
Empreinte hydrothermale au toit de sulfures massifs volcanogènes

Projet 2007-05

Par : Hugues Longuépée

Juin 2009



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 et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

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 :

Longuépée, H. 2009. Empreinte hydrothermale au toit de sulfures massifs volcanogènes. Rapport du projet CONSOREM 2007-05, 33 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@ugac.ca

Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Ce projet porte sur l'altération hydrothermale au toit des sulfures massifs volcanogènes (SMV). L'altération hydrothermale des SMV est relativement bien comprise au mur des amas minéralisés, mais le toit est généralement moins documenté. L'objectif du projet est donc de déterminer s'il y a une altération détectable au toit des amas mis en place par des processus strictement exhalatifs et où il y a absence de télescopage. Après l'examen de plusieurs banques de données disponibles parmi les partenaires du CONSOREM sur des secteurs permettant de tester l'hypothèse, la sélection s'est arrêtée sur le camp minier de Matagami bien connu pour ses gisements volcanogènes et qui possède une vaste base de données lithogéochimiques générée à partir de nombreux forages.

Les données lithogéochimiques disponibles de la compagnie Xstrata Zinc ont été traitées afin de déterminer 43 indicateurs d'altération répertoriés dans la littérature et calculés à partir d'outils CONSOREM. Les analyses ont été représentées par surface d'interpolation 3D, ceci par tranches successives au-dessus de l'horizon porteur de la minéralisation, soit la Tuffite clé. Les résultats montrent qu'une altération hydrothermale de faible étendue est détectable jusqu'à environ 30 mètres au-dessus des gisements du camp de Matagami. Cette altération est plus étendue là où il y a télescopage et est à ce moment relativement similaire à celle du mur. Le meilleur discriminant toit / mur correspond à des fortes anomalies positives en MnO.

TABLE DES MATIERES

Avertissement	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
liste des figures	iii
Liste des tableaux	vii
1 Problématique.....	1
2 OBJECTIF.....	2
3 SITE D'ÉTUDE.....	4
4 GÉOLOGIE DU CAMP DE MATAGAMI	4
5 MÉTHODOLOGIE	7
6 RÉSULTATS.....	11
6.1 Variations stratigraphiques.....	11
6.2 Modèles 3D.....	14
7 INDEX D'ALTÉRATION COMBINÉ	24
8 DISCUSSIONS ET REMARQUES	29
9 CONCLUSION	30
REMERCIEMENTS.....	31
RÉFÉRENCES.....	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte géologique régionale de la Sous-province de l'Abitibi avec la localisation de la région de Matagami (Modifiée de Chown <i>et al.</i> 1992).....	5
Figure 2. Carte géologique de la région de Matagami montrant l'Anticlinal de Galinée (ligne tiretée). Les carrés rouges montrent la localisation des diverses mines de la région et l'encadré noir montre approximativement la zone étudiée dans le cadre du présent projet. Source : Xstrata zinc	6

Figure 3.	Section du flanc sud de l'anticlinal de Galinée montrant la stratigraphie de l'empilement volcanique de la région de Matagami et la position du gisement Bell Allard. La Tuffite clé sensu-stricto se limite au niveau entre la rhyolite du lac Watson et les basaltes de la Formation de Wabassée. Modifiée d'une figure fournie par Xstrata zinc.	6
Figure 4.	Schéma montrant les diverses tranches (zones tampons) pour lesquelles l'intensité de l'altération a été mesurée. Basé sur la stratigraphie du gisement de Bell-Allard Sud, l'étoile représente le gisement et indique le niveau 0. Les lithologies correspondent à celles identifiées à la Figure 3.	9
Figure 5.	Localisation des échantillons (points bleu) et de divers gisements du camp de Matagami par rapport au niveau repère (base de la Tuffite clé). Vue dans la direction 022° avec plongée à 41° (données fournies par Xstrata zinc).....	10
Figure 6.	Variations stratigraphiques composites d'un ensemble d'échantillons proximaux au gisement d'Ilse-Dieu représenté selon différentes tranches (zones tampons). À gauche l'indice d'Ishikawa, au centre, la valeur mesurée (%) en Na ₂ O et à droite la valeur mesurée en MnO. Le gisement se situe au niveau de l'étoile rouge soit le long de l'horizon de Tuffite clé en orange. L'encadré en tirets rouges indique l'étendue des valeurs des différents indices dans les zones non minéralisées du camp de Matagami. Les lignes en tirets bleu représentent des limites possibles de certaines zones d'altération. La stratigraphie est basée sur le forage IM86-32. Les barres épaisses noires horizontales représentent les valeurs comprises entre les 5 ^e et 95 ^e centiles des échantillons proximaux tombant dans la tranche représentée tandis que la ligne centrale noire représente la valeur moyenne.	12
Figure 7.	Variations stratigraphiques composites d'un ensemble d'échantillons proximaux au gisement Bell-Allard Sud représenté selon différentes tranches (zones tampons). Le gisement se situe au niveau de l'étoile rouge soit le long de l'horizon de Tuffite clé en orange. Voir la Figure 6 pour les explications sur la symbolique utilisée. La stratigraphie est basée sur le forage IM86-32.....	13
Figure 8.	Variations stratigraphiques composites d'un ensemble d'échantillons proximaux au gisement Orchan-West représenté selon différentes tranches (zones tampons). Les deux lentilles de l'indice se situent au niveau des étoiles rouges. L'horizon de Tuffite clé est en orange. Voir la Figure 6 pour les explications sur la symbolique utilisée. La stratigraphie est basée sur le forage OR-95-22A.....	14
Figure 9.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche -10 m et 0 m sous la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	15

Figure 10.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 0 m et 10 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	15
Figure 11.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 10 m et 20 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	16
Figure 12.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 20 m et 30 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	16
Figure 13.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 30 m et 40 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	17
Figure 14.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 40 m et 50 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc présence d'altération. À ce niveau, il ne reste que très peu d'évidence des gisements d'Isle-Dieu et Bell-Allard Sud.	17
Figure 15.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 50 m et 100 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc présence d'altération. À ce niveau, seul le secteur d'Orchan West montre une altération évidente.	18
Figure 16.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 100 m et 150 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	18
Figure 17.	Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 400 m et 450 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.	19
Figure 18.	Interpolation des valeurs mesurées en Na ₂ O exprimées en centiles pour les échantillons contenus dans la tranche -10 m et 0 m sous la tuffite clé. Les couleurs froides indiquent des concentrations faibles, donc la présence de lessivage du sodium.	19
Figure 19.	Interpolation des valeurs mesurées en Na ₂ O exprimées en centiles pour les échantillons contenus dans la tranche 0 m et 10 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs froides indiquent des concentrations faibles, donc la présence de lessivage du sodium.	20

Figure 20.	Interpolation des valeurs mesurées en Na ₂ O exprimées en centiles pour les échantillons contenus dans la tranche 20 m et 30 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. L'indice d'Orchan West est évident alors que celui de Bell-Allard Sud montre une zone de lessivage de superficie restreinte.....	20
Figure 21.	Interpolation des valeurs mesurées en Na ₂ O exprimées en centiles pour les échantillons situés entre 100 m et 150 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Seules deux zones de lessivage sont visibles dans la région élargie d'Orchan West et dans le secteur de Bracemac.....	21
Figure 22.	Distribution des échantillons le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West. Les échantillons situés à 25 m de part et d'autre de cette section ont été inclus dans l'interpolation.	22
Figure 23.	Variations de l'indice d'Ishikawa le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West. Un panache d'altération est identifié au-dessus de la zone d'Orchan West mais n'est pas reconnu au-dessus d'Isle-Dieu.....	23
Figure 24.	Section montrant les variations des teneurs en Na ₂ O exprimés en centiles le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West. Un panache d'altération est identifié au-dessus de la zone minéralisée d'Orchan West mais pas pour Isle-Dieu.	23
Figure 25.	Section montrant les variations des teneurs en MnO exprimés en centiles le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West.	24
Figure 26.	Exemple de distribution des échantillons dans un diagramme binaire. La distance de Mahalanobis est la distance mathématique entre un point et le centre de l'ellipse qui représente les échantillons non – altérés. Ainsi, les deux gros points sont également altérés même s'ils ne se retrouvent pas dans la même région du graphique. La distance de Mahalanobis peut se calculer dans une analyse multivariable.	25
Figure 27.	Distance de Mahalanobis calculée à partir des divers indicateurs d'altération à 30 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu est absent à cause d'un défaut dans la maille d'interpolation. Noter la présence d'une zone anormale dans le secteur du gisement de Matagami Lake et une zone où aucun gîte n'est connu (Zone X).	25
Figure 28.	Distance de Mahalanobis calculée à partir des éléments majeurs à 30 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu ne montre pas d'anomalie. Noter la présence d'une zone anormale dans le secteur du gisement de Matagami Lake.	26

- Figure 29. Distance de Mahalanobis calculée à partir de tous les éléments analysés à 30 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu ne montre qu'une petite zone anormale. Noter la présence d'une zone anormale dans le secteur du gisement de Matagami Lake et de la zone non reconnue identifiée comme Zone X. 27
- Figure 30. Distance de Mahalanobis calculée à partir de tous les éléments analysés à 50 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu ne montre qu'une petite zone anormale. Les autres zones sont présentes mais de plus faible intensité à l'exception de Bracemac où il y a plusieurs lentilles superposées sont reconnues à différents niveaux stratigraphiques. 28

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Liste de quelques gisements montrant une altération dans le toit..... 3
- Tableau 2. Liste des indicateurs d'altération mentionnés dans la littérature et testés dans le cadre du présent projet..... 8
- Tableau 3. Paramètres d'interpolation utilisés dans l'onglet variogramme de Leapfrog..... 10
- Tableau 4. Liste des indicateurs d'altération au toit jugés les plus significatifs pour les gisements et indices couverts par la zone d'étude..... 29

1 PROBLÉMATIQUE

Les minéralisations de type sulfures massifs volcanogènes (SMV) sont communément associées à des zones d'altération qui reflètent la circulation de fluides hydrothermaux dans l'empilement volcanique ou sédimentaire sous-jacent (Franklin *et al.*, 2005). Ces fluides résultent d'un système convectif à différentes échelles où les eaux marines s'infiltrent dans le substrat rocheux pour ensuite être chauffées et expulsées vers la surface via des failles synvolcaniques. Ces cellules de circulation hydrothermale engendrées par des intrusions synvolcaniques permettent le transport et le dépôt de plusieurs éléments chimiques. Le résultat de ce processus, c'est-à-dire l'empreinte de l'altération hydrothermale, est couramment utilisée en exploration minière.

Le modèle classique de circulation hydrothermale associée aux systèmes de SMV fait état d'une exhalaison de métaux sur le plancher océanique et de l'altération de l'empilement rocheux sous-jacent à ce dépôt (le mur) (*cf.* Morton et Franklin, 1987). Les épanchements de roches subséquents viennent généralement sceller le système et sont par conséquent dépourvus d'altération au toit du dépôt.

Cependant, il existe d'autres variantes de minéralisations de type SMV où la minéralisation se met en place par remplacement au sein de séquences plus poreuses souvent dominées par des roches volcanoclastiques (Doyle et Allen, 2003). Dans ces cas, l'altération est plutôt concordante et se retrouve aussi bien dans le mur que dans le toit de la minéralisation.

Il existe aussi des cas où la minéralisation est interprétée exhalative et où une empreinte d'altération dans le toit du sulfure massif est reconnue (**Tableau 1**). On invoque pour ces cas, la persistance du système hydrothermale le long de failles synvolcaniques qui vont rejouées. La distribution spatiale de cette altération est toutefois mal définie dans les modèles et l'étude de l'altération au toit demeure un des défis à relever dans l'étude des SMV (Franklin *et al.*, 2005).

Donc, indépendamment des modèles de formation des lentilles de sulfures massifs, il demeure que la reconnaissance de l'empreinte de l'altération hydrothermale s'est traditionnellement faite dans les épontes sous-jacentes constituant le mur du dépôt de

SMV. La question qui se pose est donc de définir l’empreinte de l’altération dans le toit en termes de caractéristiques chimiques et de distribution spatiale (dimension).

2 OBJECTIF

L’objectif du projet est de définir une méthodologie qui permet de reconnaître l’empreinte d’altération spécifique au toit de sulfures massifs volcanogènes et d’établir les caractéristiques de cette signature afin de pouvoir l’utiliser dans le cadre de campagnes d’exploration.

Tableau 1. Liste de quelques gisements montrant une altération dans le toit.

Gisement	Distance altération reconnue dans Toit	Minéralogie	Gain	Perte	Processus proposé	Référence
Fukazawa	250 m	Zéo, Mont, Ser, Chl	Na	K	Remplacement	Date <i>et al.</i> , 1983
Millenbach	25 m	Ab, Ser, Ca-amp			Réactivation de la structure syn-volcanique	Riverin et Hodgson, 1980
Kristineberg	2000 m	Calc-sil Chl, Ser, Py, Qtz, Mus			réactivation de la structure syn-volcanique	Hannington <i>et al.</i> , 2003
Heath Steele B	50 m	Chl, Ser, Py	Fe, Mg, Mn, S, Ba	Na, K, Ca, Rb, Sr	Exhalaison sur le plancher océanique	Lentz <i>et al.</i> , 1997
Bathurst		Phen, Chl			Exhalaison sur le plancher océanique	Galley <i>et al.</i> , 2007
Horne		Qtz, Ser	Si, K, Rb, Ba	Na, Ca, Sr	Remplacement	MacLean et Hoy, 1991
Corbet	300 m	Chl, Ser, Ab, Qtz	Fe, Mg, K	Si, Ca, Na	Remplacement	Barrett <i>et al.</i> 1993a Gibson <i>et al.</i> , 1993
Mobrun	100 m	Qtz, Ser, Chl, Py	Si, K, Rb, Fe, Mg	Na (?) Si (?)	Réactivation de la structure syn-volcanique	Barrett <i>et al.</i> , 1992
Ansil	300 m	Chl, Qtz, Mag	Fe, Mg, K, Rb, Zn, Cu	Na, Ca, Sr	Réactivation de la structure syn-volcanique	Barrett <i>et al.</i> , 1991
Delbridge		Qtz, Ser	Si, K	Na, Ca	Exhalaison sur le plancher océanique	Barrett <i>et al.</i> , 1993b
Rosebury	200 m	Mn, Carb, Ser, Na-mica	Na, Ba/Sr, Tl		Remplacement	Large <i>et al.</i> , 2001
Hellyer	200 m	Fuch, Chl, Carb, Qtz, Ab, Ser	Ca, K, Na, Cr, V, Ni	Fe, Mn, Mg, P	Exhalaison sur le plancher océanique	Gemmel et Fulton, 2001
777	910 m		Ni, Cr, Tl, Mo, Sb, Si, Rb, Au, Pb, Cu, Hf, Ce, Cl, Hg, Zn, Pb		Exhalaison sur le plancher océanique	Tardif, 2003

Il peut y avoir zonalité de l'altération; voir les références pour les détails. Zéo = zéolite, Mont = montmorillonite, Ser = séricite, Chl = chlorite, Ab = albite, Ca-amp = amphibole calcique, Calc-sil = calco-silicates, Py = pyrite, Qtz = quartz, Mus = muscovite, Phen = phengite, Mag = magnétite, Mn-carb = carbonates de manganèse, Fuch = fuchite, Carb = carbonates.

