
CONTEXTE DES MINÉRALISATIONS AURIFÈRES DANS LES FORMATIONS DE FER

Projet 2015-02

Par : Ludovic Bigot, géo., M.Sc.
2016

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.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

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 :

Bigot, L., 2016. Contexte des minéralisations aurifères dans les formations de fer. Rapport, projet CONSOREM 2015-02, 69 p.

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

Les minéralisations aurifères encaissées dans les formations de fer peuvent former des gisements de classe mondiale. C'est le cas en Amérique du Nord avec les gisements, archéens à paléoprotérozoïques, de Homestake (40 Moz Au, Dakota du Sud, USA), Méliadine (10,1 Moz Au, Nunavut, Canada), Musselwhite (6,1 Moz Au, Ontario, Canada), ou encore Meadowbank (4,3 Moz Au, Nunavut, Canada). La compréhension des processus de minéralisation à l'origine de ces gisements est capitale pour l'exploration des formations de fer aurifères au Québec. Le présent projet s'articule en deux volets. Dans un premier temps, une revue de la littérature scientifique permet d'établir des caractéristiques géologiques communes entre les grands gisements d'or dans les formations de fer, ce qui a amené à l'identification de guides d'exploration aux échelles régionale et locale. Dans un second temps, les guides proposés sont appliqués au Québec, dans les ceintures de roches vertes sur les territoires de la Baie-James et de la Fosse du Labrador, ce qui a conduit à la génération de cibles pour l'exploration.

Les gisements d'or encaissés dans des formations de fer appartiennent à la famille or orogénique. Ils se sont formés au cours des orogénèses archéennes et/ou paléoprotérozoïques, à la faveur de processus de déformation et de métamorphisme, et éventuellement de magmatisme. Les formations de fer hôtes de minéralisations aurifères sont de type Algoma, c'est-à-dire contenues dans des assemblages volcano-sédimentaires, et sont situées à proximité de failles transcrustales (limites de domaines géologiques). Les formations de fer sont des lithologies réactives qui agissent comme piège chimique causant la sulfuration de la magnétite, souvent sous forme de pyrrhotite, ce qui entraîne la précipitation de l'or issue de sources externes (e.g., métamorphique et/ou magmatique). Le style de minéralisation et les altérations varient selon le métamorphisme. Pour les faciès inférieurs à l'amphibolite, la minéralisation aurifère est portée par des veines de quartz \pm carbonate, et les altérations proximales sont à carbonate de fer et phyllosilicates, typiquement séricite et chlorite, plus pyrite-arsénopyrite-pyrrhotite. Pour les faciès à l'amphibolite, la minéralisation aurifère est associée aux zones de remplacement à pyrrhotite semi-massive à massive, et les altérations proximales sont à amphiboles de fer (i.e., grunérite et cummingtonite) et grenat, plus pyrrhotite-arsénopyrite. Dans ce dernier cas, le remplacement par imprégnation de quartz (*silica flooding*) est majeur. Les formations de fer sont des pièges rhéologiques et structuraux efficaces. Le premier a pour effet, en réponse à l'introduction de fluides hydrothermaux, le développement de veines, de brèches, et de textures d'invasion. Le second se traduit par d'importantes concentrations de minéralisations aurifères dans des zones intensément déformées par du plissement isoclinal et du cisaillement.

La documentation des caractéristiques des gisements d'or dans les formations de fer et le traitement d'informations géologiques, essentiellement publiques, ont permis de proposer deux modèles d'exploration au Québec : l'un sur le territoire de la Baie-James, l'autre dans la Fosse du Labrador. Les éléments géologiques dans les ceintures de roches

vertes de la Baie-James et de la Fosse du Labrador ont des points communs avec les caractéristiques observées dans les grands gisements nord-américains, respectivement à Musselwhite et à Homestake.

À la Baie-James, des traitements statistiques (e.g., A.C.P., régression spatiale) sur la lithogéochimie, et la géochimie de sédiments de fond de lac et de ruisseaux, à partir de données publiques, du SIGÉOM 2015, et privés, des compagnies membres du CONSOREM, ont abouti à la discrimination : a) d'assemblages volcano-sédimentaires fertiles (e.g., Guyer, Marbot, Auclair), et b) de zones favorables pour l'or dans les formations de fer. D'autres indicateurs de favorabilité, tels que la présence de nœuds structuraux (pli complexe et zone de cisaillement), et la coexistence de grunérite/cumingtonite, grenat, pyrrhothite ± arsénopyrite, au faciès métamorphique surtout amphibolitique, permet de cibler des zones d'intérêt. La méthodologie choisie pour identifier des zones d'intérêt est une pondération de couches évidentielles favorables qui, lorsqu'additionnées, définissent une carte de prospectivité. Au total, 150 cibles sont proposées sur cette carte de prospectivité aurifère dans les formations de fer à la Baie-James. Parmi celles-ci, 44 sont jugées prioritaires. Certaines cibles sont expliquées par la présence de gîtes d'or dans les formations de fer. En revanche, d'autres ne font l'objet d'aucun travaux d'exploration au moment de l'étude, ouvrant ainsi la voie à de possibles découvertes.

Dans la Fosse du Labrador, plusieurs zones favorables sont identifiées à partir d'une approche analogique, en utilisant les éléments lithologiques, minéralogiques, et structuraux. Les zones de charnières d'anticlinaux antiformes plongeants faiblement vers le sud-est dans le domaine structural plissée de Thévenet, zone lithotectonique de Gerido, sont des zones favorables pour l'or lorsque la formation de fer de la Formation de Baby moyen s'y trouve. Les veines de quartz tardives (non déformées) recoupant les charnières de plis, et encaissées dans des formations de fer à faciès de carbonate de fer et séricite sont des éléments marqueurs de zones d'intérêt. L'altération n'étant pas exclusivement confinée à la formation de fer de Baby moyen, la recherche des halos d'altération à carbonate et séricite dans les gabbros environnants, pour lesquels ces altérations sont inhabituelles, pourrait s'avérer un outil d'exploration efficace. En termes de conditions métamorphiques, bien que statistiquement le faciès des schistes verts supérieur soit le plus favorable, un potentiel est ouvert dans les formations de fer déformées et altérées portées au faciès des amphibolites inférieur, soit le secteur de contact entre la zone Gerido et Rachel-Laporte.

TABLE DES MATIERES

Contexte des minéralisations aurifères dans les formations de fer	i
Avertissement	ii
SOMMAIRE EXÉCUTIF	1
Table des matières	3
Liste des Figures	4
Liste des Tableaux	7
1 INTRODUCTION	8
2 PARTIE 1 : CARACTÉRISTIQUES DES GRANDS GISEMENTS D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER (DOCUMENTATION)	9
2.1 Les formations de fer rubanées.....	9
2.2 Modèles génétiques pour l'or dans les formations de fer : syngénétique vs épigénétique	10
2.3 Les gisements d'or dans les formations de fer en Amérique du Nord	12
2.3.1 Caractéristiques des principaux gisements d'or dans les formations de fer en Amérique du Nord	14
2.3.1.1 Homestake.....	15
2.3.1.2 Meadowbank	18
2.3.1.3 Méliadine	22
2.3.1.4 <i>Lupin 26</i>	
2.3.1.5 Musselwhite	29
2.3.2 Les gîtes d'or dans les formations de fer au Québec.....	32
2.3.3 Synthèse des guides d'exploration généraux.....	33
3 PARTIE 2 : LES GUIDES D'EXPLORATION À LA BAIE-JAMES ET DANS LA FOSSE DU LABRADOR	36
3.1 Sélection des régions d'étude	36
3.2 Données disponibles dans les secteurs d'étude	37
3.3 Reconnaissance de formations de fer par l'approche aéromagnétique	38
3.4 Guides d'exploration à la Baie-James.....	40
3.4.1 Contexte géologique.....	40
3.4.2 Les faciès primaires des formations de fer.....	42
3.4.3 Approche géochimique	43
3.4.3.3 Traitement de l'environnement secondaire.....	48
3.4.4 Conditions métamorphiques	52
3.4.5 Minéraux d'altération.....	53
3.4.6 Paramètres structuraux.....	54
3.4.7 Carte de prospectivité pour l'or dans les formations de fer à la Baie-James	57
3.4.7.1 Méthodologie pour la carte de prospectivité	57
3.4.7.2 Résultats de la carte de prospectivité	59
3.5 Évaluation du potentiel aurifère dans les formations de fer de la Fosse du Labrador	63

3.5.1	Contexte géologique.....	63
3.5.2	Les faciès primaires des formations de fer.....	66
3.5.3	Méthodologie pour l'évaluation du potentiel aurifère dans la Fosse du Labrador.....	67
3.5.4	Lithogéochimie et discrimination de la fertilité des assemblages géologiques.....	67
3.5.5	Éléments structuraux.....	70
3.5.6	Approche minéralogique et altérations.....	73
3.5.7	Conditions métamorphiques.....	75
4	Conclusions.....	77
	Remerciements.....	79
	Références.....	80
	ANNEXE A : Évaluation du signal magnétique le long d'une formation de fer aurifère à Meadowbank, Nunavut.....	90

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1: CADRE GÉODYNAMIQUE DE GENÈSE DES DIFFÉRENTS TYPES DE FORMATION DE FER (<i>BIF</i>), D'APRÈS JÉBRAK ET MARCOUX (2008).....	9
FIGURE 2 : SCHÉMAS CONCEPTUELS DES MODÈLES SYNGÉNÉTIQUES ET ÉPIGÉNÉTIQUES D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER.....	11
FIGURE 3: CARTE GÉOLOGIQUE DE L'AMÉRIQUE DU NORD MODIFIÉE D'APRÈS HOFFMAN (1989) AVEC LES PRINCIPAUX GISEMENTS D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER. GISEMENTS D'OR D'APRÈS GOLDFARB ET AL. (2005) ET GOSELIN ET DUBÉ (2005).	13
FIGURE 4: GÉOLOGIE DES <i>BLACK HILLS</i> . UN SOULÈVEMENT TECTONIQUE TERTIAIRE AVEC UN NIVEAU D'ÉROSION ACTUEL EXPOSANT DES ROCHES PRÉCAMBRIENNES (BELL, 2013).....	15
FIGURE 5: BLOC MODÈLE DU SECTEUR DE LA MINE <i>HOMESTAKE</i> À GAUCHE D'APRÈS CADDEY ET AL. (1991), MODIFIÉ PAR BELL (2013), ET SECTION TRANSVERSALE À DROITE.	16
FIGURE 6: INTENSE MINÉRALISATION AURIFÈRE DANS UNE VEINE DE QUARTZ BRÉCHIFIÉE, AVEC ARSÉNOPYRITE (BELL, 2013).....	17
FIGURE 7: SCHÉMAS ILLUSTRANT PLUSIEURS ÉTAPES DE DÉFORMATION DANS LE SECTEUR DE LA MINE <i>HOMESTAKE</i> (BELL, 2013).....	18
FIGURE 8: CARTE GÉOLOGIQUE DE LA PARTIE OUEST DE LA PROVINCE DE CHURCHILL, D'APRÈS HRABI ET AL. (2003).....	19
FIGURE 9: A) CARTE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURALE DU SECTEUR DE <i>MEADOWBANK</i> , DANS JANVIER ET AL. (2015A).	20
FIGURE 10: SECTION GÉOLOGIQUE TRANSVERSALE DANS LE GISEMENT DE <i>MEADOWBANK</i> (JANVIER ET AL., 2015A). LES ZONES MINÉRALISÉES SONT EN LES PLAGES JAUNES HACHURÉES, ET LES FORMATIONS DE FER SONT EN ROUGE.	21
FIGURE 11: MINÉRALISATION AURIFÈRE DANS UNE FORMATION DE FER FORTEMENT PLISSÉE ET CISAILLÉE DE LA MINE DE <i>MEADOWBANK</i> (JANVIER ET AL., 2015A). FINE DISSÉMINATION DE GRUNÉRITE OÙ LA PYRRHOTITE REMPLACE LA MAGNÉTITE.	21
FIGURE 12: BLOC GÉOLOGIQUE INTERPRÉTÉ DU SECTEUR DE <i>MEADOWBANK</i> (MODIFIÉ DE JANVIER ET AL., 2015C). L'ÉTOILE INDIQUE LA POSITION DU GISEMENT DE <i>MEADOWBANK</i>	22

FIGURE 13: CARTE GÉOLOGIQUE DU DISTRICT AURIFÈRE DE <i>MÉLIADINE</i> . EN TERMES DE CONTENU EN OR, TIRIGANIAQ (FORMATION DE FER AURIFÈRE) EST LE PRINCIPAL GISEMENT D'OR DU DISTRICT (LAROUCHE ET AL., 2015).	23
FIGURE 14: GÉOLOGIE LOCALE DU SECTEUR DE <i>TIRIGANIAQ</i> (MODIFIÉ DE LAROUCHE ET AL., 2015).	24
FIGURE 15: SECTION NORD-SUD DU GISEMENT DE <i>TIRIGANIAQ</i> (MODIFIÉ D'APRÈS <i>AGNICO-EAGLE, COM. PERS.</i>).....	25
FIGURE 16: GÉOLOGIE RÉGIONALE ET LOCALE DE LA MINE <i>LUPIN</i> , D'APRÈS GEUSEBROEK ET DUKE (2004).	26
FIGURE 17: A) VUE EN PLAN DE LA FORMATION DE FER DE <i>LUPIN</i> , DES ZONES MINÉRALISÉES, ET D'AUTRES ÉLÉMENTS GÉOLOGIQUES ET MINIERS (MODIFIÉ DE BULLIS ET AL., 1993). B) DIAGRAMME ISOMÉTRIQUE DU DÔME DE <i>LUPIN</i> (GEUSEBROEK ET DUKE, 2004).....	27
FIGURE 18: PHOTO DE LA FORMATION DE FER AURIFÈRE À <i>LUPIN</i> DANS LAQUELLE LES HORIZONS À MAGNÉTITE ET AMPHIBOLE SONT REMPLACÉS PAR LA PYRRHOTITE, ET L'ENSEMBLE RECOUPÉ PAR DES VEINES DE QUARTZ TARDIVES (GEUSEBROEK ET DUKE, 2004).	28
FIGURE 19: DIAGRAMME SCHÉMATIQUE DES RELATIONS ENTRE LES VEINES DE QUARTZ ET LA MINÉRALISATION AURIFÈRE DANS LA FORMATION DE FER DU GISEMENT DE <i>LUPIN</i> (LHOTKA ET NESBITT, 1989).	28
FIGURE 20: CARTE GÉOLOGIQUE RÉGIONALE ET LOCALISATION DU GISEMENT DE <i>MUSSELWHITE</i> (OSWALD ET AL., 2015A).....	29
FIGURE 21: MINÉRALISATION TYPIQUE DU GISEMENT DE <i>MUSSELWHITE</i> MONTRANT DE L'ENVAHISSEMENT/L'IMPRÉGNATION DE QUARTZ (<i>SILICA FLOODING</i>) ET DU REMPLACEMENT PAR LA PYRRHOTITE (OSWALD ET AL. 2015A).	30
FIGURE 22: AGRANDISSEMENT DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DU SECTEUR DE <i>MUSSELWHITE</i> (OSWALD ET AL. 2015 B).	31
FIGURE 23: GÎTES D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER AU QUÉBEC D'APRÈS SIGÉOM 2015. CEINTURES DE ROCHES VERTES EN VERT, ET FORMATIONS DE FER EN MAUVE, D'APRÈS PEARSON (2007) ET SIGÉOM 2015.....	32
FIGURE 24: REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES CRITÈRES D'EXPLORATION GÉNÉRAUX POUR LES GISEMENTS D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER.	35
FIGURE 25: RECONSTITUTION DU SUPER-CONTINENT COLUMBIA AU PALÉOPROTÉROZOÏQUE (OTH : OROGÈNE TRANS-HUSONIEN). MINÉRALISATIONS AURIFÈRES PALÉOPROTÉROZOÏQUES DANS LES GISEMENTS DE HOMESTAKE (BELL, 2013), <i>MÉLIADINE</i> (LAWLEY ET AL., 2015), ET MEADOWBANK (JANVIER ET AL., 2015A, B).....	36
FIGURE 26: LEVÉS AÉROMAGNÉTIQUES AU QUÉBEC (MERN), ET LES DEUX SECTEURS D'ÉTUDE EN ROUGE À LA BAIE-JAMES ET DANS LA FOSSE DU LABRADOR.	37
FIGURE 27: VALEURS DE GRADIENT VERTICAL DU CHAMP MAGNÉTIQUE SELON LES LITHOLOGIES À LA BAIE-JAMES ET DANS LA FOSSE DU LABRADOR.....	39
FIGURE 28: LES VALEURS DES CENTILES DE LA 1 ^{ÈRE} DÉRIVÉE VERTICALE SONT PROJÉTÉES SPATIALEMENT AVEC LA CARTE DE 1 ^{ÈRE} DÉRIVÉE VERTICALE À L'ARRIÈRE-PLAN.....	40
FIGURE 29: LES SOUS-PROVINCES GÉOLOGIQUES ET LES FORMATIONS DE FER INTERPRÉTÉES, ET CONNUES ET/OU PRÉCISÉES DANS LE SECTEUR D'ÉTUDE À LA BAIE-JAMES. SOUS-PROVINCES D'APRÈS WWW.DONNEESQUEBEC.CA.....	41
FIGURE 30: SOUS-PROVINCES GÉOLOGIQUES (WWW.DONNEESQUEBEC.CA), CEINTURES DE ROCHES VERTES (SIGÉOM 2015), FORMATIONS DE FER INTERPRÉTÉES, ET GÎTES D'OR (SIGÉOM 2015) DANS LES FORMATIONS DE FER SUR LE TERRITOIRE DE LA BAIE-JAMES.	42
FIGURE 31: BOITES À MOUSTACHES ILLUSTRANT LA CONCENTRATION EN OR SELON LE FACIÈS PRIMAIRE DES FORMATIONS DE FER ARCHÉENNES AU QUÉBEC.	42
FIGURE 32: ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (A.C.P.) DES FORMATIONS DE FER MINÉRALISÉES (> 0,5 G/T Au) À LA BAIE-JAMES (N=264)	43

FIGURE 33: DIAGRAMME QUANTILE-QUANTILE DE L'AU DANS LES FORMATIONS DE FER À LA BAIE-JAMES, D'APRÈS LES DONNÉES LITHOGÉOCHIMIQUES DANS SIGÉOM 2015.....	44
FIGURE 34: (A) BOÎTES À MOUSTACHES DE LA DISTRIBUTION DE L'OR DANS LES ROCHES DES ASSEMBLAGES HÔTES DES FORMATIONS DE FER. (B) BOÎTES À MOUSTACHES DE LA DISTRIBUTION DE L'ARSENIC DANS LES ROCHES DES ASSEMBLAGES HÔTES DES FORMATIONS DE FER.	46
FIGURE 35: GROUPES/FORMATIONS VOLCANO-SÉDIMENTAIRES À LA BAIE-JAMES SELON LEUR CARACTÈRE DE FERTILITÉ POUR LES ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DES GÎTES D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER.	47
FIGURE 36: COUVERTURE DE SÉDIMENTS DE FOND DE LAC (POINT NOIR) À LA BAIE-JAMES D'APRÈS SIGÉOM 2015. LES POLYGONES MAUVES SONT LES FORMATIONS DE FER INTERPRÉTÉES.	48
FIGURE 37: CARTE D'INTERPOLATION DE L'ARSENIC DANS LES SÉDIMENTS DE FOND DE LAC PAR LA MÉTHODE « INVERSE DE LA DISTANCE », ET LIMITE DES LEVÉS DE SÉDIMENTS DE FOND DE LAC. (A) ARSENIC BRUT (B) ARSENIC NIVELÉ.	50
FIGURE 38: CARTE D'INTERPOLATION DE L'ARSENIC RÉSIDUEL DANS LES SÉDIMENTS DE FOND DE LAC PAR LA MÉTHODE « INVERSE DE LA DISTANCE ». DONNÉES D'APRÈS SIGÉOM 2015.	51
FIGURE 39: ISOGRADES MÉTAMORPHIQUES DANS LE SECTEUR D'ÉTUDE À LA BAIE-JAMES. MODIFIÉ DE GAUTHIER (2000), ET GAUTHIER ET AL. (2007) ; POINTS D'INFORMATION MÉTAMORPHIQUE D'APRÈS SIGÉOM 2015.....	53
FIGURE 40: CARTE MATRICIELLE PAR CUMUL DE POIDS MONTRANT DE LA COMPLEXITÉ STRUCTURALE À LA BAIE-JAMES.....	55
FIGURE 41: CALCUL DE CONTRASTE DE LA COMPLEXITÉ STRUCTURALE (CUMUL DE POIDS SUPÉRIEUR OU ÉGAL À 5 SUR 8) SELON LA DISTANCE AUX GÎTES D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER À LA BAIE-JAMES.	56
FIGURE 42: REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE DE CUMUL DES COUCHES D'ÉVIDENCES PONDÉRÉES.....	57
FIGURE 43: CARTE DE PROSPECTIVITÉ POUR L'OR DANS LES FORMATIONS DE FER À LA BAIE-JAMES. LE MAXIMUM DE CRITÈRES EST UN CUMUL DE 19 POINTS.....	59
FIGURE 44: GRAPHIQUE ILLUSTRANT LE CONTRASTE ENTRE LES GÎTES D'OR CONNUS DANS LES FORMATIONS DE FER À LA BAIE-JAMES, ET LE NOMBRE DE CRITÈRES CUMULÉS À PARTIR DES COUCHES.	60
FIGURE 45: CARTE DE PROSPECTIVITÉ AVEC LA PRIORITÉ DES ZONES À EXPLORER. LES ZONES DE FORTES PRIORITÉS REPRODUISENT LES SECTEURS MINÉRALISÉS. UNE ZONE TAMPON (<i>BUFFER</i>) D'INTERPOLATION DE 2 KM A ÉTÉ APPLIQUÉE AUTOUR DES FORMATIONS DE FER.....	61
FIGURE 46: A) VUE RAPPROCHÉE DE LA CARTE DE PROSPECTIVITÉ DANS LE SECTEUR NORD-EST. B) VUE RAPPROCHÉE DE LA CARTE DE PROSPECTIVITÉ DANS LE SECTEUR NORD-OUEST. LES FLÈCHES ROUGES INDIQUENT DES ZONES FAVORABLES HORS DE GÎTES D'OR CONNUS (TOUS TYPES D'APRÈS SIGÉOM 2015). UNE ZONE TAMPON (<i>BUFFER</i>) D'INTERPOLATION DE 2 KM A ÉTÉ APPLIQUÉE AUTOUR DES FORMATIONS DE FER.	63
FIGURE 47: CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL DE L'OROGENE DU NOUVEAU-QUÉBEC D'APRÈS CLARK ET WARES (2004) ET LA GÉOLOGIE DE SIGÉOM 2015. LES FORMATIONS DE FER SONT INTERPRÉTÉES (CF. CHAPITRE 3.3).	65
FIGURE 48: BOÎTES À MOUSTACHES ILLUSTRANT LA CONCENTRATION EN OR SELON LE FACIÈS PRIMAIRE DES FORMATIONS DE FER PALÉOPROTÉROZOÏQUES DE LA FOSSE DU LABRADOR.	66
FIGURE 49: ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP) DES FORMATIONS DE FER MINÉRALISÉES (> 0,5 G/T AU) DANS LA FOSSE DU LABRADOR (N=303, TOUTES FORMATIONS DE FER), D'APRÈS LA LITHOGÉOCHIMIE DANS SIGÉOM 2015. MÉTHODOLOGIE : TRANSFORMATION DES DONNÉES EN LOG-CENTRÉE.....	67

FIGURE 50: (A) BOÎTES À MOUSTACHES DE LA DISTRIBUTION DE L'OR DANS LES ROCHES DES ASSEMBLAGES HÔTES DES FORMATIONS DE FER. (B) BOÎTES À MOUSTACHES DE LA DISTRIBUTION DE L'ARSENIC DANS LES ROCHES DES ASSEMBLAGES HÔTES DES FORMATIONS DE FER. 68

FIGURE 51: FORMATIONS GÉOLOGIQUES HÔTES DE FORMATIONS DE FER SELON LEUR CARACTÈRE DE FERTILITÉ, DANS LA ZONE LITHOTECTONIQUE DE *GÉRIDO*. 69

FIGURE 52: A) FAILLES DE CHEVAUchemENTS ET PLIS (SIGÉOM 2015), ET GÎTES D'OR ; B) SECTION A-A' DANS LA ZONE LITHOTECTONIQUE DE *GERIDO* (MODIFIÉ DE WARES ET GOUTIER, 1990). LES DEUX DISQUES JAUNES INDIQUENT LA POSITION PROBABLE DES GÎTES D'OR *VENDITELLI* ET *DESSUREAULT* DANS LES FORMATIONS DE FER (HORIZONS EN NOIR PLISSÉ). 71

FIGURE 53: FAILLES ET TRACES AXIALES DES PLIS ANTICLINAUX ANTIFORMES DANS LE DOMAINE DE THÉVENET, FORMATIONS DE FER INTERPRÉTÉES, ET GÎTES D'OR. LES CERCLES AVEC AURÉOLE JAUNE SONT DES SECTEURS D'INTÉRÊT POUR L'OR DANS LES FORMATIONS DE FER. 72

FIGURE 54: SECTEUR CENTRE-NORD DE LA FOSSE DU LABRADOR. CARTE INDIQUANT LA POSITION DES GABBROS ALTÉRÉS EN CARBONATE (DISQUE VERT) DANS LE DOMAINE STRUCTURAL DE THÉVENET. 74

FIGURE 55: PORTRAIT MÉTAMORPHIQUE DU CENTRE-NORD DE L'OROGÈNE DU NOUVEAU-QUÉBEC, SECTEUR DE LA ZONE LITHOTECTONIQUE DE *GÉRIDO*, MODIFIÉ DE DIMROTH ET DRESSLER (1978) ET FAURE (2012), AVEC LES GÎTES D'OR DE TOUT TYPE (SIGÉOM 2015, WWW.MIDLANDEXPLORATION.COM). 75

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1: PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES GRANDS GISEMENTS D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER EN AMÉRIQUE DU NORD. 14

TABLEAU 2: SEUILS ANOMALIQUES POUR LA SUITE DES ÉLÉMENTS CORRÉLÉS À L'OR DANS LES FORMATIONS DE FER À LA BAIE-JAMES. DONNÉES LITHOGÉOCHIMIQUES D'APRÈS SIGÉOM 2015. 44

TABLEAU 3: COUCHES D'ÉVIDENCES PONDÉRÉES UTILISÉES POUR LA CARTE DE PROSPECTIVITÉ DE L'OR DANS LES FORMATIONS DE FER À LA BAIE-JAMES. 58

1 INTRODUCTION

Les gisements d'or dans les formations de fer forment une catégorie distincte de gisements au sein de la famille des gisements orogéniques (c.f. Robert et al., 2007), au même titre que le type veines de quartz-carbonate dans les ceintures de roches vertes (*Greenstone-hosted deposit*), et veines dans les séquences turbiditiques (*Turbidite-hosted veines*). Les gisements de type formations de fer aurifères sont globalement moins répandus que les gisements de type veines de quartz-carbonate dans les ceintures de roches vertes, cependant ils ont un potentiel pour former des gisements de classe mondiale (e.g., *Homestake, South Dakota, 40 Moz*) et représentent mondialement plus de 100 Moz d'or (production, réserves, et ressources ; Kerswill, 1996).

Deux familles de gisement d'or dans les formations de fer peuvent être distinguées (Dubé et al, 2011) : celle formant des gisements isolés (e.g., *Musselwhite, Meadowbank*), et celle dont les gisements sont regroupés au sein d'un district (e.g., *Méliadine, Geraldton*). L'intérêt pour les gisements d'or dans les formations de fer a été mis en avant au cours des dernières années, notamment par les projets de recherche de Ressources naturelles Canada avec la quatrième phase de l'initiative géoscientifique ciblée (IGC-4), sur le thème de l'or épigénétique au Canada (Dubé et al, 2011, Dubé et Mercier-Langevin, 2015). Cinq projets académiques portant sur les gisements de Meliadine, Musselwhite, Meadowbank, et Geraldton, ont eu pour objectif de définir les contrôles de minéralisations et les empreintes géochimiques de ces gisements.

Le présent projet se veut intégrateur et de portée régionale voire continentale. Il s'articule en deux principaux volets. Le premier est une documentation des systèmes aurifères dans les formations de fer à partir de gisements existants, et le second est une évaluation du potentiel au Québec. Dans la première partie seront présentés les modèles géologiques, ainsi que les principales caractéristiques des gisements d'or dans les formations de fer en Amérique du Nord ; l'emphase sera mise sur le contexte tectonique, les faciès primaires, les altérations, le métamorphisme, et le contrôle structural. L'objectif de cette première partie est d'identifier des critères généraux distinctifs des formations de fer aurifères par rapport à celles non aurifères. Le second volet est une reconnaissance de guides d'exploration régionaux pour la Baie-James et la Fosse du Labrador à partir d'éléments géochimiques, métamorphiques, minéralogiques, et structuraux.

2 PARTIE 1 : CARACTÉRISTIQUES DES GRANDS GISEMENTS D'OR DANS LES FORMATIONS DE FER (DOCUMENTATION)

2.1 Les formations de fer rubanées

Les formations de fer rubanées (FF), *Banded Iron Formation (BIF)* en anglais, en premiers définis par James (1954), sont de fins sédiments chimiques lités ou laminés, constituées d'au moins 15 % de fer d'origine sédimentaire généralement interlité avec du chert. Les formations de fer sont divisées en quatre catégories selon leurs faciès primaires, soit à oxyde, carbonate, silicate, et sulfure. Il y a un consensus général sur l'origine des oxydes, des carbonates, et des silicates, à savoir qu'ils proviennent de sédiments marins chimiques et/ou détritiques (Castro, 1994 ; Klein et Ladeira, 2000 ; Klein, 2005). En revanche l'origine des sulfures reste discutée.

Deux types de formation de fer ont été distingués par Gross (1995) : le type lac Supérieur, à caractère sédimentaire épicontinental, et le type Algoma, présent dans les ceintures volcano-sédimentaires (**Figure 1**). Le premier s'est déposé entre 1,8 et 2,3 Ga, en environnement de plateforme continentale dans des marges passives, en réponse à l'oxygénation des océans (processus globaux), et forme des séquences étendues sur des centaines de kilomètres ; le second est surtout archéen à paléoprotérozoïque, encaissé dans des ceintures de roches vertes, et forme des systèmes de dizaines de kilomètres s'étant déposés à la faveur de processus exhalatifs d'un centre volcanique local (Bekker et al., 2010). Les gisements d'or dans les formations de fer sont typiquement associés aux formations de fer de type Algoma.

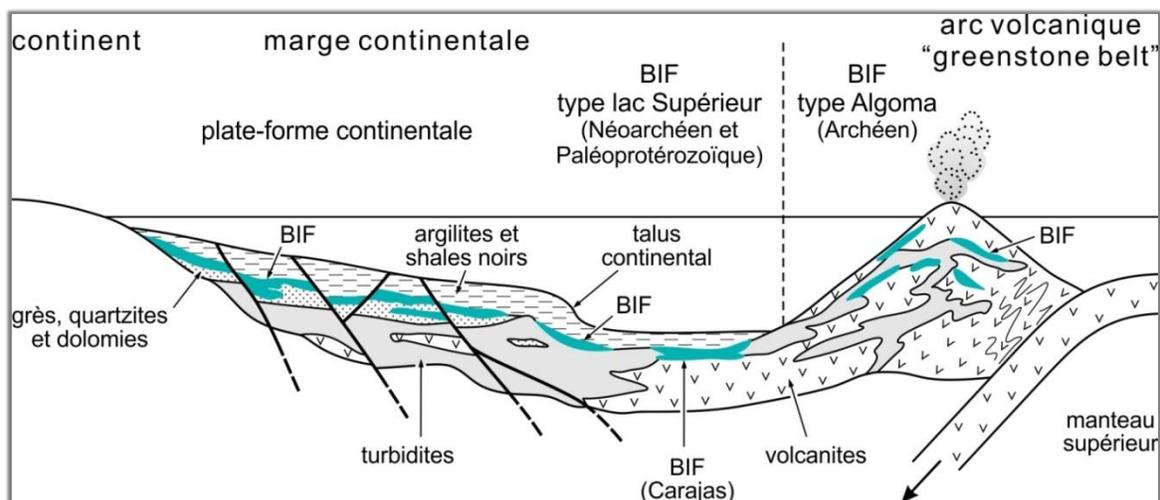


Figure 1: Cadre géodynamique de genèse des différents types de formation de fer (*BIF*), d'après Jébrak et Marcoux (2008).

2.2 Modèles génétiques pour l'or dans les formations de fer : syngénétique vs épigénétique

Les modèles syngénétiques et épigénétiques d'or dans les formations de fer ont d'importantes implications pour l'exploration (Gonzalez Garzon, 2010). Si l'or est syngénétique, déposé au cours de la diagenèse avec les sédiments (Ridler, 1970; Hutchinson et al., 1971; Fripp, 1976; Hutchinson, 1976; Saager et al., 1987; Slack et al., 2007), l'exploration devrait se focaliser sur les contrôles stratigraphiques, tout en gardant en tête les complications structurales. En revanche, si l'or est épigénétique (Fyon et al., 1983; Phillips et al., 1984; Lhotka et Nesbitt, 1989; Caddey et al., 1991; Bullis et al., 1993; Kerswill, 1996; Martins et al., 2007; Ribeiro et al., 2007; Bell, 2013; Janvier et al., 2015a, b; Lawley et al., 2015), les structures, agissant comme une plomberie pour les fluides hydrothermaux, les fronts métamorphiques, marquant des secteurs de dévolatilisation des fluides, et éventuellement le magmatisme, deviennent les paramètres critiques.

Les critères de caractère stratiforme et de continuité latérale des minéralisations, ainsi que l'absence d'altération et une faible complexité structurale appuient le modèle syngénétique (**Figure 2**). Le piège chimique, la sulfuration de la magnétite, est l'élément majeur qui contrôle l'incorporation de l'or au sédiment. Pour le modèle épigénétique (**Figure 2**), les principaux critères sont : les transitions latérales entre les zones sulfurées aurifères et les zones non sulfurées non aurifères, les zonalités des altérations enveloppant les minéralisations et la présence de veines et filons, et les fortes complexités structurales marquées notamment par d'intenses plissements et cisaillements. Le processus minéralisateur est alors syn-tectonique/syn-métamorphique ; l'or étant contrôlé par des pièges chimiques (sulfuration de la magnétite), rhéologiques (fracturation des formations de fer plus compétentes que l'encaissant), et structuraux (fluides minéralisés drainés dans les structures et métaux précipités dans les zones de faiblesse). Le modèle épigénétique est plus largement proposé, notamment pour les gisements canadiens (cf. Dubé et Mercier-Langevin, 2015).

