: Algorithme d'atténuation des vecteurs disponible dans ArcGIS®-ESRI : 1) 1) par la méthode *PEAK* (acronyme pour *Polynomial Approximation with Exponential Kernel*) et 2) par la méthode d'interpolation de Bézier. Dans notre cas, la méthode *PEAK* a été utilisée. Source : ArcGIS®-ESRI.

Étape 5

La cinquième étape consiste à éliminer les vecteurs représentant le « bruit de fond » du rubanement magnétique. Le but de cette étape est de représenter le rubanement magnétique régional et d'éliminer au maximum les effets des discontinuités magnétiques tardives. Pour éliminer ce « bruit de fond » magnétique, plusieurs tests ont été effectués : éliminer les vecteurs de moins de 100 m, de 150 m, de 200 m, de 300 m, de 400 m, de 500 m, de 600 m, de 700 m, de 800 m, et finalement de 1000 m. Dans notre cas, pour obtenir une représentation juste et fidèle du rubanement magnétique du socle rocheux, éliminer les vecteurs d'une longueur de 2 fois l'écart-type (en éliminant les vecteurs plus petits que 752 m) semblait représenter un résultat plausible (**Figure 31**). La **figure 32** montre la comparaison entre l'interprétation manuelle des crêtes magnétiques dans le cadre du projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017) et la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques dans le cadre de ce projet. Généralement, il y a une bonne correspondance entre les deux résultats. Certains secteurs ont plus d'informations avec une méthode et inversement. La **figure 33** montre le résultat final de la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques sur le secteur d'étude 2017-01.

Encore une fois, les auteurs croient que le résultat pourrait différer d'un levé magnétométrique à l'autre selon le secteur étudié. Il se peut que sur un secteur donné, éliminer les vecteurs plus petits que 2 fois l'écart-type s'avère n'être aucunement représentatif de la réalité terrain en termes de rubanement magnétique. C'est pourquoi il est important de faire les tests appropriés sur chaque terrain et de comparer avec les informations disponibles dans les bases de données.

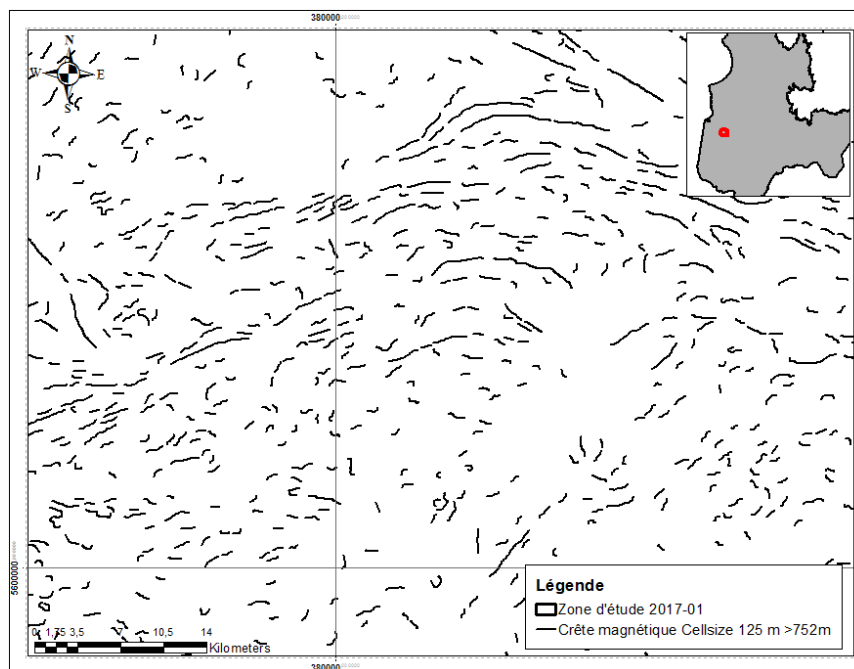


Figure 31 : Exemple de la classe d'entité spatiale vectorielle sans « bruit de fond » dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25). Les vecteurs de moins de 752 mètres (plus petits que 2 fois l'écart-type) ont été éliminés. Cette figure représente le rubanement magnétique utilisé pour calculer l'orientation moyenne et la densité moyenne pour chaque cellule de la matrice.

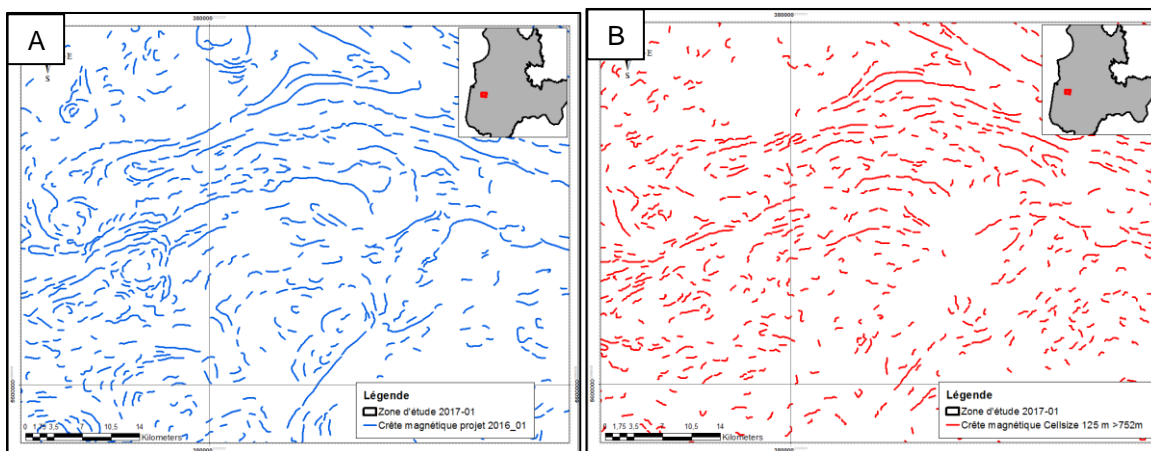


Figure 32 : Comparaison entre A) l'interprétation manuelle des crêtes magnétiques effectuées dans le cadre du projet CONSOREM 2016-01 (Lavoie, 2017) et B) la reconnaissance semi-automatique des crêtes magnétiques dans le secteur du segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans (même localisation que la figure 25) dans le cadre du projet CONSOREM 2017-01.

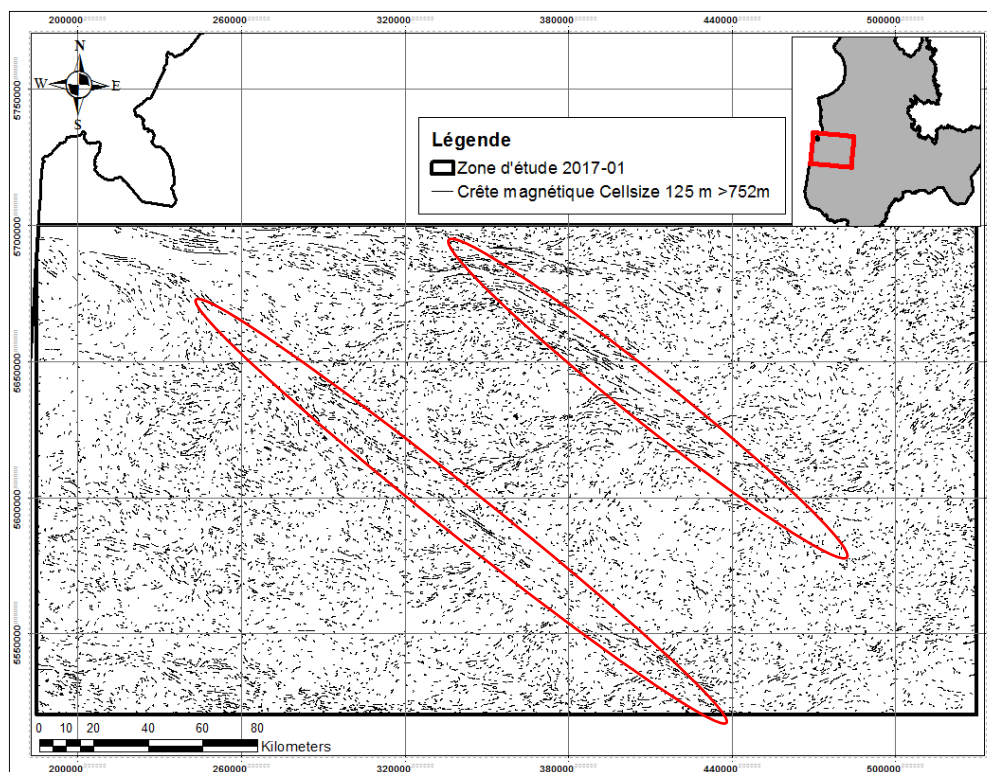


Figure 33 : Résultat de la reconnaissance semi-automatique des vecteurs représentant les crêtes magnétiques sur le secteur d'étude (*Cellsize* de 125 mètres et les vecteurs plus grands que 752 mètres). Remarquez les traces bien visibles des zones de déformation en décrochement dextre de la rivière Nottaway et du ruisseau Lucky Strike (ovales rouges). Le segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de Frotet-Evans ressort également très bien.

