

Paramètres des altérations hydrothermales des gisements de type VMS et aurifères : Comparaison de la performance d'indicateurs d'altération

Par

Damien Gaboury, Géo. Ph.D.

Automne 2004



CONSOREM

Consortium de recherche en exploration minérale



AVERTISSEMENT

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

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

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

Gaboury, D. 2004. Paramètres des altérations hydrothermales des gisements de type VMS et aurifères : comparaison de la performance d'indicateurs d'altération. Rapport, projet CONSOREM 2000-2A, 77 p.

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

Résumé

La signature de l'altération hydrothermale est généralement bien documentée dans la littérature pour différents environnements et contextes de minéralisation. On y décrit la minéralogie, les échanges entre le fluide et la roche, les enrichissements ou appauvrissements en certains éléments et les changements de masse. Ces informations permettent de juger des processus d'altération, de la nature du fluide et, dans une certaine mesure, du degré d'altération en fonction de la distance d'un gisement. Les études portent régulièrement sur des gisements ou indices connus ce qui biaise, en partie, l'échantillonnage autour du site de dépôt. Ce dernier point reflète peu la réalité de l'exploration qui se fait avec des banques de données plus régionales.

L'aspect dimensionnel de l'enveloppe d'altération est un élément critique en exploration. Cette détermination spatiale de la zone d'altération fait appel à plusieurs critères qui sont fonction d'une logique binaire (établissement d'un seuil d'altération) ou d'une logique floue (établissement d'un degré). Par surcroît, le choix de la méthode en fonction du contexte de minéralisation et de la nature des roches hôtes est déterminant. Finalement, les banques de données régionales sont souvent hétérogènes.

Plusieurs banques de données lithogéochimiques issues de compilation (p.ex. la banque de données du MRNFPQ ou les banques de compagnies en format numérique) sont utilisées afin d'obtenir une image plus régionale de l'altération. Toutefois, ces banques ne sont pas uniformes en termes d'éléments analysés et leurs dénominateurs communs sont les éléments majeurs.

Le projet de recherche du CONSOREM vise à faire un bilan de performance comparative entre plusieurs méthodes afin d'établir laquelle est la mieux adaptée en fonction du contexte et de l'environnement de minéralisation. Ce projet a été établi dans le but d'optimiser les banques de données constituées surtout d'éléments majeurs.

Plusieurs méthodes ont donc été utilisées avec différents types de gisements de métaux de base et précieux, dans différents contextes lithologiques et métamorphiques. Les méthodes utilisées correspondent à Normat, l'Analyse-PER, les Ratios d'éléments, les Minéraux normatifs calculés ainsi qu'une adaptation du Bilan de masses développée par le CONSOREM, soit le Bilan de masses relatif.

Normat est particulièrement performant pour les gisements volcanogènes où l'altération correspond essentiellement à des lessivages. Le calcul de Bilan de masses relatif, quoique plus complexe, a été la méthode la plus performante pour faire ressortir les zones d'altération 1) en contexte de haut grade métamorphique et 2) en association avec les gisements aurifères où les altérations sont principalement des gains de masses.

Table des matières

Avertissement.....	ii
Résumé	iii
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	16
3.1.1 Géologie régionale	16
3.1.2 Calcul du Bilan de masses	17
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.....	26
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.....	19
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: Les isocontours relatifs.....	32
Figure 2: Deux profils de l'altération mesurée par rapport à deux indices	32
Figure 3: Visualisation de l'hétérogénéité de l'altération hydrothermale.....	33
Figure 4: Distribution normale des échantillons frais	33
Figure 5: Distribution log-normale des échantillons altérés	34
Figure 6: Distribution quasi-normale	34
Figure 7: Distribution quasi-log-normale.....	35
Figure 8: Distribution quasi-normale	35

Figure 9: Distribution quasi-log-normale.....	36
Figure 10: Distribution quasi-normale.....	36
Figure 11: Distribution quasi-log-normale.....	37
Figure 12: Détermination du seuil.....	37
Figure 13: Visualisation de la superposition des champs des roches fraîches et altérées.....	38
Figure 14: Calcul des minéraux normatifs, les plans de référence des roches fraîches et altérées sont différents et la superposition est éliminée.....	38
Figure 15: Les échantillons peu altérés sont distribués suivant une droite.....	39
Figure 16: Graphiques des droites modèles pour les feldspath et les minéraux mafiques.....	39
Figure 17: Deux exemples réalisés à partir de la banque de données de Dussault.....	40
Figure 18: Exemple de gain et perte d'éléments mobiles par la méthode du Bilan de masses.....	40
Figure 19: Distribution d'éléments immobiles, Al en fonction de Ti, où le précurseur est déterminé.....	41
Figure 20: La courbe théorique de fractionnement modélise la composition des précurseurs suivant une suite de roches.....	41
Figure 21: Distribution en éventail des échantillons altérés.....	42
Figure 22: Détermination de la composition des éléments immobiles des précurseurs.....	42
Figure 23: La courbe d'éléments immobiles est modélisée.....	43
Figure 24: La courbe de fractionnement des précurseurs permet de calculer s'il y a eu gain ou perte de masse.....	43
Figure 25: Exemple de la définition de l'équation générale pour les roches d'affinité tholéiitique à calco-alkaline.....	44
Figure 26: Le diagramme de gauche montre deux courbes « test » de fractionnement qui ont été modélisé.....	44
Figure 27: Amélioration de la méthode de Bilan de masses relatif.....	45
Figure 28: Géologie régionale de la mine Bell-Allard.....	45
Figure 29: Vue en coupe de la propriété Bell-Allard.....	46
Figure 30: Projection des échantillons de la banque de données autour de la zone minéralisée.....	47
Figure 31: La répartition des échantillons suggère la présence de deux tendances de différenciation magmatique.....	48
Figure 32: Diagrammes binaires de Zr/Al versus Ti et de MgO versus Ti qui sont , difficiles à intégrer au sein d'une même suite magmatique.....	48
Figure 33: Les diagrammes binaires Al ₂ O ₃ versus TiO ₂ des groupes 1 (Gr1) et 2 (Gr 2) montrent leur courbe de différenciation respective.....	49
Figure 34: Les diagrammes binaires CaO versus TiO ₂ des groupes 1 et 2 montrent leur courbe de différenciation respective.....	49
Figure 35: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode du Bilan de masses appliquée à l'indice variation.....	50
Figure 36: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode Normat appliquée à la densité.....	51
Figure 37: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode des Minéraux normatifs calculés appliquée au quartz.....	52

Figure 38: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode de Ratio d'éléments selon l'indice d'altération d'Ishikawa	53
Figure 39: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode Normat appliquée à l'indice d'altération I-Ser.....	54
Figure 40: Comparaison des méthodes de détermination du halo d'altération	55
Figure 41: Exemple de détermination du seuil.....	56
Figure 42: La zone tampon.....	56
Figure 43: Les résultats sont donnés pour 22 indicateurs	57
Figure 44: La zone tampon.....	57
Figure 45: À 50% des échantillons altérés, moins d'indicateurs d'altération sont applicables.....	58
Figure 46: À 80% des échantillons altérés, moins d'indicateurs d'altération sont applicables.....	58
Figure 47: Géologie régionale représentant le contexte de la propriété de Dussault	59
Figure 48: La géologie locale montre 5 unités lithologiques plus les zones minéralisées.....	59
Figure 49: Les points représentent les échantillons projetés à la surface	60
Figure 50: Les graphiques présentent tous deux groupes de roches distincts	60
Figure 51: Le diagramme binaire de l'indice de variation en fonction du nombre d'échantillons illustre la compilation des résultats de la subdivision en groupes.....	61
Figure 52: Voici les courbes de fractionnement modélisées pour les échantillons appartenant au groupe 1 et au groupe 2.....	61
Figure 53: Diagramme des gains/pertes (%) en fonction du pourcentage poids de Na ₂ O	62
Figure 54: L'indice d'altération Na évalué avec la méthode BMR.....	62
Figure 55: L'indice d'altération Si évalué avec la méthode BMR	63
Figure 56: L'indice d'altération Mg évalué avec la méthode BMR	64
Figure 57: Géologie régionale représentant le contexte dans lequel se trouve les gisements aurifères de Casa Berardi.....	65
Figure 58: Géologie régionale vue en section	65
Figure 59: Bilan de masses calculé par rapport à deux catégories d'échantillons.....	66
Figure 60: Les quatre figures d'indice d'altération en carbonate traduisent la présence des failles et oblitèrent l'altération spécifique à la minéralisation ..	66
Figure 61: Les quatre figures d'indice d'altération traduisent la présence de failles	67
Figure 62: Géologie régionale représentant le contexte dans lequel se trouve le complexe minier de Kiena.....	67
Figure 63: Zones en exploitation et zones satellite.....	68
Figure 64: Le diagramme Al/Ti illustre la dispersion des échantillons komatiitiques et volcaniques.....	68
Figure 65: L'indice d'altération calculé selon la Σ carbonates-Normat.....	69
Figure 66: Comparaison des différents indicateurs d'altération déterminés à partir de la méthode Normat	69
Figure 67: Comparaison des indicateurs PER-Alcalin et calcul du Bilan de masses.....	70
Figure 68: Résumé de l'efficacité des méthodes de détermination de l'altération par rapport aux différents cas étudiés.....	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.

Tableau 1 : Résumé des cas théoriques simples.

Cas simple	Fig. 4	Fig. 5	Fig. 6	Fig. 7
Population	Homogène	Homogène	Homogène	Homogène
Lithologie	Unique	Unique	Unique	Unique
Proportion altérée	Aucune	Totale	Faible	Forte
Distribution statistique	Normale	Log-normale	Quasi-normale	Quasi-log-normale

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](#)).

Tableau 2 : Résumé des cas théoriques complexes.

Cas complexe	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11
Population	Hétérogène	Hétérogène	Hétérogène	Hétérogène
Lithologie	Unique	Unique	Unique	Deux
Altération	Faible	Forte	Faible	Forte
Distribution statistique	Quasi-normale	Quasi-log-normale	Quasi-normale	Quasi-log-normale

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

Tableau 3: Valeur qualitative des paramètres influençant la signature d'altération.

Paramètres	Valeur qualitative des paramètres
Intensité de l'altération	Aucune : tous les échantillons sont frais.
	Faible : les échantillons sont majoritairement frais et quelques-uns sont altérés.
	Forte : les échantillons sont majoritairement altérés et quelques-uns sont frais.
	Totale : tous les échantillons sont altérés.
Homogénéité de la population	Homogène lorsque les échantillons, altérés ou non, se retrouvent tous dans les mêmes secteurs aux environs de la zone minéralisée.
	Hétérogène lorsque les échantillons altérés et frais se côtoient à l'intérieur d'un même secteur aux environs de la zone minéralisée
Distribution spatiale	Les échantillons altérés peuvent être distribués de façon symétrique ou seulement d'un côté par rapport à la zone minéralisée.
Unité lithologique	Une seule ou plusieurs unités lithologiques peuvent être altérées aux environs de la zone minéralisée.

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, 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 (**Ca**₅**P**₃)
2. Anatase (**Ti**)
3. Albite (**Na**₂**AlSi**₃)
4. Séricite (**KAl**₃**Si**₄)
5. Chlorite (**Al**₂**SiFeMg**)
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.

Tableau 4 : comparaison des méthodes.

Nom	Forme	Principe	Résultat	Avantage	Limite	Pour
Normat	Logiciel	Calcul les minéraux d'altération à partir de la composition chimique résiduelle, soustrait de la composition modélisée selon le principe de la norme	Tableau de % de minéraux normatifs Indice d'altération Perte au feu Contenu en CO ₂ Densité	Utilise seulement les éléments majeurs Facile d'utilisation Lien minéralogique Pas de précurseur	Calibré au faciès des schistes verts Calibré sur les volcanites	VMS Aurifère Autres
Ratios d'éléments	Ratio élément	Formule arithmétique en proportion d'oxyde	Valeur quantitative	Résultat unique Facile d'utilisation Pas de précurseur	Limité à quelques éléments Calibré pour VMS Fonction des volcanites	VMS Aurifère Autres
Analyse-PER	Équation Tabulateur Graphique	Diagrammes binaires de rapports molaires d'éléments mobile/incompatible	Diagrammes binaires illustrant la distribution des échantillons par rapport à des lignes de différenciation magmatique. Le niveau de divergence définit le degré d'altération. Il peut être calculé mathématiquement.	Pas de fermeture à 100% Considère variation ignée Calcul molaire Analyse minéralogique	Laborieux Roches volcaniques	VMS Aurifère Autres
Bilan de masses (1 précurseur)	Équation Tabulateur	Calcul du gain ou de la perte d'un élément à partir d'un échantillon de référence	Tableau des gains et pertes des éléments majeurs	Traitement par éléments Quantitatif Mobilité des éléments	Précurseur non-altéré Analyses de qualité Zr et Y ou AL et Ti Composition homogène Élément immobile	VMS Aurifère Autres
Bilan de masses (précurseurs multiples)	Équation Tabulateur Graphique	Calcul du gain ou de la perte d'un élément à partir d'une composition de référence modélisée selon le fractionnement igné	Tableau de variation des éléments majeurs Projection des échantillons dans des diagrammes binaires par rapport aux courbes de fractionnement	Traitement par éléments Quantitatif Mobilité des éléments Délimiter une zonation Pas de précurseur	Roches volcaniques Analyse de qualité Zr et Y ou Al et Ti Affinités mag. connues Élément immobile Laborieux Bonne géologie	VMS Aurifère Autres
Minéraux normatifs calculés	Tabulateur	Calcul des minéraux d'altération à partir de la composition chimique résiduelle, soustrait de la composition modélisée selon le principe de la norme	Tableau de % de minéraux normatifs	Majeurs seulement Facile d'utilisation Lien minéralogique	Schistes verts	VMS Aurifère Autres

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.

Tableau 5 : Caractéristiques géologiques des quatre banques de données.

	Mine Bell-Allard	Propriété Dussault	Mine Kiena	Mine Casa Berardi
Roche hôte	Volcanites mafique à felsique Dykes gabbroïques	Amphibolite Gneiss à hornblende Gneiss quartzo-feldspathique	Komatiite Basalte komatiitique et tholéitique Intrusions porphyriques quartzo-feldspathique	Basalte tholéitique Conglomérat Sandstone Shale
Minerais	Zn-Cu-Ag-Au	Zn-Cu-Pb-Ag-Au	Au	Au
Type de gisement	Lentilles de sulfures massifs et Cheminée minéralisée	Sulfures massifs à disséminés formant des lentilles parallèles aux couches	Sulfures disséminés dans des zones altérées et bréchifiées	Veines et lentilles de quartz-carbonate
Faciès métamorphique	Schiste vert	Amphibolite	Schiste vert	Schiste vert
Minéraux d'altération	Talc, chlorite, séricite	Grenat, sillimanite, cordiérite, anthophyllite	Quartz, albite, carbonates	Quartz, carbonates
Type de dépôt	VMS	VMS-SEDEX	Intrusion	Au-orogénique

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.

Tableau 6 : Paramètres de traitement pour le calcul des bilans de masse.

	Mine Bell-Allard	Propriété Dussault	Mine Kiena	Mine Casa Berardi
Nombre d'échantillons	916	673	1228	2076
Méthode utilisée	Précurseurs multiples (2 groupes de roches)	Précurseurs multiples (2 groupes de roches)	Précurseurs multiples (1 groupe de roches) Précurseur unique	Précurseurs multiples (1 groupe de roches)
Approche de modélisation du ou des précurseur(s)	Échantillons frais avec l'utilisation de PAF et A.I.	Méthode inverse	Théorique (précurseurs multiples) Statistique (précurseur unique)	Méthode inverse
Affiliation du groupe de roche	Composition TiO ₂	Composition TiO ₂	Lithologique	Lithologique

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 cherteuse (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 Wabassee, 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 tholéitique (Sharpe, 1968). Le Groupe de Wabassee se compose essentiellement de roches volcaniques mafiques d'affinité principalement tholéitique mais également, en moindre proportion, d'affinité calco-alkaline. 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).

Tableau 7 : Équations des courbes de fractionnement modélisées pour les groupes 1 et 2.

Groupe 1	Groupe 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](#).

Tableau 8 : comparaison des superficies des halos d'altération obtenus par l'utilisation de différents indices.

	Cheminée (km ²)	Toit (km ²)	Total (km ²)	Ratio
Bilan de masses	0,07	0,00	0,07	3 fois
Normat pour la densité	0,08	0,06	0,14	7 fois
Quartz calculé	0,07	0,03	0,10	5 fois
Indice d'altération d'Ishikawa	0,07	0,01	0,08	4 fois
Normat pour I-Ser	0,06	0,05	0,11	6 fois

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 Lapeyrère. 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 chalcopyrite 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 calculés. 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:

Tableau 9 : Équations des courbes de fractionnement modélisées des roches felsiques et des roches mafiques.

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

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'amoindrir 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 et al., 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 et al., 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.

Tableau 10 : Équations des courbes de fractionnement modélisées pour les volcanites et les sédiments.

Volcanites		
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.

Tableau 11 : Équations des courbes de fractionnement modélisées des komatiites et des volcanites.

Groupe 1 : komatiites	Groupe 2 : volcanites
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.

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.

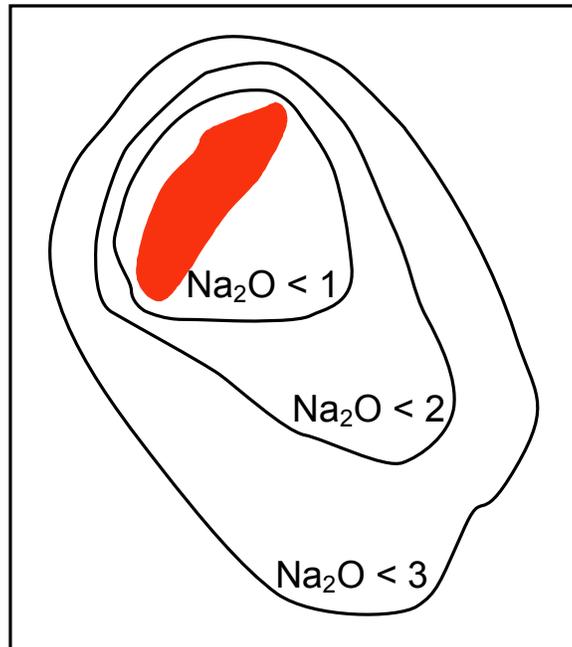


Figure 1: Les isocontours relatifs sont tracés en fonction des valeurs analytiques de Na_2O des échantillons. La zone minéralisée (rouge) se trouve au centre des isocontours. [Retour au texte.](#)

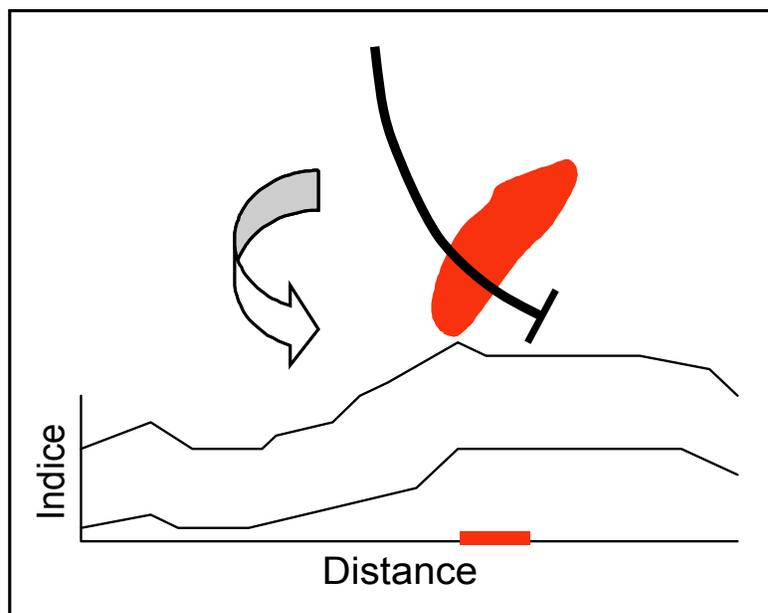


Figure 2: Deux profils de l'altération mesurée par rapport à deux indices sont représentés graphiquement. La zone minéralisée et sa projection sur le profil apparaissent en rouge et le profil du forage qui recoupe la zone minéralisée apparaît en noir. [Retour au texte.](#)

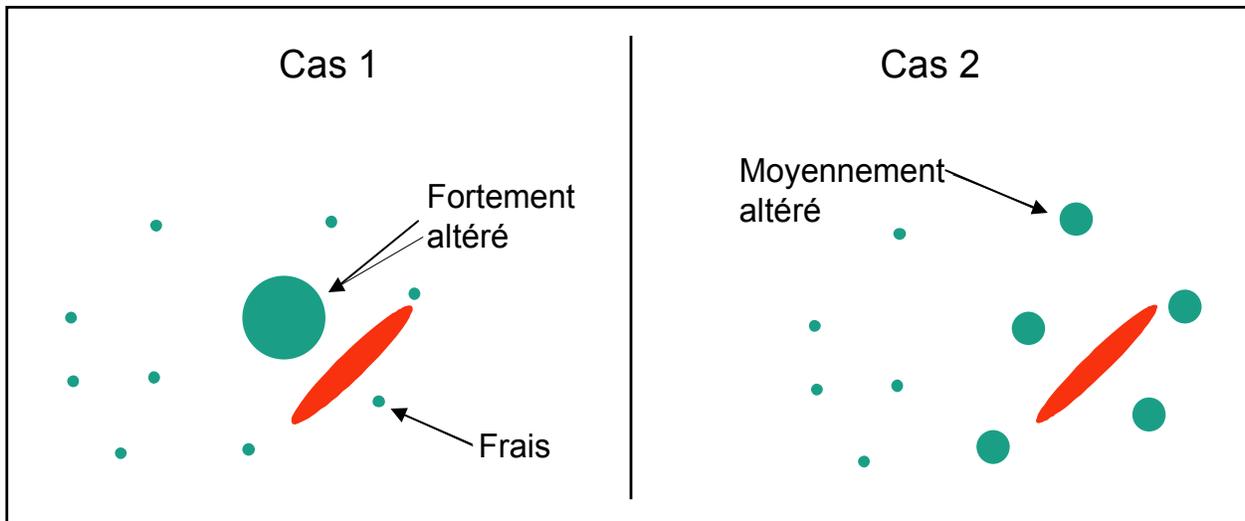


Figure 3: Les cas 1 et 2 permettent de visualiser l'hétérogénéité de l'altération hydrothermale. La zone minéralisée est rouge et les échantillons sont verts. Plus le cercle est grand, plus l'altération est intense. [Retour au texte](#).