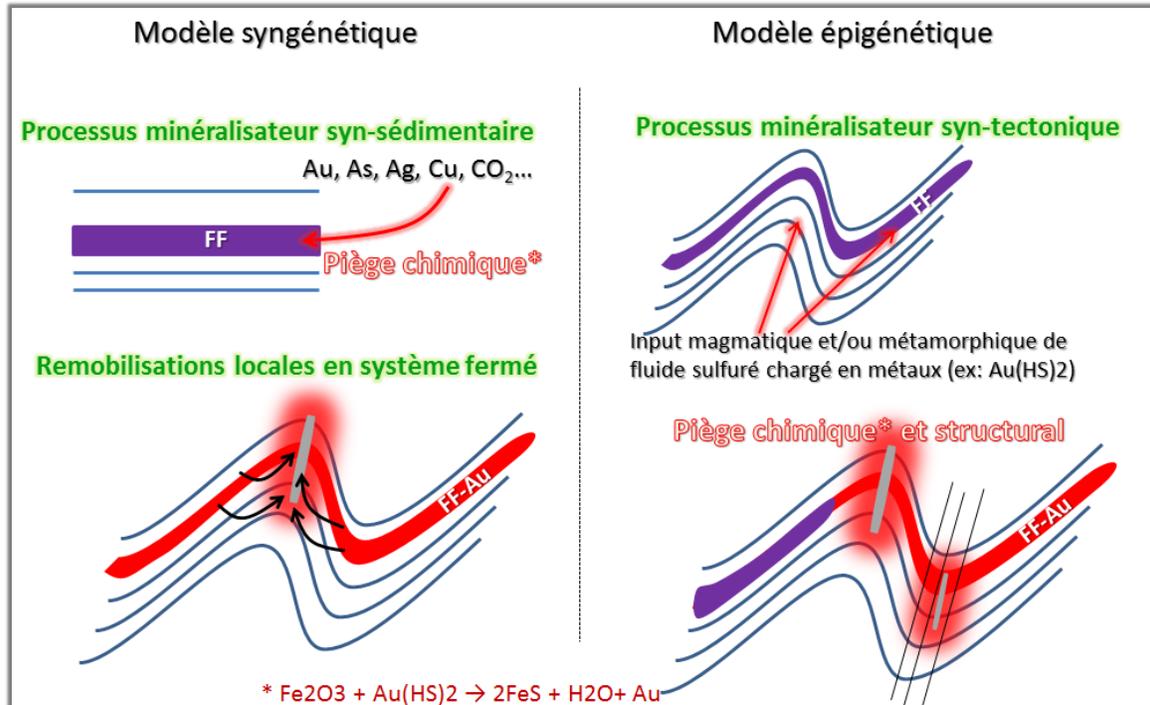


Figure 2 : Schémas conceptuels des modèles syngénétiques et épigénétiques d'or dans les formations de fer.

2.3 Les gisements d'or dans les formations de fer en Amérique du Nord

Les gisements d'or dans les formations de fer contribuent largement à la dotation aurifère des roches précambriennes, notamment avec des gisements géants et à fortes teneurs (e.g., Homestake; 40 Moz Au : Caddey et al., 1991 ; Bell, 2013). Ces types de gisements sont des cibles de premier ordre lorsque vient le temps de l'exploration dans les terrains précambriens de l'Amérique du Nord (Dubé et Mercier-Langevin, 2015). Au-delà des classifications portant sur l'origine (syngénétique vs épigénétique : Fripp, 1976 ; Phillips et al., 1984) et le style de minéralisation (stratiforme vs non-stratiform : Kerswill, 1993), Dubé et Mercier-Langevin (2015) proposent une nouvelle perspective pour différencier les gisements canadiens d'or encaissés dans les formations de fer selon deux catégories : 1) gisements dans lesquels l'essentiel de l'or est contenu dans une formation de fer de type Algoma (i.e., *Musselwhite*, *Meadowbank*), 2) gisements dans lesquels l'or est à la fois dans la formation de fer et à l'extérieur (*Méliadine*, *Geraldton*). Dans le premier cas, il s'agit de gisements isolés, alors que dans le second cas, les zones minéralisées forment des grappes de gisements le long des failles majeures.

Un portrait géologique de l'Amérique du Nord est présenté à la **Figure 3**. Une partie importante de l'Amérique du Nord est déjà formée à la fin de l'Archéen. Il s'agit alors de terranes isolés (e.g., Superior, Rae, Hearne) de dimensions variables s'étant développés à la faveur d'accrétions tectoniques et magmatiques (Corrigan et al., 2009). Au Paléoprotérozoïque, s'amorce mondialement un cycle tectonique de Wilson qui se traduit en Amérique du Nord par l'orogénie trans-hudsonienne (OTH). Cette orogénie entraîne l'amalgamation des cratons pour former le supercontinent Columbia entre 2,0 et 1,8 Ga. L'OTH a évolué durant tout un cycle de Wilson; il représente l'ouverture de l'océan Manikewan, puis sa fermeture (Corrigan et al. 2009). Les principaux stigmates de cette orogénie sont d'importantes sutures en marges des terranes agglomérés, notamment dans le bloc de Churchill, ainsi que la mise en place d'arcs océaniques (zone Reindeer), de bassins d'arrière-arc, de croutes et de plateaux océaniques accrétés sur la marge nord du craton du Supérieur long de plus de 2000 km.

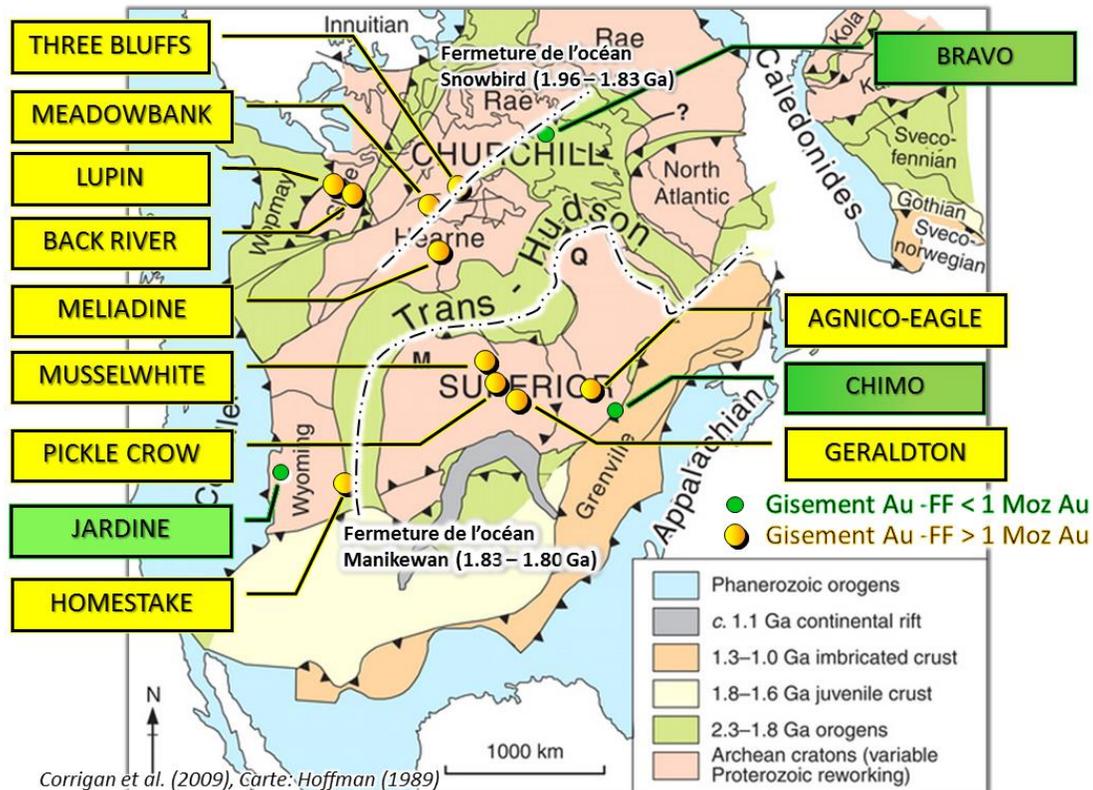


Figure 3: Carte géologique de l'Amérique du Nord modifiée d'après Hoffman (1989) avec les principaux gisements d'or dans les formations de fer. Gisements d'or d'après Goldfarb et al. (2005) et Gosselin et Dubé (2005).

L'Amérique du Nord contient (production + réserves) environ 80 Moz d'or provenant de formations de fer aurifères (d'après Goldfarb et al., 2005, et Gosselin et Dubé, 2005). Les formations de fer hôtes des gisements d'or sont archéennes (début du Paléoprotérozoïque pour Homestake), et contenues dans les cratons du Supérieur, de Hearne, de Rae, des Esclaves. Les zones pour lesquelles l'OTH a laissé des stigmates sur les roches plus anciennes (e.g., domaine du Churchill : secteur de *Meadowbank* et *Meliadine*; secteur *Homestake*) sont d'une grande importance, car l'âge des minéralisations aurifères est contemporain de l'OTH, soit la fin du Paléoprotérozoïque (Caddey et al., 1991 ; Gosselin et Dubé, 2005 ; Bell, 2013 ; Janvier et al., 2015a, b ; Lawley et al., 2015). Les gisements dans ces secteurs se trouvent à proximité de failles transcrustales actives au cours de l'OTH, et marquant la fermeture d'océans. Dans la Province des Esclaves et de Supérieur, les minéralisations aurifères dans les formations de fer sont archéennes (Bullis et al., 1993; Geusebroek et Duke, 2004 ; Gosselin et Dubé, 2005 ; Goldfarb et al., 2005 ; Dubé et Mercier-Langevin, 2015 ; Oswald et al. ; 2015a, b). Dans les grands gisements, même si l'or n'est pas exclusivement confiné à la formation de fer, la majorité des minéralisations s'y trouve néanmoins (Dubé et Mercier-Langevin, 2015). En revanche, il existe une autre catégorie de gisements, comprenant par exemple les gisements AgnicoEagle (Gauthier et al., 2003) et Chimo (Sauvé et al., 1987 ; Rafini, 2014), dans lesquels l'or dans les formations de fer n'est qu'un faciès mineur.

2.3.1 Caractéristiques des principaux gisements d'or dans les formations de fer en Amérique du Nord

L'identification des caractéristiques géologiques favorables aux minéralisations aurifères dans les formations de fer a été effectuée pour les cinq plus importants gisements en termes de contenu en or (**Tableau 1**). Les observations portent sur les domaines géologiques hôtes, les faciès primaires des formations de fer, les altérations associées à l'or, le style de minéralisation et son âge, la minéralisation, le métamorphisme, le magmatisme, et les éléments structuraux.

Tableau 1: Principales caractéristiques des grands gisements d'or dans les formations de fer en Amérique du Nord

(Lhotka et Nesbitt, 1989 ; Caddey et al, 1991 ; Bullis et al., 1993 ; Geusebroek et Duke, 2004 ; Goldfarb et al., 2005 ; Gosselin et Dubé, 2005 ; Dubé et al., 2011 ; Bell, 2013 ; Janvier et al., 2015a, b ; Lawley et al., 2015 ; Oswald et al., 2015a, b).

Gisement	Tonnage/ Teneur/ Moz Au*	Orogène/ Craton	Faciès primaire FF	Altération associée à l'or	Âge de la minéralisa- tion	Métam. dépôt (vs régional)	Contrôle structural
HOMESTAKE (USA)	148 Mt @ 8,57 g/tAu – 40 Moz	Trans- Hudsonien	Carbonaté et silicaté	Po-Apy- Sid-Grun- Bo-Chl	1730 Ma	SVS-AMP inf (SV)	Charnière de plis isoclinaux (D4) + cisaillement. Vn Qtz
MEADOWBANK (NU)	42,2 Mt @ 3,3 g/tAu – 4,3 Moz	Domaine de Rae (Churchill)	Oxydé	Po-Grun- Cumm	1910-1830 Ma. Pré-pic métam.	SVS-AMP inf (SV)	Cisaillements et plis (Dp2)
MÉLIADINE (Tiriganiaq) (NU)	48,2 Mt @ 6,5 g/tAu – 10,1 Moz	Domaine de Hearne (Churchill)	Silicaté: Grun-Hbl	Apy-Po- Ser-Ank- Qtz-Chl	2270 et/ou 1900 Ma Remobil.: 1860 Ma	SVS-AMP inf (SV)	Faïlle de cisaillement (2 nd ordre). Pli; Vn Qtz
LUPIN (NWT)	15 Mt @ 7,5 g/tAu – 3,8 Moz	Esclave	Silicaté: Gru-Chert	Po-Apy, Qtz-Hbl- Qtz	~ 2590- 2580 Ma. Post-pic métam.	SVS-AMP inf (SVS)	Flanc de plis isoclinaux P2 + zone de déformation. Vn Qtz
MUSSELWHITE (ON)	26,8 Mt @ 6 g/tAu – 6,1 Moz	North Caribou G.B. (Supérieur)	Oxydé	Po-Grt- Grun-Qtz	< 2909 Ma Tardi- Archéen	AMP inf (AMP moyen)	Charnière de pli, zone de décollement au contact litho., silica flooding

*Ressources totales : Ressources + réserves + production

2.3.1.1 Homestake

Le gisement de *Homestake* est situé dans le Dakota du Sud, aux U.S.A. La production totale de la mine a excédé 40 Moz d'or à une teneur moyenne de 8,57 g/t Au sur une période de 126 ans, de 1876 à 2002, en opération à ciel ouvert et souterraine jusqu'à 2,5 km de profondeur (Goldfarb et al., 2005).

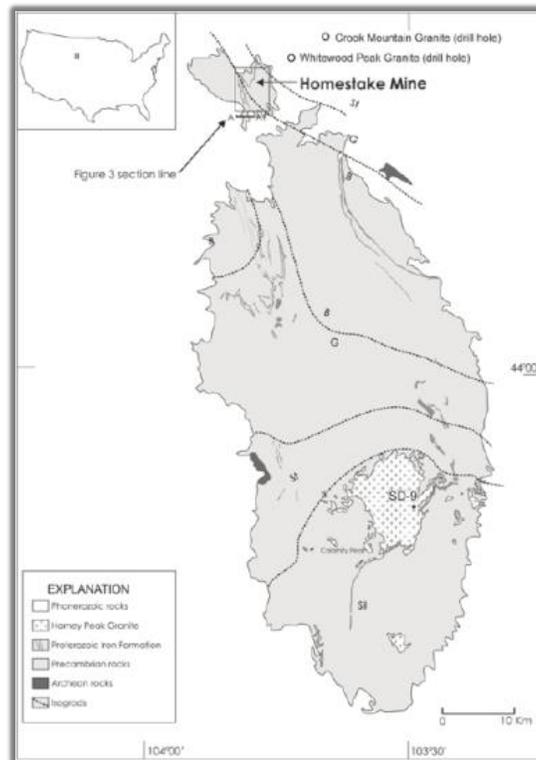


Figure 4: Géologie des *Black Hills*. Un soulèvement tectonique tertiaire avec un niveau d'érosion actuel exposant des roches précambriennes (Bell, 2013)

Le gisement de *Homestake* est situé dans la partie nord du dôme de *Black Hill* (**Figure 4**). Ce soulèvement tectonique d'âge Tertiaire résulte de l'Orogène de Laramide, et son niveau d'érosion actuel expose des roches précambriennes qui constituent le membre méridional de l'Orogène Trans-Hudsonien d'âge Paléoprotérozoïque (Dahl et al., 1999). Les roches de cette fenêtre précambrienne sont des séquences métamorphisées de grauwackes, cherts, shales noirs, coulées basaltiques, et de filons-couches (Bell, 2013).

Les assemblages stratigraphiques reconnus dans le secteur mine, du plus ancien au plus jeune, sont les suivants (**Figure 5A et 5B**) : (i) la Formation de *Poorman* constituée de calcaire, de pélite, d'argilite graphitique, et d'amphibolite ; (ii) la Formation de *Homestake* constituée d'une formation de fer à lits d'épaisseur variable de carbonates et silicates, essentiellement des schistes à grunérite ; et (iii) la Formation d'*Ellison* constituée d'interlits

de quartzite massif et de pélite. Les séquences stratigraphiques sont intrudées par plusieurs plutons précambriens et tertiaires.

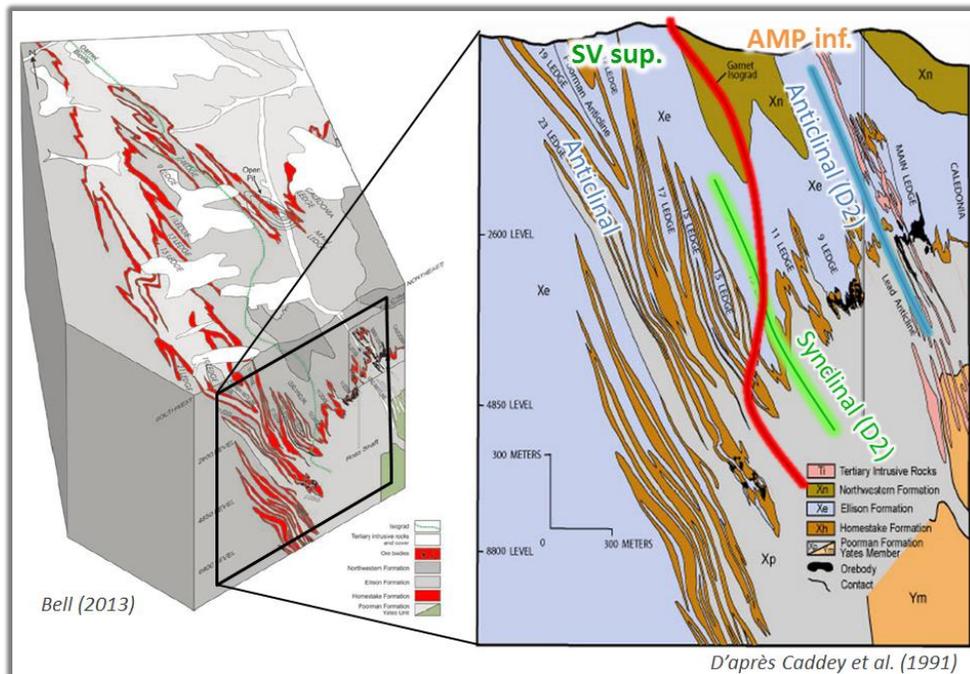


Figure 5: Bloc modèle du secteur de la mine *Homestake* à gauche d'après Caddey et al. (1991), modifié par Bell (2013), et section transversale à droite.

(Sur le bloc modèle, la Formation de *Homestake* est en rouge, la Formation de *Poorman* en gris clair, et la Formation d'*Ellison* en gris foncé. Sur la section contenant une partie du gisement (Caddey et al., 1991), on peut noter l'intense plissement isoclinal, et la transition métamorphique schiste vert supérieur – amphibolite inférieur).

La minéralisation aurifère est contenue pratiquement exclusivement dans la formation de fer de la Formation de *Homestake*. Les minéralisations sont stratoïdes à la formation de *Homestake* (**Figure 5**), et sont associées à des veines de quartz bréchifiées (**Figure 6**) dans des zones de cisaillement au sein de charnières de plis isoclinaux. Les corps minéralisés sont tabulaires à cylindriques dans un schiste à sidérite et à grunérite (Bell, 2013). L'or est cogénétique à la pyrrhotite et l'arsénopyrite (Caddey et al., 1991), et les zones minéralisées sont contenues dans des halos d'altération à quartz, chlorite, sidérite, biotite, et grenat.

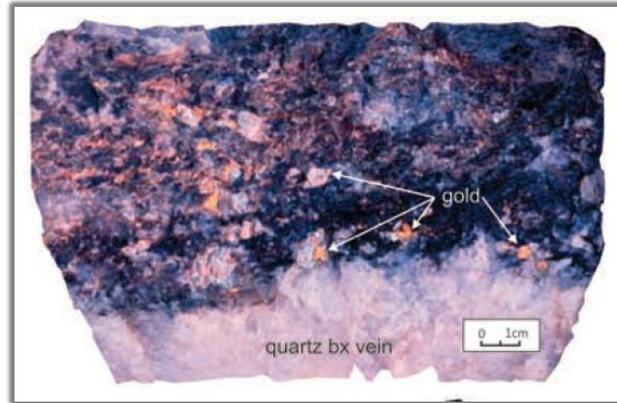


Figure 6: Intense minéralisation aurifère dans une veine de quartz bréchifiée, avec arsénopyrite (Bell, 2013).

Le métamorphisme dans la mine est contraint par l'isograde métamorphique du grenat qui délimite le faciès du schiste vert supérieur et le faciès inférieur de l'amphibolite (**Figure 5**). Cet isograde ce serait développé verticalement et aurait conservé son état au cours des multiples phases de déformation et de métamorphisme (Bell, 2013). Les corps minéralisés sont situés à proximité de l'isograde. Cependant, les trois quarts du minerai produit proviennent de la zone inférieure de l'amphibolite.

Le secteur de la mine *Homestake* a été affecté par de multiples phases de déformation (Bell, 2013). Les premières phases ont été amorcées durant l'OTH entre 1,89 et 1,78 Ga (Baird et al., 1996), cependant le principal évènement coïncide avec l'orogénie des Plaines Centrales de 1,78 à 1,63 Ga (Dahl et Frei, 1998 ; Dahl et al., 1999). C'est au cours de ces déformations que la géométrie des roches encaissantes du gisement de *Homestake* est définie. Bell (2013) a reconnu cinq phases de déformation dans le gisement :

- (D1) une parallélisation du litage et de la schistosité S1 ;
- (D2) un intense plissement isoclinal avec des plans axiaux sub-verticaux et une seconde schistosité largement développée dans le secteur de la mine ;
- (D3) du plissement avec plans axiaux sub-horizontaux et du cisaillement ayant entraîné la rotation locale de S2 ;
- (D4) plissement avec plans axiaux alignés sur D2, et développement d'une schistosité de crénulation S4 peu intense (S2 étant la principale), légèrement oblique par rapport à S2 ;
- (D5) du cisaillement localisé dans les plans axiaux des plis.

L'épaisseur de la formation de fer déformée varie de nulle à 120 mètres, alors que son épaisseur d'origine est estimée à environ 20 mètres (Caddey et al., 1991). La **Figure 7** illustre la complexité structurale qui règne dans le secteur de la mine *Homestake*, et particulièrement dans les zones minéralisées. En effet, ces zones minéralisées coïncident avec des secteurs de forte hétérogénéité structurale pré-D4 (**Figure 7a et 7 b**).

Il s'agit de zones dans lesquelles les structures antérieures à D3 sont reprises et déformées ; les plans axiaux de D2 et D3 sont à angles prononcés et les cisaillements le long de ces plans sont en sens opposés. Ces nœuds structuraux localisés, en plus du contraste rhéologique existant entre la formation de fer et les roches sus- et sous-jacentes, auraient entraîné de l'ouverture suivie d'implosion, de bréchification et de précipitation de minéralisation aurifère au cours de la phase D4 (Bell, 2013).

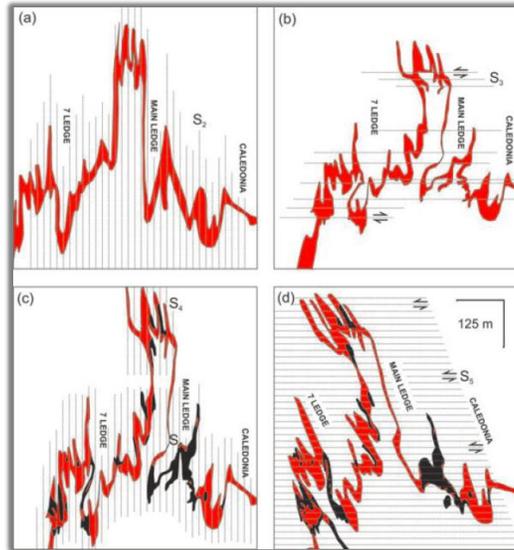


Figure 7: Schémas illustrant plusieurs étapes de déformation dans le secteur de la mine Homestake (Bell, 2013)

(a) raccourcissement durant D2 ; b) raccourcissement selon un angle très fort par rapport D2, au cours de D3 ; c) compression durant D4, mise en place de la minéralisation aurifère (en noir) dans les zones de coexistence des structures D2 et D3 ; d) cisaillements locaux (D5).

Alors que la formation de fer de Homestake est datée à 2000 Ma, la minéralisation est pour sa part datée à 1738 ± 8 Ma (Re-Os sur arsénopyrite ; Bell, 2013). Cet âge est à mettre en relation avec celui évalué à 1746 ± 10 Ma pour le granite de Harney Peak situé à 10 km de la mine (Frei et al., 2009). En se basant sur ces relations d'âge, une contribution aurifère magmatique ne peut être exclue.

2.3.1.2 Meadowbank

Le gisement de *Meadowbank* (production : 21,1 Mt @ 3,46 g/t Au contenant 2,2 Moz Au ; réserves probables et prouvées : 10,8 Mt @ 2,72 g/t Au contenant 0.9 Moz Au, ressources mesurées et indiquées : 7 Mt @ 3,21 g/t Au contenant 0.7 Moz Au, ressources présumées : 3,4 Mt @ 3,99 g/t Au contenant 0.4 Moz Au ; www.agnicoeagle.com ; *Côté-Mantha, com. pers.*), au Nunavut, Canada, est contenu dans des formations de fer de type Algoma intensément déformées et métamorphisées du craton de Rae, dans la Province géologique de Churchill ouest (**Figure 8**).

Les formations de fer aurifères sont encaissées dans un mince assemblage volcano-sédimentaire, le Groupe de *Woodburn*, étiré en nord-sud et pincé entre deux plutons granitiques. L'assemblage est constitué de volcanoclastites intermédiaires, de grauweekes, de pélites, de quartzites, et de schistes ultramafiques (Zaleski et al., 1997). Il est daté à 2711-2710 Ma (Davis and Zaleski, 1998).

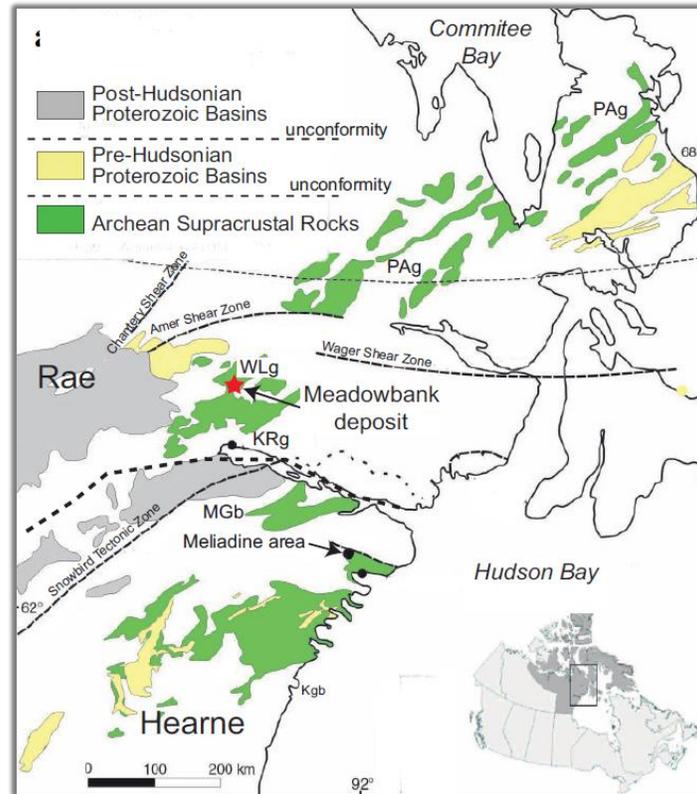


Figure 8: Carte géologique de la partie ouest de la Province de Churchill, d'après Hradi et al. (2003)

L'assemblage volcano-sédimentaire de *Woodburn* est riche en formations de fer ; dans le secteur de la mine, plusieurs y sont identifiées (**Figure 9A et 9B**). Malgré leur similitudes minéralogiques et chimiques (e.g., Gourcerol et al., 2014), seule la formation de fer centrale contient des minéralisations aurifères économiques (**Figure 9A et 9B**), ce qui suggère que les éléments clés du processus de minéralisation n'étaient présents qu'à cet endroit précis. Cet élément pourrait être la complexité structurale. La **Figure 9B** montre assez nettement du démembrement de la formation de fer (aurifère) au niveau de la fosse Portage, lieu de la plus importante concentration d'or, alors que ce n'est pas le cas, ou moins, pour les autres formations de fer. L'épaisseur de cette formation de fer peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (**Figure 10**). Les roches ultramafiques sont abondantes (**Figure 10**) ; elles sont souvent en contact avec la formation de fer, et contiennent parfois une partie de la minéralisation aurifère. Les formations de fer sont à faciès primaire oxydé à magnétite-chert, et contiennent une quantité variable de grunérite et/ou cummingtonite, chlorite, greenalite, et stilpnomelane.

Les zones aurifères de la formation de fer centrale sont associées aux sulfures disséminés à pyrrhotite, arsénopyrite, et pyrite, en remplacement de la magnétite (**Figure 11**). L'évolution minéralogique le long de la formation de fer, dans le secteur de la fosse Portage, traduit une transition métamorphique. La biotite très présente au sud disparaît progressivement vers le nord au profit des amphiboles. Cela suggère une transition depuis le schiste vert supérieur vers l'amphibolite inférieure.

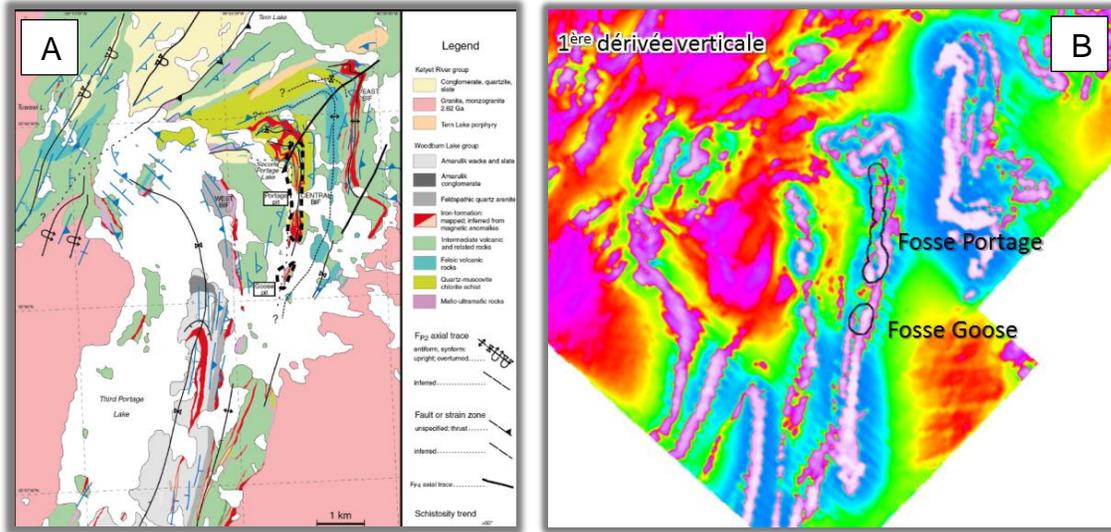


Figure 9: A) Carte géologique et structurale du secteur de *Meadowbank*, dans Janvier et al. (2015a).

Les formations de fer sont en rouge. B) Carte géophysique de la première dérivée verticale du secteur de *Meadowbank*, et traces des fosses à ciel ouvert *Portage* et *Goose*. Les formations de fer sont distinguées par les hautes valeurs de contraste.

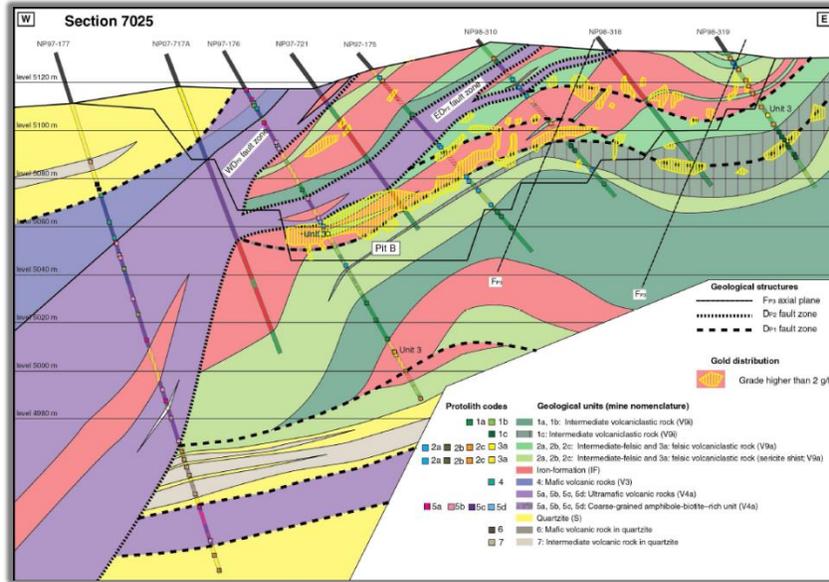


Figure 10: Section géologique transversale dans le gisement de Meadowbank (Janvier et al., 2015a). Les zones minéralisées sont en les plages jaunes hachurées, et les formations de fer sont en rouge.

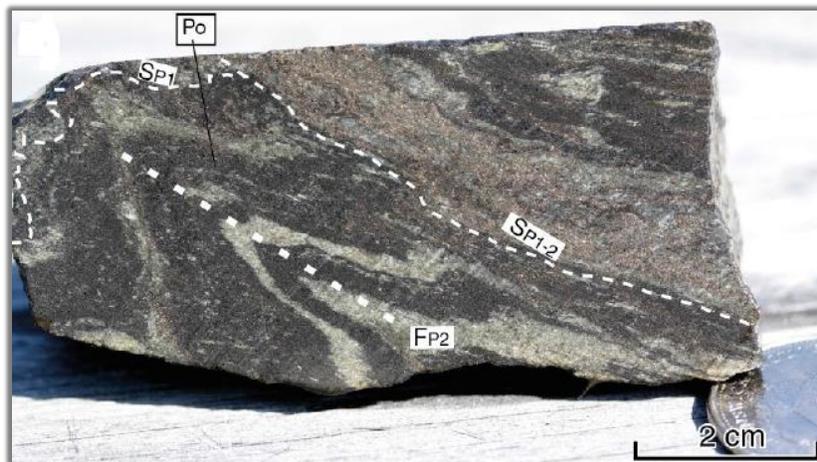


Figure 11: Minéralisation aurifère dans une formation de fer fortement plissée et cisailée de la mine de Meadowbank (Janvier et al., 2015a). Fine dissémination de grunérite où la pyrrhotite remplace la magnétite.