Étape 6

La sixième et dernière étape consiste à calculer l'orientation moyenne (ainsi que l'écart-type associé) des vecteurs représentant le rubanement magnétique ainsi que la densité moyenne du rubanement magnétique pour chaque cellule de la matrice. Pour le calcul de l'orientation de chaque vecteur, les auteurs ont utilisé le logiciel MapInfo® à l'aide de l'outil « *Line Orientation* » disponible dans Discover (« *Discover -> Data Utilities -> Line Orientation* »). Cette étape nécessite d'exporter la classe d'entité dans le logiciel MapInfo®, d'effectuer le calcul de l'orientation des vecteurs et d'importer de nouveau la table du format MapInfo (.TAB) en format *Shapefile* (.SHP). Une fois cette petite manipulation effectuée, une nouvelle couche matricielle sera générée à partir de la couche vectorielle finale (**Figure 33**) avec l'outil « *Polyline To Raster* » (**Figure 34** : « *Conversion Tools -> To Raster -> Polyline To Raster* »). Lors de la création de cette couche matricielle, il est très important d'utiliser la valeur de l'orientation des vecteurs calculée avec le logiciel MapInfo® dans l'option « *Value Field* » et de mettre la même dimension de recherche de cellule (*Cellsize*) utilisée à l'étape 3 (c.-à-d. 125 mètres dans notre cas). Avec cette manipulation, chaque pixel aura la valeur de l'orientation provenant du vecteur correspondant.

Par la suite, avec l'outil *Zonal* « *Statistic as Table* » dans le logiciel ArcGIS®- ESRI (**Figure 18** ; dans l'outil de calcul « *Spatial Analyst* »), il sera possible de calculer les statistiques classiques sur-le-champ « *Orientation* » dans chaque cellule en utilisant le champ « *Orientation* » des

vecteurs calculé avec le logiciel MapInfo® dans l'option « *Value Field* » (**Figure 18**). Ainsi, la moyenne (MEAN), la médiane (MEDIAN) et l'écart-type (STD) de la variable orientation des vecteurs seront calculées pour chaque cellule et également la densité du rubanement magnétique, qui elle sera donnée par le compte de pixel dans chaque cellule (SUM). Naturellement, certaines cellules auront des valeurs « *Null* » puisque le rubanement magnétique ne sera pas nécessairement présent dans toutes les cellules. Les **figures 35, 36 et 37** illustrent les résultats de l'orientation moyenne, de l'écart-type et de la densité moyenne par cellule sur la zone d'étude.

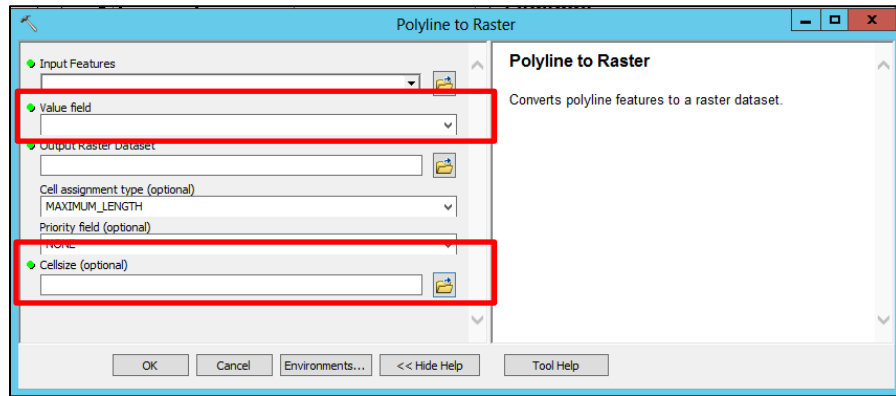


Figure 34: Boîte de dialogue de l'outil « *Polyline To Raster* » dans ArcGIS®-ESRI. Il est très important d'utiliser la même dimension de recherche de cellule (*Cellsize*) utilisée à l'étape 3 (c.-à-d. 125 mètres dans notre cas).

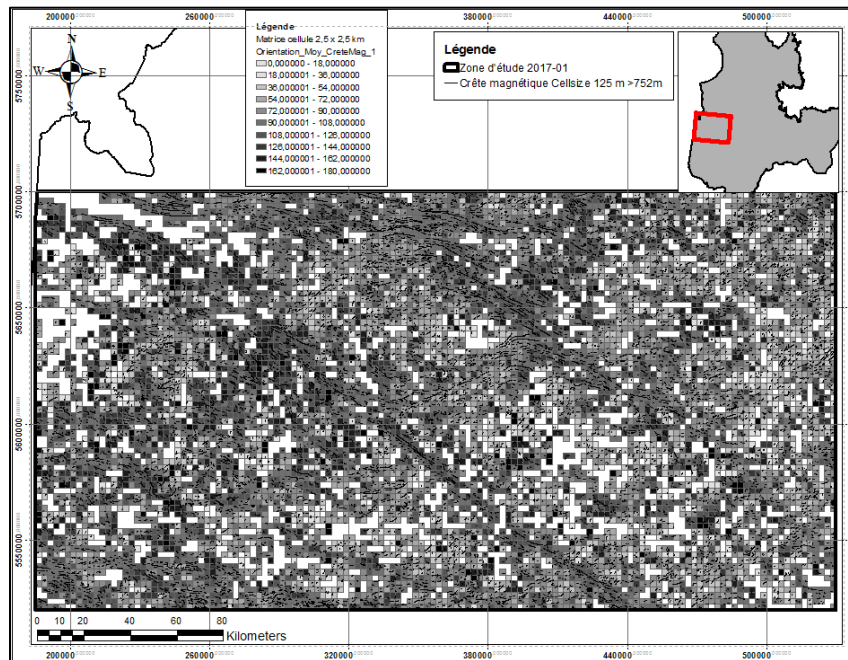


Figure 35: Orientation moyenne des crêtes magnétiques pour chaque cellule sur la zone d'étude. Plus les couleurs tendent vers le noir, plus l'orientation tend vers 0° ou vers 180° . Les zones en blancs correspondent avec des cellules avec absence de rubanement magnétique (*Null*). Classification par intervalle régulier, $n = 10$ classes.