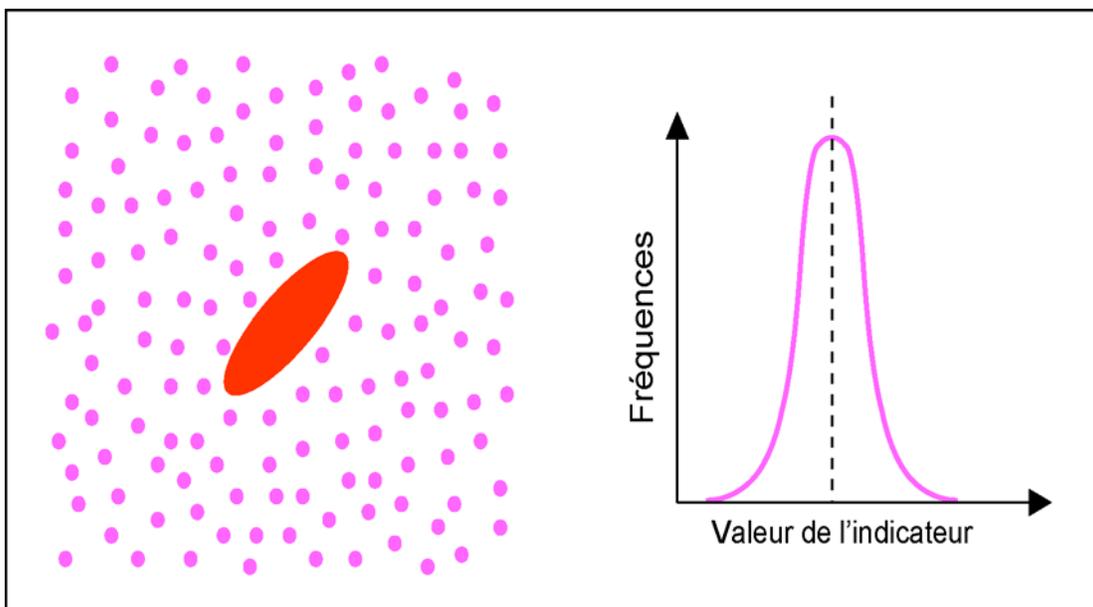


Figure 4: Distribution normale des échantillons frais sur un graphique des fréquences en fonction de la valeur de l'indicateur d'altération. La figure (gauche) montre la zone minéralisée en rouge et les échantillons frais en rose. La ligne pointillée correspond au mode statistique. [Retour au texte](#).

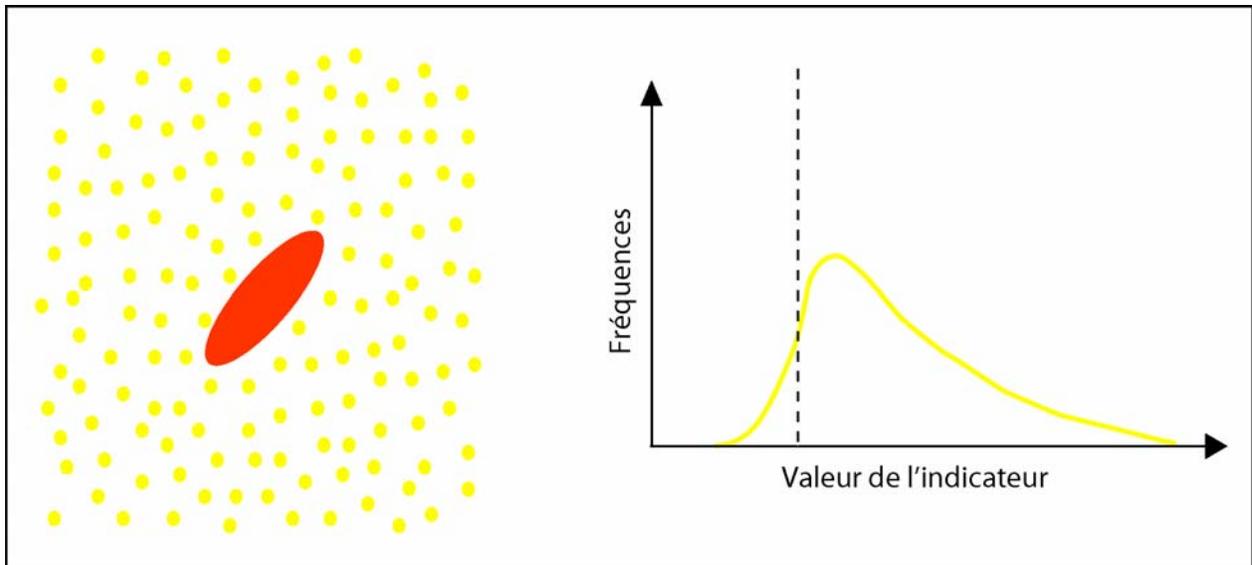


Figure 5: Distribution log-normale des échantillons altérés sur un graphique des fréquences en fonction de la valeur de l'indicateur d'altération. La figure (gauche) montre la zone minéralisée en rouge et les échantillons altérés en jaune. La ligne pointillée représente le mode statistique mesuré à partir d'échantillons frais. [Retour au texte.](#)

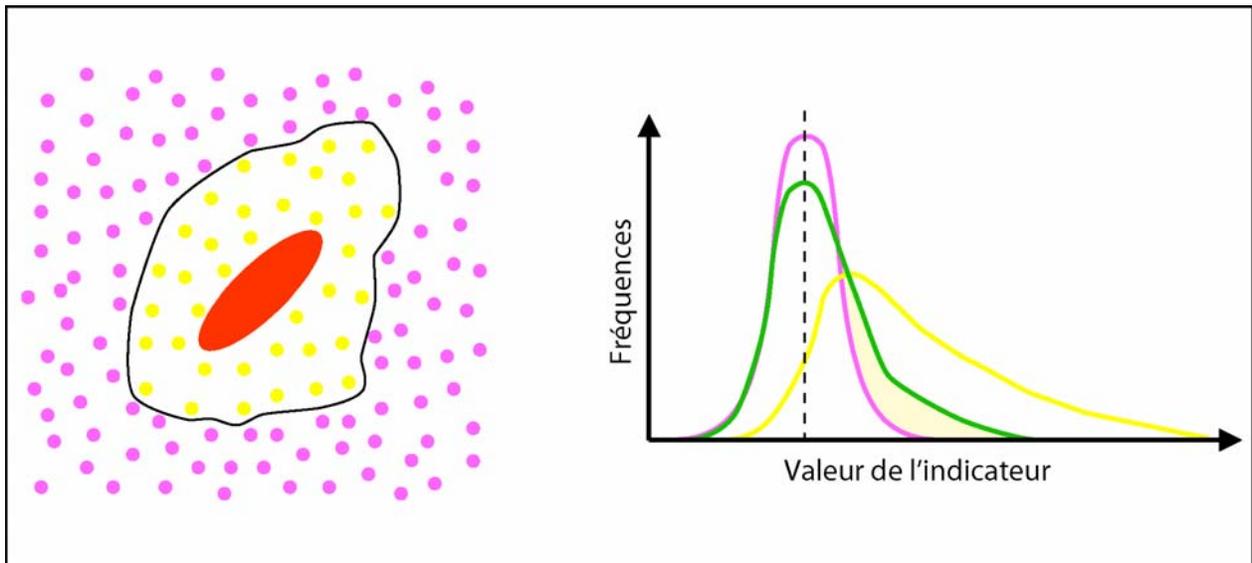


Figure 6: Distribution quasi-normale (courbe verte : somme des échantillons altérés et frais) correspondant au cas illustré à gauche (zone minéralisée entourée d'échantillons altérés, eux-mêmes entourés d'échantillons frais). La légende utilisée est la même que celle des figures 4 et 5. Le mode de la population totale est la meilleure estimation de la composition de la roche fraîche. [Retour au texte.](#)

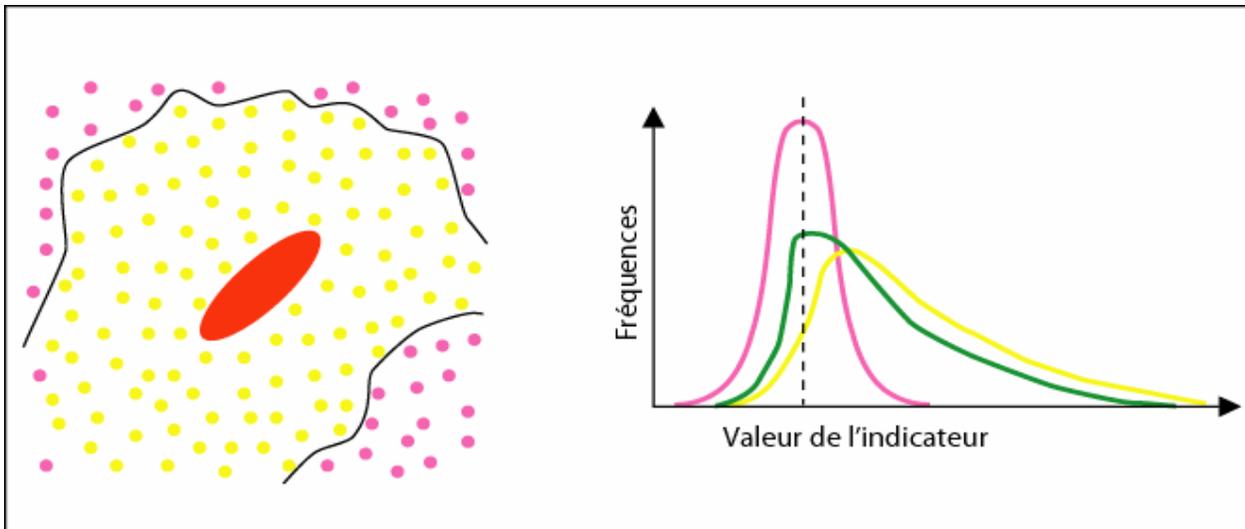


Figure 7: Distribution quasi-log-normale (courbe verte) correspondant au cas illustré à gauche (zone minéralisée entourée d'un grand nombre d'échantillons altérés, eux-mêmes entourés d'échantillons frais). La légende utilisée est la même que celle des figures 4 et 5. [Retour au texte](#).

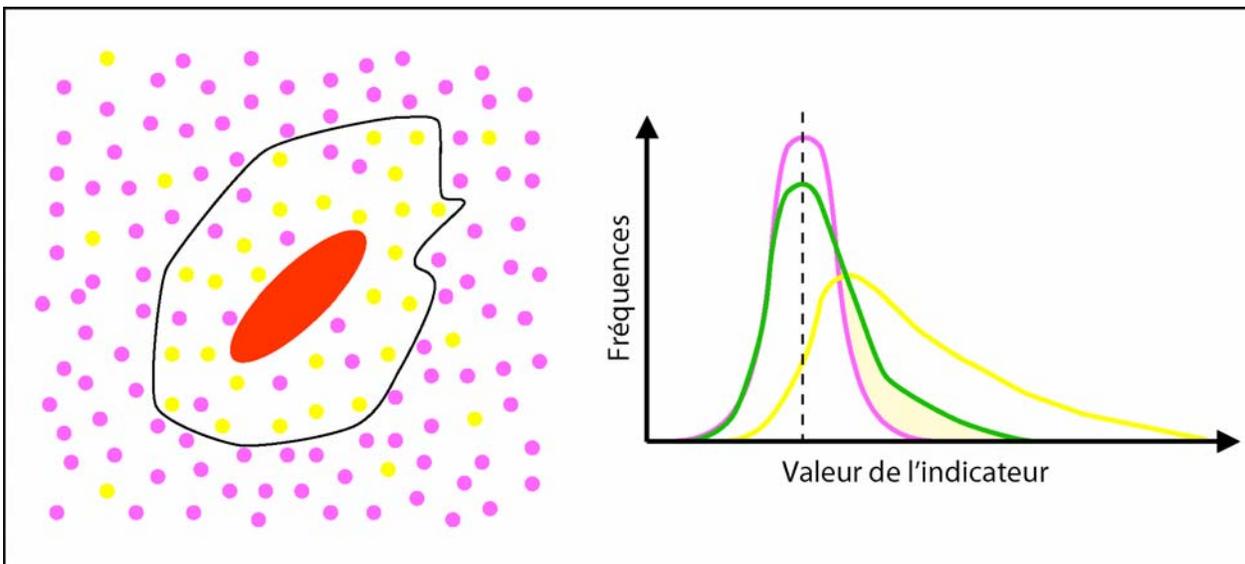


Figure 8: Distribution quasi-normale (courbe verte) correspondant au cas illustré à gauche (zone minéralisée entourée d'un mélange d'échantillons altérés et frais). La légende utilisée est la même que celle des figures 4 et 5. [Retour au texte](#).

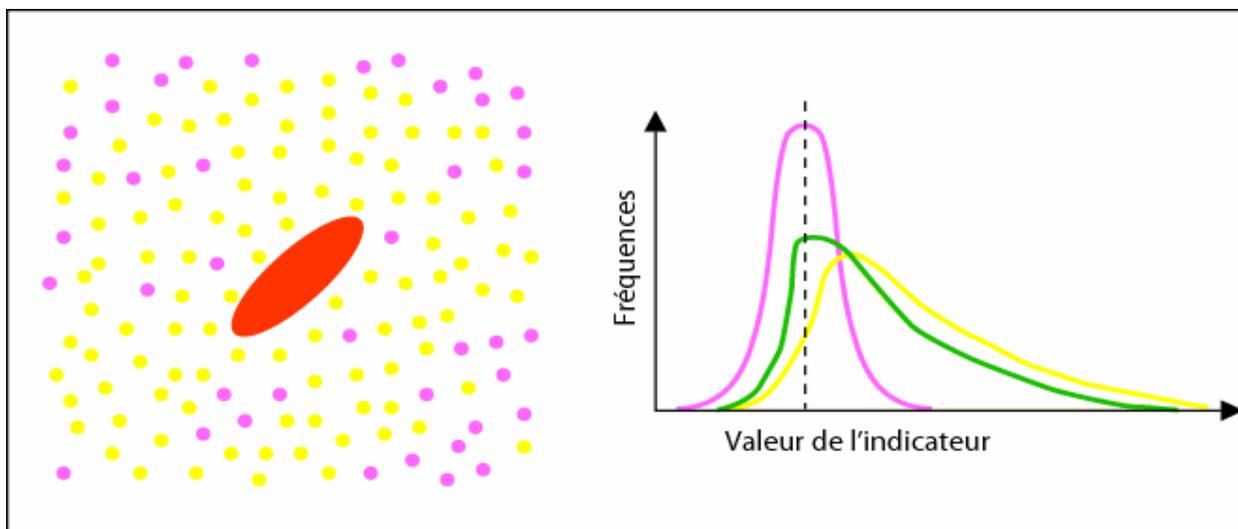


Figure 9: Distribution quasi-log-normale (courbe verte) correspondant au cas illustré à gauche (zone minéralisée entourée d'un mélange composé principalement d'échantillons altérés et d'un peu d'échantillons frais). La légende utilisée est la même que celle des figures 4 et 5. [Retour au texte](#).

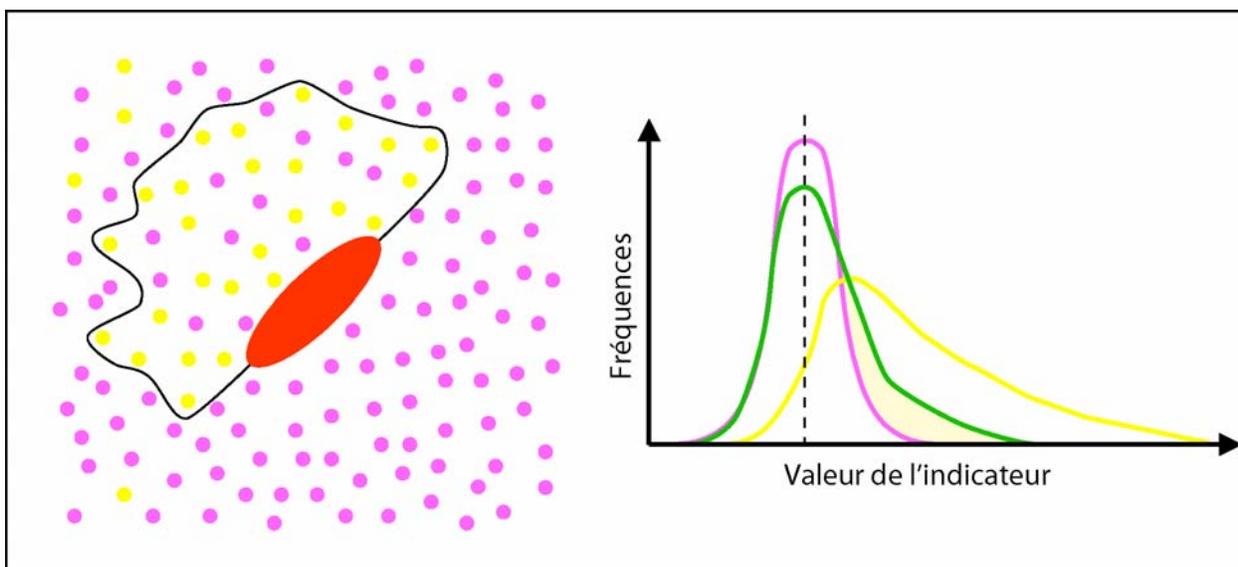


Figure 10: Distribution quasi-normale (courbe verte) correspondant au cas illustré à gauche (zone minéralisée bordée d'un côté par un mélange d'échantillons altérés et frais et, de l'autre côté, uniquement par des échantillons frais). La légende utilisée est la même que celle des figures 4 et 5. [Retour au texte](#).

