



Traitement de compilations de données issues d'analyses au LA-ICP-MS effectuées sur des sulfures aurifères

Blandine Gourcerol

► To cite this version:

Blandine Gourcerol. Traitement de compilations de données issues d'analyses au LA-ICP-MS effectuées sur des sulfures aurifères. Mines et carrières (Paris), 2018. hal-02284316

HAL Id: hal-02284316

<https://brgm.hal.science/hal-02284316>

Submitted on 17 Sep 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Traitement de compilations de données issues d'analyses au LA-ICP-MS effectuées sur des sulfures aurifères

Introduction

L'analyse semi-quantitative de la distribution des éléments par spectrométrie de masse couplée à un plasma inductif avec prélèvement par ablation laser (LA-ICP-MS) sur des sulfures comme des pyrites diagénétiques et ultérieures, des pyrrhotites métamorphiques et des arsénopyrites hydrothermales, permet d'obtenir des cartes et/ou des profils de concentrations élémentaires ainsi que la localisation de chaque élément dans un contexte cristallin (par exemple : des fractures, des zones de croissance, des sutures...) et d'établir visuellement des associations d'éléments ainsi qu'une paragenèse cristalline [1, 2]. Son avantage principal est de minimiser l'effet de moyenne des analyses classiques issues de l'ICP-MS basées sur l'analyse d'échantillons "en vrac", masquant bien trop souvent les informations importantes relatives aux associations élémentaires.

Ainsi, la plupart des cartes de distribution d'éléments obtenues par LA-ICP-MS sont créées en recoupant de nombreuses lignes (ou points) d'analyses effectuées dans une tranche de temps préalablement définie. Cette approche a un attrait visuel mais peut toutefois rendre difficile la distinction d'associations d'éléments à la plus petite échelle et ne permet pas de traitements secondaires des données. Alternative, la compilation des données issues de chaque tranche de temps individuelle (TDT) (correspondant à chaque balayage du MS) à partir des analyses laser permet de numériser la distribution des éléments en une base de données et ainsi d'évaluer les corrélations entre les éléments à une échelle beaucoup plus fine. La force de cette approche est rarement exploitée car très fastidieuse mais offre un plus grand potentiel pour explorer et mieux comprendre les systèmes minéralisateurs. Dans le cas des études de dépôts aurifères, l'intégration des cartes et le traitement des bases de données TDT permettent d'identifier la réelle signature élémentaire des dépôts et les nombreuses remobilisations.

Le but de cet article est de présenter une routine de traitement consistant à intégrer les cartes de distributions élémentaires ainsi que le traitement des données TDT associées. Cette procédure permet

d'optimiser l'interprétation des données dans le contexte :

- de paragenèse élémentaire ;
- de genèse des gisements ;
- et, par extension, d'exploration.

Avec ces objectifs, une sélection d'échantillons provenant de différents gisements est utilisée afin de démontrer l'efficacité de la méthode TDT. De nouveaux diagrammes spécifiques aux sulfures sont créés (par exemple : Ag - Ni, Ni - Co / Ni, Au - Ag) afin de comprendre et représenter la complexité des événements aurifères et l'influence de la stratigraphie sur la géochimie des fluides et donc, par extension, des sulfures. Des méthodes d'analyse de données comme, par exemple, l'analyse multidimensionnelle et l'analyse discriminante, sont également utilisées afin :

- de confirmer les associations d'éléments suggérées à partir des cartes et des diagrammes binaires d'éléments ;
- de confirmer le nombre d'événements aurifères identifiés par le traitement des données TDT ;
- et d'aborder la nature des fluides sulfurisés.

Pour ce faire, des échantillons de sulfures, sélectionnés dans différents gisements orogéniques canadiens, sont utilisés. Parmi ceux-ci, citons les gisements de Meliadine [2, 3, 4] et de Meadowbank [3, 4, 5] en Nunavut et de Musselwhite [3, 4, 6] en Ontario correspondant à des formations de fer précambriennes de type Algoma, où la minéralisation aurifère est associée à un remplacement du matériel riche en fer par des sulfures (arsénopyrite, pyrite et pyrrhotine, respectivement) ainsi que le gisement de Beaver Dam (Nouvelle-Écosse) associé à des métaturbidites phanérozoïques dans lesquelles les sulfures, tels que l'arsénopyrite, précipitent par remplissage des veines de quartz-carbonates [7].

Méthodes d'analyses

LA-ICP-MS

Les analyses au LA-ICP-MS des sulfures sélectionnés ont été effectuées au sein du laboratoire géochimique de l'université Laurentienne (Sudbury,

Canada). Un système d'ablation laser RESOLUTION M-50 193 nm couplée à un quadropole Thermo X-Series II ICP-MS est utilisé afin de déterminer les éléments traces dans les sulfures sélectionnés [8]. Les isotopes analysés sont les suivants : ^{33}S , ^{45}Sc , ^{47}Ti , ^{55}Mn , ^{56}Fe , ^{59}Co , ^{60}Ni , ^{65}Cu , ^{66}Zn , ^{75}As , ^{82}Se , ^{95}Mo , ^{101}Ru , ^{103}Rh , ^{105}Pd , ^{107}Ag , ^{111}Cd , ^{115}In , ^{118}Sn , ^{121}Sb , ^{125}Te , ^{182}W , ^{189}Os , ^{193}Ir , ^{195}Pt , ^{197}Au , ^{202}Hg , ^{205}Tl , ^{208}Pb , ^{209}Bi , ^{238}U .

L'ablation est réalisée en utilisant un mélange de gaz introduit par vaporisation dans une cellule, mélange incluant de l'hélium de haute pureté (650 ml/min), de l'argon (750-800 ml/min) et de l'azote (6 ml/min). La quantification des données brutes est effectuée par le système de traitement Iolite 39 en utilisant le verre synthétique NIST6108 et le ^{56}Fe comme matériaux de référence externe et interne respectivement. Il faut noter que des photographies et les études pétrographiques de détail sont effectuées au préalable sur chaque sulfure, puisque le LA-ICP-MS est une technique micro-destructrice ne permettant pas un retour aux observations.

Génération des cartes élémentaires et des bases de données TDT

Pour créer des cartes de concentrations élémentaires, des séries de lignes d'analyses, effectuées parallèlement sur un sulfure dans une tranche de temps préalablement définie et régulière, sont combinées via le logiciel Iolite. La compilation de ces données permet d'obtenir une base de données TDT compatible aux logiciels Excel et XLStat (2014, Addinsoft, Inc., Brooklyn, NY, USA).

Traitement des données et applications

Ce chapitre représente une procédure "étape par étape" pouvant être utilisée comme routine lors du traitement des cartes élémentaires et des données TDT associées. Elle comprend une première partie étudiant la paragenèse élémentaire basée sur les cartes de concentration. Une seconde partie permet de définir la nature du fluide minéralisateur, d'évaluer la remobilisation aurifère dans le système "gisement" et d'estimer les enrichissements élémentaires dans les pyrites associées à des dépôts de type "sediment-hosted" à l'aide de graphiques discriminants. Enfin une analyse des données permet de confirmer les paragenèses élémentaires et de mieux définir leurs associations.