3 SITE D'ÉTUDE

Le camp minier de Matagami se révèle le site tout indiqué pour réaliser cette étude à cause de ses nombreux dépôts de SMV, son degré de connaissance et surtout la disponibilité d'une vaste banque de données lithogéochimiques tridimensionnelles générées à la faveur d'une multitude de forages (données de X-Strata Zn).

Afin d'atteindre l'objectif proposé, une étude géochimique d'un gisement de type SMV se devait d'être réalisée. Idéalement, il aurait été souhaitable d'utiliser un gisement avec les caractéristiques suivantes :

- 1) Idéalement formé par exhalaison de fluides hydrothermaux et non par remplacement,
- 2) Situé dans une zone où il n'y a pas ou peu d'empilement (« stacking ») afin de ne pas confondre toit de la lentille et le mur d'une lentille sus-jacente et,
- 3) ne pas être associé à une faille syn-volcanique montrant des évidences de réactivation.

De plus, une banque de données lithogéochimiques se doit d'être disponible pour le secteur choisi. Pour ces raisons, le choix s'est arrêté sur le secteur de Matagami dont certains gisements présentent, avec le niveau actuel de connaissances, certaines des caractéristiques recherchées bien que le débat sur le remplacement soit en cours au moment de la réalisation de ce projet (Dominique Genna, Ph.D en cours UQAC).

4 GÉOLOGIE DU CAMP DE MATAGAMI

La région de Matagami est localisée dans la partie centrale nord de la Sous-province archéenne de l'Abitibi (**Figure 1**). On y retrouve le Complexe de la Rivière Bell, une vaste intrusion mafique litée synvolcanique au premier cycle volcanique reconnu pour l'Abitibi (Chown *et al.*, 1992) considéré comme moteur hydrothermal probable pour les minéralisations en SMV.

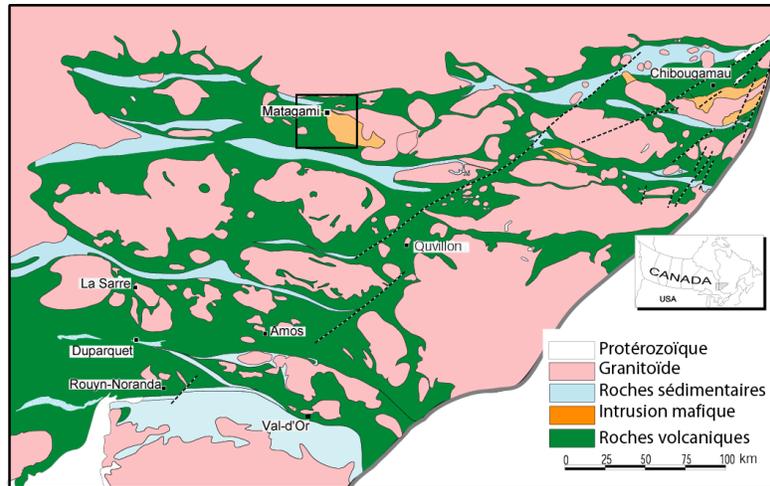


Figure 1. Carte géologique régionale de la Sous-province de l'Abitibi avec la localisation de la région de Matagami (Modifiée de Chown *et al.* 1992).

L'Anticlinal de Galinée occupe le cœur du Complexe de la Rivière Bell (**Figure 2**). Sur les flancs nord et sud de cette structure se retrouve une séquence volcanique composée de rhyolites, de volcanoclastites et de basaltes. Le flanc Nord présente un degré de déformation plus élevé et les pendages des unités sont abrupts. Sur le flanc Sud toutefois, les unités sont bien préservées et possèdent un pendage modéré vers le sud-ouest (**Figure 3**). Au sein de la séquence stratigraphique on reconnaît la rhyolite de Watson Lake qui constitue le mur des minéralisations. Cette rhyolite est surmontée par un horizon repère significatif connu sous le nom de Tuffite clé (KT) dont la puissance varie de quelques centimètres à 6 m d'épaisseur (Liaghat et MacLean, 1992). Au-dessus de la Tuffite clé se retrouve la Formation de Wabassee composée de basalte localement intercalé de rhyolite (Rhyolite Supérieure et Rhyolite de Bracemac) et de minces niveaux discontinus de tuffite. Des filons-couches de gabbro et quelques dykes felsiques sont également présents dans la séquence.

Le camp minier de Matagami est l'hôte de plusieurs gîtes et mines de zinc, exploitées ou en exploitation. À l'exception des mines de Bracemac et de McLeod, tous les gisements du camp minier de Matagami sont situés le long de la Tuffite clé. L'indice d'Orchan West se situe pour sa part à environ 100 m au-dessus de la tuffite. Aucun empilement (stacking) n'a été identifié à l'exception de celui du secteur de Bracemac – MacLeod.

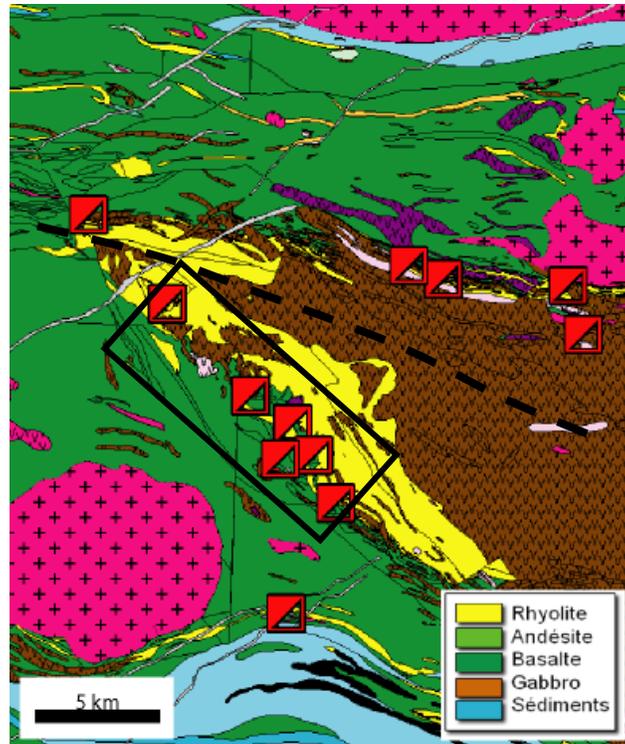


Figure 2. Carte géologique de la région de Matagami montrant l'Anticlinale de Galinée (ligne tiretée). Les carrés rouges montrent la localisation des diverses mines de la région et l'encadré noir montre approximativement la zone étudiée dans le cadre du présent projet. Source : Xstrata zinc

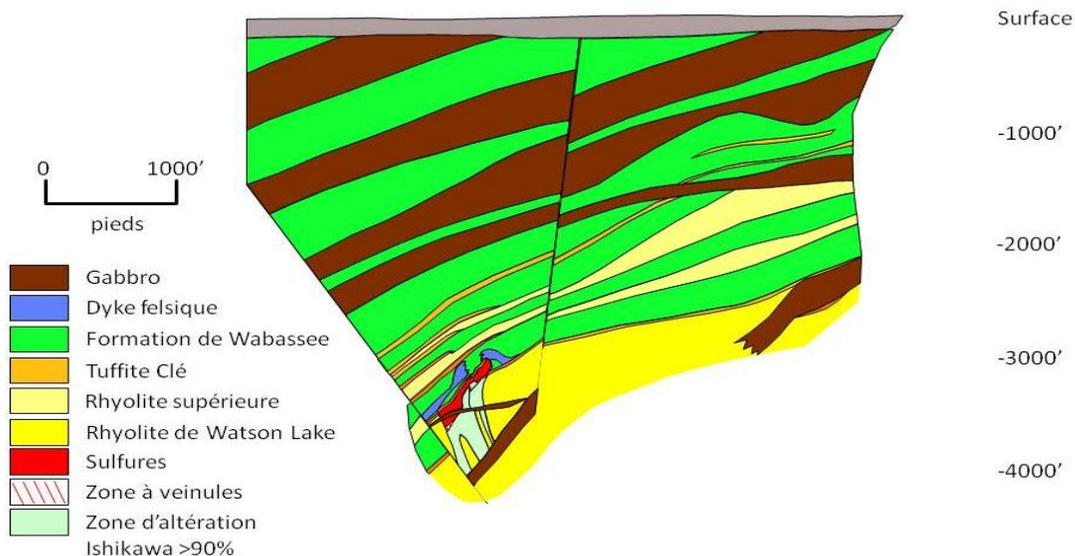


Figure 3. Section du flanc sud de l'anticlinal de Galinée montrant la stratigraphie de l'empilement volcanique de la région de Matagami et la position du gisement Bell Allard. La Tuffite clé sensu-stricto se limite au niveau entre la rhyolite du lac Watson et les basaltes de la Formation de Wabasseé. Modifiée d'une figure fournie par Xstrata zinc.

5 MÉTHODOLOGIE

Afin de définir la présence d'altération hydrothermale dans les roches volcaniques du toit des lentilles de sulfures massifs volcanogènes, plusieurs indices d'altération ont été calculés et plusieurs valeurs d'éléments mesurés ont été utilisés au sein des roches volcaniques (**Tableau 2**). Comme l'altération hydrothermale s'exprime de façon différente selon le type de roche, les indices d'altération ont été normalisés selon une méthode de Trépanier (2011) afin d'éliminer la contribution lithologique. La formule utilisée est la suivante :

$$\text{Valeur normalisée} = (\text{valeur mesurée}_{\text{litho X}} - \text{moyenne}_{\text{litho X}}) / \text{écart-type}_{\text{litho X}}$$

Ainsi, les valeurs normalisées d'une lithologie X peuvent être comparées à celles d'une lithologie Y (Trépanier 2011).

Les résultats pour le mur et le toit ont été comparés pour plusieurs gisements du flanc sud afin de définir la présence ou l'absence de différence dans le type et l'intensité de l'altération. La comparaison a été faite pour différentes tranches ou zones tampons situées à une certaine distance au-dessus et en-dessous de l'amas sulfuré (**Figure 4**). Ces tranches (zones tampons) sont d'épaisseur variable mais sont de 10 m près de l'horizon repère que constitue la Tuffite clé puis sont d'épaisseur plus grande en s'éloignant du niveau repère. Tous les échantillons tombant dans la tranche ou la zone tampon sélectionnée ont été considérés et représentés sur une même surface composite. Les comparaisons ont été réalisées à partir des valeurs absolues (normalisées) et aussi à partir des valeurs exprimées en centiles. Afin de déterminer l'étendue de l'altération présente, une modélisation en trois dimensions du secteur d'étude a également été réalisée à partir des mêmes échantillons (**Figure 5**).

Les données ont été modélisées grâce au logiciel Leapfrog. L'interpolation s'est faite dans un modèle linéaire et par krigeage dont les paramètres sont listés au **Tableau 3**.

Tableau 2. Liste des indicateurs d'altération mentionnés dans la littérature et testés dans le cadre du présent projet.

BMR ¹	Éléments mesurés ²	Normat ³	Ratios ⁴
CaO	Ba	Ankérite	Index Chlorite
Fe ₂ O ₃	Cu	Calcite	(Fe+Mg) / (Na+Ca)
K ₂ O	MnO	Fe-chlorite	Hashigushi
MgO	Na ₂ O	Mg-chlorite	Hashimoto
Na ₂ O	P ₂ O ₅	Dolomite	Ishikawa
SiO ₂	Rb	Épidote	(Mg+K) / (Na+Ca)
Total	Y	IAB	PER alcalin
	Zn	ICD	PER mafique
	Zr	ICHLO	Index Séricite
		IFRAIS	Spitz
		IOR	
		IPAF	
		IPARA	
		IPYRO	
		ISER	
		Séricite	

¹ BMR = Bilan de masse relatif tel que développé par le Consorem (projet 2002-1B), ² Éléments mesurés = chaque élément a été modélisé selon la valeur mesurée, son expression en centile, sa valeur normalisée selon la lithologie et sa valeur normalisée exprimée en centile, ³ Normat = exprimés par la valeur Normat et la valeur Normat normalisée par la lithologie et ⁴ Ratios = valeurs calculée et normalisée en fonction de la lithologie.



Figure 4. Schéma montrant les diverses tranches (zones tampons) pour lesquelles l'intensité de l'altération a été mesurée. Basé sur la stratigraphie du gisement de Bell-Allard Sud, l'étoile représente le gisement et indique le niveau 0. Les lithologies correspondent à celles identifiées à la Figure 3.