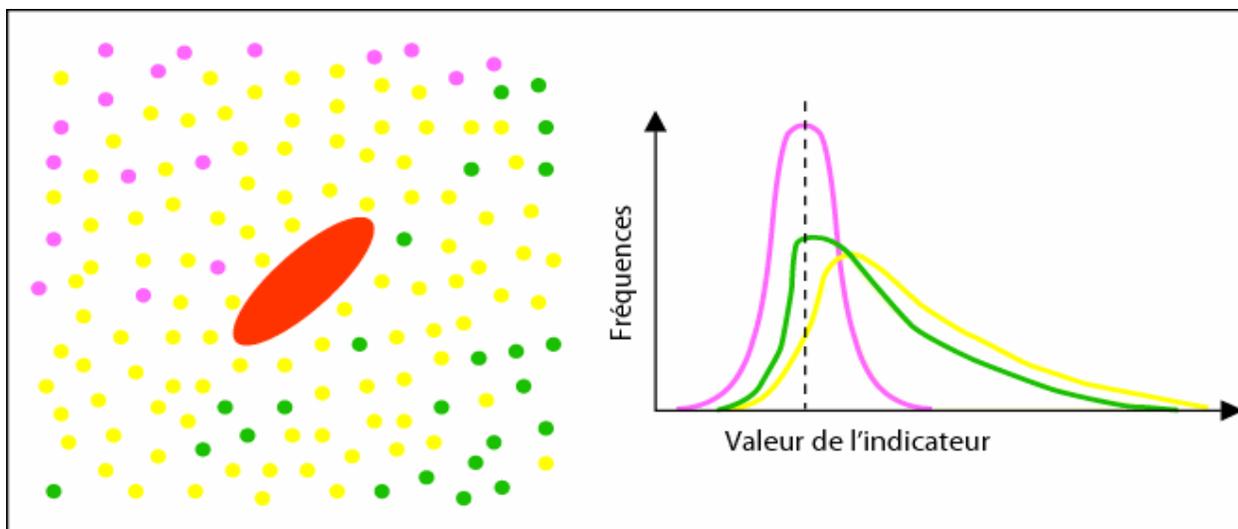


Figure 11: Distribution quasi-log-normale (courbe verte) correspondant au cas illustré à gauche (zone minéralisée bordée d'un côté par un mélange d'échantillons altérés et frais et, de l'autre côté, uniquement par des échantillons frais). Les échantillons frais sont représentés par des points roses et verts. La légende utilisée est la même que celle des figures 4 et 5. [Retour au texte.](#)

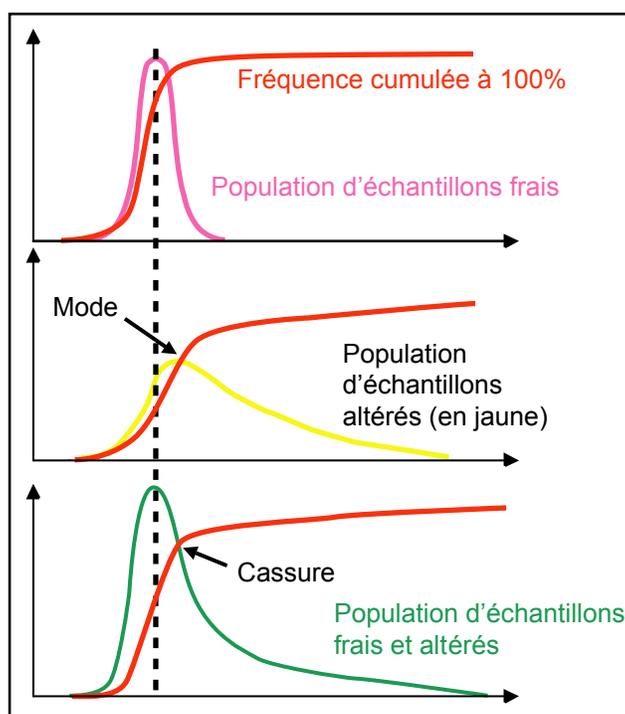


Figure 12: Le seuil est déterminé en combinant la cassure de la courbe des fréquences cumulées pour la population totale (diagramme du bas) et le mode de la population d'échantillons altérés (diagramme du centre). Le diagramme du haut considère seulement les échantillons frais, celui du milieu seulement les échantillons altérés et celui du bas la totalité des échantillons. [Retour au texte.](#)

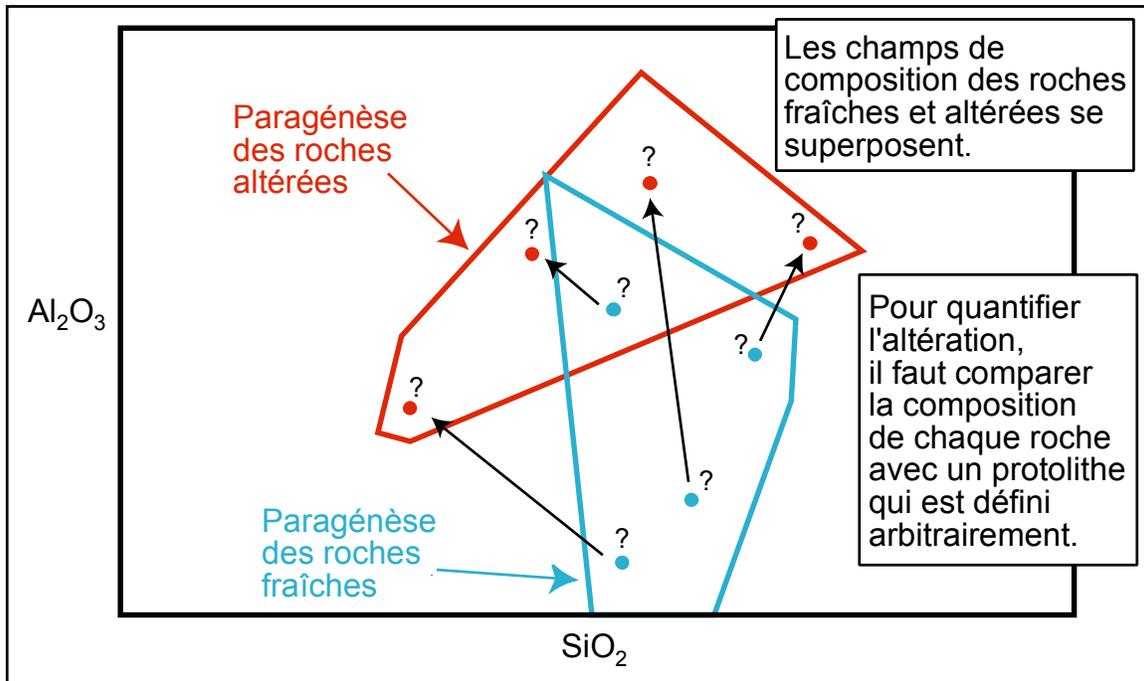


Figure 13: Visualisation de la superposition des champs des roches fraîches et altérées. Tirée Piché et Descarreaux 2000. [Retour au texte.](#)

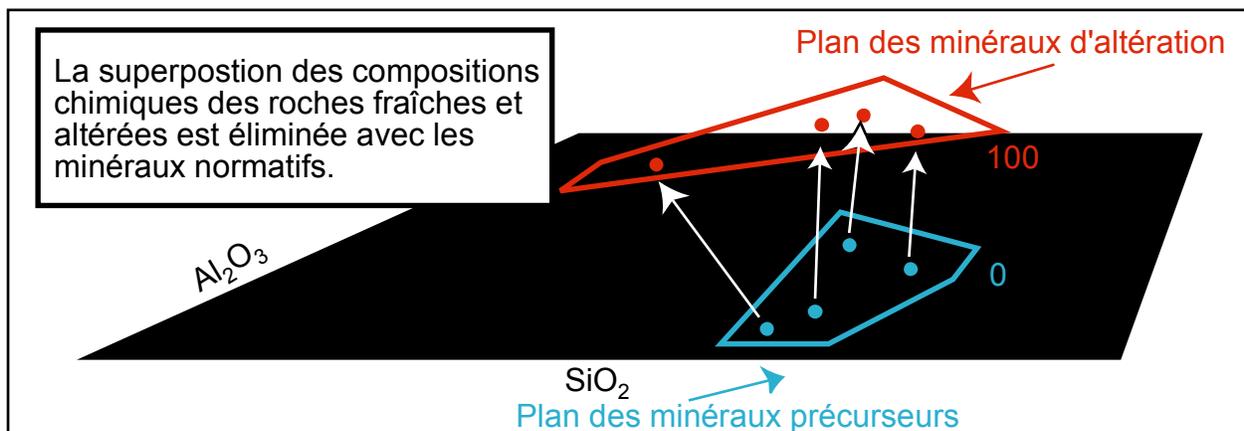


Figure 14: Par le calcul des minéraux normatifs, les plans de référence des roches fraîches et altérées sont différents et la superposition est éliminée. Tirée de Piché et Descarreaux 2000. [Retour au texte.](#)

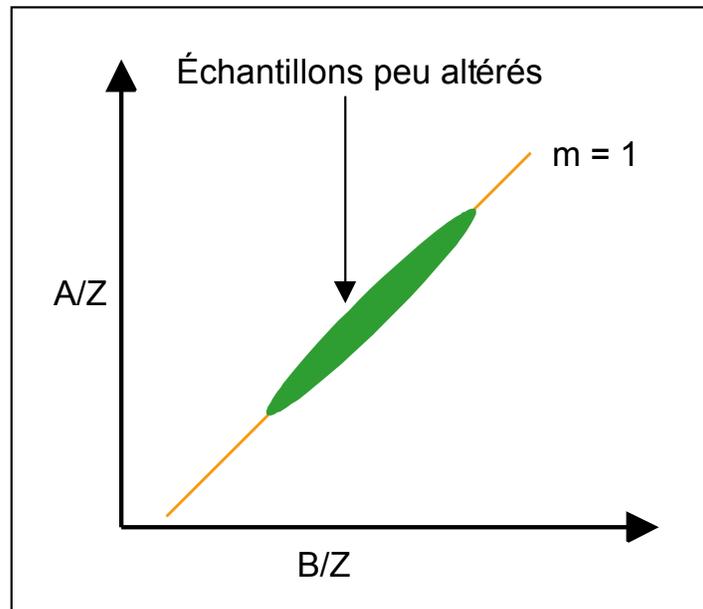


Figure 15: Les échantillons peu altérés sont distribués suivant une droite de pente « m » égale à 1. [Retour au texte.](#)

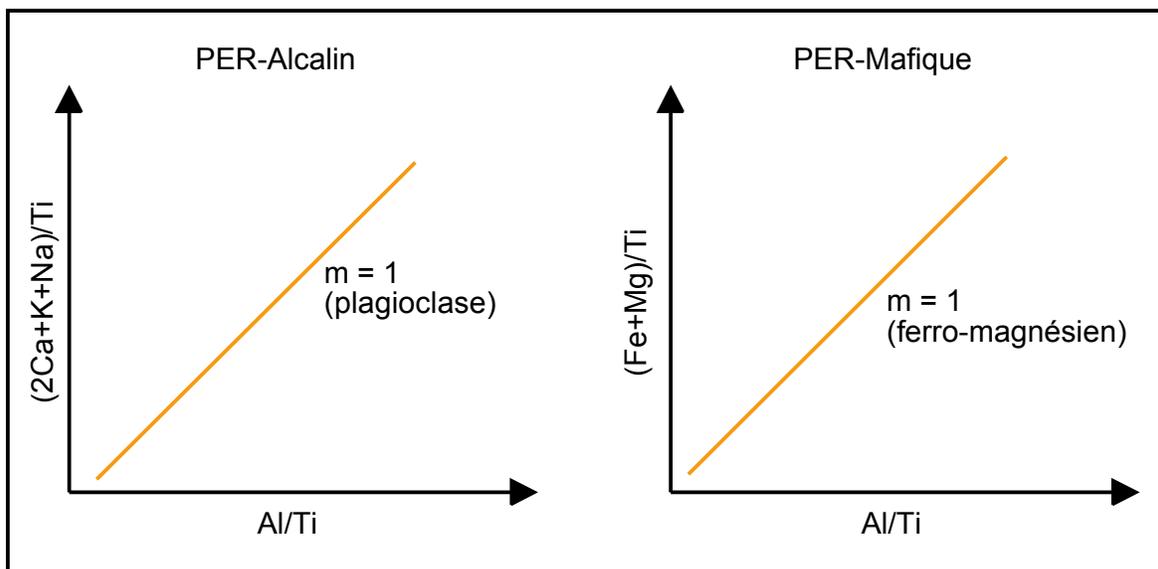


Figure 16: Graphiques des droites modèles pour les feldspaths, à gauche, et les minéraux mafiques, à droite. [Retour au texte.](#)

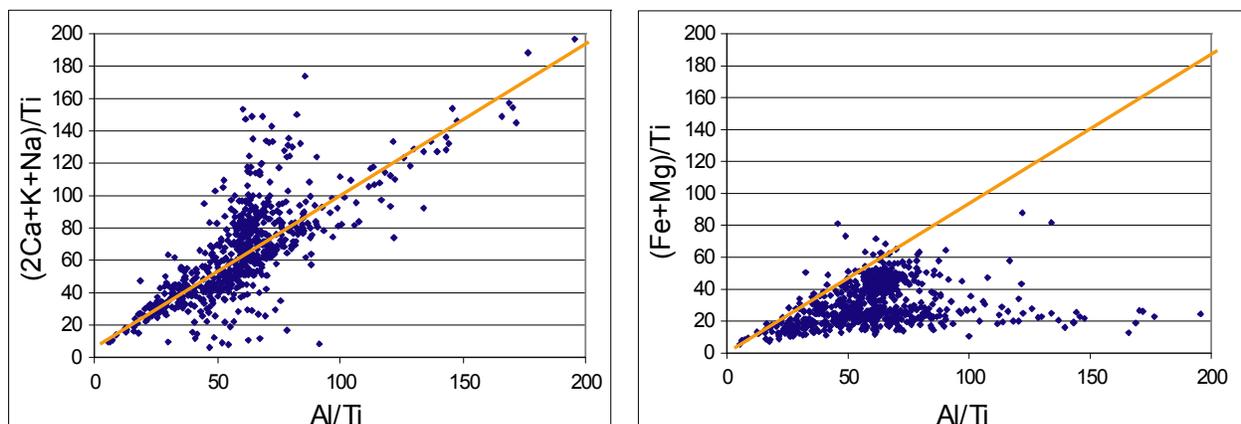


Figure 17: Deux exemples réalisés à partir de la banque de données des échantillons de Dussault. [Retour au texte](#).

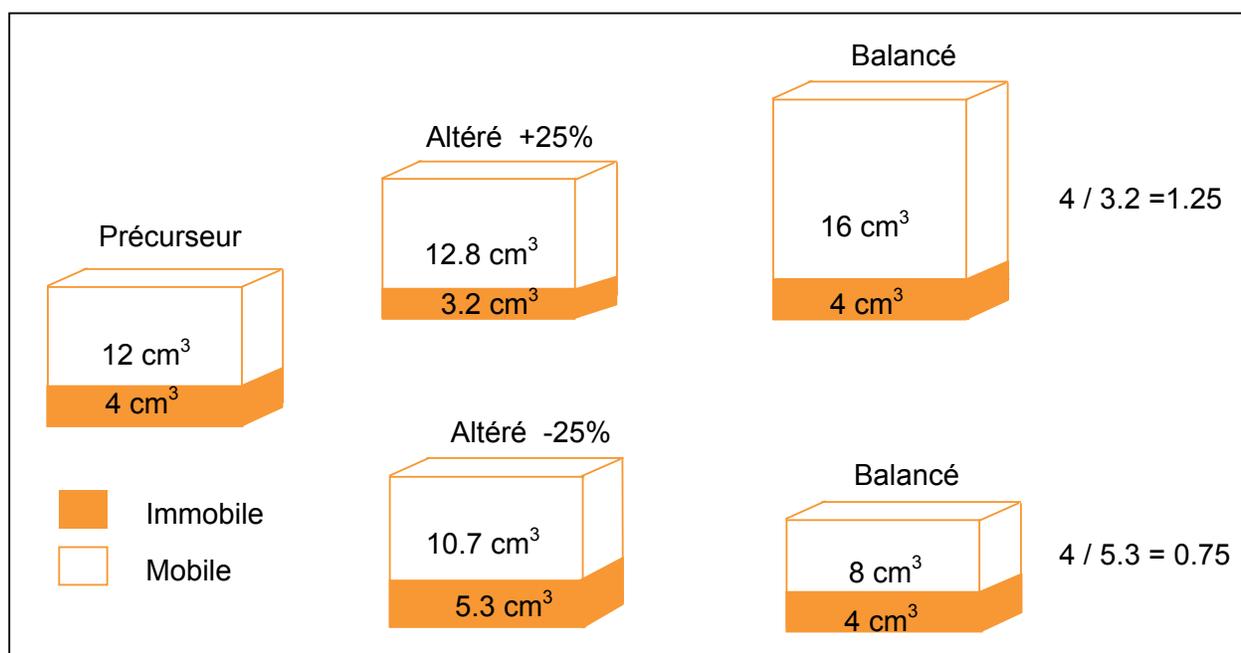


Figure 18: Exemple de gain et perte d'éléments mobiles par la méthode du Bilan de masses. Le précurseur possède 4 cm³ d'éléments immobiles et 12 cm³ d'éléments mobiles pour un total de 16 cm³ pour l'échantillon analysé. Si la même quantité de matériel est analysée, soit 16 cm³, et que les résultats d'analyses donnent 3,2 cm³ d'éléments immobiles et 12,8 cm³ d'éléments mobiles, il y a forcément un gain d'éléments mobiles se traduisant par un gain et une diminution de masse pour les éléments immobiles. C'est ce qui est démontré par l'équation balancée où la masse d'éléments immobiles analysés est ramenée à 4 cm³ pour permettre la comparaison avec le précurseur. Un gain de 25% d'éléments mobiles est obtenu par l'équation balancée (modifiée de Leitch et Lentz, 1994). La même démarche permet d'observer une perte de masse. [Retour au texte](#).