Paragenèse élémentaire

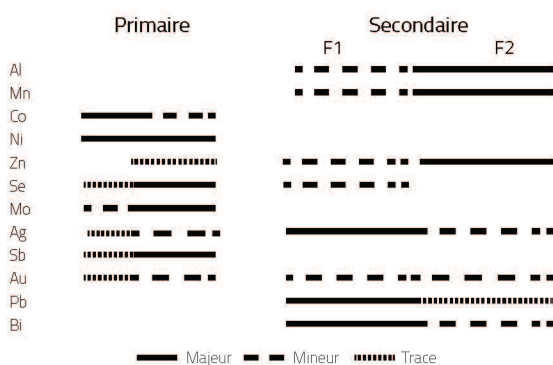
Les cartes de concentration des éléments, combinées à des études pétrographiques détaillées, ainsi que des analyses au microscope électronique à balayage (MEB), fournissent une base pour établir une paragenèse élémentaire spécifique aux sulfures associés aux minéralisations aurifères. Par conséquent, cette étape est cruciale pour l'identification des associations d'éléments ainsi que leur répartition spatiale (noyau par rapport aux bordures du grain, fractures et zones de croissance).

En ce qui concerne les cartes élémentaires, l'intensité des couleurs met en évidence la concentration et les "loci" de chaque élément, établissant ainsi leur répartition dans l'ensemble du grain. Les **figures 1 et 2** illustrent un exemple de ces cartes acquises sur un grain d'arsénopyrite provenant du dépôt d'or de Beaver Dam et la paragenèse élémentaire associée.

Dans cet échantillon, les concentrations en Co semblent imiter le zonage de croissance du sulfure (indiqué par les lignes noires), ce qui suggère que cet élément reflète une origine primaire. D'autres éléments qui sont co-spatiaux avec le Co sont interprétés de la même manière. Ainsi, le Ni, le Mo, le Se, le Sb et, dans une moindre mesure, l'Au sont également identifiés comme éléments primaires (c'est-à-dire qu'ils sont contemporains de la formation du sulfure). Dans certains cas, il est noté que certains éléments, incluant le Mo, le Ni, le Sb et le Se, semblent se superposer au zonage et reflètent une caractéristique primaire relativement tardive. Les concentrations uniformément réparties, bien que faibles, d'Ag et de Zn suggèrent qu'ils sont également présents dans le réseau cristallin du sulfure soit comme concentrations d'arrière-plan, soit comme micro-inclusions suggérant une origine également primaire. Le Bi, le Pb et l'Ag sont principalement associés à des fractures précoces F1 (indiquées par les lignes pointillées blanches), tandis que l'Al, le Zn et le Mn semblent être relativement tardifs et sont associés à des fractures transversales tardives F2 (indiquées par les lignes pointillées blanches), comme déduit de l'étude pétrographique. Enfin, l'Au semble également être associé à la fois aux fractures F1 et F2 en tant que microinclusions. De plus, le Ni et le Se, ainsi que le Mo et le Sb, semblent être démobilisés compte tenu de leurs concentrations variables le long des fractures pouvant suggérer une remobilisation le long du réseau de fractures F1. Ainsi, en fonction de l'interprétation des cartes de distribution élémentaires, quatre associations d'éléments sont discernées : Co-Ni ; Mo-Se-Sb (Au-Ag-Zn) ; Bi-Pb-Ag (Au) et Al-Zn-Mn (Au).

Les analyses ponctuelles (sous forme de points d'analyse) ne peuvent fournir d'informations similaires. Il convient de noter que, dans un contexte d'exploration aurifère, l'identification des espèces de sulfures qui hébergent la minéralisation aurifère doit être effectuée au préalable avant toute analyse cartographique au LA ICP-MS, soit par mode de

Figure 1 –
Tableau paragenétique
des éléments pour le grain
d'arsénopyrite aurifère
du dépôt de Beaver Dam.



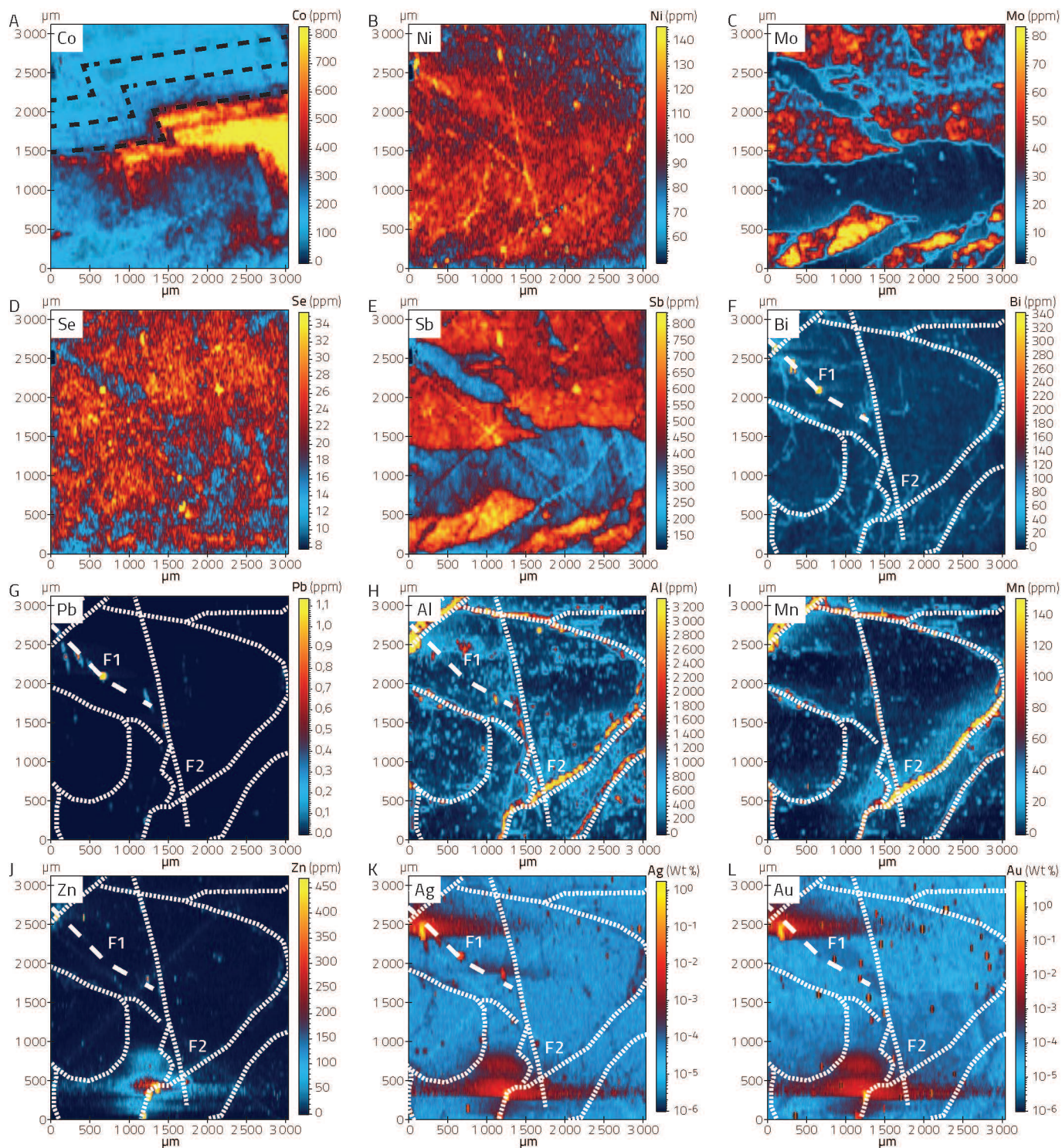


Figure 2 – Cartographies élémentaires d'un grain d'arsénopyrite aurifère issu d'une veine de quartz-carbonates dans le dépôt de Beaver Dam.

points d'analyses, soit par lignes afin d'optimiser le temps et d'obtenir une cartographie pertinente. En outre, plusieurs grains doivent être analysés afin d'obtenir une moyenne qualitative des associations d'éléments.