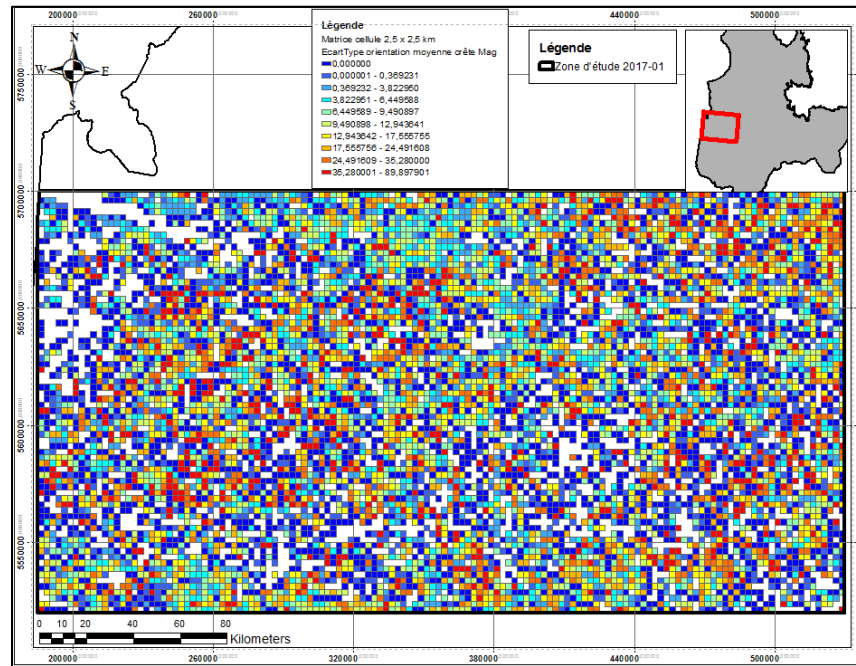


Figure 36: Variabilité (écart-type) de l'orientation moyenne des crêtes magnétiques pour chaque cellule sur la zone d'étude. Les couleurs froides représentent de faibles variabilités tandis que les couleurs chaudes représentent de fortes variabilités. Classification par la méthode des centiles, n = 10 classes.

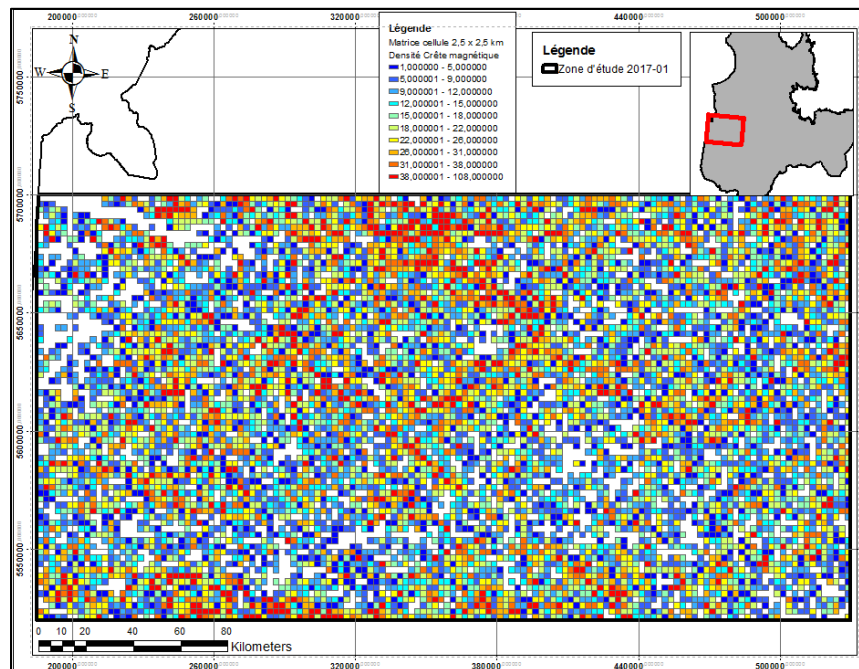


Figure 37: Densité moyenne des crêtes magnétiques pour chaque cellule sur la zone d'étude. Les couleurs froides représentent de faibles densités tandis que les couleurs chaudes représentent de fortes densités. La densité moyenne a été calculée à partir du compte de pixel (SUM) de la couche matricielle générée avec la classe d'entité spatiale vectorielle des crêtes magnétiques (Cellsize de 125 mètres et les vecteurs plus grands que 752 mètres). Classification par la méthode des centiles, n = 10 classes.

3.4.4.3 Synthèse

Avec la méthodologie développée en quelques étapes (**Figure 23**), il est maintenant possible de reconnaître et de vectoriser, et ce, de manière semi-automatique, les crêtes magnétiques à partir d'un levé magnétométrique. La méthodologie se veut simple et amène un gain substantiel d'efficacité lors de l'interprétation structurale des levés magnétométriques. De plus, elle élimine le biais de l'observateur contrairement à l'interprétation manuelle des crêtes magnétiques. Cette méthodologie, nouvelle et innovatrice, pourrait être utilisée facilement par les firmes de consultants et les compagnies pour les études structurales effectuées à partir de n'importe lequel levé magnétométrique. Par contre, elle nécessite un logiciel de traitement des données géophysiques (*p. ex.* Geosoft™) et un logiciel à géoréférence spatiale (*p. ex.* ArcGIS®-ESRI).

3.5 Regroupement et classification (*Clustering*)

3.5.1 Introduction

Cette étape est de loin la plus critique dans le processus développé. C'est ici que les cellules contiguës, rassemblant des caractéristiques communes, seront fusionnées pour former des domaines magnétiques uniformes et cohérents. Il existe des centaines de techniques de regroupement et de classification. Dans le cadre de ce projet, il nous a été impossible d'en tester plusieurs. Nous avons sélectionné deux algorithmes de regroupement et de classification qui était offerte dans le logiciel statistique JMP® version 8.0.2 (onglet « *Analyze -> Multivariate Methods -> Cluster* »). Les deux algorithmes de regroupement et de classification testés sont: 1) les K-moyennes et 2) la méthode hiérarchique. Les prochains paragraphes présentent quelques résultats de regroupement et de classification effectués à partir de ces deux algorithmes.

3.5.2 Regroupement et classification par les algorithmes de type K-Moyennes

3.5.2.1 Définition

Le partitionnement en K-moyennes (*K-means*) est une méthode de partitionnement de données basé sur la distance et un problème d'optimisation combinatoire. Étant donné des points et un entier « K », le problème est de diviser les points en K-groupes (*clusters*) de façon à minimiser une certaine fonction. Cet algorithme doit généralement être utilisé avec de grosses bases de données (jusqu'à 100 000 observations). Pour les petites bases de données, les résultats risquent d'être plus sensibles et variables.

3.5.2.2 Méthodologie

Plusieurs tests ont été effectués avec la méthode de regroupement et de classification par les algorithmes K-Moyennes. Premièrement, il faut déterminer le nombre de paramètres qui seront utilisés pour le regroupement et la classification. Dans le cadre de ce projet, aucune analyse en composante principale (ACP) n'a été effectuée pour vérifier les paramètres corrélables entre eux. Des tests aléatoires ont alors été effectués sur le nombre de paramètres utilisés lors des différents tests. Deuxièmement, il faut choisir entre trois (3) options disponibles dans le logiciel JMP® (**Figure 38**): 1) « *K-Means Clustering* », 2) « *Normal Mixture* » et 3) « *Self-Organizing Map* ». Seulement la première option a été testée ici. Et finalement, un nombre de classes (*clusters*) doit être défini pour chaque test (**Figure 38**). Pour ce projet, les tests ont été effectués soit avec 8 classes, ou soit avec 10 classes.

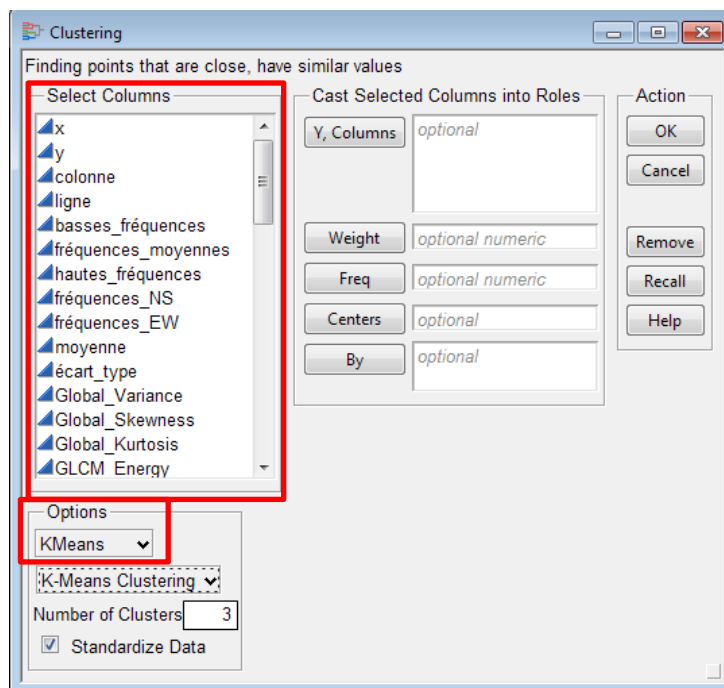


Figure 38: Boîte de dialogue de l'outil « Clustering » (Regroupement-Classification) du logiciel JMP® avec l'option « K-Means » sélectionnée.