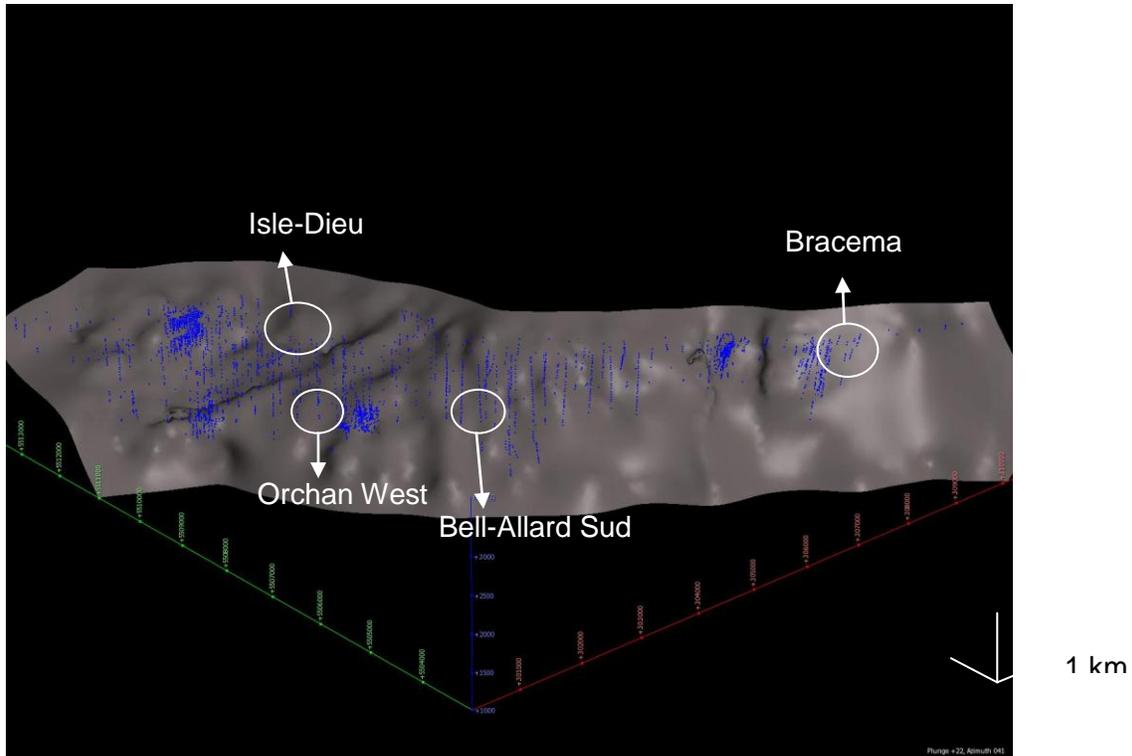


Figure 5. Localisation des échantillons (points bleu) et de divers gisements du camp de Matagami par rapport au niveau repère (base de la Tuffite clé). Vue dans la direction 022° avec plongée à 41° (données fournies par Xstrata zinc).

Tableau 3. Paramètres d'interpolation utilisés dans l'onglet variogramme de Leapfrog.

Variogramme	Tendance générale (global trend)
Direction (°)	0, 0, 0 (dip, dip azimuth, pitch)
Forme de l'ellipse	1, 1, 1
Exactitude (accuracy)	0,003
Modèle	Linéaire
Pente	1,00
Effet pépite (nugget)	0
Dérive (drift)	Constant (ordinary kriging)

6 RÉSULTATS

Chacun des indices d'altération ayant été modélisé quatre fois (valeurs mesurées, valeurs normalisées, centiles des valeurs mesurées et des centiles des valeurs normalisées) et ce pour 10 tranches ou zones tampons ou plus en dessous et au-dessus du niveau minéralisé, cela représente plus de 1 440 modèles. Donc seuls les résultats les plus significatifs seront illustrés et discutés ci-après plus en détail.

6.1 Variations stratigraphiques

Trois indices considérés efficaces pour représenter l'altération hydrothermale volcanogène ont été choisis pour comparer le comportement de l'altération pour trois gisements qui sont : 1) Isle-Dieu, 2) Bell-Allard Sud et 3) Orchan West. Les variations de ces trois indices selon les différentes tranches dans le mur et le toit des lentilles minéralisées sont représentées aux **Figures 6, 7 et 8**. Pour chaque tranche, les valeurs d'un ensemble d'échantillons considérés proximaux au gisement (- de 300 environ, voir **Figure 5**) sont statistiquement considérées. Ainsi il est possible d'obtenir des tendances basées sur la valeur moyenne, l'étendue (range) et sur les centiles ceci pour les différentes tranches considérées.

Pour le gisement Isle-Dieu (**Figure 6**), la valeur moyenne de l'indice d'Ishikawa est plus élevée dans le mur mais diminue près de l'horizon repère. Les étendues de l'indice sont toutefois très larges dans le mur par rapport à celles du toit. Aussi il est intéressant de regarder le comportement par tranche du 95^e centile de la population. Cet indicateur permet une représentation des échantillons jugés anormaux dans la tranche. La valeur du 95^e centile est élevée dans le mur se situant près de 1 et diminue vers 0,4 dans le toit. Une légère remontée de l'indice est observée à 20 m et 100 m au-dessus de la lentille. Le comportement des valeurs moyennes mesurées pour le Na₂O montre des valeurs plus basses dans le mur que dans le toit. Toutefois l'étendue des valeurs indique une forte variabilité au sein d'une même tranche ceci aussi bien dans le mur que dans le toit. Dans ce cas précis, les valeurs basses doivent être considérées soit le 5^e centile qui est plus clairement plus faible dans le mur. Également à 100 m au-dessus du gisement, une petite fluctuation est observée dans le comportement de l'indice. Les teneurs en manganèse montrent de plus grandes variations dans le mur que dans le toit bien que la

moyenne soit légèrement plus faible dans le mur. Toutefois, le 95^e centile est beaucoup plus élevé dans le mur avec des sursauts localisés à 20 et 150 m dans le toit.

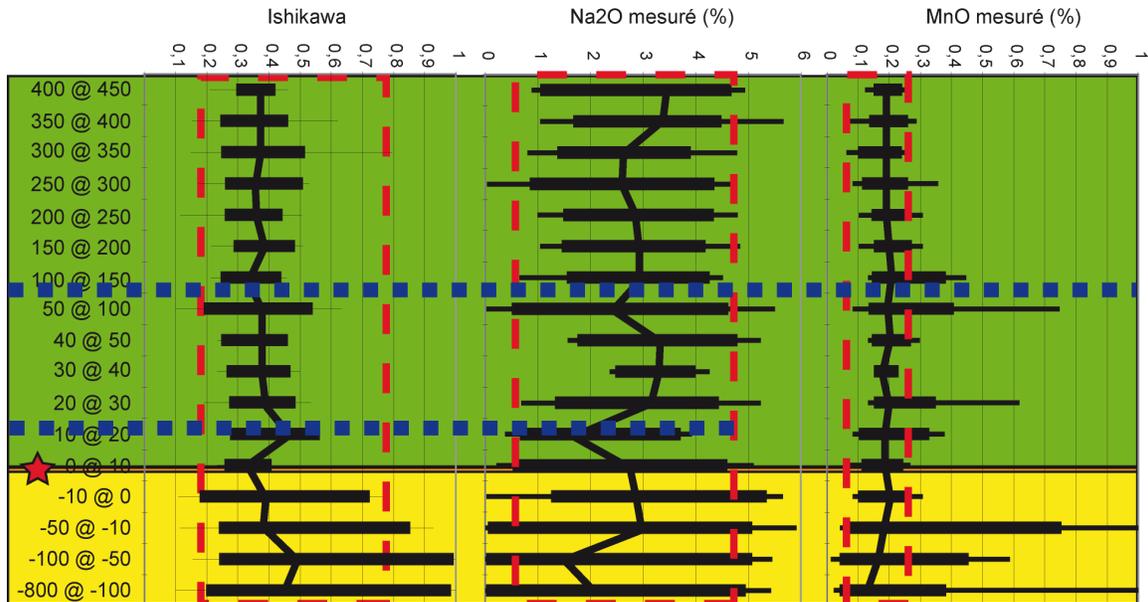


Figure 6. Variations stratigraphiques composites d'un ensemble d'échantillons proximaux au gisement d'Ilse-Dieu représenté selon différentes tranches (zones tampons). À gauche l'indice d'Ishikawa, au centre, la valeur mesurée (%) en Na₂O et à droite la valeur mesurée en MnO. Le gisement se situe au niveau de l'étoile rouge soit le long de l'horizon de Tuffite clé en orange. L'encadré en tirets rouges indique l'étendue des valeurs des différents indices dans les zones non minéralisées du camp de Matagami. Les lignes en tirets bleu représentent des limites possibles de certaines zones d'altération. La stratigraphie est basée sur le forage IM86-32. Les barres épaisses noires horizontales représentent les valeurs comprises entre les 5^e et 95^e centiles des échantillons proximaux tombant dans la tranche représentée tandis que la ligne centrale noire représente la valeur moyenne.

Pour la mine de Bell-Allard Sud (**Figure 7**), l'indice Ishikawa présente un comportement moyen présentant peu de variabilité. Toutefois le 95^e centile est plus élevé que le bruit de fond régional pour les échantillons situés dans le mur. Les valeurs élevées du 95^e centile sont également reconnues jusqu'à 40 m dans le toit et restent globalement plus élevées que le bruit de fond jusqu'à environ 200 m au-dessus de la lentille. De la même manière, le 5^e centile des valeurs mesurées en Na₂O est plus faible que le bruit de fond pour le mur et ces basses valeurs sont reconnues jusqu'à 200 m dans le toit. Finalement, les valeurs mesurées en manganèse (95^e centile) sont significativement plus hautes que le bruit de fond jusqu'à 200 m dans le toit. Bien que les teneurs en MnO

soient aussi plus élevées dans le mur par rapport au bruit de fond, les valeurs y sont moins hautes que dans le toit.

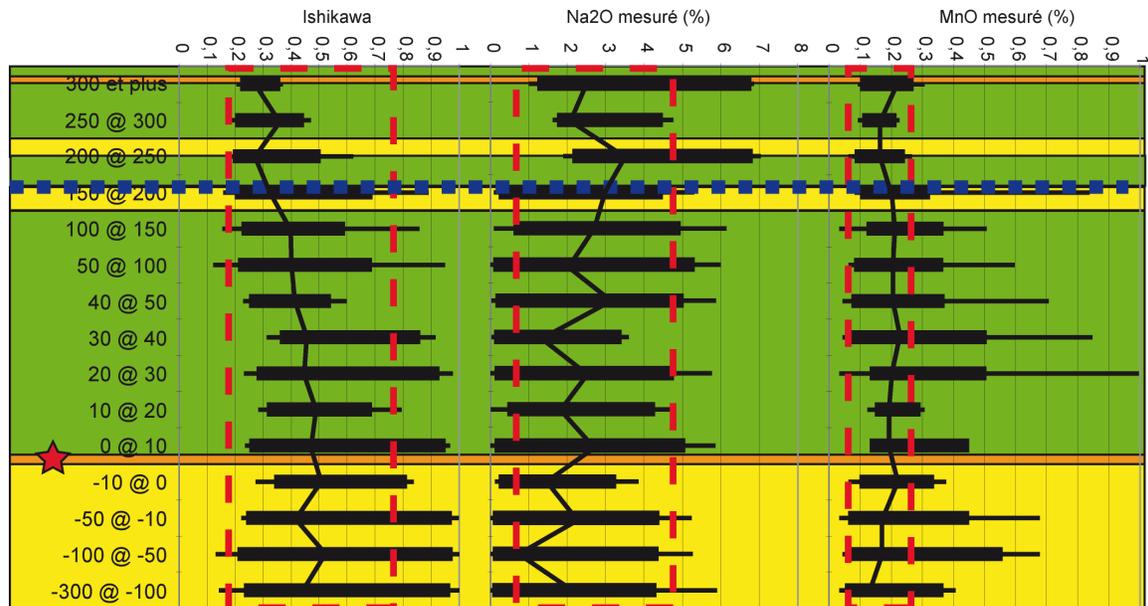


Figure 7. Variations stratigraphiques composites d'un ensemble d'échantillons proximaux au gisement Bell-Allard Sud représenté selon différentes tranches (zones tampons). Le gisement se situe au niveau de l'étoile rouge soit le long de l'horizon de Tuffite clé en orange. Voir la Figure 6 pour les explications sur la symbolique utilisée. La stratigraphie est basée sur le forage IM86-32.

Le troisième cas illustré est celui du gisement Orchan West. Ce cas est différent des deux précédents, car Orchan West constitue un gîte non exploité et se situe le long d'une structures synvolcanique reliant ce gîte aux dépôts 1, 1-A, 2a, 2b, 4 est, 4 ouest et 5 (Lavallière, 1995). Les lentilles minéralisées se situent au contact entre des basaltes de la Formation de Wabasse et de la rhyolite supérieure, à environ 100 m au-dessus de la Tuffite clé (**Figure 8**). Il n'est donc pas surprenant de détecter une altération dans les basaltes de la Formation de Wabasse. L'indice d'Ishikawa indique une altération jusqu'à 350 m au-dessus de la tuffite clé, donc 250 m au-dessus de la minéralisation. Les teneurs en Na₂O sont basses jusqu'au même niveau. Les teneurs en manganèse sont élevées autant dans le mur que le toit. Les teneurs élevées du toit se limitent toutefois à 100 m au-dessus de la minéralisation.