Graphiques discriminants

Dans la section précédente, l'analyse des cartes élémentaires a donné lieu à la détermination d'éléments potentiellement associés aux événements minéralisateurs. Aussi, la prochaine étape logique est l'utilisation des bases de données TDT afin d'évaluer la nature des fluides minéralisateurs. Dans la section suivante, plusieurs graphiques, spécifiquement conçus dans le cadre de cette étude, servent à

aborder et à mieux comprendre la nature du fluide, les étapes (nombre d'événements) impliquées dans les processus de minéralisation et l'origine des éléments (orogénique par rapport à diagénétique).

Nature du fluide minéralisateur

L'analyse des cartes provenant de plusieurs études effectuées sur des dépôts orogéniques [1, 2] ou liées à des intrusions, indiquent que les concentrations en Co et en Ni sont généralement présentes dans le réseau cristallin des sulfures où ils remplacent le Fe, ce qui représente une origine primaire reflétant la croissance des minéraux (la zonation). Lorsque la teneur de ces derniers éléments est quantifiée à partir des cartes de distributions d'éléments, ils offrent

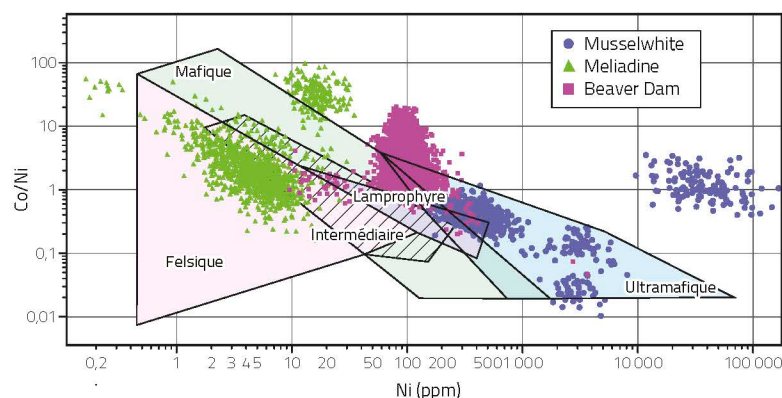


Figure 3 – Distribution des concentrations en Ni et des valeurs du ratio Co/Ni des données TDT issues des sulfures aurifères des dépôts de Musselwhite, Meliadine et Beaver Dam.

potentiellement un moyen de définir ou de mieux comprendre la source et / ou la nature du fluide associé.

La compilation des données des éléments traces effectuée sur plusieurs types de roches (felsiques à ultramafiques) sélectionnées dans la Province du Supérieur au Canada [8] a été utilisée pour construire le diagramme Co/Ni versus Ni. Ce diagramme est utilisé avec les données TDT pour comprendre la nature des fluides minéralisateurs et ainsi détecter l'interaction fluide / roche.

L'application et l'utilisation des concentrations en Co et en Ni sont illustrées à la **figure 3** en utilisant des données provenant de plusieurs échantillons de pyrrhotite ($n = 10$) et d'arsénopyrite ($n = 3$), respectivement, du dépôt de Musselwhite [6] et du district aurifère de Meliadine [3], ainsi que d'arsénopyrite du dépôt Beaver Dam (figure 1). Il est important de noter que ces données ne peuvent être comparées directement entre elles, puisqu'elles sont issues de différents sulfures (pyrrhotite et arsénopyrite). Cependant, ces échantillons suggèrent que les fluides associés aux pyrrhotites de Musselwhite sont probablement dérivés (ou ont interagi) avec des roches ultramafiques ayant des teneurs intrinsèquement variables en Ni et en Co (en considérant que les facteurs contrôlant le partage des éléments entre le fluide et le sulfure, restent constants). Un résultat similaire est illustré pour les données issues du grain d'arsénopyrite du district aurifère de Meliadine où deux groupes sont définis. Un travail plus détaillé sur ce dépôt suggère que les deux populations peuvent refléter un événement précoce associé à la cristallisation de l'arsénopyrite et un second événement ultérieur lié aux effets de remobilisation lors de l'événement orogénique du Trans-Hudson [2, 3]. Enfin, les données TDT du grain d'arsénopyrite issu du dépôt de Beaver Dam définissent également deux groupes distincts qui suggèrent que les fluides doivent avoir interagi avec différents réservoirs, relativement mafiques / ultramafiques et un second de caractère intermédiaire. Étant donné que le premier est dominant, ceci suggère que les fluides ont interagi davantage avec un réservoir mafique. En conclusion, il faut noter que, sans l'utilisation des données TDT, les groupes distincts définis pour chacun de ces échantillons et leurs interprétations n'auraient pas été possibles.

Remobilisation aurifère

et valorisation / dévalorisation des teneurs

Un aspect important des dépôts hydrothermaux de minéralisation est la longévité des systèmes de minéralisation et la complexité conséquente de la géochimie minérale et de la paragenèse élémentaire qui peut en résulter. L'apparition d'une remobilisation substantielle des teneurs en or dans certains systèmes aurifères [10] est considérée alors comme le résultat d'événements de surimpression [2]. Étant donné l'importance qu'il y a à reconnaître ce processus, l'utilisation de diagrammes binaires Au - Ag pour un sulfure décomposé par des éléments uniques et des associations d'éléments (**figure 4**), permet de déterminer la répartition spatiale et la relation entre eux dans le système "sulfure".

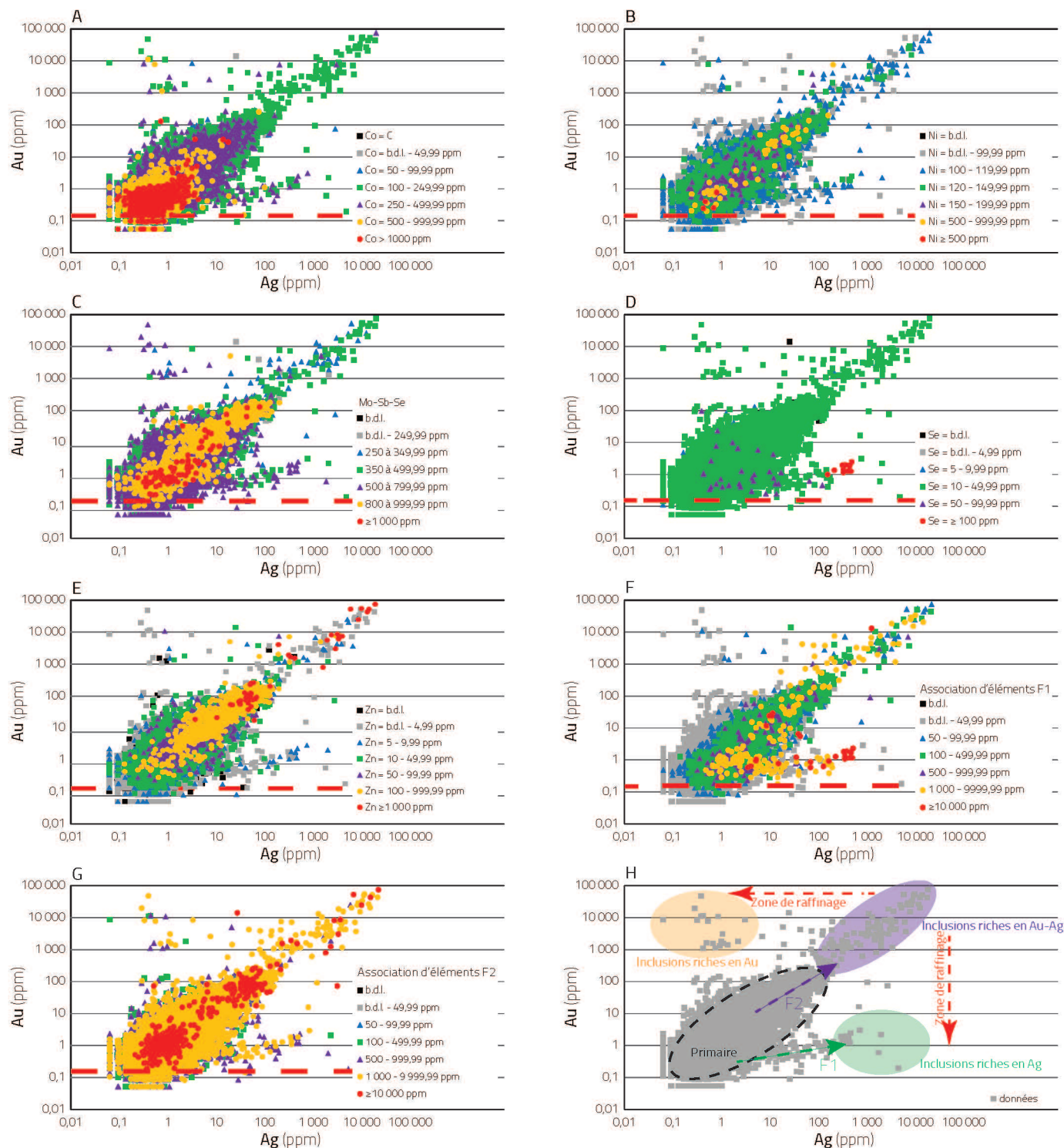
Les données TDT issues de l'arsénopyrite du dépôt de Beaver Dam (figures 1 et 2), pour laquelle des cartes de distributions élémentaires suggèrent une remobilisation des teneurs en Au, Ag et Zn le long des réseaux de fractures F1 et F2 (figure 1), sont utilisées à la figure 4.