3.5.2.3 Présentation des résultats par le regroupement/classification des algorithmes K-Moyennes

La **figure 39** montre un résultat effectué avec un regroupement par les K-Moyennes avec l'option 1 (*K-Means Clustering*), en utilisant 13 paramètres (**Tableau 3**) et un nombre de classes égal à 8 ($N = 8$). Les domaines magnétiques délimités par ce test sont très bien circonscrits (*p. ex.* pluton granitique à biotite-magnétite de Nottaway localisée dans la zone de déformation de la rivière Nottaway ; **Figure 39**). Ces masses plutoniques interprétées dans le SIGEOM correspondent avec la classe 0 à la **figure 39** (domaines en rouges). De plus, le segment de roches volcano-sédimentaires de Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) ainsi qu'une portion de la ceinture de roches volcano-sédimentaires de la Sous-province d'Abitibi (secteur Chibougamau) ressortent également très bien (**Figure 39**). La grande variété de domaines dans ces segments peut s'expliquer par une grande variété de lithologies comprises dans ces segments de roches volcano-sédimentaires (roches volcaniques ultramafiques à felsiques, formations de fer, gabbro fortement magnétique, intrusions diverses, roches méta-sédimentaires, etc.). Par exemple, la classe 2 est délimitée par une dizaine de cellules qui reviennent systématiquement dans les différents tests effectués (domaines en bruns foncés ; **Figure 40**). Ces cellules correspondent, selon la géologie interprétée provenant de la base de données de SIGEOM, à des unités stratiformes de formations de fer oxydées riches en magnétite, interlitées en quantité variable avec des tufs felsiques ou des basaltes appartenant à la Formation de Rabbit.

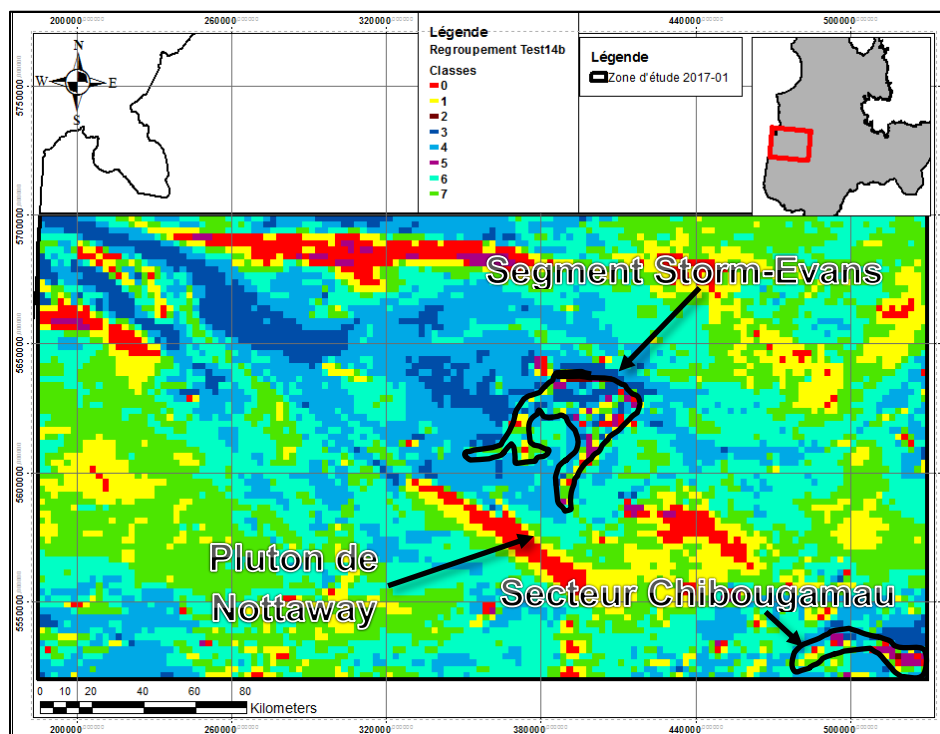


Figure 39: Résultat d'un regroupement/classification obtenu avec le logiciel JMP® par les algorithmes des K-Moyennes en utilisant l'option 1 (*K-Means Clustering*), 14 paramètres et 8 classes (test #14b). Remarquez que les différents domaines magnétiques sont bien délimités par cette méthode de regroupement/classification.

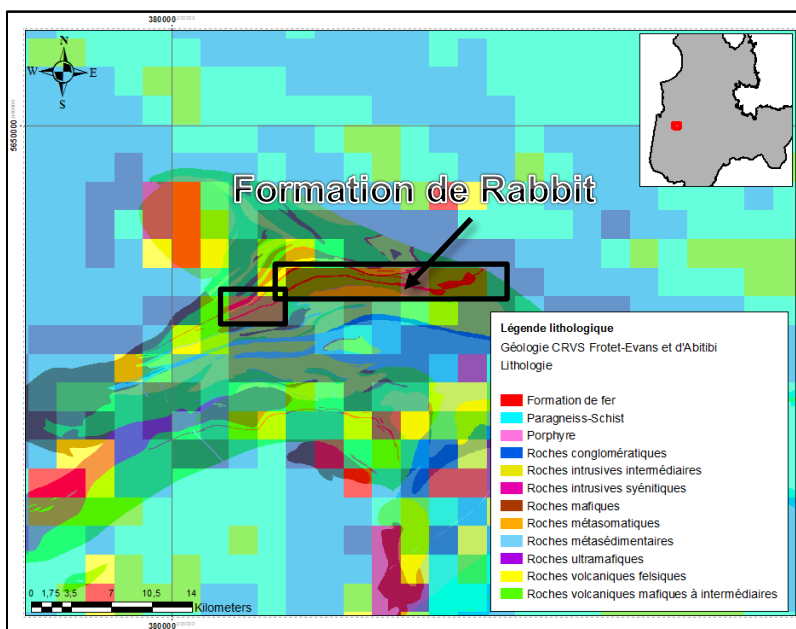


Figure 40: Unités stratiformes de formations de fer oxydées riches en magnétite, appartenant à la Formation de Rabbit (polygones rouges) interprétée dans le segment Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) et bien circonscrites par la classe 2 (encadrés noirs). Source géologie : SIGÉOM.

Tableau 3 – Liste des paramètres utilisés pour le test 14b.

Volet	Technique	Paramètres
VOLET 1	Énergie spectrale par la DCT*	Basses_frequences
		Moyennes_frequences
		Hautes_frequences
		Frequences_NS
		Frequences_EW
VOLET 2	Analyse statistique	Min_nT
		Max_nT
		Sum_nT
		Range_nT
		Mean_nT
		STD_nT
VOLET 3	Crête magnétique	Densite_CreteMag
		Orientation_Moy_CreteMag

* Discrete Cosinus Transform

3.5.3 Regroupement et classification par les algorithmes de type hiérarchiques

3.5.3.1 Définition

Les algorithmes de regroupement hiérarchiques peuvent s'expliquer ainsi : à partir d'un ensemble Ω de "n" individus, l'algorithme répartira ces individus dans un certain nombre de classes. L'algorithme commence avec chacun des points analysés dans sa propre classe (*cluster*). À chaque étape d'itération, les deux classes qui sont les plus près des uns des autres sont combinés dans une seule et même classe. Le processus itératif continu jusqu'à ce qu'il y ait seulement une *classe* qui comprend tous les points d'analyse. Ce processus est généralement bon pour les petites bases de données (quelques centaines d'observations).