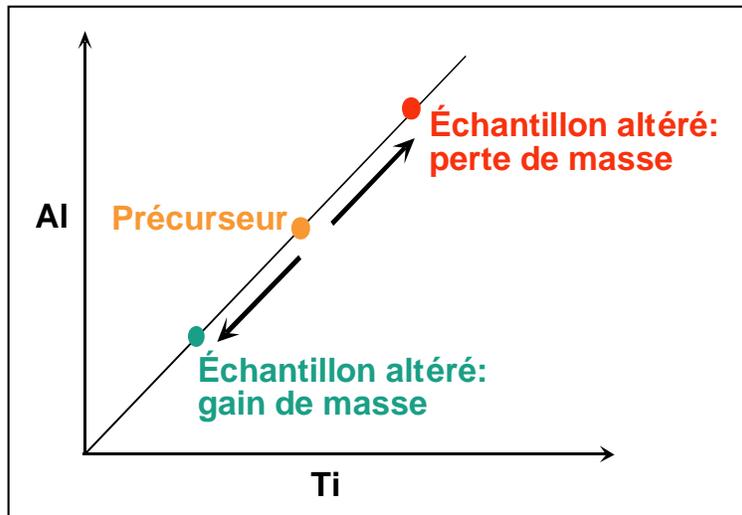


Figure 19: Distribution d'éléments immobiles, Al en fonction de Ti, où le précurseur est déterminé. Les échantillons altérés ayant subi une perte ou un gain de masse sont distribués sur la droite résultante (appelée droite d'altération) du rapport Al/Ti qui passe par l'origine. [Retour au texte.](#)

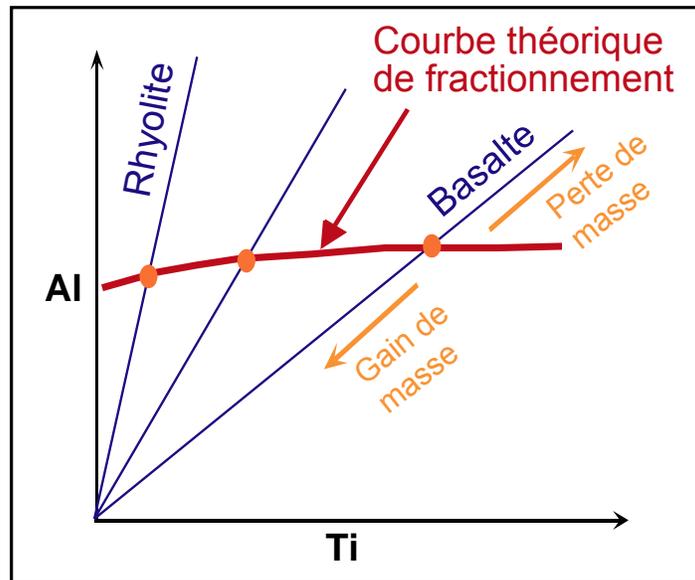


Figure 20: La courbe théorique de fractionnement modélise la composition des précurseurs suivant une suite de roches (plusieurs droites d'altération pour des précurseurs multiples). [Retour au texte.](#)

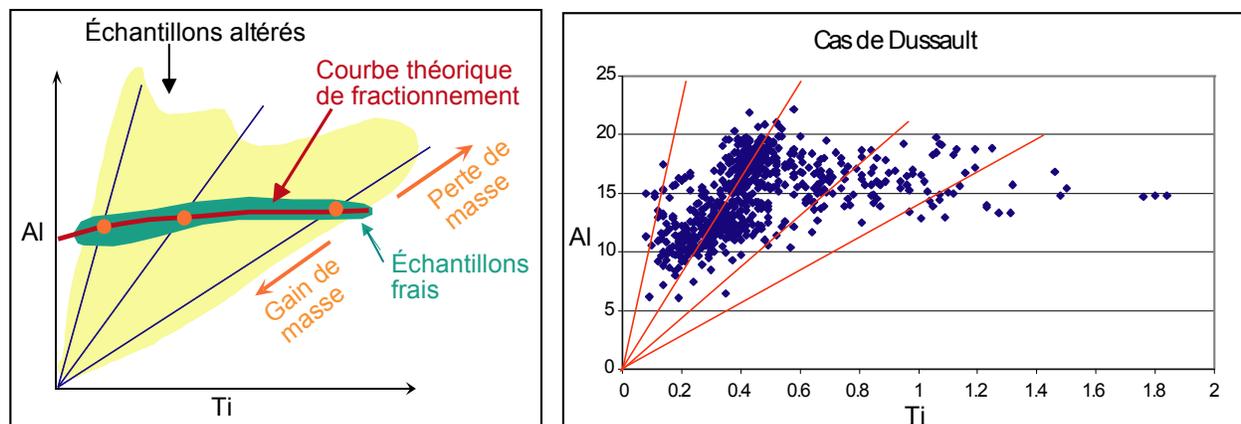


Figure 21: Distribution en éventail des échantillons altérés. Le diagramme de gauche montre l'étendu théorique que peut prendre une distribution en éventail des échantillons altérés (en jaune) sur un diagramme Al/Ti. Le diagramme de droite est un exemple de distribution en éventail obtenue par la mise en graphique des données de la banque de Dussault. La courbe de fractionnement n'est pas modélisée. Les quatre droites d'altération passant par l'origine correspondent aux groupes de roches faisant partie de la même suite et elles ont été déterminées à partir de la distribution en éventail des échantillons de la banque de données. [Retour au texte](#).

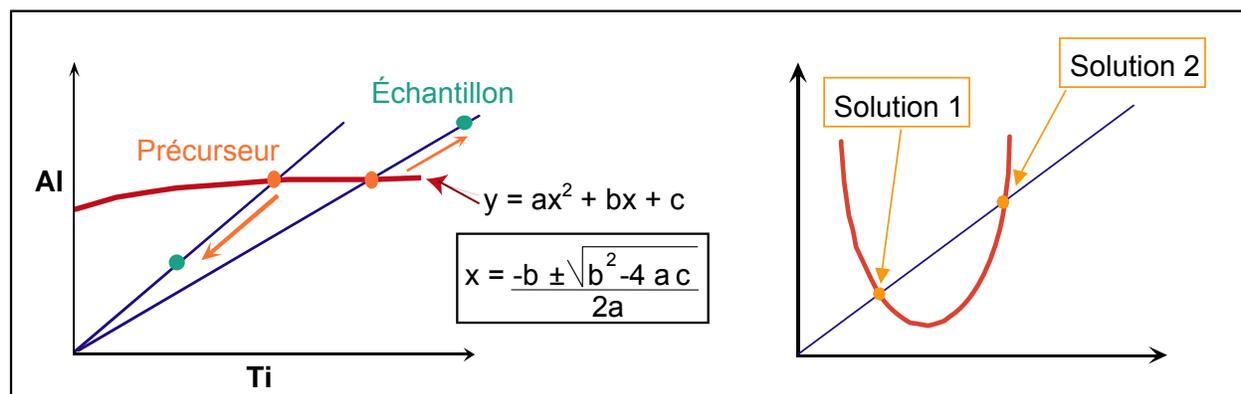


Figure 22: Détermination de la composition des éléments immobiles des précurseurs. Pour chaque échantillon, il faut calculer l'intersection entre la ligne d'altération (droites bleues) et la courbe de différenciation magmatique (courbe rouge). Le graphique de droite montre un exemple qui ne correspond pas au cas illustré sur le graphique de gauche mais qui permet de visualiser les deux solutions générées par le croisement d'une droite et d'une parabole. L'équation quadratique génère deux solutions dont une n'est pas réaliste, elle doit être rejetée. [Retour au texte](#).

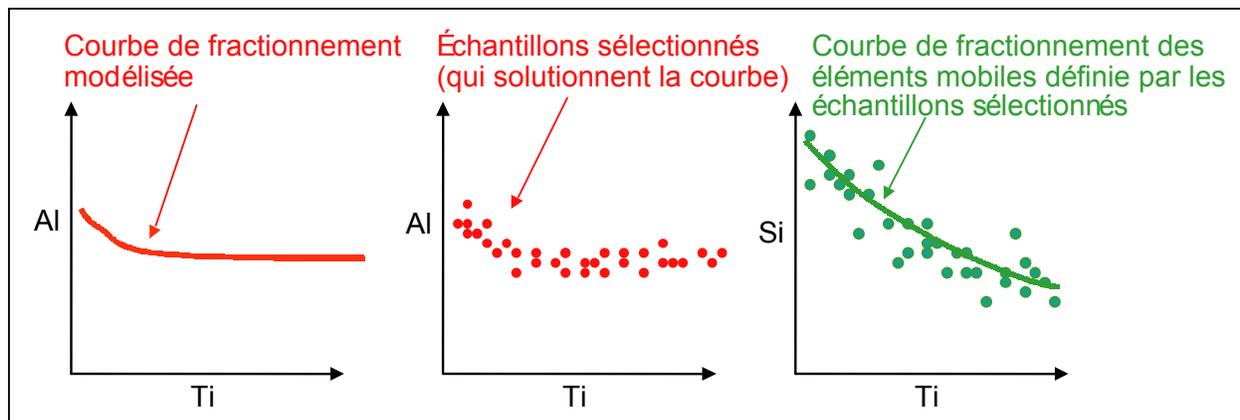


Figure 23: La courbe d'éléments immobiles Al/Ti est modélisée (diagramme de gauche) et les échantillons situés sur cette courbe sont sélectionnés et isolés (diagramme du centre). Ces échantillons sont ensuite utilisés pour définir les courbes d'éléments mobiles (par exemple Si/Ti) des précurseurs (diagramme de droite). [Retour au texte](#).

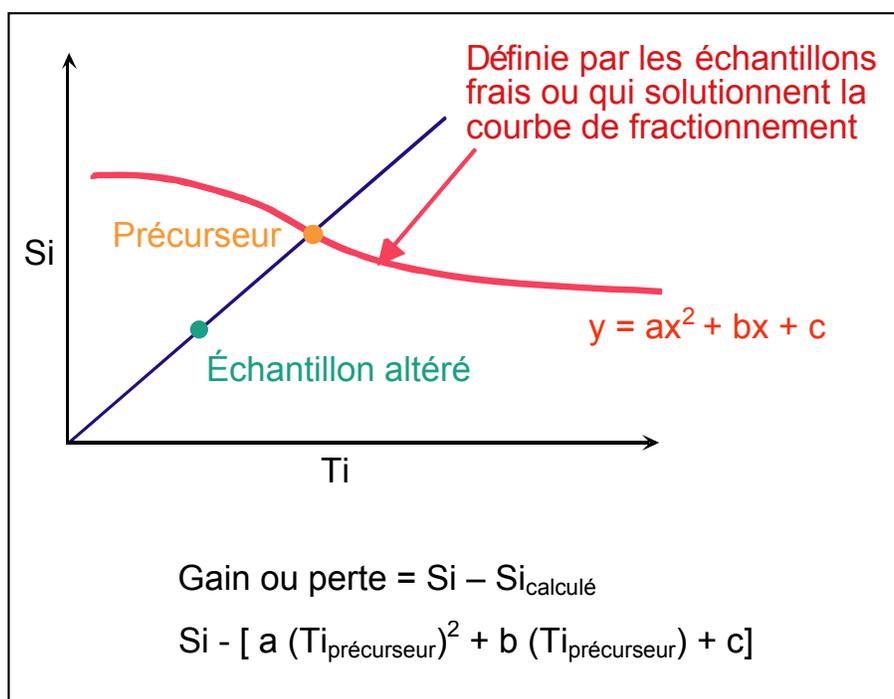


Figure 24: La courbe de fractionnement des précurseurs permet de calculer, pour chaque échantillon altéré, s'il y a eu gain ou perte de masse. [Retour au texte](#).

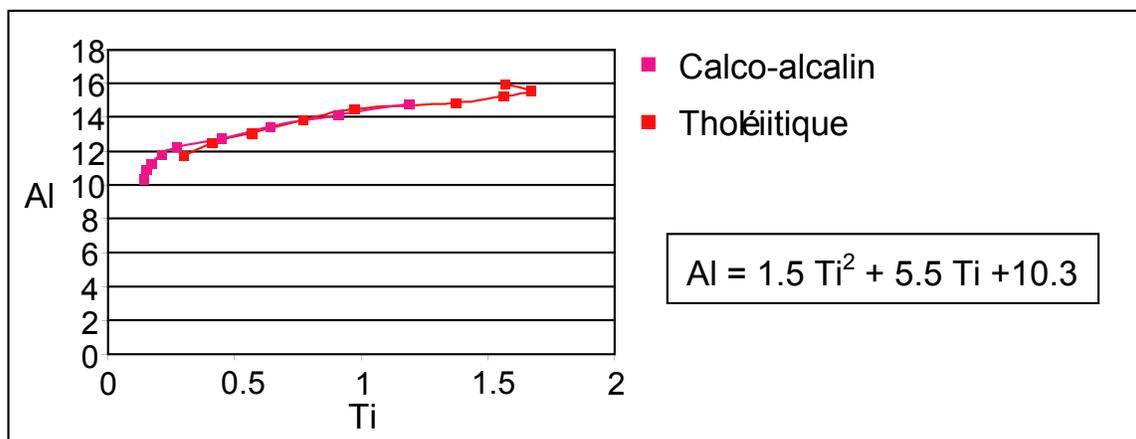


Figure 25: Exemple de la définition de l'équation générale pour les roches d'affinité tholéitique à calco-alcaline (données de Cattalani et al., 1993). [Retour au texte](#).

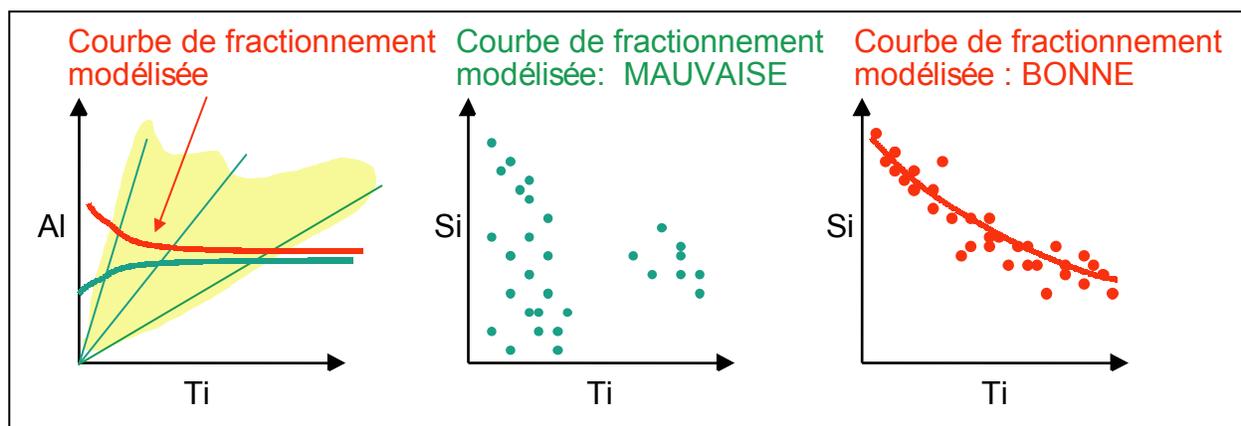


Figure 26: Le diagramme de gauche montre deux courbes « test » de fractionnement qui ont été modélisées. La courbe verte ne correspond pas aux précurseurs étant donné que lorsque les échantillons sont utilisés dans le diagramme Si/Ti, il n'est pas possible de tracer une courbe cohérente (diagramme du centre). Par contre, la courbe rouge correspond à une courbe cohérente lorsque les échantillons sont utilisés dans le diagramme Si/Ti (diagramme de droite). [Retour au texte](#).

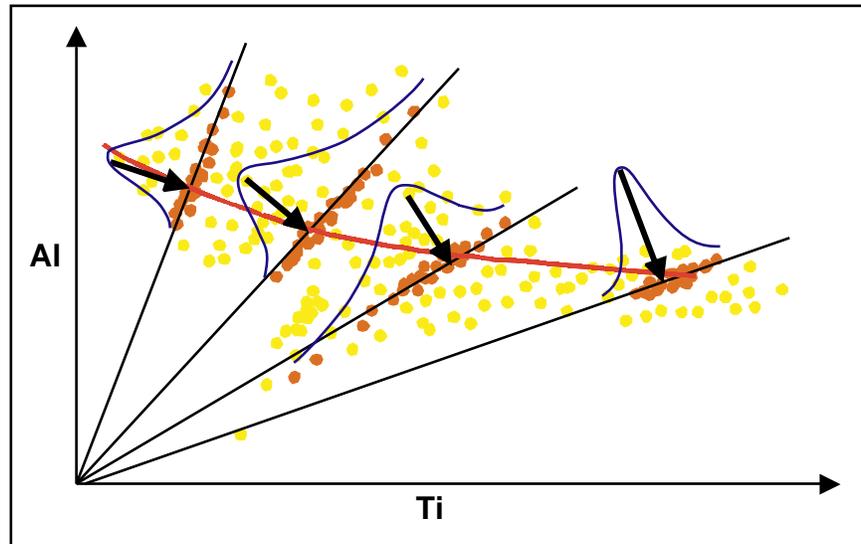


Figure 27: Amélioration de la méthode de Bilan de masses relatif. La distribution statistique des échantillons correspondant aux droites d'altération est représentée en bleu et le mode de chacune des courbes est indiqué par les flèches noires. La courbe de fractionnement passe par le mode de chaque droite. [Retour au texte](#).

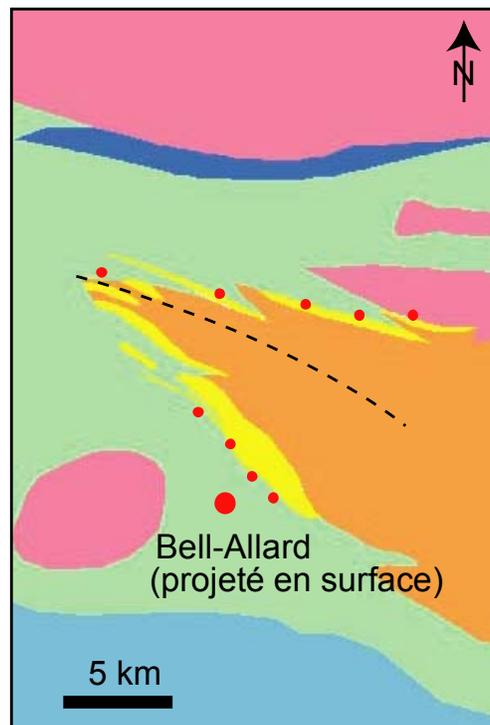


Figure 28: Géologie régionale simplifiée du camp minier de Matagami fournie par Noranda. Les petits points rouges représentent la projection en surface des gisements de Zn-Cu alors que le gros point rouge correspond à la mine Bell-Allard. Le Groupe du Lac Watson est de couleur jaune, le Groupe de Wabasseé est de couleur vert, et le complexe anorthositique de la rivière Bell est coloré en orangé. [Retour au texte](#).

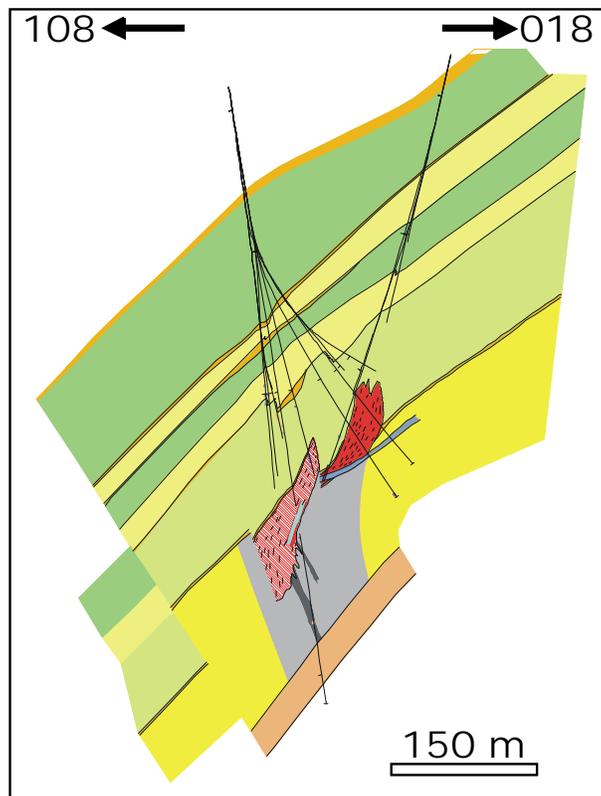


Figure 29: Vue en coupe de la lentille principale du gisement Bell-Allard. La lentille est en rouge et la zone de cheminée minéralisée en gris. La lentille est à environ 1000 m de la surface. Section modifiée de Noranda. [Retour au texte](#).

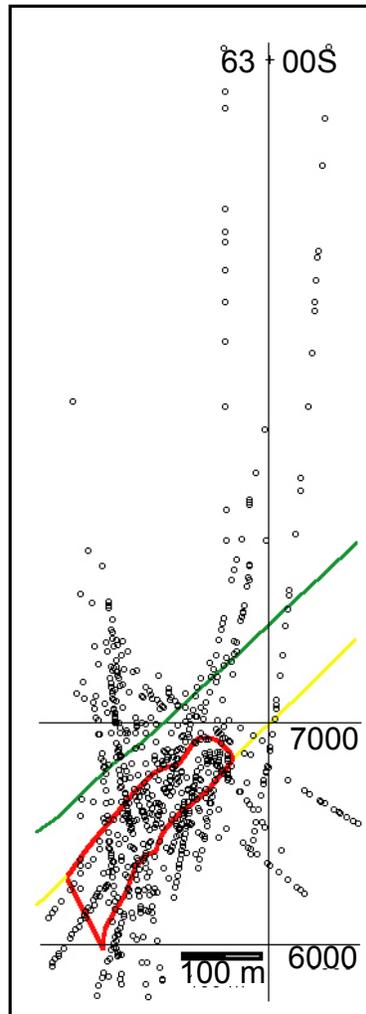


Figure 30: Projection des échantillons de la banque de données autour de la zone minéralisée. La forme et la dimension de la lentille de minerai (en rouge) résultent de la compilation des 9 sections individuelles soumises par Noranda. La géométrie et les dimensions représentant la lentille sont donc maximales. La ligne jaune représente le contact de la rhyolite à la base de la lentille minéralisée (footwall). La ligne verte représente le contact sommital de l'unité de basalte qui surmonte la lentille (cap rock). Compte tenu de l'aspect asymétrique de la minéralisation (lentille concordante et cheminée discordante), l'étude a été réalisée uniquement en section. [Retour au texte](#).