Le gisement semble connecté à une structure transcrustale, active dès l'Archéen et reactivée au Paléoprotérozoïque à la faveur de l'orogénie trans-hudsonienne, qui délimite deux domaines archéens de 2710 et 2717 Ma (**Figure 12**; Janvier et al., 2015c). Les déformations archéennes sont peu évidentes, et sont surimposées par celles trans-hudsoniennes très présentes. Au moins quatre phases de déformation régionale d'âge trans-hudsonien sont documentées (Janvier et al., 2015a, b, c) : 1) plissement isoclinal et cisaillement, fortement affectés par les déformations postérieures ; 2) plissement isoclinal et cisaillement majeurs ; 3) plissement ouvert à fermé ; et 4) plissement.

Le plissement est le style structural largement dominant dans le secteur. Néanmoins, les zones de cisaillement de la seconde phase de déformation ont fortement laissé leurs stigmates (**Figure 10**). Les observations de terrains permettent de contraindre la minéralisation aurifère à un âge trans-hudsonien. L'or a été introduit le long des structures de la première phase de déformation protérozoïque, et a été fortement remobilisé par la seconde phase (Janvier et al., 2015c).

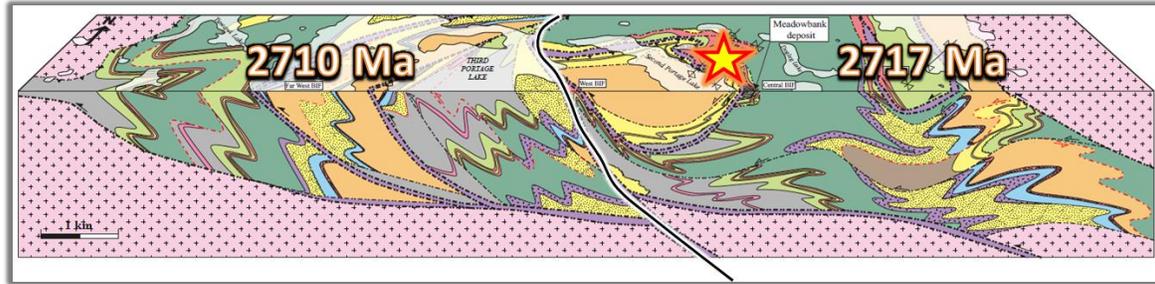


Figure 12: Bloc géologique interprété du secteur de *Meadowbank* (modifié de Janvier et al., 2015c). L'étoile indique la position du gisement de *Meadowbank*.

L'annexe 1 présente une évaluation d'un guide géophysique dans le secteur de *Meadowbank*. Il s'agit de tester le postulat suivant : la susceptibilité magnétique de la magnétite étant largement supérieure à celle des sulfures, le processus de démagnétisation au profit des sulfures devrait se traduire par des creux du signal magnétique le long des formations de fer en présence de sulfures. Le postulat semble en partie validé pour le secteur sud de la mine, à la fosse *Goose*.

Le champ magnétique résiduel diminue alors que le contenu aurifère augmente. Ainsi, il pourrait s'agir d'un nouveau guide d'exploration à l'échelle locale.

2.3.1.3 Méliadine

Méliadine forme un district de gisements aurifères situé à la frontière entre les blocs de Hearne et de Chesterfield, dans la ceinture de roches vertes de Rankin Inlet (cf. Aspler et Chiarenzelli, 1996) de la Province géologique de Churchill Ouest (**Figure 13** ; Lawley et al., 2015). Ce district aurifère est constitué de gisements orogéniques d'or dans les formations de fer, mais aussi de gisements orogéniques d'or dans les veines de quartz-carbonate dans les ceintures de roches vertes (cf. Robert et al., 2007). Le district détient des réserves prouvées et probables de 13,9 Mt @ 7,44 g/t Au contenant 3,3 Moz Au, et des ressources totales de 34,3 Mt @ 6,1 g/t Au contenant 6,8 Moz Au (Larouche et al., 2015).

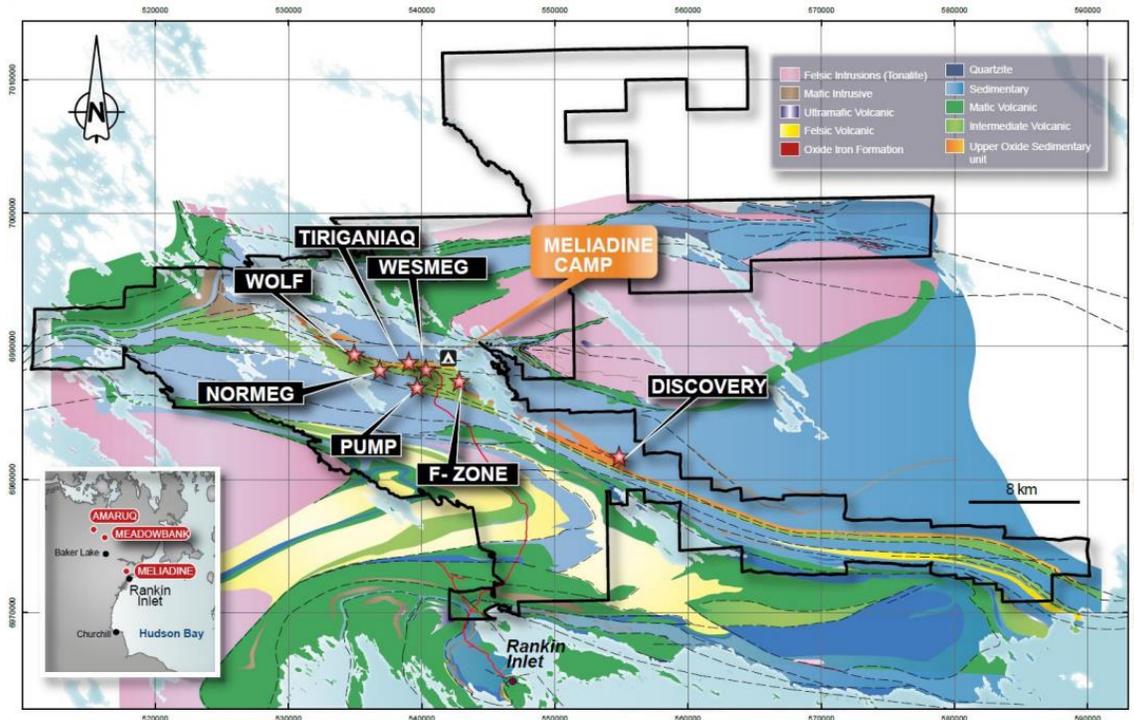


Figure 13: Carte géologique du district aurifère de *Méliadine*. En termes de contenu en or, Tiriganiaq (formation de fer aurifère) est le principal gisement d'or du district (Larouche et al., 2015).

Les principaux gisements (i.e., Tiriganiaq) sont spatialement associés à la faille *Lower Fault* qui est une subsidiaire de la faille majeure transcrustale *Pyke Fault* (**Figure 14**). L'ensemble forme un réseau de failles à tendance est-ouest qui aurait été actif tout au long des épisodes de déformation à l'Archéen et au Paléoprotérozoïque (i.e., orogénie trans-hudsonienne). La déformation est polyphasée selon quatre phases majeures de plissements et chevauchements, et le métamorphisme varie régionalement de schiste vert à amphibolite (Carpenter et Duke, 2004 ; Carpenter et al., 2005).

Dans le secteur de Tiriganiaq, les minéralisations aurifères sont fortement associées au cisaillement et aux veines de quartz±ankérite paléoprotérozoïques. La majorité de ces minéralisations est contenue dans la formation de fer *Upper Oxide Iron Formation* (**Figure 14 et 15**) à grunérite et hornblende. Cependant, de faibles quantités d'or sont aussi contenues dans les turbidites et les volcanites mafiques environnantes (Larouche et al., 2015 ; Lawley et al., 2015). La formation de fer *Upper Oxide Iron Formation* se situe surtout le long de la *Lower Fault* qui, en plus d'être une intense zone de cisaillement, marque un contact stratigraphique entre les volcanites mafiques au sud et les turbidites au nord (**Figure 14 et 15** ; Carpenter et Duke, 2004). Dans les secteurs minéralisés, la formation de fer *Upper Oxide Iron Formation* est discontinue, intensément plissée et épaissie, transposée, et présente un style d'altération en remplacement à pyrrhotite et arsénopyrite. L'arsénopyrite est d'ailleurs intimement associé à l'or puisqu'il contient ce dernier en inclusion et dans des fractures (Lawley et al., 2015).

Un halo d'altération de plusieurs dizaines de mètres à séricite surtout, et plus ou moins ankérite ± chlorite ± quartz, est caractéristique des zones minéralisées autour des veines de quartz ± ankérite aurifères. Cependant, cette altération potassique est plus apparente dans les volcanites et turbidites au contact de la formation de fer (Larouche et al., 2015). Pour les zones à fortes teneurs, l'altération par remplacement (envahissement) à quartz est caractéristique (Lawley et al. 2015).

Le contrôle stratigraphique et structural est majeur dans ce gisement, et la transition métamorphique de schiste vert à amphibolite inférieure est notable (**Figure 15**). Contrairement à *Meadowbank*, les formations de fer de *Méliadine* sont peu abondantes et de faibles épaisseurs. Néanmoins, les deux gisements partagent une histoire similaire quant à la complexité et à la durée des événements de déformation et d'hydrothermalisme (Dubé et Mercier-Langevin, 2015 ; Lawley et al., 2015).

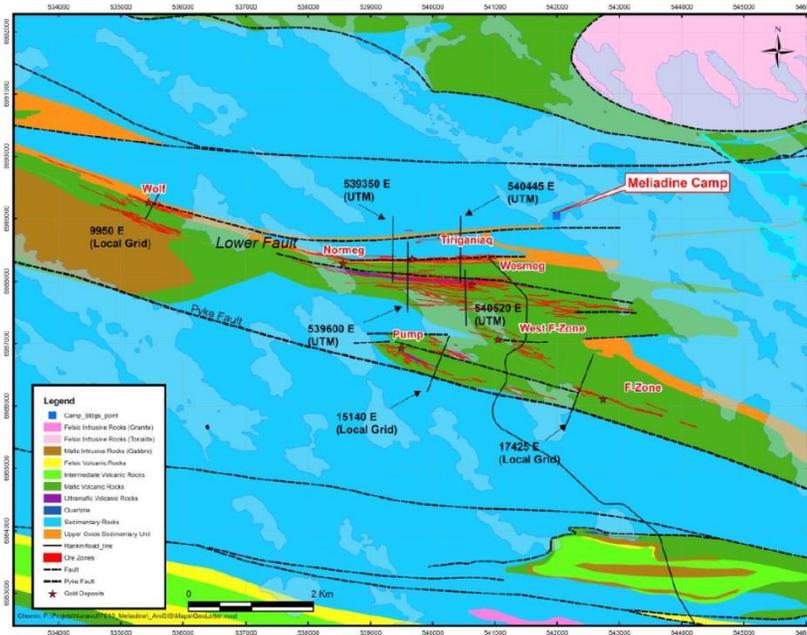


Figure 14: Géologie locale du secteur de *Tiriganiaq* (modifié de Larouche et al., 2015).

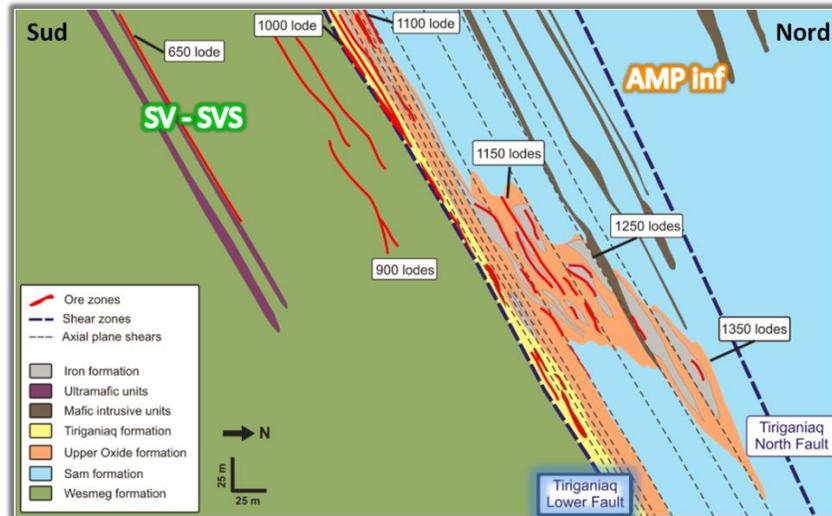


Figure 15: Section nord-sud du gisement de *Tiriganiaq* (modifié d'après *Agnico-Eagle, com. pers.*).

Les évaluations structurales couplées à la géochronologie suggèrent que l'or à *Méliadine* ait été introduit au cours des événements hydrothermaux précoces au Paléoprotérozoïque, entre 2,27 et 1,90 Ga, et qu'il ait été fortement remobilisé durant les épisodes tardifs de l'orogénie trans-hudsonienne à 1,86-1,85 Ga (Carpenter et al., 2005 ; Lawley et al., 2014, 2015).

2.3.1.4 Lupin

Le gisement de *Lupin* (production : 3,4 Moz Au @ 8,9 g/t Au ; Harron, 2011 ; réserves prouvées et probables : 32 kt @ 8,6 g/t Au, et ressources totales : 0,78 Mt @ 9 g/t Au ; Martin, 2005), au Nunavut, Canada, est situé dans la Province géologique des Esclaves. Les minéralisations aurifères sont contenues dans une formation de fer archéenne silicatée (i.e., grunérite) qui fait partie d'un dôme structural, le dôme de *Lupin*. Il s'agit d'une structure d'interférence de plis, en forme de tête de marteau (*hammerhead shape*), dans une zone de transition métamorphique allant du faciès des schistes verts à l'amphibolite (Geusebroek et Duke, 2004).

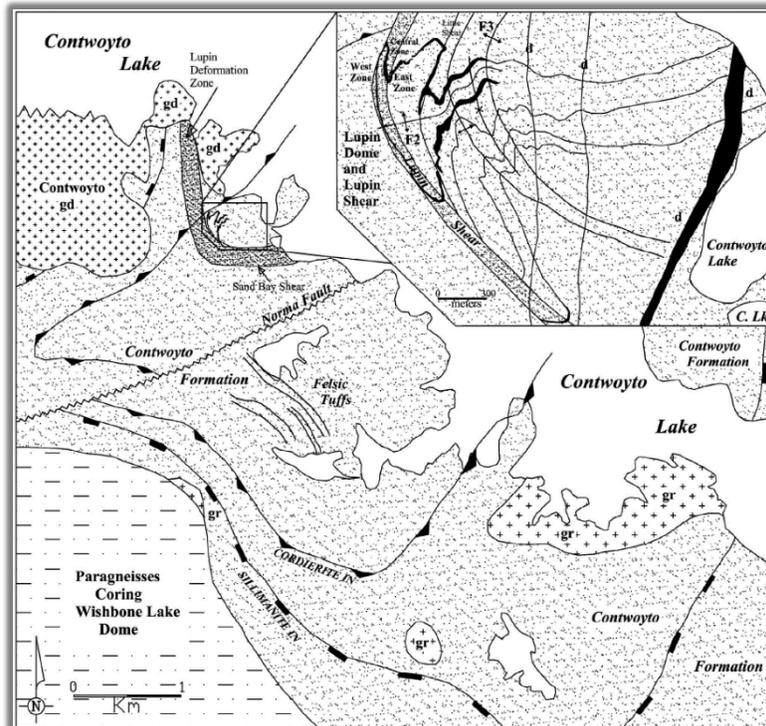


Figure 16: Géologie régionale et locale de la mine *Lupin*, d'après Geusebroek et Duke (2004).

La formation de fer hôte de la minéralisation aurifère fait de 1 à 20 mètres d'épaisseur (Lhotka et Nesbitt, 1989). Elle est encaissée dans une séquence sédimentaire détritique archéenne (i.e., grauwacke, turbidite, argilite), la Formation de *Contwoyto* (**Figure 16**), dans laquelle elle est surmontée par une unité de mudstone imperméable. L'ensemble est intrudé par une série de granitoïdes tardi-archéens, avec des zones gneissiques séparant les plutons des sédiments (**Figure 16** ; Geusebroek et Duke, 2004). De multiples phases de plissement aboutissent à un portrait structural complexe formant le dôme de *Lupin*, qui est un élément clé dans le contrôle structural de la minéralisation aurifère.

Au moins trois phases de déformation ont affecté le secteur : La première phase n'a laissé que peu de traces. En revanche, la seconde phase de déformation a formé des plis isoclinaux selon des traces axiales est-ouest, et la troisième déformation a entraîné, à la faveur d'un épisode de raccourcissement est-ouest, du plissement isoclinal, la verticalisation des traces axiales de pli P2, le développement d'une zone de déformation nommée *Lupin Deformation Zone* « LDZ », et la forme en tête de marteau (*hammerhead shape*) du dôme (**Figure 17A et 17B** ; Gardiner, 1986 ; King et al., 1988). Le gisement se situe dans la partie ouest du dôme de *Lupin*, zone dans laquelle les roches sédimentaires plissées (F2/P2) semblent buter sur la LDZ, à un point précis de changement d'orientation de cette dernière de nord-sud vers le sud-est (**Figure 16**). Les principales concentrations en or sont situées dans les flancs ouest et centre de cette zone, secteur dans lequel les éléments cisailant sont intenses, alors que les minéralisations aurifères deviennent plus sporadiques en s'éloignant vers l'est (**Figure 17** ; Geusebroek et Duke, 2004). La relation spatiale entre la zone de déformation ductile (syn-D3) et les plis P2 et P3 du dôme de *Lupin* est un élément majeur quant à la présence de concentrations aurifères.

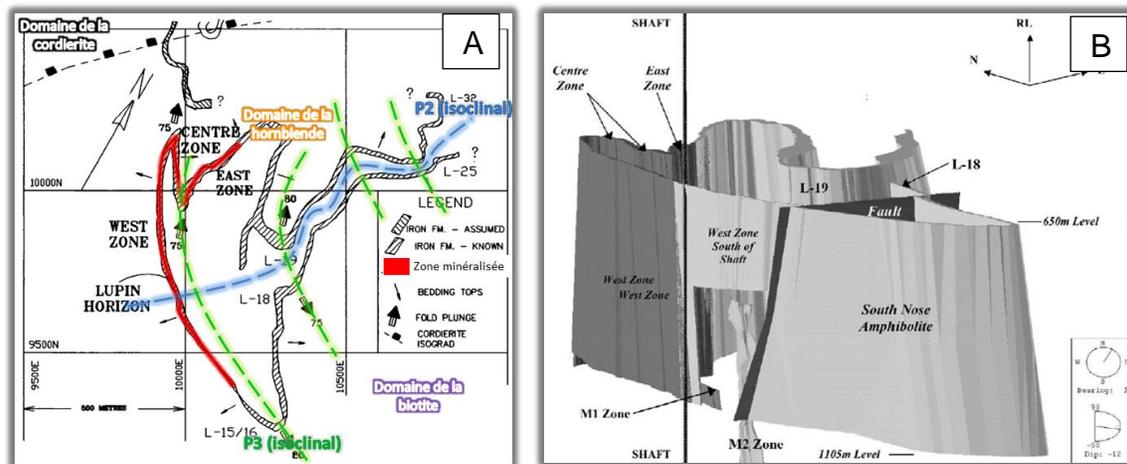


Figure 17: A) Vue en plan de la formation de fer de *Lupin*, des zones minéralisées, et d'autres éléments géologiques et miniers (modifié de Bullis et al., 1993). B) Diagramme isométrique du dôme de *Lupin* (Geusebroek et Duke, 2004).

Dans le secteur du dôme de *Lupin*, les faciès métamorphiques évoluent du sud en nord, depuis le domaine de la biotite à celui de la cordiérite (**Figure 17A**). Ainsi, la formation de fer hôte des minéralisations aurifères est portée à un faciès métamorphique transitionnel de schiste vert à amphibolite (Geusebroek et Duke, 2004). Les zones minéralisées sont confinées à la formation de fer à amphibole (i.e., grunérite, hornblende ; **Figure 17A**). Parfois des grenats sont aussi reconnus.

L'or à *Lupin* est présent dans la pyrrhotite ± arséniures (i.e., arsénopyrite, loellingite) au niveau de la formation de fer à faciès à hornblende. Les veines de quartz sont très abondantes dans les zones minéralisées (**Figure 18 et 19**) et contrôlent la distribution d'arséniures qui sont aussi associés à l'or.

Les veines de quartz sont clairement tardives par rapport à la déformation, car elles ne sont pas ou très peu déformées. Les altérations calco-silicatées (e.g. hedenbergite) sont typiques des zones minéralisées, et sont spatialement et temporellement associées aux veines de quartz. Bien que la formation de fer soit à grunerite, la hornblende la remplace dans les zones minéralisées (Lhotka et Nesbitt, 1989). Il y a une zonalité entre le faciès distal à grunerite, peu minéralisé, et le faciès proximal à hornblende caractéristique de zones minéralisées dans lesquelles se concentrent les veines de quartz (**Figure 19**; Lhotka et Nesbitt, 1989).



Figure 18: Photo de la formation de fer aurifère à *Lupin* dans laquelle les horizons à magnétite et amphibole sont remplacés par la pyrrhotite, et l'ensemble recoupé par des veines de quartz tardives (Geusebroek et Duke, 2004).

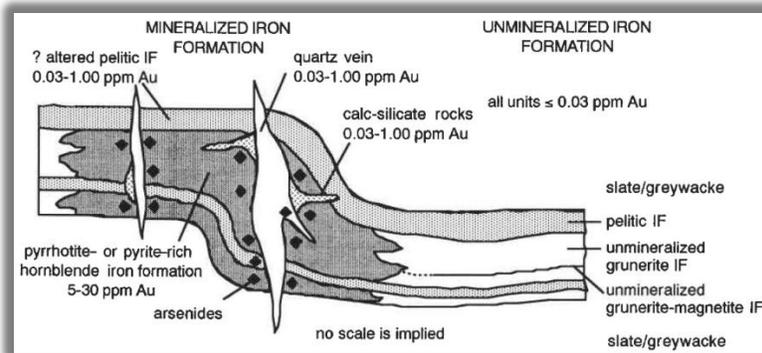


Figure 19: Diagramme schématique des relations entre les veines de quartz et la minéralisation aurifère dans la formation de fer du gisement de *Lupin* (Lhotka et Nesbitt, 1989).

Selon Geusebroek et Duke (2004), l'élément clé des concentrations aurifères à *Lupin* est la combinaison d'un réservoir de fluides métamorphiques (importante mobilité des fluides à la transition SV-AMP), un conduit structural (LDZ), et un piège chimique (formation de fer de *Lupin*). Le développement du dôme de *Lupin* a certainement été un autre élément important dans le contrôle la mobilité des fluides.

Par ailleurs, la présence d'une unité de mudstone imperméable, stratigraphiquement au-dessus de la formation de fer, a pu être un paramètre significatif qui aurait permis de seller le système et ainsi focaliser les fluides sur la formation de fer.

2.3.1.5 Musselwhite

Le gisement de *Musselwhite* est localisé dans la ceinture de roches vertes de *North Caribou*, dans la partie ouest de la Province géologique du Supérieur (Thurston et al., 1991 ; **Figure 20**). En opération depuis 1997, la mine a produit environ 4,4 Moz Au, alors que les réserves probables et prouvées sont de 1,72 Moz Au (www.goldcorp.com).

La formation de fer hôte du gisement, de type Algoma, fait partie de l'assemblage métavolcanique de *Opapamiskan*, qui est riche en formations de fer (Dubé et Mercier-Langevin, 2015). Les roches du secteur de *Musselwhite* sont archéennes ; l'âge des volcanites de l'*Opapamiskan* est compris entre 2983 Ma et 2972 Ma (Biczok et al., 2012).

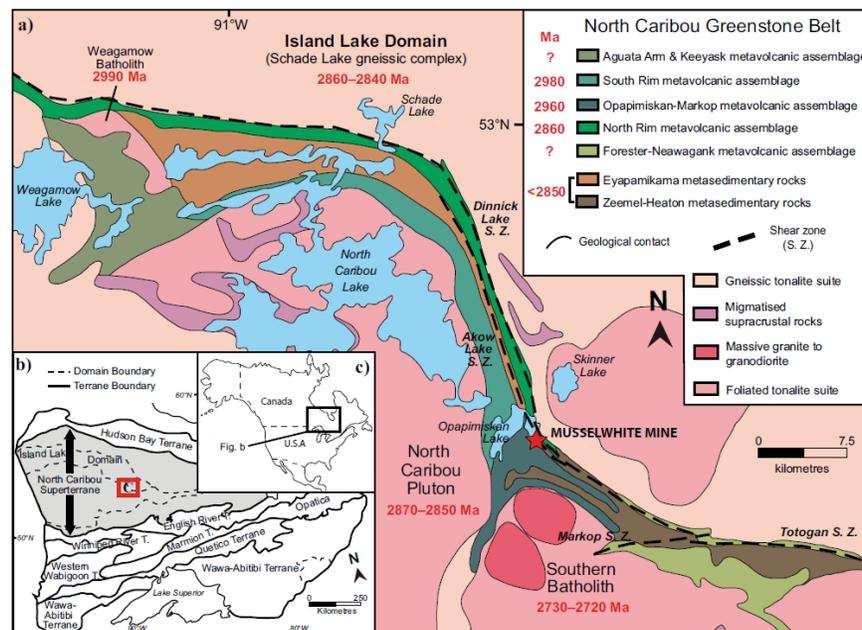


Figure 20: Carte géologique régionale et localisation du gisement de *Musselwhite* (Oswald et al., 2015a).



Figure 21: Minéralisation typique du gisement de *Musselwhite* montrant de l'envahissement/l'imprégnation de quartz (*silica flooding*) et du remplacement par la pyrrhotite (Oswald et al. 2015a).

Les minéralisations sont encaissées dans une formation de fer à grenat-grunérite-magnétite, la *Northern Iron Formation*, au faciès amphibolites inférieur (Oswald et al., 2015a, b). Les textures, compositions, et abondances de ces minéraux reflètent le caractère proximal ou distal de l'altération associée aux zones aurifères. Le faciès d'altération distal à grenat-grunérite contient du grenat almandin xénomorphe en faible quantité, alors que le faciès d'altération proximal de la minéralisation aurifère contient, en association avec la pyrrhotite, une abondance de grenats almandins riches en calcium et fracturés (Moran, 2008 ; Kolb, 2011 ; Oswald et al., 2014, 2015a, b). Les zones de plus fortes teneurs en or sont des zones de remplacement stratoïdes à pyrrhotite (\pm pyrite), et des zones d'envahissement et d'imprégnation de quartz (*silica flooding*) (**Figure 21**). Une petite portion de la minéralisation est aussi portée par des veines de quartz - pyrrhotite \pm pyrite qui coupent la formation de fer (Oswald et al., 2014, 2015a, b).

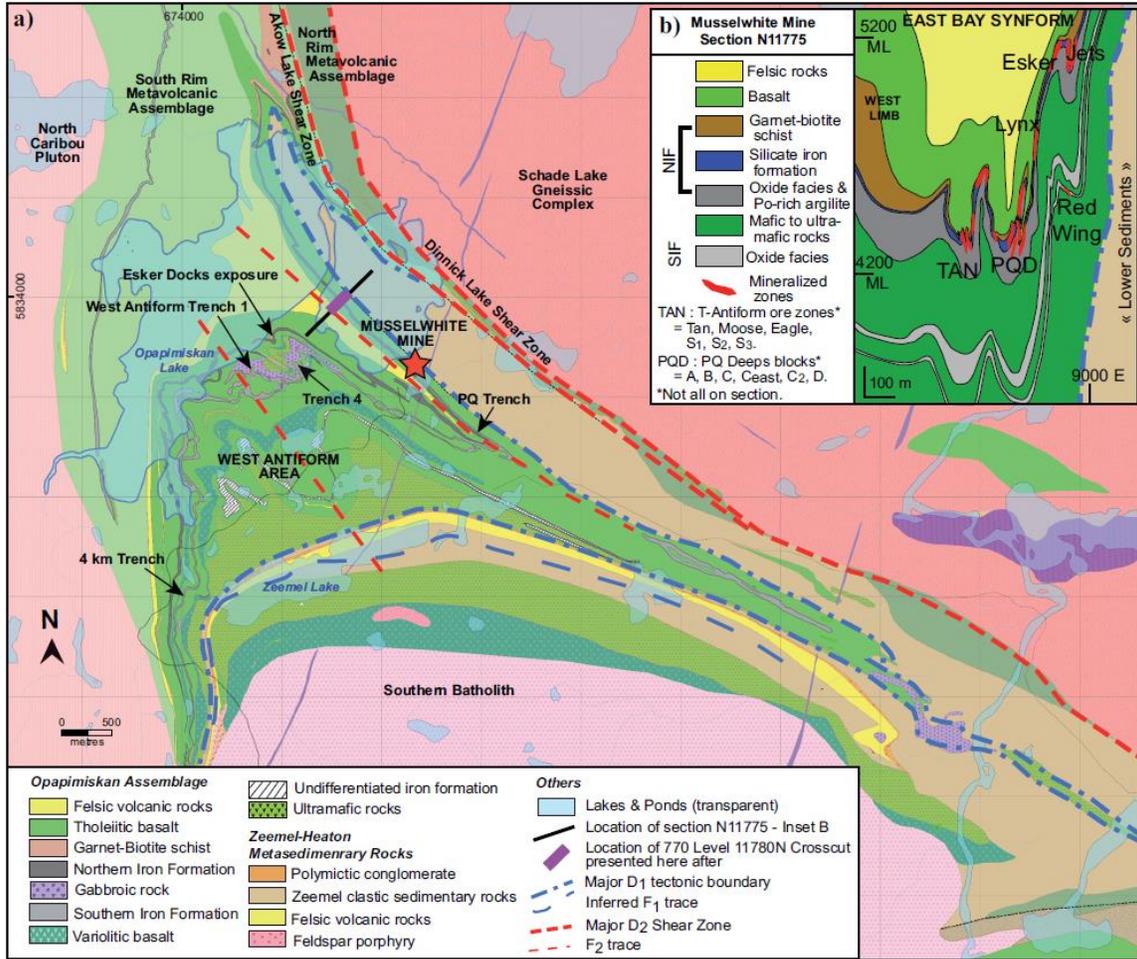


Figure 22: Agrandissement de la carte géologique du secteur de *Musselwhite* (Oswald et al. 2015 b).

Une révision de la stratigraphie et de la structure, ainsi que des datations U-Pb indiquent que la stratigraphie de la mine est inversée (McNicoll et al., 2013 ; Oswald et al., 2015a, b). La mine est contenue dans un flanc retourné d'un pli synclinal kilométrique de la 1^{ère} phase de déformation, à proximité d'une zone de déformation majeure délimitant deux domaines géologiques (**Figure 22A**). Ce premier épisode de déformation est significatif quant à la distribution et la géométrie des formations de fer hôtes des minéralisations aurifères (Oswald et al., 2014, 2015a, b).

Les plis D1 ont été fortement plissés par les plis isoclinaux de seconde génération, lesquels dominent le motif structural régional. Les zones minéralisées sont associées à des zones de forte déformation apparentées à D2, et se concentrent dans les charnières et le long des flancs considérablement amincis des plis P2 (**Figure 22B**). Le contrôle structural sur les minéralisations aurifères est un élément majeur à *Musselwhite*.

Les cristaux de grenat automorphe se surimposent à la seconde schistosité (S2), indiquant qu'ils ont crû tardivement ou après la phase de déformation D2. Des évidences minéralogiques telles que la présence d'or dans les cristaux de grenat, dans leur fracture, et dans les ombres de pression des porphyroblastes, suggèrent que l'or aurait été introduit après l'amorce de la cristallisation de ces porphyroblastes, au cours de la phase de déformation D2 (Oswald et al., 2015a, b). Ainsi, à *Musselfite*, l'or serait archéen, associé aux phases de déformation tardives.

2.3.2 Les gîtes d'or dans les formations de fer au Québec

Au Québec, les gîtes d'or dans les formations de fer sont à ce jour au nombre de 198 (cf. SIGÉOM 2015), ce qui représente 9 % de l'ensemble des gîtes d'or (**Figure 23**). Ces gîtes sont surtout contenus dans des ceintures de roches vertes, dans les domaines archéens et paléoproterozoïques.

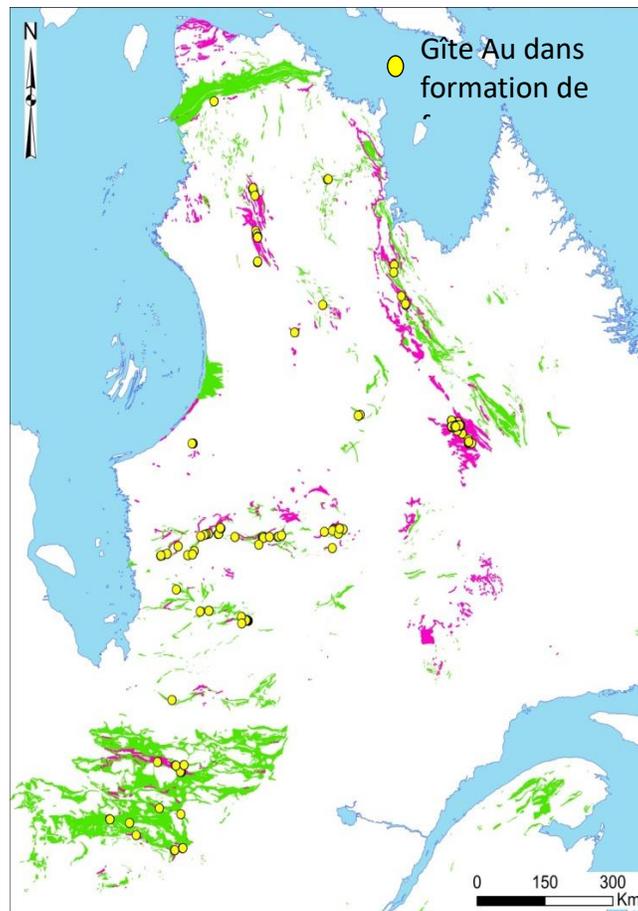


Figure 23: Gîtes d'or dans les formations de fer au Québec d'après SIGÉOM 2015. Ceintures de roches vertes en vert, et formations de fer en mauve, d'après Pearson (2007) et SIGÉOM 2015.

Dans les roches archéennes du Québec, les éléments géologiques tels que les faciès primaires, les minéraux d'altérations, le métamorphisme, et les composantes structurales sont régulièrement similaires. En effet, au Québec, la plupart des gîtes d'or dans les formations de fer se trouvent à proximité de limites de domaines géologiques, possiblement des structures transcrustales. Les faciès primaires des formations de fer minéralisées sont surtout oxydés et silicatés; les zones minéralisées forment un assemblage de minéraux d'altération à grunérite, grenat, biotite \pm chlorite, pyrrhotite, et arsénopyrite essentiellement au faciès métamorphique transitionnel schiste vert supérieur à inférieur des amphibolites, parfois intermédiaires. Les veines de quartz et les zones de silicification témoignent d'évènements hydrothermaux significatifs. Les contrôles structuraux, marqués notamment par des séries de plis isoclinaux ou complexes, des cisaillements, et de l'étirement, sont des éléments récurrents de concentration des minéralisations aurifères (e.g., gîte Orfée : Bogatu (2016); gîte Kogaluc : Francoeur, 1995, 1996; Chapdelaine, 1998).