3.5.3.2 Méthodologie

Plusieurs tests ont été effectués avec la méthode de regroupement et de classification par les algorithmes hiérarchiques. Comme pour la section précédente (K-MNoyennes), il faut déterminer le nombre de paramètres qui seront utilisés pour le regroupement et la classification. Comme mentionné précédemment, aucune analyse en composante principale (ACP) n'a été effectuée pour vérifier les paramètres corrélables entre eux. Des tests aléatoires ont alors été effectués sur le nombre de paramètres utilisés lors des différents tests. Deuxièmement, il faut choisir entre trois (3) options disponibles dans le logiciel JMP® (**Figure 41**): 1) « Average », 2) « Centroid », 3) « Ward », 4) « Single », 5) « Complete » et finalement 6) « Fast Ward ». Seulement l'option 3 (*Ward*) a été testée dans le cadre de ce projet. Le logiciel construit un dendrogramme comme illustré à la **figure 42**. Un dendrogramme est une représentation graphique d'une classification ascendante hiérarchique; il se présente souvent comme un « arbre binaire » dont les feuilles sont les individus alignés sur l'axe des abscisses ou des ordonnées (**Figure 42**). Et finalement, un nombre de classes (*clusters*) doit être défini pour chaque test (**Figure 42**). Pour déterminer le

nombre de classes, le dendrogramme doit être préalablement calculé et par la suite on peut choisir le nombre de classes en cliquant sur la petite flèche rouge en haut à gauche de la boîte de dialogue indiquée par la flèche rouge à la **figure 42**. Les tests ont été effectués soit avec 8 ou soit 10 classes.

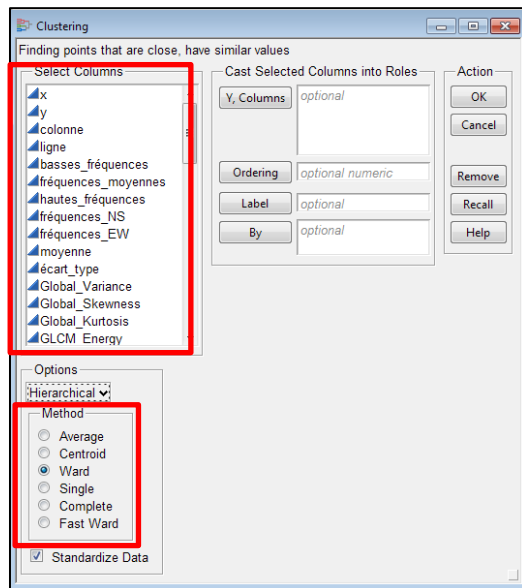


Figure 41: Boîte de dialogue de l'outil « *Clustering* » (Regroupement-Classification) du logiciel JMP® avec la méthode « *Hierarchical* » sélectionnée. Les six (6) options disponibles sont montrées par le rectangle rouge inférieur.

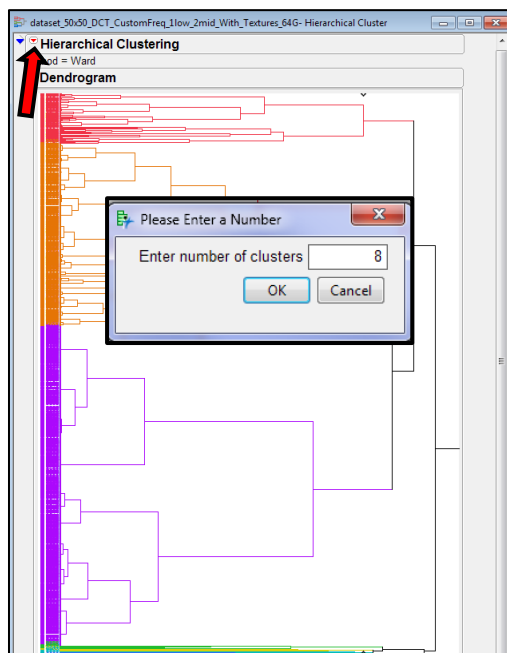


Figure 42: Exemple de dendrogramme calculé par le logiciel JMP® avec la méthode « *Hierarchical* » (« option *Ward* »). Les couleurs représentent les différentes classes (N = 8 classes dans cet exemple).

3.5.3.3 Présentation des résultats par le regroupement/classification des algorithmes hiérarchiques

La **figure 43** montre un résultat effectué avec un regroupement par les algorithmes hiérarchiques avec l'option 3 (*Ward*), en utilisant 4 paramètres (Basses_Fréquences, Moyennes_fréquences, Hautes_Fréquences, Moyenne_nT) et un nombre de classes égal à 8 ($N = 8$). Les domaines magnétiques délimités par ce test sont également très bien circonscrits (*p. ex.* pluton granitique à biotite-magnétite de Nottaway localisé dans la zone de déformation de la rivière Nottaway, pluton dioritique d'Hugh au nord du segment Storm-Evans; **Figure 43**). Ces masses plutoniques interprétées dans le SIGEOM correspondent avec la classe 6 (**Figure 43** : domaines en rouges). Cette classe peut également correspondre aux domaines de haut grade métamorphique (faciès amphibolite supérieur à granulite) comme le domaine localisé dans la partie supérieure ouest du levé correspondant à des paragneiss à biotite ou des diatexites et/ou métatexites dérivées de paragneiss appartenant au Complexe de Rupert ou des roches intrusives tonalitiques à granodioritiques à pyroxène et hornblende du Complexe de Champion (ovale bleu ; **Figure 43**). Comme dans l'exemple présenté à la **figure 39**, le segment de roches volcano-sédimentaires de Storm-Evans (Boily et Dion, 2002) ressort bien. Également, les segments d'Evans-Ouagama (Boily et Dion, 2002), de Frotet-Troilus (Boily et Dion, 2002), d'Assinica (Boily et Dion, 2002), de Colomb-Chabouillé, de la rivière Obmasca, de Némiscau et la partie nord de la Sous-province d'Abitibi (lignes blanches à la **figure 44**) ainsi que de nombreux segments de moindres importances et répertoriés dans le SIGEOM (**Figure 44**) ressortent partiellement ou en totalité. Ces domaines correspondent aux classes 1 à 5 de la **figure 44**. Les ceintures de roches volcano-sédimentaires sont représentés par les polygones en noirs sur cette figure. Se référer à la **figure 4** (page 5) pour la localisation et le nom des différents segments de roches volcano-sédimentaires. De plus, les domaines associés aux dykes de diabase/gabbro tardifs paléoprotérozoïques sont bien délimités, et spécifiquement l'essaim de dykes orientés NE-SO (essaim de dykes de Senneterre). Une fois de plus, la classe 2 délimitée par une dizaine de cellules dans le segment de Storm-Evans est encore observée (domaines en bruns foncés ; **Figure 43**). Ces cellules correspondent, selon la géologie interprétée provenant du SIGEOM, à des unités stratiformes de formations de fer oxydées riches en magnétite, interlitées en quantité variable avec des tufs felsiques ou des basaltes appartenant à la Formation de Rabbit.

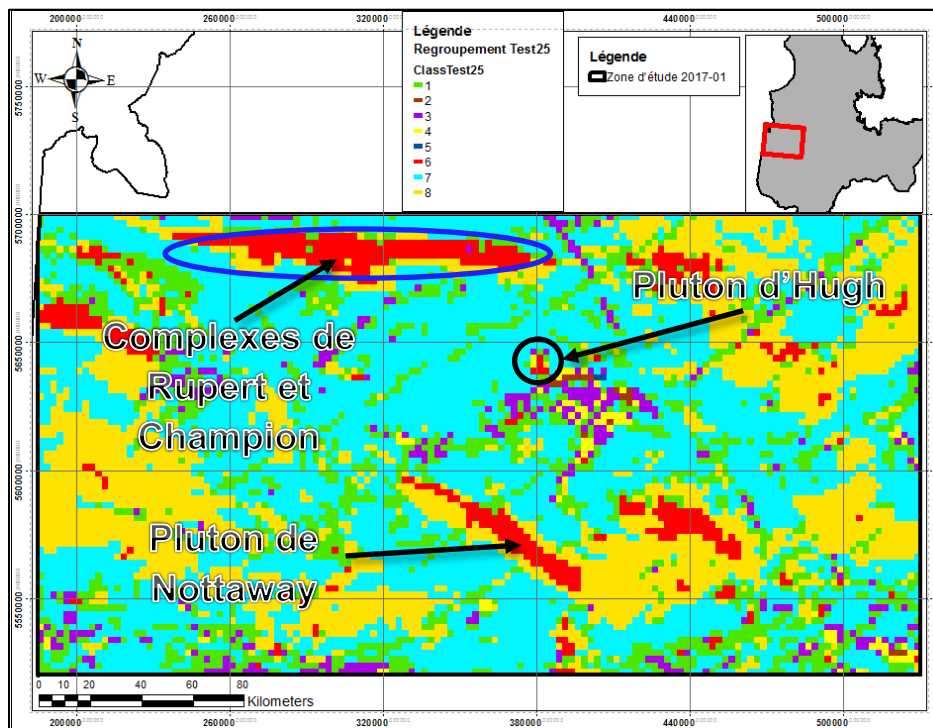


Figure 43: Résultat d'un regroupement/classification obtenu avec le logiciel JMP® par les algorithmes hiérarchiques en utilisant l'option 3 (*Ward*), 4 paramètres et N = 8 classes (Test #25). Remarquez que les différents domaines magnétiques sont bien délimités par cette méthode de regroupement/classification.