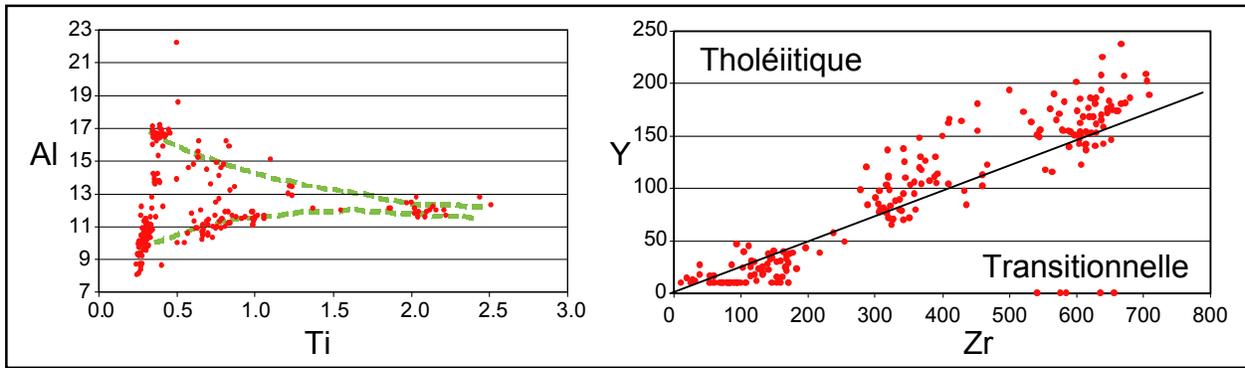


Figure 31: La répartition des échantillons suggère la présence de deux tendances de différenciation magmatique, représentées par les lignes pointillées vertes. Le diagramme binaire de gauche Al/Ti est fait à partir des échantillons peu altérés. Le diagramme binaire Y/Zr indique que les échantillons sont d'affinité tholéitique à transitionnelle. [Retour au texte.](#)

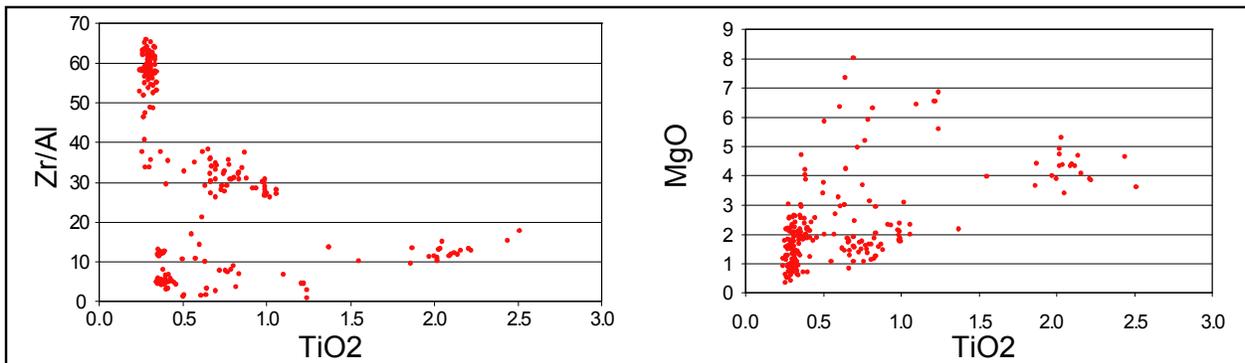


Figure 32: Le diagramme binaire de Zr/Al versus Ti (gauche) montre l'existence de plusieurs groupements de roches qui sont difficiles à intégrer au sein d'une même suite magmatique. Le diagramme binaire de droite, MgO versus Ti, montre la grande variabilité du contenu en MgO qui est également difficile à intégrer au sein d'une même suite magmatique. [Retour au texte.](#)

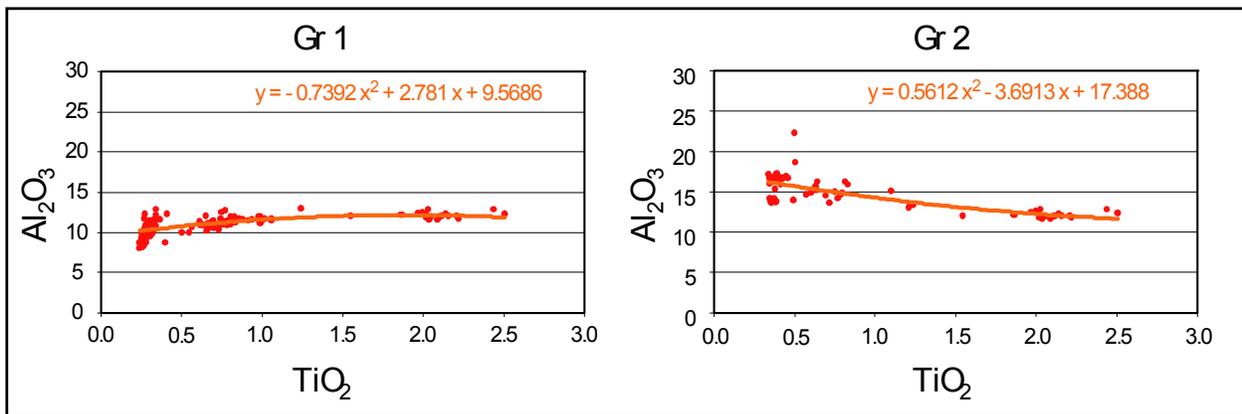


Figure 33: Les diagrammes binaires Al_2O_3 versus TiO_2 des groupes 1 (Gr1) et 2 (Gr 2) montrent leurs courbes de différenciation respectives. Les échantillons dont la teneur en TiO_2 est supérieure à 1,5% se retrouvent dans les deux groupes dans le but de générer une courbe de différenciation étendue. Pour les calculs, les échantillons dont le rapport Zr/Al est inférieur ou égal à 20 (figure 32) ont été calculés à partir de la courbe de fractionnement du Groupe 2. Tandis que ceux dont le rapport est supérieur à 20 ont été calculés par la courbe du groupe 1. [Retour au texte](#).

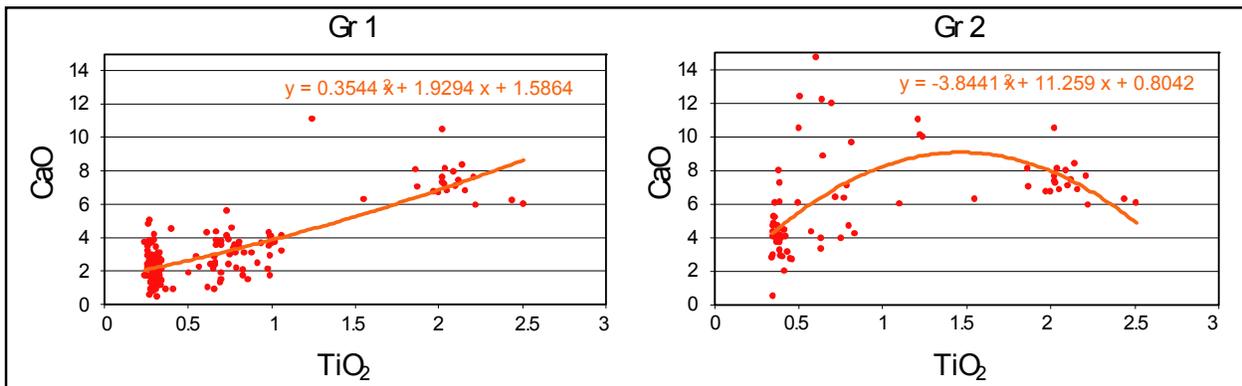


Figure 34: Les diagrammes binaires CaO versus TiO_2 des groupes 1 et 2 montrent leur courbe de différenciation respective. Les échantillons dont la teneur en TiO_2 est supérieure à 1,5% se retrouvent dans les deux groupes dans le but de générer une courbe de différenciation étendue. [Retour au texte](#).

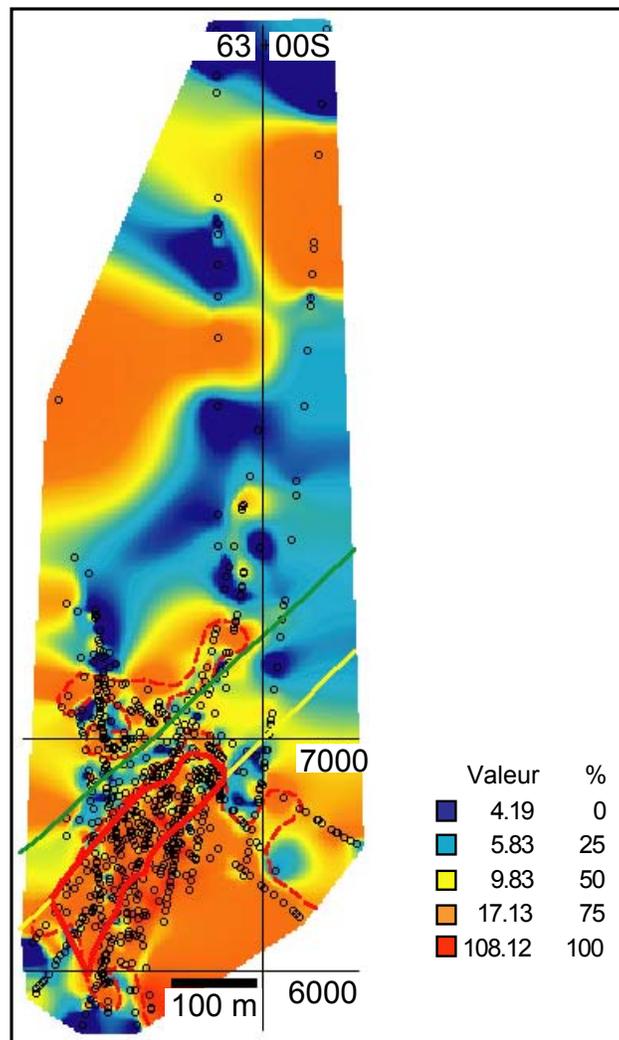


Figure 35: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode du Bilan de masses appliquée à l'indice variation. La limite du halo d'altération (ligne pointillée rouge) permet d'éliminer l'effet d'interpolation entre les échantillons trop distants. La délimitation est basée sur les échantillons dont la valeur de l'indice variation est supérieure à 17,13 (couleurs orangée et rouge). Le halo ainsi défini permet de bien visualiser la cheminée d'altération sous-jacente à la lentille. La terminaison abrupte de la signature d'altération dans la partie inférieure de la lentille est attribuable à la présence d'une faille, selon les sections de Noranda. Dans le toit, le halo d'altération est détectable localement sur 100 à 150 m au-dessus de la lentille. [Retour au texte](#).

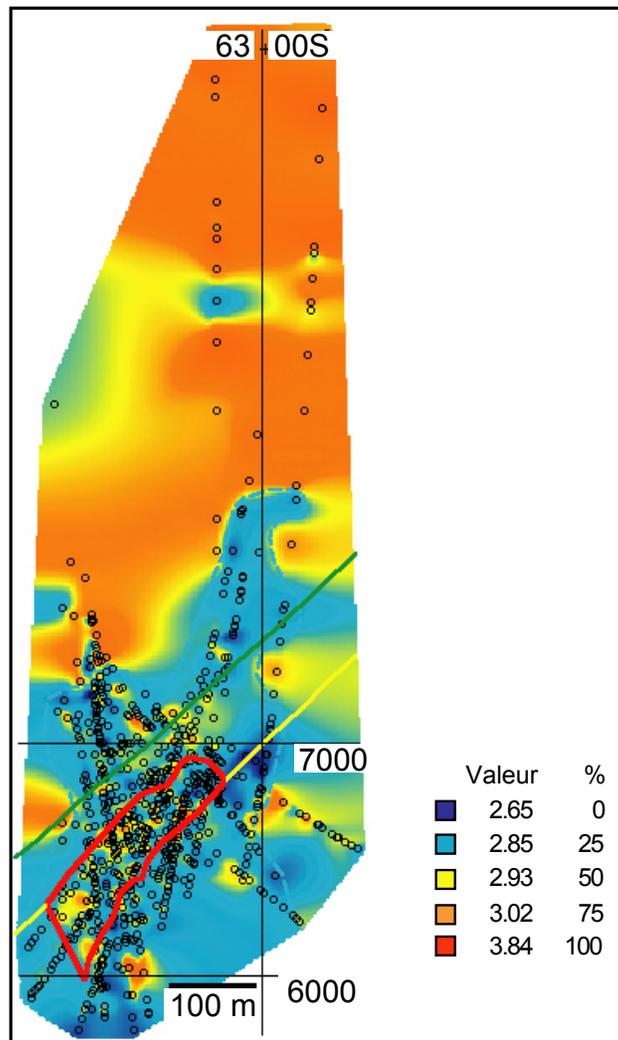


Figure 36: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode Normat appliquée à la densité. La limite du halo d'altération (ligne pointillée bleue) permet d'éliminer l'effet d'interpolation entre les échantillons trop distants. La délimitation est basée sur les échantillons dont la valeur de l'indice variation est inférieure à 2,85 (couleurs bleu pâle et bleu foncé). Le halo ainsi défini permet de bien visualiser la cheminée d'altération sous-jacente à la lentille. Dans le toit, le halo d'altération est détectable sur 200 à 400 m verticalement au-dessus de la lentille. [Retour au texte.](#)

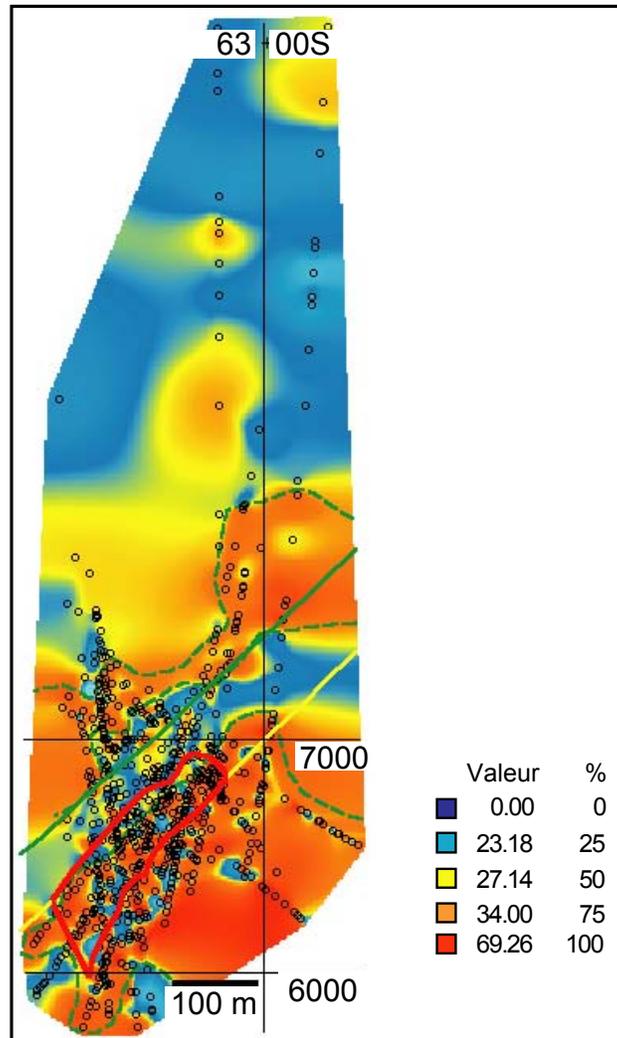


Figure 37: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode des Minéraux normatifs calculés appliquée au quartz. La limite du halo d'altération (ligne pointillée verte) permet d'éliminer l'effet d'interpolation entre les échantillons trop distants. La délimitation est basée sur les échantillons dont la valeur de l'indice variation est supérieur à 34,00 (couleurs orangée et rouge). Le halo ainsi défini permet de bien visualiser la cheminée d'altération sous-jacente à la lentille. Dans le toit, le halo d'altération est détectable sur 100 à 150 m au-dessus de la lentille. Verticalement, le halo est détectable sur 250 m au-dessus de la lentille. [Retour au texte](#).

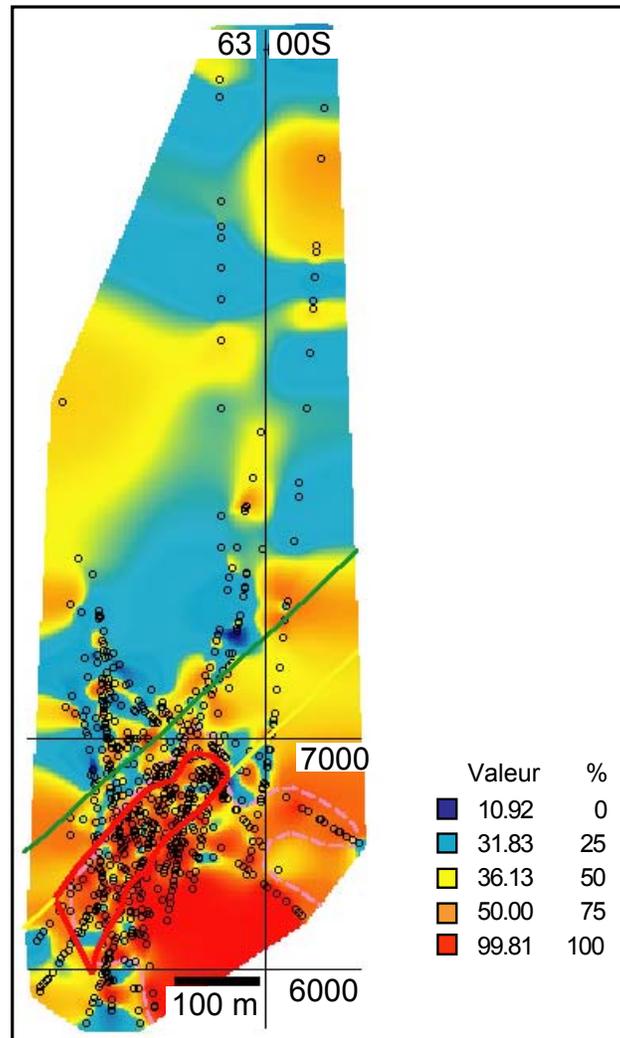


Figure 38: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode de Ratio d'éléments selon l'indice d'altération d'Ishikawa. La limite du halo d'altération (ligne pointillée rose) permet d'éliminer l'effet d'interpolation entre les échantillons trop distants. La délimitation est basée sur les échantillons dont la valeur de l'indice variation est supérieure à 50,00 (couleurs orangée et rouge). Le halo ainsi défini permet de bien visualiser la cheminée d'altération sous-jacente à la lentille. Dans le toit, le halo d'altération est faiblement détectable au-dessus de la lentille. [Retour au texte.](#)

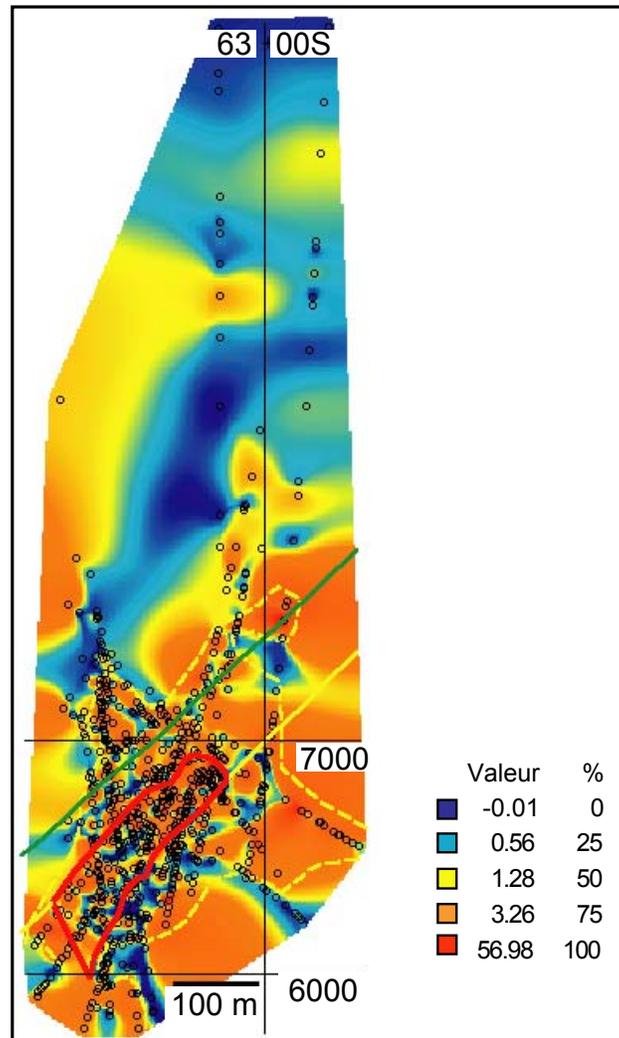


Figure 39: Halo d'altération déterminé à partir de la méthode Normat appliquée à l'indice d'altération I-Ser. La limite du halo d'altération (ligne pointillée jaune) permet d'éliminer l'effet d'interpolation entre les échantillons trop distants. La délimitation est basée sur les échantillons dont la valeur de l'indice variation est supérieure à 3,26 (couleurs orangée et rouge). Le halo ainsi défini permet de bien visualiser la cheminée d'altération sous-jacente à la lentille. Dans le toit, le halo d'altération est détectable sur 100 à 150 m au-dessus de la lentille. Un effet de flaque, résultant d'une distribution hétérogène des valeurs d'altération, est généré par cet indicateur. [Retour au texte](#).

