

**Comparing the performance of hydrothermal alteration indicators for VMS and
gold deposits**

By

Damien Gaboury, Géo., Ph.D.

Fall 2004



CONSOREM
Consortium de recherche en exploration minérale



WARNING

This document represents the final report of a research project realized by CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale). Since the period of confidentiality decreed by the CONSOREM's regulations is over, the results of this project are now available to the public for the profit of the geological community.

Although this document has been subjected to thorough examination, errors or omissions may be found and CONSOREM alone is responsible for this and assumes the responsibility of it.

The contents of the document remains the author's and CONSOREM's property. If the following reference is correctly quoted, the document can be entirely or partly reproduced for non-commercial purposes:

Gaboury, D. 2004. Comparing the performance of hydrothermal alteration indicators for VMS and gold deposits, Report, CONSOREM's project 2000-2A, 77 p.

However, the multiple reproduction of this document, in all or in part, for commercial purposes is forbidden, except with the written permission of CONSOREM.

NOTE: Only the abstract and figure captions have been translated in this document. The figures are combined at the end of the document, with captions enhanced so that a basic understanding of the full study could be gained without reading the main text in French.

Summary

The signature of hydrothermal alteration for many types of mineralization and host rocks is generally well documented in the literature. The relevant mineralogy, fluid-rock exchanges, element gains and losses, and mass changes, are all described. From this, an understanding of the alteration processes, involved fluids, and to some extent, degree of alteration with increasing distance from an ore deposit, can be gained.

Nevertheless, most alteration studies in the literature focus on known mineral deposits or showings, thereby over-sampling the proximal areas of alteration haloes. Explorationists, in contrast, are necessarily required to use more regional geochemical databases. The understanding of the 3D nature of an alteration envelope remains a critical aspect of a successful exploration program. This spatial determination relies on several criteria based on either binary logic (alteration thresholds) or fuzzy logic (alteration levels). Furthermore, methodological choices for a given type of mineralizing system and host rock are very important. Another issue is the heterogeneous nature of many regional geochemical databases.

In this study, several composite geochemical datasets were used to obtain a more regional picture of hydrothermal alteration. These datasets are not uniform in terms of what chemical elements were analysed, with only the major elements being consistently reported. The project aimed at comparing the performance of hydrothermal alteration indicators, in order to establish which are better-adapted to different contexts and mineralization types. In particular, the use of major elements was emphasized given the nature of the databases used.

Several methods were trialed for different types of precious and base metal deposits, in different lithological and metamorphic environments. These strategies included Normat (software which calculates normative minerals and alteration indices), PER-analysis, element ratios (such as the Ishikawa alteration index), calculated normative minerals, and relative mass balances. The latter is a CONSOREM-developed adaptation to the mass balance method.

Normat was found to be particularly effective in VMS environments where leaching dominates. The relative mass balance method is more complex but was the best-performing strategy to delineate alteration zones (1) in high-grade metamorphic environments; and (2) in relation with gold mineralization for which related alteration largely consists of mass gains.

Table of contents

Summary	ii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	v
Liste des figures	v
1. Introduction et objectifs	1
1.1 Approches classiques	1
1.2 Approche statistique	2
1.2.1 Cas théoriques simples	2
1.2.2 Cas théoriques complexes	3
1.3 Détermination du seuil d'altération	4
1.4 Synthèse des paramètres influençant la signature d'altération	5
2. Description des méthodes	6
2.1 Normat	6
2.2 Ratios d'éléments	6
2.3 Analyse-PER	7
2.4 Bilan de masses	8
2.4.1 Précurseur unique	8
2.4.2 Précurseurs multiples	8
2.4.3 Calcul des courbes de fractionnement des précurseurs	9
2.4.4 Calcul des gains ou des pertes de masse	9
2.4.5 Indice variation	10
2.4.6 Bilan de masses relatif	10
2.4.7 Méthodologie du Bilan de masses relatif	11
2.4.8 Amélioration de la méthode du Bilan de masses relatif	11
2.5 Minéraux normatifs calculés :	12
3. Études de cas	15
3.1 Cas de Bell-Allard	15
3.1.1 Géologie régionale	15
3.1.2 Calcul du Bilan de masses	16
3.1.3 Présentation des résultats	18
1) Bilan de masses appliqué à l'indice variation (figure 35);	18
2) Normat appliqué à la densité (figure 36);	18
3) Minéraux normatifs calculés appliqué au quartz (figure 37);	18
4) Ratio d'éléments selon l'indice d'altération d'Ishikawa (figure 38);	18
5) Normat appliqué à l'indice d'altération I-Ser (figure 39).	18
3.1.4 Comparaison des méthodes	18
3.1.5 Détermination du seuil	19
3.1.6 Conclusion	20
3.2 Cas de Dussault	20
3.2.1 Géologie régionale	20
3.2.2 Calcul du Bilan de masses relatif	21
3.2.3 Modélisation des précurseurs	22
3.2.4 Résultats	23
3.2.5 Conclusion	23
3.3 Cas de Casa Berardi	24
3.3.1 Géologie régionale	24
3.3.2 Paramètres de traitement	24
3.3.3 Résultats	25
3.3.4 Conclusion	25
3.4 Cas de Kiena	26
3.4.1 Géologie régionale	26
3.4.3 Résultats	27
3.4.3.1 Méthode Normat	28
3.4.3.2 Autres méthodes	28

3.4.4 Conclusion	28
4. Conclusion générale.....	28
5. Remerciements	29
6. Références	30

Liste des tableaux

Tableau 1: Résumé des cas théoriques simples.	3
Tableau 2: Résumé des cas théoriques complexes.	4
Tableau 3: Valeur qualitative des paramètres influençant la signature d'altération.....	5
Tableau 4: Comparaison des méthodes.	14
Tableau 5: Caractéristiques géologiques des quatre banques de données.....	15
Tableau 6: Paramètres de traitement pour le calcul des bilans de masse.	15
Tableau 7: Équations des courbes de fractionnement modélisées pour les groupes 1 et 2.	17
Tableau 8: Comparaison des superficies des halos d'altération obtenus par l'utilisation de différents indices.....	18
Tableau 9: Équations des courbes de fractionnement modélisées des roches felsiques et des roches mafiques.	23
Tableau 10: Équations des courbes de fractionnement modélisées pour les volcanites et les sédiments.	25
Tableau 11: Équations des courbes de fractionnement modélisées des komatiites et des volcanites.....	27

Liste des figures

Figure 1: Isocontours.....	32
Figure 2: Two alteration profiles using different alteration index.	32
Figure 3: Heterogeneous hydrothermal alteration..	33
Figure 4: Normal distribution of unaltered samples	33
Figure 5: Log-normal distribution of altered samples.....	34
Figure 6: Quasi-normal distribution.....	34
Figure 7: Quasi-log-normal distribution.....	35
Figure 8: Quasi-normal distribution.....	35
Figure 9: Quasi-log-normal distribution.....	36
Figure 10: Quasi-normal distribution.....	36
Figure 11: Quasi-log-normal distribution.....	37
Figure 12: Determination of an alteration threshold.....	37
Figure 13: Superposition of the fields for unaltered and altered rocks.....	38
Figure 14: Calculation of normative minerals using Normat.....	38
Figure 15: Distribution of weakly altered samples on binary diagrams.....	39
Figure 16: Illustration of the PER analysis method to quantify hydrothermal alteration.....	39
Figure 17: Two examples of PER analysis-type plots from the Dussault database.....	40
Figure 18: Element gains and losses obtained from the mass balance method.....	40
Figure 19: Immobile elements distribution using Al and Ti.....	41
Figure 20: The theoretical fractionation curve modelling the composition of multiple precursors.....	41
Figure 21: Fan-shaped distribution for altered samples on the Al/Ti diagram.....	42
Figure 22: Determination of immobile elements composition of precursors.....	42
Figure 23: Determination of fractionation curves for mobile elements.....	43
Figure 24: Once mobile elements curves have been established, mass gains / losses can be calculated.....	43
Figure 25: Example of the “general equation” for tholeiitic and calc-alkaline rocks.....	44
Figure 26: Using the “relative mass balance” method by testing two modelled fractionation curves.....	44

Figure 27: The RMB method could be improved by programming new software to automatically define precursor rocks along specific alteration curves.....	45
Figure 28: Regional geology of the Bell-Allard Mine.....	45
Figure 29: Cross-section of the Bell-Allard property..	46
Figure 30: Projection of samples around the mineralized zone at Bell-Allard.....	47
Figure 31: For mass balance calculations, the least altered samples were selected in the Bell-Allard database to model the precursor's compositions.....	48
Figure 32: Zr/Al versus Ti and MgO versus Ti binary diagrams.....	48
Figure 33: Al ₂ O ₃ versus TiO ₂ binary plots showing differentiation curves for two different groups of samples.....	49
Figure 34: CaO versus TiO ₂ binary plots showing differentiation curves for two different groups of samples.....	49
Figure 35: Alteration halos determined by the RMB method (variation index) at Bell-Allard.....	50
Figure 36: Alteration halos determined by Normat (density).....	51
Figure 37: Alteration halos showing quartz values from normative minerals calculations at Bell-Allard.....	52
Figure 38: Alteration halos using the Ishikawa index.....	53
Figure 39: Alteration halos determined by Normat and using the I-Ser alteration index.....	54
Figure 40: Bell-Allard mine, continued. Both this figure and Table 8 compare the size of the alteration haloes produced by different methods..	55
Figure 41: At Bell-Allard, the determination of an alteration threshold.....	56
Figure 42: The application of a buffer zone at Bell-Allard.....	56
Figure 43: Bell-Allard mine, continued. The buffer technique discussed in figure 42 was applied to the 25 alteration indicators, and the results are displayed here for 22 of these.....	57
Figure 44: The area marked by the arrowhead lacks samples, thereby resulting in the artificial 60 m limit in footwall alteration on figure 43. The bold green line is the 60 m buffer..	57
Figure 45: If instead of 20% of samples, 50% need to be altered within a 10 m-wide buffer, fewer alteration indicators are applicable.	58
Figure 46: If 80% of samples need to be altered within a 10 m-wide buffer, even fewer alteration indicators are applicable.	58
Figure 47: Regional geology of the Dussault property.....	59
Figure 48: Local geologic map of the Dussault property	59
Figure 49: Projection of samples to the surface of Dussault property.	60
Figure 50: Two groups of samples from the Dussault property are observed on X vs. Ti diagrams, where X is a mobile element.....	60
Figure 51: Binary diagram showing the variation index vs. the number of samples from Dussault.....	61
Figure 52: Modelled fractionation curves for Group 1 and Group 2 samples from Dussault.....	61
Figure 53: Diagram showing the mass gain/loss versus Na ₂ O, Dussault property..	62
Figure 54: Na alteration index evaluated using the RMB method.....	62
Figure 55: Si alteration index evaluated using the RMB method.....	63
Figure 56: Mg alteration index evaluated using the RMB method.....	63
Figure 57: Regional geology of the Casa Berardi gold mine.	64
Figure 58: Regional geological cross-section through Casa Berardi.....	64
Figure 59: Casa Berardi, continued. For mass balance calculations, samples were divided into two categories based on drill hole information: sedimentary vs. volcanic rocks.....	65
Figure 60: Casa Berardi, continued. Map-view grids of carbonate alteration derived from various methods	65
Figure 61: Casa Berardi, continued. Map-view grids of four alteration indicators: Iser-Normat (sericite index), alkaline PER, Ipa-Normat (LOI index) and Ifrais-Normat.....	66
Figure 62: Regional geology of the Kiena mining area.....	66
Figure 63: Exploited zones (pinkish grey) and satellite mineralized zones (in green) in the Kiena mining area (after McWatters).....	67
Figure 64: Al/Ti diagram showing the distribution of komatiites and other volcanic rocks from the Kiena mining area.	67
Figure 65: Kiena mining area, continued. Using the Normat software, several parameters were calculated, including the sum of normative carbonates.....	68

Figure 66: Kiena mining area, continued. Comparison of several Normat-derived alteration indicators, in map view. 68
Figure 67: Comparison of alkaline PER calculations and mass balance calculations..... 69
Figure 68: Efficiency of the different methods used to characterize hydrothermal alteration. 70

1. Introduction et objectifs

La signature de l'altération hydrothermale se caractérise par sa composition chimique, sa dimension et sa disposition autour de la zone minéralisée. Cinq méthodes de caractérisation de l'altération sont proposées et comparées dans ce document de même que les résultats de quatre études de cas qui permettent de vérifier les avantages et les limites des méthodes.

Cette étude a pour principaux objectifs de caractériser l'aspect dimensionnel de l'altération hydrothermale, de déterminer les seuils minimaux de la signature afin d'identifier l'altération minimale et de comparer l'efficacité des différentes méthodes utilisées pour définir la signature de l'altération hydrothermale. Ces objectifs sont interdépendants les uns des autres et ont été menés en parallèle. Ils traduisent l'importance de définir quantitativement et qualitativement les altérations des gisements de sulfures massifs volcanogènes (VMS) et aurifères.

Certaines méthodes permettent déjà de visualiser la dimension de l'altération hydrothermale par rapport à un seuil déterminé. Les approches classiques et statistiques constituent deux de ces méthodes.

1.1 Approches classiques

Dans la littérature, deux types de visualisation de l'altération hydrothermale sont communément utilisés, soit les isocontours relatifs et les profils linéaires le long d'un forage.

Les isocontours relatifs se tracent à partir de la distribution spatiale des échantillons aux environs d'une zone minéralisée. Ces isocontours correspondent aux valeurs analytiques d'un élément, d'un oxyde ou d'un indice d'altération ([figure 1](#)). Les isocontours se tracent habituellement à main levée dans le but de faire ressortir les variations d'intensité de l'altération en différentes zones.

Les profils linéaires le long d'un forage représentent l'intensité de l'altération tracée en fonction de la distance linéaire du forage. La distance linéaire est celle qui suit le profil du forage ([figure 2](#)).

Les approches classiques simplifient la représentation spatiale des phénomènes d'altération et elles négligent l'hétérogénéité tridimensionnelle aux environs d'une zone minéralisée. Ainsi, l'intensité de l'altération hydrothermale ne varie pas linéairement en fonction de la distance à laquelle se situe l'échantillon par rapport à la zone minéralisée. Par exemple, un échantillon situé à 10 m de la zone minéralisée peut être altéré, tandis qu'un autre échantillon, situé également à 10 m de cette zone et à 1 m de l'autre échantillon, ne présente pas nécessairement la même intensité d'altération ou n'est tout simplement pas altéré. Comme l'intensité de l'altération hydrothermale est hétérogène, la détermination de la signature d'altération est complexe.

Les méthodes classiques de visualisation de l'altération hydrothermale présentent des résultats simplifiés étant donné qu'elles négligent l'hétérogénéité. Pour plus de précision, une approche statistique pour l'étude de l'altération est utilisée.

1.2 Approche statistique

Cette approche intègre plus de données que les méthodes classiques. Elle permet ainsi de les traiter en considérant leur hétérogénéité spatiale.

Par exemple, si un seul échantillon fortement altéré est répertorié dans un secteur (cas 1 de la [figure 3](#)), a-t-il le même poids que si la moitié des échantillons sont modérément altérés dans un autre secteur (cas 2 de la [figure 3](#))? La première étape pour répondre à cette question est de déterminer un seuil de validation pour l'altération hydrothermale. Ce seuil se définit selon deux paramètres : 1) la valeur analytique minimum de l'altération, en valeur absolue, pour un secteur donné et 2) la quantité d'échantillons représentatifs dont les valeurs d'altération seront supérieures ou égales à ce seuil. Ces paramètres font appel à la distribution des populations d'échantillons qui est abordée par les approches statistiques.

La section suivante présente différents cas théoriques illustrant l'utilisation de la distribution spatiale des échantillons frais et altérés par rapport aux courbes de distribution des populations.

1.2.1 Cas théoriques simples

Les cas théoriques simples où la banque de données est composée d'une seule lithologie et l'altération est bien définie spatialement, permettent d'illustrer l'effet de l'altération sur une population d'analyses chimiques et de démontrer que la statistique est un outil utile mais limité. Par exemple, une banque de données contient plusieurs échantillons qui appartiennent tous à la même lithologie et qui se situent aux environs d'une zone minéralisée.

Si les échantillons ne sont pas altérés, le résultat graphique présente une courbe correspondant à une distribution normale de la population ([figure 4](#)), en raison de la variabilité des résultats analytiques et celle inhérente à la composition de la roche. Par contre, si la totalité des échantillons est altérée, le résultat graphique présente une courbe correspondant à une distribution log-normale de la population ([figure 5](#)), en raison de la variabilité de l'intensité de l'altération. Le mode de la population de la figure 5 est le meilleur estimé de la composition initiale de la roche.

En combinant les échantillons altérés et frais on obtient différents type de population. Si une faible proportion des échantillons est altérée contre une forte proportion qui ne l'est pas, le résultat du graphique présente une courbe correspondant à une distribution quasi-normale. Le mode est presque le même que celui de la distribution normale mais la courbe est asymétrique vers la droite, suivant la tendance de la distribution log-normale ([figure 6](#)). Par contre, si une forte proportion des échantillons est altérée contre

une faible proportion qui ne l'est pas, le résultat du graphique présente une courbe correspondant à une distribution quasi-log-normale. La courbe est asymétrique vers la droite suivant la tendance de la distribution log-normale ([figure 7](#)). Dans tous les cas, le mode demeure la meilleure estimation de la composition initiale de la roche fraîche.

Table 1: Summary of simple theoretical cases.

Simple case	Fig. 4	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7
Population	Homogeneous	Homogeneous	Homogeneous	Homogeneous
Lithology	Unique	Unique	Unique	Unique
Alteration	Nil	Complete	Weak	Strong
Statistical distribution	Normal	Log-normal	Quasi-normal	Quasi-log-normal

1.2.2 Cas théoriques complexes

Les cas théoriques complexes où l'altération est hétérogène et mal définie dans l'espace, permettent d'illustrer l'effet de l'altération sur une population d'analyses chimiques et de démontrer que la statistique est limitée dans sa capacité de traduction des particularités spatiales. Par exemple, une banque de données contient plusieurs échantillons se situant aux environs d'une zone minéralisée. Ils appartiennent tous à la même lithologie mais leur population est hétérogène, c'est-à-dire que des échantillons altérés et frais se côtoient à l'intérieur d'une même zone. Si une faible proportion des échantillons est altérée contre une forte proportion qui ne l'est pas, le résultat du graphique présente une courbe correspondant à une distribution quasi-normale. Le mode est presque le même que celui de la distribution normale mais la courbe est asymétrique vers la droite suivant la tendance de la distribution log-normale ([figure 8](#)). Par contre, si une forte proportion des échantillons est altérée contre une faible proportion qui ne l'est pas, le résultat du graphique présente une courbe correspondant à une distribution quasi-log-normale ([figure 9](#)) et la courbe est asymétrique vers la droite. Ces résultats sont comparables à ceux des cas simples.

Si une faible proportion des échantillons est altérée contre une forte proportion qui ne l'est pas, le résultat graphique présente une courbe correspondant à une distribution quasi-normale. Le mode est presque le même que celui de la distribution normale mais la courbe est asymétrique vers la droite suivant la tendance de la distribution log-normale ([figure 10](#)).

Enfin, une banque de données contient plusieurs échantillons se situant aux environs d'une zone minéralisée. Ils appartiennent à deux lithologies différentes mais sensiblement similaires pour l'indicateur considéré et leur population est hétérogène, c'est-à-dire que des échantillons altérés et frais se côtoient à l'intérieur d'une même zone.

Si une forte proportion des échantillons est altérée contre une faible proportion qui ne l'est pas, le résultat graphique présente une courbe correspondant à une distribution

quasi-log-normale. La courbe est asymétrique vers la droite suivant la tendance de la distribution log-normale ([figure 11](#)).

Table 2: Summary of more complex theoretical cases.

Complex case	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11
Population	Heterogeneous	Heterogeneous	Heterogeneous	Heterogeneous
Lithology	Unique	Unique	Unique	Two
Alteration	Weak	Strong	Weak	Strong
Statistical distribution	Quasi-normal	Quasi-log-normal	Quasi-normal	Quasi-log-normal

Suite à ces constatations, les différents cas théoriques démontrent que, d'un simple point de vue statistique, l'utilisation des populations est un outil incomplet pour déterminer les seuils de validité de l'altération. En effet, les différentes populations sont indépendantes de la distribution spatiale des échantillons altérés. Une considération spatiale doit donc être utilisée pour valider les altérations.

1.3 Détermination du seuil d'altération

Le seuil correspond à une valeur obtenue à partir des analyses chimiques et il permet de caractériser la signature d'altération. Par sa définition, sa valeur doit être supérieure à celle du bruit de fond régional, représentative d'une partie significative des échantillons (en pourcentage) et correspondante à une distribution spatiale cohérente des échantillons altérés. Lorsque ce seuil est défini, il est utile pour dimensionner le halo d'altération et comparer l'efficacité des différentes méthodes.

Théoriquement, plus la valeur du seuil est élevée par rapport à celle du bruit de fond, plus la proportion d'échantillons altérés diminue. Parallèlement, il faut équilibrer la valeur du seuil pour que les échantillons altérés définissent une distribution spatiale cohérente. D'un point de vue pratique, il faut déterminer deux valeurs qui sont interdépendantes : la valeur du seuil et le pourcentage d'échantillons représentatifs. Des modélisations en ce sens ont été réalisées dans le cadre du traitement de la base de données de Bell-Allard.

À la suite de plusieurs tentatives pour déterminer le seuil, une approche statistique a été définie. Cette méthode utilise la rupture de pente des fréquences cumulées de la population totale d'échantillons, combinée au mode d'une population témoin d'échantillons altérés ([figure 12](#)). Cette méthode objective a été appliquée pour les 25 indices d'altération étudiés à partir de la banque de données de Bell-Allard.

Premièrement, un graphique de la distribution des valeurs analytiques des échantillons altérés doit être tracé (ceci donne une distribution log-normale). Deuxièmement, la valeur du mode de cette courbe est déterminée et elle représente le seuil au-delà duquel les échantillons seront considérés altérés. Troisièmement, la courbe de la

distribution de la population totale des échantillons et celle des fréquences cumulées sont tracées sur le même graphique (figure 12). Quatrièmement, la valeur du mode de la population d'échantillons altérés est introduite dans le graphique de la population totale afin d'identifier les échantillons altérés. Finalement, si le mode se situe à gauche de la cassure sur le diagramme de la population totale, tous les échantillons possédant une valeur d'altération plus petite ou égale à celle du mode seront considérés comme étant altérés. Par contre, si le mode se situe à droite de la cassure, tous les échantillons ayant une valeur d'altération plus grande ou égale à celle du mode seront considérés comme étant altérés.

En exploration, l'avantage de définir l'altération par rapport à un seuil permet de définir les zones d'intérêt à différentes échelles. À l'échelle locale, la connaissance du seuil aide à la décision lors de la recherche de zone minéralisée. Tandis qu'à l'échelle régionale, il est possible de faire un dépistage à partir des banques de données existantes et de cibler des secteurs propices à la minéralisation.

1.4 Synthèse des paramètres influençant la signature d'altération

Table 3: Qualitative values for parameters influencing the alteration signature.

Parameters	Qualitative values
Alteration intensity	Nil: all samples are unaltered
	Weak: most samples are unaltered, a few are altered
	Strong: most samples are altered, a few are unaltered
	Complete: all samples are altered
Population homogeneity	Homogeneous: only unaltered <u>or</u> altered samples exist in a given area near the mineralized zone
	Heterogeneous: both unaltered and altered samples coexist in a given area near the mineralized zone
Spatial distribution	Altered samples can be distributed symmetrically or not relative to the mineralized zone
Lithology	One or several rock types can be altered near the mineralized zone

2. Description des méthodes

Cinq méthodes permettent de déterminer l'intensité de l'altération par rapport aux valeurs analytiques des échantillons lithogéochimiques. Les méthodes sont les suivantes : 1) Normat, 2) Ratios d'éléments, 3) Analyse-PER, 4) Bilan de masses et 5) Minéraux normatifs calculés.

2.1 Normat

Normat est une méthode conçue par Mathieu Piché (2000; 2001). La méthode est établie autour d'un logiciel de calcul des minéraux normatifs au faciès des schistes verts (la dernière version inclut également le faciès amphibolite) qui génère 38 minéraux normatifs, 8 indices d'altération indépendants de la composition de la roche, la densité de la roche et la perte au feu normative (Piché, 2000; 2001). Les calculs utilisent uniquement les éléments majeurs et sont basés sur des équations publiées (Cross et al., 1902; Riverin, 1977 et certains travaux de pétrologie expérimentale) et des équations développées par essais et erreurs en utilisant les 300 000 échantillons des bases de données de Jean Descarreaux. Pour la présente étude, les résultats des calculs ont été générés directement par M. Mathieu Piché.

Normat calcule les altérations en transformant les données analytiques en minéraux normatifs. Cette approche ne nécessite pas la connaissance d'un précurseur (protolithe). Deux étapes concourantes sont nécessaires pour calculer les minéraux normatifs. Premièrement, les minéraux sont calculés en utilisant les bases de la norme CIPW et la séquence inverse de Bowen. Deuxièmement, les minéraux discordants par rapport à ceux typiques des roches fraîches sont recalculés en fonction de minéraux d'altération selon différentes formules ([figure 13](#) et [figure 14](#)). Les formules ont été établies à partir de réactions chimiques documentées, expérimentales et à partir d'une approche cognitive. Les détails de la méthode demeurent la propriété intellectuelle de M. Mathieu Piché. Les figures 13 et 14 sont tirées de Piché et Descarreaux (2000; <http://www.cablevision.qc.ca/jdal/page8.html>).

2.2 Ratios d'éléments

Cette dénomination regroupe les différents indices d'altération basés sur des équations arithmétiques, utilisant les pourcentages oxydes ou des proportions cationiques ou molaires. Ces indices permettent de déterminer l'intensité de l'altération des échantillons appartenant à une base de données. Il s'agit spécifiquement de l'indice d'altération d'Ishikawa (Ishikawa et al., 1976) et de l'indice mafique ainsi que des différents ratios utilisés spécifiquement pour certaines banques, comme les ratios cationiques (Casa Berardi et Kiena). Voici les équations arithmétiques des deux indices :

- Indice d'altération d'Ishikawa : $(\text{MgO} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$
- Indice Mafique : $(\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3) / (\text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$

2.3 Analyse-PER

La méthode de l'Analyse-PER pour les altérations hydrothermales a été développée par Stanley et Madeisky (1994). Elle est basée sur l'approche de Pearce (1968) développée initialement pour étudier les changements chimiques d'origine ignée. Graphiquement, la méthode prend la forme de diagrammes binaires A/Z en fonction de B/Z, où A et B sont des éléments uniques ou des combinaisons d'éléments établies selon des rapports spécifiques ([figure 15](#)). La normalisation des éléments considérés à un facteur commun (Z), non impliqué dans les transfères de masses (élément immobile, voir la méthode du Bilan de masses), élimine le problème de fermeture des analyses. Cette normalisation a pour effet de rendre les corrélations plus évidentes (principe de base du PER). Le TiO_2 a été utilisé comme facteur de normalisation (Z). Le métasomatisme subi par la roche est évalué en fonction des divergences de la composition des échantillons par rapport à une droite passant par l'origine dans les diagrammes binaires. L'équation de la droite est fonction des modèles minéralogiques de fractionnement, par exemple les plagioclases et l'olivine.

Deux modèles sont utilisés :

PER-Alcalin : $(2Ca + K + Na)/Ti$ en fonction de Al/Ti , où $A=(2Ca + K + Na)$, $B=Al$ et $Z=Ti$

PER-Mafique : $(Fe + Mg) / Ti$ en fonction de Al/Ti , où $A=(Fe + Mg)$, $B=Al$ et $Z=Ti$

Pour simplifier la visualisation, les données d'analyse en pourcentage poids d'oxydes sont transformées en rapports molaires (oxyde / poids atomique). Cette transformation permet de développer des « droites modèles » directement en fonction de la composition stœchiométrique des minéraux. Comme l'indiquent les équations ci-dessus, les modèles utilisés sont ceux du feldspath (PER-Alcalin) et mafique (PER-Mafique pour olivine-pyroxène) ([figure 16](#)). Ces deux modèles définissent des droites de pente $m=1$. Dans le but de quantifier le métasomatisme (R), la pente de la droite qui passe par l'origine et la position de l'échantillon, est comparée à celle du modèle ($m=1$) selon les équations suivantes :

$$R = (1 - [((2Ca + Na + K) / Ti) / (Al / Ti)]) * 100 \text{ (modèle feldspath)}$$

$$R = (1 - [(0,5 * (Na + K)) / Ti] / (Al / Ti)) * 100 \text{ (modèle mafique pour olivine-pyroxène)}$$

Les valeurs calculées qui sont inférieures 1, indiquent un appauvrissement des éléments considérés en ordonnée, tandis que les valeurs supérieures à 1, un enrichissement. Deux exemples utilisant la banque de données de Dussault sont présentés à la [figure 17](#).

2.4 Bilan de masses

Dans les analyses lithogéochimiques, le contenu en éléments majeurs est exprimé sous la forme de pourcentage poids des oxydes qui sont comptabilisés sur 100%. Les processus métasomatiques impliquent des pertes et des gains de masse. Même si certains éléments immobiles tels Al, Ti, Zr et Y, sont généralement réfractaires aux processus métasomatiques (Gresens, 1967 ; Winchester et Floyd, 1977 ; MacLean et Kranidiotis, 1987), leur pourcentage poids sera tout de même affecté par les transferts chimiques d'éléments mobiles. Ainsi, ces processus de gains et de pertes de masse feront respectivement diminuer et augmenter le pourcentage d'éléments immobiles contenus (MacLean et Kranidiotis, 1987). Le fondement du calcul du Bilan de masses repose sur ce principe. Spécifiquement, le calcul du Bilan de masses vise à déterminer le facteur d'altération qui correspond à la variation du contenu en éléments immobiles dans une roche altérée versus son protolithe.

Le **principe de base** du calcul de Bilan de masses repose sur l'immobilité de certains éléments durant le métasomatisme. Considérant cette immobilité, le rapport de deux éléments devrait demeurer le même pour une même roche indépendamment du degré de métasomatisme ([figure 18](#)).

2.4.1 Précurseur unique

Dans un diagramme binaire d'éléments immobiles Al versus Ti, si la roche subit un gain ou une perte de masse durant l'altération hydrothermale alors la composition de cette roche (ratio Al/Ti) se déplacera le long d'une droite reliant sa position initiale (précurseur) et l'origine ([figure 19](#)). Les échantillons altérés ou non qui appartiennent à une même roche se situent tous sur la même droite. Cette droite sera appelée « droite d'altération » et, sur les diagrammes binaires des éléments mobiles et immobiles, elle passe toujours par l'origine. Ce déplacement le long de la droite d'altération est fonction de la conservation du rapport Al/Ti. Ainsi, l'altération hydrothermale se manifeste chimiquement par l'augmentation ou la diminution de la concentration des éléments immobiles (Al/Ti) dans la roche altérée. Le calcul du Bilan de masses (MacLean et Kranidiotis, 1987) vise donc à déterminer le déplacement de la composition des roches altérées le long de droites spécifiques d'altération. Cette méthode implique la connaissance de la composition du protolithe (précurseur) ou, du moins, son estimation.