Il faut mentionner un secteur avec un cas atypique de gîtes d'or dans les formations de fer, le secteur du gîte Lilois dans le Complexe de l'*Ashuanipi* (cf. Gauthier, 2000). Le métamorphisme est au faciès supérieur des amphibolites à granulite. Le matériel a partiellement fondu pour donner un assemblage à quartz, pyroxène, grenat, avec des sulfures tels que pyrrhotite, arsénopyrite, et loellingite. Les veines de quartz sont absentes, ce qui est courant dans les faciès élevés. Malgré l'élément métamorphique atypique, la composante structurale est présente avec la concentration des zones minéralisées dans des charnières de pli et des zones de cisaillement.

Les gîtes d'or dans les formations de fer paléoprotérozoïques sont bien moins répandus que dans les roches archéennes. Néanmoins, leur présence démontre qu'un potentiel existe aussi dans les roches paléoprotérozoïques du Québec. Certaines caractéristiques géologiques de ces gîtes paléoprotérozoïques sont communes aux gîtes archéens : Les charnières de structures plissées et complexes, ainsi que l'abondance de veines de quartz sont typiques des zones minéralisées (e.g., gîtes Venditelli et Dessureault : Wares et Goutier, 1990; Goutier et Wares, 1991). En revanche, des différences notables portent sur les minéraux d'altération qui sont majoritairement à carbonates de fer et phyllosilicates (e.g., séricite, chlorite), et sur le faciès métamorphique inférieur des amphibolites.

2.3.3 Synthèse des guides d'exploration généraux

D'après la documentation des systèmes aurifères dans les formations de fer, plusieurs critères de natures empirique et conceptuelle sont reconnus. Un schéma présenté à la **Figure 24** synthétise ces principaux critères.

Les gisements d'or dans les formations de fer sont le produit de plusieurs évènements aurifères (ou remobilisation), associés à la génération de zones de déformations archéennes à protérozoïques, dans lesquelles les contrôles structuraux et stratigraphiques sont majeurs.

Les gisements d'or dans les formations de fer sont localisés à proximité de failles régionales de type transcrustale représentant généralement une limite de domaine géologique. Il s'agit de structures drainant d'importants volumes de fluides potentiellement minéralisés (cf. Groves et al., 1998 ; Goldfarb et al., 2005), ce qui dans le cadre d'un modèle épigénétique les rendent très critiques pour l'exploration à l'échelle régionale. Les zones minéralisées se concentrent dans les charnières de plis épaisses et complexes, et le long des flancs de plis fortement cisailés, ainsi que dans des zones de déformation de second, voire de troisième ordre.

Les stigmates de l'hydrothermalisme sont marqués par la présence de veines de quartz abondantes, ou par l'imprégnation/envahissement de quartz (*silica flooding*) dans des horizons concordants au litage dans le cas de faciès métamorphiques plus élevés. Ce métamorphisme élevé atteint le faciès intermédiaire de l'amphibolite, mais la fenêtre métamorphique transitionnelle entre le schiste vert supérieur et le faciès inférieur de l'amphibolite est dominante pour les gisements d'or dans les formations de fer. Cette fenêtre favorable est soutenue par le modèle conceptuel de dévolatilisation des fluides dans cette zone métamorphique transitionnelle (Large et al., 2007, 2011).

Les associations minérales issues de l'altération sont influencées par les conditions métamorphiques. Pour des faciès inférieurs à l'amphibolite, les assemblages à carbonate de fer, séricite, biotite, et sulfure tels que pyrite, arsénopyrite, parfois pyrrhotite sont caractéristiques. Pour des faciès à l'amphibolite, les assemblages minéralogiques sont silicatés, notamment à grunérite/cummingtonite et grenat, et sulfurés à pyrrhotite, arsénopyrite, parfois pyrite. La disparition des carbonates de fer au cours du métamorphisme prograde pourrait s'expliquer par la consommation de ces derniers, en plus du quartz, pour produire des amphiboles riches en fer et des carbonates calciques (Klein, 2005).

Afin d'évaluer un potentiel en or dans les formations de fer, les critères identifiés à partir de la documentation des gisements/gîtes d'or dans les formations de fer existant, sont à recouper avec des anomalies géochimiques en métaux dans les formations de fer, dans les roches volcano-sédimentaires hôtes des formations de fer (type *Algoma*), ainsi que dans l'environnement secondaire (**Figure 24**).

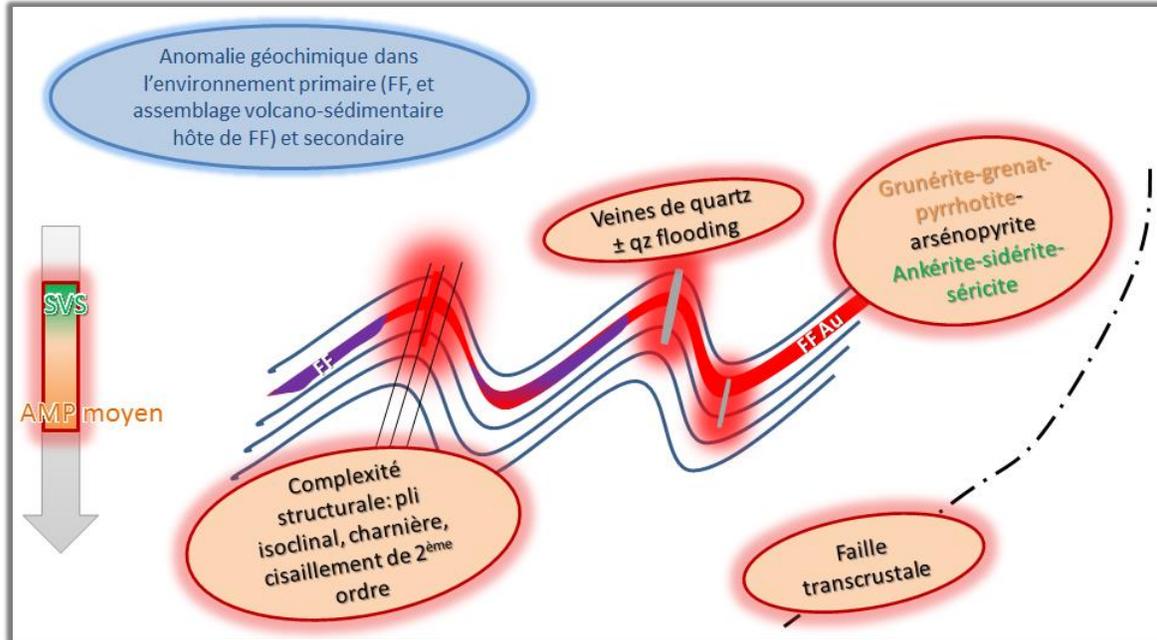


Figure 24: Représentation schématique des critères d'exploration généraux pour les gisements d'or dans les formations de fer.

(Les polygones à contours rouges représentent des caractéristiques observées dans les gisements. Les caractéristiques dans le polygone bleu sont des éléments qui doivent être considérés en parallèle des critères structuraux, minéralogiques, et métamorphiques (en rouge)).

3 PARTIE 2 : LES GUIDES D'EXPLORATION À LA BAIE-JAMES ET DANS LA FOSSE DU LABRADOR

Cette seconde partie traite des guides d'exploration régionaux pour les minéralisations de type formation de fer aurifère à la Baie-James et dans la Fosse du Labrador. Les guides d'exploration proposés dans ces deux territoires du Québec résultent de l'application des indicateurs de favorabilité aurifère provenant de l'étude des grands gisements nord-américains (cf. PARTIE 1), et du recouplement avec l'information quantitative de la géochimie.

3.1 Sélection des régions d'étude

À partir de considérations géotectoniques, deux secteurs ont retenu notre attention : la Baie-James et la Fosse du Labrador. La Baie-James contient environ 50 % de tous les gîtes d'or dans les formations de fer au Québec. Il s'agit donc d'une zone attrayante pour ce type de gîte. À la Baie-James l'environnement géologique est globalement similaire à celui que l'on trouve dans les secteurs de *Geraldton*, *Musselwhite*, et d'*Agnico-Eagle* avec des terranes archéens dans la Province de Supérieur, et ayant accomodées des déformations à la fin de l'Archéen (cf. Percival, 2007). Dans la Fosse du Labrador, d'importantes quantités de formations de fer, 75 % du Québec (SIGÉOM 2015), dont une portion de type *Algoma* (cycle 2; Clark et Wares, 2004), sont reconnues dans des ceintures volcano-sédimentaires. Ces assemblages géologiques résultent de l'orogénie trans-hudsonienne au Paléoprotérozoïque, une période faste pour l'or de type orogénique notamment en Amérique du Nord avec les cas de *Homestake*, *Meadowbank*, et *Méliadine* (Figure 25).

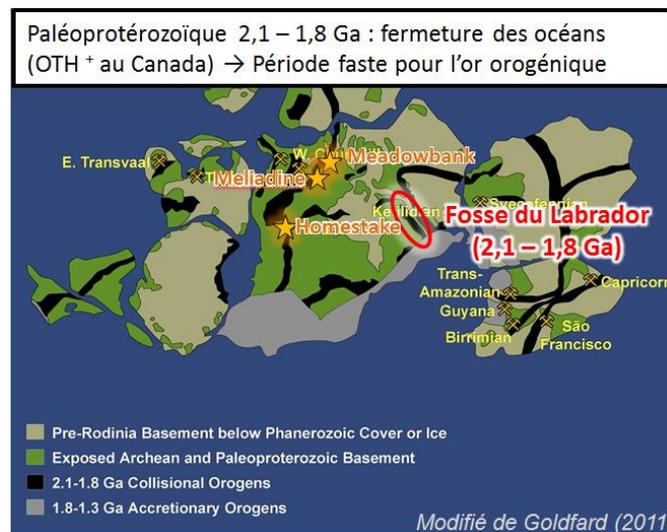


Figure 25: Reconstitution du super-continent Columbia au Paléoprotérozoïque (OTH : Orognène Trans-Husonien). Minéralisations aurifères paléoprotérozoïques dans les gisements de Homestake (Bell, 2013), Méliadine (Lawley et al., 2015), et Meadowbank (Janvier et al., 2015a, b).

À noter que la Fosse de l'Ungava était considérée au départ dans ce travail, car il s'agit d'un contexte similaire à la Fosse du Labrador. Cependant, la très faible quantité d'information publique disponible n'a pas permis une évaluation de ce secteur qui pourtant présente, à priori, un intérêt.

3.2 Données disponibles dans les secteurs d'étude

Les secteurs d'étude à la Baie-James et dans la Fosse du Labrador (**Figure 26**) totalisent une superficie de 216 385 km², soit 14 % de la surface du Québec. La zone d'étude à la Baie-James couvre 231 feuillets SNRC 50K qui sont contenus dans les feuillets SNRC 250K 22M, 23D, 23E, 23L, 23M, 32M, 32N, 32O, 32P, 33A, 33B, 33C, 33D, 33E, 33F, 33G, 33H, 33I, 33J, 33K, 33P. La zone d'étude dans la Fosse du Labrador couvre 109 feuillets SNRC 50K qui sont contenus dans les feuillets SNRC 250K 23G, 23H, 23I, 23J, 23N, 23O, 23P, 24B, 24C, 24E, 24F, 24K, 24L, 24M, 24N, 25C, et 25D.

La Baie-James et la Fosse du Labrador ont fait l'objet de levés géophysiques aéroportés réalisés par le MERN. Il s'agit de levés magnétiques aéroportés de haute résolution avec des lignes de vols au 250 m effectués entre 2007 et 2011 pour la Baie-James, et 2009 et 2015 pour la Fosse du Labrador (**Figure 26** ; D'Amours, 2011 ; D'Amours et Intissar, 2012a, b, 2013 ; Benhamed et Intissar, 2015 ; Intissar et al, 2015a, b).

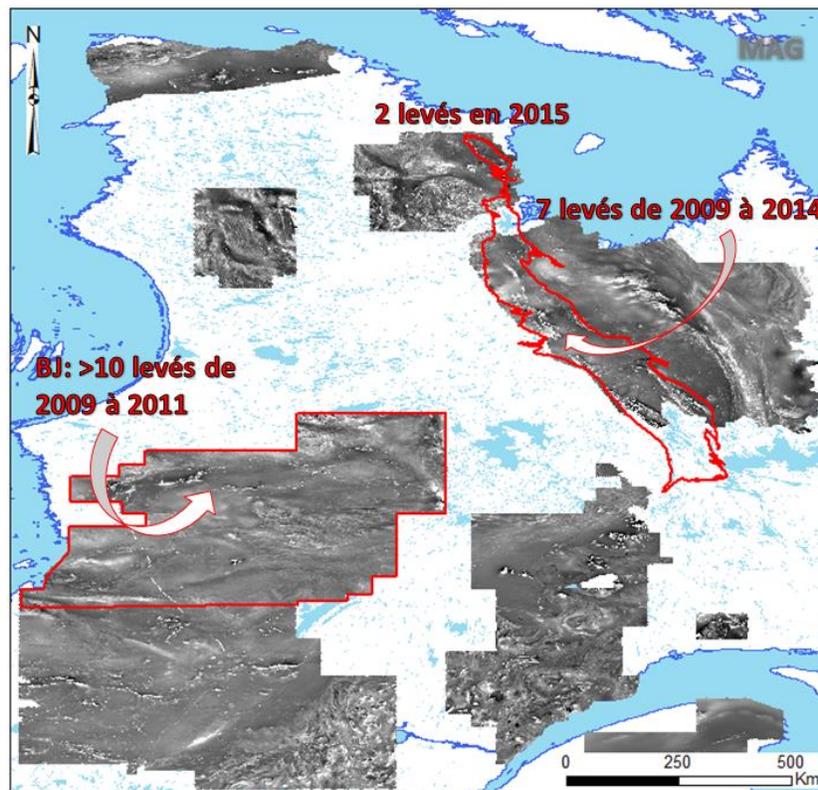


Figure 26: Levés aéromagnétiques au Québec (MERN), et les deux secteurs d'étude en rouge à la Baie-James et dans la Fosse du Labrador.

3.3 Reconnaissance de formations de fer par l'approche aéromagnétique

L'étude portant sur l'or dans les formations de fer, la reconnaissance de ces unités est un préalable à l'évaluation du potentiel au Québec. Les travaux de cartographie géologique du MERN ont mené à l'identification de plus de 3 000 formations de fer (cf. SIGÉOM 2015). Cependant, les formations de fer sont généralement des corps étroits peu évidents à distinguer en cartographie de terrain, notamment lorsque la couverture quaternaire est importante comme à la Baie-James. Par ailleurs, une formation de fer peut avoir été identifiée en affleurement, mais n'apparaîtra pas nécessairement sur une carte gouvernementale si l'unité a une dimension inférieure à 20 mètres qui est le seuil (*J. Goutier, com. pers.*).

Les formations de fer contenant de la magnétite définissent de hautes anomalies magnétiques sur les levés aéromagnétiques (cf. **Figure 9B**). La magnétite a des valeurs de susceptibilité magnétique comprises entre 300 et 1600 (10^{-3} SI) (Landry, 2014). En comparaison, les roches ultramafiques, elles aussi magnétiques, ont une susceptibilité magnétique comprise entre 20 et 150 (10^{-3} SI) (Landry, 2014). Ce caractère magnétique permet d'utiliser la cartographie géophysique de façon complémentaire à la cartographie de terrain, soit pour raffiner la géométrie, soit pour reconnaître de nouvelles unités.

Les récents levés magnétiques aéroportés de hautes résolutions apportent un nouveau regard sur la Baie-James et la Fosse du Labrador (**Figure 26** ; D'Amours, 2011 ; D'Amours et Intissar, 2012a, b, 2013 ; Benhamed et Intissar, 2015 ; Intissar et al, 2015a, b). Afin de distinguer le signal magnétique d'une formation de fer versus d'autres lithologies (e.g., felsique, intermédiaire, mafique, ultramafique), des valeurs du gradient vertical du champ magnétique sont collectées pour plusieurs lithologies ignées et sédimentaires bien identifiées dans la Province de Supérieur et dans la Fosse du Labrador. Il s'agit de valeurs de la 1^{ère} dérivée verticale du champ magnétique, et non du champ magnétique total, car les valeurs de contraste entre les lithologies sont mieux marquées. Statistiquement, les résultats sont probants. Ils présentent une discrimination des formations de fer par rapport aux autres lithologies (**Figure 27**). À la Baie-James, un seuil de 10 nT/m marque le champ des formations de fer. Dans la Fosse du Labrador, le seuil est de 4 nT/m, avec cependant une distinction entre les roches ultramafiques et les formations de fer moins évidentes qu'à la Baie-James. Les plus faibles valeurs dans la Fosse pourraient être expliquées par un moindre contenu en magnétite. En effet, les faciès primaires sont essentiellement à carbonate et à silicate, à la différence de la Baie-James où les faciès primaires oxydés sont largement répandus.

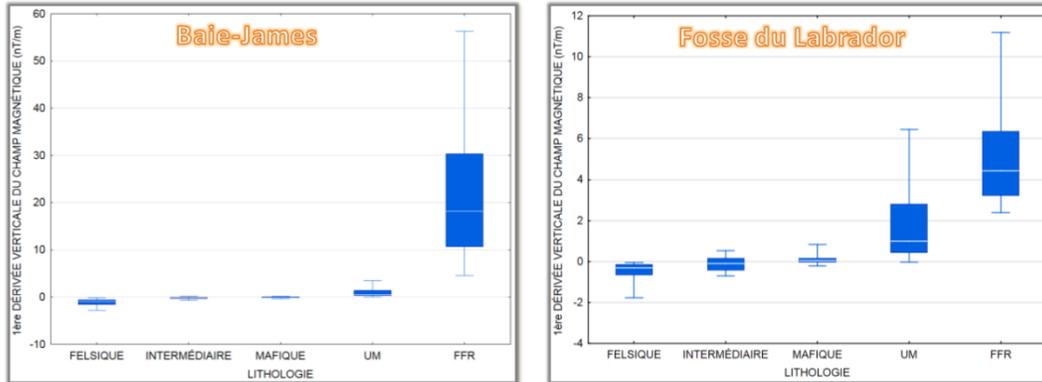


Figure 27: Valeurs de gradient vertical du champ magnétique selon les lithologies à la Baie-James et dans la Fosse du Labrador.

(D'après les lithologies dans SIGÉOM 2015 et les valeurs de gradient de DP2011-06, DP2011-07, et DP2011-08. FFR=Formation de fer (Baie-James N= 851, Fosse N=907), UM=ultramafique (Baie-James N=238, Fosse N=196), MAFIQUE (Baie-James N=282, Fosse N=670), INTERMÉDIAIRE (Baies-James N=404, Fosse N=65), FELSIQUE (Baie-James N=316, Fosse N=175)).

Par cette approche, il est possible d'identifier de bons candidats pour des formations de fer à la Baie-James et dans la Fosse du Labrador. Ces candidats ont des valeurs de 1^{ère} dérivée verticale supérieures aux seuils identifiés (**Figure 27**). Ils sont ensuite validés, ou invalidés, en fonction des points de contrôles d'affleurement de géofiche, de compilation, et des informations de forages le cas échéant provenant des données publiques et des partenaires du CONSOREM.

Les formations de fer existantes sur les cartes géologiques sont conservées si leur géométrie est cohérente avec la signature magnétique. Au final, la superficie des formations de fer nouvellement reconnues, et existantes et/ou précisées représente 434 km² à la Baie-James, et 675 km² dans la Fosse du Labrador. La **Figure 28** présente un exemple de l'exercice réalisé pour un secteur à la Baie-James.

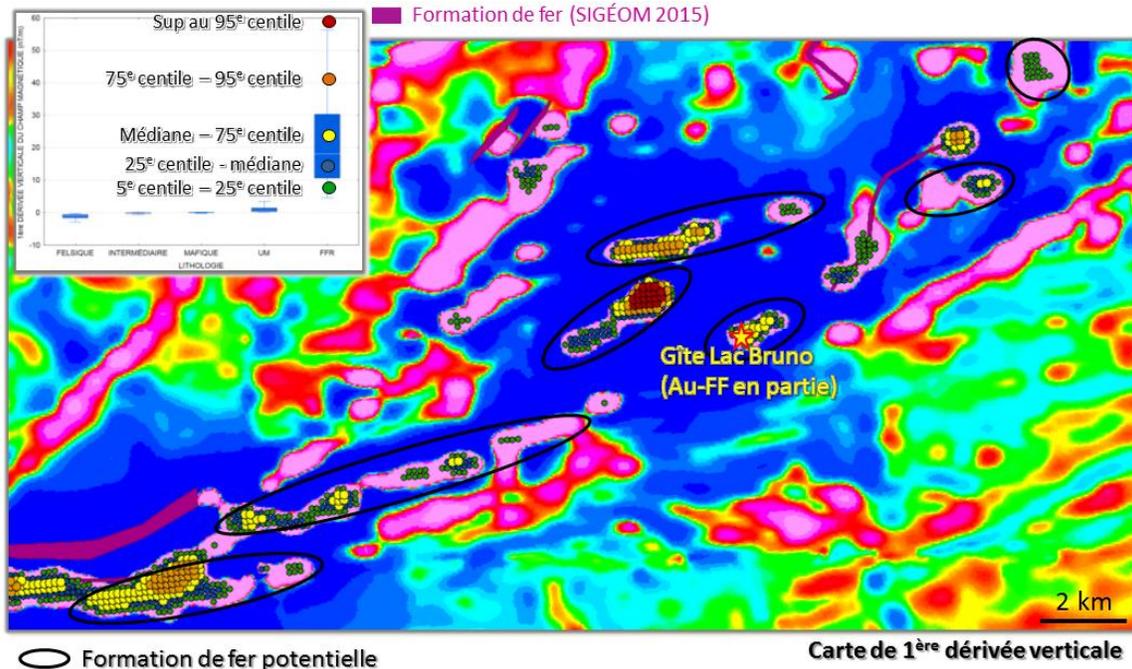


Figure 28: Les valeurs des centiles de la 1^{ère} dérivée verticale sont projetées spatialement avec la carte de 1^{ère} dérivée verticale à l'arrière-plan.

(La présence de forts centiles (points jaune, orange, et rouge) suggère fortement un potentiel pour des formations de fer. Les cercles noirs mettent en valeur des zones potentielles. Cas du gîte du Lac Bruno (cf. SIGÉOM 2015) : minéralisation aurifère en partie contenue dans une formation de fer, mais formation de fer non cartée. Les centiles indiquent une forte probabilité de présence).

3.4 Guides d'exploration à la Baie-James

3.4.1 Contexte géologique

Le territoire de la Baie-James est situé dans la Province géologique de Supérieur, laquelle est constituée d'un assemblage de fragments continentaux d'âge mésoarchéen et de lambeaux de croûte océanique d'âge néoarchéen assemblés entre 2,72 et 2,68 Ga (Percival, 2007). Le secteur d'étude couvre cinq domaines archéens (**Figure 29**) :

- (i) La Sous-province de l'Opatoca au sud-est un domaine essentiellement métaplutonique constitué de tonalites, de granodiorites, et de granites.
- (ii) La Sous-province de l'Opinaca, au centre et sud du secteur d'étude, est un domaine métasédimentaire constitué de métagrauwackes de haut grade métamorphique, typiquement amphibolite moyen à granulite. Sa frontière nord, avec la Sous-province de La Grande, est une faille régionale majeure délimitant deux domaines géologiques (Goutier et al., 2002).

- (iii) La Sous-province de La Grande, au nord de l'Opinaca, est un domaine volcano-sédimentaire dont les ceintures de roches vertes sont minces et discontinues et les paramètres tectoniques sont variables.
- (iv) La Sous-province de Bienville, au contact nord de La Grande, est un domaine de roches plutoniques granitiques. (v) Le complexe d'Ashuanipi est un domaine de roches métamorphiques et plutoniques de haut faciès métamorphique.

Les formations de fer du territoire de la Baie-James sont essentiellement contenues dans les ceintures de roches vertes de la Sous-province de La Grande (**Figure 29 et 30**). Il s'agit de formations de fer de type Algoma. Les gîtes d'or dans ces formations de fer sont en grande partie localisés au front de la Sous-province de La Grande, à proximité du contact avec l'Opinaca et donc d'une structure transcrustale majeure. Le contact Opinaca/La Grande se présente comme un guide régional d'exploration.

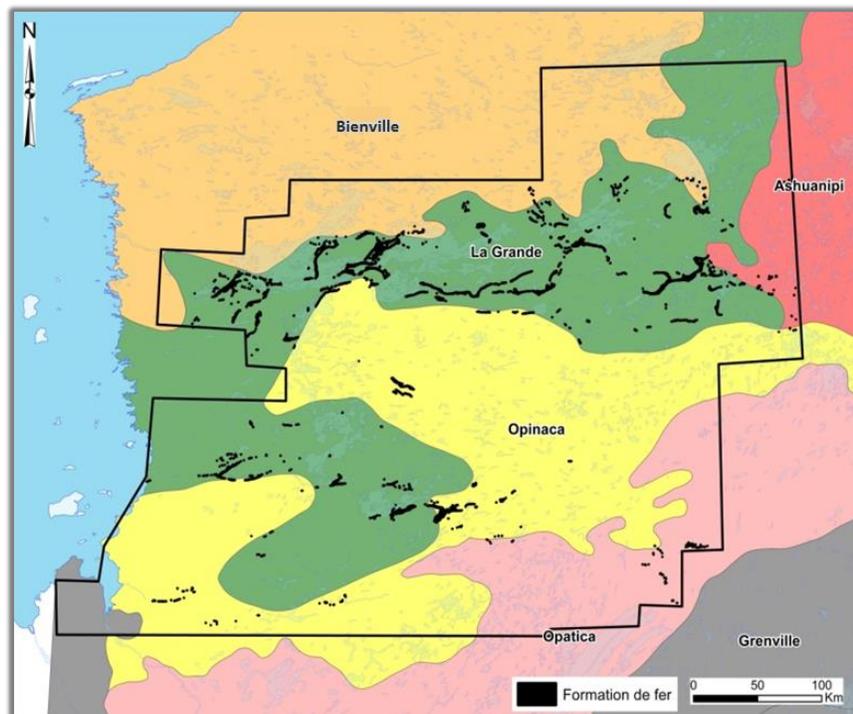


Figure 29: Les Sous-provinces géologiques et les formations de fer interprétées, et connues et/ou précisées dans le secteur d'étude à la Baie-James. Sous-provinces d'après www.donneesquebec.ca

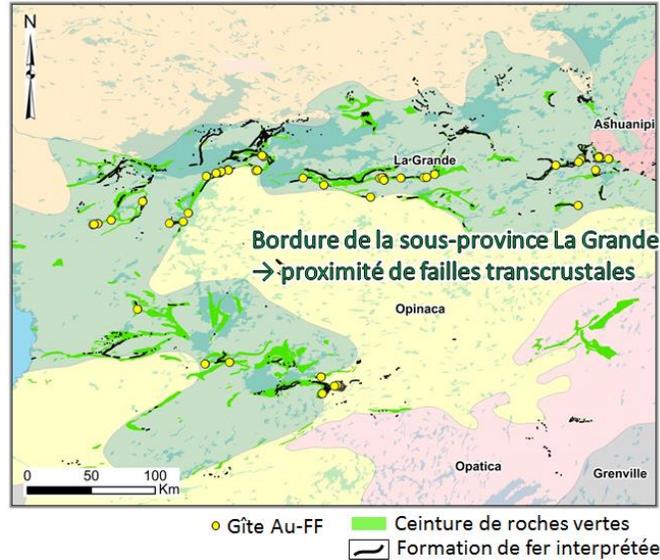


Figure 30: Sous-provinces géologiques (www.donneesquebec.ca), ceintures de roches vertes (SIGÉOM 2015), formations de fer interprétées, et gîtes d'or (SIGÉOM 2015) dans les formations de fer sur le territoire de la Baie-James.

3.4.2 Les faciès primaires des formations de fer

Une évaluation de la discrimination de la fertilité en or des faciès primaires des formations de fer archéennes du Québec est présentée à la **Figure 31**. La distribution des teneurs varie selon le faciès, mais de façon générale il n'y a pas de faciès discriminant. Les médianes évoluent entre 20 et 40 ppb d'or. On peut conclure de cette évaluation qu'il n'est pas nécessaire de considérer un faciès plus qu'un autre dans le cadre d'une exploration régionale à la Baie-James. Cependant, plus localement le faciès pourrait être pertinent.

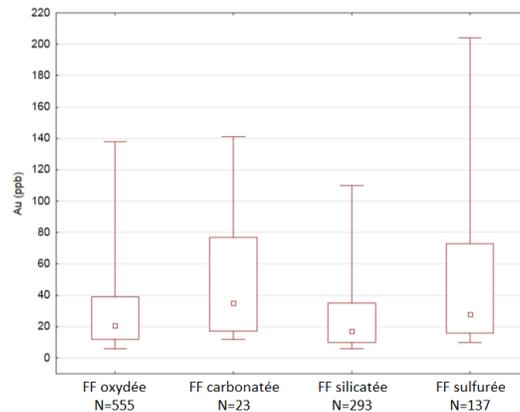


Figure 31: Boîtes à moustaches illustrant la concentration en or selon le faciès primaire des formations de fer archéennes au Québec.

(D'après la base de données lithogéochimiques de SIGÉOM 2015. Le carré rouge au centre de la boîte représente la médiane. À noter que le faciès carbonaté est absent des descriptions des faciès primaires à la Baie-James, mais a été reconnu plus au sud en Abitibi).

3.4.3 Approche géochimique

3.4.3.1 Les suites d'éléments dans les formations de fer à la Baie-James

Les gîtes de type or dans les formations de fer appartiennent à la vaste famille des gisements d'or orogénique d'après Robert et al. (2007). Cette famille se démarque de la famille des gîtes aurifères magmatiques par, notamment, la faible présence de métaux de bases (e.g., Cu, Zn). Alors que l'association Au±Ag-As-W est la suite d'éléments traceurs pour les gîtes d'or de type veines de quartz-carbonate dans les ceintures de roches vertes (Robert et al., 2007), et que la suite d'éléments Au-VAMSNAZ, pour Au±V-Ag-Mo-Se-N-As-Z, identifiée par Large et al. (2007, 2011) est indicatrice des minéralisations aurifères dans les sédiments pélitiques fins. Dubé et Mercier-Langevin (2015) reconnaissent une association Au±As-Te-Cu-Pb-Zn-Sb comme caractéristique du contexte aurifère dans les formations de fer.

Afin d'évaluer efficacement les associations élémentaires dans les formations de fer aurifère à la Baie-James, une analyse en composante principale ACP (cf Baccini, 2010 ; Bigot, 2013) a été réalisée à partir de la lithogéochimie. Les échantillons utilisés proviennent de formations de fer minéralisées à la Baie-James. Il en résulte la reconnaissance d'une association positive entre l'Au et l'As, Ag, Sb, Be, et SiO₂ (**Figure 32**). La distribution des éléments dans l'ACP de la **Figure 32** est typiquement contrôlée par les sulfures.

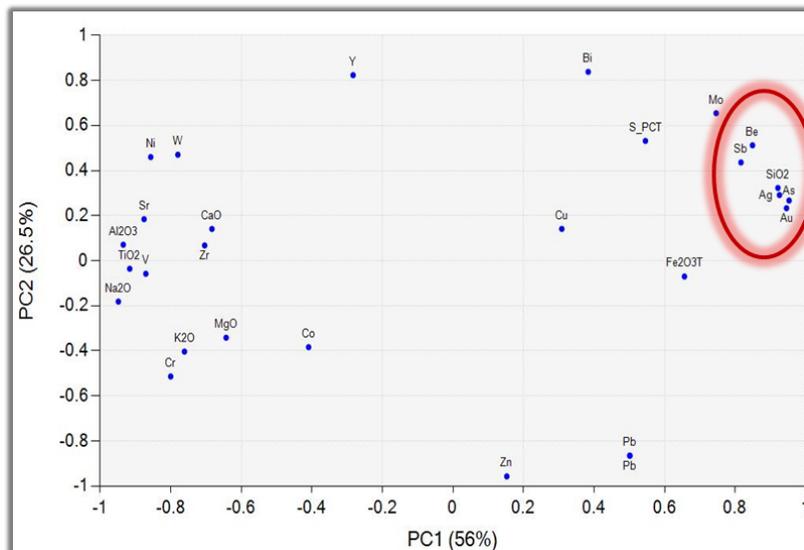


Figure 32: Analyse en composantes principales (A.C.P.) des formations de fer minéralisées (> 0,5 g/t Au) à la Baie-James (N=264)

(D'après la lithogéochimie dans SIGÉOM 2015. Méthodologie : Transformation des données en log-centrée).

À partir de cette suite d'éléments, il est primordial d'identifier les seuils de bruit de fond au-delà desquels les valeurs peuvent être considérées anormales. Les diagrammes quantile-quantile permettent de distinguer ces seuils. La **Figure 33** est un exemple pour l'élément Au. Dans ce cas-ci le seuil est à 50 ppb.

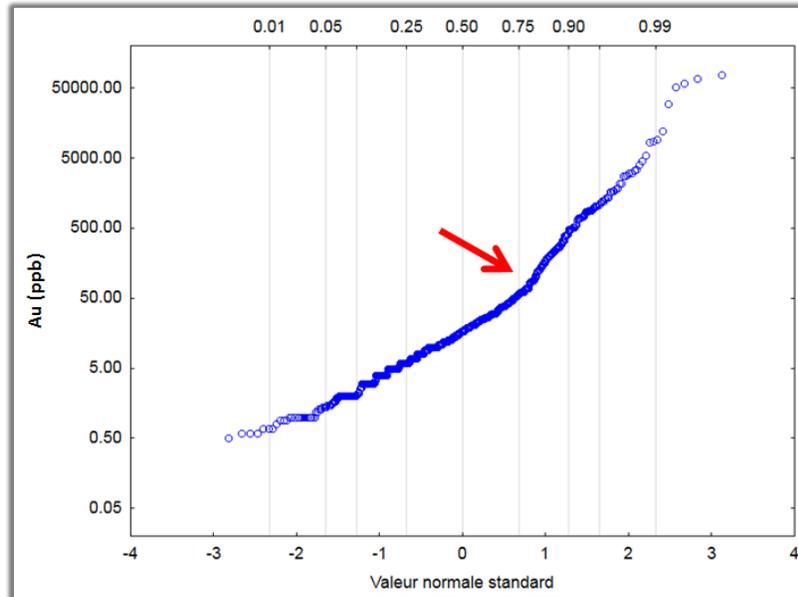


Figure 33: Diagramme quantile-quantile de l'Au dans les formations de fer à la Baie-James, d'après les données lithogéochimiques dans SIGÉOM 2015.