Les diagrammes montrent que les concentrations en Au et en Ag ont une corrélation positive avec un ratio Au sur Ag de 10 pour 1. Les concentrations en Co, en Ni et en Mo-Sb-Se semblent co-varier avec l'Au et l'Ag, ce qui confirme leur origine primaire (figures 4 A, B et C). En revanche, une remobilisation des éléments est indiquée lorsque les données sont regroupées par leurs associations précédemment identifiées :

- l'association d'éléments associés au réseau de fracture F1 illustrée par Bi-Pb-(Cd-In) ;
- l'association F2 illustrée par Al-Ti-Mn-(V-Cu-Sn-Cr-W) (figures 4 F et G, respectivement).

Ainsi, F1, qui est définie comme une association Bi-Pb-In-Cd, montre également l'enrichissement en Ag qui peut être dû à sa remobilisation et / ou à la précipitation tardive d'un fluide riche en Ag. La distribution de Se (figure 4 D) suggère également une remobilisation associée à la fracturation F1 (mais dans une moindre mesure). L'association d'éléments F2 composée de Al-Ti-Mn-V-Cu-Sn-Cr-W (figure 4 G) montre collectivement une concentration élevée, coïncidant avec la tendance principale Au versus Ag et suggérant donc une augmentation des teneurs en métaux précieux. Cette observation est attribuée au processus de dissolution / reprécipitation de l'arsénopyrite le long des fractures créant une seconde génération d'arsénopyrites qui incorporent ces nouveaux éléments (Al-Ti-Mn-V-Cu-Sn-Cr-W).

La présence des valeurs extrêmement riches en Ag, Au-Ag et Au fournissent des preuves de la présence de micro-inclusions dans le sulfure hôte (figure 4 H) et suggèrent des zones de raffinage le long des fractures F1 et F2. Ainsi, l'utilisation des données TDT permet de distinguer l'apport primaire par rapport à la remobilisation / valorisation de la minéralisation dans les sulfures.



Évaluation des enrichissements élémentaires dans les pyrites

Large et al. (2009) ont utilisé les données issues d'analyses LA-ICP-MS générées sur des pyrites, pour évaluer l'origine de quatre dépôts d'or associés à des sédiments ("sediment-hosted") incluant les dépôts Sukhoi Log, Bendigo, Spanish Mountain et North Carlin Trend. À l'aide de ces données, il est possible de distinguer la signature chimique des pyrites d'origines diagénétique, métamorphique, hydrothermale issues de dépôts orogéniques et de type Carlin. Sur la base de ces données et de leur origine, un diagramme binaire Ag - Ni a été élaboré afin de distinguer l'origine des pyrites et des éléments associés (figure 5).

Afin d'illustrer cette application, une base de données TDT issue d'une pyrite aurifère du dépôt de Meadowbank [3] a été utilisée. Cette pyrite enregistre une histoire de cristallisation en deux étapes impliquant un stade diagénétique précoce qui a été modifié, probablement par des processus de dissolution / reprécipitation, lors d'un événement ultérieur métamorphique / orogénique.

Comme indiqué à la figure 5, l'intégration des données TDT avec les champs discriminants suggère que la pyrite diagénétique précoce est enrichie en Co, ainsi qu'en Bi, en Pb et dans une certaine mesure en Mo, alors que le stade métamorphique / orogénique est caractérisé par l'enrichissement en Au, Se et Mo.

Figure 4 – Diagrammes binaires Au - Ag (ppm) basés sur les données TDT issues d'un grain d'arsénopyrite aurifère du dépôt de Beaver Dam.

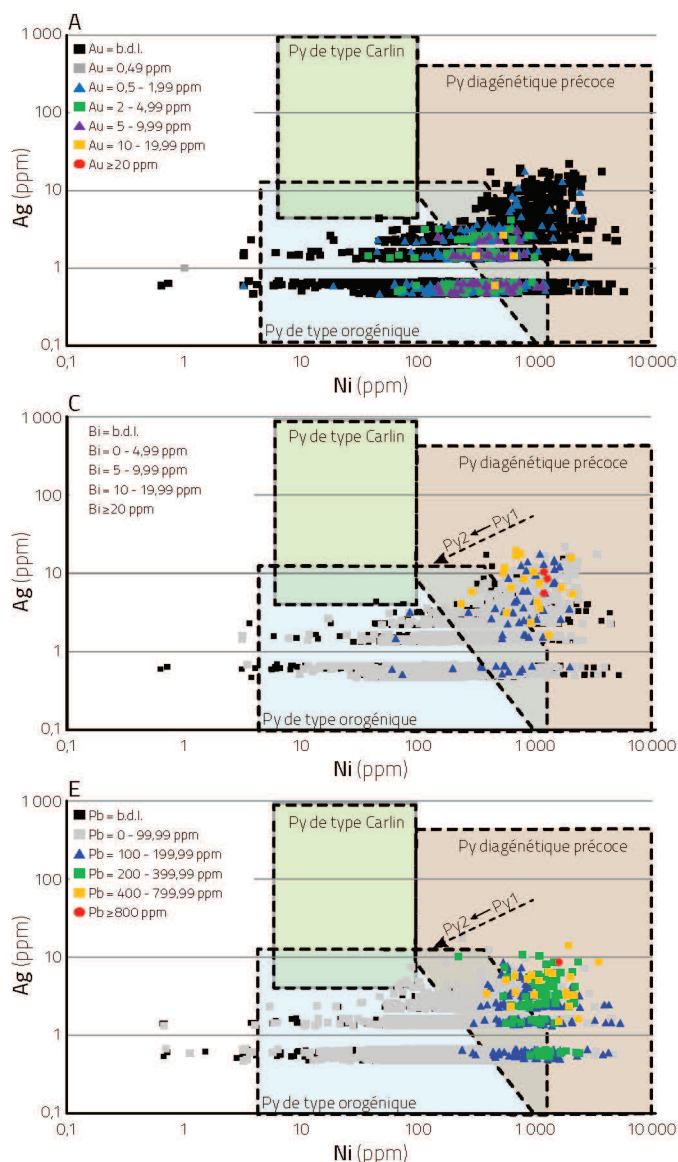


Figure 5 – Diagrammes binaires Ag - Ni (ppm) basés sur les données TDT issues d'un grain de pyrite aurifère sélectionné dans le dépôt de Meadowbank.