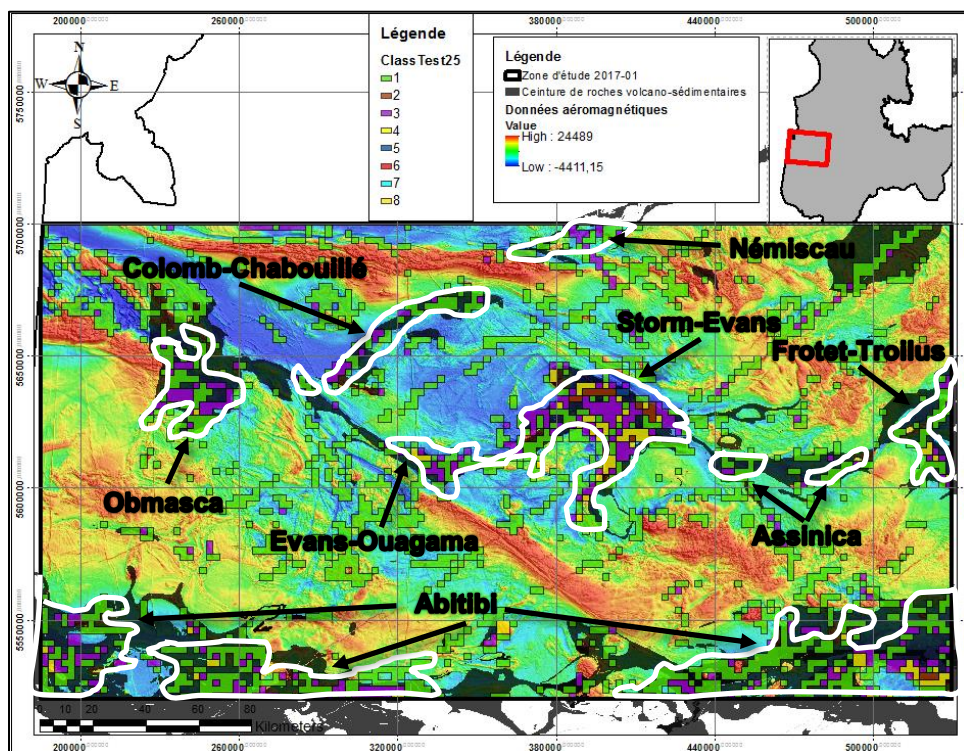


Figure 44: Reconnaissance, partielle ou en totalité, des différents segments de ceintures de roches volcano-sédimentaires (classes 1 à 5, test #25) sur la zone d'étude. Les différents segments de ceintures de roches volcano-sédimentaires sont délimités par les polygones blancs.

3.5.4 Synthèse

Il existe des centaines d'algorithmes de regroupement et de classification. Dans le cadre de ce projet, naturellement, il n'a pas été possible de tous les tester. Seulement deux algorithmes ont été testés et de manière partielle. Par contre, il est clair que ces deux algorithmes fonctionnent relativement bien pour délimiter les différents domaines magnétiques de la zone d'étude à partir de la classification des cellules effectuées par les différentes méthodes décrites précédemment (p. ex. reconnaissance des ceintures de roches volcano-sédimentaires, reconnaissance de certains types de plutons, reconnaissance de faciès métamorphiques de hauts grades, etc.). Il demeure encore beaucoup de travail à faire, mais l'utilisation des algorithmes de regroupement et de classification s'avère une avenue prometteuse pour l'interprétation et la classification des domaines magnétiques de manière semi-automatique.

4 DISCUSSION

Le projet 2017-01 a permis de développer une méthodologie novatrice pour l'analyse des données et l'interprétation géologique des levés magnétométriques, et spécifiquement, des levés aéromagnétiques. La méthodologie développée permet, de manière semi-automatique, de délimiter des domaines magnétiques par les techniques de segmentation d'images fondées sur la classification. Ces techniques qui sont utilisées dans de nombreux domaines ont été testées sur des levés magnétométriques pour ce projet. Plusieurs paramètres ont été assignés aux cellules à partir : 1) de l'analyse spectrale 2) de l'analyse texturale 3) de l'analyse statistique et 4) de l'analyse des crêtes magnétiques. Le spectre d'énergie calculé décrit intégralement les caractéristiques de l'intensité du champ magnétique de chacune des cellules (*c.-à-d.* l'orientation, la largeur ou la profondeur, l'intensité, la dimension/longueur des anomalies magnétiques). Cette approche élimine les artefacts ou l'effet de la variabilité liée au processus d'interpolation classique effectué sur les levés (*p. ex.* Transformées de Fourier). La méthodologie élimine les biais de l'observateur lors d'une interprétation manuelle d'un levé magnétométrique (*p. ex* projet CONSOREM 2016-01 ; Lavoie, 2017).

Par contre, la qualité du résultat final dépend largement de la qualité du processus de segmentation et du résultat segmenté (*c.-à-d.* de la technique de segmentation qui sera choisie). Des centaines de techniques de segmentation existent dans la littérature, mais il n'y a pas de méthode unique qui peut être considérée comme excellente pour toutes les images, pas plus que toutes les méthodes ne sont également bonnes pour une image en particulier (Pal et Pal, 1993). Selon Pavlidis (1977), la segmentation d'image est une problématique de perception psychophysique, et donc, qui n'a pas une solution unique pure. La sélection d'une technique de segmentation appropriée dépend largement du type d'image et des secteurs d'application de ces techniques. C'est pourquoi il est important de choisir la bonne technique pour obtenir le meilleur résultat. Dans le cadre de ce projet, la technique de segmentation utilisée représente une parmi une multitude de méthodes possibles qui n'ont pu être testées.

La méthode devra être optimisée en prenant en compte les éléments suivants :

- i) Raffinement et hiérarchisation des critères de caractérisation (effectuer une analyse en composante principale sur les paramètres);
- ii) Utilisation optimale de l'analyse texturale;
- iii) Discrétisation optimale des cellules selon le levé utilisé;
- iv) Tests avec des cellules en chevauchement et/ou des cellules mobiles;
- v) Optimisation de la méthode en effectuant différents tests avec plusieurs techniques de segmentation d'images;
- vi) Test de sensibilité sur les différentes techniques de segmentation d'images;
- vii) Test sur des levés magnétométriques de très haute résolution (drone) à l'échelle de la propriété;

Plusieurs problématiques n'ont pas été abordées dans ce projet. Une de celles-ci est l'évaluation objective des résultats de segmentation. Selon Pal et Pal (1993), il demeure que l'humain est le meilleur juge pour évaluer le résultat de n'importe quel algorithme de segmentation. Certains indices de validation ont été développés dans la littérature. Il serait intéressant de valider nos résultats de segmentation d'images avec ces indices. Une autre question demeure en suspens et c'est la possibilité de la surpondération de certains paramètres (*p. ex.* l'intensité magnétique). C'est pourquoi les auteurs recommandent fortement la poursuite du projet dans une phase II pour répondre à ces questions. Ultiment, le développement d'un logiciel devrait permettre la segmentation de manière automatique et interactive en différents domaines magnétiques, ce qui fournirait à l'industrie un outil utile pour l'exploration minérale.

5 CONCLUSIONS

Les résultats obtenus dans le cadre du projet 2017-01 ont démontré qu'il est possible de traiter de manière semi-automatique un levé magnétométrique afin de produire une interprétation pseudo-géologique à partir des domaines magnétiques. La nouvelle méthodologie développée permet l'interprétation des levés magnétométriques de haute résolution par des techniques de segmentation d'images basée, entre autres, sur l'énergie spectrale du champ magnétique. De plus, le projet a permis de développer une méthodologie pour la reconnaissance et la vectorisation des crêtes magnétiques.