2.4.2 Précurseurs multiples

Une population d'échantillons à précurseurs multiples se reconnaît par la distribution des échantillons sur plusieurs droites d'altération. Plusieurs droites passant par l'origine doivent être tracées pour que chaque échantillon appartienne à une roche donnée. Le principe du calcul de Bilan de masses à précurseurs multiples implique une modélisation de la composition initiale des roches fraîches qui sera illustrée par une courbe de fractionnement ([figure 20](#)) recoupant les multiples droites d'altération (MacLean, 1990; MacLean et Barrett, 1993; Barrett et MacLean, 1994). Cette modélisation peut s'effectuer de différentes façons (présentée à la section « 2.4.6 Aspect qualitatif de la méthode »). La courbe de fractionnement est modélisée

en utilisant un élément immobile et compatible (Al) versus un élément immobile mais incompatible (Ti). Cette courbe est définie par une équation du deuxième degré (équation de la parabole) qui est considérée comme étant représentative d'une suite de roches volcaniques dont les compositions varient de basalte à rhyolite.

Au sein d'une banque de données contenant des échantillons altérés, la présence d'altération se manifeste par une distribution en éventail le long de droites d'altération dans un diagramme binaire Al versus Ti ([figure 21](#), à gauche). Ce test rapide de la distribution des échantillons permet d'évaluer empiriquement l'importance des phénomènes d'altération et l'applicabilité du calcul de Bilan de masses pour la banque de données. Le diagramme de droite de la [figure 21](#), Al versus Ti, présente la distribution en éventail des échantillons pour une des quatre banques de données traitées dans le cadre du projet, celle de Dussault.

2.4.3 Calcul des courbes de fractionnement des précurseurs

Les conditions de base veulent que les valeurs de Al/Ti des précurseurs soit connues, ainsi la courbe de différenciation magmatique est également connue. En utilisant la courbe de différenciation magmatique ou la courbe de fractionnement, la composition en Ti du protolithe peut être déterminée ([figure 22](#), à gauche). Cette opération doit être réalisée pour tous les échantillons. La composition du protolithe correspond au point d'intersection (en orange) entre la courbe de différenciation (en rouge) et la droite passant par l'origine (en bleu). La courbe de différenciation correspond à une courbe parabolique dont l'équation est de deuxième degré et la droite d'altération correspond à une équation linéaire, de premier degré. En utilisant le logiciel Excel, les équations de la droite et de la parabole sont facilement définies. La composition en Ti du protolithe est déterminée mathématiquement selon la formule classique d'équation du deuxième degré ([figure 22](#)). L'intersection entre une ligne et une parabole génère au maximum deux solutions ([figure 22](#), à droite). Selon les cas, l'une des solutions est irréaliste et doit être rejetée.

Une fois que la composition initiale en Ti est déterminée pour chaque échantillon, il faut modéliser les courbes de fractionnement des éléments mobiles (Ca, Si, Fe, Mg, Na, K). Pour ce faire, les échantillons qui solutionnent l'équation définie précédemment, c.-à-d. ceux qui se situent sur la courbe de fractionnement, sont sélectionnés. Ces échantillons sont considérés comme peu altérés et leur contenu en éléments mobiles est également considéré comme représentatif de la roche fraîche. En utilisant le logiciel Excel, la courbe idéale de fractionnement des éléments mobiles est modélisée en fonction du Ti ([figure 23](#)). S'il y a des incohérences, elles sont probablement dues à la présence de groupes particuliers de roches. Ces groupes de roches devront être isolés et traités indépendamment.

2.4.4 Calcul des gains ou des pertes de masse

Lorsque les courbes des éléments mobiles des précurseurs sont déterminées, les gains et les pertes de masse peuvent être calculés pour chaque échantillon. Ceci se fait en solutionnant les équations quadratiques des éléments mobiles pour chaque échantillon

([figure 24](#)). Cette opération permet de calculer la composition théorique des éléments mobiles du précurseur modélisé. Le calcul du Bilan de masses se fait en soustrayant la valeur analytique d'un élément mobile, disons Si, de sa valeur calculée. Un résultat négatif indique une perte (lessivage) de cet élément et inversement.

2.4.5 Indice variation

Les résultats du calcul de Bilan de masses sont exprimés en gain (+) et en perte (-) d'un élément spécifique par rapport à la composition modélisée du précurseur. « L'indice variation » (nom informel) correspond à la somme des gains et des pertes pour les éléments mobiles suivants :

$$\text{Indice variation} = \Sigma (\text{Si} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{Ca} + \text{K}) \text{ où toutes les valeurs sont données en valeur absolue.}$$

Cet indice permet de quantifier les gains et les pertes de tous les éléments par un seul chiffre. Ainsi, plus la valeur de l'indice variation est élevée, plus le métasomatisme subi par la roche est intense.

2.4.6 Bilan de masses relatif

La détermination de la composition chimique des précurseurs est le paramètre le plus qualitatif du calcul de Bilan de masses. Deux groupes de méthodes sont utilisés, soit les méthodes directes et indirectes. Les méthodes directes reposent sur l'utilisation de la composition chimique d'une ou de plusieurs roches qui sont, d'une manière démontrable, des équivalents frais aux roches altérées. À cette fin, la position stratigraphique des échantillons et/ou une étude pétrographique peuvent être utilisées pour démontrer le lien génétique entre les échantillons de référence frais et ceux altérés. Les méthodes indirectes sont utilisées pour définir les courbes de fractionnement représentatives de la composition des protolithes au sein d'une banque de données volumineuse. Cette étape est fondamentale et peut se réaliser à partir de trois approches : en sélectionnant des roches peu altérées dans la banque de données, en utilisant une courbe modèle de fractionnement ou en appliquant la méthode inverse qui teste différentes courbes. La dernière méthode correspond à celle du Bilan de masses relatif et a été développée par le CONSOREM.

La sélection de roches peu altérées se fait en utilisant des indicateurs tels que la perte au feu, l'indice d'Ishikawa et le contenu en CO₂. Par essais et erreurs, des groupes de roches représentatifs des échantillons peu altérés sont isolés. Dans le diagramme Al versus Ti, les roches volcaniques d'affinité tholéiitique à calco-alcaline définissent des courbes de fractionnement théoriques, de composition basaltique à rhyolitique, qui se superposent ([Figure 25](#)). Une équation générale pour le fractionnement des roches volcaniques est déduite de cette superposition. Ainsi, cette équation s'utilise directement pour toutes les roches volcaniques, sauf celles alcalines.

La méthode du bilan de masses relatif (BMR) vise à déterminer des courbes de différenciation par la méthode inverse. La prémisse de base veut que les échantillons

peu altérés définissent des courbes de fractionnement cohérentes des éléments mobiles. L'expression « courbes cohérentes » définit une distribution linéaire ou de deuxième ordre des échantillons dans un diagramme d'éléments mobiles (Na, Si, K, Fe, Mg, Ca) versus Ti. C'est une méthode dont le résultat provient d'une démarche effectuée par essais et erreurs.

2.4.7 Méthodologie du Bilan de masses relatif

Les conditions de base considèrent que les valeurs de Al/Ti des précurseurs et la courbe de différenciation magmatique sont inconnues.

La méthodologie correspond aux étapes suivantes :

- 1- Les droites d'altération sont tracées.
- 2- Une courbe de fractionnement des précurseurs est modélisée à partir de la distribution en éventail des échantillons sur un diagramme Al/Ti. Cette courbe « test » est tracée de façon aléatoire en se guidant sur les droites d'altérations et doit être cohérente, c'est-à-dire qu'elle doit être linéaire ou correspondre à une courbe de deuxième degré.
- 3- L'équation de la courbe « test » est définie. Pour ce faire, quelques échantillons représentatifs de la courbe sont sélectionnés, isolés et introduits dans un nouveau diagramme Al/Ti dans le logiciel Excel. L'équation de 1^{er} ou 2^{ième} ordre est déterminée par le logiciel Excel.
- 4- En utilisant cette équation, les échantillons qui solutionnent l'équation selon un certain degré de tolérance, sont extraits de la banque de données. Ainsi, les échantillons se situant sur ou en marge de la courbe « test » sont isolés. Le degré de tolérance est fonction du nombre d'échantillons de la banque de données. Par exemple, avec une banque volumineuse, un faible niveau de tolérance est acceptable puisque plusieurs échantillons solutionneront nécessairement l'équation.
- 5- Il reste à vérifier que les échantillons sélectionnés génèrent des courbes cohérentes lorsqu'ils sont utilisés dans les diagrammes d'éléments mobiles soit Si, Fe, Mg, Mn et Ca versus Ti.
- 6- Si les courbes ne sont pas cohérentes dans les diagrammes d'éléments mobiles, c'est que la courbe « test » ne correspond pas à la courbe de fractionnement des précurseurs. Dans ce cas, il faut recommencer les étapes 1 à 5 pour sélectionner d'autres échantillons jusqu'à ce que le résultat réponde aux critères de départ ([figure 26](#)).

Un avantage important de cette méthode est qu'elle peut être appliquée pour le traitement de l'altération des roches de différents grades métamorphiques et de différentes compositions chimiques.

2.4.8 Amélioration de la méthode du Bilan de masses relatif

Une amélioration majeure à la méthode BMR serait la programmation d'un logiciel utilisant les distributions des populations de points le long de droites spécifiques d'altération ([figure 27](#)) pour définir la composition des précurseurs. En utilisant le mode (voir approche statistique), le logiciel pourrait déterminer la composition des protolithes

le long de droites spécifiques et ainsi définir une courbe de fractionnement idéalisée mais représentative de la composition des échantillons dans la base de données. Cette démarche éliminerait ainsi l'approche par essais et erreurs pour la modélisation des différentes courbes de fractionnement.

2.5 Minéraux normatifs calculés :

Cette méthode repose sur le calcul normatif des minéraux d'altération selon l'ordre d'énumération suivant :

1. Apatite (**Ca₅P₃**)
2. Anatase (**Ti**)
3. Albite (**Na₂AlSi₃**)
4. Séricite (**KAl₃Si₄**)
5. Chlorite (**Al₂SiFeMg**)
6. Quartz (**Si**)
7. Ankérite (**CaFeMg**)
8. Dolomie (**CaMg**)
9. Calcite (**Ca**)
10. Sidérite (**Fe**)
11. Magnésite (**Mg**)

Le principe repose sur l'attribution des cations pour la formation de minéraux d'altération spécifiques. Cette norme est applicable principalement pour les roches carbonatées. Elle a été développée pour faire ressortir les zonalités en carbonates (Ca-Fe-Mg) par Damien Gaboury. Le rapport Fe/Fe+Mg de la chlorite est également calculé. La séquence de formation des carbonates, soit ankérite, dolomie, calcite, sidérite et magnésite est basée sur la formation prioritaire des minéraux à cations multiples, suivie par les minéraux bi-cationiques et à cations uniques (éléments en caractère gras dans l'énumération ci-dessus).

Le premier fondement de la méthode considère la séquence de formation des silicates. Cette séquence repose sur l'attribution de la quantité maximale d'un cation pour la formation d'un minéral spécifique. D'après la transformation des pourcentages d'oxydes en pourcentages cationiques, des quantités de cations sont attribuées pour la formation de minéraux spécifiques dont la composition est stœchiométrique. Par exemple, la quantité de Na détermine la valeur calculée d'albite. Une certaine quantité de Si et d'Al, nécessaire à la formation de l'albite, est soustraite. La valeur du K détermine la quantité de séricite qui sera formée. Encore une fois, une quantité de Si et d'Al est soustraite. À ce stade, la valeur résiduelle de Al contrôle la quantité de chlorite qui sera formée. Un rapport de 50% de Fe et de 50% de Mg est attribué par défaut. Si la quantité de Mg ou de Fe est insuffisante, alors le rapport de Fe/Mg est changé en conséquence. Enfin, la valeur résiduelle de Si est transformée en quartz.

Le deuxième fondement de la méthode considère la séquence de formation des carbonates. Cette séquence repose sur la quantité disponible des trois éléments : Ca, Fe et Mg. Si ces trois éléments sont disponibles, la quantité minimale de l'un des trois éléments est utilisée pour former de l'ankérite. Par la suite la valeur résiduelle en Ca et

Mg est utilisée pour former de la dolomie. La quantité de dolomie est contrôlée par la valeur minimale de Ca ou de Mg. Enfin, s'il reste des quantités non attribuées de Ca, Fe et Mg, celles-ci servent à former la calcite (Ca), la sidérite (Fe) et la magnésite (Mg). Le résultat est un pourcentage de minéraux calculés dont la somme est de 100%. Cet assemblage ne correspond probablement pas à la minéralogie réelle de la roche. Toutefois, comme l'attribution des cations repose sur les mêmes fondements pour chaque échantillon, l'assemblage minéralogique devrait faire ressortir les variations chimiques de la roche et plus particulièrement pour l'assemblage idéalisé des carbonates.

Table 4: Comparison of trialed methods.

Method	Form	Principles	Results	Advantages	Limitations	Used for
Normat	Software	Calculation of alteration minerals based on the residual chemical composition, which is derived from a modeled composition based on normative principles	Table showing the proportions of normative minerals, alteration indices, LOI, CO ₂ content, and sample density	Uses major elements only Easy to use Link with mineralogy No precursor selection	Version used is calibrated for greenschist facies & volcanic rocks	VMS Gold Others
Element ratios	Element ratios	Arithmetic formulas (oxide proportions)	Quantitative values	Unique result Easy to use No precursor selection	Limited to a few elements Calibrated for VMS Relies on volcanic rocks	VMS Gold Others
PER analysis	Equation Spreadsheet Graphical	Binary diagrams showing molar proportions of mobile/incompatible elements	Binary diagrams showing the distribution of samples relative to magmatic differentiation curves. The level of divergence defines alteration intensity (can be quantified)	No closure to 100% Considers igneous variations Molar calculations Mineralogical analysis	Labour-intensive Relies on volcanic rocks	VMS Gold Others
Mass balances (single precursor)	Equation Spreadsheet	Calculation for element gains/losses in an altered sample compared to a fresh precursor	Table containing gains and losses for major elements	Treatment by element Quantitative Element mobility	Non-altered precursor Quality of analyses Zr - Y or Al - Ti Homogeneous composition Immobile elements	VMS Gold Others
Mass balances (multiple precursors)	Equation Spreadsheet Graphical	Calculation for element gains/losses in an altered sample based on a reference composition modelled from igneous fractionation	Table showing the variations for major elements Projection of samples relative to fractionation curves in binary diagrams	Treatment by element Quantitative Element mobility Yields zoning No precursor selection	Relies on volcanic rocks Quality of analyses Zr - Y or Al - Ti Known magmatic affinities Immobile elements Labour-intensive Good geological knowledge	VMS Gold Others
Calculated normative minerals	Spreadsheet	Calculation of alteration minerals based on the residual chemical composition, which is derived from a modeled composition based on normative principles	Table showing the proportions of normative	Uses major elements only Easy to use Link with mineralogy	Greenschist facies	VMS Gold Others

3. Études de cas

Les méthodes de définition de l'altération hydrothermale ont été vérifiées à partir de cas réels. Au total, quatre banques de données ont été utilisées, soit celle de la mine Bell-Allard, celle de la propriété de Dussault, celle de la mine Kiena et celle de la mine Casa Berardi.

Table 5: Geological characteristics of the areas included in the four geochemical databases.

	Bell-Allard Mine	Dussault property	Kiena Mine	Casa Berardi Mine
Host rocks	Mafic to felsic volcanics Gabbroic dikes	Amphibolite Hornblende gneiss Quartzo-feldspathic gneiss	Komatiite Komatiitic & tholeiitic basalt Quartzo-feldspathic porphyry Intrusions	Tholeiitic basalt Conglomerate Sandstone Shale
Commodities	Zn-Cu-Ag-Au	Zn-Cu-Pb-Ag-Au	Au	Au
Ore description	Massive sulphide lenses; mineralized chimney	Massive to disseminated sulphides in concordant lenses	Disseminated sulphides in altered & brecciated zones	Quartz-carbonate veins & lenses
Metamorphic grade	Greenschist	Amphibolite	Greenschist	Greenschist
Alteration minerals	Talc, chlorite, sericite	Garnet, sillimanite, cordierite, anthophyllite	Quartz, albite, carbonates	Quartz, carbonates
Deposit class	VMS	VMS-SEDEX	Intrusion-related Au	Orogenic Au

Étant donné les limites des méthodes, elles n'ont pu être toutes vérifiées pour chacun des cas. Cependant, les méthodes de Bilan de masses pour un ou deux précurseurs ont été utilisées pour chaque cas comme l'indique le tableau 6.

Table 6: Parameters used in mass balance calculations.

	Bell-Allard Mine	Dussault property	Kiena Mine	Casa Berardi Mine
Number of samples	916	673	1228	2076
Methods	Multiple precursors (2 groups of rocks)	Multiple precursors (2 groups of rocks)	Multiple precursors (1 group of rocks) Unique precursor	Multiple precursors (1 group of rocks)
Modelling approach for the precursor(s)	Unaltered samples based on LOI and A.I.	Inverse method	Theoretical (multiple precursors) Statistical (unique precursor)	Inverse method
Affiliation	TiO ₂ composition	TiO ₂ composition	Lithologic	Lithologic

3.1 Cas de Bell-Allard

3.1.1 Géologie régionale

Le gisement de Bell-Allard, exploité par la compagnie Noranda, est localisé dans le camp minier de Matagami. Il est de type sulfures massifs volcanogènes (Zn-Cu) ([figure](#)

28). Il est similaire aux autres gisements de ce camp minier (voir Lavallière, 1995). Il est encaissé le long d'une unité chertreuse (tuffite clé : Liaghat et MacLean, 1992) qui s'étend latéralement à l'échelle du camp minier (> 20 km). Celle-ci définit l'interface entre deux groupes de roches volcaniques, soit le Groupe du Lac Watson, à la base, et le Groupe de Wabassée, au sommet (Sharpe, 1968). Le Groupe du Lac Watson se compose d'environ 2000 m de laves dacitiques à la base, surmontées par environ 1500 m de laves rhyodacitiques. Ces laves sont d'affinité tholéiitique (Sharpe, 1968). Le Groupe de Wabassée se compose essentiellement de roches volcaniques mafiques d'affinité principalement tholéiitique mais également, en moindre proportion, d'affinité calco-alcaline. Le complexe anorthositique de la rivière Bell, une vaste intrusion litée syn-volcanique d'une superficie d'environ 750 km², constitue la base de la séquence et est interprété comme le moteur thermique de la minéralisation volcanogène (p. ex. Maier et al., 1996). Ce complexe forme le noyau de l'anticlinal de Galinée, un élément structural dominant dans la région. L'axe de cet anticlinal plonge faiblement vers le WNW et est responsable de l'attitude des couches volcaniques (Sharpe, 1968). Dans le secteur du gisement Bell-Allard, les couches sont orientées NW-SE et sont inclinées à environ 50° vers le SW. Le degré de déformation interne des couches et du gisement lui-même est faible et le métamorphisme est au faciès des schistes verts.

Le gisement Bell-Allard a été mis en production en 1999 par Noranda. Le gisement, qui totalise 3,3 millions de tonne à des teneurs économiques de Zn et Cu, est constitué d'une lentille unique, surmontant une zone de cheminée minéralisée ([figure 29](#)). Comme l'ensemble des gisements du flanc sud, le gisement Bell-Allard est encaissé le long de la Tuffite Clé.

La banque de données comporte 916 analyses lithogéochimiques provenant de l'échantillonnage de 13 forages, distribués sur 600 m parallèlement à l'allongement de l'amas de sulfures massifs. La couverture tridimensionnelle de l'échantillonnage est très représentative en bordure de l'amas sulfuré parce que les forages principaux ont été déviés (*wedge*). Avec ces déviations, les échantillons proviennent alors de 60 axes de forage différents. Outre les éléments majeurs, les échantillons ont été analysés pour les éléments : Cr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb et Ba. Une carte de localisation des forages en surface et 11 sections, en format papier et Autocad, espacées à tous les 100 pieds (~ 30 m) accompagnent la banque de données.

Les échantillons de la banque de données sont géoréférencés par rapport à un maillage régional N-S. Toutefois, les sections sont orientées N018. Pour éliminer l'effet de la distorsion reliée à la projection angulaire des échantillons, une correction trigonométrique a été appliquée à l'ensemble des coordonnées.

La section résultante de cette projection ([figure 30](#)) regroupe tous les échantillons qui se retrouvent à l'intérieur d'une distance de 400 m de part et d'autre de la section de référence.

3.1.2 Calcul du Bilan de masses

Pour modéliser la composition des précurseurs, les échantillons peu altérés doivent être sélectionnés à l'intérieur de la banque de données. Les échantillons sélectionnés sont ceux dont la PAF est <5% et ceux dont l'indice d'Ishikawa se situe entre $20 < A.I. < 40$. Par cette approche, deux tendances magmatiques sont observées sur les diagrammes Al/Ti et Y/Zr ([figure 31](#)). Les diagrammes de la [figure 32](#) montrent également que les échantillons appartiennent à plus d'un groupe de roches.

Suite à ces observations graphiques, les échantillons sont considérés comme appartenant à deux groupes de roches comme le montre les courbes, tracées à main levée, du diagramme de gauche de la [figure 31](#). Les équations respectives des courbes de chacun des groupes ne peuvent être calculées à partir de ce diagramme parce que le logiciel calcule par défaut l'équation d'une courbe de tendance et il ne permet le calcul de deux courbes pour une même dispersion en éventail des échantillons. Pour obtenir deux courbes différentes, les échantillons doivent être sélectionnés et placés dans un autre diagramme Al/Ti. Ainsi, l'équation de la courbe de fractionnement de chacun des deux groupes est déterminée ([figure 33](#)).

Une fois que les équations des courbes définissant le TiO_2 sont identifiées pour les deux groupes en fonction d'un élément immobile, Al, les équations des courbes des éléments mobiles peuvent être définies.

L'exemple de diagramme binaire d'élément mobile est donné par le CaO ([figure 34](#)). En utilisant le logiciel Excel, l'équation de la courbe de fractionnement est facilement définie.

De la même façon, les équations des courbes de fractionnement (tableau 7) sont définies pour les autres éléments mobiles (Mg, Na, K, Fe et Si).

Table 7: Equations for modeled fractionation curves, groups 1 and 2 (Bell-Allard area).

Group 1	Group 2
$Ti = - 0,7 Al^2 + 2,8 Al + 9,6$	$Ti = 0,6 Al^2 - 3,7 Al + 17,4$
$Si = - 1,7 Ti^2 - 7,9 Ti + 74,5$	$Si = 6,9 Ti^2 - 24,7 Ti + 69,2$
$Ca = 0,4 Ti^2 + 1,9 Ti + 1,6$	$Ca = - 3,8 Ti^2 + 11,3 Ti + 0,8$
$Mg = 0,4 Ti^2 + 0,7 Ti + 1,1$	$Mg = - 3,1 Ti^2 + 8,9 Ti - 0,4$
$Na = - 0,2 Ti^2 + 0,3 Ti + 3,1$	$Na = 1,9 Ti^2 - 6,0 Ti + 6,9$
$K = - 0,2 Ti^2 + 0,04 Ti + 0,9$	$K = 1,05 Ti^2 - 3,4 Ti + 2,7$
$Fe = 2,5 Ti^2 + 0,4 Ti + 5,8$	$Fe = - 3,4 Ti^2 + 16,4 Ti - 1,4$

3.1.3 Présentation des résultats

Les résultats se divisent en trois parties : la visualisation de la maille représentant l'intensité de l'altération aux environs de la zone minéralisée établie à partir de différentes méthodes, la détermination du seuil d'altération et la comparaison de l'efficacité des différents indicateurs de l'altération.

Suite à la définition des équations des précurseurs pour chaque élément mobile, l'intensité de l'altération peut être déterminée pour chaque échantillon et l'indice de variation est calculé pour chacun d'eux. La maille a été créée à partir de la méthode d'interpolation des voisins naturels dans le logiciel MapInfo. La codification des couleurs repose sur une distribution en pourcentages uniformes, par tranche de 25%. Les résultats les plus significatifs du maillage pour les méthodes suivantes, sont présentés aux figures correspondantes :

- 1) Bilan de masses appliqué à l'indice variation ([figure 35](#));
- 2) Normat appliqué à la densité ([figure 36](#));
- 3) Minéraux normatifs calculés appliqué au quartz ([figure 37](#));
- 4) Ratio d'éléments selon l'indice d'altération d'Ishikawa ([figure 38](#));
- 5) Normat appliqué à l'indice d'altération I-Ser ([figure 39](#)).

3.1.4 Comparaison des méthodes

Les résultats obtenus par différentes méthodes se ressemblent. La projection de la section montre la lentille minéralisée (contour rouge) et la cheminée d'altération qui s'étend en profondeur sous la lentille sur plus de 200 m, selon un vecteur perpendiculaire à la lentille. L'étendue spatiale de la cheminée est limitée par la distribution des échantillons. Néanmoins, les résultats ne sont pas identiques. Il est possible de comparer les halos d'altération obtenus selon leur superficie respective (tableau 8). La superficie a été calculée en utilisant les limites de l'altération et la limite de la base de la cheminée d'altération observable sur les figures. Le ratio calculé dans le tableau 8 correspond au nombre de fois que le halo d'altération est plus grand que la lentille en section en sachant que la lentille possède une superficie de 0,02 km². La comparaison des superficies peut également être visualisée sur la [figure 40](#).

Table 8: Comparison of alteration halo surface areas, based on several methods (Bell-Allard area).

	Chimney (km ²)	Cap rock (km ²)	Total (km ²)	Ratio
Mass balance	0,07	0,00	0,07	3 times
Normat (for density)	0,08	0,06	0,14	7 times
Calculated quartz	0,07	0,03	0,10	5 times
Ishikawa alteration index	0,07	0,01	0,08	4 times
Normat (for I-Ser)	0,06	0,05	0,11	6 times

Les résultats obtenus à partir du logiciel MapInfo n'ont pas tous été montrés mais ils ont été satisfaisants pour 25 indicateurs générés par cinq méthodes différentes :

- 1) Normat (I-frais, I-para, I-chlo, I-ser, I-serpar, I-chlpyr, densité);
- 2) Bilan de masses (Si, Ca, Na, K, Fe, Mg, Fe+Mg, gain, perte, variation);
- 3) rapport d'oxydes (Indice d'altération d'Ishikawa, Fe/alk);
- 4) Analyse-PER (PER-Alcalin, PER-Mafique);
- 5) minéraux calculés (chlorite, Fe/Fe+Mg, calcite, quartz).

Les résultats démontrent que, selon la méthode utilisée, la dimension du halo varie subjectivement dépendamment du maillage appliqué. Il est donc évident qu'une méthode de détermination du seuil de validation de l'altération devait être développée et utilisée systématiquement pour chacun des indicateurs dans le but de comparer leur efficacité objectivement. Avec un point de comparaison plus objectif, l'efficacité des indicateurs sera plus facilement comparée.

3.1.5 Détermination du seuil

La méthode de détermination du seuil est décrite dans l'introduction à la suite des concepts théoriques. Elle utilise la rupture de pente des fréquences cumulées de la population totale d'échantillons, combinée au mode d'une population témoin d'échantillons altérés.

Cette méthode objective a été appliquée pour les 25 indices d'altération. Un exemple effectué à partir de la méthode Normat pour la densité permet de visualiser concrètement la façon dont se détermine le seuil ([figure 41](#)). La valeur du mode de la population des échantillons altérés doit être déterminée en premier. Par la suite, cette valeur est utilisée sur le graphique de la population d'échantillons totales afin d'identifier les échantillons altérés. Donc, si le mode se situe à gauche de la cassure sur le diagramme de la population totale, tous les échantillons qui ont une valeur d'altération plus petite ou égale à celle du mode seront considérés comme étant altérés. Tandis que si le mode se situe à droite de la cassure, tous les échantillons qui ont une valeur d'altération grande ou égale à celle du mode seront considérés comme étant altérés.

Cette méthode est utilisée pour déterminer le seuil d'altération pour tous les indicateurs. Cependant, un autre paramètre doit être considéré en plus du seuil : le niveau de représentativité de l'altération. Dans une zone tampon donnée, seulement une fraction des échantillons de cette sous-population sont altérés selon le seuil défini. Cette fraction est exprimée en pourcentage d'échantillons altérés par rapport aux frais. Pour vérifier cette hypothèse, des sous-populations d'échantillons ont été distribuées à l'intérieur de zones tampons de 10 m autour de la lentille. Ces sous-populations ont été comparées statistiquement en utilisant des proportions de 20, 50 et 80% d'échantillons altérés. Cet exercice visait à modéliser le taux d'échantillons altérés (en dessous ou au-dessus du seuil d'altération) en fonction de la distance de la lentille ([figure 42](#)).

Les sous-populations ont été comparées et étudiées pour les 25 indicateurs ([figure 43](#)). Les résultats montrent que plusieurs indicateurs marquent un arrêt de l'altération à 60 mètres du gisement pour les échantillons appartenant au toit. La [figure 44](#) montre pourquoi les résultats sont biaisés.

La [figure 45](#) et la [figure 46](#) montrent les résultats obtenus en traitant les pourcentages d'échantillons altérés à 50 et 80 % respectivement.

3.1.6 Conclusion

Suite aux comparaisons des indices d'altération, l'indice de densité calculé à l'aide du logiciel Normat apparaît comme l'indicateur le plus performant au niveau dimensionnel. Effectivement, il permet de définir le plus grand halo d'altération. Cependant, des tests à plus grande échelle sont recommandés pour valider la performance de cet indicateur.

3.2 Cas de Dussault

3.2.1 Géologie régionale

La propriété Dussault ([figure 47](#)), localisée dans la réserve faunique de Portneuf à environ 100 km au NW de Québec, renferme plusieurs indices de Zn-Cu-Pb-Au-Ag distribués sur une superficie d'environ 15 km² (SOQUEM; Bernier, 1993). La minéralisation polymétallique est sise dans une séquence de roches supracrustales, volcano-sédimentaires et métamorphiques au faciès des amphibolites. Cette séquence, interprétée comme la continuité nord du groupe de Montauban, appartient à la zone tectonique de Saint-Maurice. Cette zone, orientée N-S, s'interprète comme une suture au sein du Grenville, entre les assemblages de gneiss métamorphisés au faciès granulite du domaine de Mékinac à l'ouest et du complexe du Parc des Laurentides à l'est.

La séquence hôte se compose principalement d'amphibolite, de gneiss à hornblende et de gneiss quarzo-feldspathique à biotite ± grenat ([figure 48](#)). Cette séquence est recoupée à l'est par la volumineuse intrusion grabbroïque de Lapeyrière. L'attitude des couches est grossièrement NNW-SSE et subparallèle à une fabrique planaire

pénétrante dont le pendage varie de modéré à fort vers le WSW. Toutefois, la présence de fermetures, de répétitions et de pincements d'unités sur la carte géologique, et ce principalement à proximité de l'intrusion de Lapeyrère, suggère que les couches sont affectées par un motif de plissement. La minéralisation en sulfures semi-massifs à massifs (20-60% sulfures) forme des horizons d'épaisseur métrique à plurimétrique, subconcordant aux couches, continus latéralement sur des distances de l'ordre du kilomètre et apparemment répétés par plissement. L'assemblage de sulfures comprend principalement de la pyrite, de la pyrrhotite et, en proportion moindre, de la sphalérite ainsi que des traces de chalcopryrite et de galène. Les sulfures, en amas grossiers, sont inclus dans une gangue composée de hornblende, de diopside, de plagioclase, de calcite, de gahnite, d'ilmnénite et de rutile. Des altérations alumineuses accompagnent la minéralisation et sont exprimées principalement par la présence de grenat et, en proportion variable, par de la sillimanite, de la cordiérite et de l'anthophyllite.

La banque de données comprend 673 échantillons provenant d'un échantillonnage de surface, avec un espacement moyen d'environ 100 m entre les échantillons ([figure 49](#)). L'échantillonnage couvre la majeure partie de la superficie de la propriété. La densité de l'échantillonnage est relativement homogène. Les échantillons ont été analysés pour les éléments majeurs et les éléments suivants : Ba, Cr, Sr, Cu et Zn. À cette banque s'ajoute les échantillons provenant des forages. Cette banque compte 312 échantillons provenant de 12 forages. Toutefois, cette banque n'a pas été utilisée pour le traitement en raison de la distribution hétérogène des forages échantillonnés. En effet, deux problèmes majeurs se posent : la distribution concentrée d'échantillons dans les secteurs forés et la distribution hétérogène des forages, et la projection verticale des échantillons profonds dans un terrain dont la géométrie tridimensionnelle est complexe et mal connue.