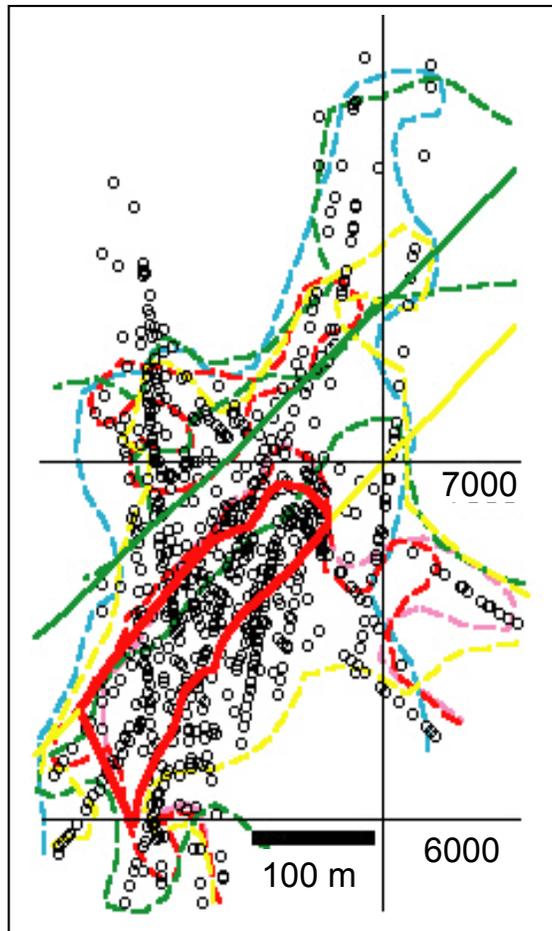


Figure 40: Comparaison des méthodes de détermination du halo d'altération. Les halos d'altération sont tous superposés et sont délimités par des lignes pointillées : Bilan de masses avec indice de variation en rouge, Normat pour la densité en bleu, minéraux calculés pour le quartz en vert, indice d'altération d'Ishikawa en rose et Normat pour I-Ser en jaune. La lentille apparaît en ligne continue rouge, la ligne continue jaune représente le contact de la rhyolite à la base de la lentille minéralisée (footwall) et la ligne continue verte représente le contact sommital de l'unité de basalte qui surmonte la lentille (cap rock). [Retour au texte](#).

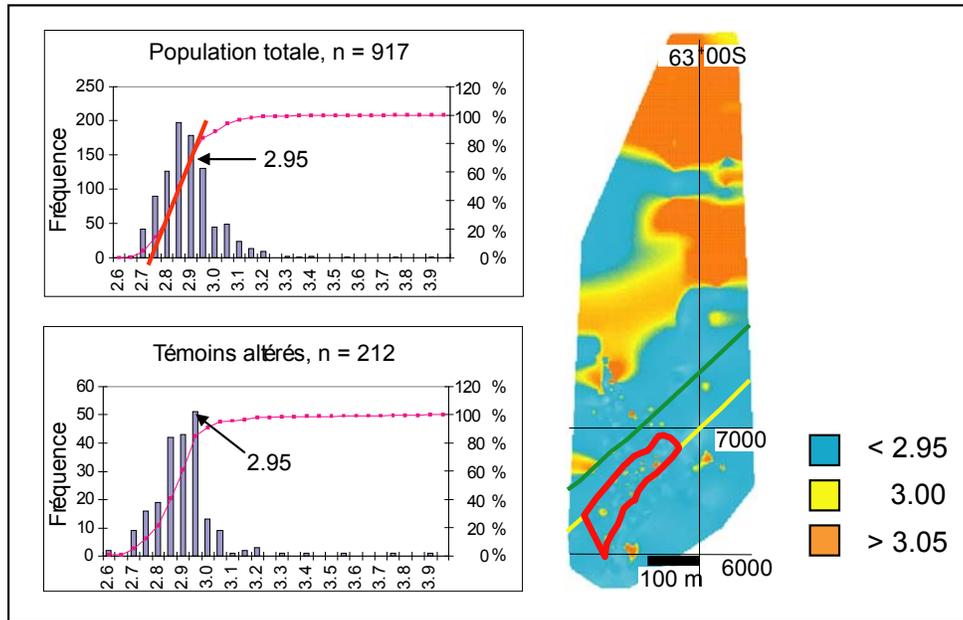


Figure 41: Exemple de détermination du seuil. Le diagramme binaire du haut représente la population totale et sert à déterminer la cassure de la fréquence cumulée. Le diagramme binaire du bas représente la population des échantillons altérés et sert à déterminer le mode. La figure de droite montre que tous les échantillons possédant une valeur d'altération plus petite à 2,95 sont considérés comme altérés. Donc, la valeur du seuil correspond à 2,95. [Retour au texte](#).

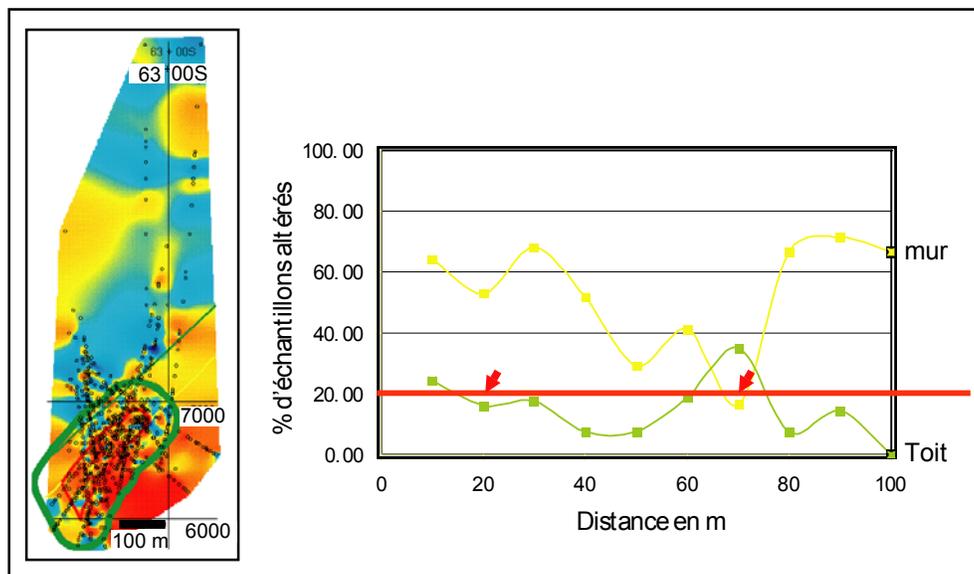


Figure 42: La zone tampon est tracée en ligne continue verte sur la figure de gauche. Le diagramme de droite illustre comment la performance d'un indicateur est évaluée en fonction du seuil d'altération et de la distance. Dans le cas illustré, l'altération est considérée significative si 20% des échantillons dans la zone tampon sont altérés. Ainsi, pour le mur, l'altération s'étend sur 60 m (cheminée), alors que dans le toit, elle est significative (en continu) jusqu'à 10 m. [Retour au texte](#).

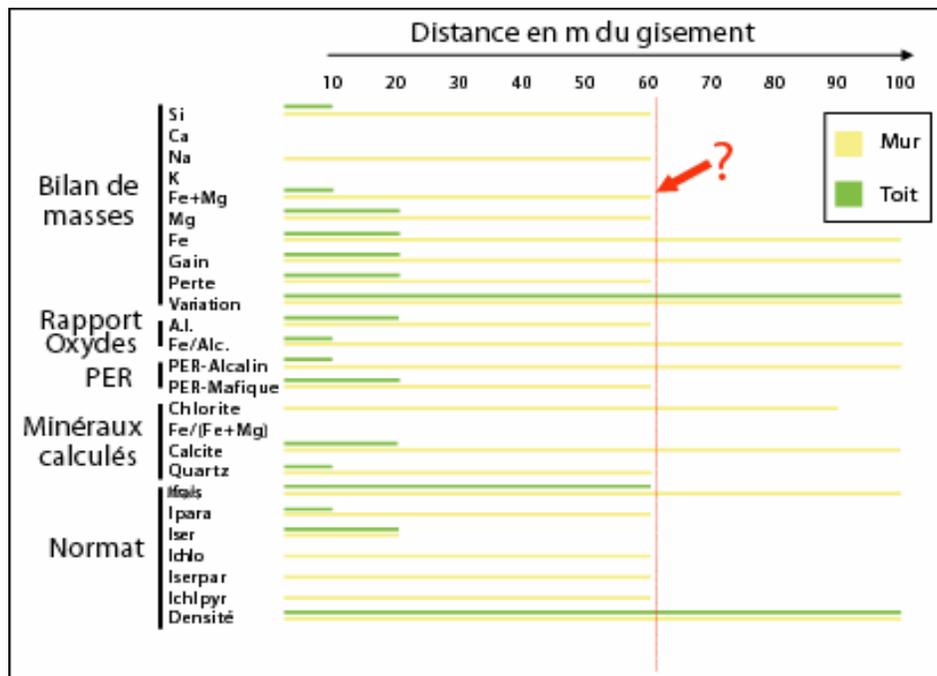


Figure 43: Les résultats sont donnés pour 22 indicateurs. Le graphique représente le nombre de mètres autour de la lentille minéralisée sur lesquels l'altération est significative avec un seuil équivalent à 20% des échantillons altérés à l'intérieur de la zone tampon. [Retour au texte](#).

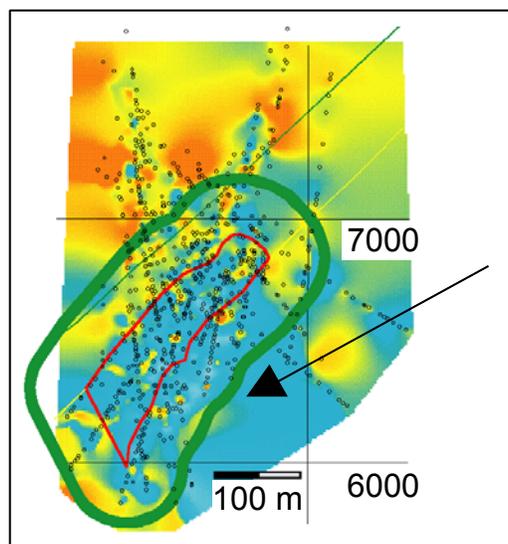


Figure 44: La zone tampon est tracée en ligne continue verte et la flèche noire indique qu'une mauvaise représentativité de l'échantillonnage pour la cheminée d'altération dans la zone tampon à 60 m est responsable du problème de la limite artificielle de l'étendue de l'altération. [Retour au texte](#).

Paramètres des altérations hydrothermales des gisements de type VMS et aurifères : comparaison de la performance d'indicateurs d'altération.

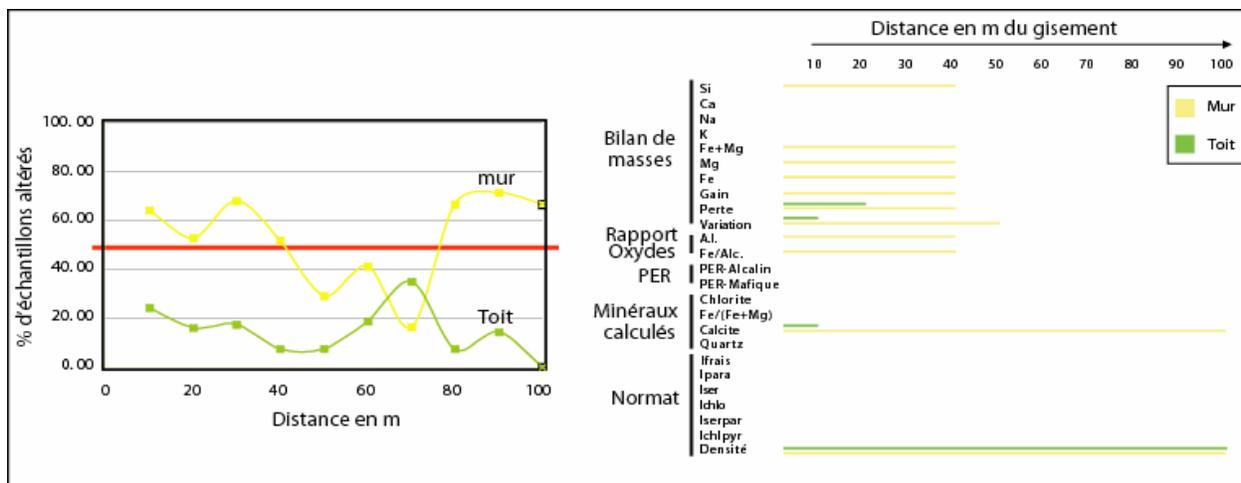


Figure 45: À 50% des échantillons altérés, moins d'indicateurs d'altération sont applicables. [Retour au texte.](#)

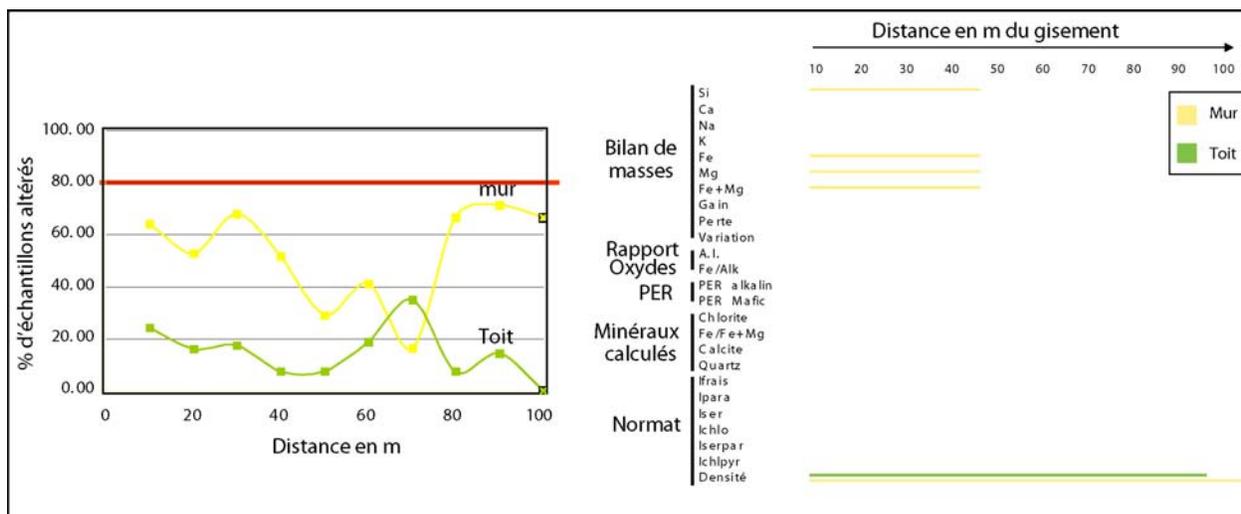


Figure 46: À 80% des échantillons altérés, moins d'indicateurs d'altération sont applicables. [Retour au texte.](#)

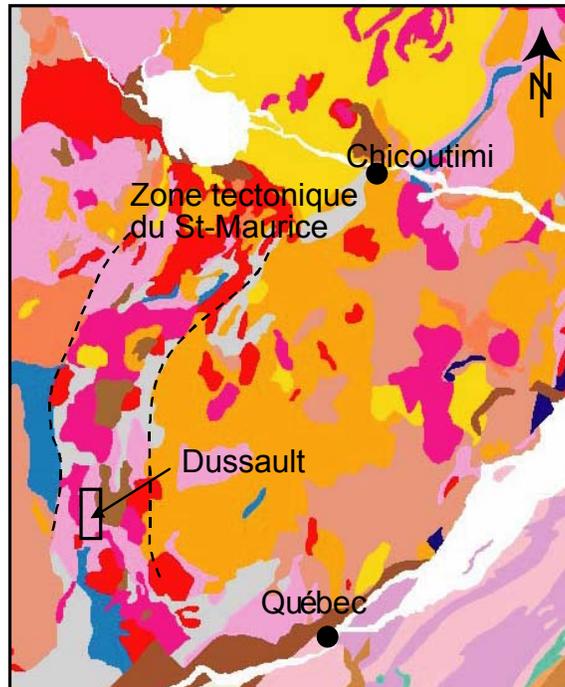


Figure 47: Géologie régionale représentant le contexte dans lequel se trouve la propriété de Dussault. Carte compilée à partir des données du SIGÉOM. [Retour au texte.](#)

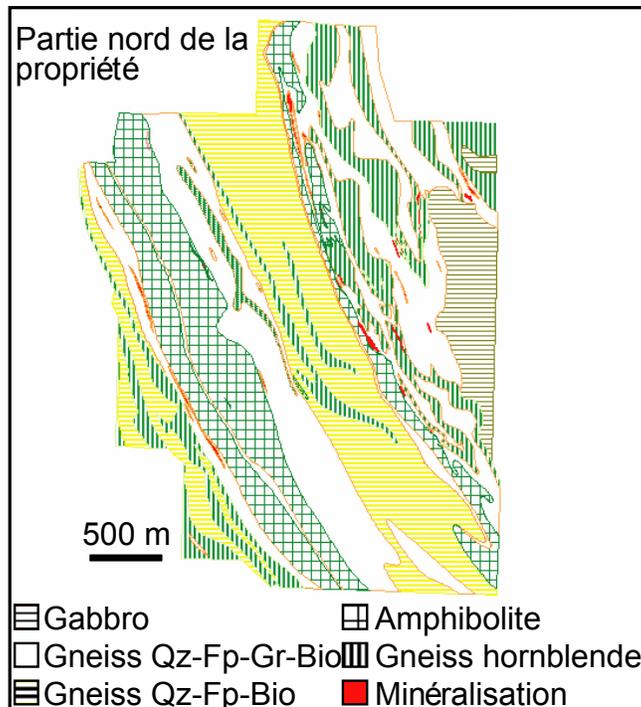


Figure 48: La géologie locale (SOQUEM) de la propriété de Dussault montre 5 unités lithologiques et les zones minéralisées. [Retour au texte.](#)

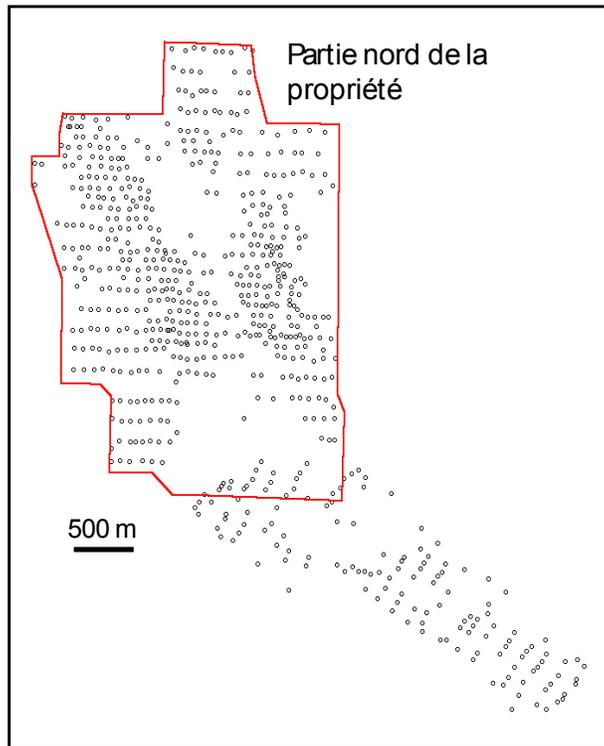


Figure 49: Les points représentent les échantillons projetés à la surface et le périmètre rouge trace le contour de la carte de la géologie locale représentée à la figure 48. [Retour au texte.](#)