L'exercice a été réalisé pour la suite d'éléments identifiés dans l'ACP ; les seuils sont présentés au **Tableau 2**.

Tableau 2: Seuils anormaux pour la suite des éléments corrélés à l'or dans les formations de fer à la Baie-James. Données lithogéochimiques d'après SIGÉOM 2015.

Élément	Seuil
Au	50 ppb
As	90 ppb
Ag	2 ppm
Be	1,1 ppm
Sb	7 ppm
SiO ₂	53 %

Avec ces seuils, il est donc possible d'identifier les secteurs anormaux le long des formations de fer. Par ailleurs, en recoupant avec d'autres paramètres géochimiques (e.g., bagage métallique des assemblages volcano-sédimentaires hôtes des formations de fer, anomalies dans les sédiments de lac et de ruisseau), cela permet d'identifier des zones à haut potentiel aurifère dans les formations de fer.

3.4.3.2 Discrimination de la fertilité des assemblages volcano-sédimentaires hôtes de formations de fer à la Baie-James

Ce volet permet d'évaluer le contenu en métal dans les assemblages volcano-sédimentaires (groupes ou formations géologiques) hôtes des formations de fer. Conceptuellement, cette approche implique que les métaux, en partie ou en totalité, pourraient avoir une origine régionale tel que proposé dans le modèle de Large et al. (2007, 2011), différent donc du modèle orogénique « standard » proposé par Groves et al. (1998) et Goldfarb et al. (2005).

L'indicateur de la fertilité repose ici sur une comparaison de la médiane des valeurs de lithogéochimie pour Au, As, Ag, Be, Sb, et SiO₂ dans les assemblages volcano-sédimentaires hôtes de formations de fer. Deux exemples de cette approche sont présentés à la **Figure 34**. Toutes les formations géologiques évaluées contiennent des formations de fer de type Algoma. L'intérêt ici est de distinguer les assemblages anomaux pour la suite d'éléments positivement corrélés, soit Au, As, Ag, Sb, Be, et SiO₂ (cf. **Figure 32**). Ces diagrammes montrent que certains groupes/formations sont enrichis par rapport aux autres, et ce pour plusieurs éléments.

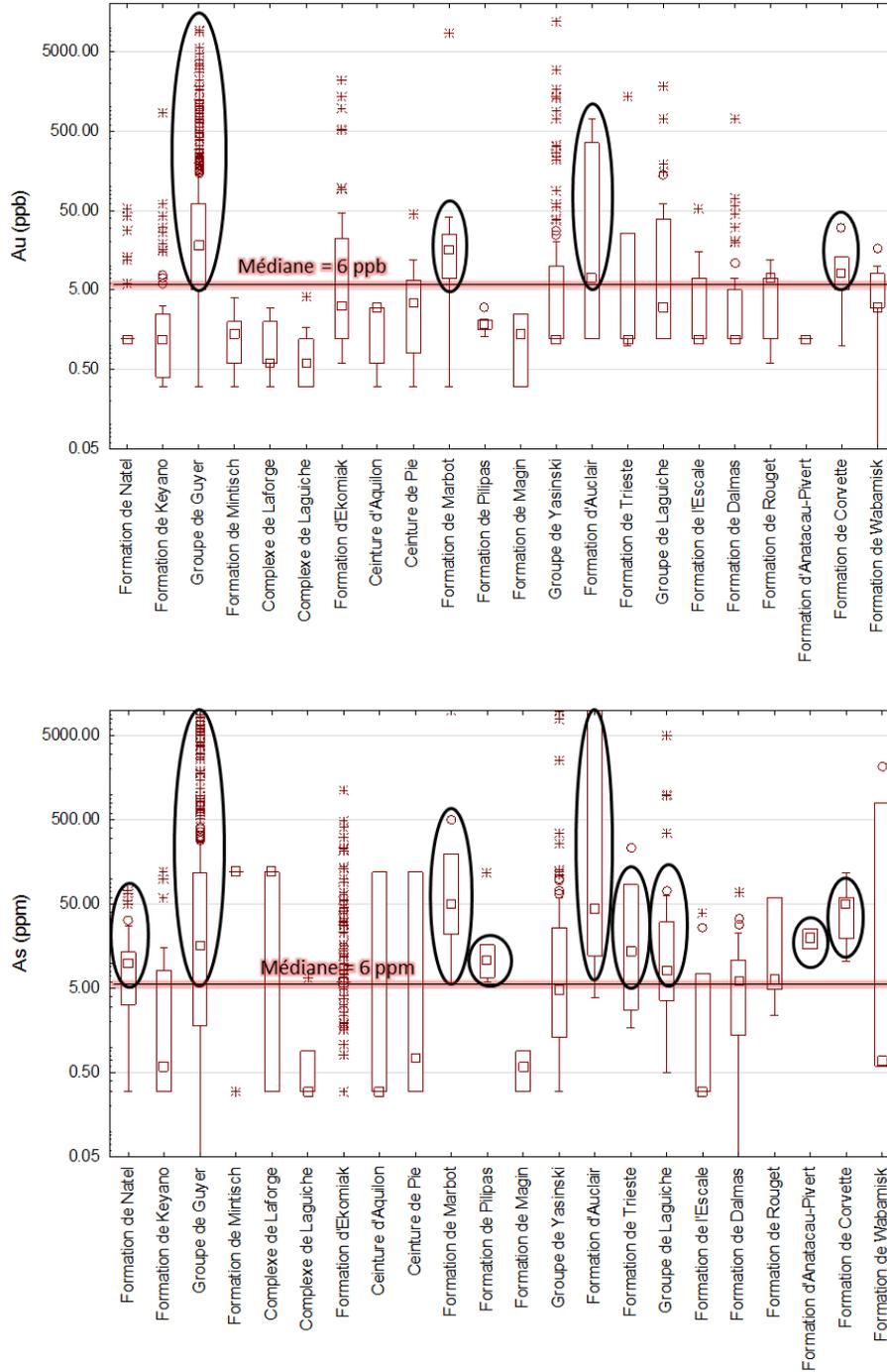


Figure 34: (A) Boîtes à moustaches de la distribution de l'or dans les roches des assemblages hôtes des formations de fer. (B) Boîtes à moustaches de la distribution de l'arsenic dans les roches des assemblages hôtes des formations de fer.

(La boîte représente le 25^e et 75^e centile, avec la médiane, l'extérieur représente le 1^{er} et 99^e centile, et la valeur extrême. La médiane de la teneur en or de tous les assemblages hôtes des formations de fer à la Baie-James est de 6 ppb. Données lithogéochimiques d'après SIGÉOM 2015).

Avec cette approche, il est possible de distinguer trois ensembles d'assemblages volcano-sédimentaires hôtes de formations de fer selon leur potentiel de fertilité. Le Groupe de *Guyer* est l'assemblage ayant le caractère le plus fertile, suivi par un ensemble de même caractère de fertilité constitué des assemblages volcano-sédimentaires de *Marbot*, d'*Auclair*, de *Trieste*, de *Laguiche*, et de *Corvette* (**Figure 35**). L'ensemble avec le caractère de fertilité le moins élevé est constitué des assemblages d'*Anatau-Pivert*, de *Dalmas*, de *Pie*, et de *Natel*.

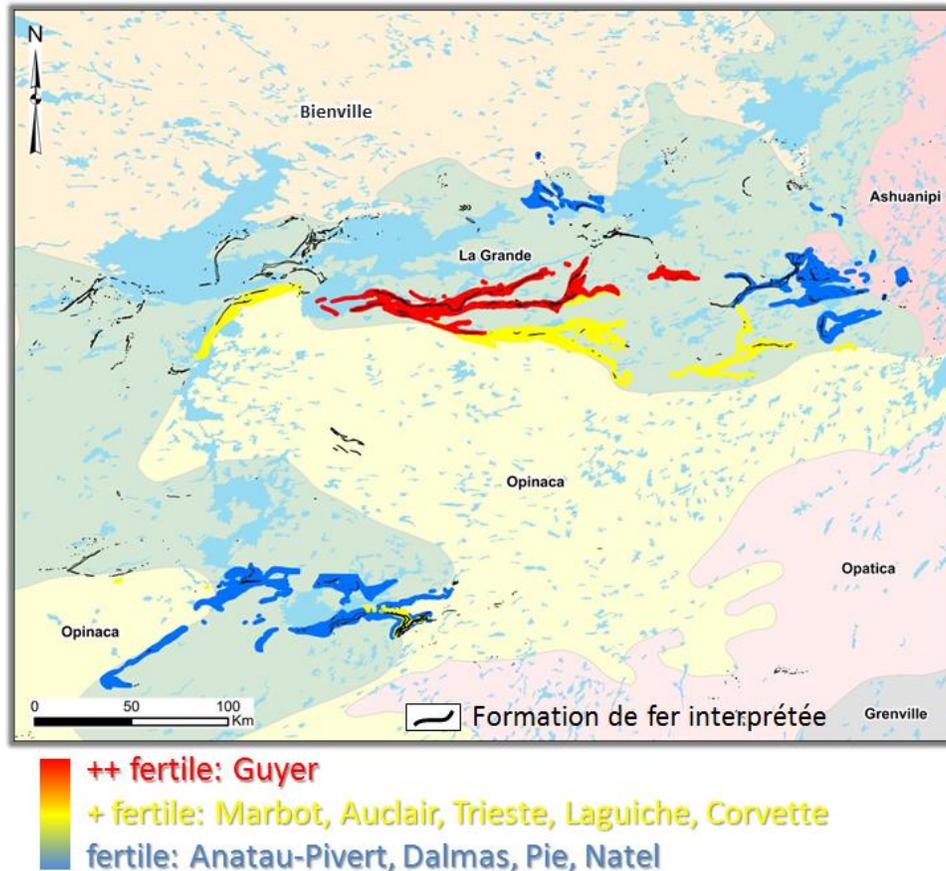


Figure 35: Groupes/formations volcano-sédimentaires à la Baie-James selon leur caractère de fertilité pour les éléments caractéristiques des gîtes d'or dans les formations de fer.

(Formation de fer en fer interprétée en noir; Sous-province géologique d'après www.donneesquebec.ca).

3.4.3.3 Traitement de l'environnement secondaire

3.4.3.3.1 Sédiments de fond de lac

Le secteur d'étude sur le territoire de la Baie-James est couvert quasiment intégralement par les levés de sédiments de fond de lac (**Figure 36**). Il s'agit de neuf levés contigus effectués de 1957 à 1996 (SIGÉOM). À l'exception du dernier levé de 1996, tous les échantillons ont été ré-analysés par ICP-MS au cours des dernières années.

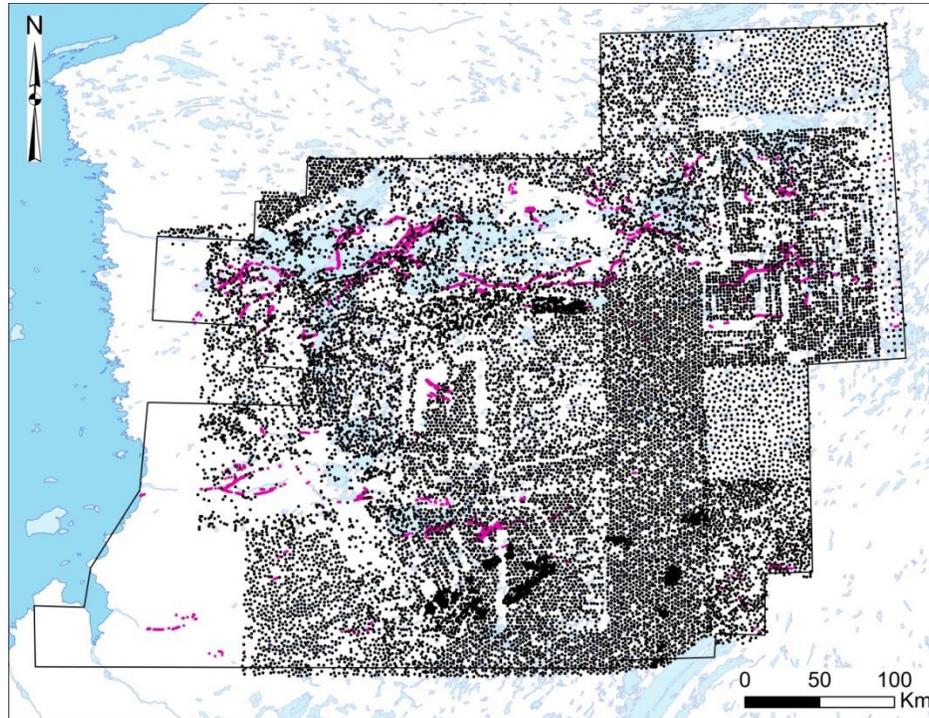


Figure 36: Couverture de sédiments de fond de lac (point noir) à la Baie-James d'après SIGÉOM 2015. Les polygones mauves sont les formations de fer interprétées.

La suite d'éléments mise en évidence par l'A.C.P. (**Figure 32, Tableau 2**) ne peut être utilisée intégralement pour tracer l'or dans les sédiments de fond de lac. Les travaux de Rafini (2015) ont montré que l'or n'est efficacement tracé dans les sédiments de fond de lac que par l'arsenic et l'antimoine. L'or, lui-même, n'est pas efficace pour se tracer. Arsenic et antimoine sont alors les deux seuls éléments du cortège d'éléments positivement corrélés à l'or qui seront utilisés dans la présente étude.

Pour une utilisation rigoureuse des données de sédiments de lacs, les valeurs brutes doivent être filtrées et corrigées, car plusieurs paramètres tels que les méthodes d'échantillonnage et d'analyse ainsi que l'environnement secondaire biaisent le signal (Trépanier, 2006 ; Rafini, 2015).

Il est donc capital de traiter ces données brutes, ce par deux méthodes successives : (1) un nivellement des levés pour résoudre les problèmes de décalages aux bordures des levés, puis (2) un traitement statistique, dans le cas présent par régression spatiale, pour annuler l'influence des paramètres environnementaux.

La **Figure 37A** présente les valeurs brutes de l'arsenic dans les sédiments de lac du secteur d'étude. Plusieurs « failles de levés » sont clairement identifiables, notamment dans la partie sud-est du secteur. De façon générale, elles sont attribuables aux différences dans les méthodes analytiques, aux différences dans les méthodes d'extraction pour les analyses partielles, ou aux différences dans les méthodes d'échantillonnage. Dans cette zone, les échantillons d'un levé sont analysés par ICP-ES, alors que les échantillons des autres levés sont analysés par ICP-MS.

Cette différence d'analyse est la raison principale du décalage des valeurs. La correction se fait par un nivellement aux bordures des levés. Ce nivellement est réalisé avec le logiciel développé au CONSOREM. La **Figure 37B** présente le levé d'arsenic nivelé ; les « failles de levés » sont corrigées.

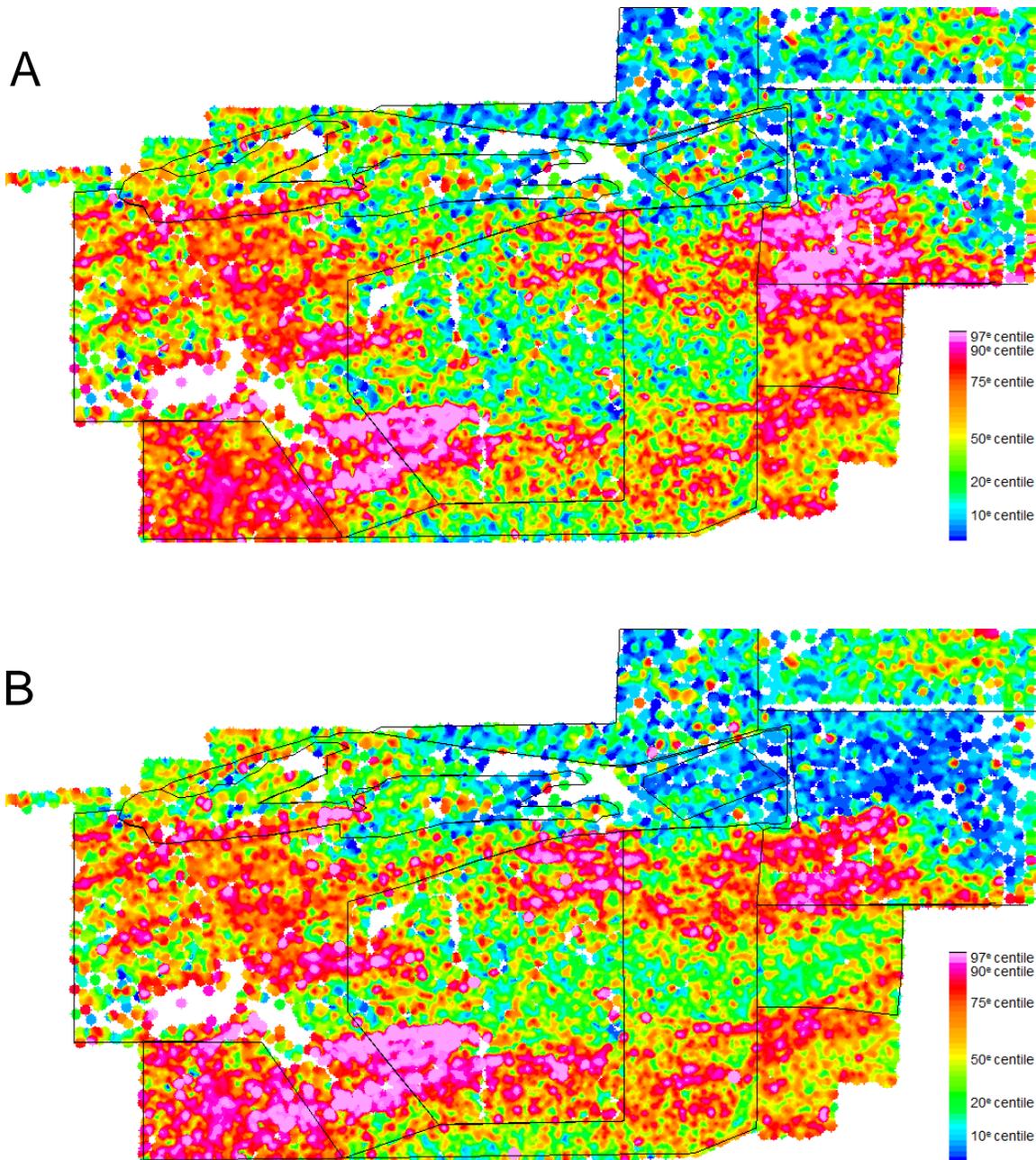


Figure 37: Carte d'interpolation de l'arsenic dans les sédiments de fond de lac par la méthode « Inverse de la distance », et limite des levés de sédiments de fond de lac. (A) Arsenic brut (B) Arsenic nivelé.

(Données d'après SIGÉOM 2015. Le traitement a été répété pour l'antimoine, mais non présenté ici).

Les anomalies géochimiques ponctuelles dans les sédiments de lac sont déterminées par une méthode statistique de régression spatiale à partir des analyses nivelées (Trépanier, 2006).

La régression spatiale exploite l'aspect multi-élémentaires des analyses en utilisant des groupes d'éléments non reliés aux minéralisations afin d'évaluer la partie du signal de l'échantillon provenant de grands processus géochimiques comme les conditions environnementales des lacs par exemple (profondeur, quantité de matière organique, perte au feu). Le principe de cette méthode est de prédire, pour chaque échantillon, la valeur « normale » que devrait avoir cet échantillon en un élément recherché à partir d'autres éléments analysés de ce même échantillon, et d'établir la relation qui existe entre l'ensemble des autres éléments et l'élément recherché pour les échantillons environnants (Trépanier, 2006). Statistiquement, il s'agit d'une régression multiple avec comme variable explicative un certain nombre d'éléments de l'analyse, et comme variable à modéliser l'élément recherché. On calcule ensuite l'anomalie en prenant la valeur résiduelle qui est égale à la valeur réelle moins la valeur prédite par la courbe de régression. La composante spatiale de l'évaluation se fait en utilisant une fenêtre coulissante et un rayon de recherche.

Pour le modèle de la Baie-James, les paramètres de l'analyse sont les suivants :

- cercle de recherche : rayon de 20 km;
- variables explicatives : Al, Ba, Ca, Ce, Cr, Co, Fe, K, La, Mg, Mn, Ni, P, Ti, U, V, Zn (Trépanier, 2006);
- variables dépendantes : Au, As, Ag, Sb, Be, Si (cf. chapitre 3.4.3.1).

La **Figure 38** présente les résultats de la régression spatiale pour l'arsenic à la Baie-James. La charte des couleurs a volontairement été rehaussée afin de mieux distinguer les zones anormales qui sont sporadiquement dispersées. L'exercice a été répété pour l'antimoine, mais non présenté ici.

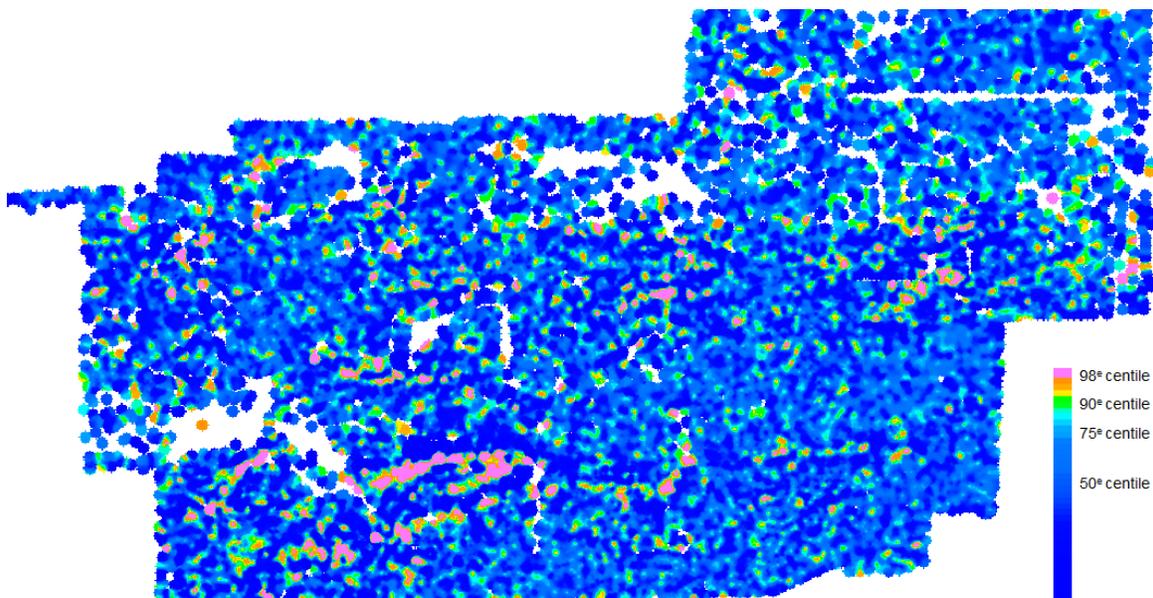


Figure 38: Carte d'interpolation de l'arsenic résiduel dans les sédiments de fond de lac par la méthode « Inverse de la distance ». Données d'après SIGÉOM 2015.

3.4.3.3.2 Sédiments de ruisseau

Le secteur d'étude à la Baie-James est couvert par sept levés de sédiments de ruisseau essentiellement au nord. Les échantillons ont été analysés par ICP-MS ou par activation neutronique (AN).

L'arsenic et l'antimoine sont efficaces pour tracer l'or dans les sédiments de ruisseau, mais à la différence des sédiments de fond de lac, l'or est aussi efficace (Rafini, 2015). La méthode de nivellement présentée dans la section précédente a été effectuée pour les données d'or, d'arsenic, et d'antimoine dans les sédiments de ruisseau. En revanche, la régression spatiale n'est pas nécessaire, car les paramètres environnementaux de profondeur du lac et de contenu en matière organique ne se retrouvent pas, ou très peu, dans les sédiments de ruisseau.

3.4.4 Conditions métamorphiques

L'évaluation du métamorphisme régional à la Baie-James provient essentiellement des travaux de Gauthier (2000), de Gauthier et al. (2007), et des affleurements de géofiche du SIGÉOM 2015. Localement, plusieurs études gouvernementales et académiques permettent d'éclairer certains secteurs afin de mieux préciser les isogrades métamorphiques (Gauthier et Larocque, 1998 ; Bandyayera et al., 2010, Ravenelle, 2010 ; Fontaine et al., 2015). La **Figure 39** présente les conditions métamorphiques à la Baie-James.

À la Baie-James, la plupart des gîtes d'or orogéniques se situent dans des roches portées au faciès des schistes vers et au faciès inférieur des amphibolites (e.g., *La Grande Sud*; Gauthier, 2000). Gauthier et al. (2007) mettent en valeur ces zones de transition métamorphique pour l'or de type orogénique, car il s'agit d'environnements propices à la circulation des fluides. Bien que les gîtes d'or dans les formations de fer soient de type orogénique, à la Baie-James, ils sont essentiellement reconnus au faciès inférieur et moyen des amphibolites (e.g., Auclair : Gauthier, 2000 ; Orfée : Bogatu, 2016 ; **Figure 39**), très peu au schiste vert supérieur. Sur ce thème, il y a un parallèle intéressant à faire avec le gisement de classe mondiale de *Musselwhite* en Ontario (cf., Oswald et al., 2015a, b) ; les conditions métamorphiques y sont semblables, dans la même Province géologique de Supérieur.

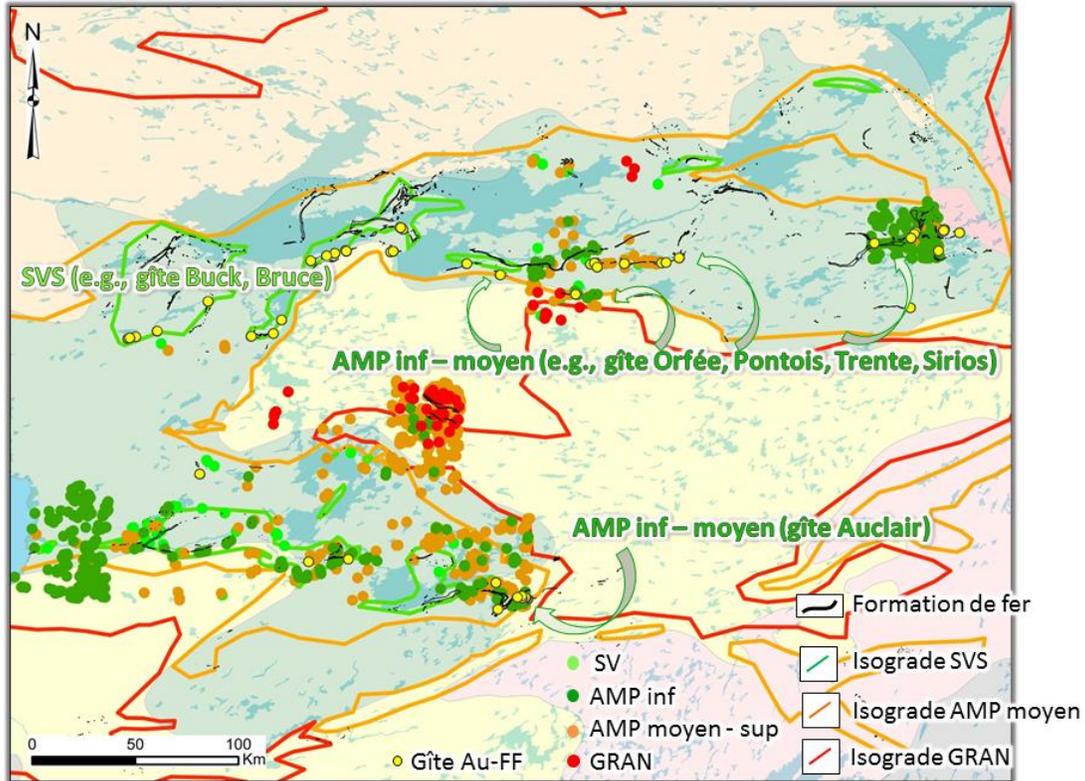


Figure 39: Isogrades métamorphiques dans le secteur d'étude à la Baie-James. Modifié de Gauthier (2000), et Gauthier et al. (2007) ; Points d'information métamorphique d'après SIGÉOM 2015.

3.4.5 Minéraux d'altération

La documentation des gisements d'or dans les formations de fer (PARTIE 1) a permis d'identifier les associations minérales « gagnantes » selon les faciès métamorphiques. Pour des environnements semblables à la Baie-James, il faut chercher la coexistence d'amphiboles de fer (i.e., grunérite et/ou cummingtonite), avec du grenat, et de la pyrrhotite ± arsénopyrite-pyrite. La présence d'un seul n'est pas discriminante. En revanche, l'association de plusieurs de ces minéraux est un bon indicateur du potentiel aurifère dans une formation de fer. Il a été proposé que les amphiboles de fer (i.e., grunérite, cummingtonite) soient le résultat de la consommation des carbonates de fer au cours du métamorphisme prograde (Klein, 2005). Cependant, à la Baie-James il n'y a quasiment pas de formations de fer carbonatées, même au faciès des schistes verts. Cela suggère que les carbonates de fer n'ont pas été des phases précurseurs importantes pour les amphiboles.

3.4.6 Paramètres structuraux

La composante structurale est un critère dominant dans les gisements de l'Amérique du Nord. La forte intensité du plissement, du cisaillement, et de l'étirement dans des formations de fer est généralement synonyme de minéralisations aurifères (e.g., le gîte Orfée : Bogatu, 2016 ; gîte Auclair : Lanthier et Saint-Cyr 1997 ; Chapdelaine et Lachance, 1998).

Afin d'illustrer la complexité structurale à la Baie-James, nous avons établi une carte matricielle de cumul d'évidences à partir des observations terrain (données ponctuelles et linéaires provenant du SIGEOM). Les éléments d'observation ponctuelles sélectionnés sont: 1) la présence de cisaillement, 2) de charnière de pli, 3) de veine de quartz. Ces données proviennent des données du SIGÉOM 2015 issues notamment des travaux de Ciesielski (1998), Goutier (2000), Goutier et Ouellet (2000), et de plusieurs autres travaux de Goutier en préparation. Ces informations gouvernementales résultent d'observations de terrain systématiques le long de grilles de cartographie, et ce peu importe qu'il y ait un indice minéral ou pas. Cela permet de dire qu'il n'y a pas suréchantillonnage d'information géologique dû à la présence d'un indice. Ces données sont toutefois tributaires du degré et de l'hétérogénéité de l'exposition rocheuse.

On a également considéré les éléments d'interprétation comme le tracé de failles ductiles régionales. Ce tracé des failles ductiles provient d'une interprétation géophysique réalisé dans un projet CONSOREM précédent (projet 2009-10 Faure, 2010 ; Bigot, 2015),

Pour chaque type d'information, une couche binaire permet de souligner la présence de l'élément cherché (e.g, charnière de pli, cisaillement). Ainsi un poids de 1 est attribué aux cellules contenant l'observation. En additionnant les poids de chaque couche, il en résulte une carte de cumul multicritère (**Figure 40**) permettant de porter un jugement sur la complexité structurale. Bien sûr cette méthode se veut un outil de visualisation rapide sans entrer dans la complexité de la pondération à partir de méthodes d'intelligence artificielle (*learning machine*). Comme déjà mentionné, cette méthode de représentation est sensible à la redondance de l'information liée à la présence ou non de l'affleurement.

Le résultat (**Figure 40**), montre des zones de forte complexité structurale, soit un pointage cumulé élevé (maximum de 8), contrastent bien avec les zones de faible contrôle structural.

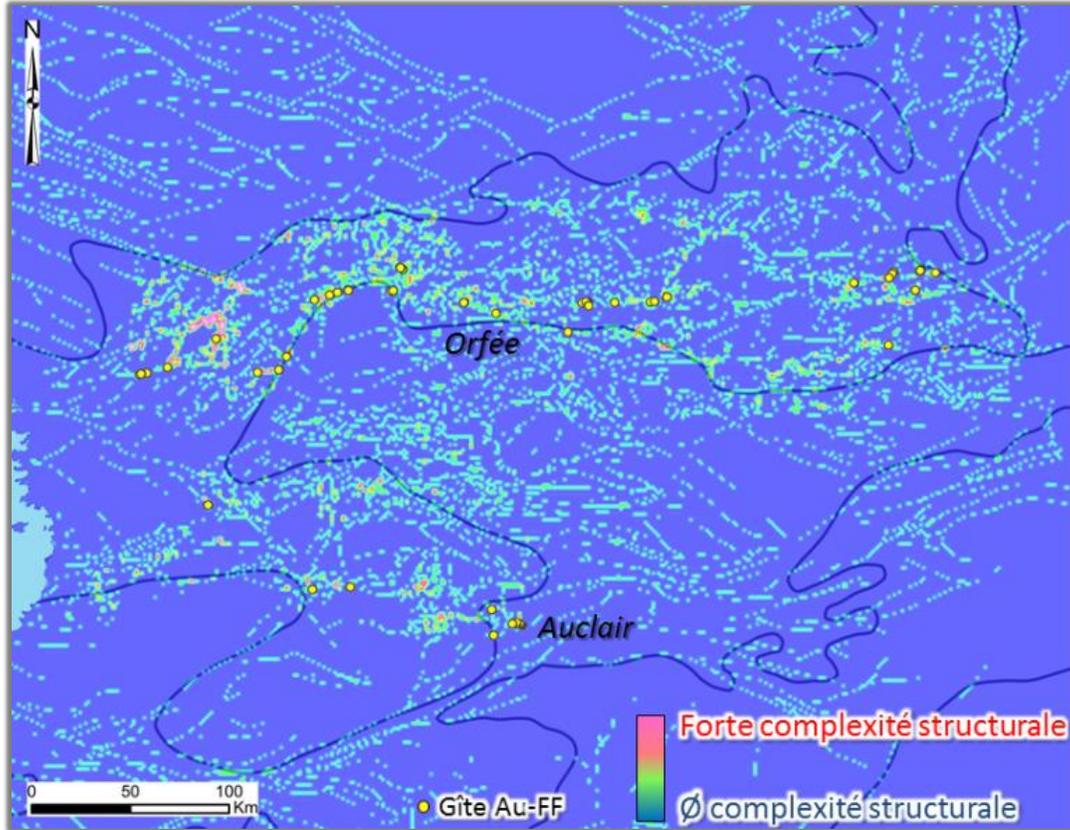


Figure 40: Carte matricielle par cumul de poids montrant de la complexité structurale à la Baie-James.

(Les différentes couches binaires soulignent la présence 1) de cisaillement, 2) de charnières de pli, 3) de veines de quartz et 4) ainsi que du tracé de failles ductiles régionales. Les zones de forte complexité structurale (= cumul de poids élevé) sont dans les couleurs chaudes, alors que les zones de faible complexité structurale sont dans les couleurs froides. Les traces des Sous-provinces géologiques sont indiquées, de même que les gîtes d'or dans les formations de fer).