Par conséquent, cette approche constitue un moyen important pour déterminer la nature géochimique des événements aurifères et d'établir l'origine des métaux associés lors de la croissance de la pyrite dans les roches sédimentaires (uniquement).

Étude par méthodes d'analyse des données

Un ensemble de procédures d'analyse des données a été appliqué aux compilations de données TDT issues du grain d'arsénopyrite provenant du dépôt de Beaver Dam (figure 1). Dans les sections suivantes, les résultats de cette approche sont présentés pour illustrer comment une telle étude peut compléter et confirmer les conclusions obtenues en utili-

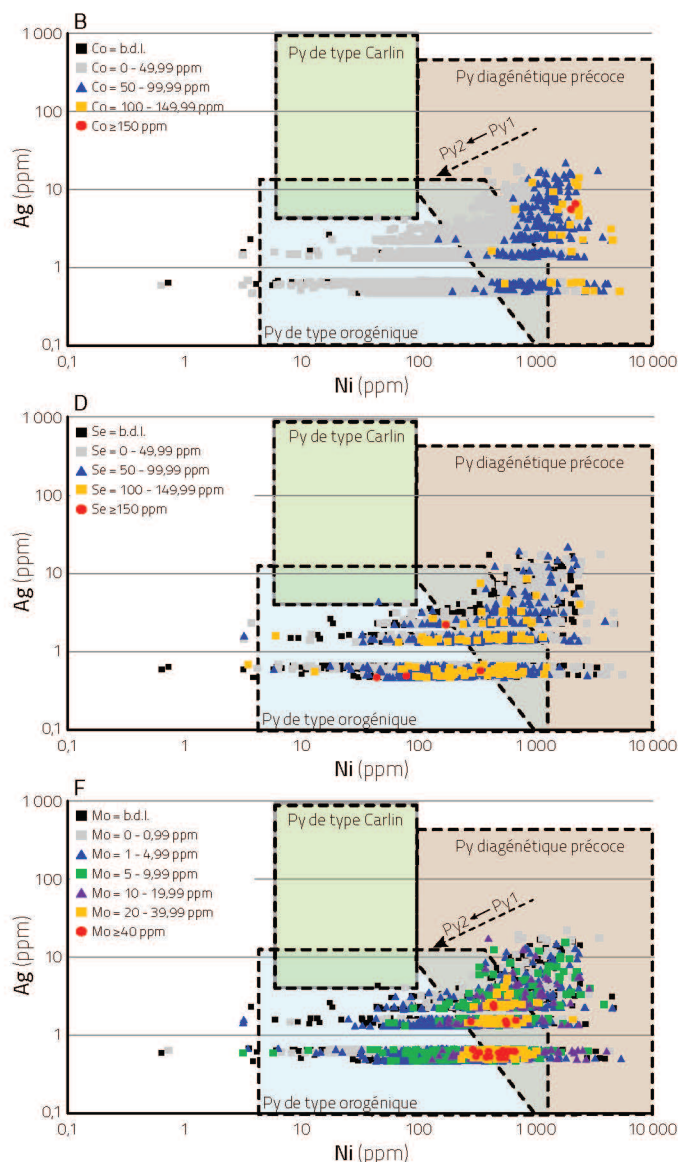


Figure 6 – Dendrogramme des données TDT du grain d'arsénopyrite aurifère du dépôt de Beaver Dam.

sant les cartes de distributions élémentaires et les diagrammes discriminants.

Classification agglomérante hiérarchique

Afin de discriminer les groupes qui définissent des associations d'éléments dans un grain de sulfure donné, une classification agglomérante hiérarchique (CAH) peut être effectuée. Cette approche, généralement présentée sous la forme de dendrogramme (figure 6), permet le traitement des données conduisant à un regroupement progressif d'éléments par une liaison unique basée sur leur degré de similarité (ici la concentration) calculée après normalisation des données (même échelle). Les résultats sont présentés sous la forme d'une matrice de coefficients de corrélation entre éléments versus éléments de Pearson, en utilisant les données TDT comme indiqué ci-dessous.

En utilisant les résultats pour le grain d'arsénopyrite issu du dépôt de Beaver Dam, le dendrogramme montre trois groupes d'éléments distincts :

- ceux associés à l'ensemble de fracture F2 (voir la séquence paragenétique de la figure 2) comprenant Zn-Ag-Au-Cu-Sn- Cr-Al-Mn-W-Ti-V ;
- une association primaire comprenant Co-As-Fe-Ni ;

– et ceux associés au jeu de fracture F1, incluant Mo-Sb-Se-Bi-Pb-Cd-In.

Il faut toutefois noter que cette approche donne un aperçu des associations d'éléments et doit être utilisée avec prudence car, à une échelle plus précise, elle est limitée dans la mesure où seule la relation la plus étroite entre les éléments est illustrée. La conséquence de cette dernière est que les associations mineures peuvent ne pas être représentées pour l'ensemble des données. Ainsi, seules les similitudes les plus élevées (valeurs de corrélation les plus élevées) peuvent être considérées comme de "vraies" similitudes, qui, pour le cas présent (figure 6), comprennent : Ag-Au-(Zn) ; Mo-Sb ; Cd-In et les associations Al-Mn et Ti-V. À cet égard, il est possible que l'effet de la remobilisation ultérieure a été "d'affaiblir" certaines associations telles que Mo-Sb-Se (figure 2) puisque le Se semble être remobilisé le long des fractures F1 parallèlement au Bi, Pb et Cd. De même, l'association d'éléments Au-Ag-Zn reflète une remobilisation de ces derniers le long de l'ensemble tardif F2.

Méthodes d'analyse exploratoire de données

Les méthodes statistiques exploratoires sont une autre approche couramment utilisées dans les études d'analyse des données pour analyser des ensembles de données et définir les variables en facteurs statistiques avec des méthodes visuelles. Le positionnement multidimensionnel (MDS), l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse discriminante linéaire (ADL) peuvent être appliqués aux ensembles de données afin d'extraire une série potentielle de variables factorielles régissant la répartition des éléments dans les sulfures dans le cadre du système cristallin en lui-même, de micro-inclusions ou de fractures. Ces méthodes sont effectuées après une normalisation des données sur la base d'une matrice d'éléments par rapport au coefficient de corrélation d'éléments Pearson pour les données TDT. Elles ont l'avantage de permettre une amélioration des limitations principales de la méthode CAH, car plusieurs dimensions sont représentées graphiquement.