Étant donné que le grade métamorphique des roches de la propriété de Dussault est au faciès amphibolite, certaines méthodes de détermination de l'indice d'altération ne peuvent pas être utilisées. Par exemple, la méthode Normat était limitée au faciès des schistes verts au moment de notre étude. D'autres méthodes ont présentées des résultats décevants, telles que les méthodes du Ratio d'éléments, du Analyse-PER et des minéraux normatifs. Finalement, la méthode du Bilan de masses était problématique, il était difficile de définir les courbes de modélisation de fractionnement. Ces problèmes de caractérisation de l'altération ont motivé le développement par méthode inverse des courbes de fractionnement pour le Bilan de masses relatif (BMR).

3.2.2 Calcul du Bilan de masses relatif

Sur des diagrammes binaires des éléments mobiles « X » en fonction de Ti (soit Si/Ti, Fe/Ti, Mg/Ti et Ca/Ti), deux groupes distincts d'échantillons sont observés. Pour faire ressortir cette subdivision, des limites ont été définies arbitrairement dans le but de subdiviser les échantillons ([figure 50](#)).

Les échantillons appartenant au groupe 1 ont les caractéristiques chimiques suivantes : Al < 15%, Si > 60%, Fe < 10%, Mg < 6% et Ca < 6%. Tandis que les échantillons

appartenant au groupe 2 ont les caractéristiques chimiques suivantes : Al > 15%, Si < 60%, Fe > 10%, Mg > 6% et Ca > 6%.

Selon les paramètres de la subdivision, 275 échantillons appartiennent spécifiquement au groupe 1 (n = 5: Σ Al + Si + Fe + Mg + Ca), 215 au groupe 2 (n = 10: Σ Al + Si + Fe + Mg + Ca) et 185 ont une ou plusieurs valeurs légèrement différentes des spécifications ([figure 51](#)). Les échantillons des groupes 1 et 2 ont été utilisés pour modéliser les courbes de fractionnement spécifiques par la méthode inverse.

3.2.3 Modélisation des précurseurs

Pour la définition des courbes de fractionnement par la méthode inverse, la prémisse de base veut que les échantillons peu altérés définissent des courbes de fractionnement cohérentes des éléments mobiles. C'est-à-dire que les courbes présentent une distribution linéaire ou de deuxième ordre des échantillons, dans un diagramme d'éléments mobiles (Na, Si, K, Fe, Mg et Ca) en fonction de Ti ([figure 52](#)).

Les courbes d'éléments immobiles, Al/Ti, sont définies à partir de 43 échantillons pour le groupe 1 et de 45 échantillons pour le groupe 2. Leurs équations sont les suivantes :

$$\text{Groupe 1 : } Ti = 3,0 Al^2 - 3,1 Al + 14,9$$

$$\text{Groupe 2 : } Ti = 0,1 Al^2 - 1,2 Al + 17,6$$

Dans la subdivision initiale en groupes ([figure 51](#)), l'objectif était de trier les échantillons les plus représentatifs à des fins de modélisation des courbes de fractionnement. Une fois ces courbes définies, il restait encore 185 échantillons qui n'étaient pas attribués. À cette fin, pour chaque échantillon de l'ensemble de la banque de données totale, la valeur analytique du Ti a été comparée à celles calculées à partir des deux courbes de fractionnement définies précédemment. L'attribution à un groupe à des fins de modélisation a été établie en fonction du groupe qui présentait la plus petite différence entre la valeur analytique et celles calculées. Les équations suivantes ont été utilisées :

$$Ti_{\text{échantillon}} - Ti_{\text{groupe 1}} = x$$

$$Ti_{\text{échantillon}} - Ti_{\text{groupe 2}} = y$$

Le plus petit des deux résultats est retenu pour déterminer à quel groupe l'échantillon appartient. Si $x < y$, alors l'échantillon appartient au groupe 1 tandis que si $y < x$, alors l'échantillon appartient au groupe 2. La subdivision en deux groupes basée sur la lithogéochimie à partir de la méthode précédente, montre une très bonne cohérence avec les unités lithologiques sur la carte géologique. Le groupe 1 correspond aux roches à caractère felsique (gneiss quartzo-feldspatiques), tandis que le groupe 2 correspond aux roches à caractère mafique (gneiss à hornblende et les amphibolites). Les équations des courbes de fractionnement modélisées des précurseurs sont calculées à l'aide du logiciel Excel:

Table 9: Equations for modeled fractionation curves, felsic and mafic rocks (Dussault property).

Group 1: felsic rocks	Group 2: mafic rocks
$Ti = 3,0 Al^2 - 3,1 Al + 14,9$	$Ti = 0,1 Al^2 - 1,2 Al + 17,6$
$Si = 3,7 Ti^2 - 13,9 Ti + 72,4$	$Si = - 1,5 Ti^2 + 5,1 Ti + 45,6$
$Ca = - 3,6 Ti^2 + 5,0 Ti + 2,6$	$Ca = 2,3 Ti^2 - 10,9 Ti + 16,4$
$Mg = - 2,4 Ti^2 + 3,6 Ti + 1,2$	$Mg = - 0,3 Ti^2 + 1,3 Ti + 5,5$
$Na = 3,7 Ti^2 - 13,9 Ti + 72,4$	$Na = - 0,3 Ti^2 + 1,1 Ti + 1,5$
$K = 1,0 Ti^2 + 0,8 Ti + 0,6$	$K = 0,06 Ti^2 - 0,2 Ti + 0,6$
$Fe = - 7,1 Ti^2 + 10,7 Ti + 3,1$	$Fe = - 0,5 Ti^2 + 3,5 Ti + 10,8$

Une autre façon de visualiser les deux groupes de roches distincts utilise les diagrammes de Bilan de masses en fonction d'un oxyde ([figure 53](#)). Ces diagrammes permettent de visualiser l'effet d'uniformisation généré par le calcul de Bilan de masses. En effet, le calcul permet d'amoinrir les anomalies d'altération qui peuvent être soit amplifiées ou inhibées par la composition initiale de certaines roches.

3.2.4 Résultats

Les résultats sont présentés pour trois éléments : Na ([figure 54](#)), Si ([figure 55](#)) et Mg ([figure 56](#)). Pour chaque élément, l'intensité de l'altération est calculée par la méthode BMR et est illustrée par tranche de 25%. Aussi, chacune des figures compare l'intensité de l'altération évaluée par la méthode BMR et l'utilisation unique du pourcentage de l'oxyde.

Des appauvrissements marqués en Na caractérisent la localisation des lentilles minéralisées. Les halos d'altération atteignent des dimensions de l'ordre de la centaine de mètres de part et d'autre des lentilles. Dans la partie sud, des lentilles sont également associées avec les zones de lessivage en Na.

3.2.5 Conclusion

La méthode du Bilan de masses relatif donne des résultats intéressants pour Na et Mg et plus ou moins intéressants pour Si. Bien que d'autres méthodes aient été utilisées pour déterminer l'altération, la méthode du BMR a été la seule efficace pour délimiter l'altération. Cette méthode est à développer pour d'autres faciès métamorphiques.

3.3 Cas de Casa Berardi

3.3.1 Géologie régionale

Les gisements aurifères de Casa Berardi ([figure 57](#)), de type veine de quartz-carbonate, sont situés à 95 km au nord de la ville de La Sarre. Les mines Casa Berardi appartiennent à la compagnie Mines Aurizon. Le contenu total en or de ces gisements est d'environ 88 t, incluant la production et les réserves. Ces gisements sont encaissés au sein du corridor de déformation de Casa Berardi. Ce corridor s'étend sur plus de 200 km en direction E-W et est l'hôte du Groupe volcano-sédimentaire de Taïbi (Pilote, 2000). Le Groupe de Taïbi, de 4 à 6 km de large, consiste en un ensemble cohérent de roches volcaniques mafiques à localement felsiques d'affinité tholéitique à calco-alcaline, et de roches sédimentaires, grauwackes, argilites, formations de fer rubanées et conglomérats (Lafèche et Camiré, 1996 ; Pilote, 2000).

Les lentilles aurifères sont développées principalement au sein de zones de déformation intense à pendage subvertical et d'orientation globale E-W (Pilote et al. 1990a et 1990b). Deux zones majeures sont reconnues, soit la faille Casa Berardi au Nord et la faille Sud au sud ([figure 58](#)). Ces deux zones définissent les limites d'une enveloppe dans laquelle les unités lithologiques (volcanites et sédiments) sont distribuées de façon hétérogène et où la déformation des roches est généralement intense. Au nord et principalement au sud, les unités lithologiques sont homoclinales à pendage fort (~75°) vers le sud. La minéralisation (zones 113 et 118) correspond à des lentilles tabulaires de quartz et de carbonates avec de la pyrite disséminée, dont l'épaisseur varie entre 5 et 20 m. Des altérations en carbonate et en séricite sont omniprésentes dans le secteur minéralisé. Les roches ont été métamorphosées au faciès des schistes verts.

La banque de données de Casa Berardi, centrée sur les nouvelles lentilles 113 et 118, compte 2076 échantillons provenant de plus d'une centaine de forages. Ces forages sont distribués latéralement sur 2000 m le long de l'axe d'allongement des zones minéralisées en surface et atteignent une profondeur maximale de 1000 m. Les échantillons de la nouvelle campagne ont été analysés pour les éléments majeurs et Zr et Y.

3.3.2 Paramètres de traitement

Le traitement des données pour dimensionner l'altération est effectué sur une vue en plan des échantillons en les projetant sur le niveau 4500 m +/- 500 m. Cette projection comprend 2043 échantillons. Le traitement est également effectué sur une vue en section N-S en projetant les échantillons sur la section 11 400 m +/- 150 m. Cette projection comprend 550 échantillons.

Les cinq méthodes de détermination de l'altération ont été appliquées : Normat, Ratio d'éléments, Analyse-PER, Bilan de masses et minéraux calculés.

Pour calculer le Bilan de masses, les échantillons ont été divisés en deux catégories selon les informations données par les descriptions de forage : volcanites et sédiments ([figure 59](#)).

Avec des précurseurs multiples, les échantillons de volcanites seront traités à partir de la méthode de Bilan de masses relatif tandis que les échantillons de sédiments seront traités à partir des histogrammes de la population des éléments mobiles (mode statistique).

Les équations des éléments immobiles sont données pour les volcanites et les sédiments dans le tableau 10. Pour les calculs de Bilan de masses, les sédiments ont été modélisés à partir des mêmes équations que pour les volcanites. La différence entre les valeurs déterminées par l'analyse des populations est négligeable comparativement à celle déterminée par les équations.

Table 10: Equations for modeled fractionation curves, volcanic and sedimentary rocks (Casa Berardi).

Volcanic rocks		
$Ti = -0.4 Al^2 + 2.0 Al + 13.4$	Ti = 0.54	Ti = 0.6
$Si = 9.4 Ti^2 - 24.8 Ti + 69.2$	Si = 58.5	Si = 61.0
$Ca = -2.4 Ti^2 + 5.4 Ti + 2.4$	Ca = 2.77	Ca = 1.1
$Mg = 1.0 Ti^2 + 2.5 Ti + 0.8$	Mg = 1.86	Mg = 2.7
$Na = 0.5 Ti^2 - 0.7 Ti + 3.0$	Na = 2.77	Na = 2.1
$K = 0.5 Ti^2 - 1.0 Ti + 1.6$	K = 1.2	K = 2.2
$Fe = -4.1 Ti^2 + 9.7 Ti + 4.4$	Fe = 8.46	Fe = 6.7

3.3.3 Résultats

Les carbonates ont été traités avec quatre indices d'altération : calcite calculée, Ca-Bilan de masses, CO₂-Normat et Σcarbonates-Normat ([figure 60](#)).

En traitant les données avec d'autres indices d'altération, la signature des failles est toujours apparente ([figure 61](#)).

Certains indicateurs d'altération montrent des effets de flaque sur des graphiques de l'intensité d'altération et, dans ces cas, ils ne sont pas discriminants. C'est le cas pour les indicateurs PER-Mafique et Densité-Normat, ils ne présentent pas de bonne concordance avec les zones d'anomalie aurifère.

D'autres indicateurs montrent des concordances avec les zones d'anomalie aurifère variant de bonne à très bonne. Ce sont respectivement les cas des indicateurs suivant : K - Bilan de masses et Na - Bilan de masses. De plus, ces deux indicateurs ont mesurés l'altération sur la projection en plan et la projection en coupe, et les résultats sont très bons dans chacun des cas.

3.3.4 Conclusion

La majorité des indicateurs traduisent simplement l'altération reliée aux zones de failles et non l'altération reliée à la minéralisation. Les calculs du Bilan de masses du K et du Na donnent les meilleurs résultats de concordance entre les zones de lessivage et les zones aurifères. Ces deux indicateurs pourraient être utilisés à l'échelle régionale avec les équations établies, ce qui devrait valider leur efficacité pour l'exploration aurifère dans ce secteur.

3.4 Cas de Kiena

3.4.1 Géologie régionale

Le complexe minier de Kiena ([figure 62](#)), propriété de la compagnie McWatters au moment de l'étude, est situé à environ 10 km à l'ouest de la ville de Val-d'Or. Les caractéristiques géologiques des gisements ont été décrites par Morasse et al. (1995) et Crevier (1998). Toutes les zones minéralisées sont encaissées dans les roches volcaniques de la formation de Jacola. Ces zones se composent principalement de coulées de komatiite, de basaltes komatiitiques et tholéitiques. Des intrusions felsiques porphyriques recoupent également la séquence. L'attitude des couches est NW-SE avec un pendage subvertical. De nombreuses zones de cisaillement, essentiellement subparallèles aux couches, définissent une déformation à géométrie anastomosée. Les zones minéralisées sont associées avec ces zones de déformation intense. Un réseau de failles orienté NE-SW décale, de façon hétérogène, les unités lithologiques en plan et les zones minéralisées. Ces failles ont vraisemblablement une forte composante de mouvement verticale.

En plus des zones en exploitation, soit la zone principale ou S-50, et des zones satellites Nord et Nord-Ouest, plusieurs autres zones ont été identifiées par forage sur la propriété ([figure 63](#)). La minéralisation aurifère est de type « Ore Flow ». Elle correspond à des sulfures disséminés dans des zones d'altération hydrothermale, des zones de brèches et de stockwerks de quartz-carbonate-albite. Les zones minéralisées sont principalement développées le long de contacts lithologiques. De la pyrite et de la pyrrotite disséminées (5% en moyenne) accompagnent les zones de brèches et de stockwerks. Les sulfures suivants sont également présents en trace : chalcopryrite, sphalérite, galène et cobaltite. Le contenu en or du gisement Kiena est évalué à 48 t Au.

La banque de données lithogéochimiques de la propriété Kiena comprend 1228 échantillons provenant essentiellement de forages répartis sur la propriété et couvrant une douzaine de zones aurifères. La propriété couvre une superficie d'environ 10 km². De plus, la banque compte une centaine d'échantillons provenant de l'échantillonnage sous-terrain des unités géologiques rencontrées dans les ouvertures de la mine. Outre les éléments majeurs, la majorité des échantillons ont été analysés pour les éléments suivants : Sr, Zr, Y, Ag, Au, Cu, Ni et Cr.

En plus de la banque de données lithogéochimiques, une banque de données analytiques de l'or a été utilisée. Cette banque renferme 36 512 analyses de l'or. Elle a été utilisée pour tracer les isocontours à 0,5 g/t.

La carte géologique en format Autocad, produite par les géologues de McWatters, a été introduite en différentes couches (une couche par unité lithologique) dans MapInfo. Cette carte géologique permet d'optimiser le traitement des altérations, particulièrement en regard de la modélisation des précurseurs pour la méthode du calcul de Bilan de masses.

3.4.2 Paramètres de traitement

L'altération est traitée uniquement en plan à cause du grand nombre de zones minéralisées du secteur. Les échantillons sont projetés verticalement sur le plan du niveau 2850 m +/- 250 m. Ce niveau est situé à -250 m par rapport à la surface. L'intervalle de projection déterminé comprend 1105 échantillons qui seront traités par rapport à un total de 1228 échantillons.

Dans le but de raffiner le calcul de Bilan de masses, les échantillons ont été subdivisés en deux groupes, soit les komatiites (en bleu) et les volcaniques (en rouge) ([figure 64](#)). En raison du groupement serré des échantillons de komatiite le long d'une ligne unique d'altération (en bleu foncé) dans un diagramme Al/Ti, la méthode de Bilan de masses à précurseur unique a été utilisée pour ce groupe. La composition du précurseur a été déterminée en utilisant des histogrammes de population (mode statistique). Pour les volcanites, les précurseurs ont été modélisés en utilisant la courbe de fractionnement modélisée dans le diagramme Al/Ti. Pour les deux groupes de roches, les équations des courbes de fractionnement modélisées sont données dans le tableau 1.

Table 11: Equations for modeled fractionation curves, komatiites and volcanic rocks (Kiena area).

Group 1: komatiites	Group 2: volcanic rocks
Ti = 0.34	$Ti = - 1.5 Al^2 + 5.5 Al + 10.3$
Si = 37.4	$Si = - 15.9 Ti^2 + 28.4 Ti + 37.6$
Ca = 6.3	$Ca = 2.9 Ti^2 - 5.7 Ti + 10.0$
Mg = 24.0	$Mg = 22.5 Ti^2 - 35.8 Ti + 19.9$
Na = 0.01	$Na = - 2.8 Ti^2 + 2.9 Ti + 2.7$
K = 0.03	$K = 0.7 Ti^2 - 1.0 Ti + 0.5$
Fe = 10.62	$Fe = - 7.6 Ti^2 + 20.8 Ti + 1.8$

3.4.3 Résultats

Les résultats sont obtenus par le traitement des données selon différentes méthodes : Σcarbonates-Normat, Densité-Normat, Ipaf-Normat, Actinote-Normat, Trémolite-Normat, Orthose-Normat, PER-Alcalin, calcul de Bilan de masses (Si + Mg) et calcul de Bilan de masses (gains totaux).

3.4.3.1 Méthode Normat

Un exemple est présenté pour la méthode Normat ([figure 65](#)) ainsi qu'une comparaison entre les six indicateurs Normat ([figure 66](#)). Pour chaque indicateur, des isocontours de l'altération hydrothermale ont été tracés à main levée dans le but de comparer les anomalies définies par chaque indicateur.

En conclusion, Normat génère plusieurs minéraux indicatifs et indices d'altération, mais les résultats sont similaires d'un indicateur à l'autre. La diversité des minéraux et des indices n'est donc pas un gage d'une certaine diversité des signatures d'altération.

3.4.3.2 Autres méthodes

Parmi les autres méthodes utilisées, celles du PER-Alcalin et du calcul du Bilan de masses (Si+Mg) ont également été comparées ([figure 67](#)). Ces indicateurs montrent une bonne correspondance entre l'ensemble des zones minéralisées et génèrent des anomalies de l'altération hydrothermale qui leurs sont propres et qui ajoutent à la diversité des cibles d'exploration.

3.4.4 Conclusion

Douze indicateurs génèrent des zones d'anomalie concordantes avec l'ensemble des zones minéralisées connues. Plusieurs des indicateurs sont générés par Normat et définissent essentiellement les mêmes géométries d'altération. Les indicateurs Si+Mg (Bilan de masses) et Indice alcalin (Analyse-PER) génèrent des résultats qui concordent avec les zones minéralisées tout en définissant des configurations d'altération aux géométries différentes.

4. Conclusion générale

Les résultats sont résumés et comparés sous forme de tableau ([figure 68](#)). Les banques de données lithogéochimiques provenaient de divers types de gisements, dans des contextes géologiques et de grades métamorphiques différents. Cette diversité, quoique limitée, a permis de tester l'efficacité de cinq méthodes de caractérisation tels le logiciel Normat, les ratios d'éléments, le Analyse-PER, les Minéraux normatifs calculés et le Bilan de masses relatif.

Normat est particulièrement performant pour les gisements volcanogènes (cas de Bell-Allard) où l'altération correspond essentiellement à des lessivages ou à des pertes de masses. Normat s'utilise plus facilement que le calcul du Bilan de masses et le Analyse-PER. Malgré cette facilité d'utilisation, la diversité de ses indicateurs n'implique pas la diversité des signatures d'altération. En effet, les minéraux normatifs sont interdépendants, en raison du processus de calcul par itérations. En conséquence, s'il y a abondance de carbonates (cas Casa Berardi), alors les altérations des alcalins peuvent être oblitérées.

Le calcul de Bilan de masses, quoique plus complexe, a été la méthode la plus performante pour faire ressortir les zones d'altération en contexte de haut grade métamorphique (Dussault) et en association avec les gisements aurifères de Casa Berardi où les altérations sont principalement des gains de masse.

La méthode du Analyse-PER a été particulièrement efficace pour le cas de Kiena. Dans ce cas, l'altération a principalement impliqué les alcalins et le modèle de différenciation des plagioclases a particulièrement bien collé aux caractéristiques lithogéochimiques de la séquence hôte.

Les différences de performance entre les méthodes, pour les différents cas, peuvent soulever le questionnement en raison du fait qu'ils ont utilisés les mêmes bases de données lithogéochimiques. Néanmoins, les approches méthodologiques sont complètement distinctes entre Normat, le Analyse-PER et le Bilan de masses. En conséquence, dépendamment du type d'altérations, du type de roches et du type de gisements, certaines méthodes sont plus performantes pour faire ressortir les zonalités de l'altération. Par contre, les ratios arithmétiques d'éléments ou de cations ne génèrent pas de grandes différences entre eux et sont directement liés aux valeurs analytiques.

D'autres cas types sont en cours d'étude (ou encore sous le couvert de la confidentialité) pour augmenter la connaissance des limites d'applicabilité et des qualités intrinsèques des méthodes de caractérisation de l'altération hydrothermale. Cette thématique de recherche devrait permettre, dans un proche avenir, de sélectionner rapidement et en toute confiance la meilleure méthode de caractérisation de l'altération en fonction du type de gisement recherché, du grade métamorphique et du contexte géologique.

5. Remerciements

Nous remercions les compagnies et les personnes suivantes d'avoir permis aux chercheurs du CONSOREM d'utiliser leurs données lithogéochimiques non publiées et d'avoir partagé leur savoir lors de discussions : Aurizon Mines Ltd. et Michel Gilbert; Noranda Exploration et Gilles Bouchard; McWatters et Tracy Armstrong; et SOQUEM et Francis Chartrand. Merci également à Marie-Line Tremblay pour sa collaboration à la rédaction et à la mise en forme du document et à Pierre-Simon Ross pour la traduction des légendes des figures.

6. Références

- Barrett, T. J. et MacLean, W. H., 1994. Mass changes in hydrothermal alteration zones associated with VMS deposits of the Noranda area. *Exploration and Mining Geology*, v. 3, p. 131-160.
- Barrett, T.J. et MacLean, W.H., 1994. Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VHMS deposits in greenstones and younger volcanic rocks. *Dans : Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems*. Édité par: D.R. Lentz. Geological Association of Canada, Short Course Handbook, v. 11, p. 433-467.
- Bernier, L.R., 1993. Étude métallogénique du gîte polymétallique Dussault, Canton Lapeyrière – Province de Grenville. Ministère des Ressources naturelles du Québec, MB-93-53, 161 p.
- Cattalani, S., MacLean, W.H. et Barrett, T., 1993. Géologie et géochimie du gisement Delbridge, Rouyn-Noranda. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, ET-91-08, 43 pages.
- Crevier, M., 1998. La Mine Kiena. *Dans : Développement d'un arc volcanique, la région de Val d'Or, ceinture de l'Abitibi – volcanologie physique et évolution métallogénique*. Édité par : P. Pilote, J. Moorhead and W. Mueller. Geological and mineralogical Associations of Canada, Québec 1998, guide book A2, p. 19-24.
- Cross, C.W., Pirsson, L.V., Iddings, J.P. et Washington, H.S., 1902. A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks. *Journal of Geology*, p. 555-690.
- Gresens, R.L., 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, v. 2, p. 47-55.
- Ishikawa, Y., Sawaguchi, T., Iwaya, S. et Horiuchi, M., 1976. Delineation of prospecting targets for Kuroko deposits based on modes of volcanism of underlying dacite and alteration haloes. *Mining Geology*, v. 26, p. 105-117 (en japonais).
- Laflièche, M.R. et Camiré, G., 1996. Geochemistry and provenance of metasedimentary rocks from the Archean Golden Pond Sequence (Casa Berardi mining district, Abitibi Subprovince). *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 33, p. 676-690.
- Lavallière, G., 1995. Processus de formation et implications pour l'exploration des cheminées atypiques des gisements volcanogènes de Matagami. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, 491 p.
- Leitch, C.H.B. et Lentz, D.R., 1994. The Gresens approach to mass balance constraints of alteration systems: method, pitfalls, examples. *Dans: Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems*. Geological Association of Canada, Short Course Handbook, v. 11, p. 161-192.
- Liaghat, S. et MacLean, H., 1992. The key tuffite, Matagami mining district: Origine of the tuff components and mass changes. *Exploration and Mining Geology*, v.1, p. 197-207.
- MacLean, W. H. et Barrett, T. J., 1993. Lithogeochemical techniques using immobile elements. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 48, p. 109-133.
- MacLean, W. H., 1990. Mass change calculations in altered rock series. *Mineralium Deposita*, v. 25, p. 44-49.
- MacLean, W.H. et Kranidiotis, P., 1987. Immobile elements as monitors of mass transfer in hydrothermal alteration: Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82, p. 951-962.
- Maier, W.D., Barnes, S.-J. et Pellet, T., 1996. The economic significance of the Bell River Complex, Abitibi subprovince, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 33, p. 967-980.
- Morasse, S., Wasteneys, H. A., Cormier, M., Helmstaedt, H. et Mason, R., 1995. A pre-2686 Ma intrusion-related gold deposit at the Kiena mine, Val-d'Or, Québec, Southern Abitibi Subprovince: *Economic Geology*, v. 90, p. 1310-1321.
- Pearce, T.H., 1968. A contribution to the theory of variation diagrams. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, v. 19, p. 142-157.
- Piché, M., 2000. Quantification de l'altération hydrothermale des roches du camp minier de Joutel à partir des analyses des éléments majeurs. Ministère des Ressources naturelles du Québec, MB-2000-06.
- Piché, M., 2001. Atelier de géochimie – Une introduction à l'utilisation des minéraux normatifs pour quantifier l'altération hydrothermale associée aux gisements de SMV et aurifères. Association des Prospecteurs du Québec, 27^e Congrès annuel, 11-13 septembre 2001, Val-d'Or, Québec. Cours intensif, 30 pages.

- Piché, M. et Descarreaux, J., 2000. L'utilisation des minéraux normatifs en exploration minière. Conférence présentée au Congrès APQ-APGGQ 2000. <http://www.cablevision.qc.ca/jdal/page8.html>
- Pilote, P., Guha, J., Daigneault, R., Robert, F., Cloutier, J.-Y., Golightly, J. P., 1990a. The structural evolution of the Casa Berardi East gold deposits, Casa Berardi Township, Quebec. *Dans: The northwestern Quebec polymetallic belt; a summary of 60 years of mining exploration; proceedings of the Rouyn-Noranda 1990 symposium. Édité par: Special Volume - Canadian Institute of Mining and Metallurgy* 43, p. 337-348.
- Pilote, P., Guha, J., Daigneault, R., Robert, F., Cloutier, J.-Y., Golightly, J. P., 1990b. Contexte structural et minéralisation aurifère des gîtes de Casa Berardi, Abitibi. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 27, p. 1672-1685.
- Pilote, P., 2000. Géologie de la région de Val-d'Or, Sous-province d'Abitibi. Ministère des Ressources naturelles du Québec, MB-2000-09, 110 p.
- Riverin G., 1977. Wall-rock alteration at the Millenbach Mine, Noranda, Quebec. Thèse de doctorat, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 256 p.
- Sharpe, J.I., 1968. Géologie et gisements de sulfures de la région de Matagami, comté d'Abitibi-est. Ministère des Richesses naturelles, 137 p.
- Stanley, C.R. et Madeisky, H.E., 1994. Lithogeochemical exploration for hydrothermal ore deposits using the Pearce Element Ratio Analysis. *Dans: Alteration and alteration processes associated with ore-forming systems. Geological Association of Canada, Short Course Handbook*, v. 11, p. 193-211.
- Winchester, J.A. et Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements: *Chemical Geology*, v. 20, p. 325-343.