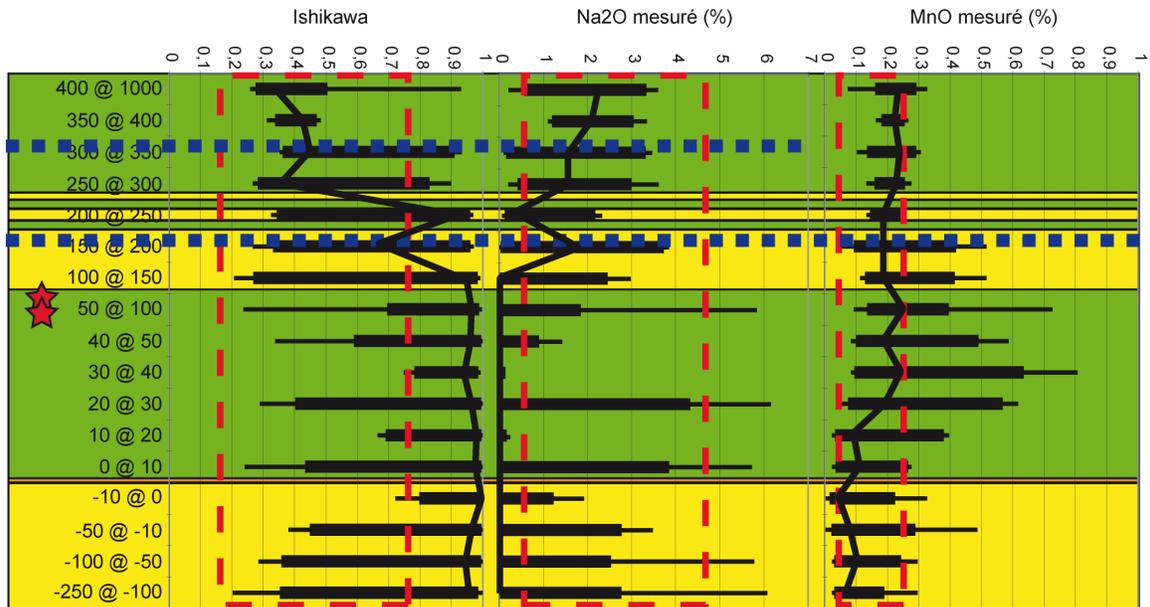


Figure 8. Variations stratigraphiques composites d'un ensemble d'échantillons proximaux au gisement Orchan-West représenté selon différentes tranches (zones tampons). Les deux lentilles de l'indice se situent au niveau des étoiles rouges. L'horizon de Tuffite clé est en orange. Voir la Figure 6 pour les explications sur la symbolique utilisée. La stratigraphie est basée sur le forage OR-95-22A.

En résumé, les données de géochimie des roches volcaniques du flanc sud de l'Anticlinal de Galinée indiquent que la zone d'altération au toit s'étend de façon relativement évidente jusqu'à 40 m au-dessus de l'horizon minéralisé et peut être retracé localement jusqu'à 200 m au-dessus des lentilles minéralisées.

6.2 Modèles 3D

La modélisation 3D a été effectuée en plusieurs tranches afin de limiter une forte interpolation dans l'axe vertical et ainsi diminuer les chances de définir de fausses anomalies au toit causées par des échantillons d'un niveau sus- ou sous-jacent à la tranche modélisée. Les **Figures 9 à 17** montrent bien l'intensité de l'altération telle que définie par l'indice d'Ishikawa pour les diverses tranches définies. Quelques exemples sont également fournis pour le Na₂O (**Figures 18 à 21**).

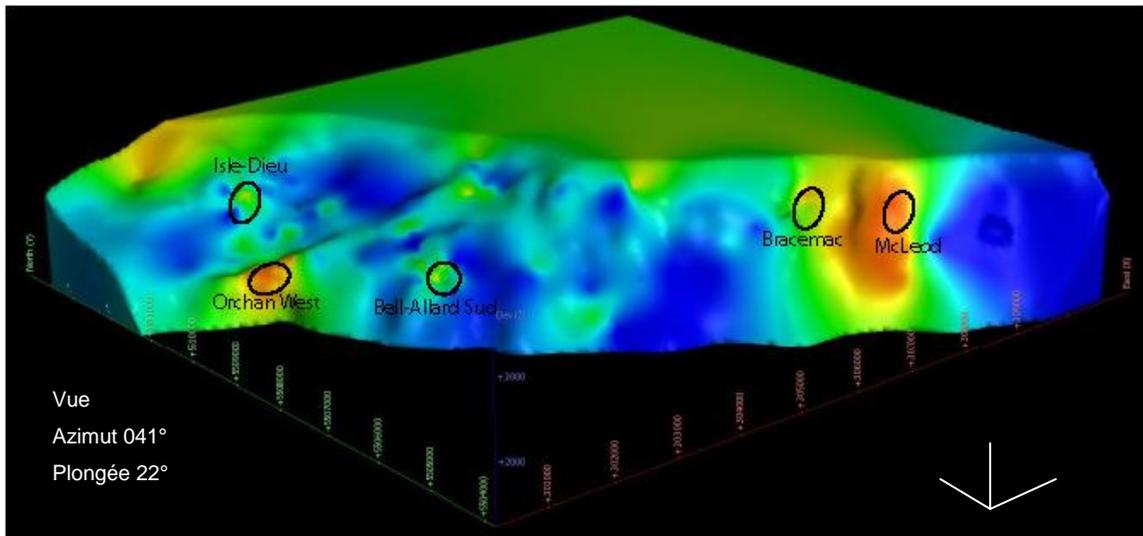


Figure 9. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche -10 m et 0 m sous la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

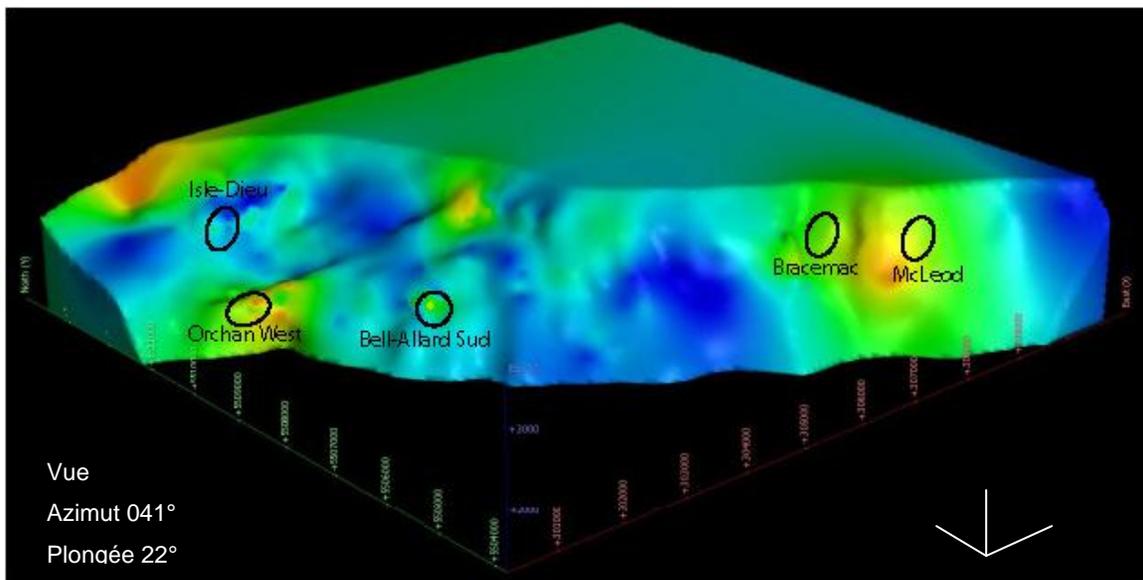


Figure 10. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 0 m et 10 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

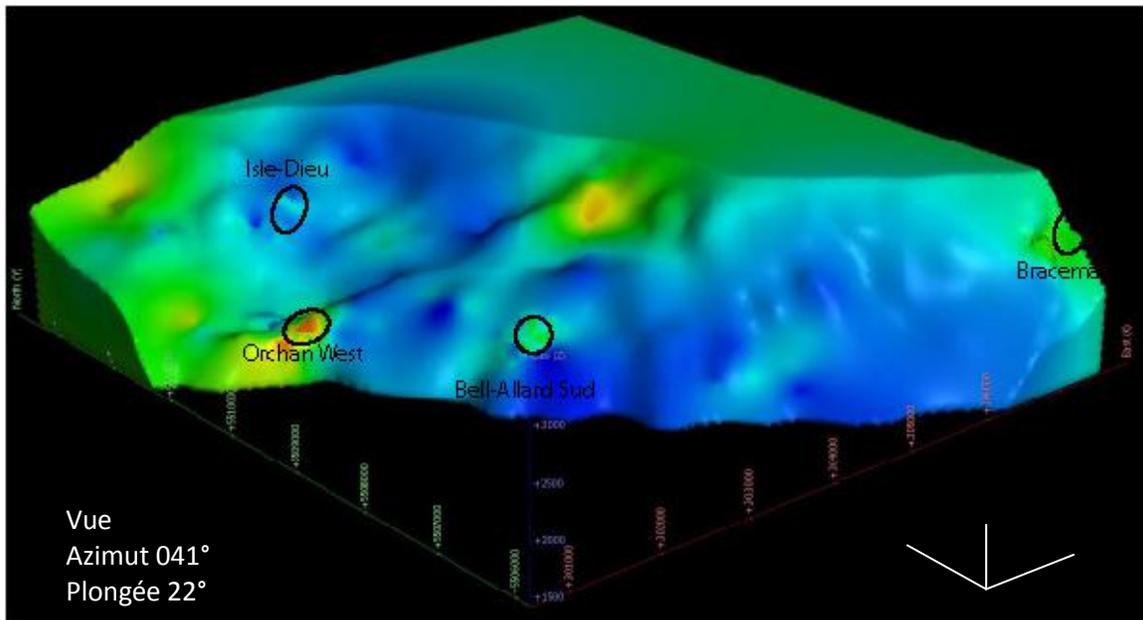


Figure 11. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 10 m et 20 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

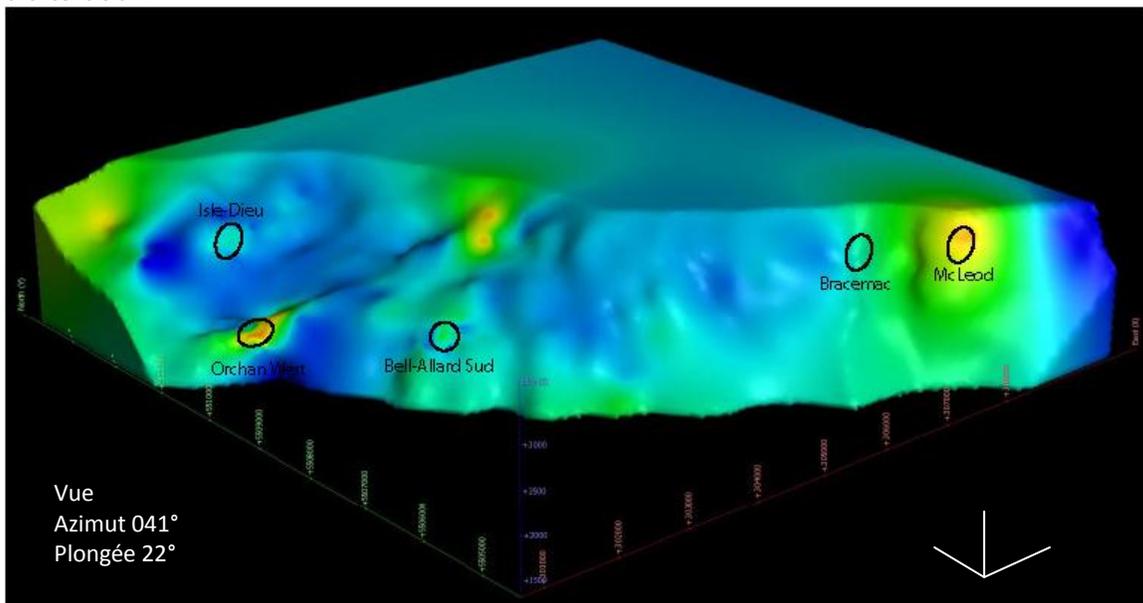


Figure 12. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 20 m et 30 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

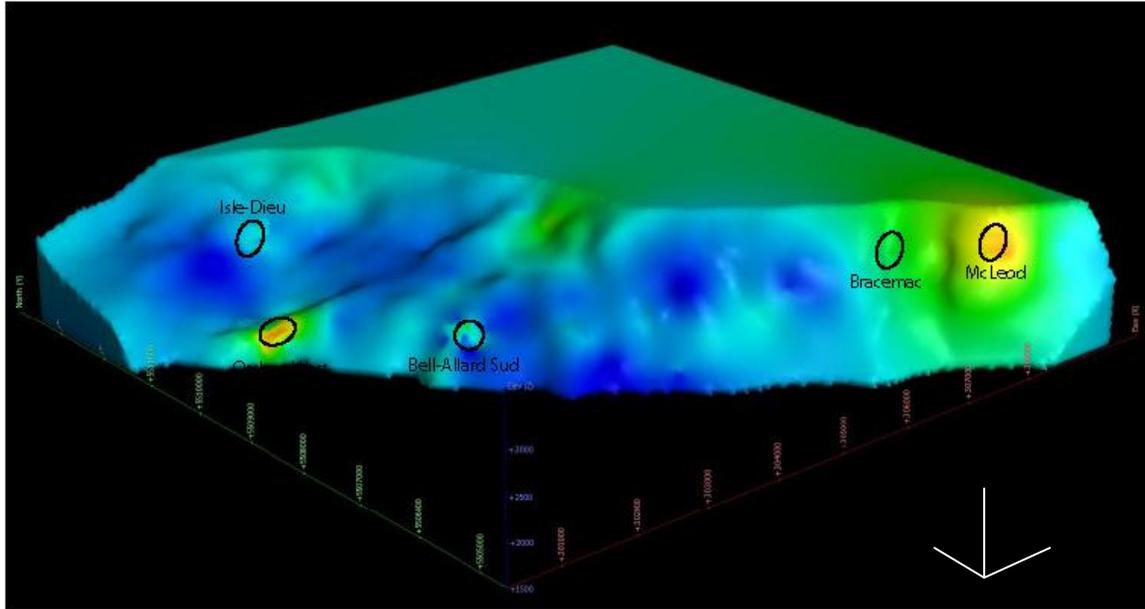


Figure 13. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 30 m et 40 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