Positionnement multidimensionnel

La méthode MDS [11] utilise une mesure de distance déterminée à partir d'une matrice de coefficient de corrélation de Pearson. Les distances sont calculées pour toutes les paires d'éléments en utilisant des données standardisées (jeu de données transformé en z-score) pour fournir une représentation graphique de la proximité des éléments les uns des autres, en utilisant une fonction linéaire de perte de Kruskal reflétant la configuration spatiale. Ainsi, le facteur principal de discrimination est appelé Dimension 1 et le second, Dimension 2. En outre, les éléments proches les uns des autres montrent une corrélation positive qui reflète leur comportement similaire, alors que les éléments sur les côtés opposés

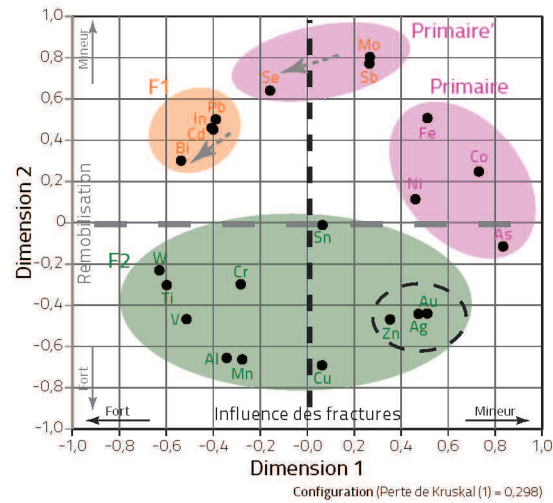


Figure 7 – Positionnement multidimensionnel des données TDT du grain d'arsénopyrite aurifère du dépôt de Beaver Dam.

afficheront une corrélation négative due à un comportement différent [12].

Ainsi, l'ensemble de données pour le grain d'arsénopyrite sélectionné définit quatre groupes distincts (figure 7) qui ont été préalablement définis lors de la paragenèse élémentaire basée sur les cartographies (figure 2) :

- une association primaire définie par Co-Fe-Ni-As ;
- une deuxième association primaire de Mo-Sb-Se ;
- une association secondaire liée à l'événement de fracture F1 composée de Pb-In-Cd-Bi ;
- une association secondaire liée aux fractures F2 et composée de W-To-V-Al-Mn-Sn-Cu-Zn-Ag-Au.

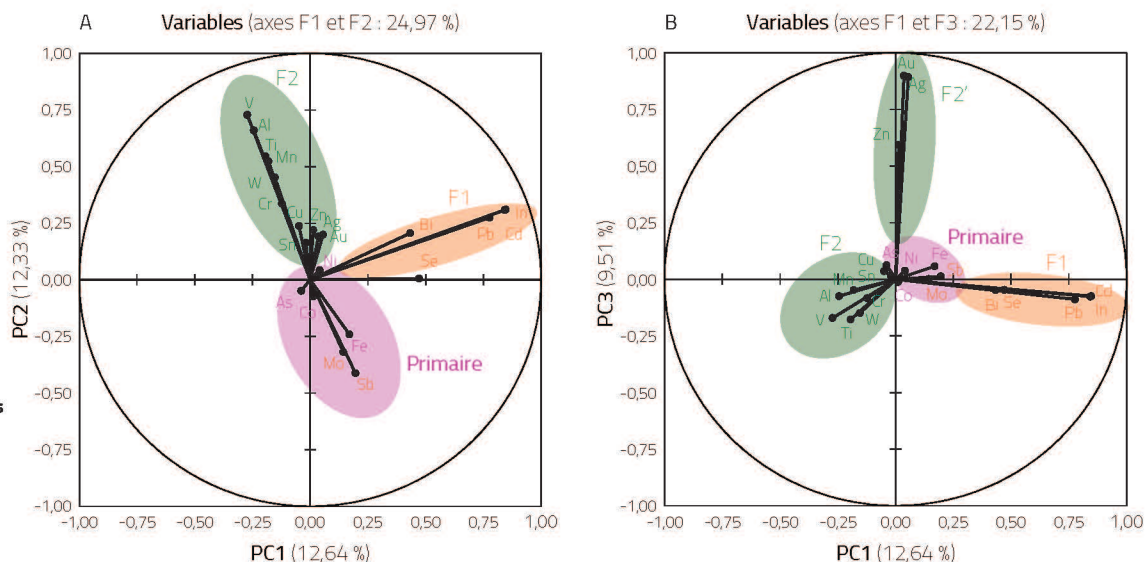
Une interprétation plus poussée du MDS suggère que la Dimension 1 peut refléter des compositions liées aux fractures alors que la Dimension 2 peut refléter la remobilisation / précipitation en micro-inclusions.

Analyse de composantes principales

À l'instar du MDS, la méthode ACP est une méthode de réduction de dimension appliquée à une matrice de corrélation (coefficient de Pearson), ce qui se traduit par des diagrammes bidimensionnels, également appelés cercles de corrélation. Dans ces diagrammes, les éléments sont répartis en fonction de leurs affinités et dissemblances (corrélations positives et négatives) par rapport à deux "facteurs" principaux qui expliquent le mieux la variabilité (PC1 et PC2). Ces facteurs représentent les principales variables dans l'ensemble des données. Dans le cas de variables positionnées près du centre du cercle, il faut vérifier si les proximités correspondent à une "vraie" similitude avec l'hypersphère en regardant les cercles de corrélation générés par d'autres paires de facteurs (PC1 et PC3).

Ainsi, l'analyse des données TDT pour le même grain d'arsénopyrite montre encore trois à quatre composantes principales qui, ensemble, représentent la variabilité de l'ensemble de données : primaire, F1 et F2 (figure 8). Sur la base du regroupement défini, les associations sont interprétées de la manière suivante : le PC1 du côté positif de cet axe comporte deux groupes : principalement Bi, In, Pb, Cd et Se et, dans une moindre mesure, Fe, Sb et Mo.