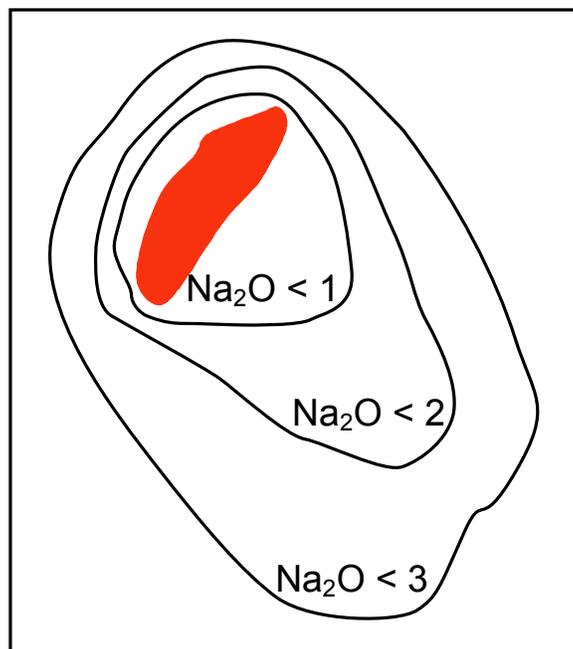


Figure 1: Isocontours. Two types of methods are traditionally used to visualize hydrothermal alteration around ore deposits: isocontours and linear profiles along drill holes. This figure shows Na_2O isocontours as an example, with the mineralized zone represented in red. [Return to the text.](#)

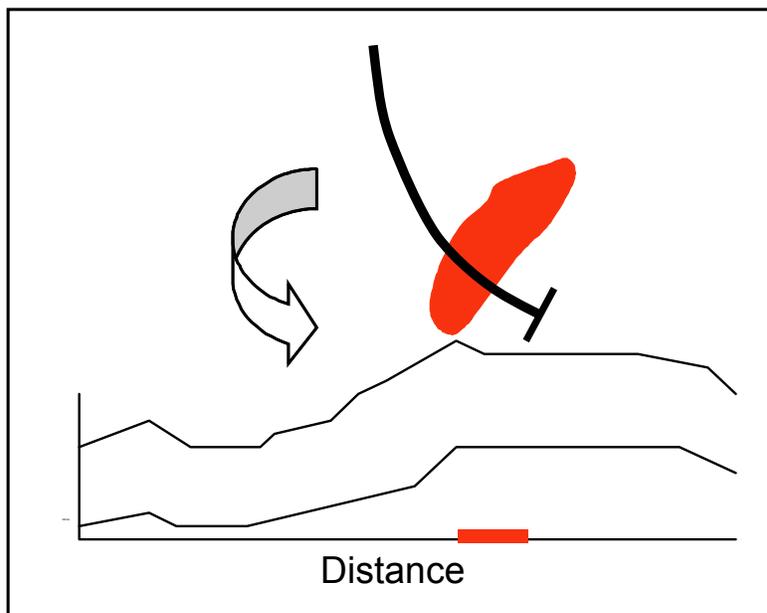


Figure 2: Two alteration profiles using different alteration index. Linear profiles along drill holes constitute another traditional method of graphically representing alteration. The graphs simply show a certain alteration index as a function of depth or distance. In this example, the mineralized zone and its projection on the profile are depicted in red, whereas the drill hole trace is shown in black. These two classic approaches (figures 1 and 2) simplify the spatial representation of alteration phenomena but neglect the 3D heterogeneity of alteration near the ore body. [Return to the text.](#)

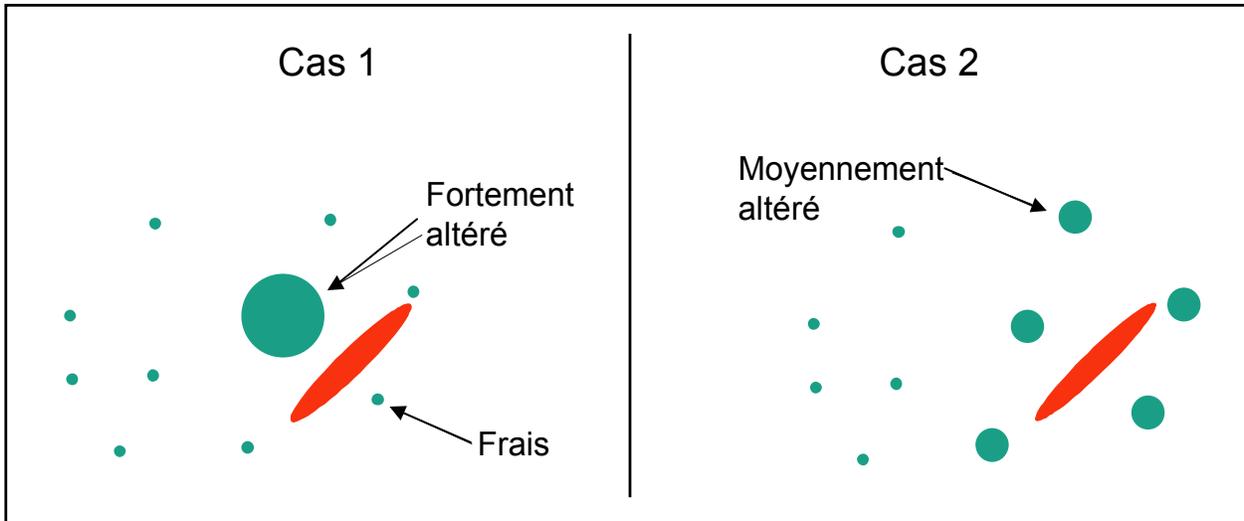


Figure 3: Heterogeneous hydrothermal alteration. Hypothetical distributions of altered samples (green dots, with sizes proportional to alteration intensity) around a mineralized zone (red). Should a single highly altered sample (case 1) be given as much weight as several moderately altered samples (case 2) near the mineralized zone? The first step toward answering this question involves deciding on a “validation threshold”: what constitutes an altered sample (what is the minimum value for an alteration index, for instance), and how many samples must meet this criteria? Statistical approaches, with their limitations, are illustrated in the following figures. [Return to the text.](#)

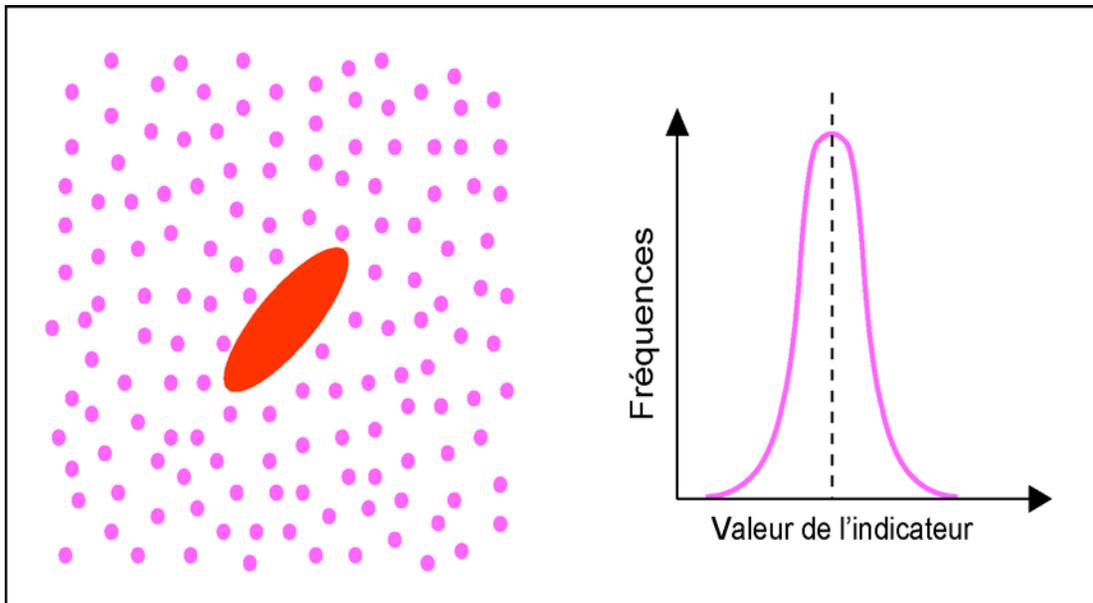


Figure 4: Normal distribution of unaltered samples. Suppose a hypothetical geochemical database consists of samples from only one rock type, and that all samples are unaltered (pink dots). The red ellipse represents the mineralized zone as in other figures. Because of the natural variation in the chemical composition of the rock and of the variability of analytical results, values of a certain alteration index should be normally distributed (bell-shaped curve on the right). The dashed line on the plot corresponds to the mode for the distribution. [Return to the text.](#)

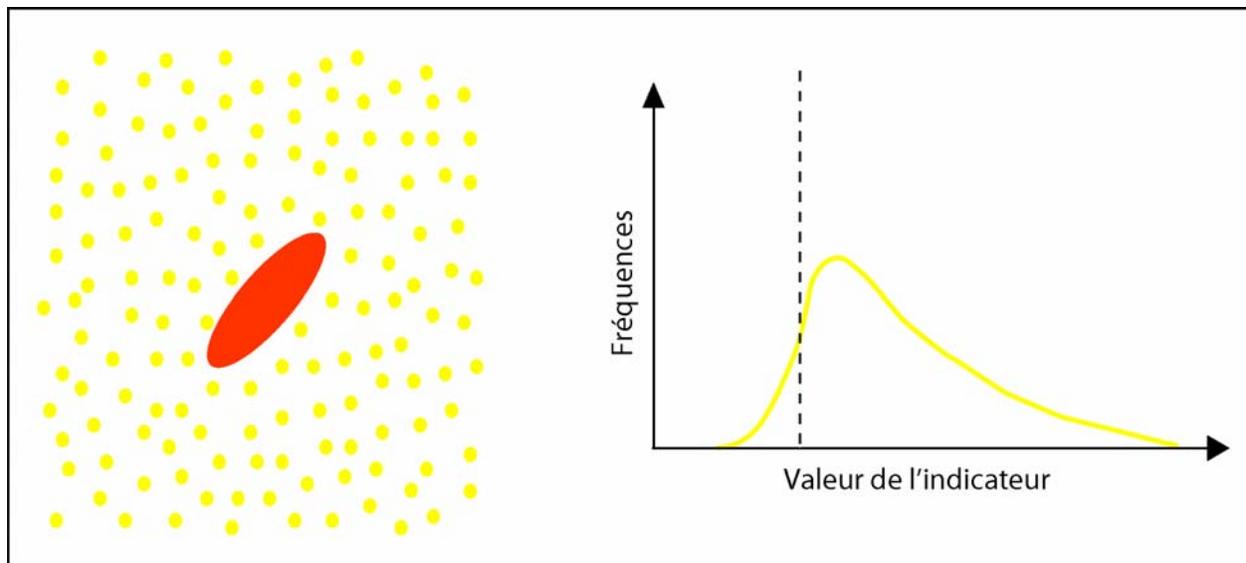


Figure 5: Log-normal distribution of altered samples. Suppose another hypothetical geochemical database consists of samples from only one rock type, and that all samples are altered (yellow dots). Because of the variability in the intensity of alteration, values of an alteration index should have a log-normal distribution. The dashed line on the plot corresponds to the mode for a distribution of unaltered samples. [Return to the text.](#)

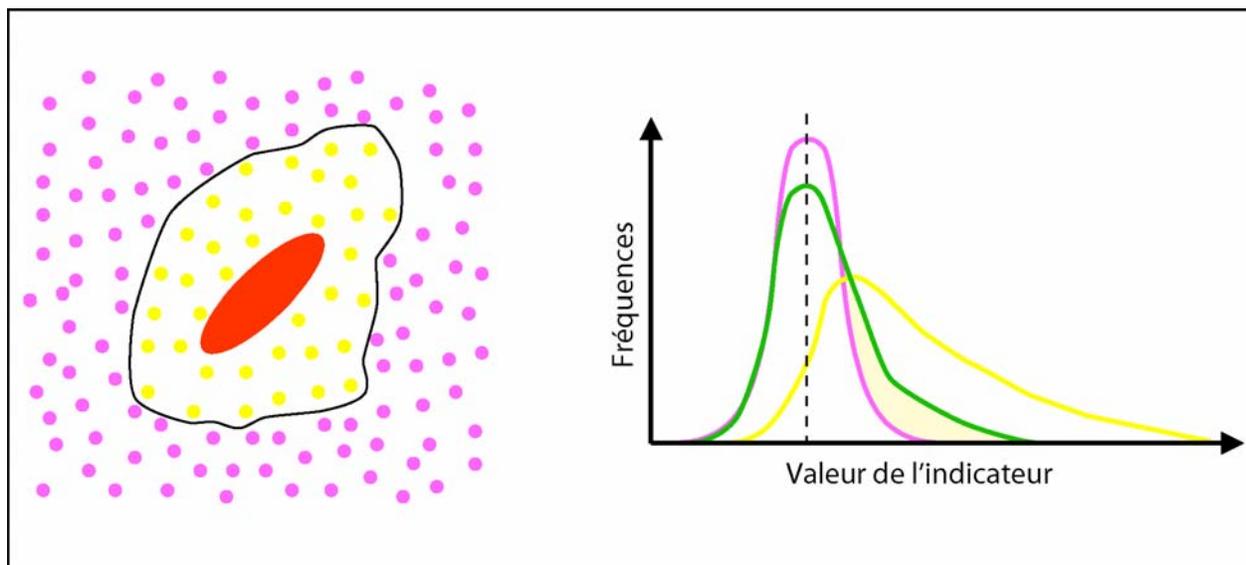


Figure 6: Quasi-normal distribution. By combining altered and unaltered samples (yellow and pink dots, respectively), different types of distributions are generated. In this example, most rocks in the database are unaltered so the resulting distribution (green curve) is quasi-normal. The combined distribution is obtained by adding the contributions for altered (yellow curve) and unaltered (pink curve) rocks. The mode for the total population (dashed line) remains the best estimate for the composition of unaltered rocks. [Return to the text.](#)

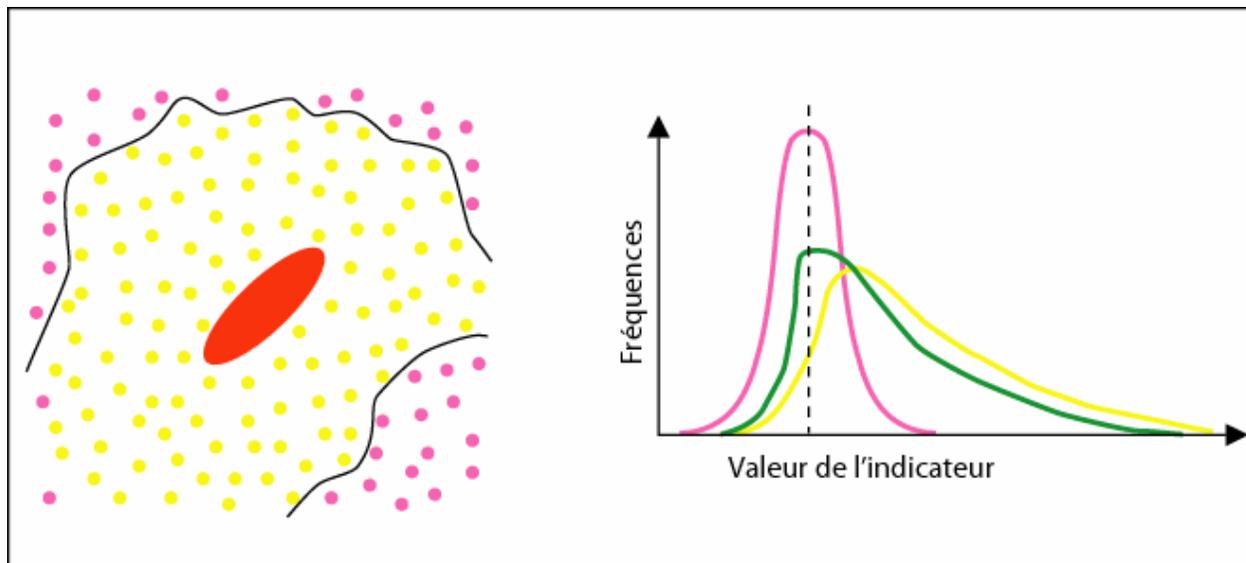


Figure 7: Quasi-log-normal distribution. Another example of combining altered (yellow dots) and unaltered (pink dots) samples, this time with altered rocks dominating the combined distribution (green curve), and making it quasi-log-normal. Again the mode remains the best estimate for the composition of unaltered rocks. Table 1 sums up the simple theoretical cases presented in figures 4 to 7. [Return to the text](#)

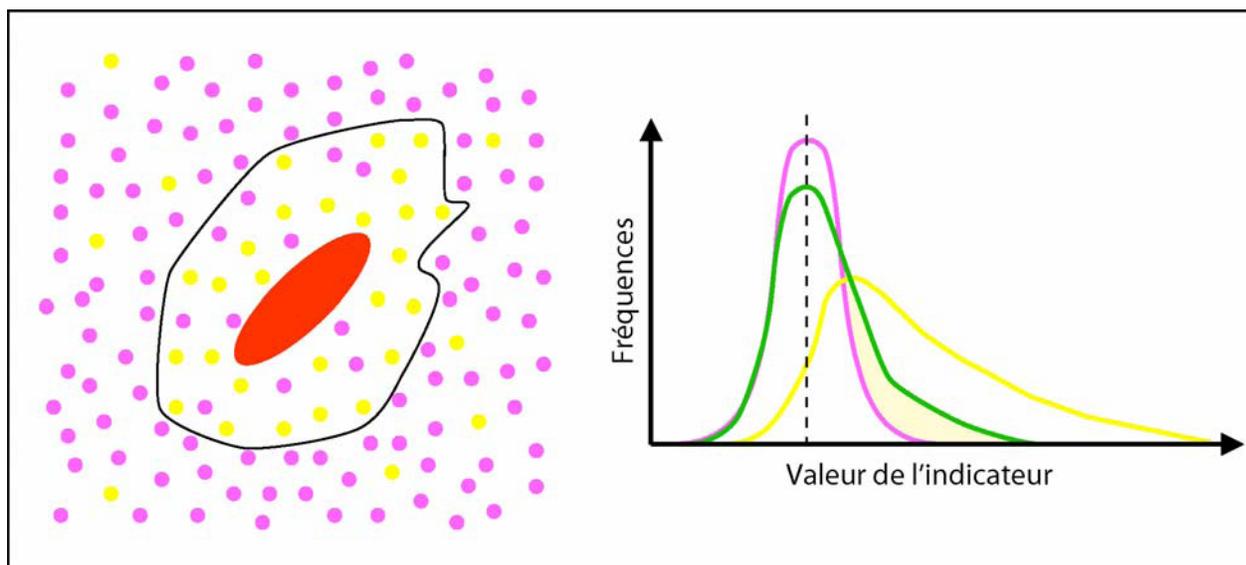


Figure 8: Quasi-normal distribution. More complex theoretical cases, where alteration is not as well constrained spatially compared to the previous cases, illustrate the limitations of statistical representations. Here, a hypothetical geochemical database contains only one rock type, but alteration near the mineralized zone (in red) is heterogeneous. Since most samples in the database are unaltered, the overall statistical distribution of the alteration index (green curve) is quasi-normal, very similar to that of figure 6, although the spatial distribution of altered versus unaltered samples is quite different. Colours to be interpreted as in figures 4-5. [Return to the text](#)

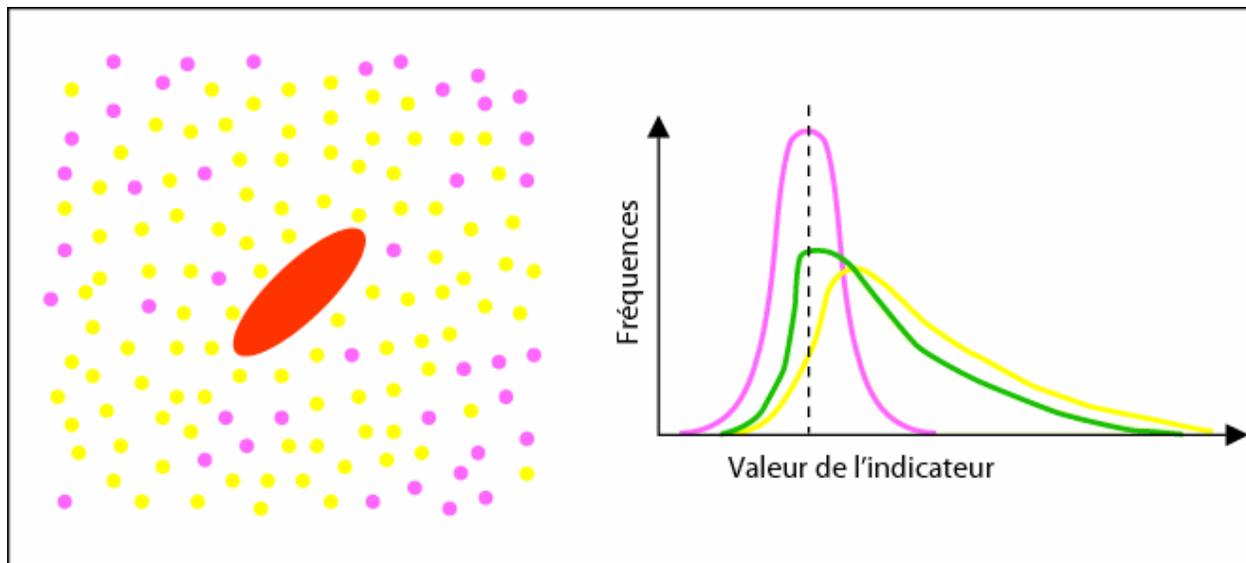


Figure 9: Quasi-log-normal distribution. Quasi-log-normal distribution plot (green curve) for all samples shown on the left. The mineralized zone is surrounded by altered samples, with a few unaltered ones. The combined statistical distribution mimics that shown in figure 7. Colours to be interpreted as in figures 4-5; see Table 2 for parameters. [Return to the text](#)

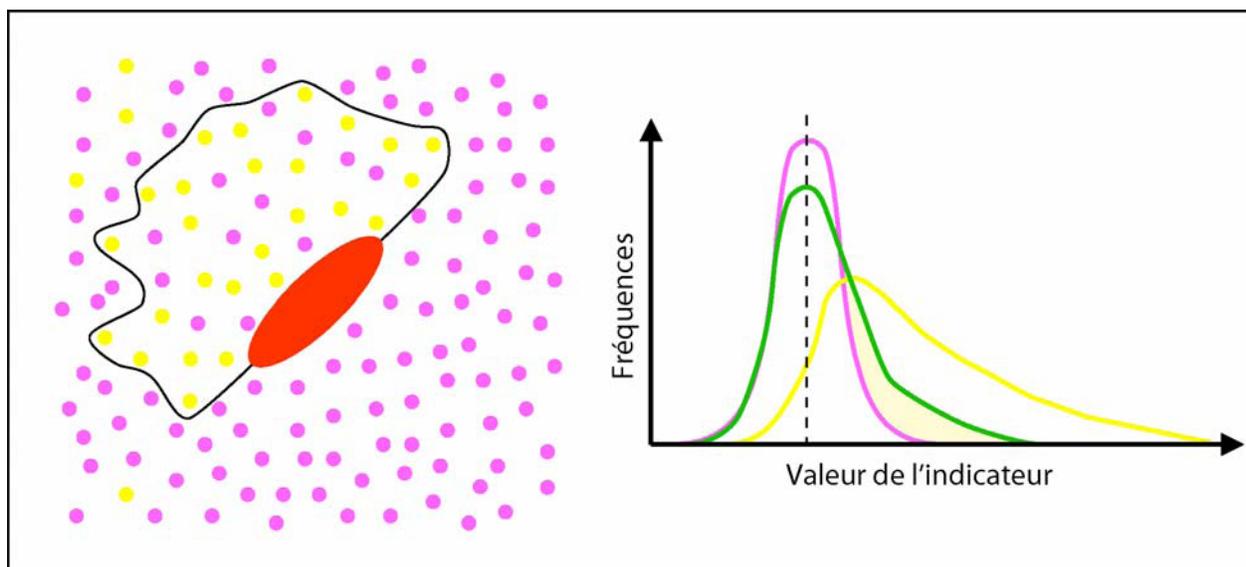


Figure 10: Quasi-normal distribution. Quasi-normal distribution plot (green curve) for all samples shown on the left. The mineralized zone is surrounded by a mixture of altered and unaltered samples on one side, and by unaltered samples only on the other side. The statistical distribution is similar to that shown in figures 6 and 8. Colours to be interpreted as in figures 4-5.; see Table 2 for parameters. [Return to the text](#)

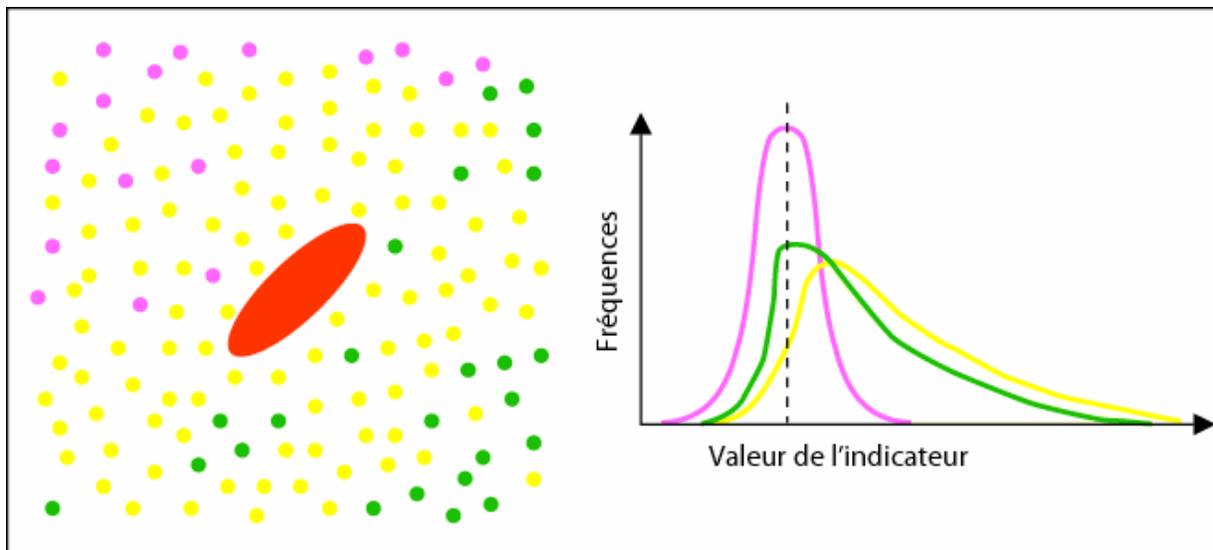


Figure 11: Quasi-log-normal distribution. A hypothetical geochemical database contains two rock types (pink dots and green dots when unaltered), which behave similarly relative to a particular alteration indicator. The combined statistical distribution of indicator values (green curve) mimics that shown in figures 7 and 9. Colours to be interpreted as in figures 4-5; see Table 2 for parameters. From the four cases illustrated in figures 8 to 11 it becomes apparent that statistical distributions alone cannot be used to select alteration thresholds, and that spatial considerations must be included in the analysis. [Return to the text](#)

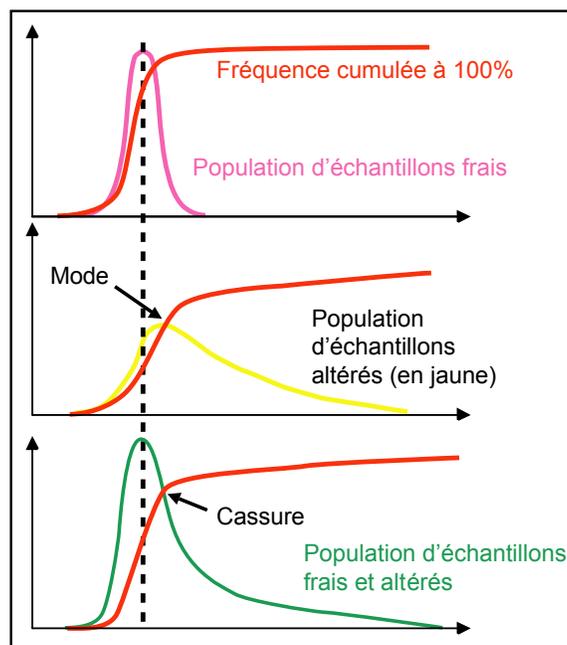


Figure 12: Determination of an alteration threshold. An alteration threshold is useful to characterize the size of an alteration halo and compare the efficiency of different alteration indicators. The larger the threshold, the smaller the number of “altered” samples in a given population. A useful threshold will be such that it yields a coherent spatial distribution of “altered” samples while still classifying most samples as “unaltered”. The method of threshold selection used in this study is based on slope breaks on cumulative frequency plots. The threshold is determined by combining the breakpoint in the cumulative distribution for the total population (bottom plot, red curve) with the mode for the population of altered samples (middle plot). The upper plot considers only unaltered samples; the middle plots shows only altered samples; the bottom plot displays all samples. [Return to the text](#).

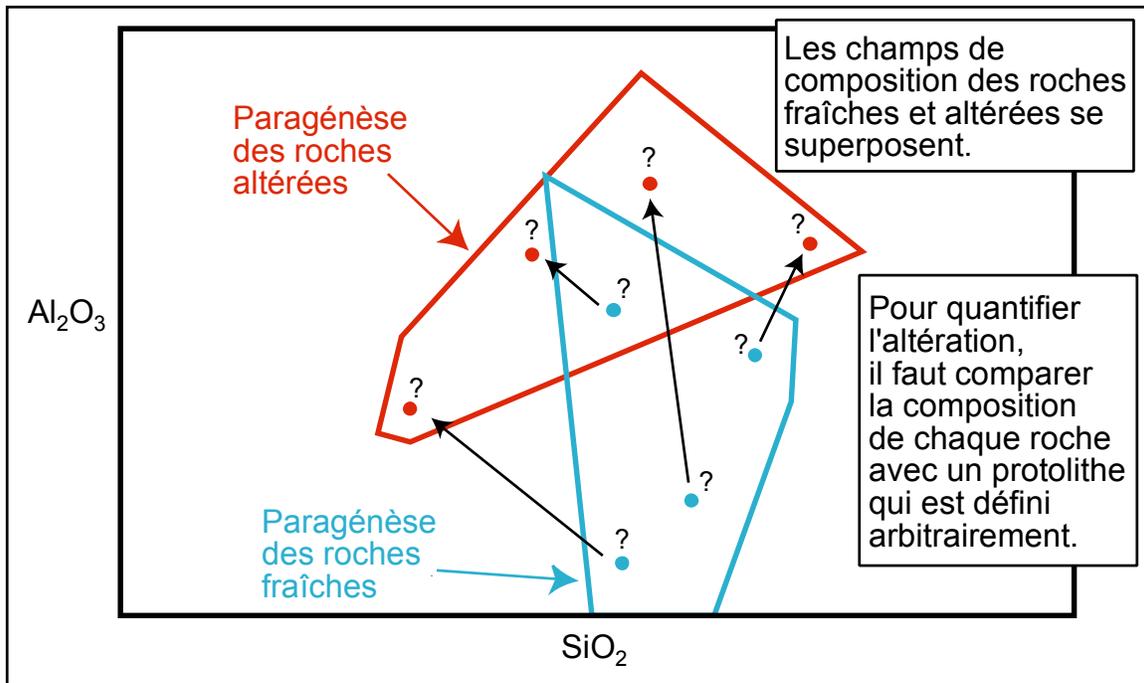


Figure 13: Superposition of the fields for unaltered and altered rocks. In this study, five methods to determine the intensity of hydrothermal alteration were trialled: Normat, PER-analysis, element ratios (e.g., Ishikawa index), calculated normative minerals, and relative mass balances. Normat, PER analysis and mass balance calculations are illustrated by figures 13 to 27; please see the main text for an explanation of the other methods, i.e. element ratios and calculated normative minerals (see also Table 4 for all methods). Many of these techniques require the knowledge of an unaltered protolith, because the fields for unaltered (blue) and altered (red) rocks overlap. Diagram after Piché and Descarreaux (2000). [Return to the text.](#)

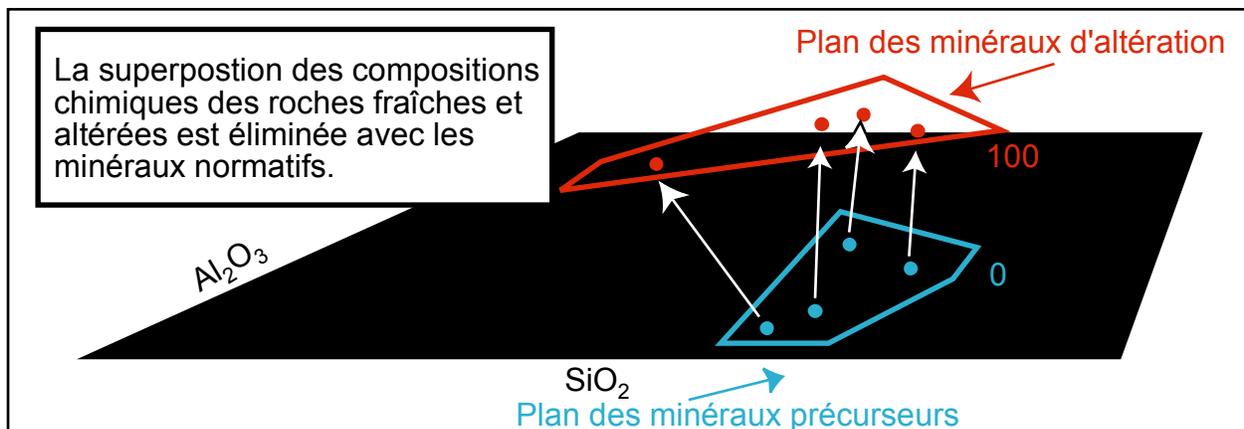


Figure 14: Calculation of normative minerals using Normat. The software Normat, created by Mr. Mathieu Piché, calculates 38 normative minerals, 8 alteration indices, the rock's density, and normative LOI, all based on major elements analyses. No precursor composition is needed. The calculation of normative minerals eliminates the superposition of fields shown in figure 13 because the reference planes for precursor minerals (blue) and alteration minerals (reds) are different (after Piché and Descarreaux, 2000). [Return to the text.](#)