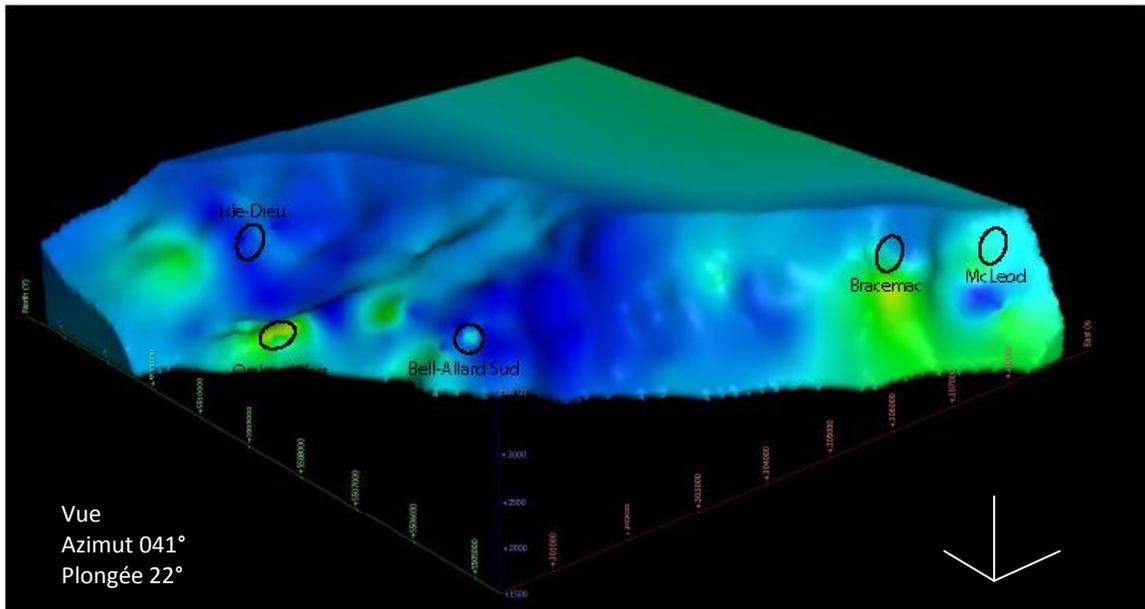


Figure 14. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 40 m et 50 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc présence d'altération. À ce niveau, il ne reste que très peu d'évidence des gisements d'Isle-Dieu et Bell-Allard Sud.

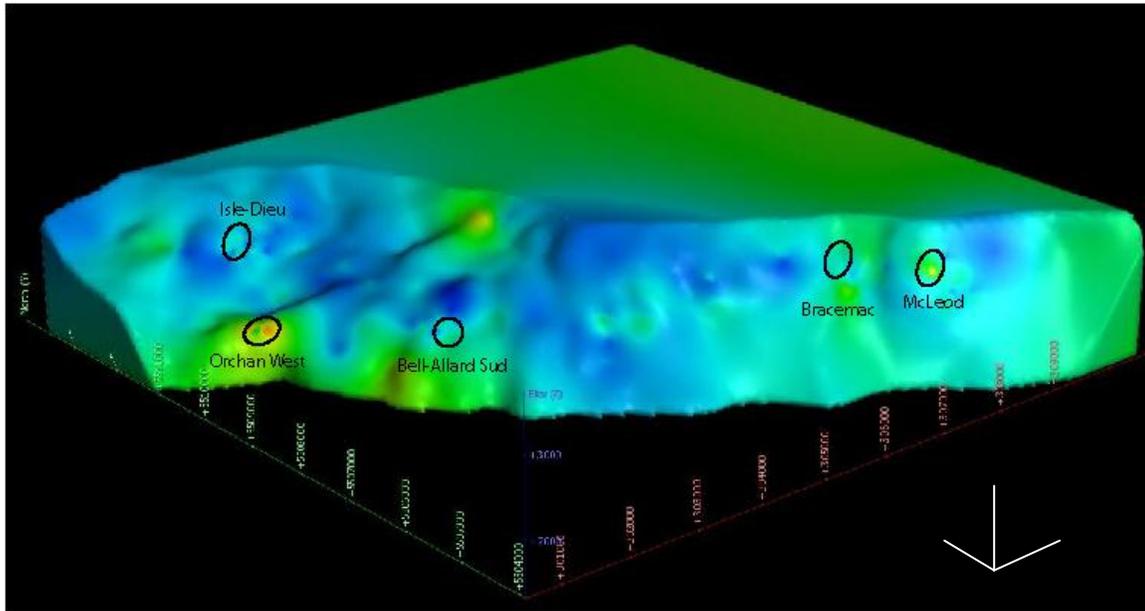


Figure 15. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 50 m et 100 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc présence d'altération. À ce niveau, seul le secteur d'Orchan West montre une altération évidente.

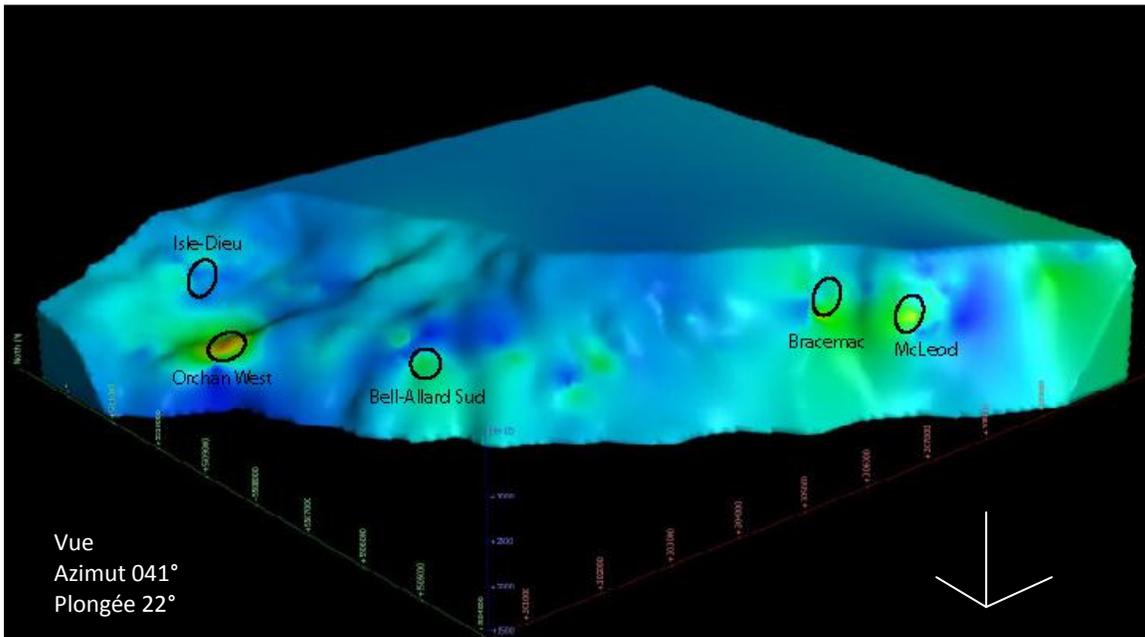


Figure 16. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 100 m et 150 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

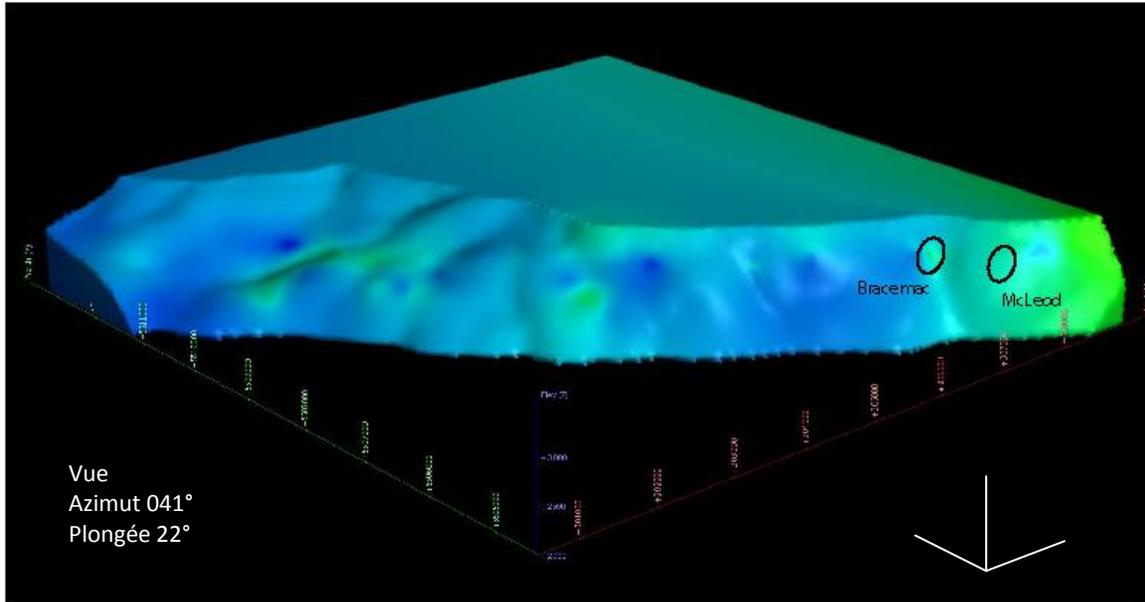


Figure 17. Interpolation de l'indice d'Ishikawa pour les échantillons contenus dans la tranche 400 m et 450 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs chaudes indiquent des indices élevés, donc la présence d'altération.

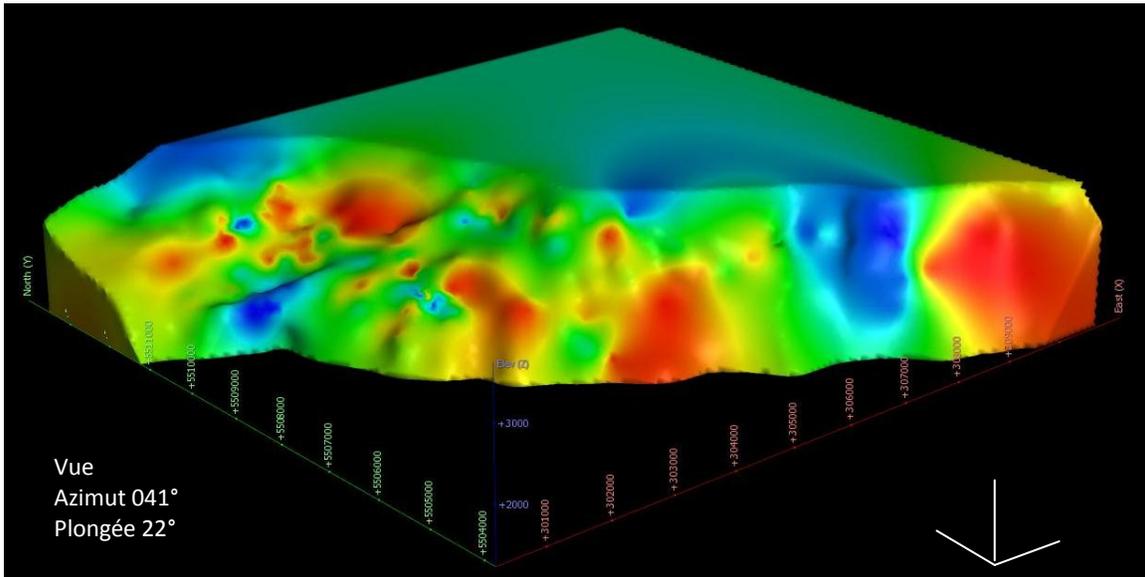


Figure 18. Interpolation des valeurs mesurées en Na_2O exprimées en centesimes pour les échantillons contenus dans la tranche -10 m et 0 m sous la tuffite clé. Les couleurs froides indiquent des concentrations faibles, donc la présence de lessivage du sodium.

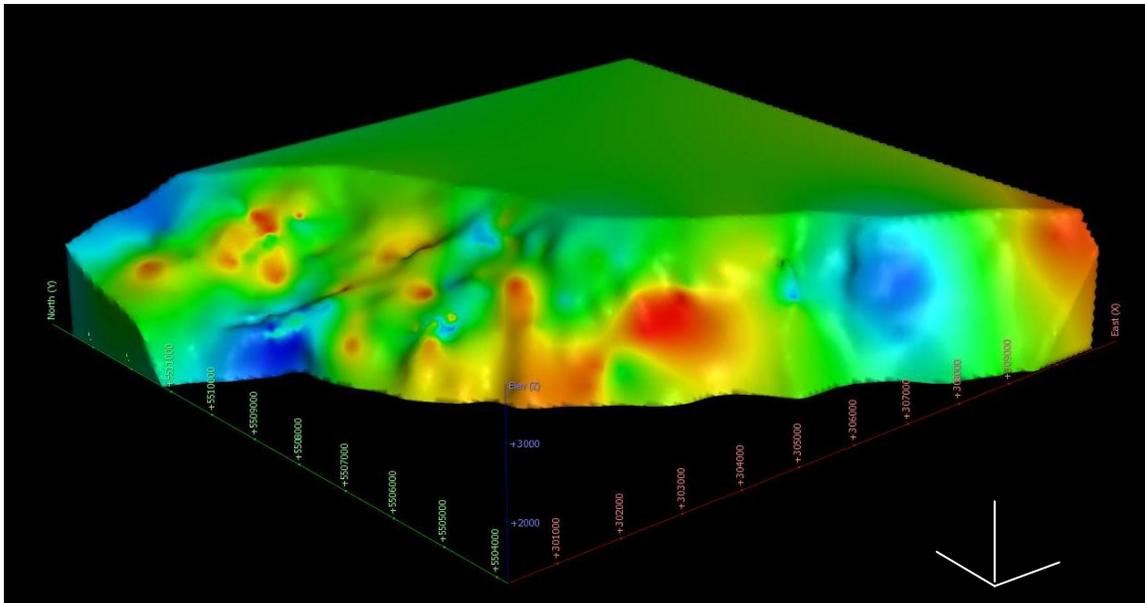


Figure 19. Interpolation des valeurs mesurées en Na_2O exprimées en centiles pour les échantillons contenus dans la tranche 0 m et 10 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Les couleurs froides indiquent des concentrations faibles, donc la présence de lessivage du sodium.