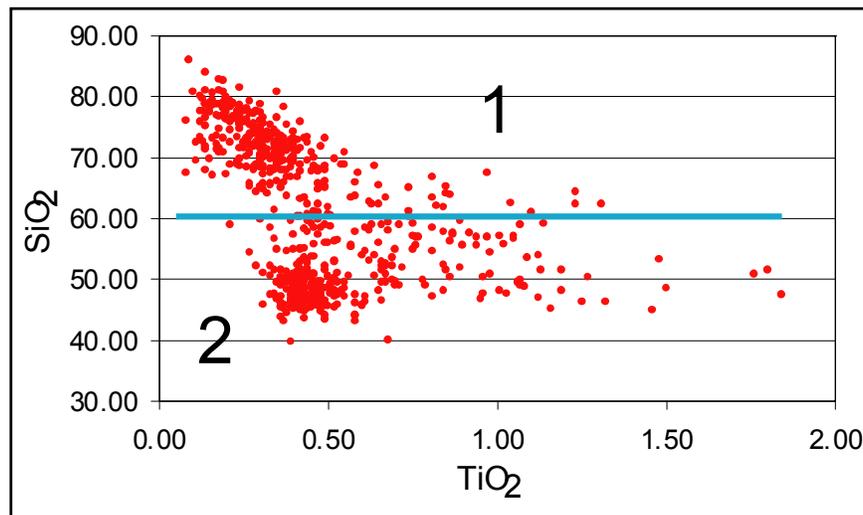


Figure 50: Les graphiques présentent tous deux groupes de roches distincts (groupe 1 et groupe 2). L'exemple donné ici représente le graphique binaire de SiO_2 en fonction de TiO_2 . La ligne continue bleue marque la division entre les deux groupes nommés 1 et 2. [Retour au texte.](#)

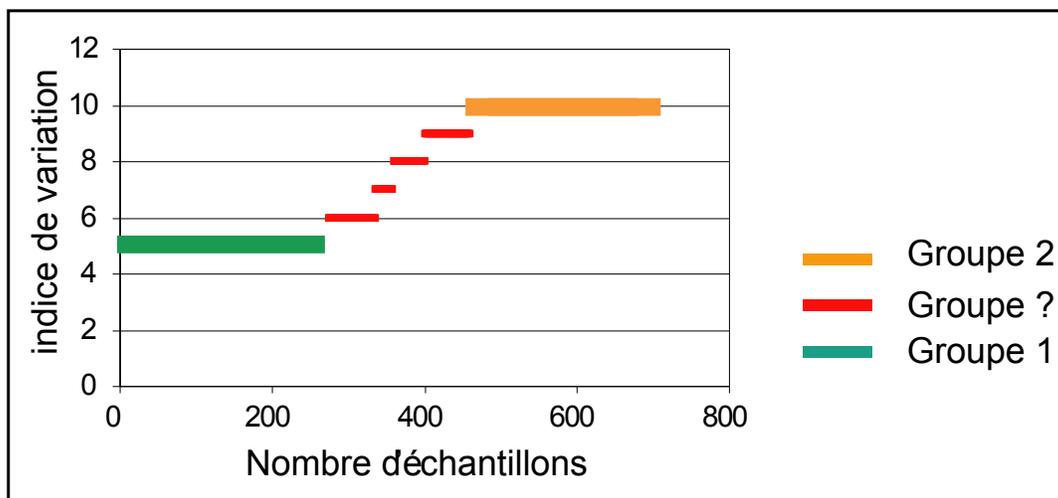


Figure 51: Le diagramme binaire de l'indice de variation en fonction du nombre d'échantillons illustre la compilation des résultats de la subdivision en groupes. [Retour au texte.](#)

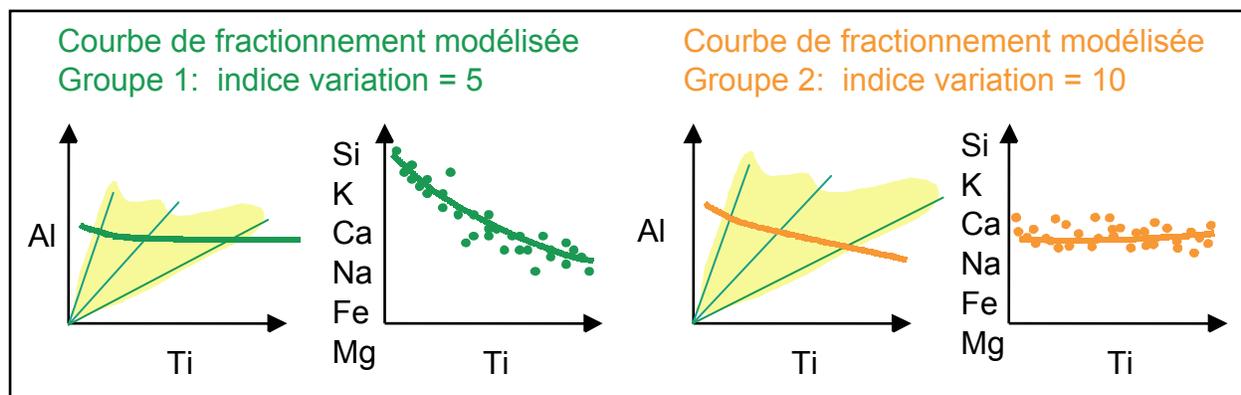


Figure 52: Voici les courbes de fractionnement modélisées pour les échantillons appartenant au groupe 1 (en vert) et ceux appartenant au groupe 2 (en orange). Les diagrammes Al/Ti présentent les courbes modélisées à partir de la distribution en éventail des échantillons. Ces courbes sont déterminées par essais et erreurs jusqu'à ce que les courbes d'éléments mobiles soient cohérentes. [Retour au texte.](#)

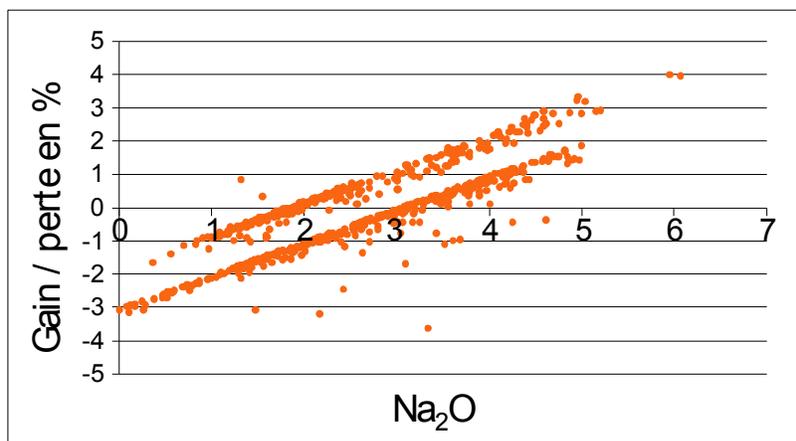


Figure 53: Diagramme des gains/pertes (%) en fonction du pourcentage poids de Na_2O . La distribution le long de deux droites reflète la subdivision en deux groupes de roches distincts. L'exemple montre l'utilisation de Na_2O mais la démarche a également été faite pour SiO_2 , MgO et K_2O et les deux groupes de roches sont toujours apparents et distincts l'un de l'autre. [Retour au texte](#).

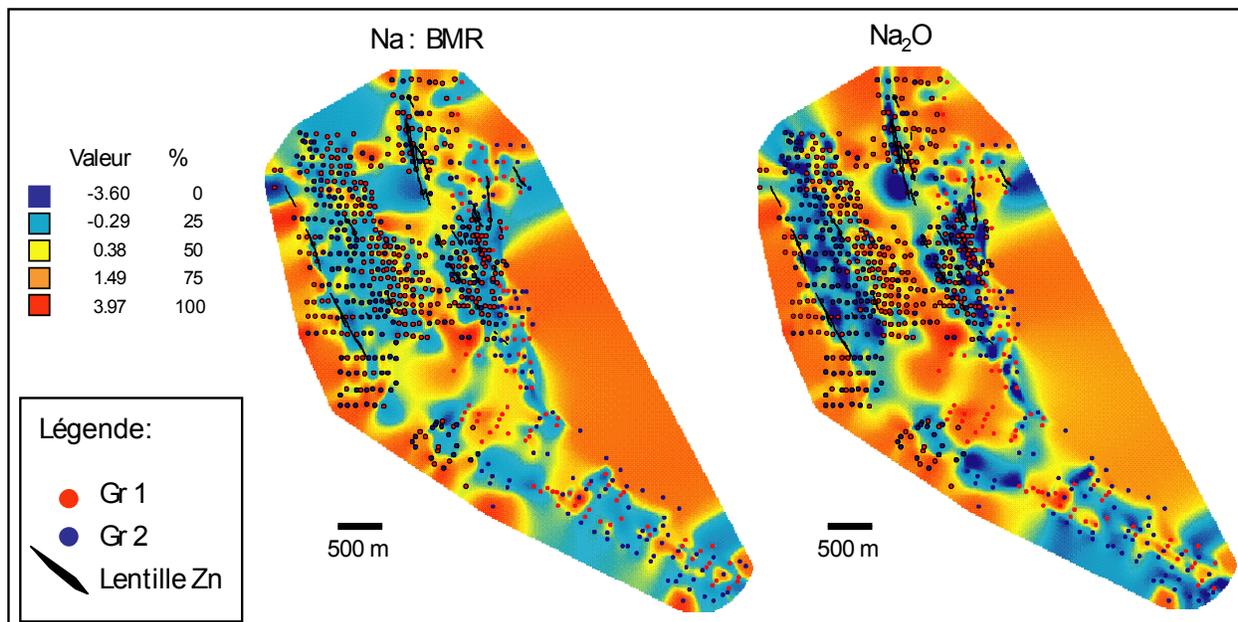


Figure 54: L'indice d'altération Na évalué avec la méthode BMR, montre des appauvrissements marqués en Na (gauche) qui caractérisent la localisation des lentilles minéralisées. Les halos d'altération atteignent des dimensions de l'ordre de la centaine de mètres de part et d'autre des lentilles. Dans la partie sud, des lentilles sont également associées avec les zones de lessivage en Na. La comparaison des deux images, celle du BMR et celle de droite qui représente la quantité d'oxyde Na_2O , montre que le calcul du Bilan de masses relatif a pour effet de niveler les concentrations en Na pour faire ressortir les gains et les pertes relativement à la composition du protolithe. [Retour au texte](#).

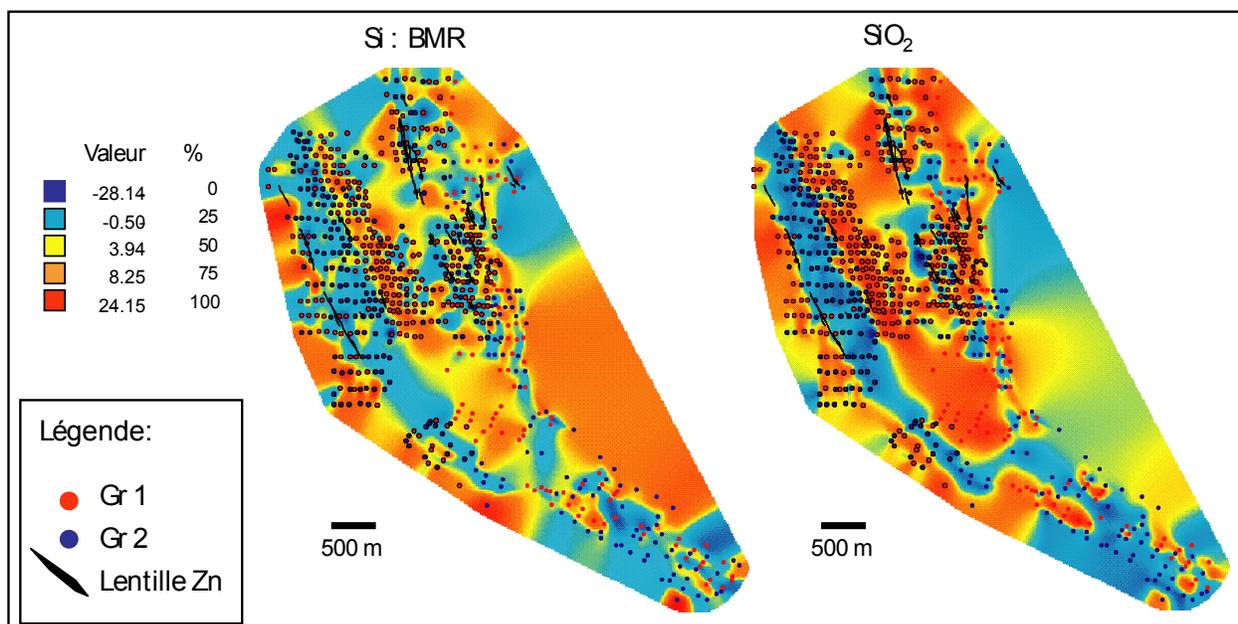


Figure 55: L'indice d'altération Si évalué avec la méthode BMR, montre des appauvrissements marqués en Si (gauche) qui caractérisent la localisation des lentilles minéralisées. Les halos d'altération atteignent des dimensions de l'ordre de la centaine de mètres de part et d'autre des lentilles. Dans la partie sud, des lentilles sont également associées avec les zones de lessivage en Si. La comparaison des deux images, celle du BMR et celle de droite qui représente la quantité d'oxyde SiO₂, montre que le calcul du Bilan de masses relatif a pour effet de niveler les concentrations en Si pour faire ressortir les gains et les pertes relativement à la composition du protolithe. [Retour au texte.](#)

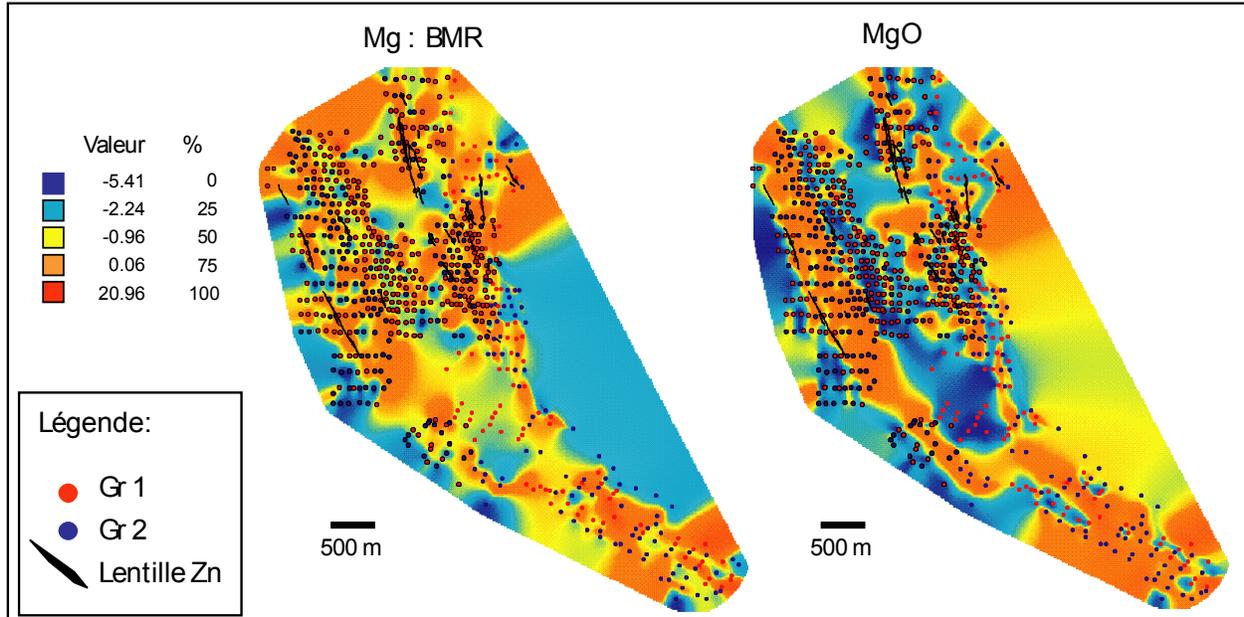


Figure 56: L'indice d'altération Mg évalué avec la méthode BMR, montre des enrichissements marqués en Mg (gauche) qui caractérisent la localisation des lentilles minéralisées. Les halos d'altération atteignent des dimensions de l'ordre de la centaine de mètres de part et d'autre des lentilles. Dans la partie sud, des lentilles sont également associées avec les zones de lessivage en Mg. La comparaison des deux figures, celle du BMR et celle de droite qui représente la quantité d'oxyde MgO, montre que le calcul du Bilan de masses relatif a pour effet de niveler les concentrations en Mg pour faire ressortir les gains et les pertes relativement à la composition du protolithe. [Retour au texte.](#)

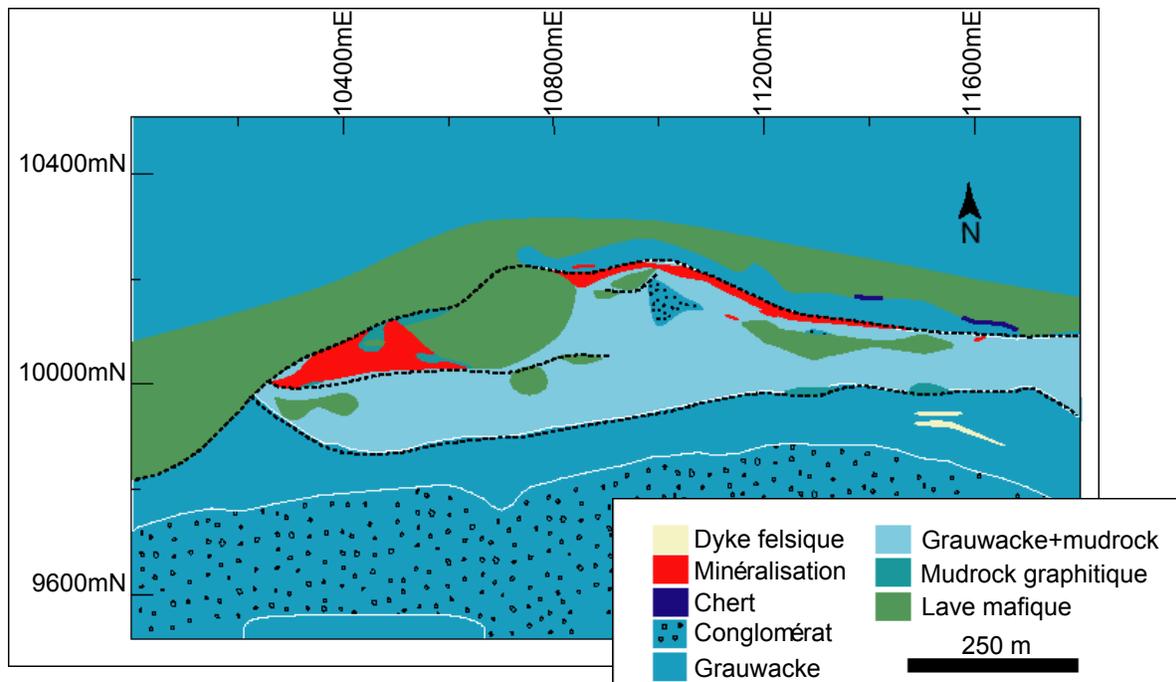


Figure 57: Géologie régionale selon la compilation de la compagnie Aurizon représentant le contexte dans lequel se trouve les gisements aurifères de Casa Berardi. Les lentilles minéralisées sont les lentilles 113 et 118. [Retour au texte](#).