Afin de tester la relation spatiale entre les zones de complexité structurale et les gîtes d'or dans les formations de fer à la Baie-James, nous avons procédé par un calcul de contraste (**Figure 41**). Le contraste mesure l'association spatiale entre deux objets (Bonham-Carter 1994, cf. Mathieu, 2013), dans ce cas-ci la forte complexité structurale, pour des valeurs de cumul de poids supérieures ou égales à 5 sur 8 (A), et la distance aux gîtes d'or dans les formations de fer (B1 < 2 km ; 2 km > B2 < 4 km ; 4 km > B3 < 6 km ; 6 km > B4 < 8 km ; B5 > 8 km). Un résultat de contraste positif sera un chiffre positif si, par exemple, la majeure partie de A se situe dans B1, et un chiffre négatif dans le cas contraire. Un contraste proche de 0 signifie qu'il n'y a pas de relation spatiale particulière entre A et B. Dans le cas présent, le calcul est le suivant :

Contraste = $\ln \left[\frac{\text{surface des zones de forte complexité (A) dans B1}}{\text{surface de toutes les valeurs de complexité structurale, fortes, faibles, nulles, dans B1}} \right] / \left[\frac{\text{surface des zones de forte complexité (A) dans B2}}{\text{surface de toutes les valeurs de complexité structurale, fortes, faibles, nulles, dans B2}} \right]$.

L'exercice a été répété pour B2 et B3, B3 et B4, et B4 et B5. La **Figure 41** montre que la corrélation entre les zones de forte complexité structurale, soit le recoupement de paramètres structuraux tels que la présence de cisaillement, de pli, de faille ductile, ou de veine de quartz, est bonne à proximité des gîtes d'or dans les formations de fer, alors que la corrélation positive diminue rapidement au-delà de 2 km des gîtes d'or. Ainsi, le guide d'exploration, forte complexité structurale, est un indicateur valide pour les minéralisations aurifères dans les formations de fer à la Baie-James.

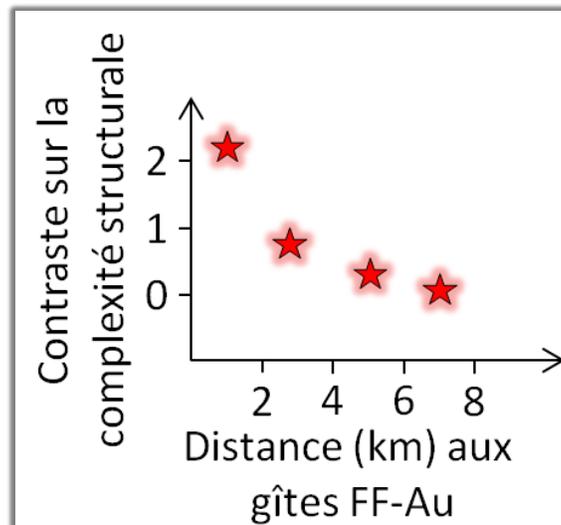


Figure 41: Calcul de contraste de la complexité structurale (cumul de poids supérieur ou égal à 5 sur 8) selon la distance aux gîtes d'or dans les formations de fer à la Baie-James.

3.4.7 Carte de prospectivité pour l'or dans les formations de fer à la Baie-James

3.4.7.1 Méthodologie pour la carte de prospectivité

Une carte de prospectivité a été établie à partir de couches évidentielles de nature variée telle que géochimique, minéralogique, structurale, métamorphique, et géologique. Ces couches sont présentées dans les sections précédentes (de 3.4.1 à 3.4.6).

Les couches évidentielles utilisées sont les suivantes :

- « Fertilité » des assemblages volcano-sédimentaires ;
- Anomalies lithogéochimiques dans les formations de fer pour les métaux ;
- Anomalies de sédiments de fond de lac pour les métaux ;
- Anomalies de sédiments de ruisseau pour les métaux ;
- Faciès métamorphiques ;
- Associations minérales ;
- Complexité structurale.

La méthode de représentation est conceptuelle et repose sur l'application d'un poids (e.g., 0, 1, 2) à chaque élément, et cela dans chaque couche. Cette pondération reflète un jugement porté sur la pertinence comme guide d'exploration. Un poids nul indique que l'élément est considéré non favorable, alors qu'un poids de 1 (et plus) indique que l'élément est favorable. Ensuite, il s'agit d'effectuer le cumul des poids des différentes couches évidentielles (**Figure 42**). Encore une fois, ici, il s'agit d'une méthode de représentation simple qui permet de générer un résultat sans entrer dans les contraintes de l'entraînement à partir d'algorithme d'intelligence artificielle. La pondération des couches est bien sûr subjective. À titre d'exemple, Au et As sont des éléments plus caractéristiques du type gîte d'or dans les formations de fer que Be et Sb. Ainsi, les anomalies en Au et As se voient attribuer un poids de 2 alors que Be et Sb se voient attribuer un poids de 1.

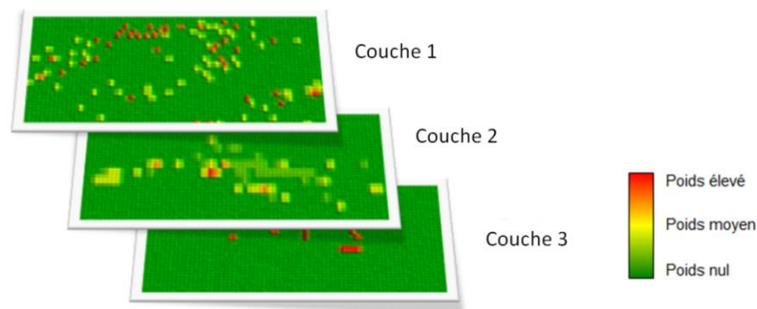


Figure 42: Représentation schématique de la méthode de cumul des couches d'évidences pondérées.

En termes de réalisation de la carte de prospectivité par addition des couches d'évidences pondérées, nous avons utilisé le module « *Spatial Analyst Tools* » dans ArcGIS 10.1.

Les couches avec les informations pondérées en points, polygones, ou polygones sont converties en format raster. Cela crée des cellules de dimensions égales avec une pondération ; ou une valeur moyenne de pondération lorsqu'il y a plus d'un élément par cellule. Grâce à cette moyenne surfacique il n'y a pas de biais de suréchantillonnage (forte densité d'information vs faible densité d'information). Ensuite, le cumul des poids des éléments de chaque couche est réalisé en utilisant l'outil « *Weighted Sum* ». Le **Tableau 3** synthétise les critères utilisés pour la carte de prospectivité, et les poids attribués à chaque paramètre.

Tableau 3: Couches d'évidences pondérées utilisées pour la carte de prospectivité de l'or dans les formations de fer à la Baie-James.

<u>Anomalies lithogéochimiques dans les formations de fer</u>	Poids
Au > 50 ppb	3
As > 90 ppm	3
Ag > 2 ppm	1
Be > 1.1 ppm	1
Sb > 7 ppm	1
SiO ₂ > 53 %	1
<u>Anomalies de sédiments de fond de lac</u>	
As > 95e centile	1
As > 99e centile	3
Sb > 95e centile	1
Sb > 99e centile	2
<u>Anomalies de sédiments de ruisseau</u>	
Au > 95e centile	1
Au > 99e centile	3
As > 95e centile	1
As > 99e centile	3
Sb > 95e centile	1
Sb > 99e centile	2
<u>Critères métamorphiques</u>	
SVS à AMP moyen	1
<u>Minéraux d'altération</u>	
grunérite	2
grenat	1
arsénopyrite	1
pyrrhotite	1
pyrite	1
<u>Structures locales</u>	
veines de quartz	2
charnière de pli	2
cisaillement	2
<u>Structures majeures</u>	
< 250 m d'une faille ductile	2
> 250 m d'une faille ductile et < 1000 m	1
<u>Fertilité des assemblages volcano-sédimentaires hôtes des formations de fer</u>	
Guyer	3
Marbot, Auclair, Trieste, Laguiche, Corvette	2
Anatau-Pivert, Dalmas, Pie, Natel	1

3.4.7.2 Résultats de la carte de prospectivité

Le résultat du cumul des indices de pondérations de toutes les couches du modèle est présenté sur la carte de prospectivité de la **Figure 43**. La somme des critères pondérés, avec un score maximum de 19 points, permet de mettre en valeur des secteurs d'intérêt pour l'exploration. Afin de restreindre le résultat au voisinage des formations de fer, une interpolation a été réalisée avec la méthode de l'inverse de la distance des cellules pondérées dans une zone tampon de 2 km autour des formations de fer.

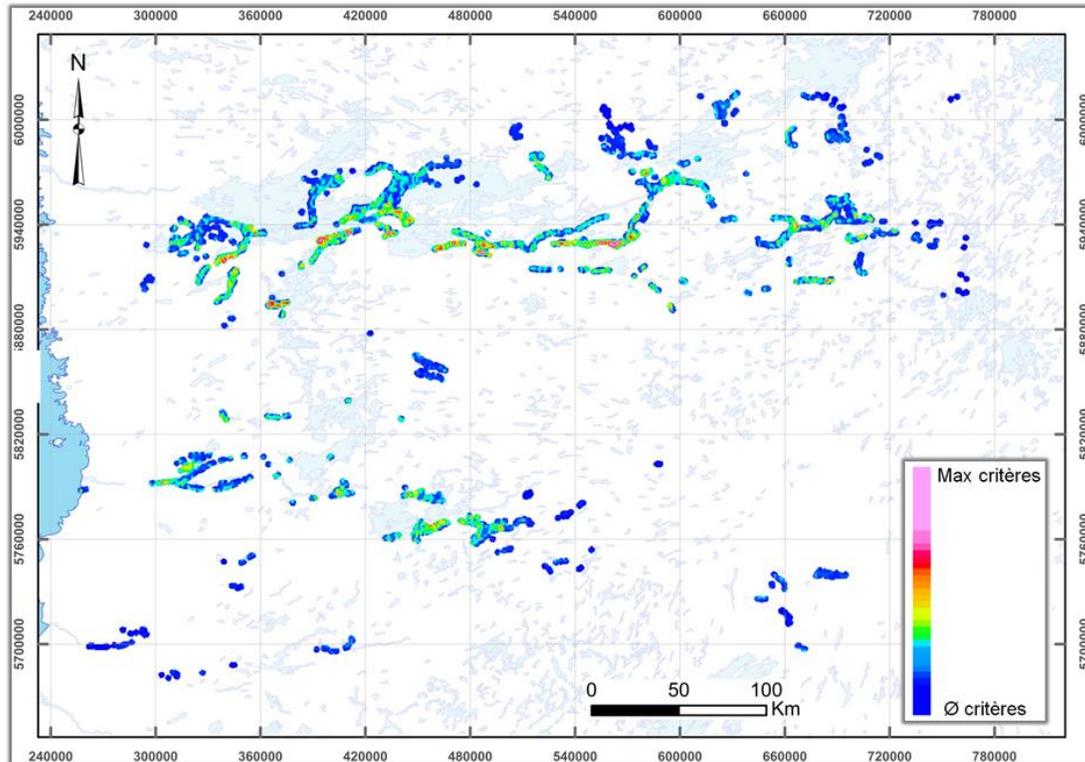


Figure 43: Carte de prospectivité pour l'or dans les formations de fer à la Baie-James. Le maximum de critères est un cumul de 19 points.

(La couleur mauve commence pour une valeur de 10, la transition orange à rouge représente une valeur de 7, et la couleur jaune illustre une valeur de cumul de 5. L'interpolation a été faite avec la méthode « Inverse de la distance ». Le grid est en coordonnées NAD83 zone 18. À noter que pour la représentation, une zone tampon de 2 km d'interpolation a été appliquée autour des formations de fer).

Afin d'évaluer la pertinence des zones d'intérêt proposées par le cumul des poids des couches, nous avons réalisé un calcul de contraste selon les gîtes d'or dans les formations de fer (**Figure 44**). Il en résulte que le contraste aux gîtes d'or dans les formations de fer (distance de 2 km) est d'autant plus positif que le cumul des critères est élevé. Cela signifie que plus le nombre de critères est élevé, plus la zone est favorable pour des minéralisations aurifères dans les formations de fer de la Baie-James. Ainsi, la carte de prospectivité proposée (**Figure 43**) cible les zones favorables de manière efficace.

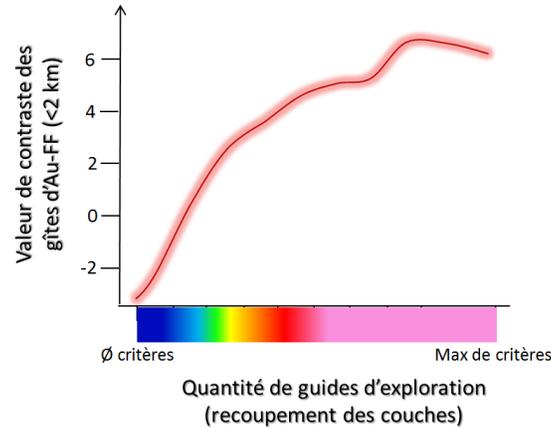


Figure 44: Graphique illustrant le contraste entre les gîtes d'or connus dans les formations de fer à la Baie-James, et le nombre de critères cumulés à partir des couches.

(La couleur mauve commence pour une valeur de 10, la transition orange à rouge représente une valeur de 7, et la couleur jaune illustre une valeur de cumul de 5)

Selon les valeurs de contraste, il est possible de considérer différentes priorités de cibles :

- des zones de priorité forte (valeur de cumul > 10 critères) dont les valeurs de contraste sont supérieures à 4 ;
- des zones de priorité modérée (7 critères < valeur de cumul ≤ 10 critères) dont les valeurs de contraste sont comprises entre 2 et 4 ;
- des zones de priorité faible (5 critères < valeur de cumul ≤ 7 critères) dont les valeurs de contraste sont comprises entre 1 et 2 ; et
- des zones de priorité nulle/inconnue (valeur de cumul ≤ 5 critères) dont les valeurs de contraste sont nulles.

Les zones de forte priorité sont statistiquement les secteurs les plus favorables à la présence de gîtes d'or dans les formations de fer (**Figure 44**). Les zones de faible recouvrement de critères, voir absence totale (priorité nulle/inconnue), ne doivent pas être interprétées comme étant des secteurs absolument défavorables, mais plutôt comme des secteurs dont le manque d'information ne permet pas d'évaluer adéquatement le potentiel.

Un total de 150 cibles est proposé selon deux catégories de priorité. La première catégorie, constituée de 44 zones favorables, regroupe les zones de forte priorité dont le cumul de poids est supérieur à 10 (max de 19). La seconde catégorie, constituée de 106 zones favorables, regroupe les zones dont le cumul est compris entre 7 et 10. Lorsque des valeurs de catégorie 2 entourent une zone de catégorie 1, les deux zones sont fusionnées en catégorie 1.

La **Figure 45** met en évidence la relation entre les gîtes d'or dans les formations de fer et les zones de fortes priorités. Tous les gîtes d'or dans les formations de fer le long de ce segment (e.g., Lac Kristine SO, Orfée, Rivière Pontois, Lac Daniel Sud, Lac Bruno) sont reproduits par les zones de forte priorité d'exploration. La **Figure 46A et 46B** met en valeur certains secteurs cibles dans la moitié nord de la zone d'étude, à l'ouest et à l'est du segment de la **Figure 45**. Plusieurs zones favorables, de fortes à moyennes priorités, se présentent hors de gîtes d'or connus, ce qui en font des zones à considérer pour l'exploration (**Figure 46A et 46B**).

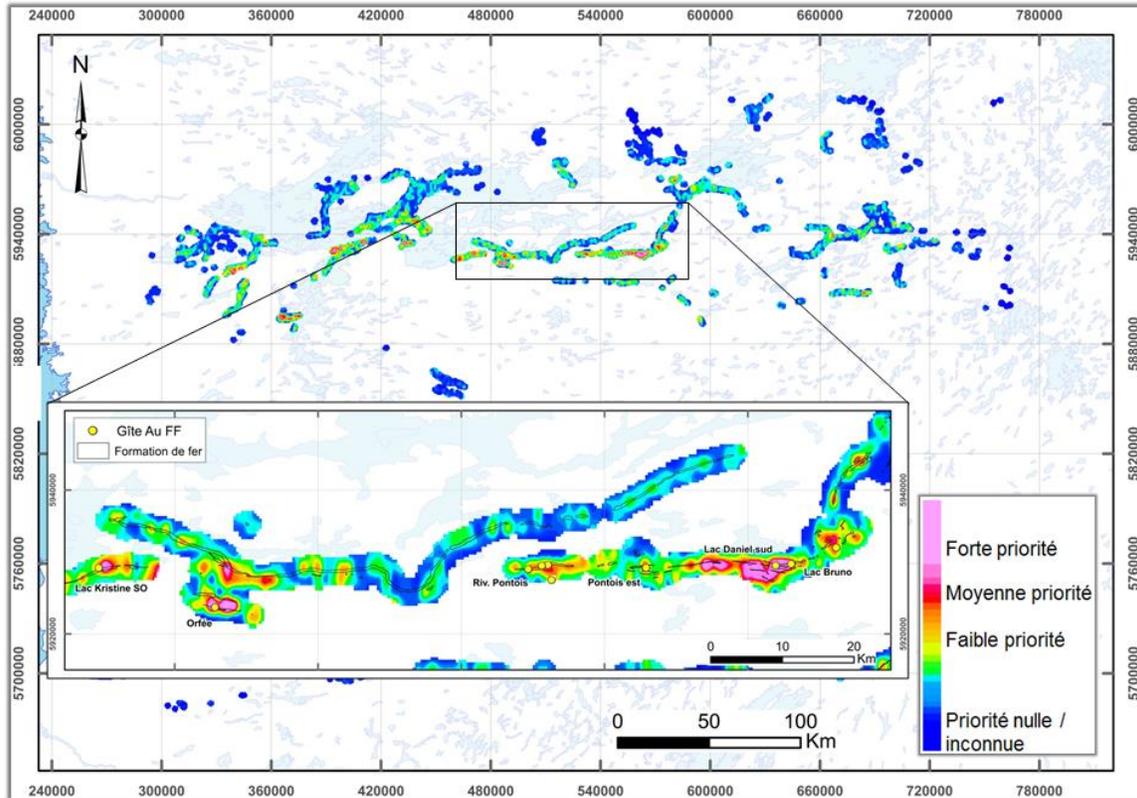
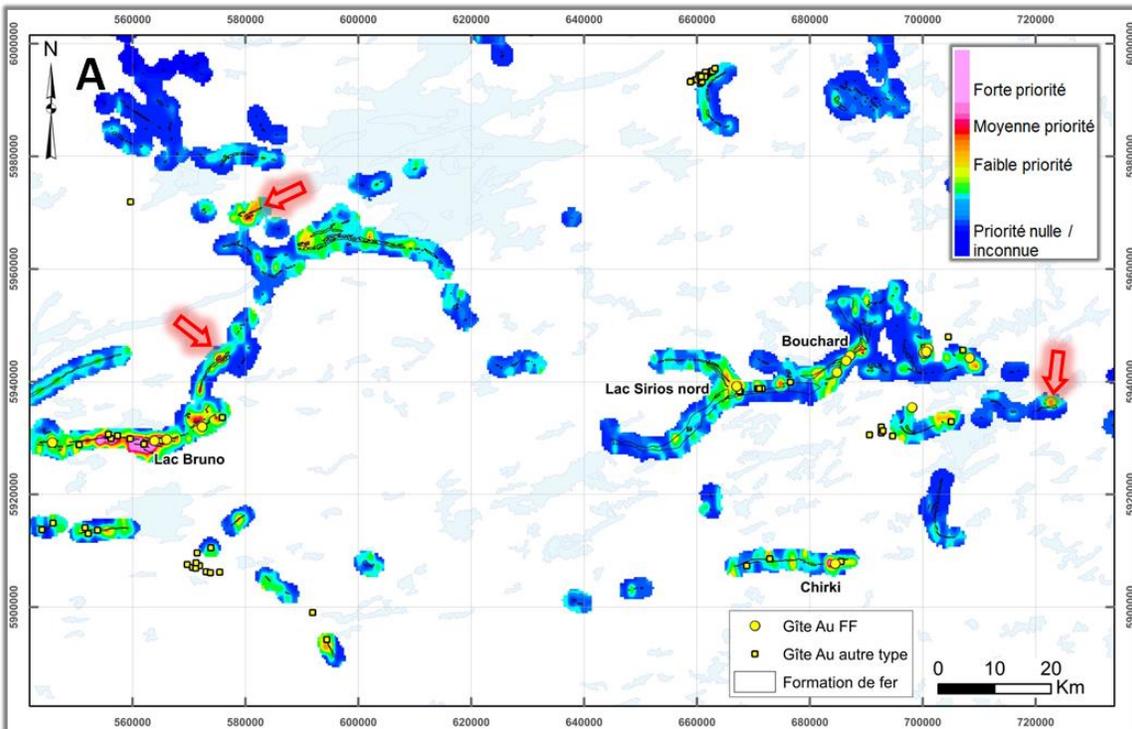
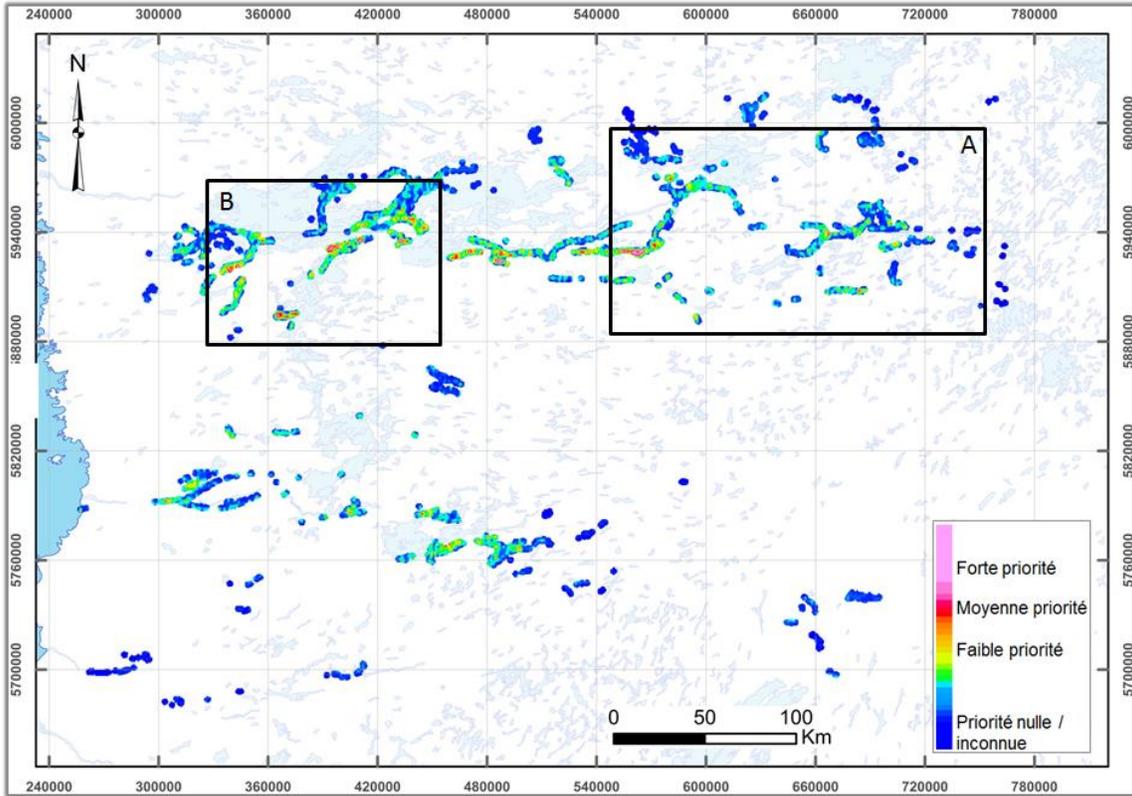


Figure 45: Carte de prospection avec la priorité des zones à explorer. Les zones de fortes priorités reproduisent les secteurs minéralisés. Une zone tampon (*buffer*) d'interpolation de 2 km a été appliquée autour des formations de fer.



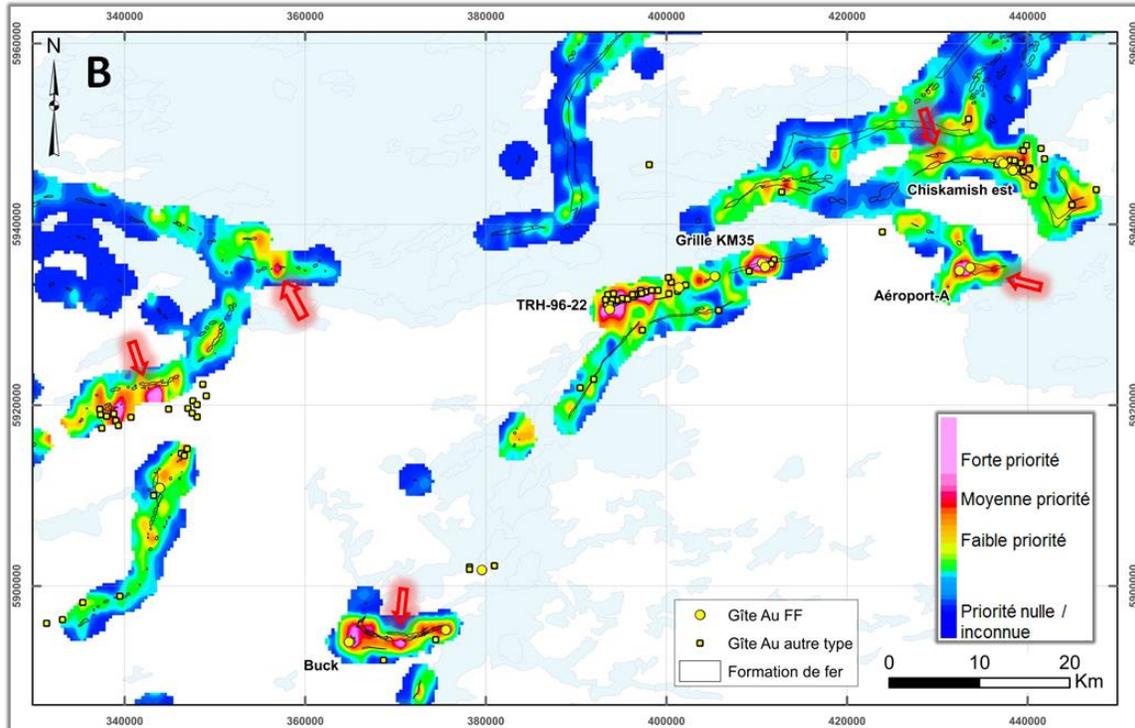


Figure 46: A) Vue rapprochée de la carte de prospectivité dans le secteur nord-est. B) Vue rapprochée de la carte de prospectivité dans le secteur nord-ouest. Les flèches rouges indiquent des zones favorables hors de gîtes d'or connus (tous types d'après SIGÉOM 2015). Une zone tampon (*buffer*) d'interpolation de 2 km a été appliquée autour des formations de fer.

3.5 Évaluation du potentiel aurifère dans les formations de fer de la Fosse du Labrador

3.5.1 Contexte géologique

L'Orogène du Nouveau-Québec (connue également sous le vocable Fosse du Labrador) est une ceinture plissée et chevauchée d'âge paléoproterozoïque (2,17 – 1,87 Ga), située sur la marge nord-est de la Province de Supérieur. L'Orogène du Nouveau-Québec se divise en deux zones tectoniques majeures : l'avant-pays à l'ouest, communément appelé Fosse du Labrador sensu stricto, et l'arrière-pays à l'est (**Figure 47**). Dans l'avant-pays, Clark et Wares (2004) et Clark (2012) distinguent deux principaux cycles de sédimentation et de volcanisme s'épaississant vers l'est et séparés par des discordances d'érosion. L'ensemble repose en discordance sur le craton du Supérieur. Le développement de la Fosse du Labrador s'est amorcé avec le rifting (cycle 1) du continent archéen et le dépôt de sédiments de rift et de plate-forme marine. Une épaisse séquence de basalte s'est accumulée dans un bassin de rift dans l'est de la Fosse, et l'ensemble stratigraphique est intrudé par des filons-couches mafiques contemporains. Le premier cycle s'est terminé avec l'établissement d'une plate-forme marine et le dépôt de dolomies. Aucun dépôt de formation de fer n'est associé à cet épisode de rifting.

Le deuxième cycle consiste en l'établissement d'une plate-forme continentale qui a commencé avec une séquence transgressive constituée de sédiments de plate-forme, suivi par une épaisse séquence turbiditique de marge continentale profonde (Formations de Baby et de Thompson Lake), avec notamment des formations de fer, et localement du volcanisme. Les sédiments sont surmontés par d'épaisses séquences de basaltes (Formations d'Hellancourt et de Willbob), et l'ensemble est intrudé par des filons-couches de gabbro (suite de Montagnais) présents dans la partie est de la Fosse. L'arrière-pays est un domaine métamorphisé au faciès des amphibolites dans lequel les roches métasédimentaires et les metabasaltes sont corrélés au cycle 2 (Clark et Wares, 2004). À l'est, la Zone noyau représente un ancien craton archéen déformé et remanié au Paléoproterozoïque. Cette zone interne est constituée de gneiss et de migmatites archéens à paléoproterozoïques recoupés par des intrusions archéennes et paléoproterozoïques (**Figure 47**).

Les épisodes de déformation et de métamorphisme dans les différentes parties de l'orogène se sont étendus entre 1,84 et 1,77 Ga. Les plis et les chevauchements dans la Fosse du Labrador sont attribués à la collision oblique et dextre, en transpression, de la zone interne (Zone noyau) archéenne avec la Province de Supérieur (Wardle et al., 2002 ; Clark et D'Amours, 2012). Selon Goldfarb et al. (2005), un régime en transpression suivant un épaississement de la croûte est un des facteurs déterminants pour la fertilité d'une ceinture et la formation de gisements d'or orogénique.

Les formations de fer sont toutes contenues dans les roches du cycle 2. Les types Lac Supérieur et *Algoma* sont reconnus dans la Fosse (Clark et Wares, 2004). Pendant le stade de plate-forme précoce du deuxième cycle, les formations de fer de type Lac Supérieur ont précipité. Ces formations de fer appartiennent à la Formation de Sokoman, et sont largement dominantes dans la Fosse. Elles sont situées au sud, sud-ouest, et en bordure ouest du nord au sud de la Fosse. Plusieurs gîtes et gisements de fer sont contenus dans ces formations de fer, dont certains sont des projets miniers en stade de développement avancé (e.g., DSO). Les formations de fer de type *Algoma* se sont formées en eau plus profonde, dans un bassin contemporain de la plate-forme précoce du cycle 2 contenant les formations de fer de type Lac Supérieur, et adjacent à celle-ci. Les formations de fer de type *Algoma* font parties de la Formation de *Baby*, essentiellement *Baby moyen*, localement *Baby supérieur*. La Formation de *Baby moyen* est contemporaine d'un épisode volcanique, alors que la Formation de *Baby supérieur* est surtout post-volcanique. Les formations de fer de type *Algoma*, associées aux ceintures de roches vertes du cycle 2, sont localisées dans la moitié est de la Fosse, secteur centre-nord, dans la zone Gerido (**Figure 47**).

La période paléoproterozoïque de 2,1 à 1,8 Ga est mondialement faste pour l'orogénique, avec la mise en place d'importants volumes de matériel aurifère (Goldfarb et al., 2005) tels qu'à *Homestake* (40 Moz Au), *Meliadine*, ou *Meadowbank* en Amérique du Nord, dans le district d'*Ashanti* (80 Moz Au) du bouclier Birimien en Afrique de l'Ouest, ou encore dans le bouclier guyanais en Amérique centrale (31 Moz Au). Malgré une période de mise en place propice, le potentiel pour un gisement majeur d'or orogénique dans la

Fosse du Labrador n'a pas été démontré à ce jour. Une vingtaine d'indices aurifères sont rapportés (cf. SIGÉOM 2015) ; ils sont contenus dans des formations de fer, dans des shales graphitiques (Faure, 2012), ou dans des gabbros (cf. www.midlandexploration.com).

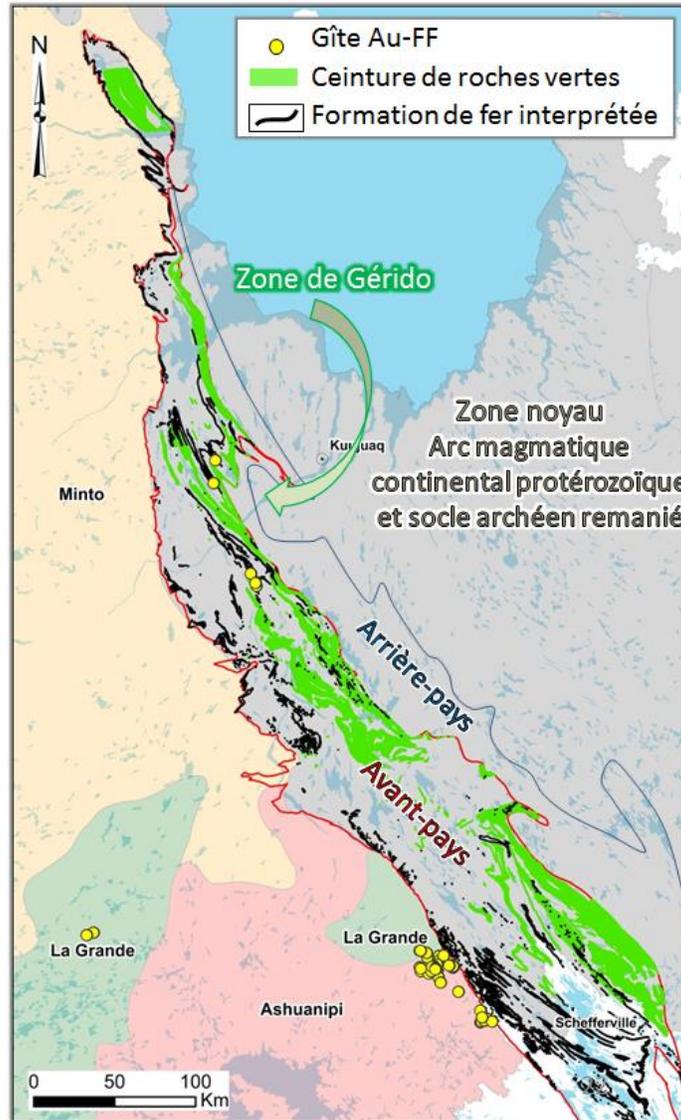


Figure 47: Contexte géologique régional de l'Orogène du Nouveau-Québec d'après Clark et Wares (2004) et la géologie de SIGÉOM 2015. Les formations de fer sont interprétées (cf. chapitre 3.3).