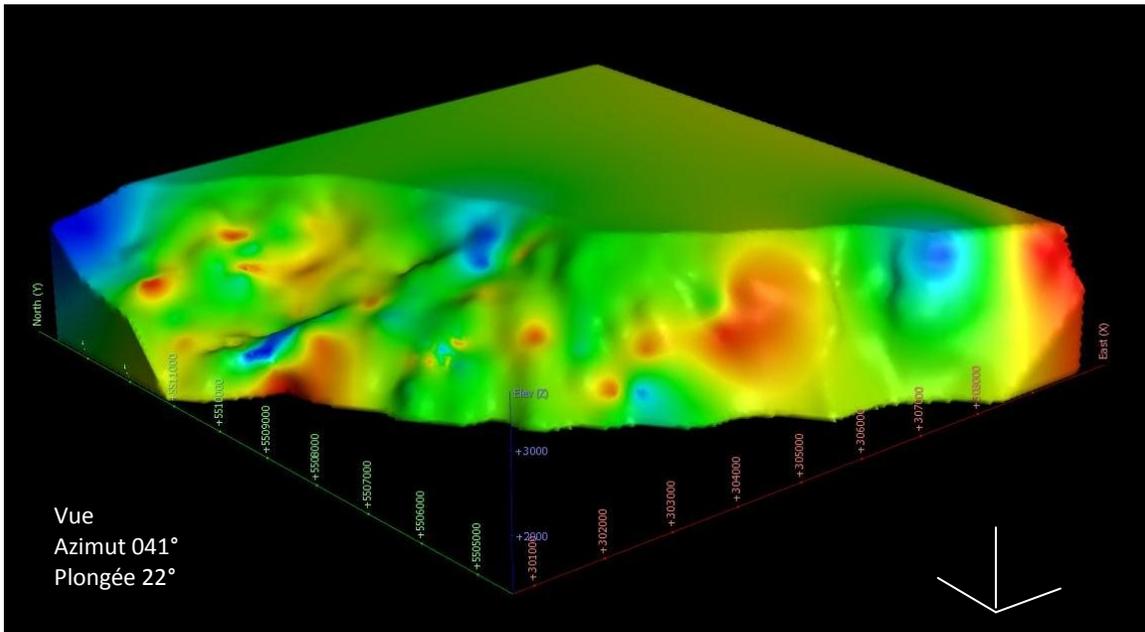


Figure 20. Interpolation des valeurs mesurées en Na_2O exprimées en centiles pour les échantillons contenus dans la tranche 20 m et 30 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. L'indice d'Orchan West est évident alors que celui de Bell-Allard Sud montre une zone de lessivage de superficie restreinte.

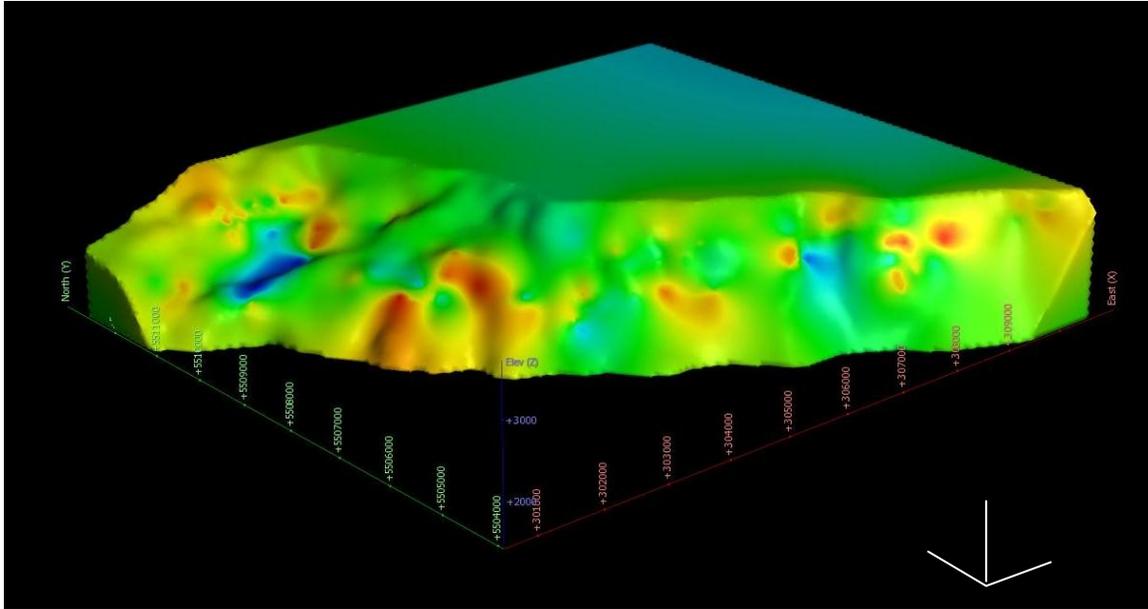


Figure 21. Interpolation des valeurs mesurées en Na_2O exprimées en centiles pour les échantillons situés entre 100 m et 150 m au-dessus du contact entre la Formation de Watson Lake et la Tuffite clé. Seules deux zones de lessivage sont visibles dans la région élargie d'Orchan West et dans le secteur de Bracemac.

Afin de visualiser plus facilement l'étendue verticale de l'altération soit donc à travers la séquence stratigraphique, une section comprenant le gisement d'Isle-Dieu et le gîte d'Orchan West à été générée (**Figure 22**). Bien que le nombre de forages soit limité dans le secteur d'Orchan West et que l'étendue de l'altération puisse être exagérée par ce fait, il n'en demeure pas moins que l'altération y est présente comme le montre les variations de l'indice d'Ishikawa et des teneurs en Na_2O et MnO (**Figures 23 à 24**).

La modélisation en 3D confirme dans certains cas l'étendue verticale de l'altération dans le toit. L'étendue latérale de l'altération est toutefois limitée

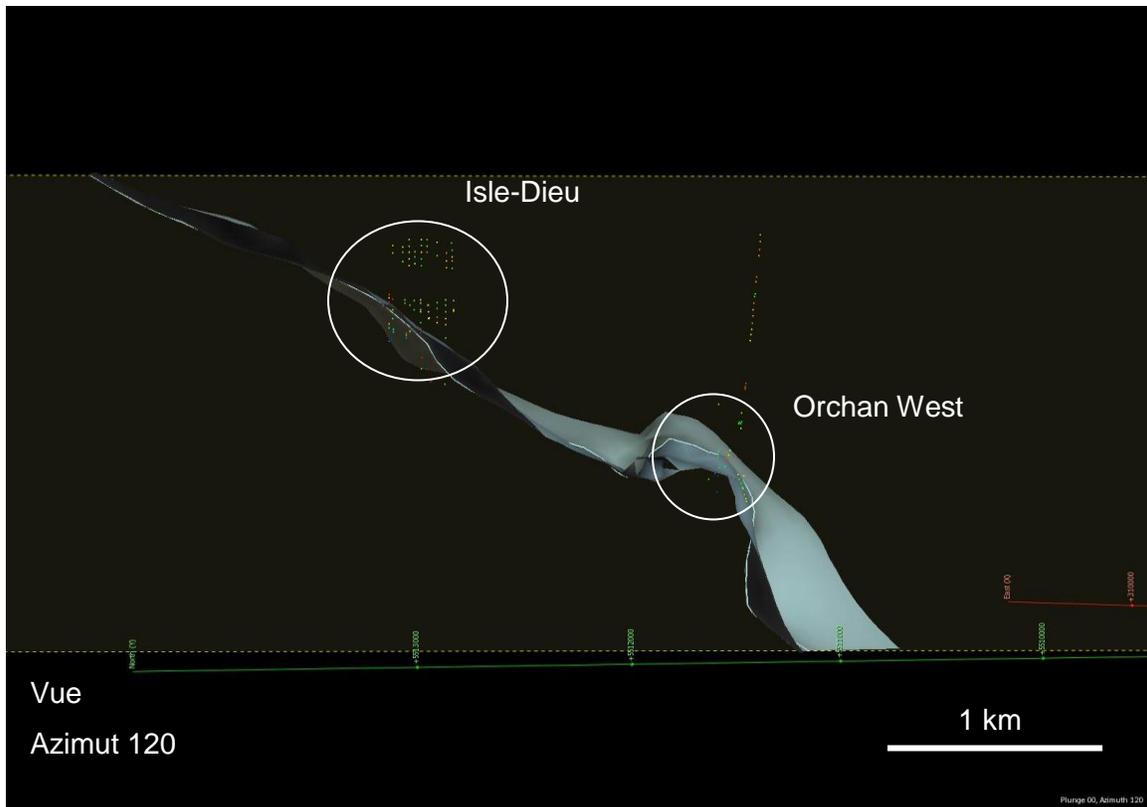


Figure 22. Distribution des échantillons le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West. Les échantillons situés à 25 m de part et d'autre de cette section ont été inclus dans l'interpolation.

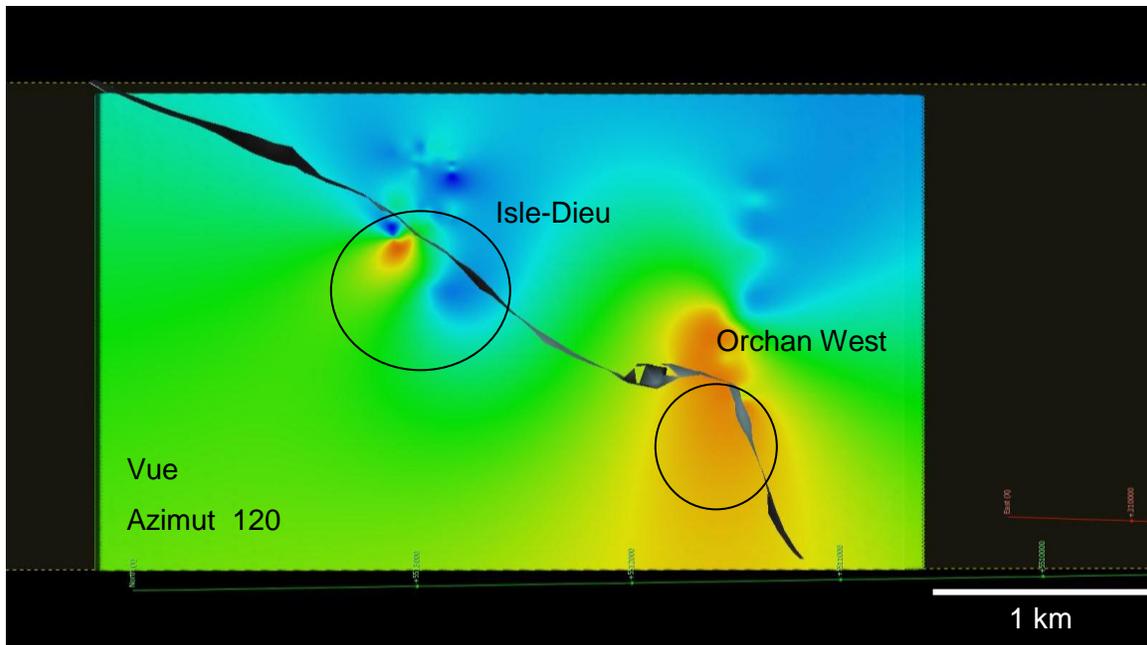


Figure 23. Variations de l'indice d'Ishikawa le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West. Un panache d'altération est identifié au-dessus de la zone d'Orchan West mais n'est pas reconnu au-dessus d'Isle-Dieu.

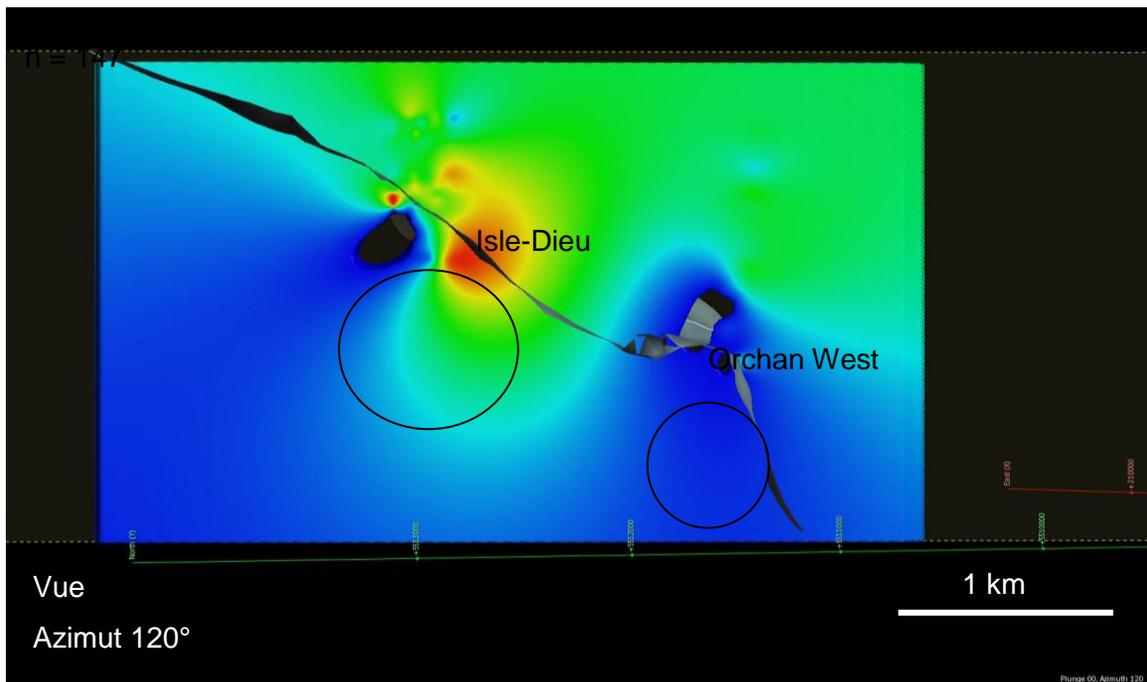


Figure 24. Section montrant les variations des teneurs en Na_2O exprimés en centiles le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West. Un panache d'altération est identifié au-dessus de la zone minéralisée d'Orchan West mais pas pour Isle-Dieu.