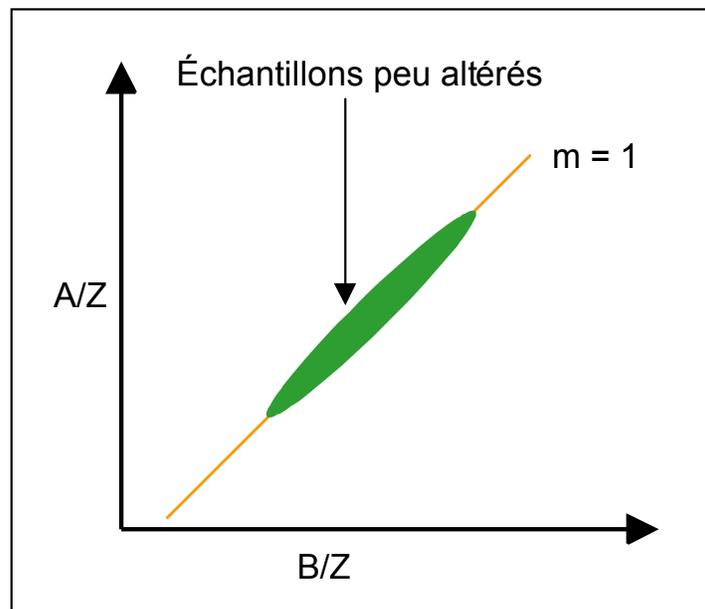


Figure 15: Distribution of weakly altered samples on binary diagrams. PER analysis uses binary diagrams in the form shown here, where A and B are unique elements or element combinations (e.g., A = Fe + Mg for the mafic PER model, see figure 16) and Z is the common normalisation factor. The element Z must not be implied in mass transfers (it must be immobile). Normalisation eliminates the need for closure of analyses. In this study, titanium was used as the immobile element. On the diagrams, weakly altered samples are distributed along a straight line having a slope of one. [Return to the text.](#)

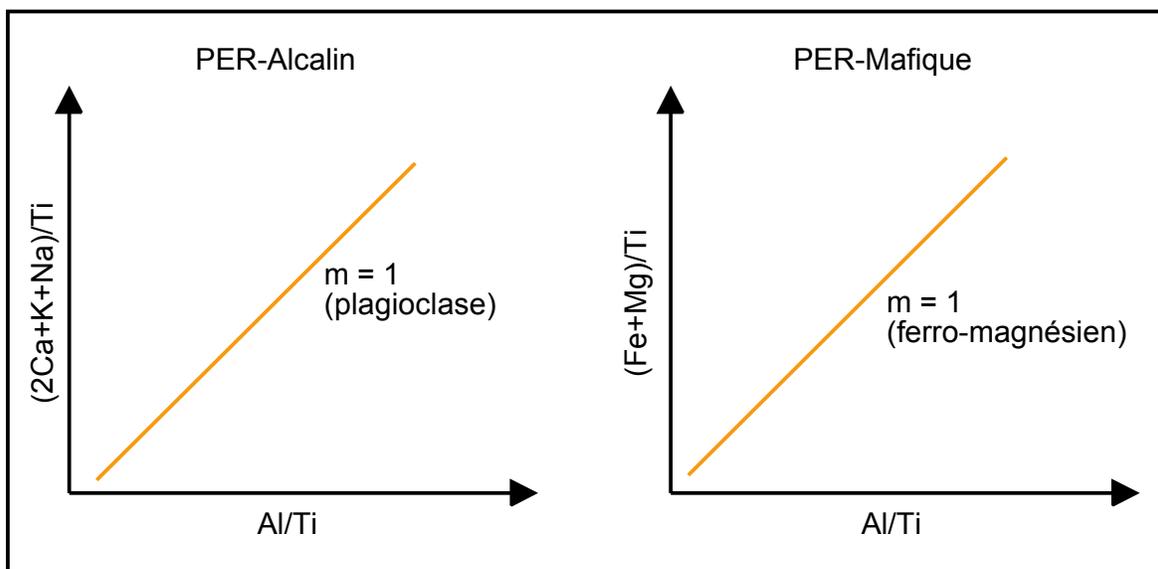


Figure 16: Illustration of the PER analysis method to quantify hydrothermal alteration. The “unaltered” line (orange) is calculated based on fractionation models, for example for feldspar or olivine. In the two models used in this study, alkaline PER (left) and mafic PER (right), “unaltered” lines have a slope (m) of 1. If samples from an actual database define a line having a slope smaller than 1, the interpretation is that the elements listed on the y-axis of the plot (parameter “A”, see figure 15) have been leached in the course of hydrothermal alteration. If the slope is more than one, the same elements have been added. [Return to the text.](#)

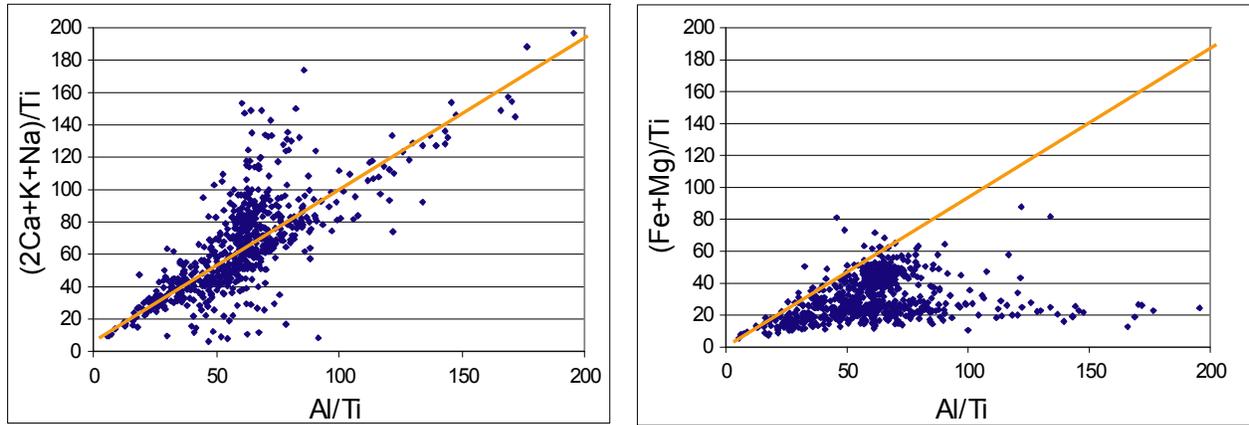


Figure 17: Two examples of PER analysis-type plots from the Dussault database, one of the four considered in this study. See figures 15 and 16 for an explanation of PER analysis. [Return to the text.](#)

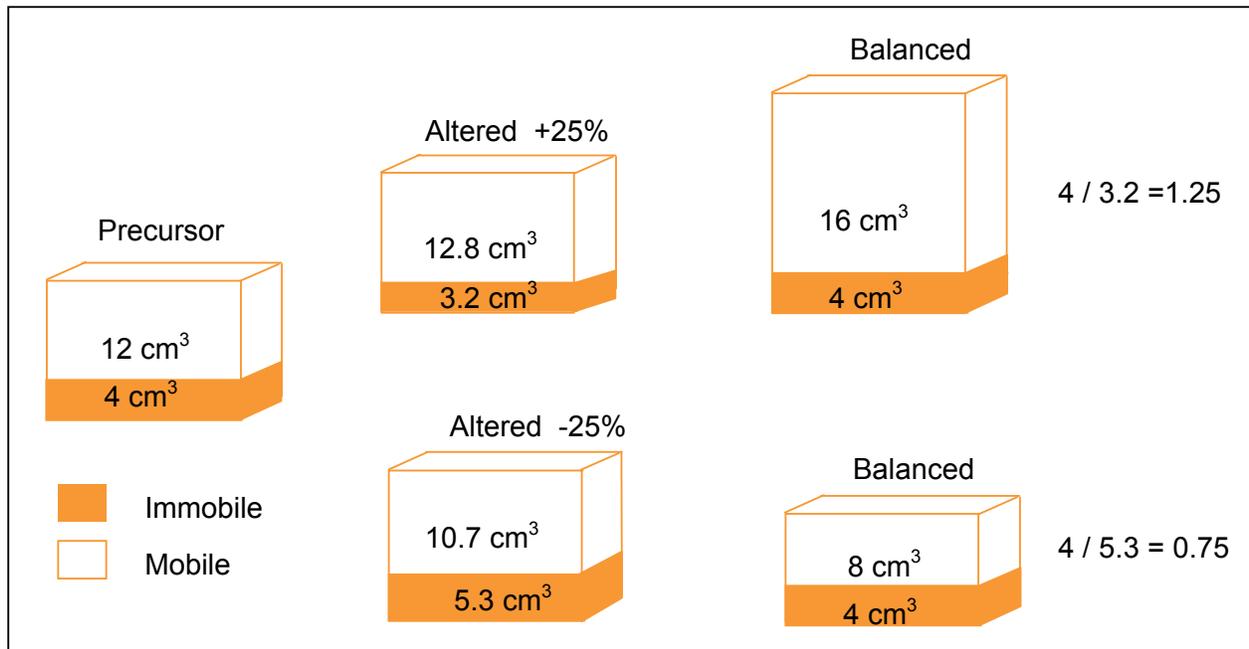


Figure 18: Element gains and losses obtained from the mass balance method. In this example, the precursor rock contains 4 cm³ of immobile elements and 12 cm³ of mobile elements. If, after alteration, the same amount of sample is analysed (16 cm³) and the analysis yields 3.2 cm³ of immobile elements for 12.8 cm³ of mobile elements, a mass gain in mobile elements has occurred. If the immobile elements are brought back to their original value (“balanced” cartoon, upper right), to allow a direct comparison with the precursor, a mass gain of 25% (for mobile elements) is calculated (equation modified from Leitch and Lentz, 1994). The same calculations can apply to a mass loss situation (lower cartons). [Return to the text.](#)

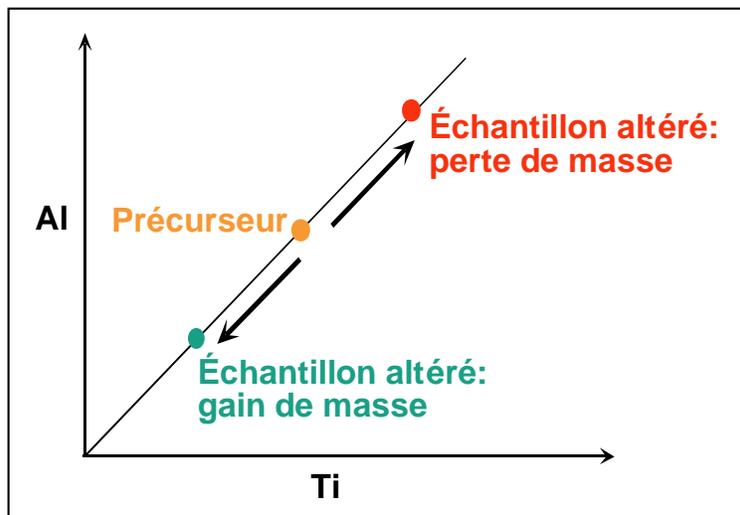


Figure 19: Immobile elements distribution using Al and Ti. The mass balance method is based on the idea that the ratio of two immobile elements, such as Al and Ti, remains constant during alteration, although concentrations of these elements in a chemical analysis will vary because mobile elements are being added or leached. The method can assume either a single or multiple precursor(s). In the case of a single precursor, altered samples plot on a line (the “alteration line”) passing through both the origin and the precursor’s position (orange dot). The red dot is an example of mass loss (for the mobile elements) whereas the turquoise dot shows a case of mass gain. If the actual precursor is unknown, it has to be estimated. [Return to the text.](#)

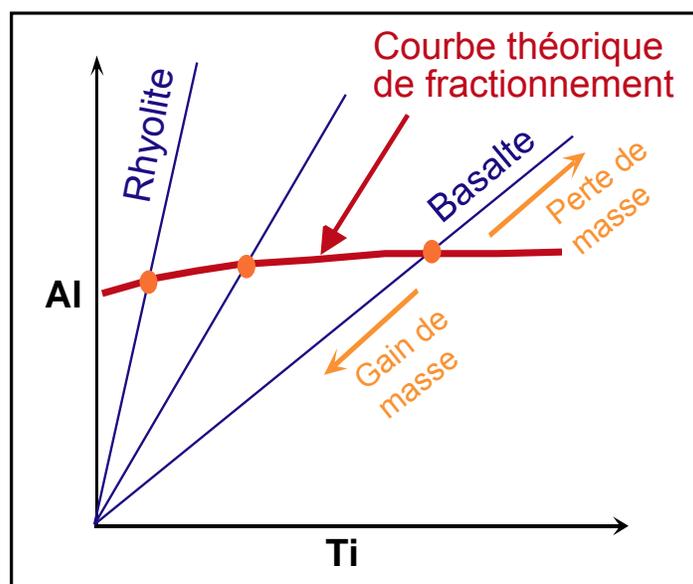


Figure 20: The theoretical fractionation curve modelling the composition of multiple precursors. When using the mass balance method, a population of altered rocks having more than one precursor can be identified if samples plot on several alteration lines (thin blue lines on the graph). When assuming multiple precursors, the mass balance method involves the modelling of the unaltered rocks’ initial composition using a theoretical fractionation curve (dark red). This fractionation curve is defined using two immobile elements: a compatible one (Al) and an incompatible one (Ti) and is a parabola representative of a suite of volcanic rocks ranging from basalt to rhyolite. [Return to the text.](#)

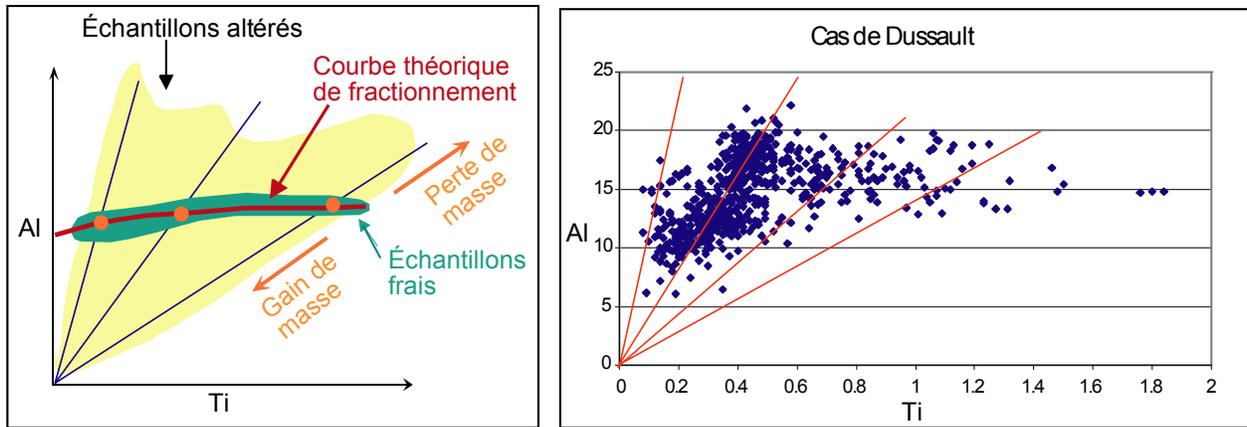


Figure 21: Fan-shaped distribution for altered samples on the Al/Ti diagram: theoretical case (on the left) and example using the Dussault dataset (on the right). For the Dussault case, the fractionation curve was not modelled; the four alteration lines (red) were determined for different group of samples identified based on the fan-shaped distribution. [Return to the text.](#)

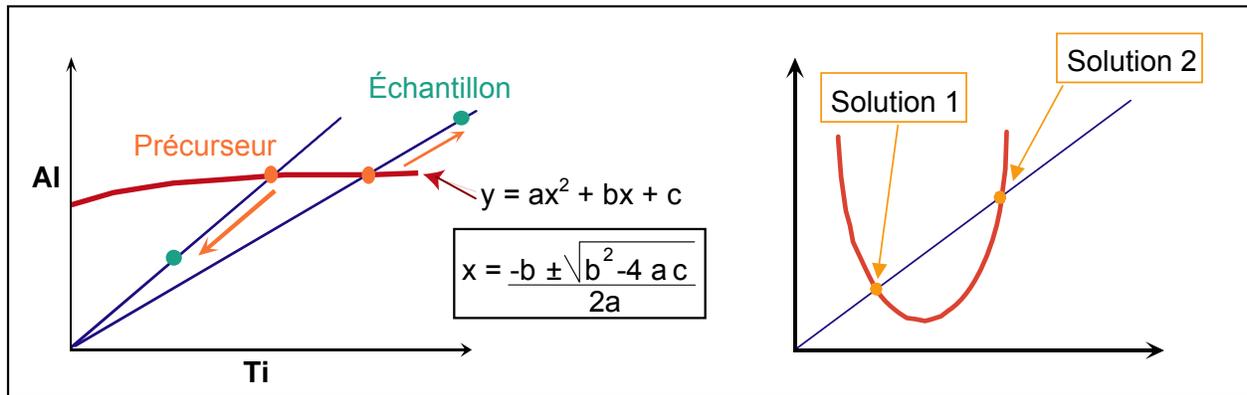


Figure 22: Determination of immobile elements composition of precursors. For the mass balance method using multiple precursors, the initial assumption is that Al/Ti ratios for the precursors are known. For each sample, the Ti content of the precursor is obtained by finding the intersection of the fractionation curve (a parabola, $y = ax^2 + bx + c$) and the alteration line (a straight line). In practice, equations for the fractionation curve (a parabola, $y = ax^2 + bx + c$) and the alteration line (a straight line) are written in a spreadsheet (e.g., MS Excel). The desired intersection (Ti value) corresponds to one of the solutions to the second degree quadratic equation. The plot on the right illustrates that a line and a parabola have two intersection points, one of which must be rejected because it is unrealistic. [Return to the text.](#)

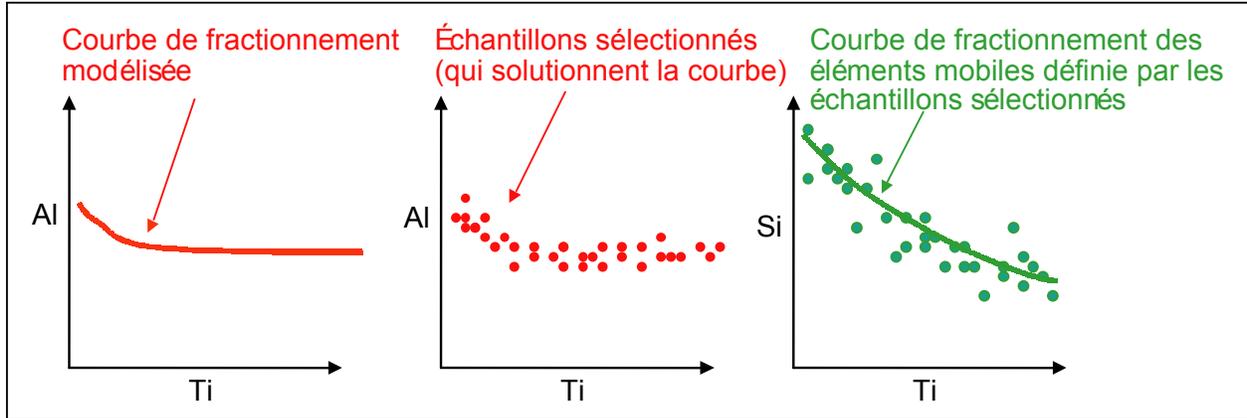


Figure 23: Determination of fractionation curves for mobile elements. In the mass balance method, once the initial Ti composition has been found for each precursor, fractionation curves for mobile elements (Ca, Si, Fe, Mg, Na, K) must be determined. First the Al/Ti curve is modelled (left), then samples plotting near this curve are selected (centre) and these samples – which are considered relatively fresh – are used to define mobile elements curves (right). [Return to the text.](#)

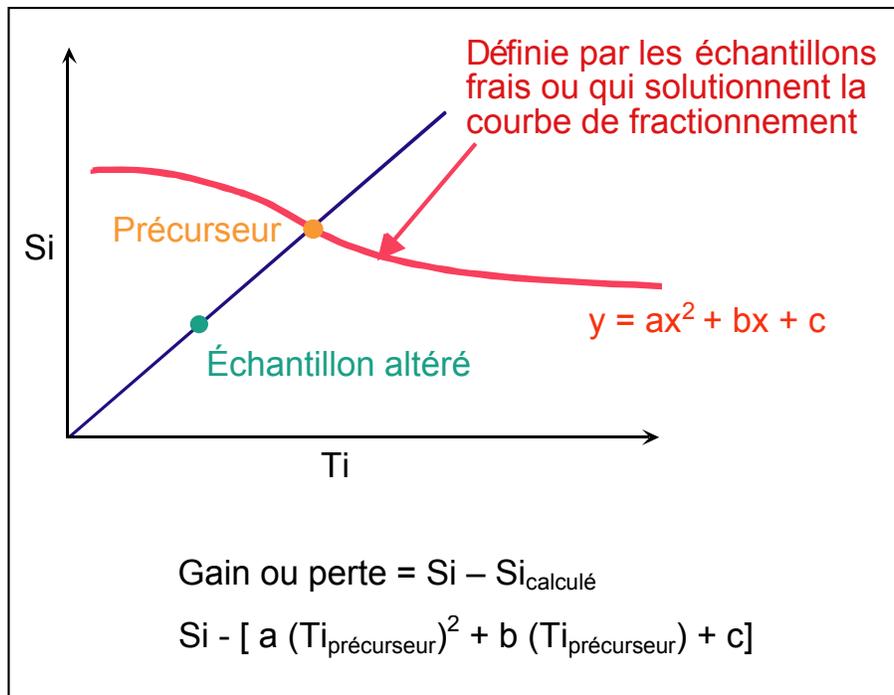


Figure 24: Once mobile elements curves have been established, mass gains / losses can be calculated. This means that quadratic equations for mobile elements must be solved for each sample, producing a theoretical content in mobile elements for each precursor. Subtracting the measured value of a mobile element such as Si from this theoretical value yields the mass gain (if the result is positive) or mass loss (if negative). [Return to the text.](#)

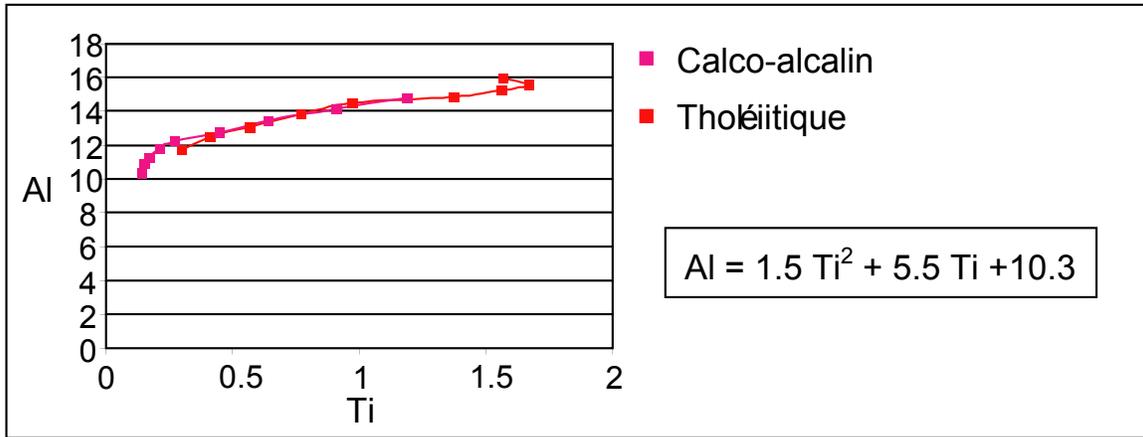


Figure 25: Example of the “general equation” for tholeiitic and calc-alkaline rocks (data from Cattalani et al., 1993). Such equations can be used in mass balance calculations for all volcanic rocks except alkaline series. [Return to the texte.](#)

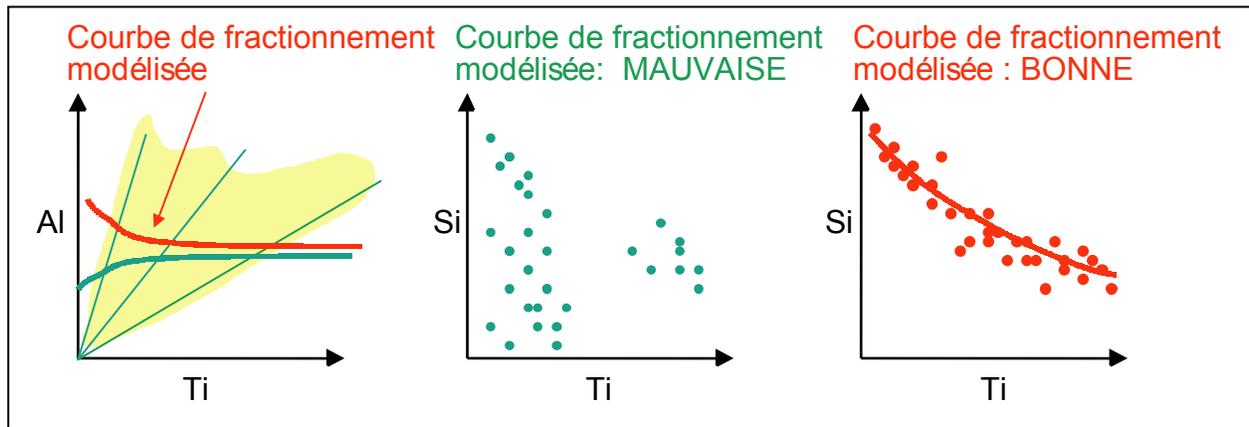


Figure 26: Using the “relative mass balance” method by testing two modelled fractionation curves. The “relative mass balance” (RMB) strategy has been developed by CONSOREM. It involves an inverse method to test different fractionation curves; the aim is to find the composition of the unaltered precursor. The underlying premise of the method is that mobile elements for unaltered samples should define “coherent” curves (e.g., right), i.e. they should have a linear or second order distribution, not a “random” or shotgun pattern-type distribution (e.g., centre). The RMB method involves a trial-and-error process, and supposes that Al/Ti ratios for the precursors are initially unknown (as opposed to the conventional mass balance method, see figure 22). First, several possible fractionation curves are traced on an Al vs. Ti diagram (left). For each of these curves, representative samples are selected, and displayed on mobile element plots such as Si vs. Ti (centre and right). If the samples corresponding to a certain fractionation curve on the Al-Ti diagram do not generate “coherent” mobile element plots, the prospective curve is rejected and another possibility is examined. [Return to the text.](#)

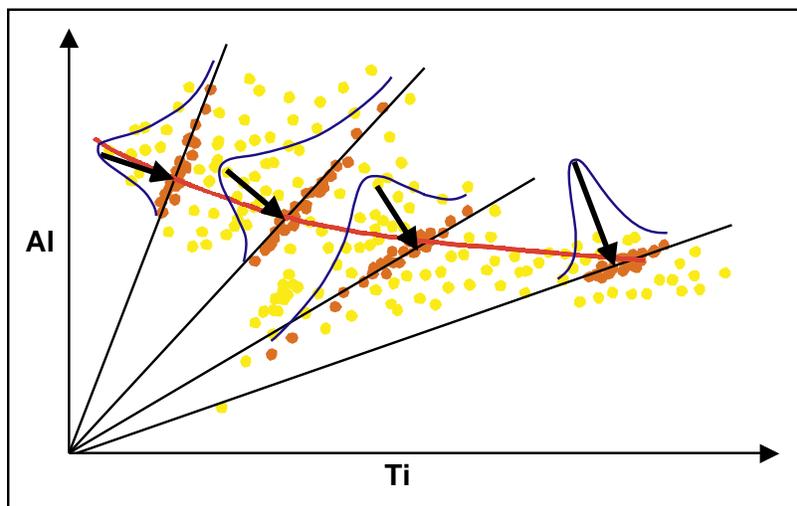


Figure 27: The RMB method could be improved by programming new software to automatically define precursor rocks along specific alteration curves. This would eliminate the “trial-and-error” process. The software would determine protolith compositions by calculating the statistical mode (bold arrows) of samples along specific alteration lines (orange dots). The resulting fractionation curve (red) would join each mode [such a software has been generated by CONSOREM and was presented to members in April 2006]. Table 4 sums-up the different methods considered in this study. [Return to the text.](#)

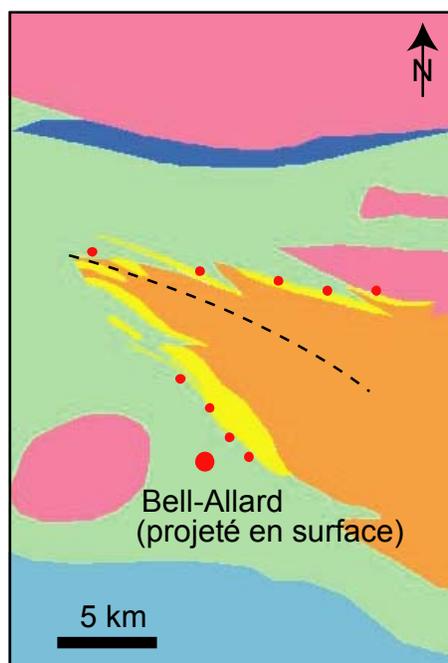


Figure 28: Regional geology of the Bell-Allard Mine. The methods used to determine the intensity of hydrothermal alteration were trialled with four geochemical databases: Bell-Allard (a VMS mine), Dussault (a VMS-SEDEX exploration property), Kierna (a gold mining complex) and Casa Berardi (an orogenic-type gold mine). The sampled rocks are described in Table 5 and parameters used for mass balance calculations are listed in Table 6. The Bell-Allard Zn-Cu mine is part of the Matagami mining camp; this figure shows the Noranda-supplied regional geology. Small red dots represent Zn-Cu deposits projected at the surface; they occur at the transition between the Watson Lake Group (in yellow) and the Wabasse Group (in green). Both of these stratigraphic units are dominated by tholeiitic lavas. The Bell River anorthosite complex, shown in orange, lies at the base of the volcanic sequence. [Return to the text.](#)