3.5.2 Les faciès primaires des formations de fer

Une évaluation de la discrimination de la fertilité en or des faciès primaires des formations de fer paléoprotérozoïques de la Fosse du Labrador est présentée à la **Figure 48**. La distribution est bien différente de celle de la Baie-James (**Figure 31**). En effet, les valeurs en or dans les formations de fer sont plus faibles, l'échantillonnage est aussi beaucoup plus restreint (e.g. N=6 pour FF sulfurée), et surtout un faciès primaire se distingue nettement des autres. Les formations de fer avec un faciès primaire carbonaté sont globalement deux fois plus aurifères que les autres (**Figure 48**). Ainsi, la recherche des formations de fer carbonatées semble être un guide d'exploration pertinent pour les minéralisations en or.

La similitude avec le style des formations de fer aurifères à *Homestake* est notable puisqu'il s'agit là aussi de formations de fer carbonatées.

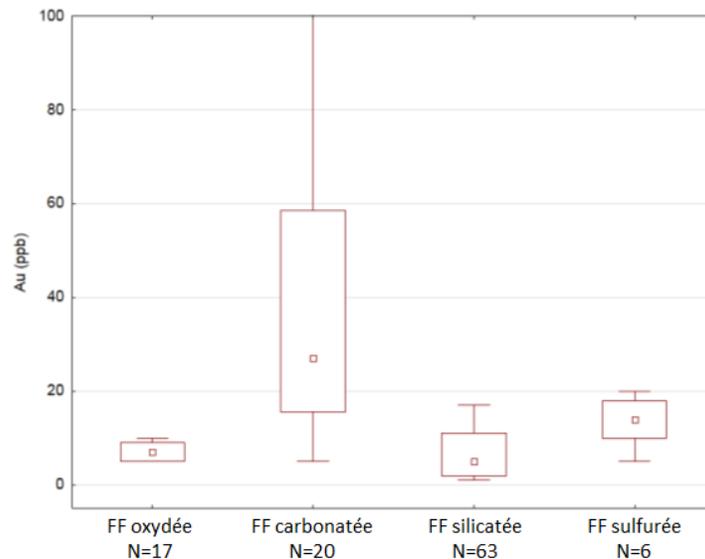


Figure 48: Boîtes à moustaches illustrant la concentration en or selon le faciès primaire des formations de fer paléoprotérozoïques de la Fosse du Labrador.

(D'après la base de données lithogéochimique de SIGÉOM 2015. Le carré rouge au centre de la boîte représente la médiane).

3.5.3 Méthodologie pour l'évaluation du potentiel aurifère dans la Fosse du Labrador

Dans l'optique d'évaluer le potentiel aurifère dans les formations de fer dans la Fosse du Labrador, la qualité et la quantité de données disponibles sont capitales. Dans la zone de *Gérido*, qui contient les seules formations de fer de type *Algoma* (**Figure 47** ; cf. Clark et Wares, 2004), l'information géochimique est fragmentaire, en quantité variable, et date essentiellement des années pré-2000. La lithogéochimie est présentée dans les paragraphes suivants ; en revanche, des tests effectués sur l'environnement secondaire n'ont pas donné de résultats concluants et ne seront pas présentés. Par ailleurs, les informations d'affleurement, de minéralogie, et de texture sont peu intégrées dans le secteur *Gérido*. Au regard de ces éléments, l'approche pour évaluer le potentiel aurifère dans les formations de fer sera différente de celle de la Baie-James (cf. chapitre 3.4). Dans le volet Fosse du Labrador, nous allons proposer des guides d'exploration, et indirectement des zones d'intérêt, mais pas de carte de prospectivité.

3.5.4 Lithogéochimie et discrimination de la fertilité des assemblages géologiques

Afin d'évaluer efficacement les associations élémentaires dans les formations de fer aurifères de la Fosse du Labrador, nous avons procédé avec une analyse en composante principale ACP (cf. Baccini, 2010 ; Bigot, 2013) à partir de la lithogéochimie. Les échantillons utilisés proviennent de formations de fer minéralisées de la Fosse du Labrador. Il en résulte la distinction d'une association positive entre Au, As, Ag, Sb, Be, Sn, Se, et SiO₂ (**Figure 49**). La distribution des éléments dans l'ACP de la **Figure 49** est typiquement contrôlée par les sulfures.

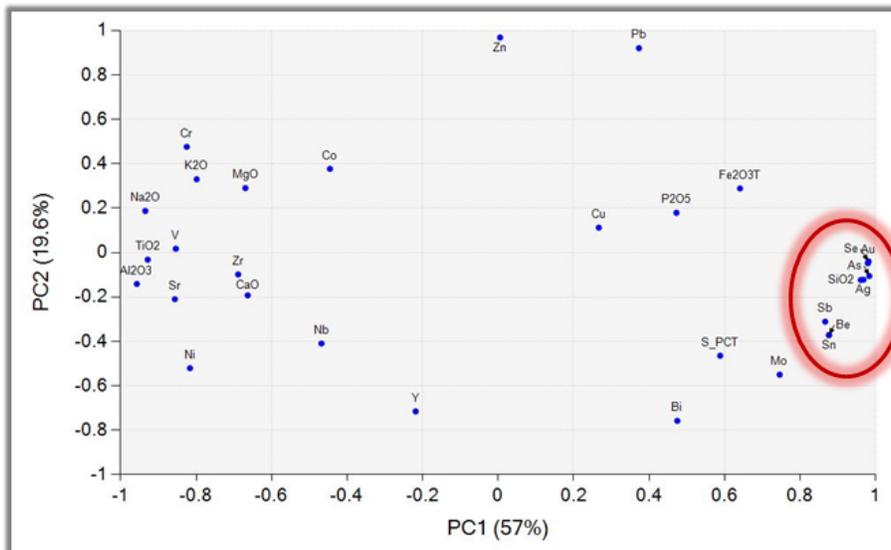


Figure 49: Analyse en composantes principales (ACP) des formations de fer minéralisées (> 0,5 g/t Au) dans la Fosse du Labrador (N=303, toutes formations de fer), d'après la lithogéochimie dans SIGÉOM 2015. Méthodologie : Transformation des données en log-centrée.

L'indicateur de la fertilité des assemblages géologiques repose sur une comparaison de la médiane des valeurs de lithogéochimie pour Au, As, Ag, Sb, Be, Sn, Se, et SiO₂ dans les assemblages volcano-sédimentaires hôtes de formations de fer. Deux exemples de cette approche sont présentés aux **Figures 50A et 50B** pour la Fosse du Labrador. Toutes les formations évaluées contiennent des formations de fer, de type Algoma ou Lac Supérieur. L'intérêt ici est de distinguer les assemblages anomaux pour la suite d'éléments positivement corrélés, soit Au, As, Ag, Sb, Be, Sn, Se, et SiO₂. Ces diagrammes montrent que certaines formations géologiques sont enrichies par rapport aux autres, et ce pour plusieurs éléments. Pour le type de gîte évalué dans ce projet, on en conclut que la Formation de Baby moyen est plus « fertile » que la Formation de Baby supérieur (**Figure 51**).

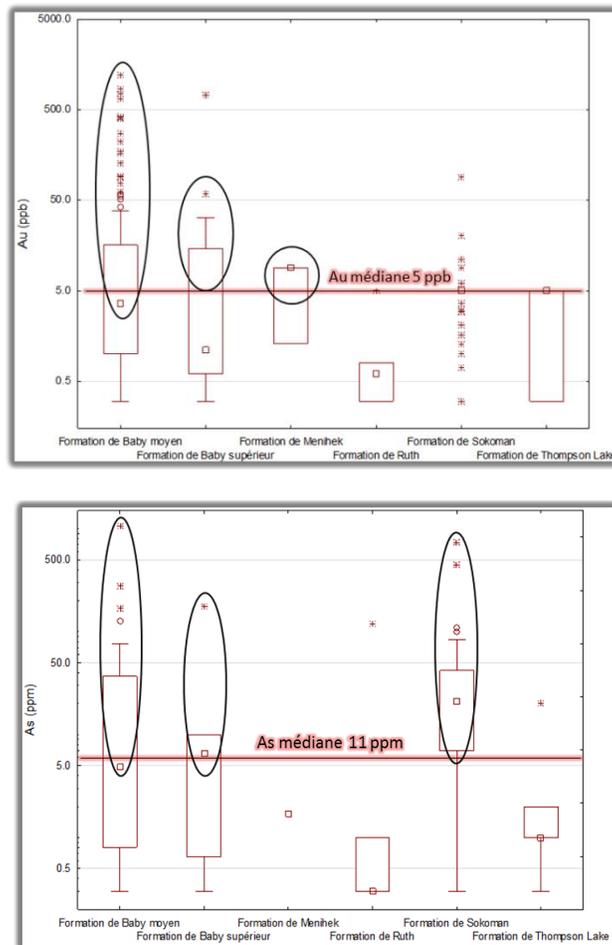


Figure 50: (A) Boîtes à moustaches de la distribution de l'or dans les roches des assemblages hôtes des formations de fer. (B) Boîtes à moustaches de la distribution de l'arsenic dans les roches des assemblages hôtes des formations de fer.

(La boîte représente le 25^e et 75^e centile, avec la médiane, l'extérieur représente le 1^{er} et 99^e centile, et la valeur extrême. Données lithogéochimiques d'après SIGÉOM 2015).

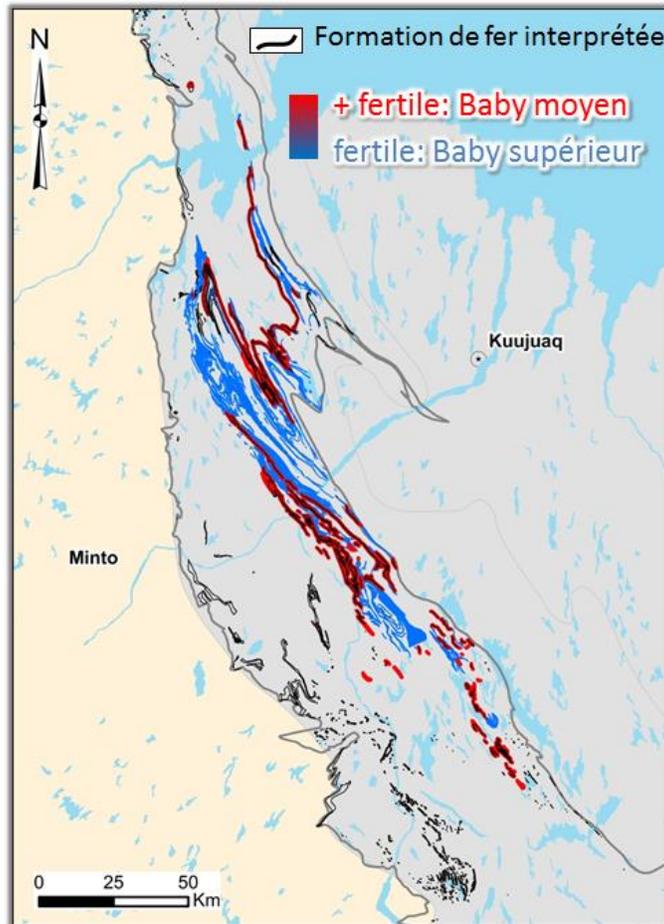


Figure 51: Formations géologiques hôtes de formations de fer selon leur caractère de fertilité, dans la zone lithotectonique de *Gérido*.

3.5.5 Éléments structuraux

Le style tectonique de la Fosse du Labrador se caractérise par une série de nappes de charriage et de chevauchements imbriqués à vergence ouest, ainsi que des plis, parfois serrés à isoclinaux, notamment dans le nord et le sud de la Fosse (Goulet, 1987; Wares et Goutier, 1989; Wardle et al., 2002; Clark et Wares, 2004).

La Formation de *Baby* moyen se trouve dans la partie sud et nord-nord-est de la zone lithotectonique de *Gérido*, alors que le centre est surtout dominé par d'épaisses séquences de la Formation de *Baby* supérieur. Cette distribution particulière est à mettre en parallèle avec les éléments structuraux majeurs dans la Fosse du Labrador, à savoir les failles de chevauchement et les plis (**Figure 52A**). Wares et Goutier (1990) ont reconnu deux domaines structuraux bien distincts dans la partie centre et nord de la zone lithotectonique de *Gerido* (**Figure 52B**).

Le domaine ouest-est est une zone d'imbrication majeure dans laquelle les roches sédimentaires de la Formation de *Baby* supérieur sont transposées; le plissement y est très mineur. La faille de chevauchement *Archiac* marque la limite est de ce premier domaine dans lequel aucun gîte d'or dans les formations de fer n'est connu. À l'est se trouve un domaine dominé par le plissement, ce domaine a été baptisé « domaine de Thévenet » par Wares et Goutier (1990). Le domaine de Thévenet présente un style remarquablement différent du domaine ouest. Les chevauchements y sont très mineurs, alors que l'ensemble des assemblages géologiques est influencé par de grands plis plongeants vers le sud-est dont l'amplitude et la longueur d'onde sont respectivement de l'ordre de six et douze kilomètres (Wares et Goutier, 1990).

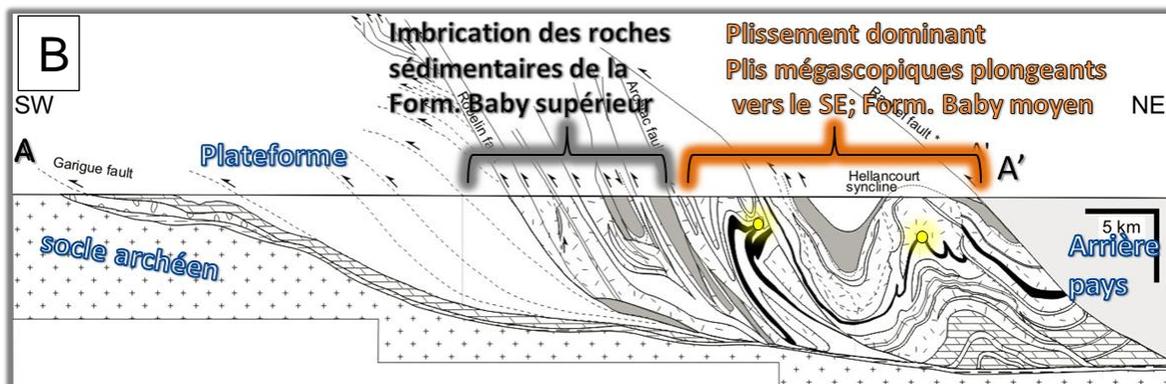
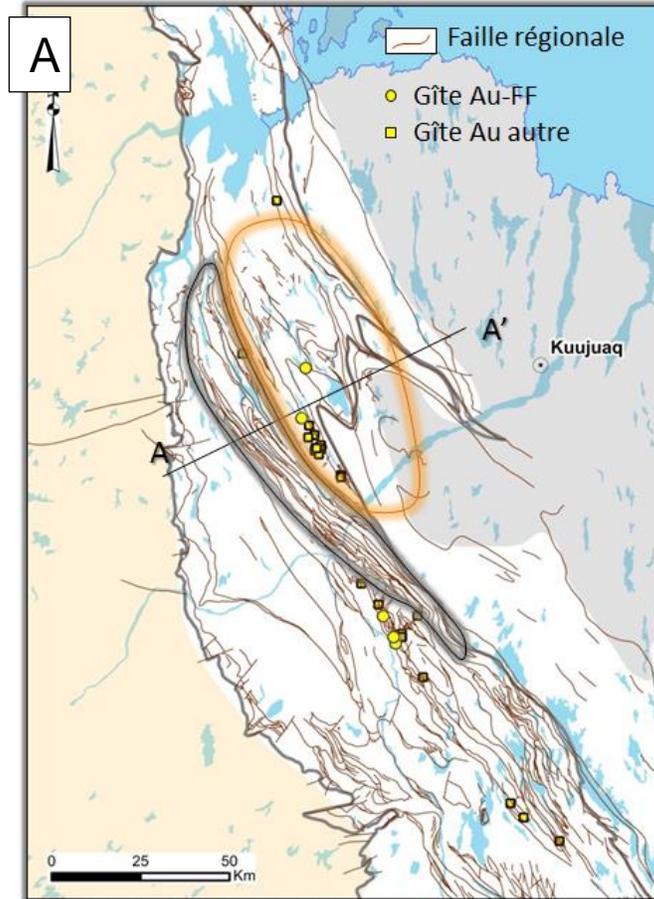


Figure 52: A) Failles de chevauchements et plis (SIGÉOM 2015), et gîtes d'or ; **B)** Section A-A' dans la zone lithotectonique de *Gerido* (modifié de Wares et Goutier, 1990). Les deux disques jaunes indiquent la position probable des gîtes d'or *Venditelli* et *Dessureault* dans les formations de fer (horizons en noir plissé).

Les gîtes d'or dans les formations de fer, et les autres types de gîtes d'or, sont contenus dans le domaine plissé de Thévenet, généralement dans, ou à proximité, des charnières des grands plis faiblement plongeants vers le sud-est (**Figure 52B**) reconnus D3' régionalement (Wares et Goutier, 1990). Ces plis, hôtes de gîtes aurifères dans les formations de fer, sont tous des anticlinaux antiformes, et la minéralisation est restreinte aux veines de quartz non déformées, tardi-tectoniques, au niveau des charnières. À partir de ce constat, chercher des joints tardi-tectoniques dans, ou à proximité, des charnières de plis anticlinaux antiformes dans les formations de fer, surtout de la Formation de Baby moyen, dans domaine de Thévenet, devient un guide d'exploration. La **Figure 53** montre les traces axiales des plis anticlinaux antiformes plongeants vers le sud-est, et la localisation de zones à priori favorables pour l'or dans les formations de fer. Le parallèle avec le gisement de Homestake est remarquable puisque dans ce gisement les minéralisations sont dans des veines de quartz, et brèches, tardi-tectoniques localisées dans des charnières de plis isoclinaux ; la principale zone minéralisée se trouve dans un anticlinal antiforme (Bell, 2013).

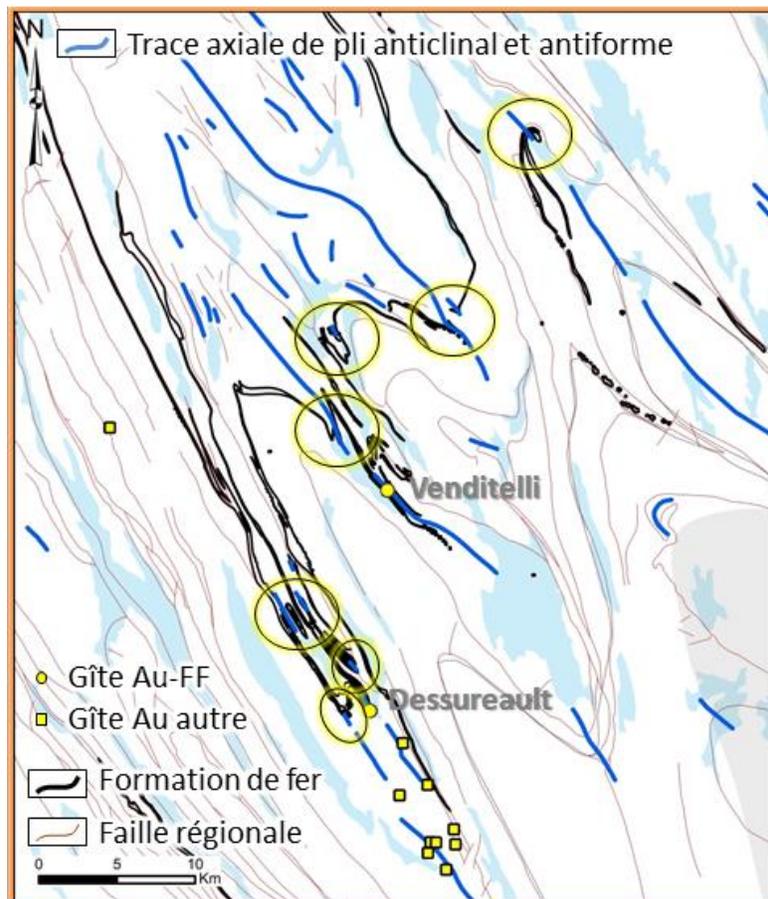


Figure 53: Failles et traces axiales des plis anticlinaux antiformes dans le domaine de Thévenet, formations de fer interprétées, et gîtes d'or. Les cercles avec auréole jaune sont des secteurs d'intérêt pour l'or dans les formations de fer.

3.5.6 Approche minéralogique et altérations

À l'instar du territoire de la Baie-James, où l'association minérale grunérite et/ou cummingtonite, grenat, et pyrrhotite \pm arsénopyrite est généralement discriminante des formations de fer minéralisées (cf. chapitre 3.4.5), la Fosse du Labrador a aussi une association de minéraux favorables. Dans ce cas-ci, les silicates hydratés (i.e., séricite, chlorite) et les carbonates de fer (i.e., ankérite) sont les meilleurs indicateurs des zones minéralisées. Dans les gîtes Venditelli et Dessureault, les deux gîtes d'or dans les formations de fer ayant fait l'objet de travaux de recherche (Wares et Goutier, 1990), ce sont les sous-faciès à ankérite et séricite qui portent les veines de quartz aurifères. Cependant, ces altérations en carbonate et en séricite ne sont pas facilement identifiables, alors qu'elles sont évidentes dans les gabbros environnants (Wares et Goutier, 1990). Ces altérations sont très inhabituelles dans les gabbros, et pourraient résulter de l'épisode hydrothermal minéralisateur.

Ainsi, l'altération hydrothermale associée à l'or ne serait pas confinée à la formation de fer. Dans ce cas, les gabbros altérés en carbonate et séricite seraient d'excellents proxys pour la minéralisation aurifère dans les formations de fer, et donc ces halos d'altération sont des guides d'exploration. À Homestake, les altérations en carbonate et séricite associées à la zone minéralisée s'étendent dans les roches sus- et sous-jacentes à la formation de fer dans le secteur de la mine (Caddey et al., 1991).

Les travaux de cartographie de Sauvé et Bergeron (1965) notamment ont mis en lumière des halos d'altération en carbonates dans des gabbros. Le fait intéressant est que ces gabbros carbonatés se situent au contact, ou à proximité, de la formation de fer de Baby moyen. La **Figure 54** présente ces zones d'intérêt.

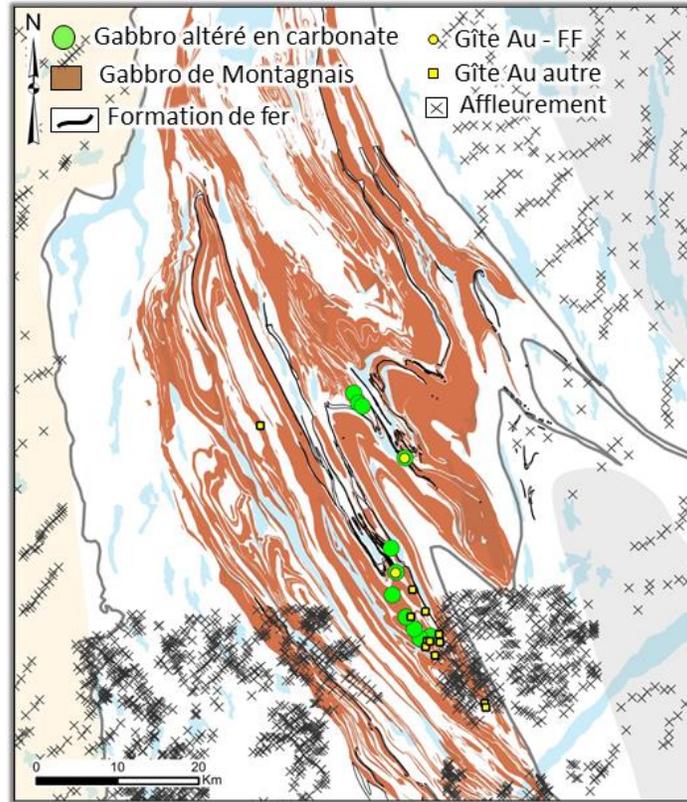


Figure 54: Secteur centre-nord de la Fosse du Labrador. Carte indiquant la position des gabbros altérés en carbonate (disque vert) dans le domaine structural de Thévenet.

3.5.7 Conditions métamorphiques

Le métamorphisme dans la Fosse du Labrador augmente d'ouest en est, ce qui coïncide avec l'épaississement des séquences protérozoïques discordantes sur le socle archéen. Dans l'avant-pays, les faciès évoluent depuis le sous-schiste vert au schiste vert supérieur (Dimroth et Dressler, 1978 ; Wares et al., 1998 ; Perreault et Hynes, 1990), et localement amphibolite inférieure le long de la marge est de l'orogène dans le secteur Rachel-Laporte. Les roches de l'arrière-pays, soit la marge continentale, ont été métamorphisées aux faciès supérieurs des amphibolites ou des granulites (Clark et Wares, 2004). La **Figure 55** présente les isogrades métamorphiques issus des travaux de Dimroth et Dressler (1978), et dont l'isograde biotite-grenat a été précisé à certains endroits par Faure (2012) à partir des informations publiques d'affleurements et de géophysiques.

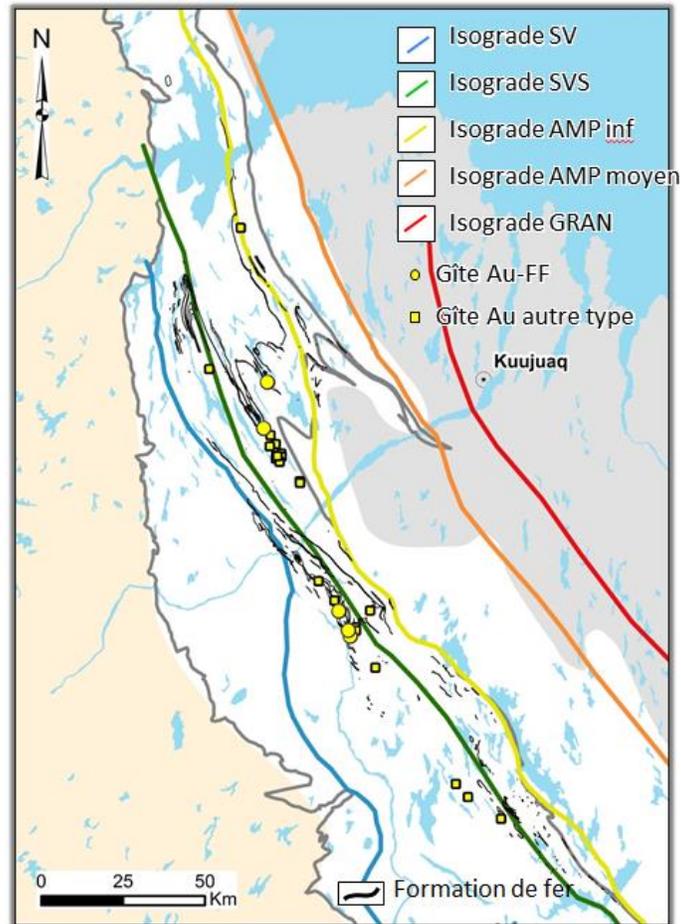


Figure 55: Portrait métamorphique du centre-nord de l'Orogène du Nouveau-Québec, secteur de la zone lithotectonique de Gériido, modifié de Dimroth et Dressler (1978) et Faure (2012), avec les gîtes d'or de tout type (SIGÉOM 2015, www.midlandexploration.com).

Au total trente-cinq gîtes d'or sont identifiés. Parmi ceux-là, cinq sont interprétés comme appartenant au type gîte d'or dans les formations de fer. Les gîtes *Venditelli* et *Dessureault* (Wares et Goutier, 1990) sont au faciès des schistes verts supérieur ; les gîtes *Kan*, *Ferricrete*, et *Pyrite falls*, sont au faciès des schistes verts, mais proches de l'isograde schiste vert supérieur. Pour établir une statistique robuste, cinq éléments ce n'est pas suffisamment. En revanche, en considérant l'ensemble des gîtes d'or, soit trente-cinq, l'évaluation sera meilleure. Ainsi, 46 % (n=16) des gîtes d'or sont au faciès des schistes verts, 51 % (n=18) sont au faciès des schistes verts supérieur, et 3 % (n=1) sont au faciès inférieur des amphibolites. Le faciès supérieur des schistes verts apparaît, à priori, favorable pour l'or. Clark et Wares (2004) concluent aussi que les gîtes d'or dans les formations de fer de la Fosse du Labrador sont portés à des faciès inférieurs aux amphibolites.

Cependant, une perspective différente pourrait être considérée. Pour cela, il faut à nouveau faire un parallèle avec le gisement de *Homestake*. D'après Caddey et al. (1991), les trois quarts de minerai produit provient d'un secteur ayant dépassé l'isograde métamorphique grenat, soit à un faciès transitionnel schiste vert supérieur et inférieur des amphibolites. Plusieurs formations de fer de la Fosse du Labrador sont disposées le long de l'isograde inférieur des amphibolites, dans le secteur au contact entre les zones de *Gérido* et de *Rachel-Laporte*. Ces formations de fer (suite de *Fréneuse*) sont schisteuses à carbonate ± grunérite, et localement fortement plissées. Peu d'éléments permettent actuellement de pousser plus loin l'évaluation de ce secteur, cependant la nouvelle perspective est intrigante et mériterait d'être considérée dans le cadre de programme d'exploration.

4 CONCLUSIONS

Les gisements d'or encaissés dans des formations de fer ont des caractéristiques géologiques communes. Ce sont des gisements appartenant à la famille or orogénique, qui se sont formés au cours des orogènes archéennes et paléoprotérozoïques à la faveur de processus de déformation et de métamorphisme, et éventuellement de magmatisme.

Les formations de fer hôtes de minéralisations aurifères sont de type Algoma, c'est-à-dire contenues dans des assemblages volcano-sédimentaires, et sont situées à proximité de failles transcrustales (limites de domaines géologiques).

Les formations de fer sont des lithologies réactives qui agissent comme piège chimique causant la sulfuration de la magnétite, souvent sous forme de pyrrhotite, ce qui entraîne la précipitation de l'or issue de sources externes (e.g., métamorphique et/ou magmatique).

Le style de minéralisation et les altérations varient selon le métamorphisme. Pour les faciès inférieurs à l'amphibolite, la minéralisation aurifère est portée par des veines de quartz \pm carbonate, et les altérations proximales sont à carbonate de fer et phyllosilicate (e.g., séricite, chlorite), plus pyrite-arsénopyrite-pyrrhotite. Pour les faciès inférieurs des amphibolites et plus élevés, la minéralisation aurifère est associée aux zones de remplacement à pyrrhotite semi-massive à massive, et les altérations proximales sont à amphibole de fer (i.e., grunérite et cummingtonite) et grenat, plus pyrrhotite-arsénopyrite. Dans ce dernier cas, le remplacement par imprégnation de quartz (*silica flooding*) est majeur.

Les formations de fer sont des pièges rhéologiques et structuraux efficaces. Le premier a pour effet, en réponse à l'introduction de fluides hydrothermaux, le développement de veines, de brèches, et de textures d'envahissement. Le second se traduit par d'importantes concentrations de minéralisations aurifères dans des zones intensément déformées par du plissement isoclinal et du cisaillement.

La phase documentaire a permis de faire ressortir les principales caractéristiques des grands gisements, et des guides d'exploration. À partir de cette synthèse, et en utilisant des informations géologiques essentiellement publiques, deux modèles d'exploration sont proposés, l'un sur le territoire de la Baie-James, l'autre dans la Fosse du Labrador.

À la Baie-James, des traitements statistiques (e.g., ACP, régression spatiale) sur la lithogéochimie, et la géochimie de sédiments de fond de lac et de ruisseaux, à partir de données publiques, du SIGÉOM 2015, et privés, des compagnies membres du CONSOREM, ont abouti à la discrimination, a) d'assemblages volcano-sédimentaires fertiles (e.g., Guyer, Marbot, Auclair), et b) de zones favorables pour l'or dans les formations de fer. D'autres indicateurs de favorabilité, tels que la présence de nœuds structuraux (pli complexe et zone de cisaillement), et la coexistence de grunérite/cummingtonite, grenat, pyrrhotite \pm arsénopyrite, au faciès métamorphique surtout amphibolitique, permet de cibler des zones d'intérêt. La méthodologie choisie pour l'identification de zones d'intérêt est une pondération de couches d'éléments favorables

qui, lorsqu'additionnées, définissent une carte de prospectivité. Au total, 150 cibles sont proposées sur cette carte de prospectivité aurifère à la Baie-James. Parmi celles-ci, 44 sont jugées prioritaires. Certaines cibles sont expliquées par la présence de gîtes d'or dans les formations de fer. En revanche, d'autres ne font l'objet d'aucun travail d'exploration, ouvrant ainsi la voie à de possibles découvertes.

Dans la Fosse du Labrador, plusieurs zones favorables sont identifiées à partir d'une approche analogique, en utilisant les éléments lithologiques, minéralogiques, et structuraux. Les zones de charnières d'anticlinaux antifformes plongeants faiblement vers le sud-est dans le domaine structural plissé de Thévenet, zone lithotectonique de *Gerido*, sont des zones favorables pour l'or lorsque la formation de fer de la Formation de *Baby moyen* s'y trouve. Les veines de quartz tardives (non déformées) recoupant les charnières de plis, et encaissées dans des formations de fer à faciès de carbonate de fer et séricite sont des éléments marqueurs de zones d'intérêt. L'altération n'étant pas exclusivement confinée à la formation de fer de *Baby moyen*, la recherche des halos d'altération à carbonate et séricite dans les gabbros environnants, pour lesquels ces altérations sont inhabituelles, pourrait s'avérer un outil d'exploration efficace. En termes de conditions métamorphiques, bien que statistiquement le faciès supérieur des schistes verts soit le plus favorable, un potentiel est ouvert dans les formations de fer déformées et altérées portées au faciès inférieur des amphibolites, soit le secteur de contact entre la zone *Gérido* et *Rachel-Laporte*.

La Baie-James et la Fosse du Labrador sont des entités géologiques très différentes, et il serait hasardeux de tenter des comparaisons entre les deux. En revanche, les éléments géologiques (e.g., âge, structure, altération, association minérale, métamorphisme) dans les ceintures de roches vertes de la Baie-James et de la Fosse du Labrador ont des points communs avec les caractéristiques observées dans les grands gisements nord-américains. Le premier territoire est à mettre en parallèle avec la zone de *Musselwhite*, alors que le second territoire partage des affinités avec le secteur de *Homestake*. Alors que le potentiel pour un gisement d'or important dans les formations de fer à la Baie-James est tout à fait ouvert, cette affirmation semble moins vraie pour la Fosse du Labrador. Malgré un contexte géologique global similaire à *Homestake*, des différences sont notables et pourraient être d'une grande importance. À titre d'exemple, à *Homestake* il y a une relation temporelle, et possiblement génétique, entre la formation de fer aurifère et des intrusions granitiques proximales qui sont orogéniques. Dans la Fosse du Labrador, il y a très peu d'intrusions orogéniques, ce qui pourrait expliquer le faible bagage aurifère comparativement à d'autres ceintures protérozoïques plus riches en or. Le rôle aussi des unités sus-jacentes aux formations de fer pourrait être significatif lorsqu'il s'agit de couches imperméables qui ont une capacité pour bloquer la propagation des fluides et ainsi les faire réagir plus longuement avec les formations de fer (cf. *Lupin*).