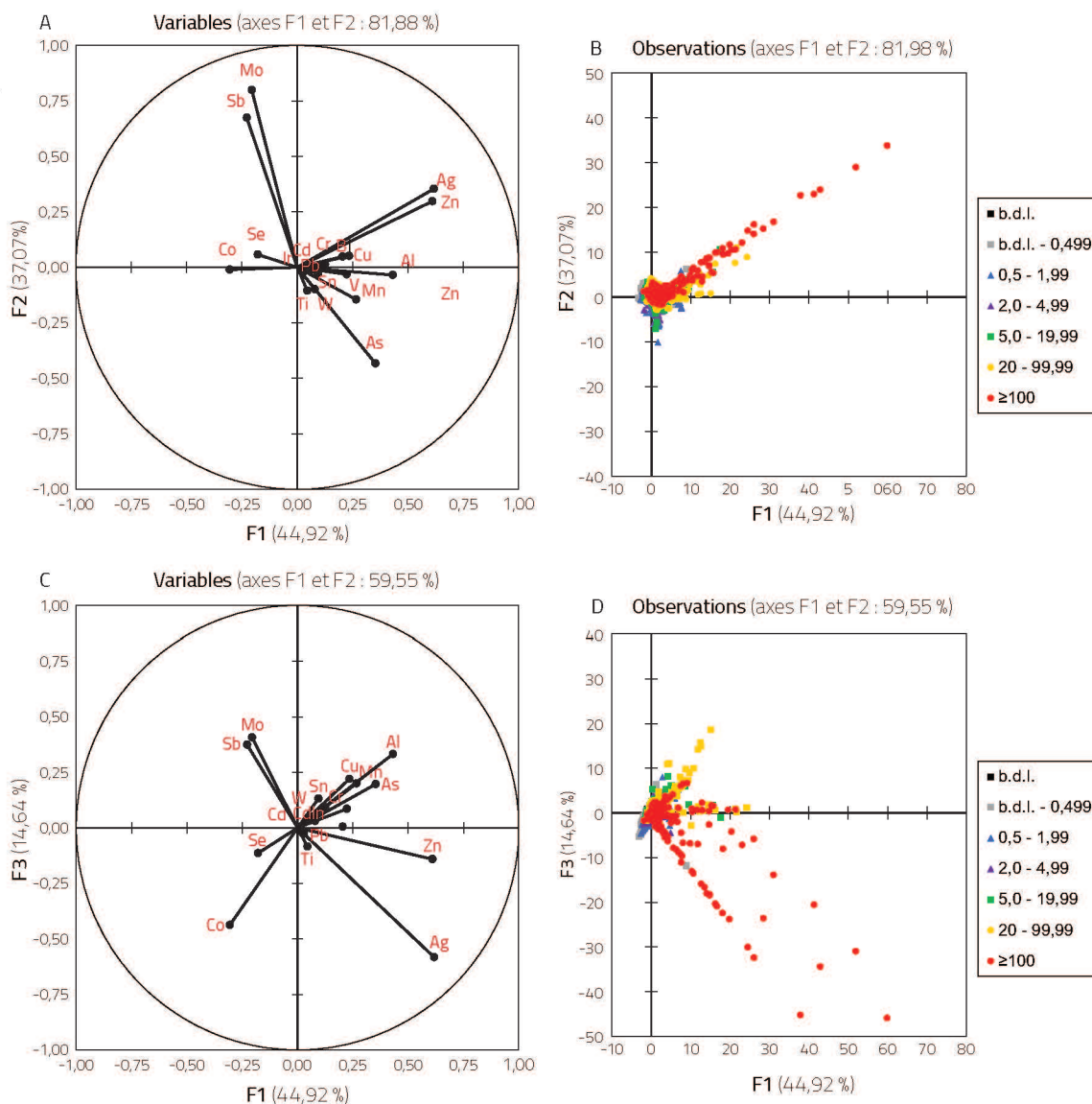
Figure 8 – Analyses en composantes principales des données TDT du grain d'arsénopyrite aurifère du dépôt de Beaver Dam en fonction des PC1, PC2 et PC3 définissant les principaux axes de discrimination.



Ces associations sont attribuées aux associations d'éléments qui caractérisent l'événement de fracture F1 avec une légère à forte remobilisation le long de celle-ci (figure 8 A). Le meilleur exemple de cette association de F1 est Se et, dans une certaine mesure, Ni, considéré comme un élément primaire dans la structure du grain d'arsénopyrite (figures 1 et 2) qui a ensuite été remobilisé le long du vecteur F1. Par

conséquent, l'axe négatif PC1 montre l'affinité d'association d'élément F2 (par exemple : Al, Mn et V) car ils sont relativement tardifs dans la formation du sulfure. L'axe PC2 positif est composé des associations d'éléments F1 et F2 ainsi que d'Ag, d'Au, de Zn et de Ni en teneur mineure, alors que l'axe négatif est composé des associations d'éléments primaires qui suggère que PC2 représente l'influence de F2

Figure 9 – Analyses discriminatoires linéaires standard des données TDT en fonction des F1, F2 et F3.



(figure 8 A). Enfin, l'axe PC3 positif est composé principalement d'Ag, d'Au et de Zn (F2') et suggère des micro-inclusions invisibles à visibles le long des ensembles de fractures (figure 8 B). Il est important de noter que la position de l'Ag, de l'Au et du Zn le long de PC1 et PC3, suggère qu'ils ont ensuite été remobilisés de F1 par F2 comme suggéré précédemment (figure 2).

Analyse discriminatoire linéaire standard

Enfin, la méthode ADL [13] utilise une approche similaire à la technique ACP, mais varie dans le sens où elle classe un ensemble de données dans des groupes prédéfinis tels que les plages de concentrations avant tout traitement. Ainsi, les éléments sont tracés dans des diagrammes bidimensionnels en fonction de leurs scores de discrimination (F1 et F2 ; F1 et F3) et de leurs comportements face à une variable explicative telle que la concentration en Au. Par conséquent, la catégorisation des valeurs Au en fonction des éléments sélectionnés peut donner une idée des éléments qui sont étroitement associés ou non à la minéralisation aurifère. Cette approche peut également être appliquée aux associations d'éléments liées à la remobilisation de l'Au [10].

Par conséquent, l'approche ADL avec les données TDT pour le même grain d'arsénopyrite (figure 9) montre que Au est fortement associé à Ag et Zn (figures 9 A et B, à noter que le dernier tracé superpose les valeurs de Au sur ce vecteur). En outre, il apparaît aussi que les concentrations en Au sont fortement associées à celles de l'Al, du Mn, du Cu... et faiblement associées à celles du Co, du Mo et de Sb (figures 9 C et D). En examinant les associations d'éléments (figure 10), il est clairement indiqué que les valeurs élevées d'Au (>100 ppm) sont fortement associées aux variables F2 et F1 alors que les associations primaires (reflétant les éléments précoces de l'épisode primaire Co-Ni-Fe-As) et primaires' (reflétant les éléments tardifs de l'épisode primaire Mo-Sb-Se) montrent des teneurs en Au plus faibles (inférieures à la limite de détection de 100 ppm). En résumé, les diagrammes issus de la méthode ADL démontrent clairement que la minéralisation aurifère était vraisemblablement initialement invisible dans l'arsénopyrite (dans son réseau cristallin) et a ensuite été remobilisée pendant les événements F1 et F2 avec Ag et Zn, ce qui a donné lieu à une augmentation préférentielle des teneurs en Au en tant que micro-inclusions le long des réseaux de fractures.