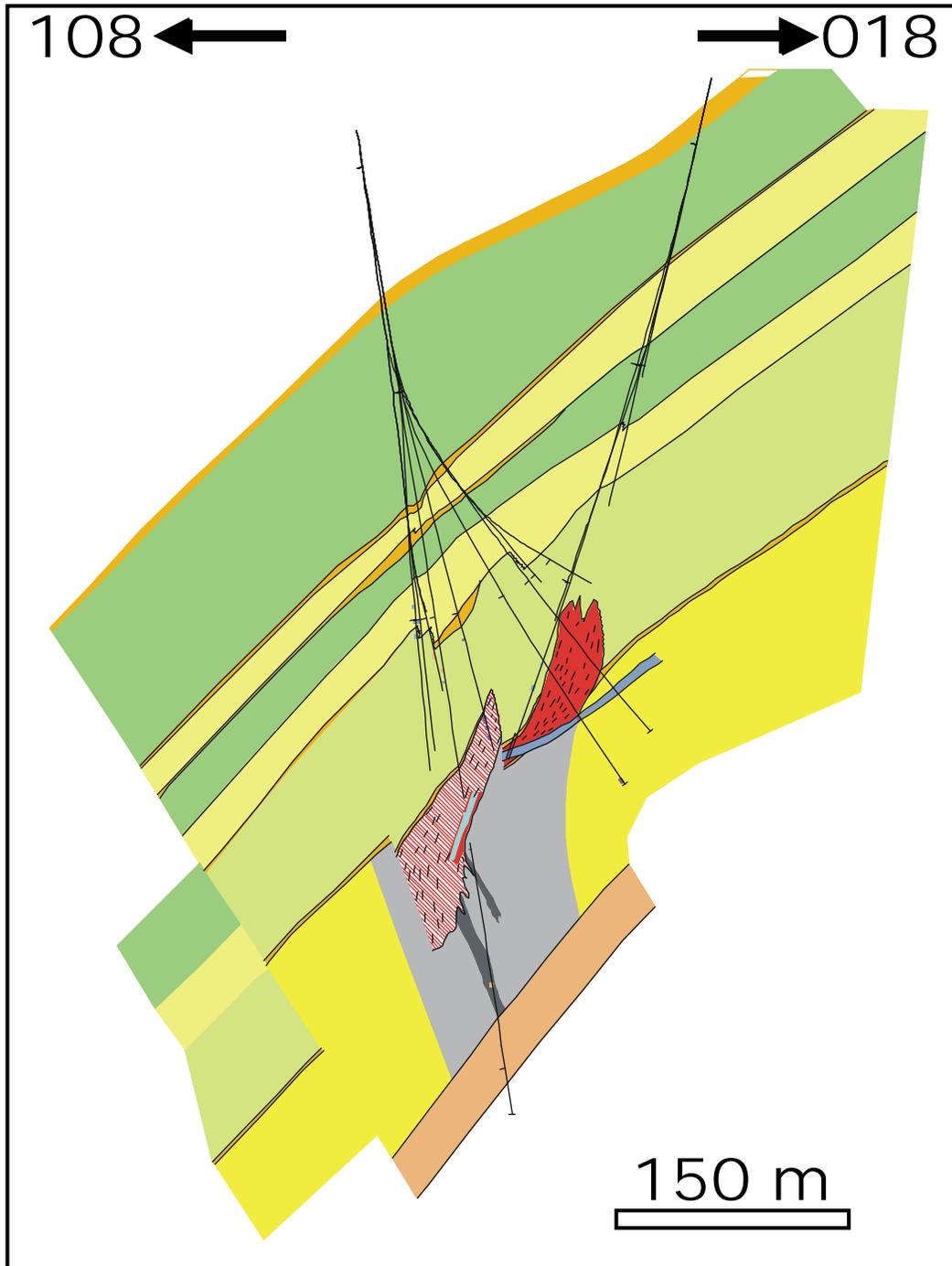


Figure 29: Cross-section of the Bell-Allard property. This cross section (modified from Noranda's work) shows that the 3.3 Mt Bell-Allard deposit consists of a single Zn-Cu massive sulphide lens, about 1000 m below the surface, overlying a mineralised chimney (in grey). [Return to the text.](#)

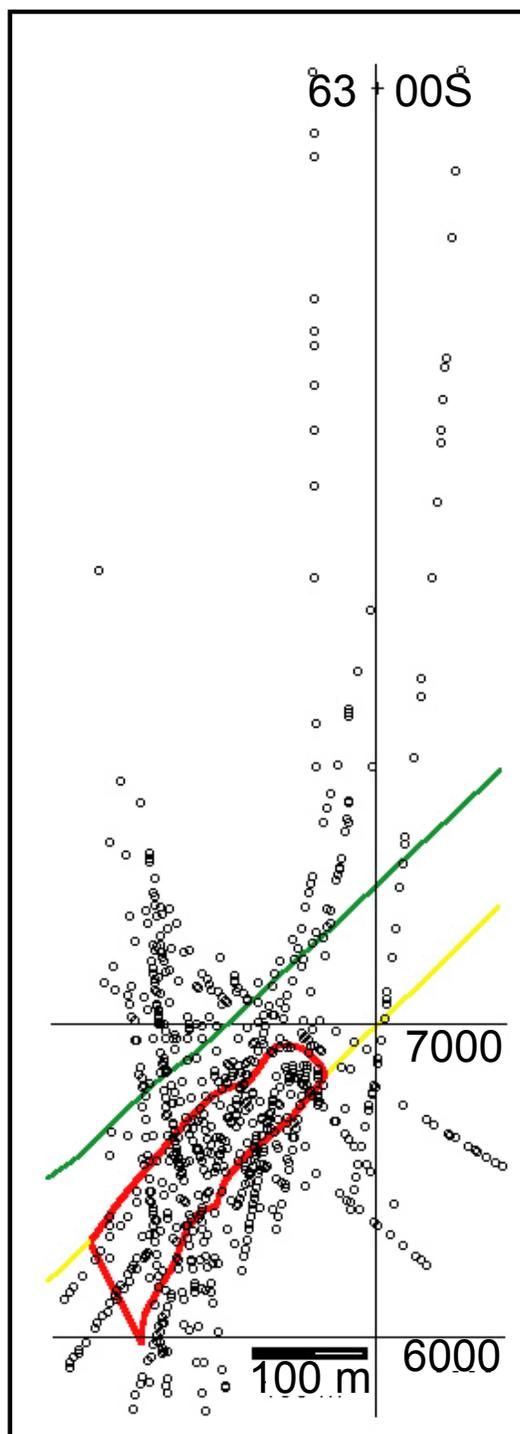


Figure 30: Projection of samples around the mineralized zone at Bell-Allard. The overall Bell-Allard geochemical dataset supplied by Noranda contained 916 analyses from 13 drill holes. Samples up to 400 m on either side of a representative section were projected horizontally. The shape and size of the ore lens (red outline) was compiled from several sections and is therefore maximal. The yellow line represents the top of the footwall rhyolite whereas the green line delimits the summit of the basalt serving as cap rock. Taking into account the asymmetrical aspect of mineralization (concordant lens + discordant chimney), the alteration study was only carried on this cross-section. [Return to the text.](#)

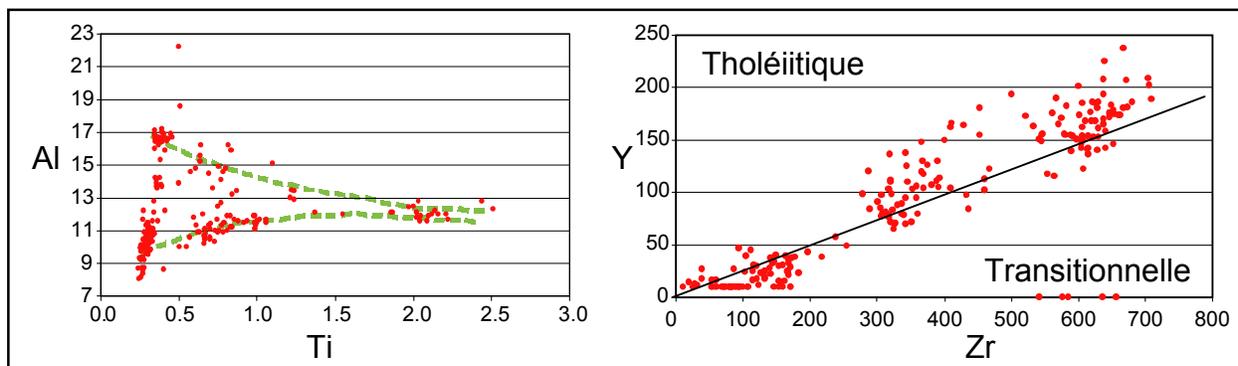


Figure 31: For mass balance calculations, the least altered samples were selected in the Bell-Allard database to model the precursor's compositions. Samples having a LOI <5% and an Ishikawa index between 20 and 40 were chosen. The distribution of such samples on various binary diagrams suggests that several groups are present. Two possible differentiation curves are sketched (green dashed lines) on the Al/Ti diagram; samples corresponding to these curves (groups 1 & 2) are reported on figure 33 to calculate equations for differentiation curves. The Y/Zr diagram shows that these rocks have a tholeiitic to transitional affinity. [Return to the text.](#)

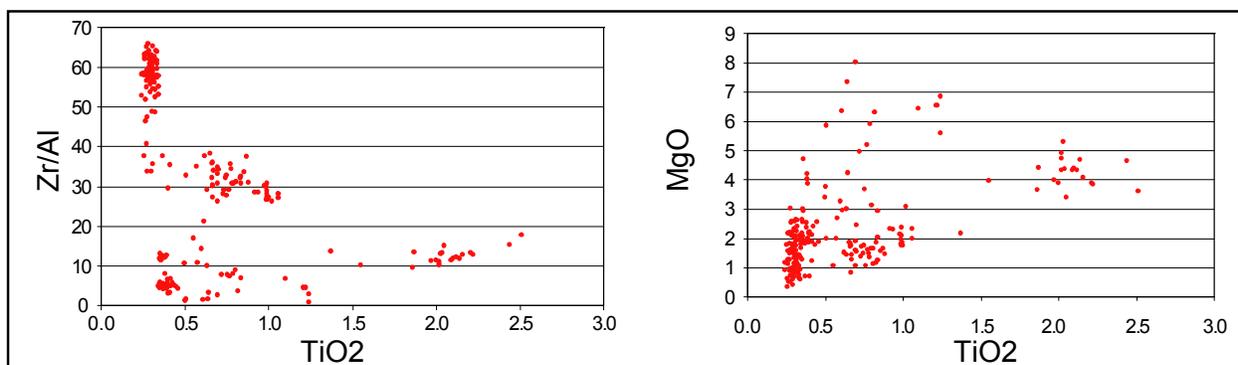


Figure 32: Zr/Al versus Ti and MgO versus Ti binary diagrams. Further binary plots of the least-altered samples in the Bell-Allard database, demonstrating that several magmatic suites must be present. [Return to the text.](#)

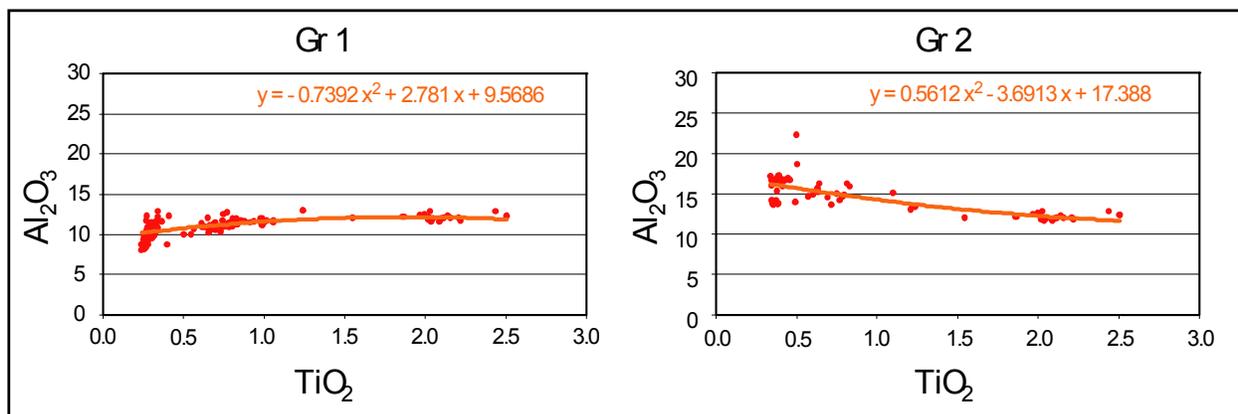


Figure 33: Al_2O_3 versus TiO_2 binary plots showing differentiation curves for two different groups of samples. Samples from groups 1 and 2 (see figure 31) are plotted separately and differentiation curves are calculated. Samples with TiO_2 values above 1.5% are used in both groups to generate fractionation curves covering the full range of Ti values. For mass balance calculations, samples having a Zr/Al ratio under 20 were processed using the fractionation curve for group 2, whereas the others were processed with the group 1 curve. [Return to the text.](#)

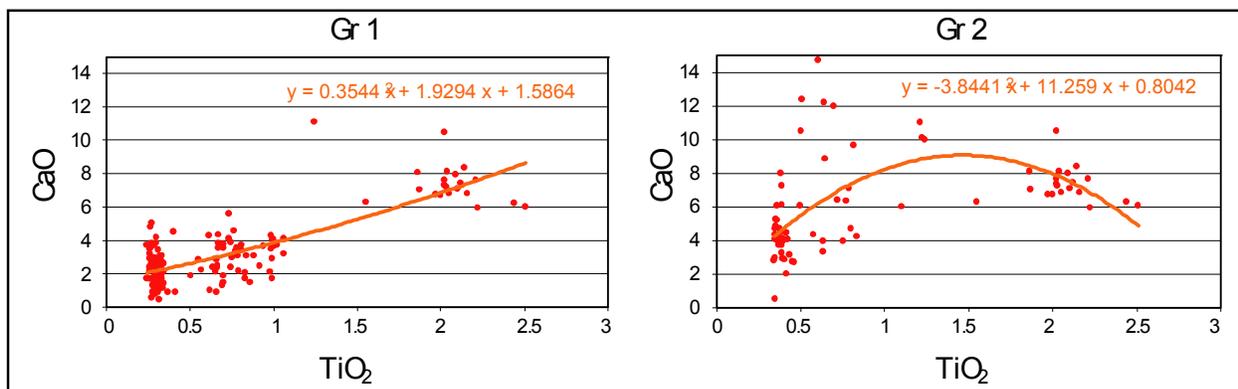


Figure 34: CaO versus TiO_2 binary plots showing differentiation curves for two different groups of samples. Once the behaviour of Ti as a function of an incompatible element is known for both groups of Bell-Allard samples, equations for mobile elements can be defined. Here, CaO - TiO_2 curves serve as an example. Samples having more than 1.5% TiO_2 are used in both groups. Fractionation curves for other mobile elements (Mg, Na, K, Fe and Si) are similarly defined (Table 7). [Return to the text.](#)

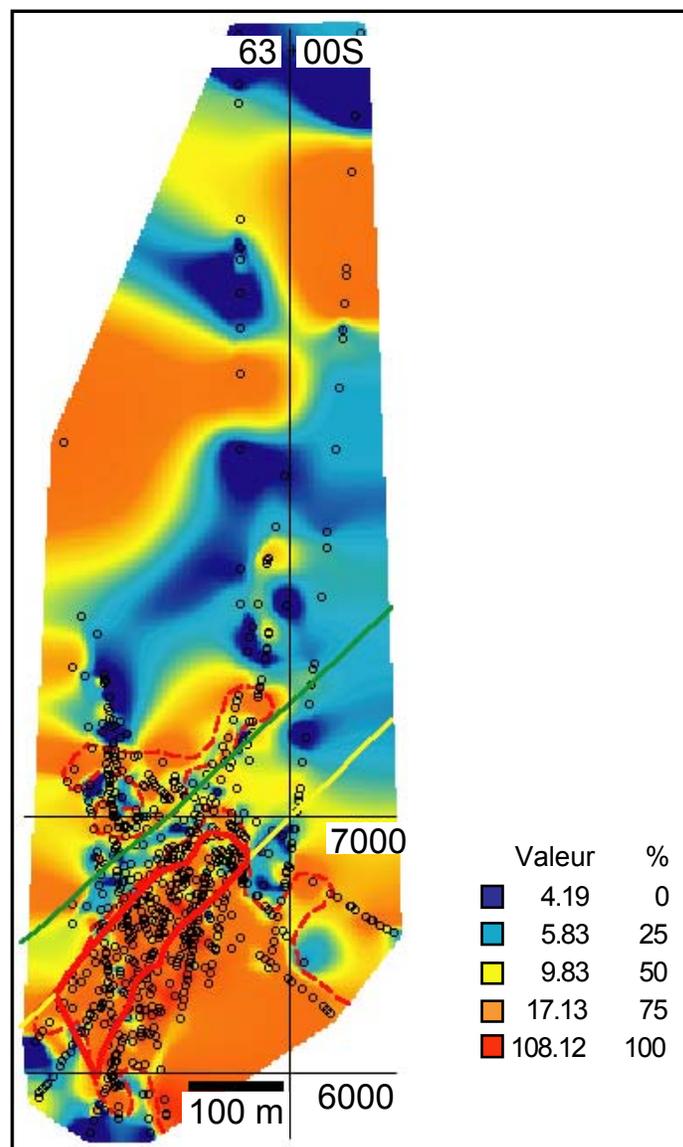


Figure 35: Alteration halos determined by the RMB method (variation index) at Bell-Allard. After the fractionation curves for the precursors have been determined, various alteration indices are calculated for each sample (mass balance, Normat, etc.). Then grids are created in MapInfo to help visualisation, based on the natural neighbour method. The particular grid shown here, for the same cross-section as figure 30, illustrates the mass balance method (variation index). The alteration halo (red dashed line) eliminates interpolation effects between far-away samples; only samples having a variation index over 17.13 are included in the halo. This allows visualisation of the alteration chimney under the VMS lens. The abrupt termination of the alteration signature in the lower-left portion of the figure is related to post-mineral faulting, according to Noranda's sections. In the hanging wall, alteration is detectable 100-150 m above the ore lens. [Return to the text.](#)

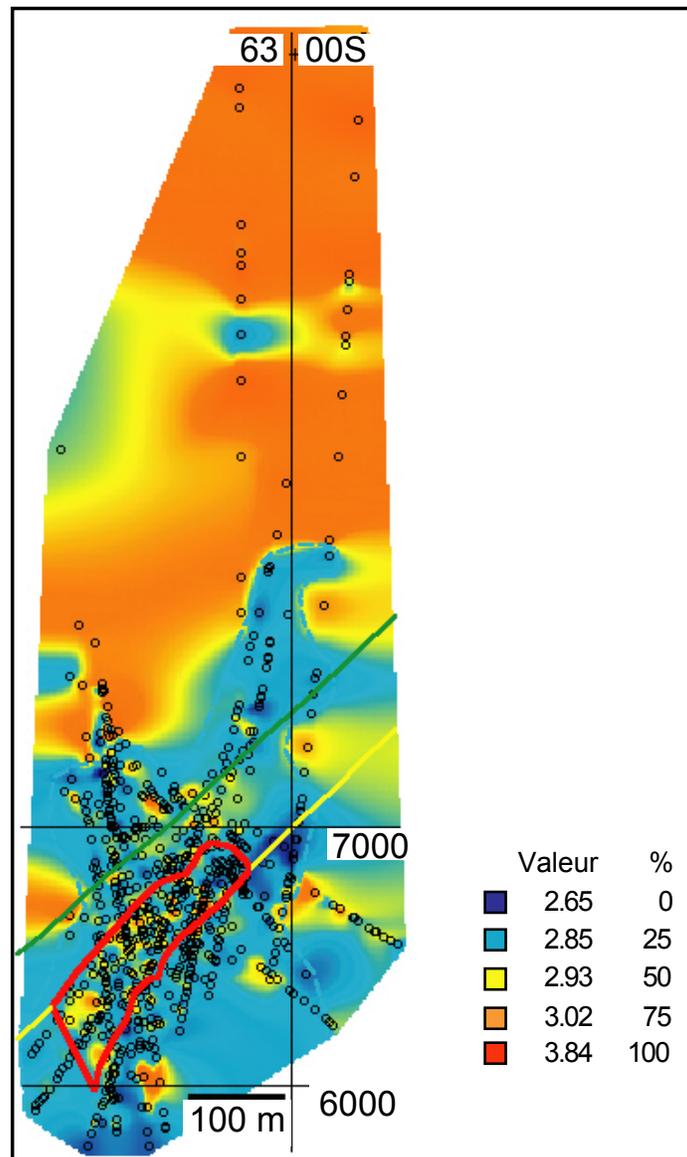


Figure 36: Alteration halos determined by Normat (density). The grid shown here, for the same section as figure 30, illustrates density values calculated by Normat. The alteration halo (pale blue dashed line) eliminates interpolation effects between far-away samples; only samples having a density <2.85 are included in the halo. This allows visualisation of the alteration chimney under the VMS lens. In the hanging wall, alteration extends 200-400 m above the ore lens. [Return to the text.](#)

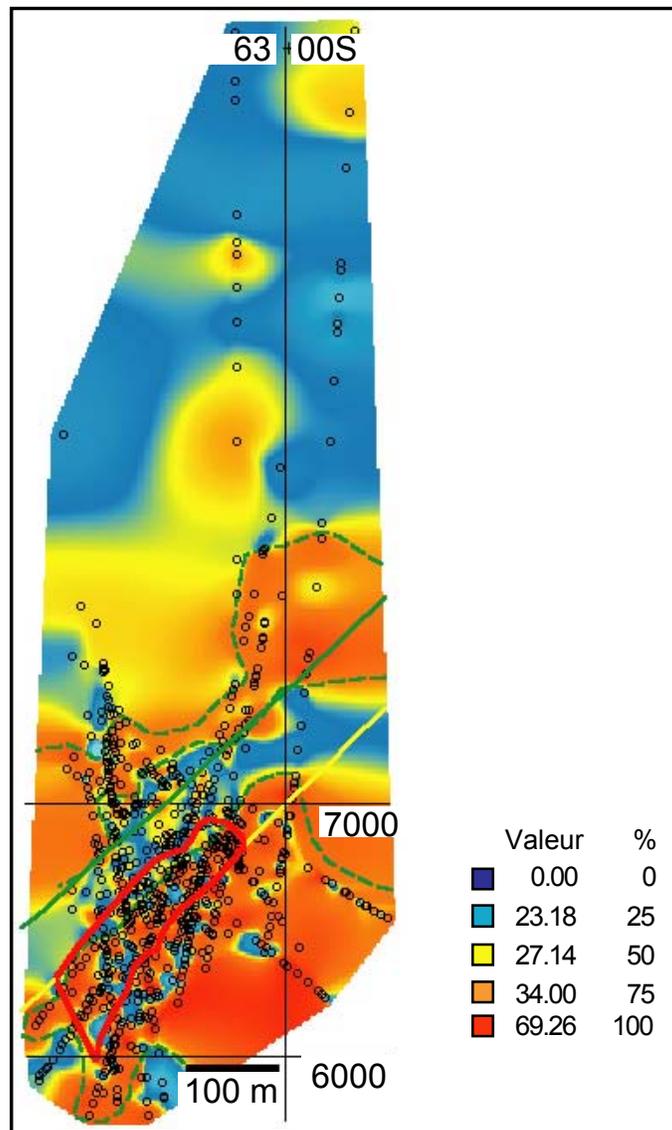


Figure 37: Alteration halos showing quartz values from normative minerals calculations. The grid shown here, for the same section as figure 30, illustrates quartz values from normative minerals calculations. The alteration halo (green dashed line) eliminates interpolation effects between far-away samples; only samples having a quartz content >34% are included in the halo. This allows visualisation of the alteration chimney under the VMS lens. In the hanging wall, alteration is detectable 250 m above the ore lens. [Return to the text.](#)

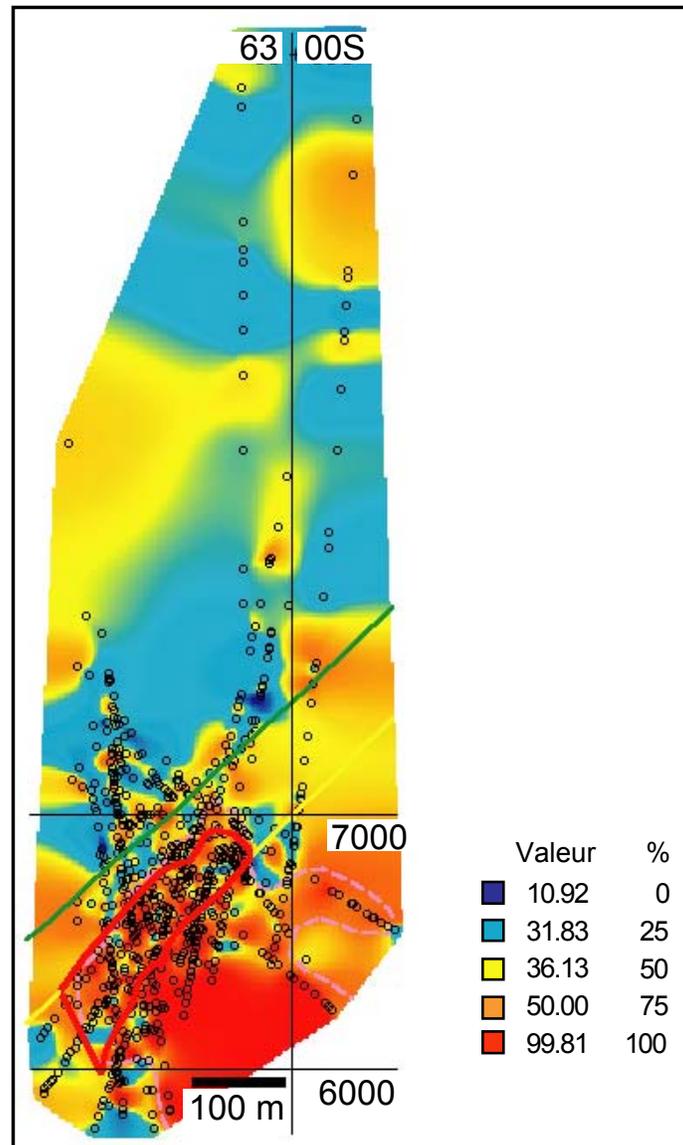


Figure 38: Alteration halos using the Ishikawa index. The grid shown here, for the same section as figure 30, illustrates the Ishikawa alteration index (an example of the elements ratio method). The alteration halo (pink dashed line) eliminates interpolation effects between far-away samples; only samples having an index over 50.0 are included in the halo. This allows visualisation of the alteration chimney under the VMS lens. In the hanging wall, alteration is weakly detectable above the ore lens. [Return to the text.](#)

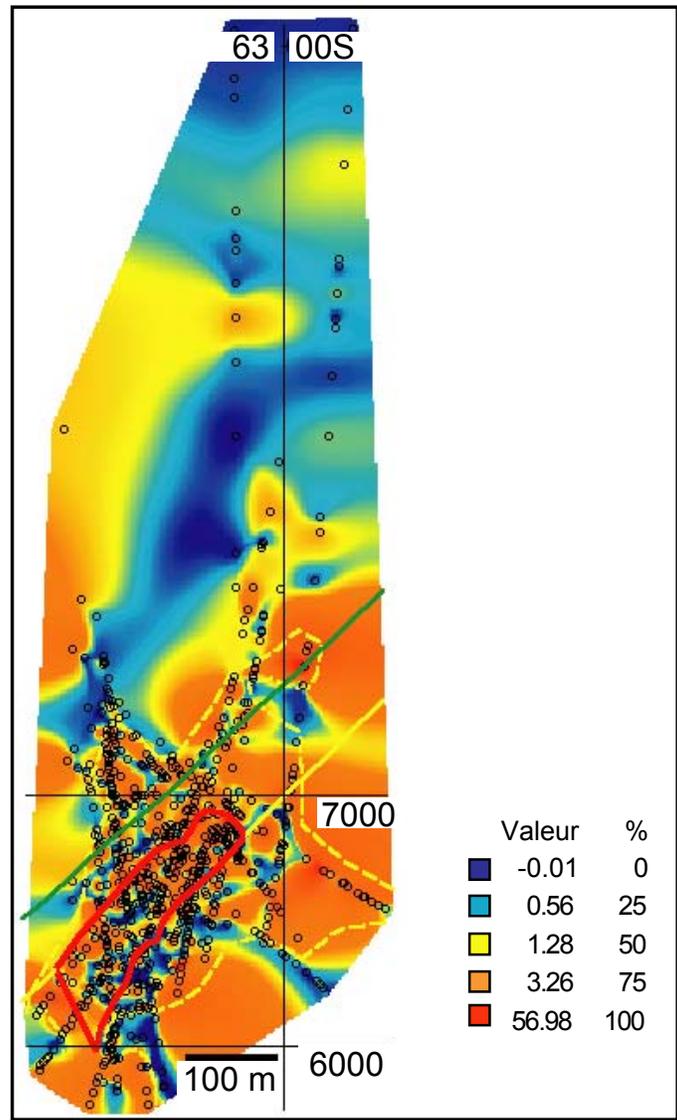


Figure 39: Alteration halos determined by Normat and using the I-Ser alteration index. The grid shown here, for the same section as figure 30, illustrates the I-Ser alteration index as calculated by Normat. The alteration halo (yellow dashed line) eliminates interpolation effects between far-away samples; only samples having an index over 3.26 are included in the halo. This allows visualisation of the alteration chimney under the VMS lens. In the hanging wall, alteration is detectable 100-150 m above the ore lens. [Return to the text.](#)

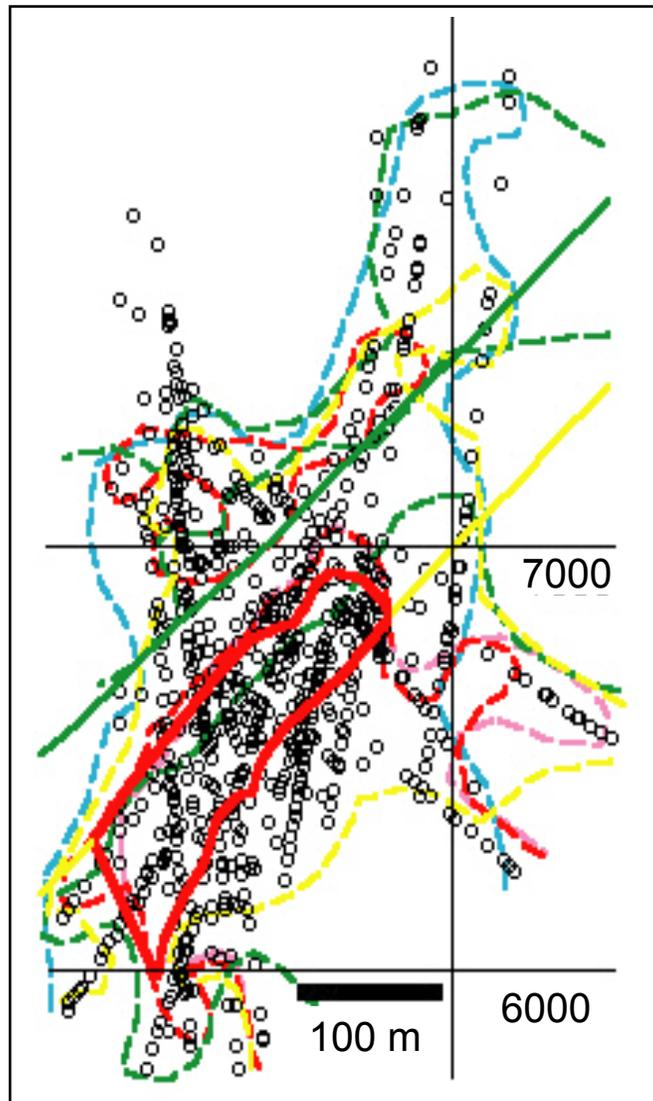


Figure 40: Bell-Allard mine, continued. Both this figure and Table 8 compare the size of the alteration haloes produced by different methods. The dashed lines show the different haloes: variation index from the mass balance method (red); density values calculated by Normat (pale blue); quartz from calculated normative minerals (green); Ishikawa index (pink); I-Ser from Normat (yellow). Other lines as in figure 30. [Return to the text.](#)

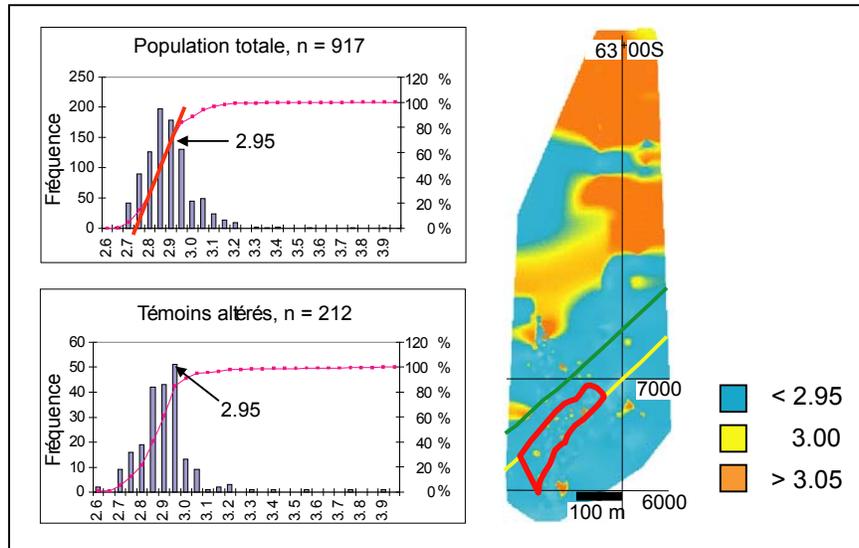


Figure 41: At Bell-Allard, the determination of an alteration threshold. Some 25 alteration indices were found to yield satisfactory grids (including the five shown in figures 35 to 39). An alteration threshold was determined for each of these indices. An example using rock density as calculated by Normat is illustrated here. The upper-left diagram represents the whole database and is used to obtain the slope break on the cumulative frequency plot. The lower-left diagram includes altered samples only and is used to obtain the mode. The diagram on the right shows that samples having a calculated density <2.95 are considered to be altered. [Return to the text.](#)