LIVRABLES

En plus du présent rapport, des quatre (4) présentations *PowerPoint* livrées lors des réunions du comité de gestion scientifique (CGS) et d'une revue de la littérature, plusieurs autres livrables sont inclus avec ce projet. Premièrement, une base de données sous forme GDB, Access et *Shapefile* est livrée. Cette base de données comprend la matrice de 9 936 cellules, les points d'intensité magnétique anormales ayant servi à la création de la couche vectorielle des crêtes magnétiques ainsi que la version brute de cette dernière couche (sans élimination des crêtes magnétiques plus petites que 752 mètres). Deuxièmement, les données de l'intensité magnétique interpolées des levés aéroportés ayant caractérisé les cellules sont également remises sous forme matricielle (.GRD). Troisièmement, les données brutes de la caractérisation des cellules calculées au moyen de la *Discrete Cosine Transform* (DCT) sous forme ASCII (.TXT). Finalement, le code MATLAB™ élaboré pour calculer le spectre d'énergie (analyse spectrale), les textures (analyse texturale) et les statistiques classiques de l'intensité magnétique pour chaque cellule.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement dans un premier temps les partenaires et membres du CONSOREM. Je remercie M. Mikaël Simard qui a construit le code MATLAB™ pour la caractérisation des cellules par l'analyse spectrale et texturale au moyen des *Discrete Cosine Transform*. M. Simard nous a fait gagner un temps précieux et a apporté un gain d'efficacité sans précédent. Je remercie également mes collègues du CONSOREM pour les échanges parfois musclés, mais souvent constructifs et nécessaires à la réussite du projet. Je remercie Mme Brigitte Poirier pour les nombreux commentaires, la révision et la mise en forme finale du document. Un merci pour M. Sylvain Trépanier, toujours disponible pour des discussions-fleuves et la transmission de son savoir, peu importe l'heure de la journée (et ce, même les fins de semaine). Je remercie spécialement M. Réal Daigneault qui, comme toujours, nous amène à nous dépasser. Mais lorsqu'on regarde le résultat final dans son ensemble, on ne peut que le remercier de toujours diriger le bateau contre vents et marées.

RÉFÉRENCES

Allard, M., et Bois, D. 1999. *La géophysique appliquée à l'exploration minérale*. Centre collégial de développement de matériel didactique.

Blakely R.J. and Simpson, R.W., 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies: *Geophysics*, v.51, p.1494-1498.

Bleil, U., et Petersen, N., 1982. Magnetic properties of natural minerals. *Numerical data and functional relationships in science and technology, group V: Geophysics and space research*, 1, 308-365.

Boily, M. and Dion, C., 2002. Geochemistry of boninite-type volcanic rocks in the Frotet-Evans greenstone belt, Opatica subprovince, Quebec: implications for the evolution of Archaean greenstone belts. *Precambrian Research*. V. 115, pp. 349-371.

Butler, R. F., & Butler, R. F., 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes* (Vol. 319). Boston: Blackwell Scientific Publications.

Chardon, D., Jayananda, M., Chetty, T. R., & Peucat, J. J., 2008. Precambrian continental strain and shear zone patterns: South Indian case. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8).

Chinner, G., 1960. Pelitic gneisses with varying ferrous/ferric ratios from Glen Clova, Angus, Scotland. *Journal of Petrology*, 1(1), 178-217.

Clark, D. A., 1997. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 83-104.

D'Amours, I., 2011. Synthèses des levés magnétiques de la Baie-James. Énergie et Ressources Naturelles Québec. DP 2011-08. 5 pages. Autres données numériques.

D'Amours, I., et Intissar, R., 2012. Levé magnétique aéroporté dans le secteur du lac Evans, Baie-James. Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune. DP 2012-01. 8 Pages. Autres données numériques.

Dass, R., Priyanka et Devi, S., 2012. Image segmentation techniques. *International Journal of Electronics & Communication Technology*. Vol. 3, Issue 1.

Dhanachandra, N., Manglem, K., & Chanu, Y. J., 2015. Image segmentation using K-means clustering algorithm and subtractive clustering algorithm. *Procedia Computer Science*, 54(2015), 764-771.

Foucault, A. et Raoult, J.-F., 2005. *Dictionnaire de Géologie*. Dunod, Paris. ISBN 2 10 049071 0.

French, B. M., 1973. Mineral assemblages in diagenetic and low-grade metamorphic iron-formation. *Economic Geology*, 68(7), 1063-1074.

Fu, K. S., et Mui, J. K., 1981. A survey on image segmentation. *Pattern recognition*, 13(1), 3-16.

Grant, F. S., 1985a. Aeromagnetics, geology and ore environments, I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: an overview. *Geoexploration*, 23(3), 303-333.

Grant, F. S., 1985b. Aeromagnetics, geology and ore environments, II. Magnetite and ore environments. *Geoexploration*, 23(3), 335-362.

Haggerty, S. E., 1979. The aeromagnetic mineralogy of igneous rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16(6), 1281-1293.

Horowitz, S.L. et Pavlidis, T., 1974. Picture Segmentation by a Direct Split and Merge Procedure. 2nd International Joint Conference on Pattern Recognition, August 1974, 424-433.

Intissar, R. et Benahmed, S., 2014. Compilation des données aéromagnétiques à haute résolution du Québec. Énergie et Ressources Naturelles Québec. DP 2014-05. 5 pages. Autres données numériques.

Ishihara, S., 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geology*, 27(145), 293-305.

LaBerge, G. L., 1964. Development of magnetite in iron formations of the Lake Superior region. *Economic Geology*, 59(7), 1313-1342.

Lavoie, J., 2017. Sous-province de l'Opatca : nouveau territoire pour l'exploration minérale. Rapport, Projet CONSOREM 2016-01, 68 p.

Leclerc, F., Caron-Côté, E. et Vallières, J., 2016. Levé géologique dans la Sous-province d'Opatca au nord-est de Matagami (région du lac Amisquioumisca). Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, BG 2017-01.

Mageswari, S. U., Sridevi, M., & Mala, C.. 2013. An experimental study and analysis of different image segmentation techniques. *Procedia engineering*, 64, 36-45.

McIntyre, J. I., 1980. Geological significance of magnetic patterns related to magnetite in sediments and metasediments? a review. *Exploration Geophysics*, 11(2), 19-33.

Osborne, E. F., 1962. Reaction series for subalkaline igneous rocks based on different oxygen pressure conditions. *Amer. Mineral.*, 7, 211-226.

Pal, N. R., et Pal, S. K., 1993. A review on image segmentation techniques. *Pattern recognition*, 26(9), 1277-1294.

Pavlidis, T., 1977. Structural Pattern Recognition. Springer, New York.

Pun, C., & Zhu, H., 2009. Textural image segmentation using discrete cosine transform. *Rn*, 1, 1.

Reeves, C., 2005. *Aeromagnetic surveys: principles, practice and interpretation* (Vol. 155). Geosoft.

Roy, G., 2014. Symboles et abréviations de la carte géoscientifique. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. DV 2014-06, 87 p.

Shive, P. N., Frost, B. R., & Peretti, A., 1988. The magnetic properties of metaperidotitic rocks as a function of metamorphic grade: implications for crustal magnetic anomalies. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B10), 12187-12195.

Thériault, R. et Beauséjour, S., 2012. Carte géologique du Québec. Ministère des Ressources naturelles du Québec, DV 2012-06, 8 p., données numériques.

ANNEXES

Annexe 1 – Liste des feuillets SNRC 1:50 000 couvrant la zone d'étude 2017-01.