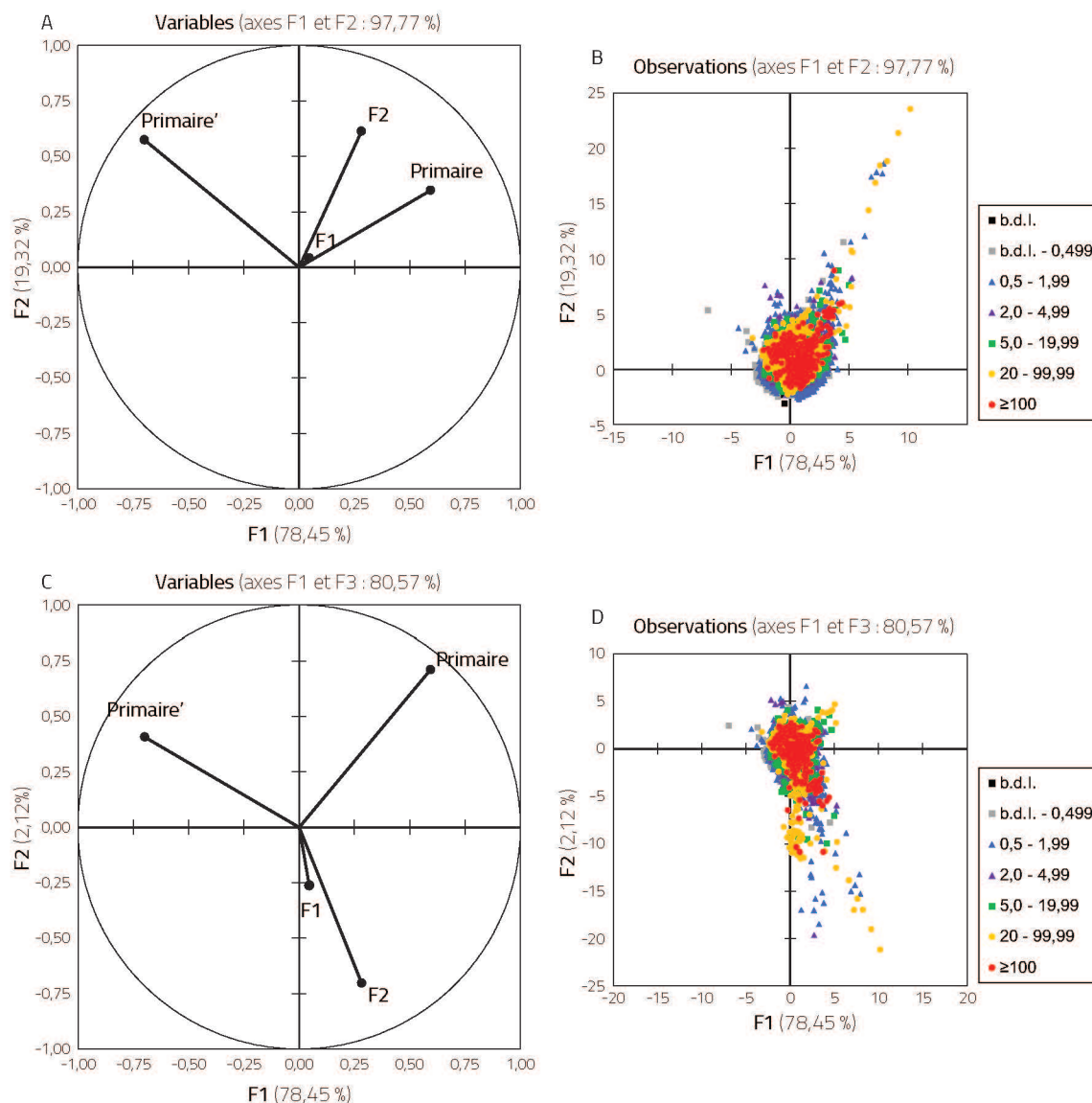


Figure 10 – Analyses discriminatoires linéaires standard des associations d'éléments identifiées (Primaire, Primaire', F1 et F2) dans les données TDT en fonction des F1, F2 et F3.

Conclusion

Grâce à cette étude, il a été démontré que l'utilisation des données TDT issues des cartographies élémentaires générées par LA-ICP-MS, peuvent fournir des renseignements très intéressants sur le développement des domaines géochimiques dans le sulfure hôte ainsi que sur la minéralisation aurifère. En traitant ces données de diverses façons, il apparaît possible d'améliorer la compréhension de la nature et de l'origine des événements minéralisateurs.

Afin de mieux comprendre la géochimie du sulfure analysé, une procédure novatrice est proposée pour le traitement de ces données. La première étape consiste, dans la mesure du possible, à utiliser les cartes élémentaires pour établir la paragenèse élémentaire et identifier les associations élémentaires. L'utilisation de diagrammes innovants (c'est-à-dire Co/Ni versus Co, Au versus Ag, Ag versus Ni) permettent le traitement des données TDT et de comprendre l'origine des fluides minéralisateurs et les divers événements aurifères (diagénétique par rapport à métamorphique / orogénique).

Enfin, des outils conventionnels d'analyse des données (MDS, ACP et ADL), qui sont appliqués de façon routinière à d'autres ensembles de données géochimiques, ont été utilisés et leur application a été illustrée. Ces derniers donnent une meilleure idée de la nature des événements aurifères et permettent la validation des conclusions déduites des autres méthodes utilisées. Ainsi, cette étude démontre que l'intégration du protocole proposé pour traiter les données TDT sur des grains de sulfure soigneusement sélectionnés, avec d'autres outils géochimiques couramment appliqués aux études de dépôts d'or et à l'exploration aurifère (par exemple : inclusions de fluides, isotopes...), fournit les moyens de mieux comprendre la nature et l'origine des milieux minéralisés et une meilleure discrimination des événements et des systèmes minéralisant de l'or. Cette procédure, bien que mise en place sur des gisements aurifères, est enclin à être applicable à n'importe quel autre type de gisement et ainsi présente un intérêt majeur notamment pour l'ensemble des métaux stratégiques.

Blandine Gourcerol
Université Laurentienne (Canada)

Références

- Large R.R., Danyushevsky L., Hollit C., Maslennikov V., Meffre S., Gilbert S., Bull S., Scott R., Emsbo P., Thomas H., Singh B. and Foster J., 2009. Gold and trace element zonation in pyrite using a laser imaging technique: implications for the timing of gold in orogenic and Carlin-style sediment-hosted deposits ; *Economic Geology*, v. 104, pp. 635-668.
- Lawley C.J.M., Creaser R.A., Jackson S., Yang Z., Davis B., Pehrsson S., Dubé B., Mercier-Langevin P. and Vaillancourt D., 2015. Unravelling the western Churchill province paleoproterozoic gold metallogeny: constraints from Re-Os arsenopyrite and U-Pb xenotime geochronology and LA-ICP-MS arsenopyrite trace element chemistry at the BIF-hosted Meliadine gold district, Nunavut, Canada ; *Economic Geology*, v. 110, pp. 1 425-1 454.
- Gourcerol B., Kontak D.J., Thurston P.C. and Petrus J.A., 2016. Gold and trace element distribution in sulphides from mineralized gold Algoma-type BIFs: implications for nature of mineralizing fluids, metal sources and deposit models; accepted by *Mineralium Deposita*.
- Gourcerol B., Thurston P.C., Kontak D.J., Côté-Mantha O. and Biczok J., 2016. Depositional setting of Algoma-type banded iron formation; *Precambrian Research*, v. 281, pp. 47-79.
- Janvier V., Castonguay S., Mercier-Langevin P., Dubé B., McNicoll V., Pehrsson S., Malo M., De Chavigny B. and Côté-Mantha O., 2015. 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.
- Oswald W., Castonguay S., Dubé B., McNicoll V.J., Biczok J., Malo M. and Mercier-Langevin P., 2015. Geological setting of the world-class Musselwhite gold mine, Superior Province, Northwestern Ontario and implications for exploration ; In: *Targeted Geoscience Initiative 4: Contributions to the understanding of Precambrian Lode gold deposits and implications for exploration*, (Eds.), Dubé B. and Mercier-Kontak D.J., Horne R.J., Creaser R.A., Petrus J. and Archibald D., 2013. A petrological and geochronological study of a 360 Ma metallogenic event in maritime Canada with implications for lithophile-metal mineralization in the Canadian Appalachians; *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 50, pp. 1 147-1 163.
- Gourcerol B., Kontak D.J., Thurston P.C. and Petrus J.A., 2017. Application of LA ICP-MS sulphide analysis and methodology for deciphering elemental paragenesis and associations in addition to multi-stage processes in metamorphic gold settings; *The Canadian Mineralogist*, in press.
- Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J. and Hergt J., 2011. Iolite: freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data; *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 26, pp. 2 508-2 518.
- Wagner T., Klemd R., Wenzel T. et Mattson B., 2007. Gold upgrading in metamorphosed massive sulphide ore deposits: direct evidence from laser-ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis of invisible gold ; *Geology*, v. 35, n. 9, pp. 775-778.
- Wilkinson L., Hill M. and Vang E., 1992. SYSTAT: Statistics. version 5.2 edition; Systat, Evanston, Illinois, USA.
- Greenough J.D., Dostal J. et Greenough L.M., 2007. Incompatible element ratios in french polynesia basalts: describing mantle component fingerprints; *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 54, pp. 947-958.
- Fisher R.A., 1936. The use of multiple measurements in taxonomic problems; *Annals of Eugenics*, v. 7 (2), pp. 179-188.