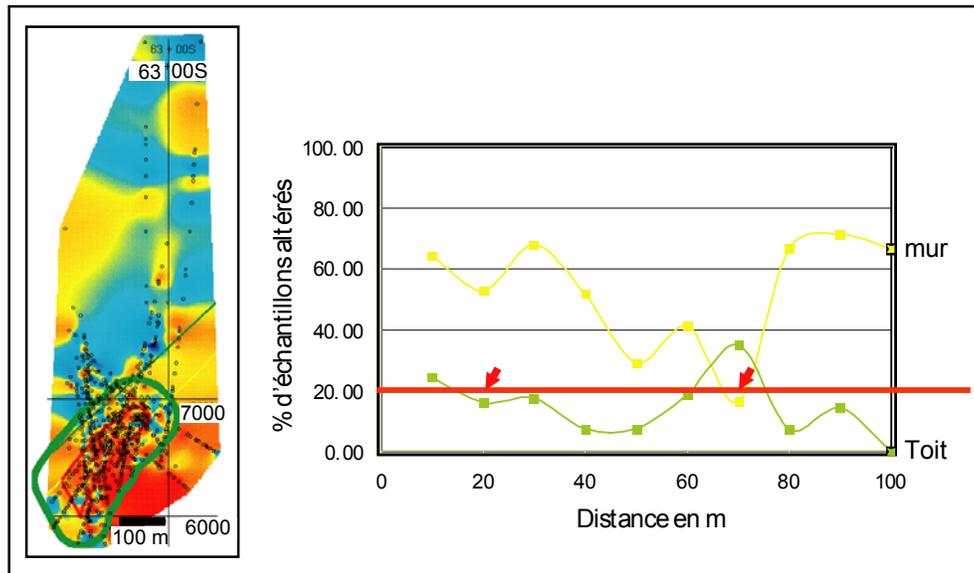


Figure 42: The application of a buffer zone at Bell-Allard. Another factor has to be considered apart from alteration thresholds: how many samples are actually altered in a halo defined by a threshold or within an arbitrary buffer. To verify this, 10 m-wide buffers were created at increasing distances from the ore lens and the percentage of altered samples was counted (graph). Clearly, more samples are altered in the footwall (yellow curve and squares on the graph) than the hanging wall (green curve and squares). One of the buffers is shown by the bold green line on the cross-section. For the illustrated case, alteration is considered significant if 20% of samples within a buffer are altered: for the hanging wall, significant alteration extends 60 m away (because of the altered chimney). [Return to the text.](#)

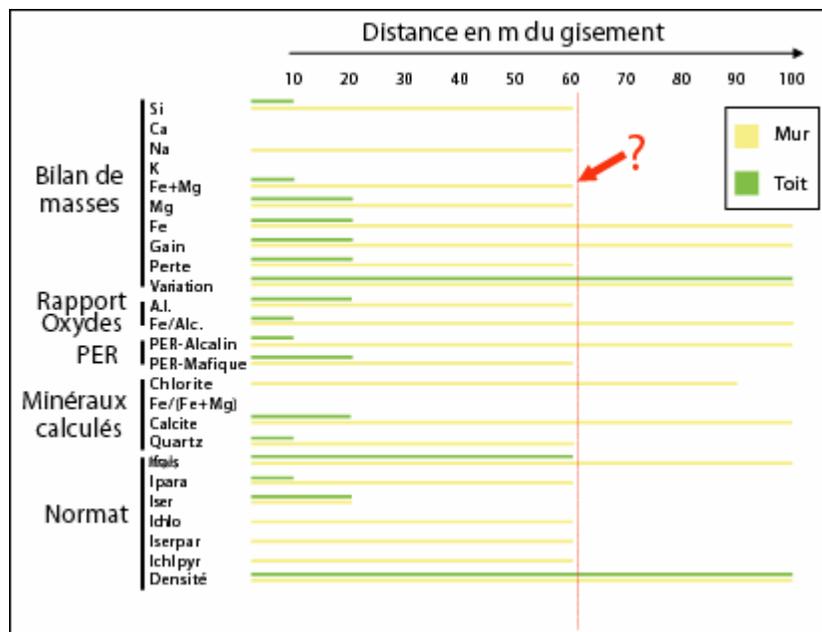


Figure 43: Bell-Allard mine, continued. The buffer technique discussed in figure 42 was applied to the 25 alteration indicators, and the results are displayed here for 22 of these. The graph shows the distance up to which over 20% of samples are altered in 10 m-wide buffers around the ore lens. Several indicators show an alteration zone stopping 60 m from the ore lens in the footwall (red line with question mark), but this is an artefact as explained in the next figure. [Return to the text.](#)

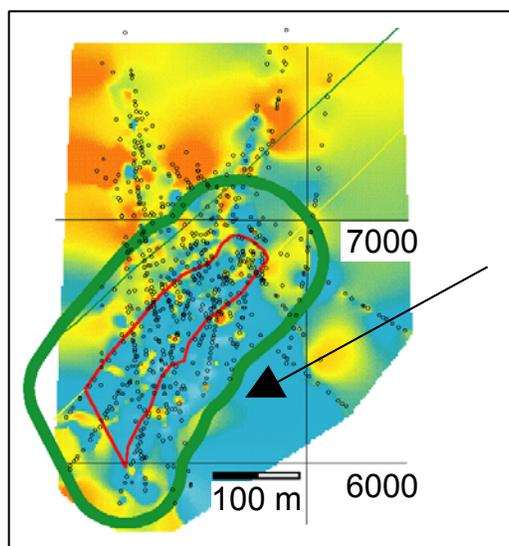


Figure 44: The area marked by the arrowhead lacks samples, thereby resulting in the artificial 60 m limit in footwall alteration on figure 43. The bold green line is the 60 m buffer. [Return to the text.](#)

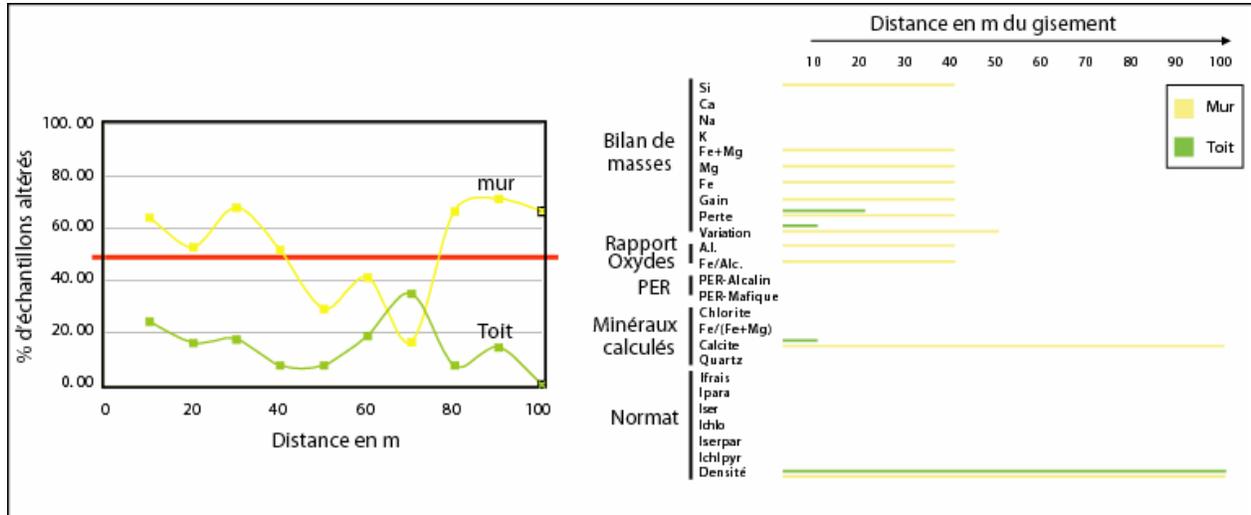


Figure 45: If instead of 20% of samples, 50% need to be altered within a 10 m-wide buffer, fewer alteration indicators are applicable. [Return to the text.](#)

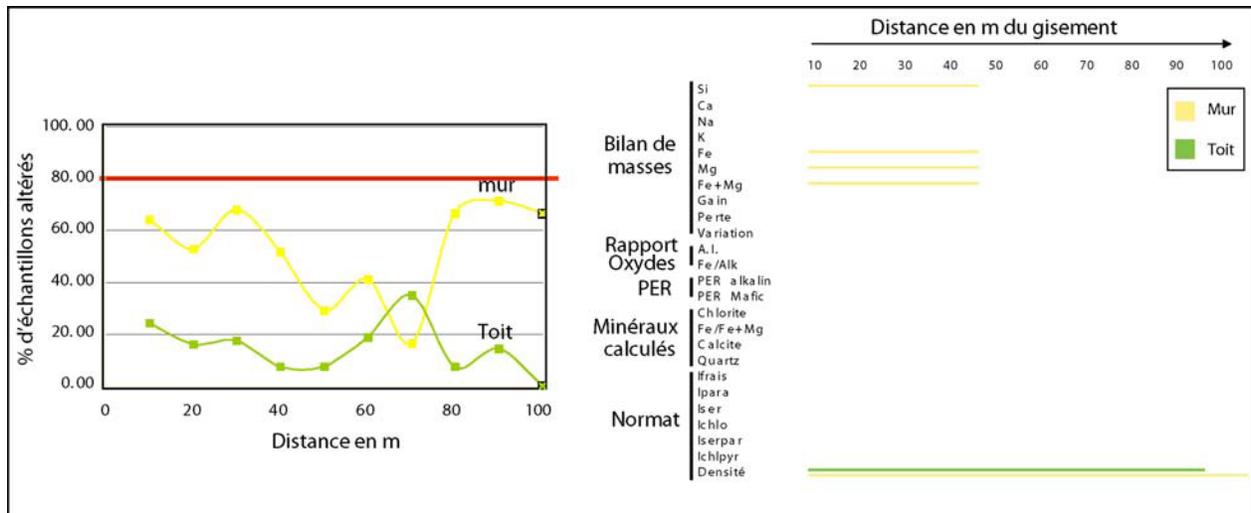


Figure 46: If 80% of samples need to be altered within a 10 m-wide buffer, even fewer alteration indicators are applicable. The conclusion for this database is that density anomalies, as calculated by Normat, define the most laterally extensive alteration halo. However larger-scale tests are recommended to validate the performance of this alteration indicator. [Return to the text.](#)

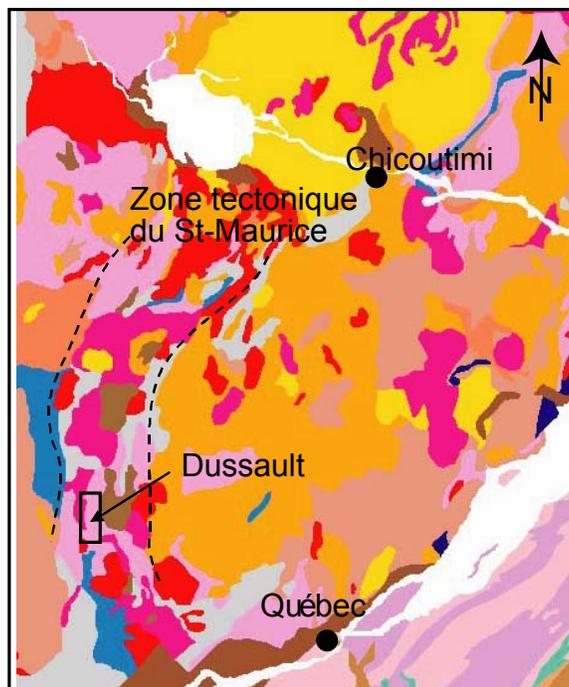


Figure 47: Regional geology of the Dussault property. The Dussault property is located in the Grenville Province about 100 km NW of Quebec city and contains several Zn-Cu-Pb-Au-Ag showings in a 15 km² area. The N-S trending St-Maurice tectonic zone is interpreted as a suture zone. Map compiled from SIGÉOM data. [Return to the text.](#)

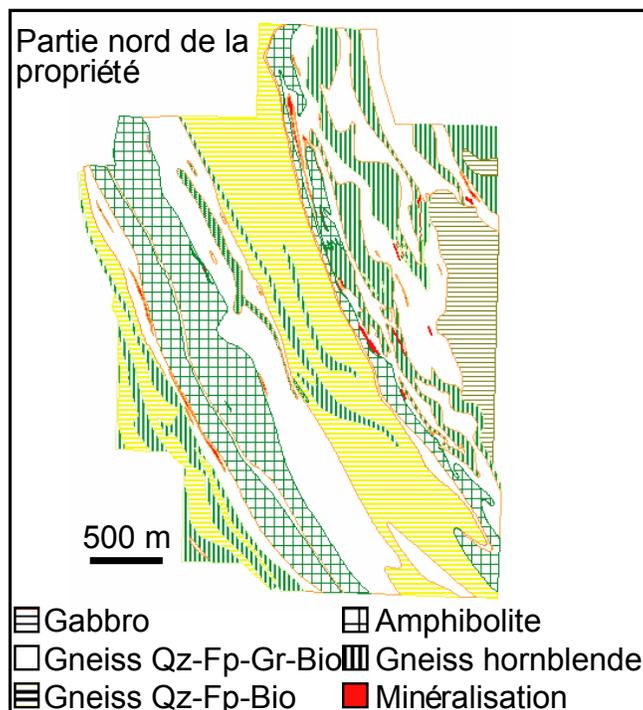


Figure 48: Local geologic map of the Dussault property (northern part only), from SOQUEM. The host rocks include amphibolites, hornblende gneisses and biotite ±garnet quarzo-feldspathic gneisses. mineralization consists of semi-massive to massive sulphides within sub-concordant horizons up to several metres thick (red units on the map). [Return to the text.](#)

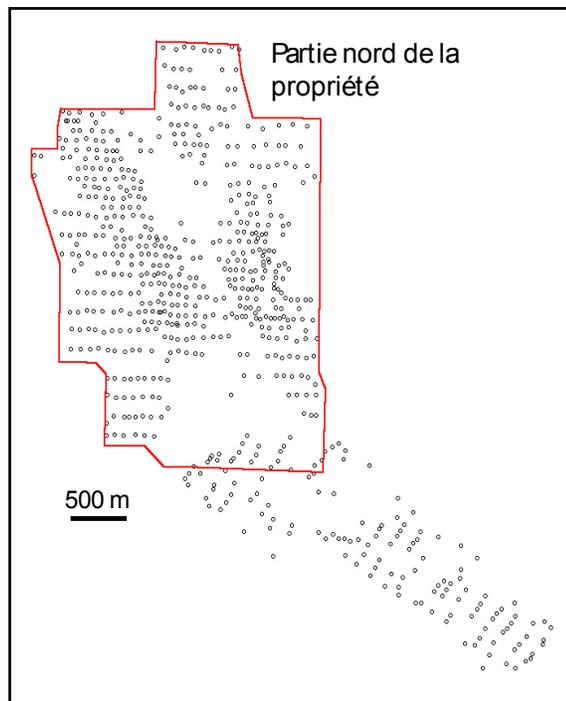


Figure 49: Projection of samples to the surface of Dussault property. The Dussault geochemical database contains 673 surface rock samples, with a mean spacing of about 100 m. Open circles on the figure show sample locations, and the red perimeter delimits the geologic map shown on figure 48. A further 312 samples derived from drill cores were not used in this study because of heterogeneous sample distribution and lack of geological constraints for projecting these samples to the surface. Also, because of the amphibolite grade metamorphism, the software Normat could not be used as it was then limited to greenschist facies calculations. Element ratios, PER-analysis and calculated normative minerals yielded unconvincing results. The mass balance method was found to be problematic, because of the difficulties encountered in modelling fractionation curves. Therefore the Relative mass balance method was used. [Return to the text.](#)

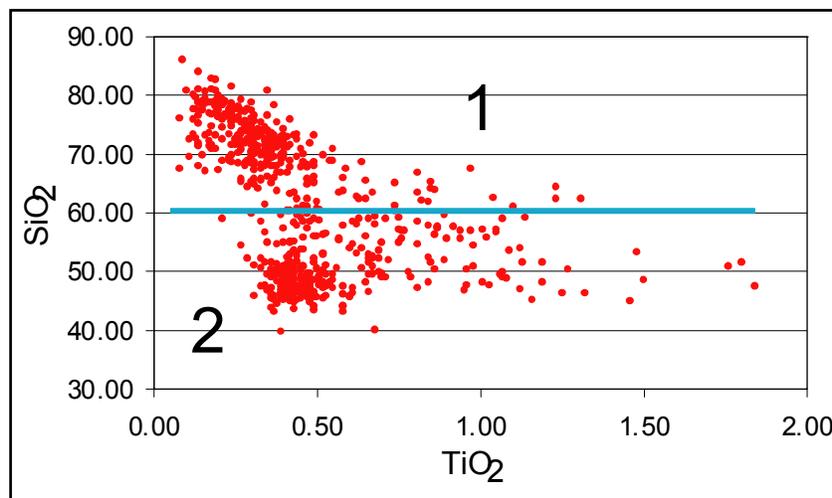


Figure 50: Two groups of samples from the Dussault property are observed on X vs. Ti diagrams, where X is a mobile element. Group 1 samples (felsic rocks) have the following characteristics: Al_2O_3 <15%, SiO_2 >60%, FeO <10%, MgO <6% and CaO <6%, whereas group 2 samples (mafic rocks) have the opposite characteristics. The SiO_2 vs. TiO_2 diagram is shown here as an example, with the blue line separating the two groups. [Return to the text.](#)

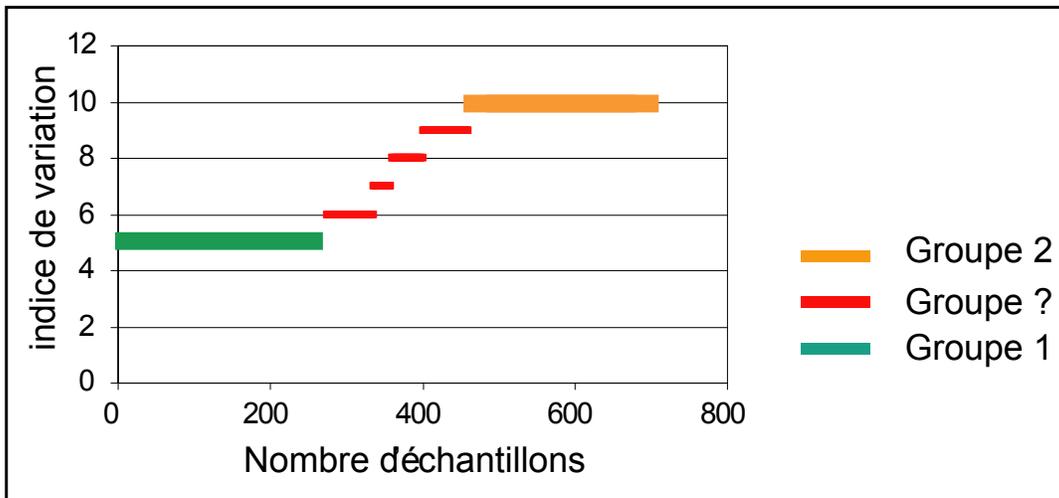


Figure 51: Binary diagram showing the variation index vs. the number of samples from Dussault. Using the parameters listed in the previous figure, 275 samples belong to group one, 215 samples belong to group two, and 185 have mixed characteristics. [Return to the text.](#)

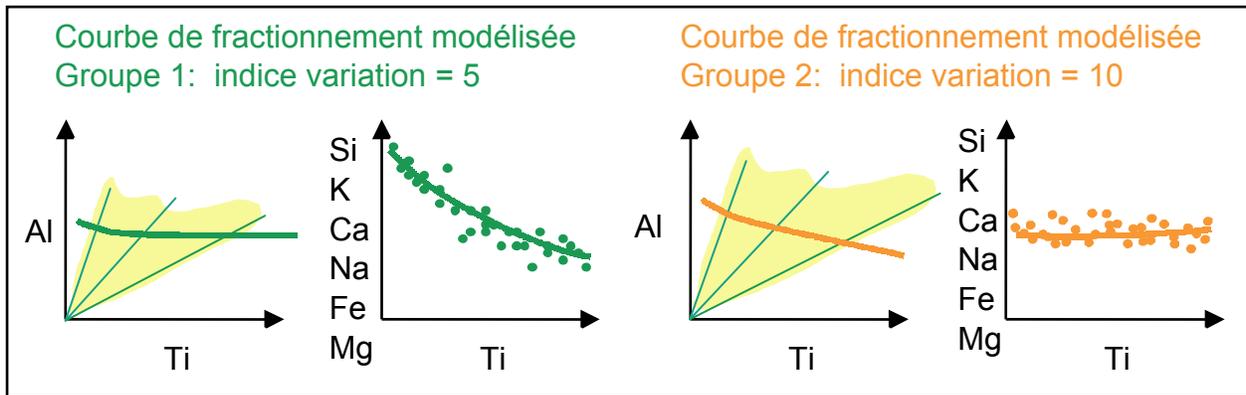


Figure 52: Modelled fractionation curves for Group 1 and Group 2 samples from Dussault. For the Relative mass balance method, the Al-Ti fractionation curves have to be such that the weakly altered samples define “coherent” trends on plots of a mobile element vs. Ti. The Al-Ti fraction curves are determined by a trial-and-error process. Group 1 samples are shown in green and group 2 samples are in orange. Fractionation curves for mobile elements as a function of Ti are listed in Table 9. [Return to the text.](#)

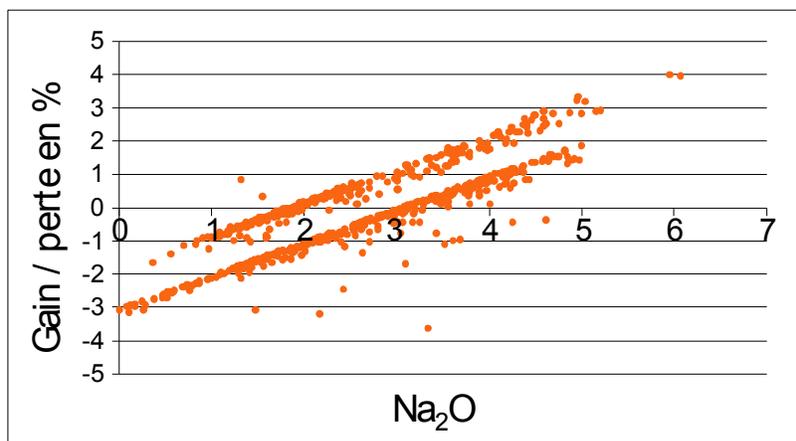


Figure 53: Diagram showing the mass gain/loss versus Na_2O , Dussault property. Relative mass balance method. The two groups of samples can be easily distinguished on this plot of the mass gain/loss vs. Na_2O content, or on similar plots using other mobile elements (Si, Mg, K). [Return to the text.](#)

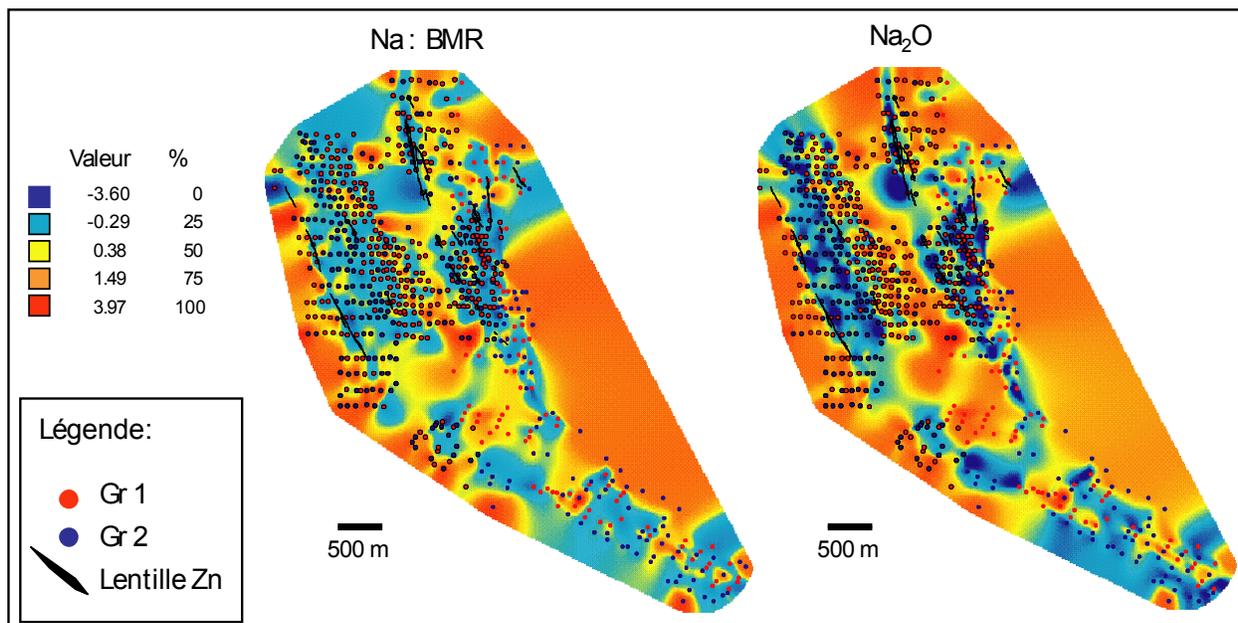


Figure 54: Na alteration index evaluated using the RMB method, Dussault property. The grid on the right simply displays the concentration of a certain oxide (here Na_2O) in the rocks, whereas the grid on the left shows the mass gains (positive values) and mass losses (negative values) of the element, as calculated by the Relative mass balance method. Zn-rich lenses are found in rocks domains where Na has been leached; these alteration haloes reach hundreds of metres on either side of the lenses. The advantage of the Relative mass balance method over simply plotting the element concentration is to display mass losses and gains regardless of the protolith composition. [Return to the text.](#)

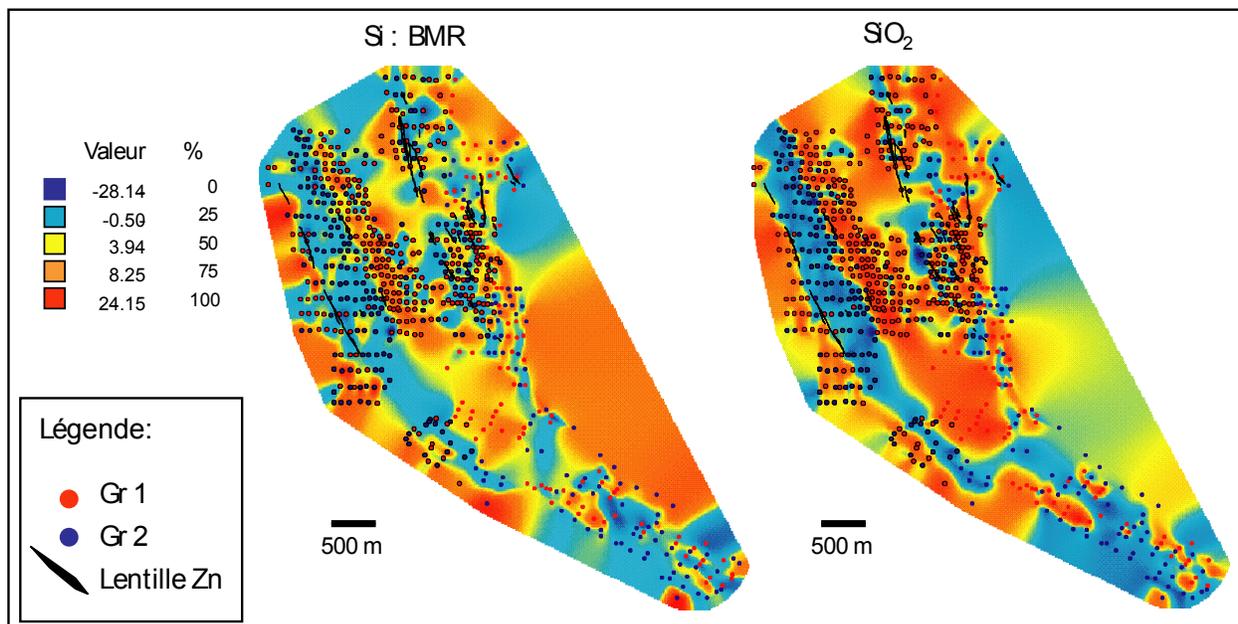


Figure 55: Si alteration index evaluated using the RMB method, Dussault property. As for figure 54, but here Si is shown. Mineralized zones are also associated with silica leaching haloes. [Return to the text.](#)

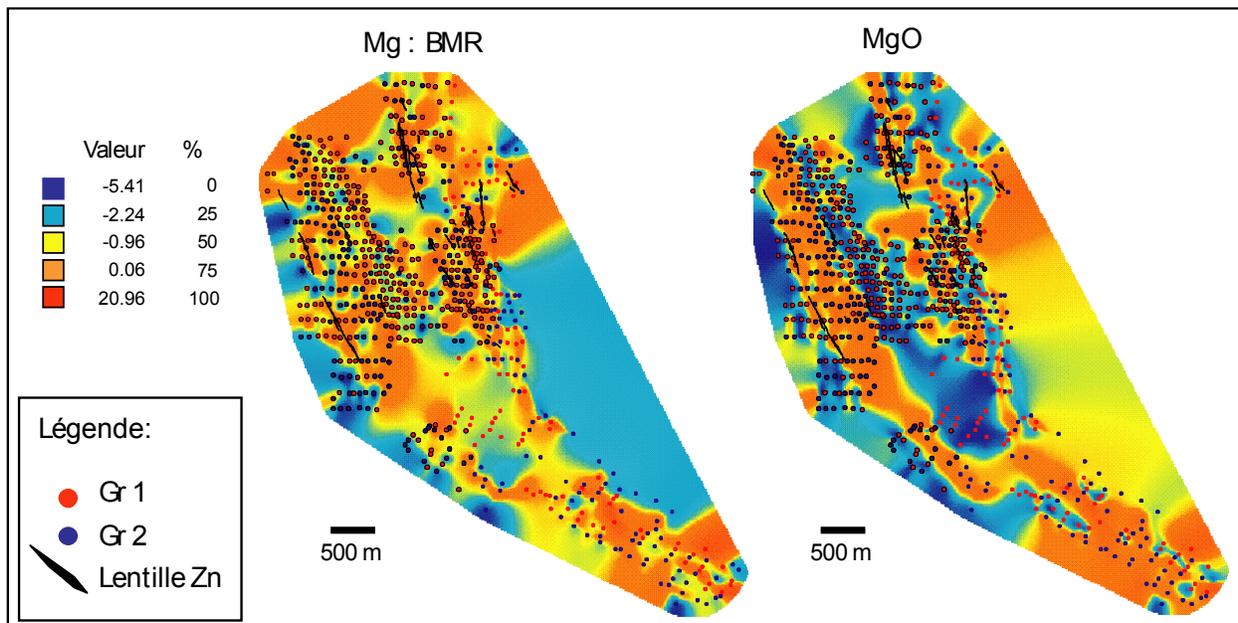


Figure 56: Mg alteration index evaluated using the RMB method, Dussault property. As for figure 54, but here Mg is shown. Mineralized lenses are associated with magnesium enrichment haloes. [Return to the text.](#)