ID_SNRC	SNRC	ID_SNRC	SNRC	ID_SNRC	SNRC
APREGENT175286	22M13	ISSTSD6204	32J14	ISSTSD6273	32N7
APREGENT175289	22M14	ISSTSD6203	32J15	ISSTSD6268	32N8
APREGENT175292	22M15	ISSTSD6202	32J16	ISSTSD6223	32O1
APREGENT175317	23C10	ISSTSD6206	32J4	ISSTSD6214	32O10
APREGENT175320	23C11	ISSTSD6209	32J5	ISSTSD6217	32O11
APREGENT175323	23C12	ISSTSD6212	32J6	ISSTSD6220	32O12
APREGENT175322	23C13	ISSTSD6211	32J7	ISSTSD6229	32O15
APREGENT175321	23C14	ISSTSD6210	32J8	ISSTSD6240	32O16
APREGENT175238	23C15	ISSTSD6205	32J9	ISSTSD6222	32O2
APREGENT175155	23C16	ISSTSD6161	32K1	ISSTSD6225	32O3
APREGENT175330	23C5	ISSTSD6152	32K10	ISSTSD6228	32O4
APREGENT175154	23D1	ISSTSD6151	32K11	ISSTSD6227	32O5
APREGENT175145	23D10	ISSTSD6154	32K12	ISSTSD6226	32O6
APREGENT175148	23D11	ISSTSD6157	32K13	ISSTSD6221	32O7
APREGENT175151	23D12	ISSTSD6156	32K14	ISSTSD6216	32O8
APREGENT175150	23D13	ISSTSD6155	32K15	ISSTSD6215	32O9
APREGENT175149	23D14	ISSTSD6166	32K16	ISSTSD6230	32P10
APREGENT175160	23D15	ISSTSD6160	32K2	ISSTSD6233	32P11
APREGENT175171	23D16	ISSTSD6159	32K3	ISSTSD6236	32P12
APREGENT175153	23D2	ISSTSD6162	32K4	ISSTSD6235	32P13
APREGENT175156	23D3	ISSTSD6165	32K5	ISSTSD6234	32P14
APREGENT175159	23D4	ISSTSD6164	32K6	ISSTSD6067	32P15
APREGENT175158	23D5	ISSTSD6163	32K7	ISSTSD6066	32P16
APREGENT175157	23D6	ISSTSD6158	32K8	ISSTSD6238	32P2
APREGENT175152	23D7	ISSTSD6153	32K9	ISSTSD6241	32P3
APREGENT175147	23D8	ISSTSD6177	32L1	ISSTSD6244	32P4
APREGENT175146	23D9	ISSTSD6168	32L10	ISSTSD6243	32P5
APREGENT175125	23F2	ISSTSD6171	32L15	ISSTSD6242	32P6
ISSTSD5887	32F13	ISSTSD6213	32L16	ISSTSD6237	32P7
ISSTSD5886	32F14	ISSTSD6175	32L3	ISSTSD6231	32P9
ISSTSD5889	32F15	ISSTSD6180	32L6	ISSTSD6065	33A1
ISSTSD6182	32I12	ISSTSD6179	32L7	ISSTSD6060	33A10
ISSTSD6185	32I13	ISSTSD6174	32L8	ISSTSD6068	33A2
ISSTSD6188	32I14	ISSTSD6169	32L9	ISSTSD6071	33A3
ISSTSD6193	32I5	ISSTSD6254	32M2	ISSTSD6070	33A4

ISSTSD6200	32J10	ISSTSD6253	32M3	ISSTSD6059	33A7
ID_SNRC	SNRC	ID_SNRC	SNRC	ID_SNRC	SNRC
ISSTSD6199	32J11	ISSTSD6270	32N2	ISSTSD6058	33A8
ISSTSD6198	32J12	ISSTSD6269	32N3	ISSTSD6057	33A9
ISSTSD6201	32J13				

SNRC 1:50 000	NOM FEUILLET	SNRC 250 000
032F13	MATAGAMI	032F
032F14	LAC OLGA	032F
032F15	LAC AU GOELAND	032F
032F16	LAC CAPISISIT	032F
032G13	LAC INCONNU	032G
032G14	LAC DES ORIGNAUX	032G
032G15	CHAPAIS	032G
032J02	LAC CLAIRE	032J
032J03	LAC A L'EAU NOIRE	032J
032J04	LAC OMO	032J
032J05	LAC CAPICHIGAMAU	032J
032J06	LAC COMENCHO	032J
032J07	LAC OPATACA	032J
032J10	LAC REGNAULT	032J
032J11	LAC ASSINICA	032J
032J12	RUIS LUCKY STRIKE	032J
032J13	LAC GINGUET	032J
032J14	RIVIERE COIGNE	032J
032J15	LAC TROILUS	032J
032K01	LAC YAPUOUICHI	032K
032K02	LAC PONCHEVILLE	032K
032K03	LAC SOSCUMICA	032K
032K04	LAC BOUCHIER	032K
032K05	LAC MAURICE	032K
032K06	LAC CHABINOCHÉ	032K
032K07	LAC OPATAOUAGA	032K
032K08	LAC AMISQUIOUMISCA	032K
032K09	LAC ROCHER	032K
032K10	LAC SALAMANDRE	032K
032K11	LAC OUAGAMA	032K
032K12	CHUTE AUX IROQUOIS	032K
032K13	LAC RODAYER	032K
032K14	LAC DANA	032K
032K15	LAKE EVANS	032K
032K16	LAC THEODAT	032K
032L01	LAC PAUL-SAUVE	032L
032L02	RIVIERE ROUGET	032L
032L03	LAC SPRADBROW	032L
032L06	LAC GETTE	032L

SNRC 1:50 000	NOM FEUILLET	SNRC 250 000
032L07	RIVIERE DES AULNES	032L
032L08	LAC OBAMSCA	032L
032L09	LAC SUZANNE	032L
032L10	R MISSISICABI OUEST	032L
032L11	RIVIERE MALOUIN	032L
032L14	LAC SALOMON	032L
032L15	RIVIERE PATRICK	032L
032L16	LAC DUSAUX	032L
032M01	R NATOUACAMISIE	032M
032M02	ILE D'HERBOMEZ	032M
032M03	RIVIERE ISCOUISTIC	032M
032M04	FRANCIS ISLAND	032M
032M05	PETITE R MISSISICABI	032M
032M06	RIVIERE OCTAVE	032M
032M07	FORT-RUPERT	032M
032M08	COLLINE JARAY	032M
032N01	LAC LEGOFF	032N
032N02	LAC GIFFARD	032N
032N03	RIVIERE OUASOUAGAMI	032N
032N04	LAC COLOMB	032N
032N05	RUISSEAU GAULIER	032N
032N06	LAC MEZIERES	032N
032N07	LAC NEMISCAU	032N
032N08	LAC DE LA SICOTIERE	032N
032O02	LAC MONTMORT	032O
032O03	LAC VILLON	032O
032O04	LAC WEAKWATEN	032O
032O05	LAC BECHARD	032O
032O06	LAC MESGOUEZ	032O
032O07	LAC LA BARDELIERE	032O
32E12	LAC RAYMOND	032E
32E15	RIVIERE TURGEON	032E
32E16	COLLINES GAUDET	032E
32E17	LAC GRASSET	032E

Annexe 2 – Liste des 40 paramètres calculés pour la caractérisation des cellules de 2,5 x 2,5 km.

Volet	Technique	Coefficients
VOLET 1	Énergie spectrale par la DCT*	Basses_frequences
		Moyennes_frequences
		Hautes_frequences
		Frequences_NS
		Frequences_EW
	Analyse texturale par la DCT*	Global_Variance
		GLCM_Energy
		GLCM_Contrast
		GLCM_Entropy
		GLCM_Homogeneity
		GLCM_SumAverage
		GLCM_Variance
		GLCM_Dissimilarity
		GLCM_AutoCorrelation
		GLRLM_SRE
		GLRLM_LRE
		GLRLM_GLN
		GLRLM_RLN
		GLRLM_RP
		GLRLM_LGRE
		GLRLM_HGRE
		GLRLM_SRLGE
		GLRLM_SRHGE
		GLRLM_LRLGE
		GLRLM_LRHGE
		GLRLM_GLV
		GLRLM_RLV
		NGTDM_Coarseness
		NGTDM_Complexity
NGTDM_Strength		
VOLET 2	Analyse statistique	COUNT
		Min_nT
		Max_nT
		Sum_nT
		Range_nT
		Mean_nT
		STD_nT
VOLET 3	Crête magnétique	Densite_CreteMag
		EcartType_OrientationMoy
		Orientation_Moy_CreteMag

* Discrete Cosinus Transform