REMERCIEMENTS

Un grand merci à Vivien Janvier (INRS-CGC) pour le partage de ses connaissances, et ses questionnements, sur le projet *Meadowbank*. Merci également à Jean Goutier (MERN) pour les discussions très fructueuses concernant la Fosse du Labrador et la Baie-James. Du côté de nos partenaires industrie, je remercie sincèrement Olivier Côté-Mantha et Marjorie Simard (AgnicoEagle), Mario Masson et Robert Banville (Midland Ressources), et Vital Pearson (Osisko Baie-James) pour la transmission de leurs connaissances et l'accès à leurs données. Michel Allard (Glencore) et Siham Benhamed (MERN) sont chaudement remerciés pour leurs éclaircissements sur les traitements géophysiques. Michel Gauthier (UQAM) et Guillaume Allard (MERN) sont aussi remerciés pour les discussions intéressantes et le partage d'informations. À mes collègues du CONSOREM, Réal Daigneault, Stéphane Faure, Silvain Rafini, et Lucie Mathieu, j'adresse de vifs remerciements pour leurs commentaires et suggestions toujours pertinents et constructifs. Je remercie aussi Marie-Line Tremblay pour son support, et pour son travail sur le document. Ce document a bénéficié d'une revue critique et éditoriale de Brigitte Poirier et de Réal Daigneault.

RÉFÉRENCES

- Aspler, L.B., et Chiarenzelli, J.R., 1996. Stratigraphy, sedimentology and physical volcanology of the Henik Group, central Ennadai-Rankin greenstone belt, Northwest Territories, Canada: Late Archean paleogeography of the Hearne Province and tectonic implications. *Precambrian Research*, 77: 59–89.
- Baccini, A., 2010. Statistique Descriptive Multidimensionnelle, Institut de mathématique de Toulouse. Université Paul Sabatier, 33 p.
- Baird, D.J., Nelson, K.D., Knapp, J.H., Walters, J.J., et Brown, L.D., 1996. Crustal structure and evolution of the Trans-Hudson orogeny: Results from seismic reflection profiling. *Tectonics*, 15: 416-426.
- Bandyayera, D., Rhéaume, P., Maurice, C., Bédard, É, Morfin, S., et Sawyer, E.W., 2010. Synthèse Géologique du Secteur du Réservoir Opinaca, Baie-James. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Rapport RG 2010-02, 44 p.
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapez, B., Hofmann, A., Konhauser, K.O., et Rouxel, J., 2010. Iron formation : the sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic and biospheric processes. *Economic Geology*, 105: 467–508.
- Bell, C., 2013. Structural controls on gold mineralization at the Homestake Mine and their implications for the geology of the Black Hill. PhD thesis, James Cook University, 232 p.
- Benhamed, S., et Intissar, R., 2015. Levé magnétique et spectrométrie aéroporté dans le secteur de la rivière Arnaud, Côte nord-ouest de la Baie d'Ungava. GeoData Solutions, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2015-08, 8 pages, 10 plans, données numériques.
- Biczok, J., Hollings, P., Klipfel, P., Heaman, L., Maas, R., Hamilton, M., Kamo, S., and Friedman, R., 2012. Geochronology of the North Caribou greenstone belt, Superior Province Canada: Implications for tectonic history and gold mineralization at the Musselwhite mine. *Precambrian Research*, 192-195: 209–230.
- Bigot, L., 2014. Typologie des altérations associées aux minéralisations aurifères en Abitibi. Rapport, projet CONSOREM 2013-07, 48 p.
- Bigot, L., 2015. Le prolongement du corridor de la route 167 : synthèse géologique et évaluation de la favorabilité minière. Rapport, projet CONSOREM 2014-03, 37 p.
- Bogatu, A., Huot, F., Goutier, J., Guilmette, C., Rhéaume-Ouellet, A., Beaudoin, G., et Davis, D., 2016. Minéralisation aurifère de gîte d'or orogénique Orfée, Eeyou Istchee Baie-James (Québec). Atelier UQAM : nouvelles perspectives pour l'exploration au Moyen-Nord ; 3 février 2016, Montréal, Canada ; www.consorem.ca/presentations_publicques.
- Bonham-Carter, G. F. 1994 - *Geographic Information Systems for Geoscientists*, Elsevier Science Ltd, Pergamon, 398 pages. ISBN 0080418678, 9780080418674

Bullis, H., Hureau, R., et Penner, B., 1993. Distribution of gold and sulfides at Lupin, Northwest Territories. *Economic Geology*, 89: 1217-1227.

Caddey, S., Bachman, R., Campbell, T., Reid, R., et Otto, R., 1991. The Homestake gold mine, an Early Proterozoic iron-formation-hosted gold deposit, Lawrence County, South Dakota: U. S. Geological Survey Bulletin 1857-J, p. 1-67.

Carpenter, R.L., et Duke, N.A., 2004. Geological setting of the West Meliadine gold deposits, Western Churchill Province, Nunavut, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 13: 49-65.

Carpenter, R.L., Duke, N.A., Sandeman, H.S., et Stern, R., 2005. Relative and absolute timing of gold mineralization along the Meliadine trend, Nunavut, Canada: Evidence for Paleoproterozoic gold hosted in an Archean greenstone belt. *Economic Geology*, 100: 567-576.

Chapdelaine, M., 1998, Rapport technique des travaux, été 1997, Projet Minto. SOQUEM. Rapport GM 55935, 277 p.

Chapdelaine, M., et Lachance, S., 1998, Rapport technique des sondages, automne 1998, Projet Auclair. Mines d'or Virginia Inc. Rapport GM 56493, 138 p.

Ciesielski, A., 1998. Compilation géologique de la partie orientale de la province du Supérieur, Québec. Geological Survey of Canada; open file 3580, échelle 1/1 000 000.

Clark, T., 2012, Géologie et gîtes minéraux de l'Orogène Trans-Hudsonien au Québec. Document numérique distribué lors d'un cours offert à Québec Mines en novembre 2012, Québec, Canada.

Clark, T., et D'Amours, I., 2012. Interprétations structurales et métallogéniques dans la Fosse du Labrador à partir des cartes magnétiques et spectrométriques. Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport RP 2012-02, 12 p.

Clark, T., et Wares, R., 2004. Synthèse lithotectonique et métallogénique de l'Orogène du Nouveau-Québec (Fosse du Labrador). Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport MM 2004-01, 182 p.

Corrigan, D., Pehrsson, S., Wodicka N., et de Kemp, E., 2009. The Palaeoproterozoic Trans-Hudson Orogen: a prototype of modern accretionary processes. Geological Society, London, Special Publications 2009, 327 : 457-479

D'Amours, I., 2011. Synthèses des levés magnétiques de la Baie-James. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2011-08, 5 pages, 2 plans, données numériques.

D'Amours, I., et Intissar, R., 2012a. Levé magnétique et spectrométrique aéroporté dans le secteur du Lac Le Moyne, Province de Churchill. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2011-06, 8 pages, 200 plans, données numériques.

D'Amours, I., et Intissar, R., 2012b. Levé magnétique et spectrométrie aéroporté de la rivière Koksoak, Province de Churchill. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2011-07, 8 pages, 180 plans, données numériques.

D'Amours, I., et Intissar, R., 2013. Levé magnétique et spectrométrie aéroporté dans le secteur du Lac Ramonet, Province de Churchill. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2013-02, 10 pages, 280 plans, données numériques.

Dahl, P.S., et Frei, R., 1998. Step-leach Pb-Pb dating of inclusion-bearing garnet and staurolite, with implications for Early Proterozoic tectonism in the Black Hills collisional orogeny, South Dakota, United States. *Geology*, 26: 111-114.

Dahl, P.S., Holm, D.K., Gardner, E.T., Hubacher, F.A., et Foland, K.A., 1999. New constraints on the timing of Early Proterozoic tectonism in the Black Hills (South Dakota), with implications for docking of the Wyoming province with Laurentia. *Geological Society of America Bulletin*, 111: 1335-1349.

Davis, W.J., et Zaleski, E., 1998. Geochronological investigations of the Woodburn Lake group, western Churchill Province, Northwest Territories: preliminary results, *Dans: Radiogenic Age and Isotopic Studies, Report 11; Geological Survey of Canada, Current Research no. 1998-F*, p. 89–97

Dimroth, E., et Dressler, B., 1978. Metamorphism of the Labrador trough. *Dans: Metamorphism in the Canadian Shield. Geological Survey of Canada, paper 78-10*, 215-236 p.

Dubé, B., et Mercier-Langevin, P. (ed.), 2015. Targeted Geosciences Initiative 4 : Contributions to the understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration. Geological Survey of Canada, Open File 7852, 297 p.

Dubé, B., Mercier-Langevin, P., Castonguay, S., McNicoll, V.J., Pehrsson, S.J., Bleeker, W., Schetselaar, E.M., et Jackson, S., 2011. Targeted Geoscience Initiative 4. Lode gold deposit in ancient, deformed and metamorphosed terranes – footprints and exploration implications: a preliminary overview of themes, objectives and targeted areas; *Dans: Summary of Field Work and Other Activities 2011; Ontario Geological Survey, Open File Report 6270*, p. 38.1-38.10.

Castro, L., 1994. Genesis of banded iron-formations. *Economic Geology*, 89 : 1384-1397.

Faure, S., 2010. Perméabilité crustale dans le Moyen-Nord québécois : Guide d'exploration géophysique pour l'or, l'uranium, et le diamant. Rapport, projet CONSOREM 2009-10, 49 p.

Faure, S., 2012. Gisements d'or géants dans les shales noirs pyriteux. Rapport, projet CONSOREM 2012-07, 72 p.

Fontaine, A., Dube, B., Malo, M., McNicoll, V.J., Brisson, T., Doucet, D., et Goutier, J., 2015. Geology of the metamorphosed Roberto gold deposit (Eleonore Mine), James Bay

region, Quebec: diversity of mineralization styles in a polyphase tectonometamorphic setting, *Dans: Targeted Geoscience Initiative 4 : Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, (ed.) B. Dube and P. Mercier-Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, p. 209–225.

Francoeur, G., 1995. Rapport des travaux 1995, Projet Minto (1121). Cominco Ltee. Rapport GM 53763, 173 p.

Francoeur, G., 1996. Rapport des travaux 1996, Projet Minto (1121). SOQUEM. Rapport GM 54360, 202 p.

Frei, R., Dahl, P.S., Frandsson, M.M., Jensen, L.A., Hansen, T.R., Terry, M.P., et Frei, K.M., 2009. Lead-isotope and trace-element geochemistry of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the Lead and Rochford basins (Black Hills, South Dakota, USA): Implications for genetic models, mineralization ages, and sources of leads in the Homestake gold deposit. *Precambrian Research*, 172: 1-24.

Fripp, R., 1976. Stratabound gold deposits in Archean banded iron-formation, Rhodesia. *Economic Geology*, 71: 58-75.

Fyon, J., Crocket, J., et Schwarcz, H., 1983. The Carshaw and Malga iron-formation-hosted deposits of the Timmins area. Ontario Geological Survey, Miscellaneous Paper 110, p. 98-110.

Gardiner, J.J., 1986. Structural Geology of the Lupin Mine, Northwest Territories. M.Sc. thesis, Acadia University, Wolfville, 206 p.

Gauthier, M., 2000. Styles et répartition des gîtes métallifères du territoire de la Baie-James (Québec), *Chronique de la Recherche Minière*, num. 539, pp. 17-61.

Gauthier, M., Baillargeon, F., et Legault, M., 2003, Étude des facies sédimentaires et des facies d'altération primaires du gisement d'or archéen d'Eagle-Telbel, canton de Joutel, Abitibi. Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport MB 2002-06, 33 p.

Gauthier, M., et Larocque, M., 1998. Cadre géologique, style, et répartition des minéralisations de la Basse- et de la Moyenne-Eastmain, territoire de la Baie-James. Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport MB 97-30, 69 p.

Gauthier, M., Trépanier, S., et Gardoll, S., 2007. Metamorphic gradient: a regional-scale area selection criterion for gold in the northeastern superior Province, Eastern Canadian Shield. *SEG Newsletters*, April 2007, Num. 69.

Geusebroek, P.A., et Duke, N.A., 2004. An Update on the Geology of the Lupin Gold Mine, Nunavut, Canada. *Explor. Mining Geol*, 13 : num. 1-4, 1-13. Ministère des ressources naturelles du Québec. Rapport MB 2002-06, 33 p.

GIGON, J. – GOUTIER, 2017. J., Géologie de la région du lac Richardie, municipalité d'Eeyou Istchee Baie-James. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec; RG 2016-04, 45 pages.

Goldfarb, R., Baker, T., Dube, B., Groves, D., Hart, C., et Gosselin, P., 2005. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes: Economic Geology 100th Anniversary Volume, p. 407-450.

Gonzalez Garzon, G., 2010. Petrographic Characterization of Two Gold-Rich Banded Iron Formations (BIFs) in the Foxe Fold Belt, Baffin Island, Canada. M.Sc. thesis, University of Arizona, 51 p.

Gosselin, P., et Dubé, B., 2005. Gold deposits of Canada: distribution, geological parameters and gold content. Geological Survey of Canada Open File 4896, 1 CD-ROM.

Goulet, N., 1987. Étude tectonique de la partie nord de la Fosse du Labrador. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Rapport intérimaire MB 87-21, 31 p.

Gourcerol, B., Thurston, P.C., Kontak, D.J., et Cote-Mantha, O., 2014. Interpretations and implications of preliminary LA ICPMS analysis of chert for the origin of geochemical signatures in banded iron-formations from the Meadowbank gold deposit, western Churchill Province, Nunavut. Geological Survey of Canada, Current Research 2014-1, 22 p.

Goutier, J., Dion, C., Ouellet, M.C., Davis, D.W., David, J., et Parent, M., 2002. Géologie de la région du lac Guyer (33G/05, 33G/06 et 33G/11). Ministère des Ressources naturelles du Québec. Rapport RG 2001-15, 53 p.

Goutier, J., Gigon, J., Burniaux, P., Dion, C., Talla Takam, F., Chartier-Montreuil, W., et Bandyayera, D., en préparation. Géologie de la région du lac de la Corvette, Eeyou Istchee Baie-James. Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles, Québec.

Goutier, J., et Wares, R., 1991. Géologie du secteur de l'indice aurifère Dessureault, Fosse du Labrador – Rapport intermédiaire. Ministère des Ressources et de l'Énergie du Québec. Rapport MB 91-10, 19 p.

Gross, G.A., 1995. Stratiform iron: Lake Superior-type iron-formation, Algoma-type iron-formation, Ironstone, *Dans: Geology of Canadian Mineral Deposit Types*, (ed.) O.R. Eckstrand, W.D. Sinclair, and R.I. Thorpe; Geological Survey of Canada, Geology of Canada Series no. 8, p. 41–80.

James, H.L., 1954. Sedimentary facies of iron-formation. *Economic Geology*, 49: 235-293.

Groves, D.I., R.J. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S.G. Hagemann et F. Robert. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7–27.

Harron, G.A., 2011. Technical Report on the Lupin mine property Kitikmeot region, Nunavut, for Elgin Mining Inc., 57 p.

Hoffman, P.F., 1989. Precambrian geology and tectonic history of North America, *Dans*: Bally, A.W., and Palmer, A.R., eds., *The Geology of North America - An Overview*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, A, p. 447-512.

Hrabi, R.B., Barclay, W.A., Fleming, D., et Alexander, R.B., 2003. Structural evolution of the Woodburn Lake group in the area of the Meadowbank gold deposit, Nunavut. Geological Survey of Canada, Current Research 2003-C27, p. 10.

Hutchinson, R., 1976, Lode gold deposits: The case for volcanogenic distribution, *Dans*: Pacific Northwest Mining and Metals Conference., Portland, Oregon, 1975, Proceedings: Salem, Oregon Department of Geology and Mineral Industries, p. 64-105.

Hutchinson, R., Ridler, R., et Suffel, G., 1971. Metallogenic relationships in the Abitibi belt, Canada: A model for Archean metallogeny. *Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Trans.*, 74: 106-115.

Intissar, R., Benhamed, S., et Theriault, R., 2015a. Levé magnétique et spectrométrie aéroporté dans le secteur de la rivière Brochant, Côte ouest de la Baie d'Ungava. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2015-01, 8 pages, 210 plans, données numériques.

Intissar, R., Benhamed, S., et Theriault, R., 2015b. Levé magnétique et spectrométrie aéroporté dans le secteur de la rivière Brochant, Côte ouest de la Baie d'Ungava. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Québec. Rapport DP 2015-02, 8 pages, 210 plans, données numériques.

Janvier, V., Castonguay, S., Mercier-Langevin, P., Dube, B., Malo, M., McNicoll, V.J., Creaser, R.A., de Chavigny, B., et Pehrsson, S.J., 2015b. Geology of the banded iron formation-hosted Meadowbank gold deposit, Churchill Province, Nunavut, *Dans*: Targeted Geoscience Initiative 4 : Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration, (ed.) B. Dube and P. Mercier-Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, p. 255–269.

Janvier, V., Castonguay, S., Mercier-Langevin, P., Dube, B., Malo, M., McNicoll, V.J., Creaser, R.A., de Chavigny, B., Cote-Mantha, O., et Pehrsson, S.J., 2015c. Key Parameters Controlling the Genesis of the BIF-Hosted Meadowbank Gold Deposit, Churchill Province, Nunavut. *Dans* : Abstracts Listing ; AGU-GAC-MAC-CGU Joint Annual Meeting, Montréal, Canada, 3-7 May 2015. Poster MD44A-0211.

Janvier, V., Castonguay, S., Mercier-Langevin, P., Dube, B., McNicoll, V., Pehrsson, S., Malo, M., De Chavigny, B., et Cote-Mantha, O., 2015a. Preliminary results of geology of the Portage deposit, Meadowbank gold mine, Churchill Province, Nunavut, Canada. Geological Survey of Canada, Current Research 2015-2, 18 p.

Jébrak, M., et E. Marcoux. 2008. Géologie des ressources minérales, (ed.) Denis L. Lefebvre, ing. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec. Rapport MM 2008-01, 667 p.

Kerswill, J.A., 1993. Models for iron-formation-hosted gold deposits, *Dans: Mineral Deposit Modelling*, (ed.) R.V. Kirkham, W.D. Sinclair, R.I. Thorpe, and J.M. Duke. Geological Survey of Canada, Special Paper 40, p. 171–199.

Kerswill, J., 1996 Iron-formation-hosted stratabound gold, *Dans: Eckstrand, O., Sinclair, W., and Thorpe, R., eds., Geology of Canadian Mineral Deposits Types*. Geological Survey of Canada, Geology of Canada, No. 8: 367-382.

King, J.E., Davis, W.J., Relf, C. et Avery, R.W., 1988. Deformation and plutonism in the Western Contwoyto Lake map area, central Slave province, District of Mackenzie, N.W.T. Geological Survey of Canada, Paper 88-1C, p. 161-176.

Klein, C., 2005, Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin. *American Mineralogist*, 90: 1473-1499.

Klein, C., et Ladeira, E., 2000. Geochemistry and petrology of some Proterozoic banded iron-formations of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 95: 405-427.

Kolb, M., 2011. A microstructural study of Musselwhite Mine and Hammond Reef shear-zone-hosted gold deposits. M.Sc. thesis, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, 204 p.

Landry, M., 2014. L'importance d'intégrer la géophysique et la géologie pour des succès en exploration : l'exemple de Mine Raglan. Québec Mines 2014, 17 au 20 novembre 2014, Québec, Canada ; http://quebecmines.gouv.qc.ca/programme/pdf/2014/presentation/S09_03_landry.pdf

Lanthier, G., et Saint-Cyr R.D., 1997. Rapport sommaire forage, projet Auclair. Mines d'or Virginia Inc. Rapport GM 55430, 443 p.

Large, R.R., Bull, S.W., et Maslennikov, V.V., 2011. A carbonaceous Sedimentary Source-Rock Model for Carlin-Type and Orogenic Gold Deposits. *Economic Geology*, 106: 331-358.

Large, R.R., Maslennikov, V.V., Robert, F., Danyushevsky, L.V., et Chang, Z., 2007. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology*, 102: 1233-1267.

Larouche, J., Caron, D., Connell, L., Laflamme, D., Robichaud, F., Petrucci, F., et Proulx, A., 2015. Updated Technical Report on the Meliadine Gold Project, Nunavut, Canada. Prepared for Agnico Eagle Mines Limited, 281 p.

Lawley, C.J.M., Dube, B., Mercier-Langevin, P., McNicoll, V.J., Creaser, R.A., Pehrsson, S.J., Castonguay, S., Blais, J.-C., Simard, M., Davis, W.J., et Jackson, S.E., 2015. Setting, age, and hydrothermal footprint of the emerging Meliadine gold district, Nunavut, *Dans: Targeted Geoscience Initiative 4 : Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, (ed.) B. Dube and P. Mercier-Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, p. 99–111.

Lawley, C.J.M., Creaser, R.A., McNicoll, V., Dube, B., Mercier-Langevin, P., Pehrsson, S., et Vaillancourt, D., 2014. Re-Os arsenopyrite and U-Pb detrital zircon geochronology at the Meliadine gold district, Nunavut: implications for the geologic setting and age of the Tiriganiaq deposit. Geological Survey of Canada, Open File 7510, 19 p.

Lhotka, P.G., et Nesbitt, B.E., 1989. Geology of unmineralized and gold-bearing iron formation, Contwoyto Lake – Point Lake region, Northwest Territories, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26: 46-64.

Martin, B.H., 2005, Mineral Inventory Report (Reserves and Resources), December 31, 2004, Lupin Mine, 25 p.

Martins, S., Lobato, L., Ferreira, J., et Jardim, E., 2007. Nature and Origin of the BIF-hosted Sao Bento gold deposit, Quadrilatero Ferrifero, Brazil, with special emphasis on structural controls. *Ore Geology Reviews*, 32: 571-595.

Mathieu, L., 2013. Exploration des gîtes magmatiques cuprifères dans la Province de Grenville. Rapport, projet CONSOREM 2012-03, 49 p.

McNicoll, V., Dube, B., Biczok, J., Castonguay, S., Oswald, W., Mercier-Langevin, P., Skulski, T., et Malo, M., 2013. The Musselwhite gold deposit, North Caribou greenstone belt, Ontario: new high-precision U-Pb ages and their impact on the geological and structural setting of the deposit. *Dans : Abstracts ; Geological Association of Canada – Mineralogical Association of Canada Joint Annual Meeting, Winnipeg, Manitoba, May 2013*, v. 36, p. 142.

Moran, P., 2008. Lithogeochemistry of the Sedimentary Stratigraphy and Metasomatic Alteration in the Musselwhite Gold Deposit, North Caribou Lake Belt, Superior Province, Canada: Implications for Deposition and Mineralization. M.Sc. Thesis, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, 411 p.

Oswald, W., Castonguay, S., Dube, B., McNicoll, V.J., Biczok, J., Malo, M., and Mercier-Langevin, P., 2015a. Geological setting of the world-class Musselwhite gold Mine, Superior Province, northwestern Ontario, and implications for exploration, *Dans: Targeted Geoscience Initiative 4 : Contributions to the Understanding of Precambrian Lode Gold Deposits and Implications for Exploration*, (ed.) B. Dube and P. Mercier-Langevin; Geological Survey of Canada, Open File 7852, p. 69–84.

Oswald, W., Castonguay, S., Dube, B., McNicoll, V.J., Biczok, J., Malo, M., et Mercier-Langevin, P., 2015b. New insights on the geological and structural settings of the

Musselwhite banded iron formation-hosted gold deposit, North Caribou greenstone belt, Superior Province, Ontario; Geological Survey of Canada, Current Research 2015-3, 19 p.

Oswald, W, Castonguay, S., Dube, B., Mercier-Langevin, P., Malo, M., Biczok, J., et McNicoll, V., 2014. Targeted Geoscience Initiative 4. Lode gold deposits in ancient deformed and metamorphosed terranes: detailed mapping of key stripped outcrops in the Musselwhite Mine area, Northwestern Ontario, and implications for the geological and structural setting of the gold mineralization, *Dans*: Summary of Field Work and Other Activities 2014; Ontario Geological Survey, Open File Report 6300, p. 42-1 to 42-15.

Pearson, V., 2007. Fertilité des petites ceintures de roches vertes archéennes. Rapport, projet CONSOREM 2004-01, 134 p.

Percival, J.A., 2007. Geology and metallogeny of the Superior Province, Canada, in Goodfellow, W.D., ed., Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, p. 903-928.

Perreault, S., et Hynes, A., 1990. Tectonic evolution of the Kuujuaq terrane, New Quebec orogen. *Geoscience Canada*, 17: 238-240.

Phillips, G., Groves, D., et Martyn, J., 1984. An epigenetic origin for Archean banded iron-formation-hosted gold deposits. *Economic Geology*, 79: 162-171.

Rafini, S., 2014. Typologie des minéralisations aurifères associées à la Faille de Cadillac. Rapport, projet CONSOREM 2011-01 et 2012-01, 45 p.

Rafini, S., 2015. Évaluation de l'efficacité des différentes techniques de géochimie de l'environnement secondaire. Rapport, projet CONSOREM 2012-04, 36 p.

Ravenelle, J.F., Dubé, B., Malo, M., McNicoll, V., Nadeau, L., et Simoneau, J., 2010. Insights on the geology of the world class Roberto gold deposit, Éléonore property, James Bay area, Québec. Geological Survey of Canada, Current Research, vol. 2010-01, 26 p.

Ribeiro, L., Oliveira, G., et Friedrich, G., 2007. The Archean BIF-Hosted Cuiaba gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 32:-3-4, pp. 543-570.

Ridler, R., 1970. Relationship of mineralization to volcanic stratigraphy in the Kirkland-Larder Lakes area, Ontario. Geological Association of Canada Annual Meeting, Proceedings, 21: 33-42.

Robert, F., Brommecker, R., Bourne, B.T., Dobak, P.J., McEwan, C.J., Rowe, R.R., et Zhou, X., 2007. Models and Exploration Methods for Major Gold Deposit Types. *Dans* : Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral

Exploration, edited by B. Milkereit. Ore Deposits and Exploration Technology, Paper 48, pp. 691-711.

Saager, R., Oberthuer, T., et Tomschi, H., 1987. Geochemistry and mineralogy of banded iron-formation-hosted gold mineralization in the Gwanda greenstone belt, Zimbabwe. *Economic Geology*, 82: 2017-2032.

Sauvé, P., et Bergeron, R., 1965. Régions des lacs Gérardo et Thévenet. Ministère des richesses naturelles du Québec. Rapport RG-104, 124 p.

Sauvé P., Blanchet P., Blouin J.-Y., Champagne M., et Leclerc A., 1987. Géologie de la mine d'or Chimo. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. Rapport MB 87-05, 59 p.

Slack, J., Grenne, T., Bekker, A., Rouxel, O., et Lindberg, P., 2007. Suboxic deep seawater in the Late Paleoproterozoic: Evidence from hematitic chert and iron formation related to seafloor-hydrothermal sulfide deposits, central Arizona, USA. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 243-256.

Thurston, P., Osmani, I. et Stone, D., 1991. Northwestern Superior Province: review and terrane analysis, *Dans: Geology of Ontario, Special Volume 4, Part 1*, (ed.) P.C. Thurston, H.R. Williams, R.H. Sutcliffe, and G.M. Stott; Ontario Geological Survey, p. 80–142.

Trépanier, S., 2006. Identification de domaines géochimiques à partir des levés régionaux de sédiments de fond de lac – Phase 2. Rapport, projet CONSOREM 2005-06, 74 p.

Wardle, R.J., James, D.T., Scott, D.J., et Hall, J., 2002. The southeastern Churchill Province: synthesis of a Paleoproterozoic transpressional orogeny. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39: 639-663.

Wares, R., Berger, J., et St-Seymour, K., 1988. Synthèse métallogénique des indices de sulfures au nord du 57^{ème} parallèle (Étape I), Fosse du Labrador. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. Rapport MB 88-05, 186 p.

Wares, R., et Goutier, J., 1989. Métallogénie des indices de sulfures au nord du 57^{ème} parallèle, Fosse du Labrador. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. Rapport MB 89-38, 114 p.

Wares, R., et Goutier, J., 1990. Synthèse métallogénique des indices de sulfures au nord du 57^{ème} parallèle – Fosse du Labrador. Rapport intérimaire, étape III. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. Rapport MB 90-25, 103 p.

Zaleski, E., Henderson, J.R., Corrigan, D., Jenner, G.A., Kjarsgaard, B.A., et Kerswill, J.A., 1997. Preliminary results of mapping and structural interpretation from the Woodburn project, western Churchill Province, Northwest Territories, *Dans: 1996 Exploration Overview*; Northwest Territories Geoscience Office, p. 3.43–3.44.

ANNEXE A : ÉVALUATION DU SIGNAL MAGNETIQUE LE LONG D'UNE FORMATION DE FER AURIFERE A MEADOWBANK, NUNAVUT

La présente annexe tente d'apporter une réponse à une question régulièrement soulevée lorsqu'il s'agit d'explorer pour l'or dans les formations de fer. Le postulat à l'origine de ce questionnement est le suivant : la susceptibilité magnétique de la magnétite étant largement supérieure à celle des sulfures (**Tableau 1**), le processus de démagnétisation au profit des sulfures devrait se traduire par des creux du signal magnétique le long des formations de fer en présence de sulfures. L'évaluation a donc pour but de savoir dans quelle mesure ce postulat peut être efficacement utilisé pour trouver des zones sulfurées, favorables à l'or.

Tableau A-1 1: Susceptibilité magnétique des minéraux, d'après Landry (2014).

Roche/Minéral	Susceptibilité magnétique (10 ⁻³ SI)
Pyrrhotite	0 - 150
Pyrite	0,1
Magnétite	300 - 1600

La méthode utilisée confronte, en section longitudinale, les profils du champ magnétique et des teneurs en or. Ces deux informations proviennent de l'équipe technique de Mines Agnico-Eagle. Les données en or proviennent de sondages au diamant, dont la majorité est dans les 200 premiers mètres de forage. Pour l'exercice, nous avons effectué une moyenne des teneurs en or par tranche de 100 m. Une projection des teneurs en or et du champ magnétique total, illustrée par une longitudinale dans la formation de fer hôte du gisement de Meadowbank, est présentée à la **Figure 1**. Ce profil a été réalisé avec le logiciel Oasis Montaj de Geosoft®. Dans la fosse Goose, les teneurs en or sont plus élevées qu'à l'extérieur, ce qui est en accord avec les attentes. Le champ magnétique total, pour sa part, diminue d'environ 15 % dans les zones minéralisées par rapport à sa valeur (en nT) dans le secteur sud qui est non minéralisé. À l'exception d'un soubresaut local, et modeste, le champ magnétique total a bien une tendance à la baisse en s'approchant des zones minéralisées, alors que le contenu d'or a une tendance à la hausse.

Sur le site d'étude de Meadowbank, le postulat de la relation inverse entre le champ magnétique total et le contenu en or (et sulfures) semble être validé. Bien qu'il y ait des limites quant à la performance de cette approche, il pourrait s'agir d'un nouvel outil intéressant pour reconnaître les zones sulfurées le long d'une formation de fer. Un exercice similaire sur d'autres formations de fer aurifères pourrait permettre de mieux tester cet outil.

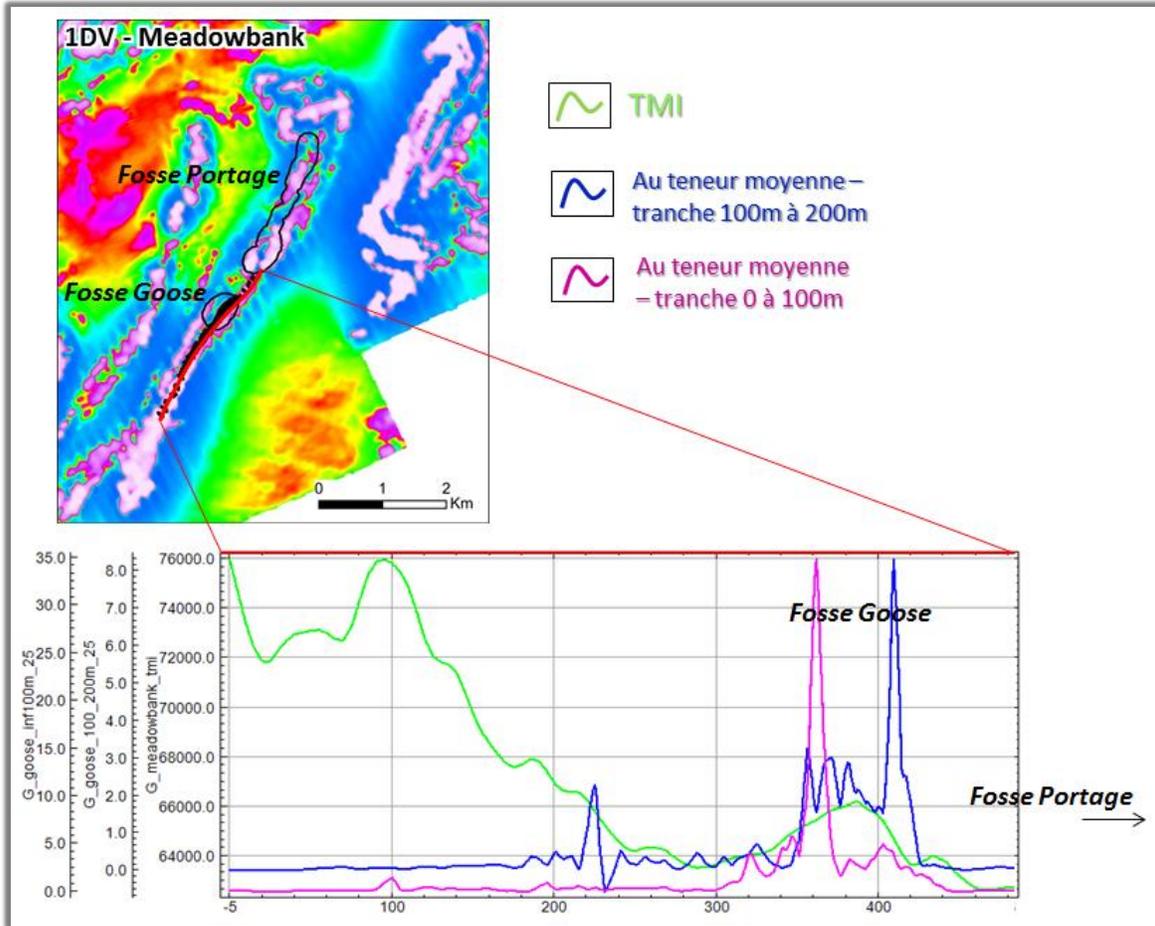


Figure A-1 1: Profil longitudinal le long d'une formation de fer dans le secteur de la mine Meadowbank. Carte de 1^{ère} dérivée verticale et teneurs en or d'après Agnico-Eagle.