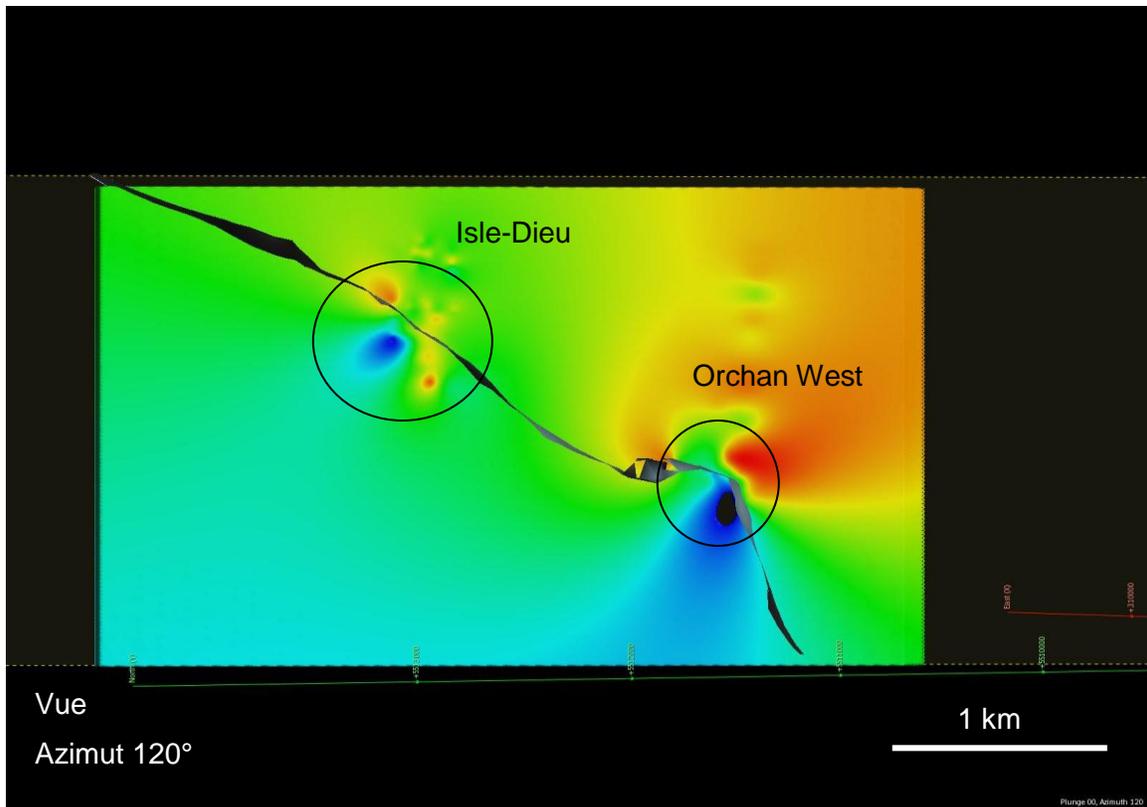


Figure 25. Section montrant les variations des teneurs en MnO exprimés en centes le long d'une section entre le gisement d'Isle-Dieu et l'indice d'Orchan West.

7 INDEX D'ALTÉRATION COMBINÉ

Comme plusieurs des indices d'altération font appel aux mêmes éléments chimiques, il est normal que plusieurs indices donnent des résultats similaires. Ainsi, l'intensité de l'altération ne peut pas être basée uniquement sur le nombre d'indices faisant ressortir ladite zone altération. Afin d'établir le degré d'altération, un index d'altération combiné a été calculé par analyse multivariable, plus précisément par la méthode dite distance de Mahalanobis (Filzmoser *et al.*, 2005). Cette technique permet de définir l'éloignement d'un échantillon par rapport au bruit de fond (**Figure 26**). Cette valeur a été calculée pour l'ensemble des indices d'altération et des éléments chimiques mesurés du **Tableau 2**. Les **Figures 27 à 30** montrent comment la distance de Mahalanobis rehausse bien les altérations au toit des divers gisements et gîtes du camp de Matagami.

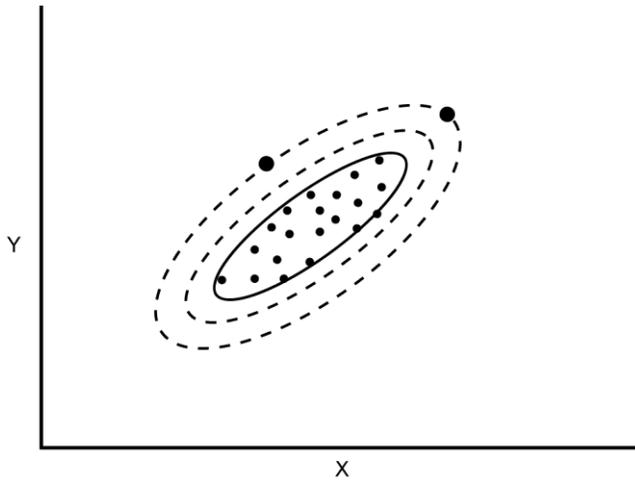


Figure 26. Exemple de distribution des échantillons dans un diagramme binaire. La distance de Mahalanobis est la distance mathématique entre un point et le centre de l'ellipse qui représente les échantillons non – altérés. Ainsi, les deux gros points sont également altérés même s'ils ne se retrouvent pas dans la même région du graphique. La distance de Mahalanobis peut se calculer dans une analyse multivariable.

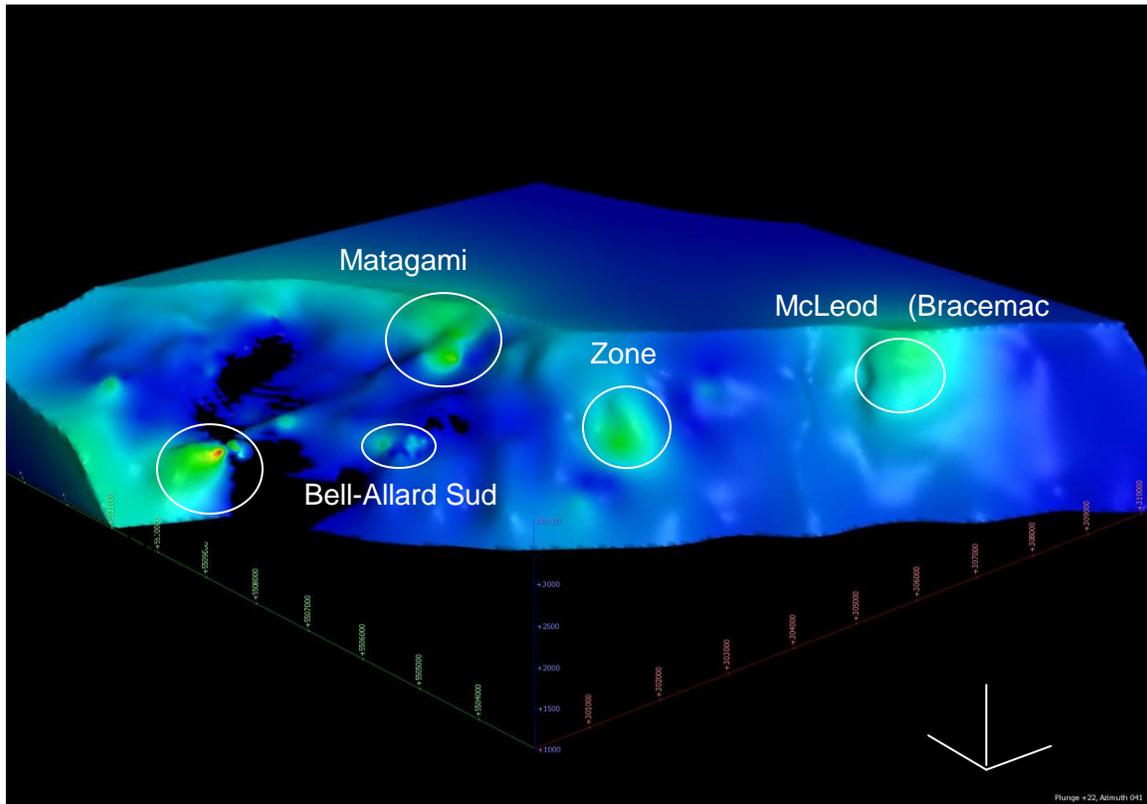


Figure 27. Distance de Mahalanobis calculée à partir des divers indicateurs d'altération à 30 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu est absent à cause d'un défaut dans la maille d'interpolation. Noter la présence d'une zone anormale dans le secteur du gisement de Matagami Lake et une zone où aucun gîte n'est connu (Zone X).

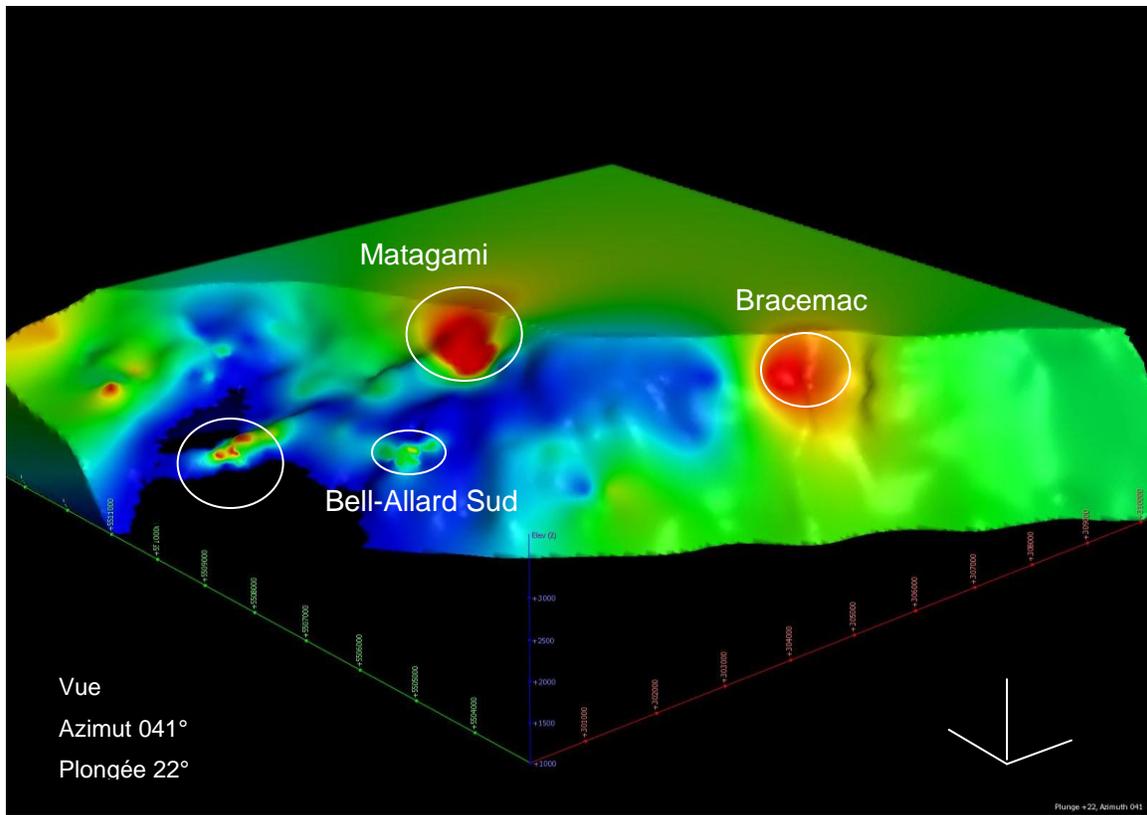


Figure 28. Distance de Mahalanobis calculée à partir des éléments majeurs à 30 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu ne montre pas d'anomalie. Noter la présence d'une zone anormale dans le secteur du gisement de Matagami Lake.

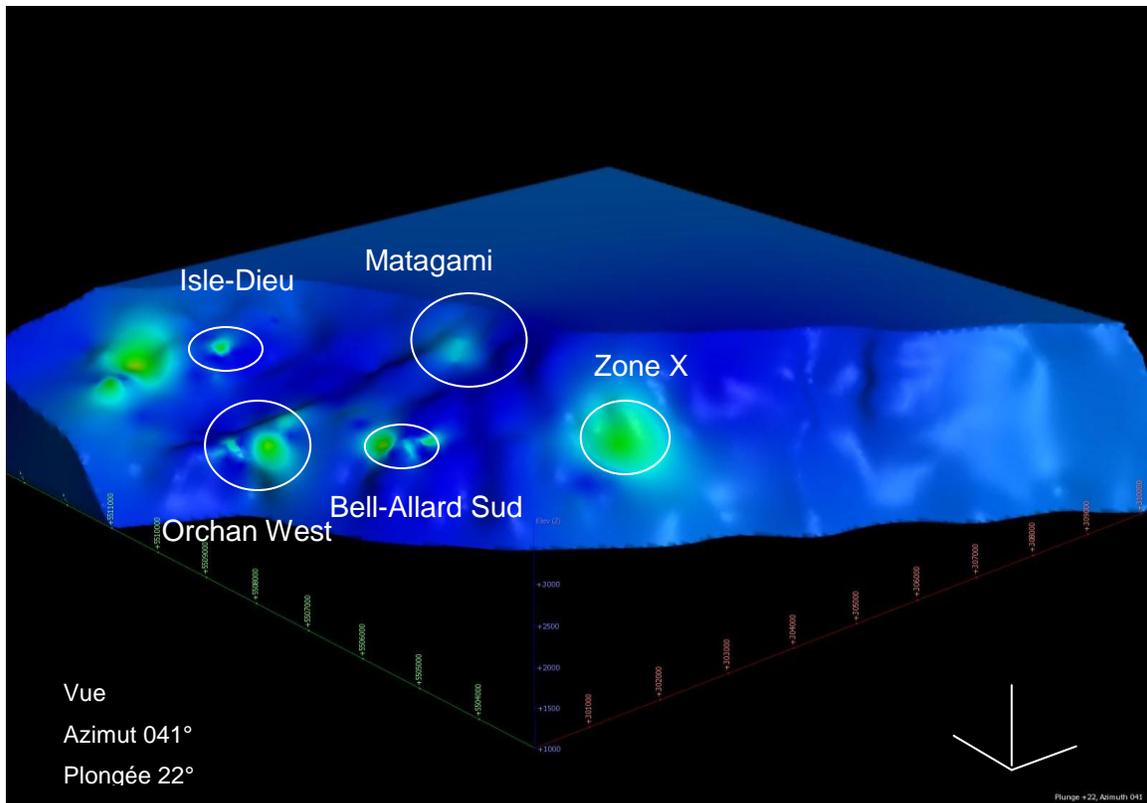


Figure 29. Distance de Mahalanobis calculée à partir de tous les éléments analysés à 30 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu ne montre qu'une petite zone anormale. Noter la présence d'une zone anormale dans le secteur du gisement de Matagami Lake et de la zone non reconnue identifiée comme Zone X.