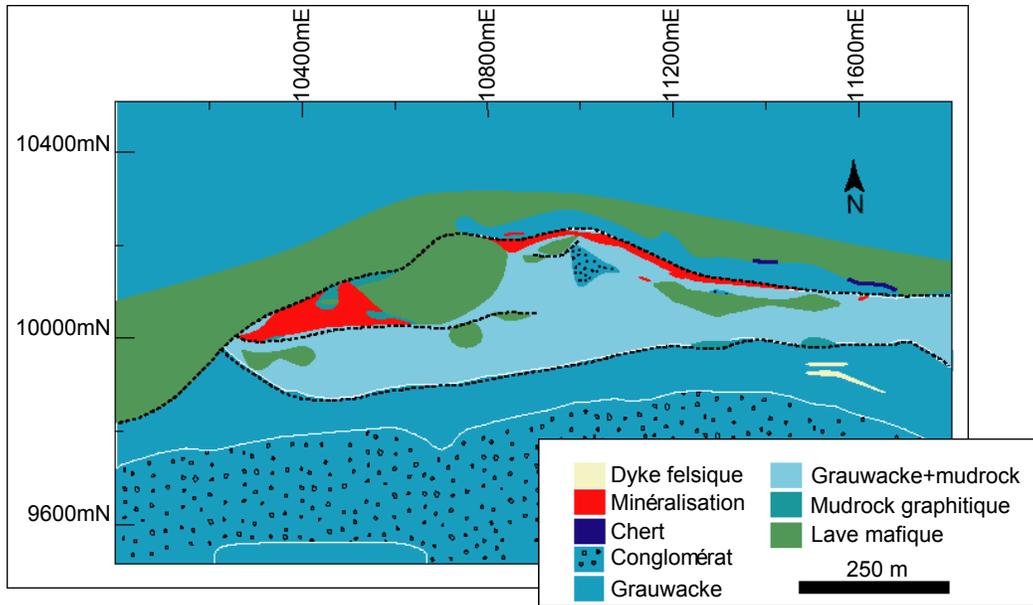


Figure 57: Regional geology of the Casa Berardi gold mine. The Casa Berardi gold mine, owned by Mines Aurizon, exploits quartz-carbonate vein-type deposits hosted by a major deformation zone 95 km north of La Sarre in the Abitibi sub-province. The host rocks belong to the Taïbi Group, a now-steeply dipping volcano-sedimentary package. Carbonate and sericite alteration are ubiquitous in the mineralized areas. This regional geological map was produced by Mines Aurizon. Lenses 113 and 118 are shown in red; blue units are sedimentary and the green unit consists of mafic lavas. [Return to the text.](#)

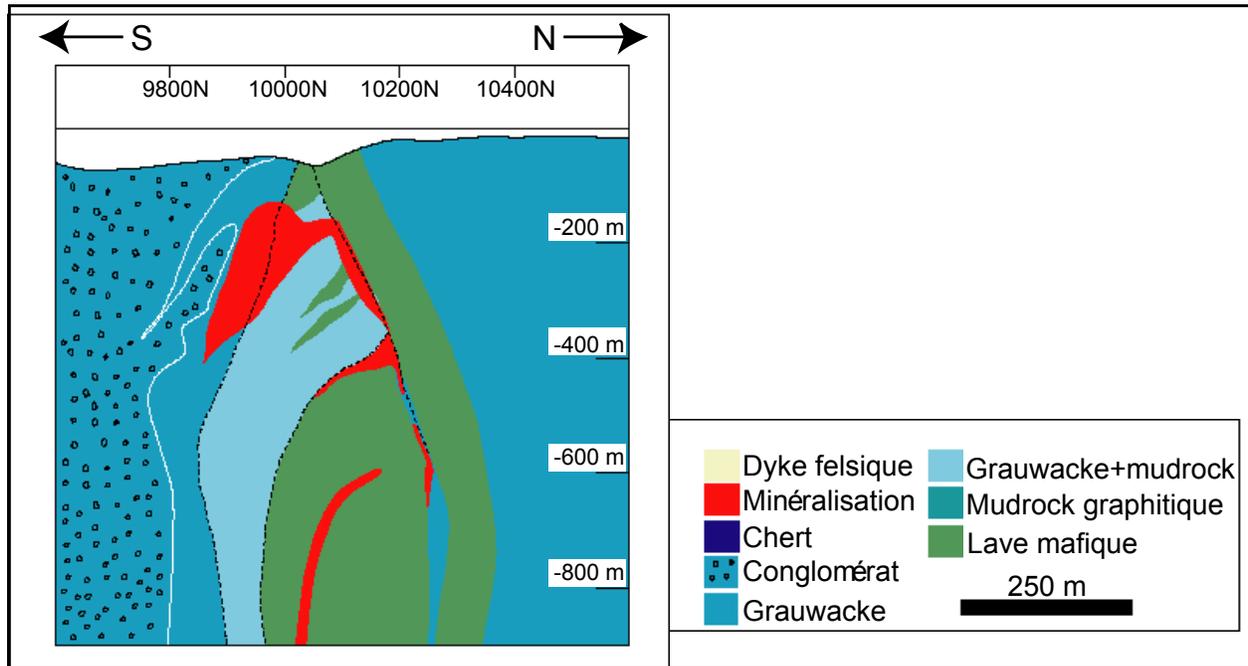


Figure 58: Regional geological cross-section through Casa Berardi, after Mines Aurizon (colour code as for figure 57). The geochemical database used in this study consists of 2076 samples taken from over 100 drill holes distributed over 2 km laterally and reaching up to 1 km in depth. Samples were projected vertically on the 4500 m level to obtain a map-view representation, and also horizontally on the 11 400 m cross-section, yielding 2043 and 550 samples, respectively. As the metamorphism only reaches greenschist conditions, the five alteration assessment methods described above were used for this site. [Return to the text.](#)

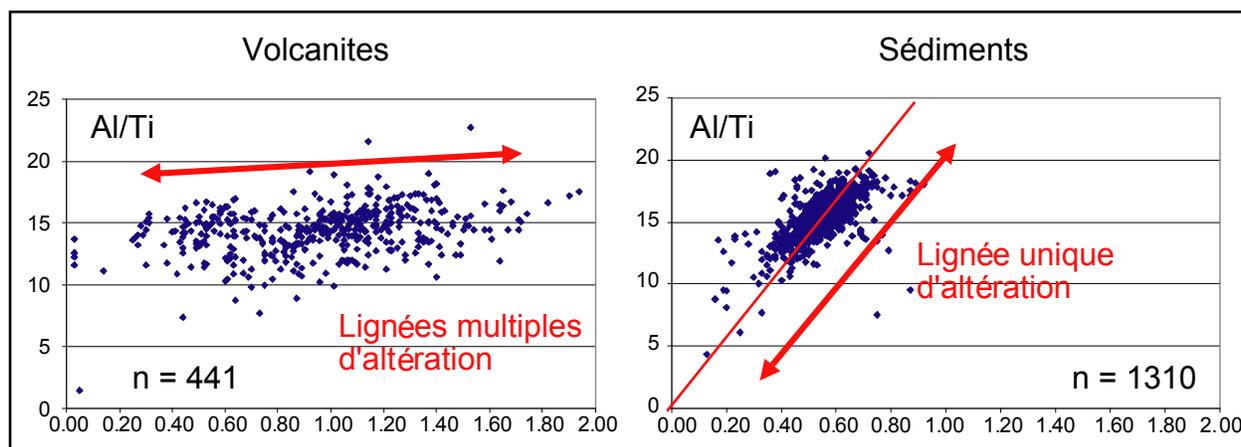


Figure 59: Casa Berardi, continued. For mass balance calculations, samples were divided into two categories based on drill hole information: sedimentary vs. volcanic rocks. The latter are shown on the Al vs. Ti diagram on the left, and are distributed on several possible alteration lines, which by definition have to go through the origin. Therefore the modelling of fractionation curves for volcanic rocks has to consider multiple precursors and the Relative mass balance method is used. On the right side, sedimentary rocks plot on a unique alteration line, suggesting a single precursor. This allows the determination of this precursor by statistical methods. Fractionation curves are presented in Table 10. [Return to the text.](#)

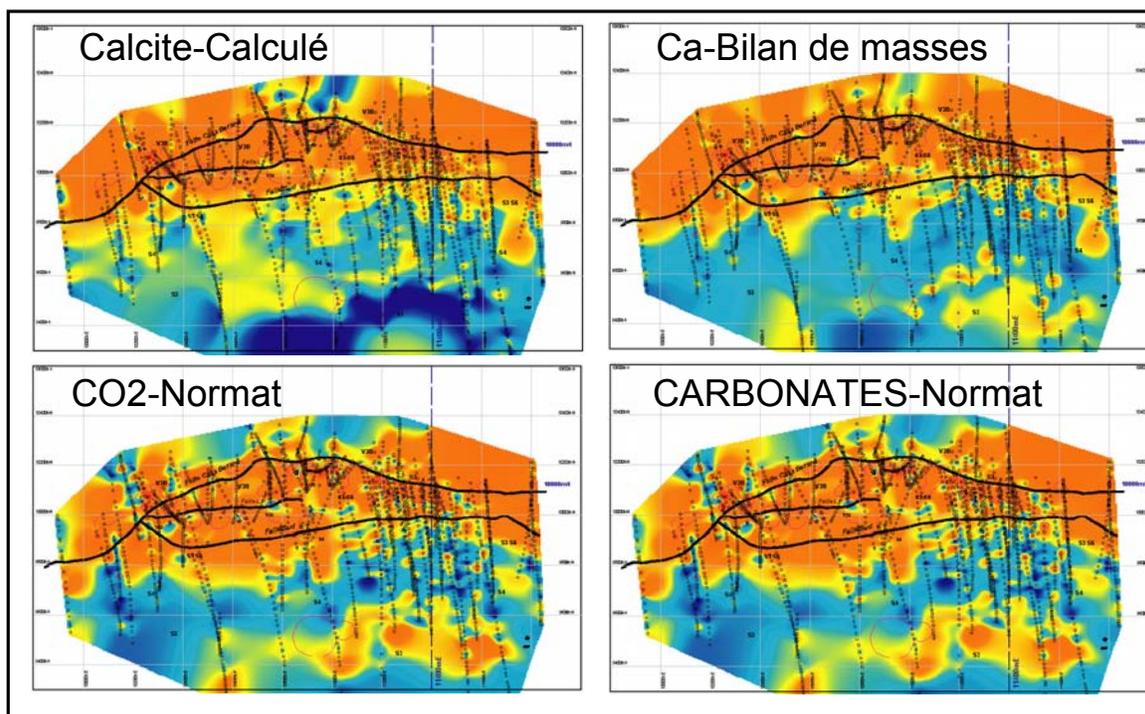


Figure 60: Casa Berardi, continued. Map-view grids of carbonate alteration derived from various methods: calculated normative minerals (calcite, upper left); mass balance (Ca gains and losses, upper right); CO₂ concentration from Normat (lower left) and the sum of normative carbonates from Normat (lower right). Major faults clearly control carbonate alteration on these plots, whereas mineralization-related alteration does not appear clearly. [Return to the text.](#)

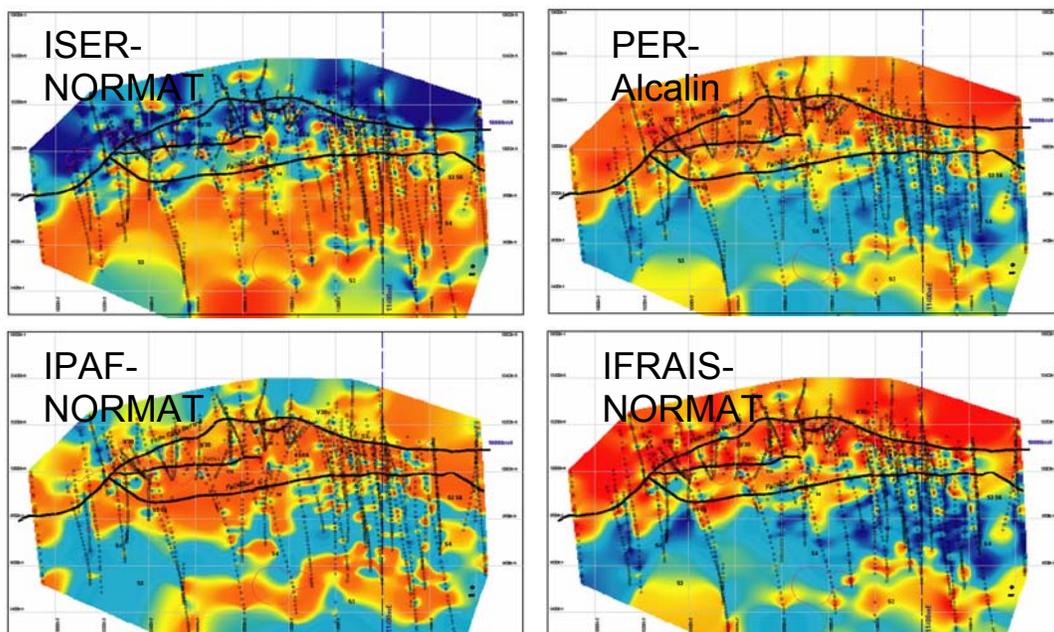


Figure 61: Casa Berardi, continued. Map-view grids of four alteration indicators: Iser-Normat (sericite index), alkaline PER, Ipaf-Normat (LOI index) and Ifrais-Normat. All of these grids are dominated by fault-related alteration. Mass balance calculations for the elements K and Na yield map-view grids and section-view grids which display a better correlation with mineralized zones, with Na yielding “very good” results (not illustrated). [Return to the text.](#)

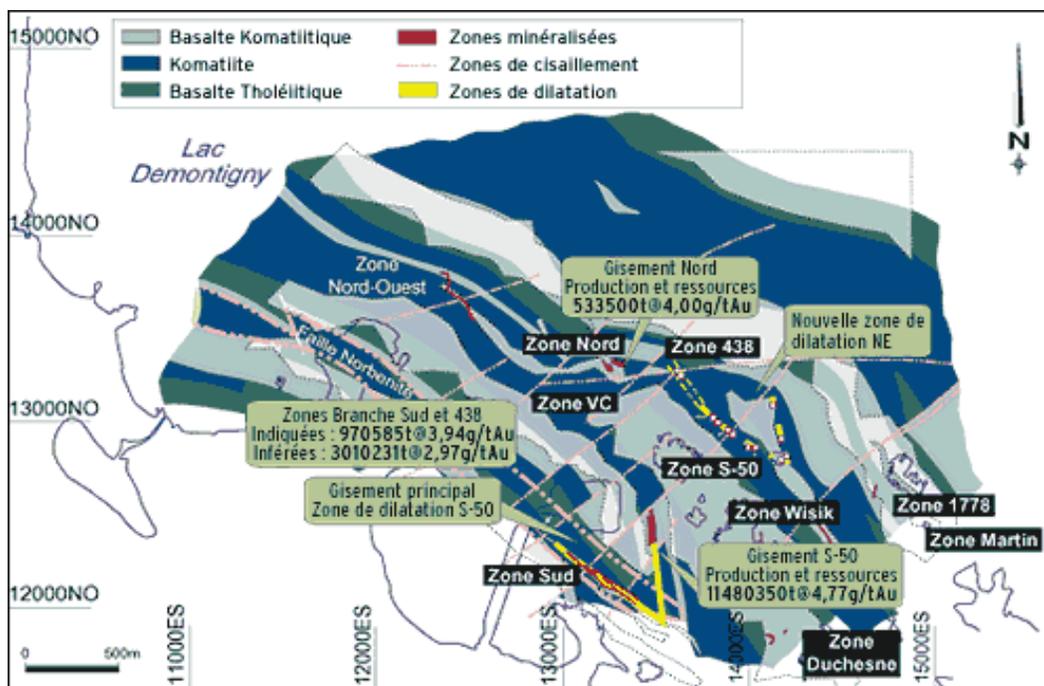


Figure 62: Regional geology of the Kiena mining area. The Kiena mining area is located 10 km W of Val d’Or in the Abitibi sub-province. The area was owned by McWatters at the time of the study, and they supplied the geologic map. The host rocks for the gold mineralization belong to the Jacola formation (volcanic rocks ranging from basalt to komatiite in composition). Several shear zones run sub-parallel to the near-vertically dipping rocks; mineralization is found within intensely deformed rocks. [Return to the text.](#)

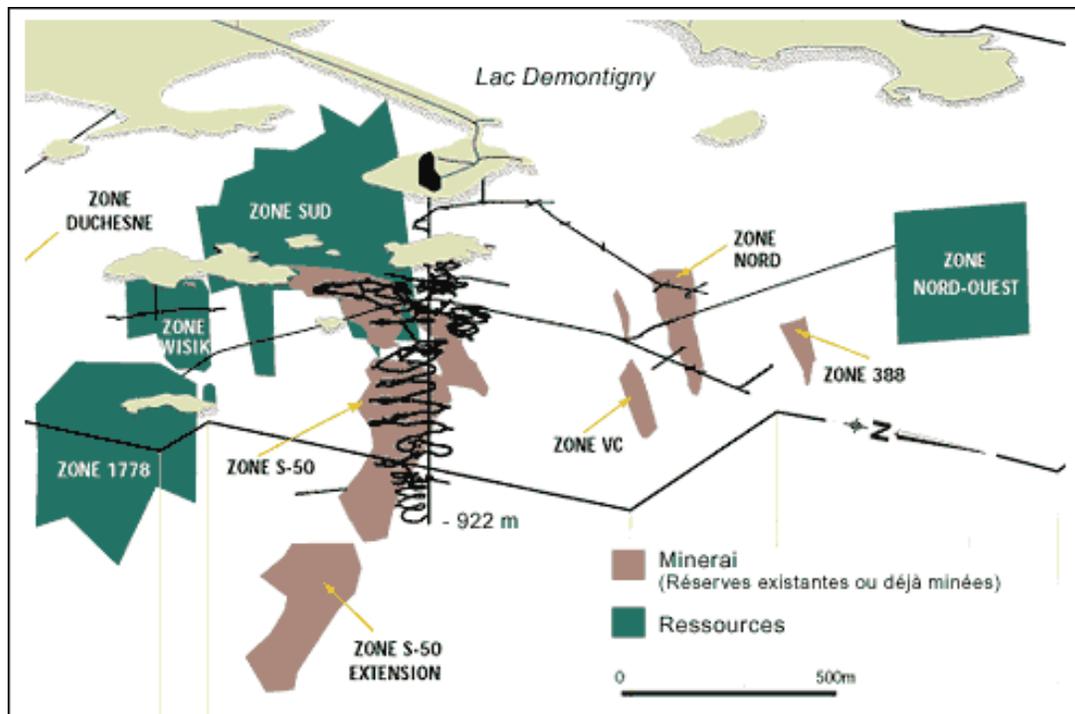


Figure 63: Exploited zones (pinkish grey) and satellite mineralized zones (in green) in the Kiena mining area (after McWatters). Mineralization consists of disseminated sulphides within hydrothermal alteration zones, brecciated zones, and quartz-carbonate-albite stockworks. The geochemical database used in this study contains 1228 samples spread over the 10 km² property; most samples are from drill holes. In addition, 36 512 samples have been analysed for gold, allowing 0.5 g/t isocontours to be drawn. All samples from the surface to a depth of 500 m were projected vertically to a level 250 m below the surface, yielding a map-view projection with 1105 samples. [Return to the text.](#)

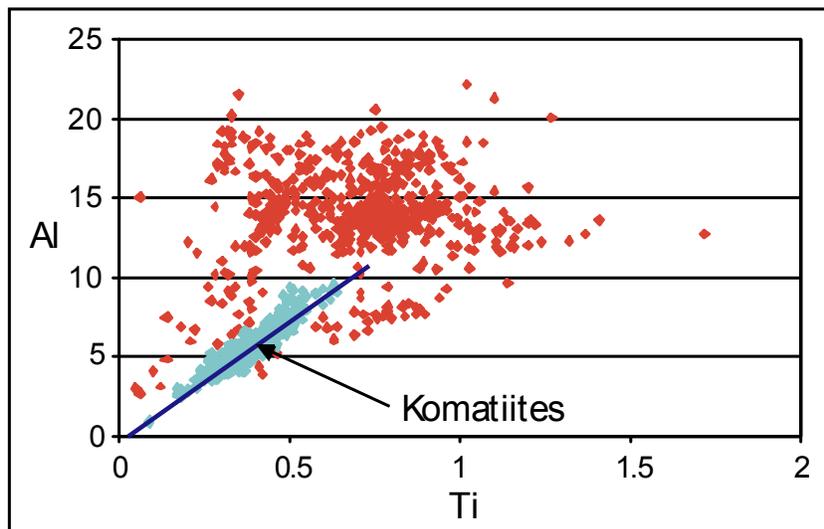


Figure 64: Al/Ti diagram showing the distribution of komatiites and other volcanic rocks from the Kiena mining area. For mass balance calculation proposes, samples were divided into komatiites (blue dots) and other volcanic rocks (red dots). Komatiites have a unique precursor as they plot on a single alteration line; a statistical method was used to assess the precursor's composition. Other volcanic rocks display a fan pattern and have multiple precursors. The modelled fractionation curves are listed in Table 11. [Return to the text.](#)

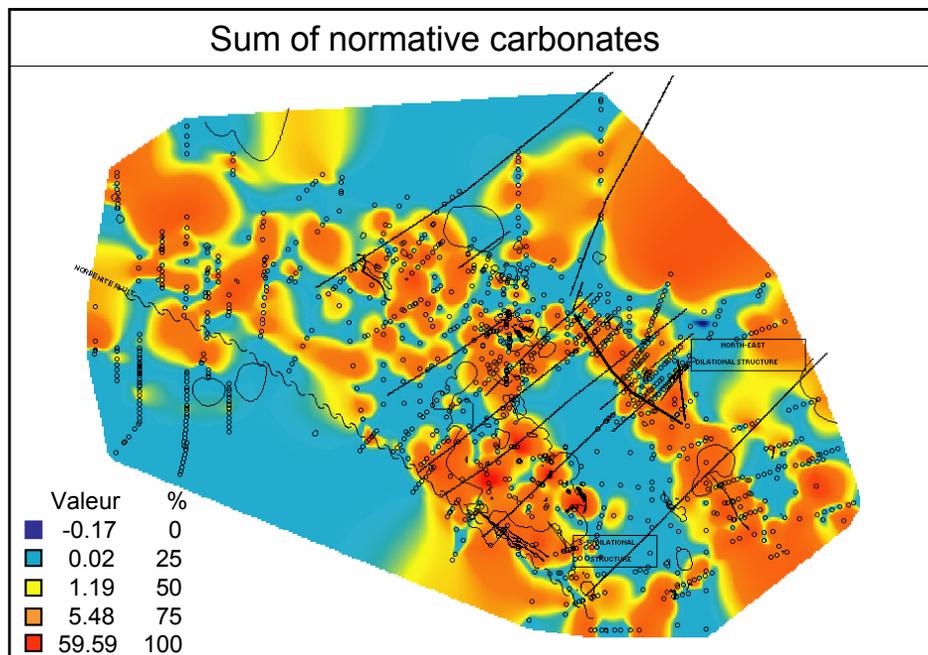


Figure 65: Kiena mining area, continued. Using the Normat software, several parameters were calculated, including the sum of normative carbonates, density, IpaF (LOI index), normative actinolite, normative orthose, and normative tremolite. The former parameter is shown here on a map-view grid as an example. Straight NE-tending lines represent faults that offset the lithological units and the mineralization (see figure 62). [Return to the text.](#)

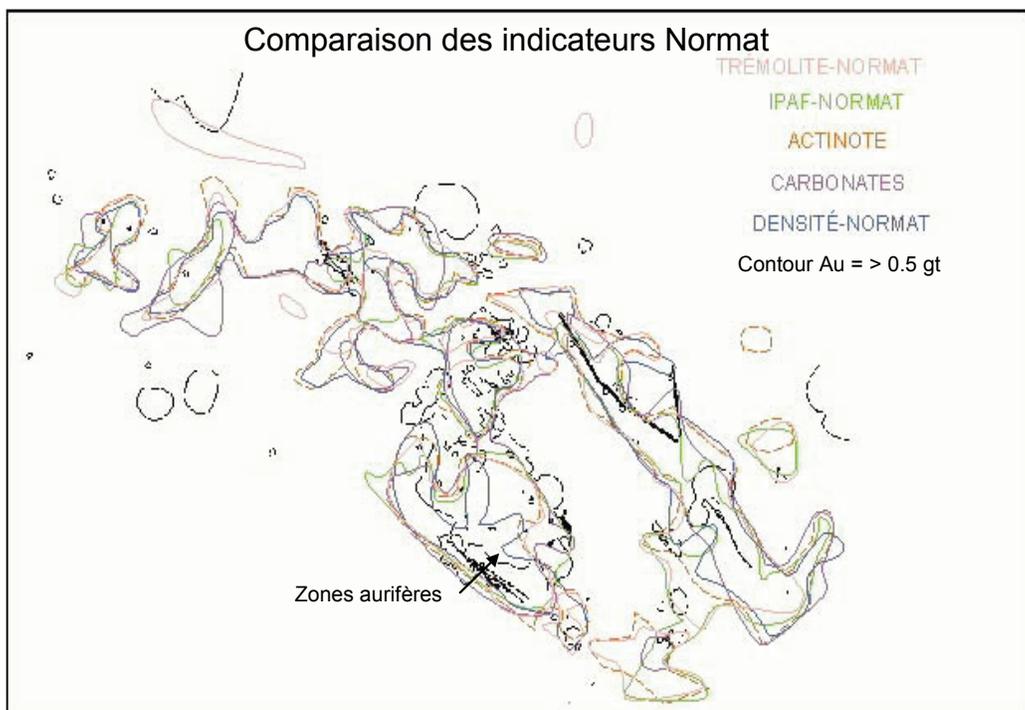


Figure 66: Kiena mining area, continued. Comparison of several Normat-derived alteration indicators, in map view. Gold zones are traced in black. All these parameters define essentially the same alteration patterns. [Return to the text.](#)

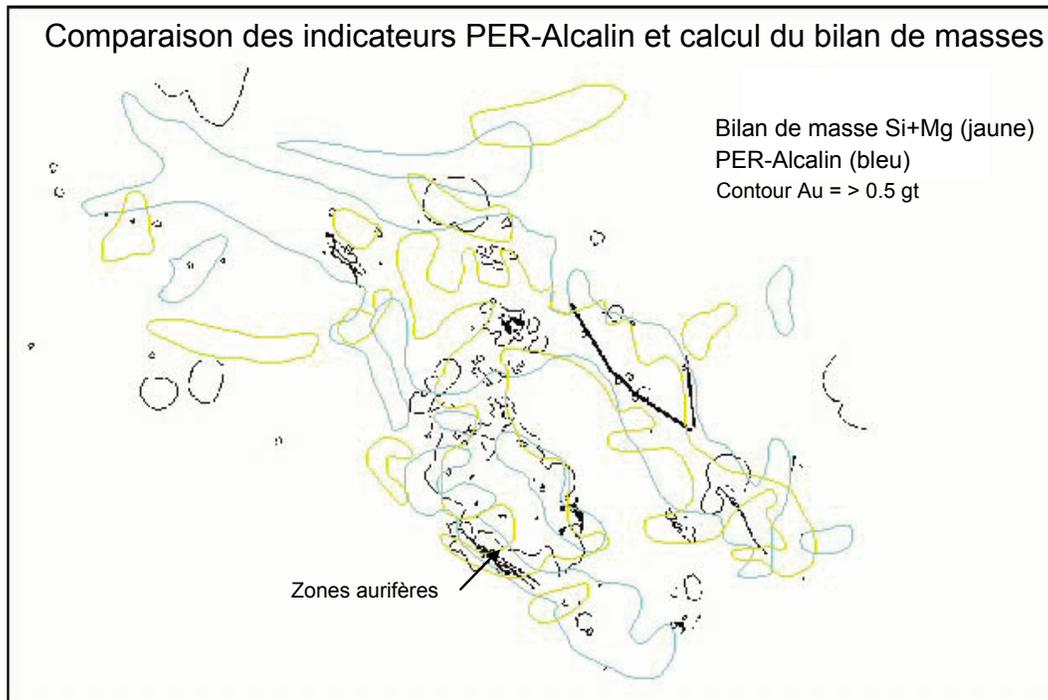


Figure 67: Comparison of alkaline PER calculations and mass balance calculations. The alteration patterns show a relatively good correspondence with the gold distribution, but also define alteration areas different in geometry from those generated by other methods. [Return to the text.](#)

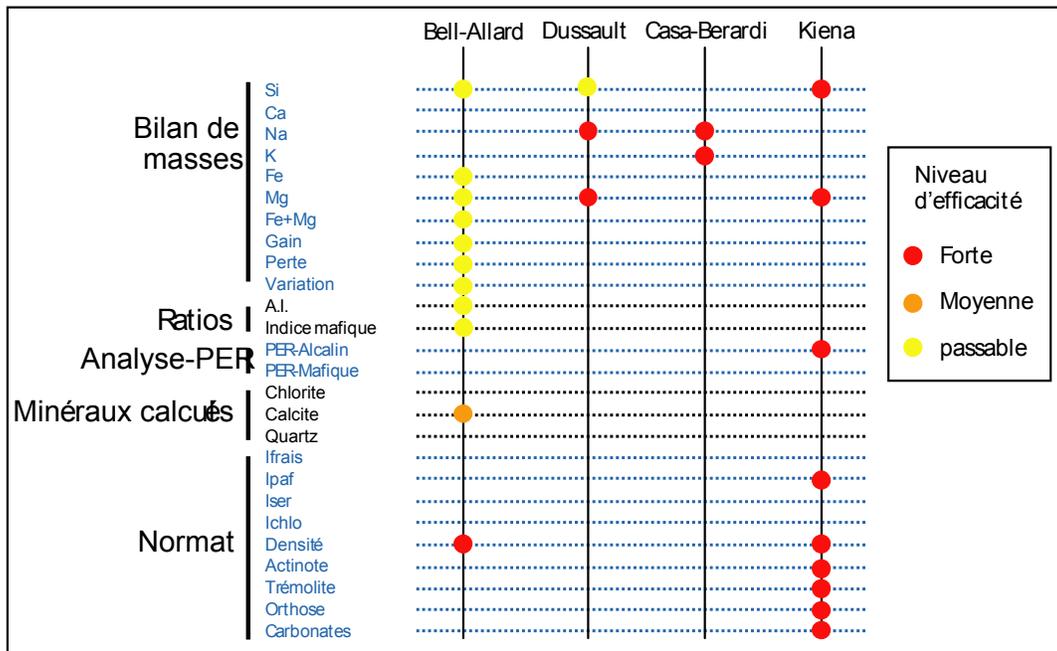


Figure 68: Efficiency of the different methods used to characterize hydrothermal alteration. In conclusion, the software Normat is very effective for VMS environments such as Bell-Allard, where alteration corresponds essentially to element leaching and mass losses. Normat is easier to use than other methods such as mass balance calculations or PER analysis, but a large number of alteration indicators does not necessarily imply a great diversity in alteration signatures, as illustrated by the Kiena case. One further problem is that normative minerals are inter-dependant and where abundant carbonates are found (e.g., Casa Berardi), alkali alteration can be obliterated. Mass balance calculations are effective to delineate alteration zones in high-grade metamorphic environments such as the Dussault property, and also in relation with gold mineralization for which related alteration largely consists of mass gains (e.g., Casa Berardi). PER analysis best performed at Kiena, where alteration mainly involved alkaline elements. [Return to the text.](#)