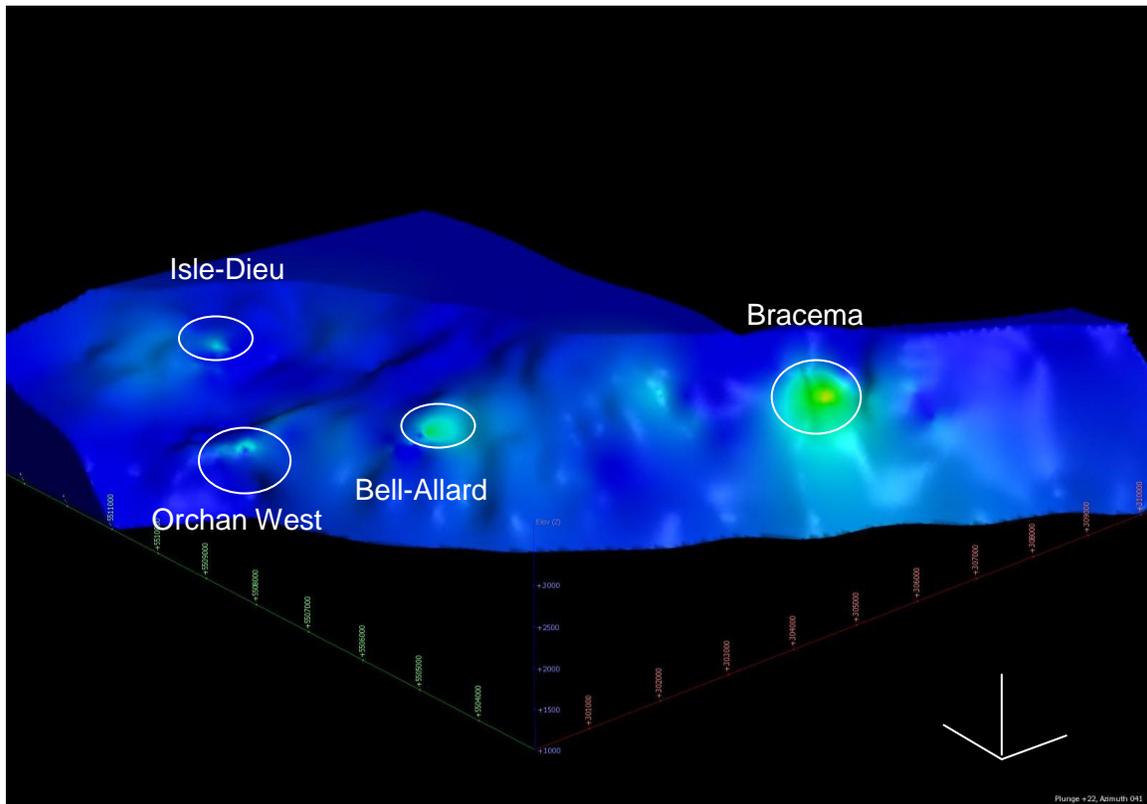


Figure 30. Distance de Mahalanobis calculée à partir de tous les éléments analysés à 50 m au-dessus du niveau repère. Le secteur d'Isle-Dieu ne montre qu'une petite zone anormale. Les autres zones sont présentes mais de plus faible intensité à l'exception de Bracema où il y a plusieurs lentilles superposées sont reconnues à différents niveaux stratigraphiques.

8 DISCUSSIONS ET REMARQUES

De la liste des 42 indicateurs d'altération testés (**Tableau 2**), cinq présentent systématiquement des anomalies détectables dans le toit des gisements et gîtes de sulfures massifs du camp de Matagami et six autres présentent des anomalies détectables dans 4 cas sur 5 (**Tableau 4**).

Tableau 4. Liste des indicateurs d'altération au toit jugés les plus significatifs pour les gisements et indices couverts par la zone d'étude.

Indice	méthode	Gisements altérés / Gisements étudiés
Indice d'Ishikawa	m	5/5
Indice d'Hashimoto	m	5/5
Chlorite index	m	5/5
Perte Na ₂ O (15 ^e centile et moins)	c	5/5
Gain Zr (85 ^e centile et plus)	c	5/5
MnO (70 ^e centile et plus)	c, m	4/5
Rb (30 ^e centile et moins)	c, m	4/5
IAB (20 ^e centile et moins)	m	4/5
IFRAIS (faibles valeurs)	m, n	4/5
Na ₂ O	m, n	4/5
Ishikawa	n	4/5

À l'exception du MnO qui montre de légères différences entre le toit et le mur, tous les autres indicateurs ne permettent pas de différencier le mur et le toit. c = exprimé en centile, m = mesuré, n = normalisée selon la lithologie.

Toutefois, seul le MnO montre des valeurs anormales beaucoup plus élevées dans le toit des lentilles que dans le mur. Ceci est identique à ce que l'on observe à la mine de Heath Steele B dans le camp de Bathurst (Lentz *et al.*, 1997).

Au niveau de la géométrie, le modèle en 3D dépend fortement de la densité d'échantillon. Ainsi, un échantillon dans une zone à faible densité sera interpolé sur une plus grande distance. Cependant, comme les données ont été séparées en diverses tranches dans le cas du présent projet, l'interpolation verticale est limitée. Donc, même

si l'anomalie interpolée est possiblement plus grande que l'anomalie réelle, sa détection semble réaliste.

Une tendance observée dans le camp de Matagami est que l'altération au toit est de taille limitée pour les grands gisements qui sont composés d'une seule lentille située au niveau de la Tuffite clé. Les gisements et gîtes de taille moindre montrent un très grand volume de roches altérées. Ceci s'explique probablement par un système hydrothermal de longue durée qui a permis la réactivation des failles synvolcaniques et la génération de plusieurs lentilles à différents niveaux stratigraphiques comme c'est le cas à Bracemac. Le gîte d'Orchan West montre également une grande zone d'altération mais est associé à un volume connu de sulfures limité. Il semble donc vrai de dire que dans le cas d'une absence de réactivation et de superposition de lentilles, le volume de roche altérée au toit est limité.

9 CONCLUSION

L'étude des échantillons des roches volcaniques du camp de Matagami montre qu'une altération au toit, bien que de taille limitée, est visible au-dessus de certains gisements situés au niveau de la tuffite clé. Les indices d'Ishikawa et d'Hashimoto, l'indice de chlorite et les teneurs mesurées en Na_2O et MnO sont les cinq meilleurs indicateurs d'altération. L'indice d'altération combiné calculé par la distance de Mahalanobis s'avère très fiable pour faire ressortir les zones d'altération au toit des sulfures massifs. Cependant, l'altération au toit lorsque présente possède des caractéristiques similaires à celle retrouvée dans le mur.

Dans le camp de Matagami, les gisements de plus grande taille composés d'une seule lentille sont surmontés par de petites zones d'altération qui s'étendent jusqu'à 40 m dans le toit, alors que les petits gisements pluri-lenticulaires sont entourés de grands halos d'altération où le toit de la lentille sous-jacente devient le mur de la lentille située au-dessus. Cette caractéristique combinée à la similitude des empreintes d'altération au toit et au mur laisse penser que la présence d'empilement de lentilles le long d'une

même structure synvolcanique est probablement plus commune que préalablement reconnue.

L'observation d'une zone d'altération au-dessus du gisement Matagami Lake et d'une zone inconnue nommée Zone X au-dessus de la tuffite représentent des cibles de premier ordre.

REMERCIEMENTS

Des remerciements sont spécialement adressés à Xstrata zinc pour avoir fourni les données essentielles à la réalisation du projet. Sylvain Trépanier est également remercié pour sa participation aux calculs multivariés et Geneviève Boudrias pour l'édition du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Barrett, T.J., MacLean, W.H., Cattalani, S., Hoy, L. et Riverin, G., 1991. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec; III, The Ansil mine. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **28**, pp. 1699-1730
- Barrett, T.J., Cattalani, S., Hoy, L., Riopel, J. et Lafleur, P.J., 1992. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec; IV, The Moberly mine. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **29**, pp. 1349-1374
- Barrett, T.J., MacLean, W.H., et Cattalani, S., 1993a. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Quebec. V. The Corbet mine. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **30**, 1934-1954.
- Barrett, T.J., Cattalani, S., et MacLean, W.H., 1993b. Volcanic lithogeochemistry and alteration at the Delbridge massive sulfide deposit, Noranda, Quebec. *Journal of Geochemical Exploration*, **48**, pp. 135-173.
- Chown, E.H., Daigneault, R., Mueller, W., and Mortensen, J., 1992. Tectonic evolution of the Northern Volcanic Zone, Abitibi Belt, Québec. *Can. Jour. of Earth Sc.*, **29**: pp. 2211-2225.
- Date, J., Watanabe, Y. et Saeki, Y., 1983. Zonal alteration around the Fuzakawa kuroko deposits, Akita Prefecture, northern Japan. *Economic Geology Monograph* 5, pp. 365-386.
- Doyle, M.G., et Allen, R.L., 2003. Subsea-floor replacement in volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Ore Geology Reviews*, **23**, 183-222.
- Galley, A.G., Hannington, M., et Jonasson, I., 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits *dans* Goodfellow, W.D., éditeur, *Mineral Deposits of Canada*. Commission Géologique du Canada, Division des gîtes minéraux, Publication speciale No. 5, pp. 141-161.
http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth_dep/vms/index_e.php
- Gemmell, J.B., et Fulton, R. 2001. Geology, genesis, and exploration implication of the footwall and hanging-wall alteration associated with the Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, Tasmania, Australia. *Economic Geology*, **96**, pp. 1003-1035.
- Gibson, H.L., Watkinson, D.H., Watkins, J.J., Labrie, M., et Doiron, G. 1993. Volcanological reconstruction of the Corbet breccia pile, and Cu-Zn massive sulfide deposit, Noranda Quebec. *Exploration and Mining Geology*, **2**, pp. 1-16.
- Filzmoser, P., Garrett, R.G., Reinmann, C., 2005. Multivariate outlier detection in exploration geochemistry. *Computers and Geosciences* 31. pp. 579-587.

- Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., et Galley, A.G., 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. *In Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, United States. pp. 523-560.
- Hannington, M.D., Kjarsgaard, I., Galley, A.G. et Taylor, B., 2003. Mineral-chemical studies of metamorphosed hydrothermal alteration in the Kristineberg volcanogenic massive sulphide district, Sweden. *Mineralium Deposita*, **38**. pp. 423-473.
- Large, R.R., Allen, R.L., Blake, M.D. et Hermann, W., 2001. Hydrothermal alteration and volatile element halos for the Rosebury K lense volcanic-hosted massive sulphide deposit, western Tasmania. *Economic Geology*, **96**, pp. 1055-1072.
- Lavallière, G., Guha, J., & Daigneault, R., 1994. Cheminées de sulfures massifs atypiques du gisement d'Isle-Dieu, Matagami, Québec; implications pour l'exploration. *Exploration and Mining Geology*, 3(2), pp. 109-129.
- Lavallière G., 1995. Processus de formation et implications pour l'exploration des cheminées atypiques des gisements volcanogènes de Matagami. Thèse de doctorat UQAC.
- Lentz, D.R., Hall, D.C. et Hoy, L.D., 1997. Chemostratigraphic, alteration, and oxygen isotopic trends in a profile through the stratigraphic sequence hosting the Heath Steele B zone massive sulphide deposit, New Brunswick. *The Canadian Mineralogist*, **35**, pp. 841-874.
- Liaghat, S et MacLean, W.H., 1992. The Key Tuffite, Matagami Mining District= Origin of the tuff components and mass changes. *Exploration and Mining Geology*, **1**, pp. 197-207.
- MacLean, W.H., et Hoy, L.D., 1991. Geochemistry of hydrothermally altered rocks at the Horne mine, Noranda, Québec. *Economic Geology*, **86**, pp. 506-528.
- Morton R, Franklin J., 1987. Two-fold classification of Archean volcanic-associated massive sulfide deposits. *Economic Geology*; 82, pp. 1057-1063.
- Riverin, G., et Hodgson, C.J., 1980. Wall-rock alteration at the Millenbach Cu-Zn mine, Noranda, Québec. *Economic Geology*, **75**, pp. 424-444.
- Tardif, N., 2003. Hanging wall alteration above the paleoproterozoic, Callinan and triple 7 volcanic massive sulphide deposits, Flin Flon, Manitoba, Canada. Mémoire de maîtrise, Université Laurentienne, Sudbury, Ontario. 163 pages.
- Trépanier, S., 2011. Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme. Projet CONSOREM 2008-07, 209 p. (https://consorem.uqac.ca/rapports_publics.html)