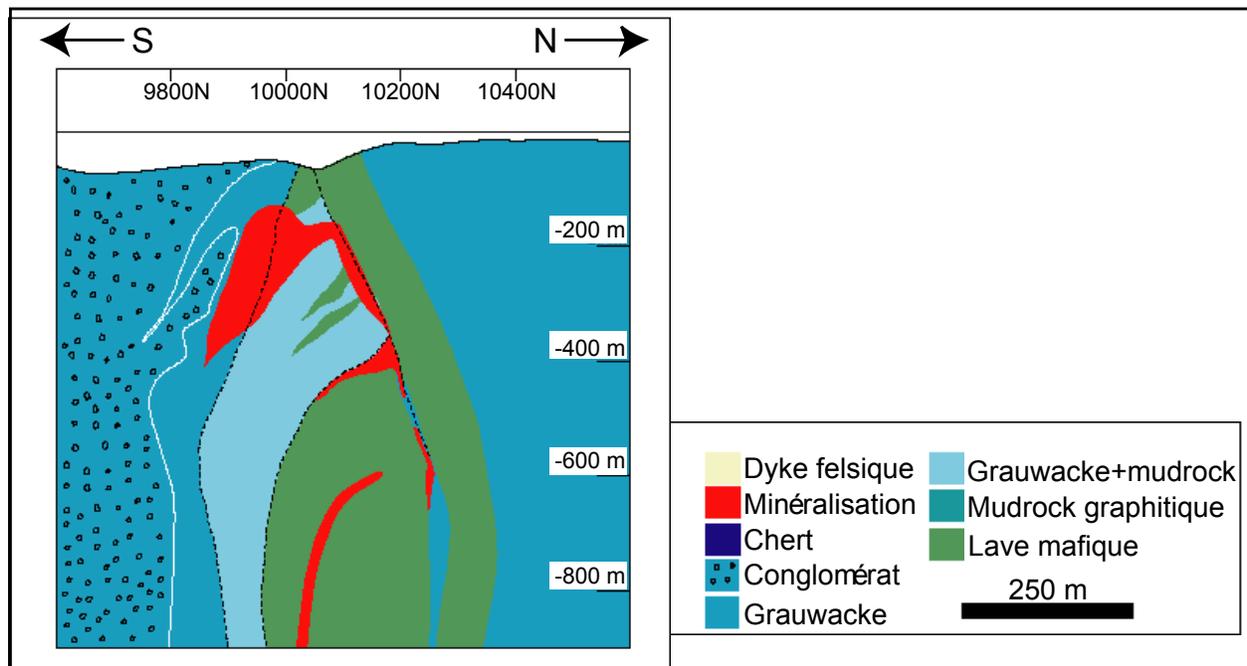


Figure 58: Géologie régionale vue en section (Aurizon). [Retour au texte](#).

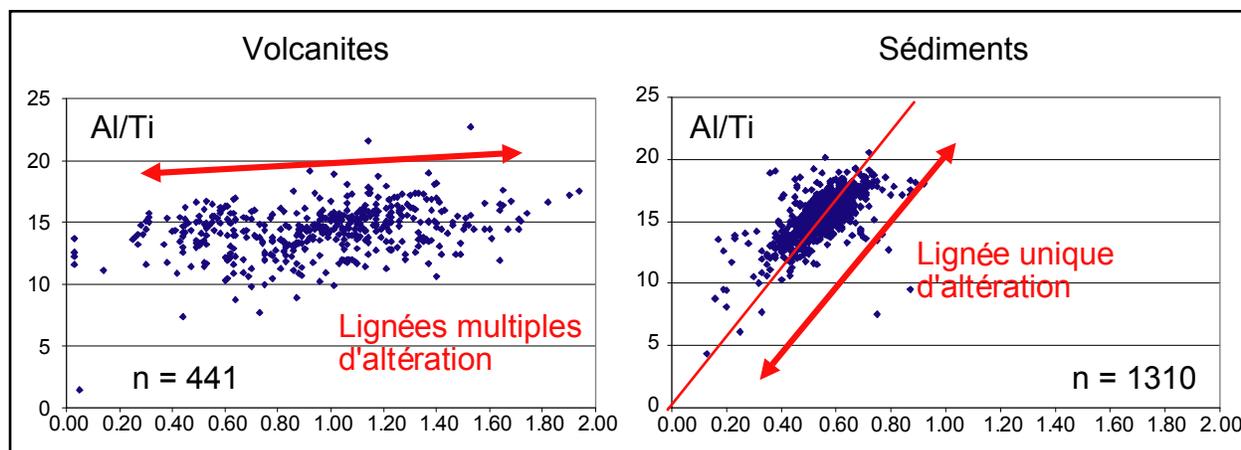


Figure 59: Bilan de masses calculé par rapport à deux catégories d'échantillons. Le diagramme binaire de gauche, Al/Ti, représente les échantillons appartenant aux volcanites. Ils sont distribués sur plus d'une ligne d'altération possible (toujours en considérant que la droite passe par l'origine), ce qui implique que la modélisation des courbes de fractionnement considérera des précurseurs multiples. Le diagramme de droite, Al/Ti, représente les échantillons appartenant aux sédiments. Ils sont distribués sur une ligne unique d'altération, ce qui implique que la modélisation des courbes de fractionnement considérera un précurseur unique. [Retour au texte](#).

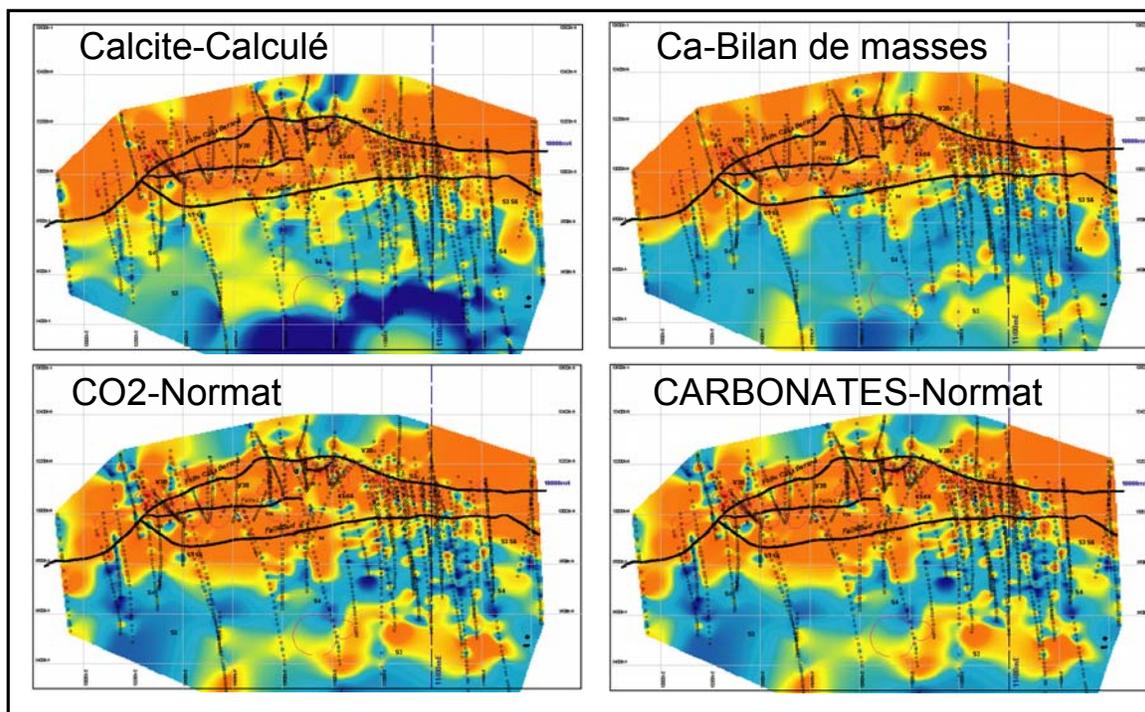


Figure 60: Les quatre figures d'indice d'altération en carbonate traduisent la présence des failles et oblitérent l'altération spécifique à la minéralisation. [Retour au texte](#).

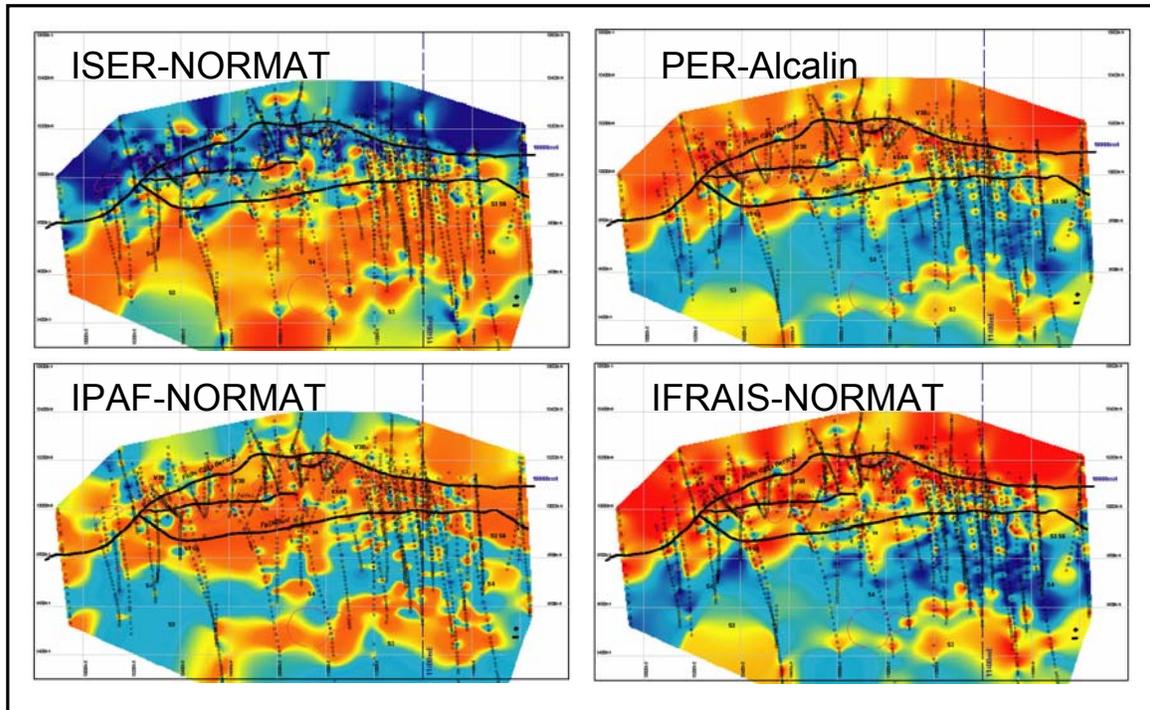


Figure 61: Les quatre figures d'indice d'altération (Iser-Normat, PER-Alcalin, Ipaf-Normat et Ifrais-Normat) traduisent la présence de failles. [Retour au texte](#).

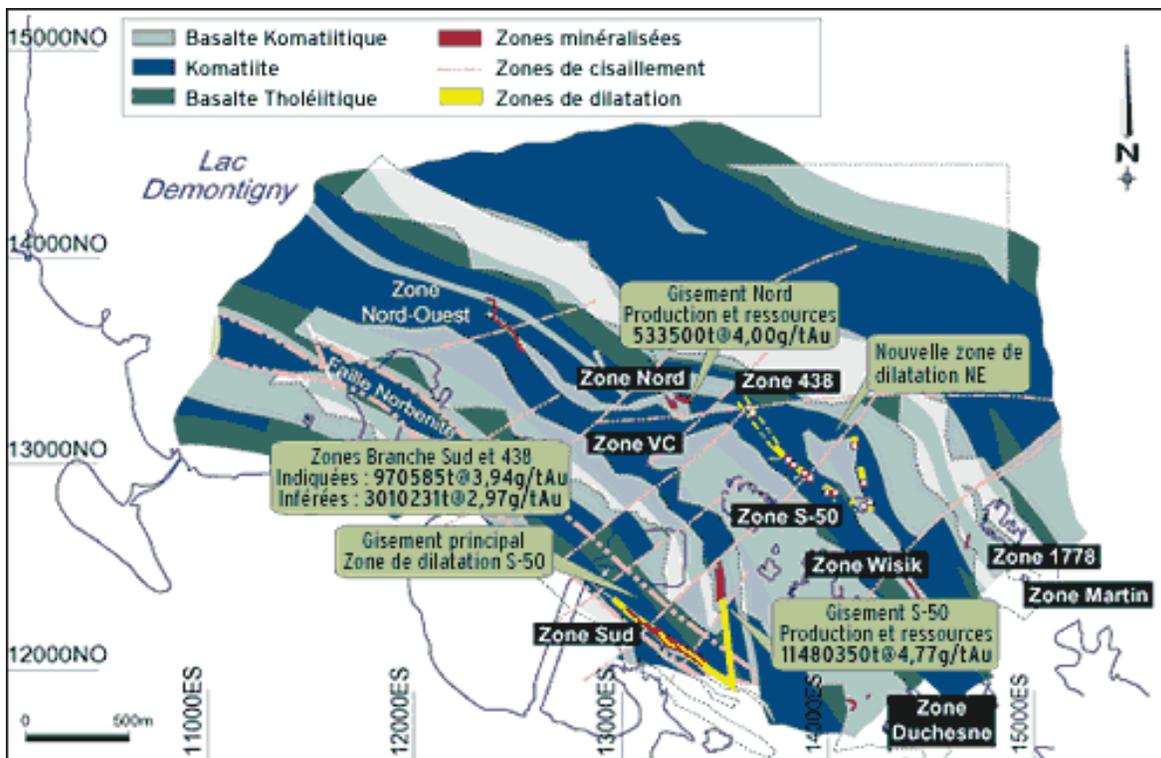


Figure 62: Géologie régionale représentant le contexte dans lequel se trouve le complexe minier de Kiena. Carte provenant de McWatters. [Retour au texte](#).

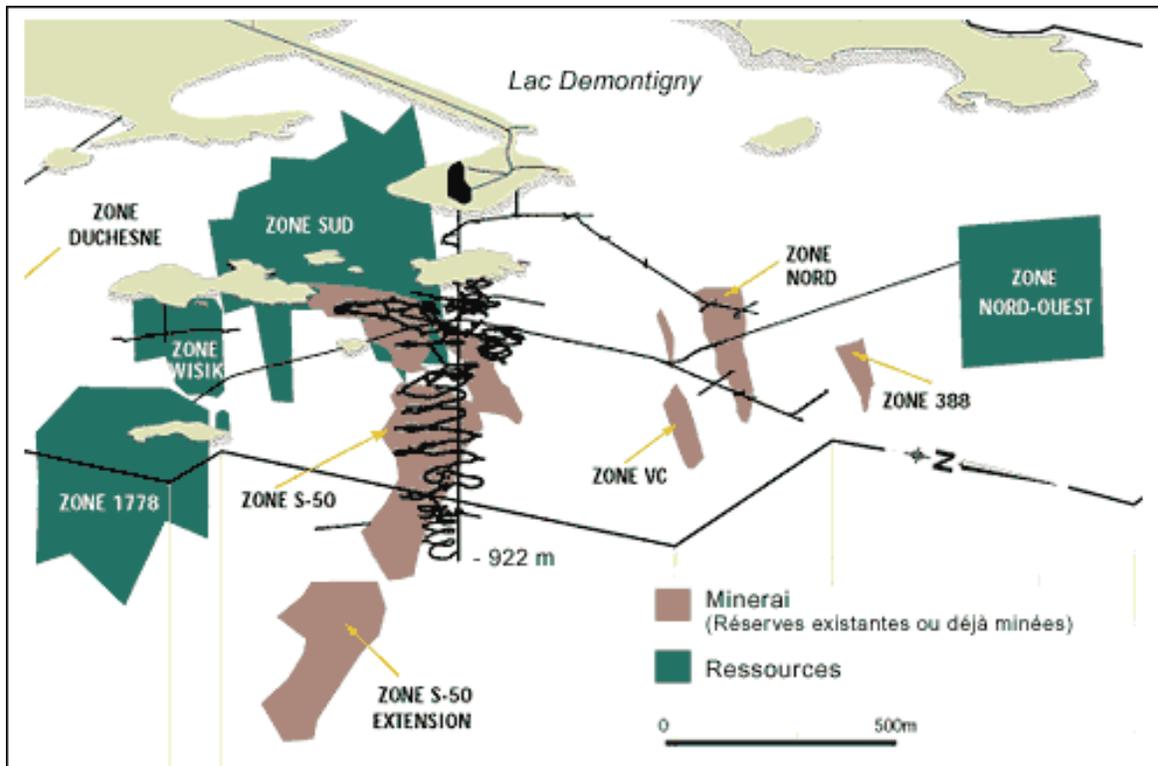


Figure 63: Zones en exploitation et zones satellite (McWatters). [Retour au texte.](#)

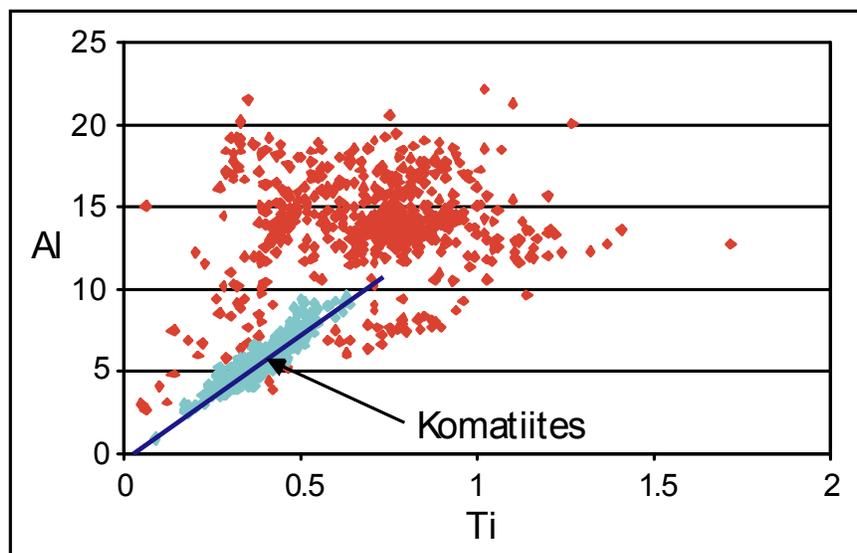


Figure 64: Le diagramme Al/Ti illustre la dispersion des échantillons komatiitiques (en bleu) et volcaniques (en rouge). La ligne bleue représente la droite d'altération unique pour les komatiites, ce qui correspond à un précurseur unique. Les échantillons volcaniques sont distribués en éventail, ce qui correspond à des précurseurs multiples. [Retour au texte.](#)

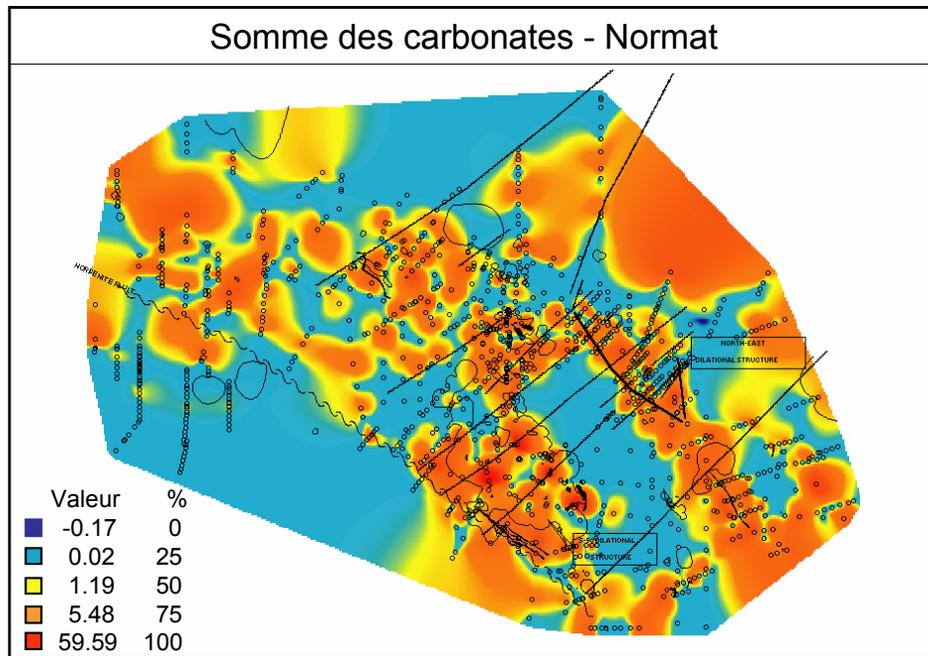


Figure 65: L'indice d'altération calculé selon la Σ carbonates-Normat. En utilisant cette figure, des isocontours de l'altération ont été tracés à main levée en respectant le fait que les zones orangées sont les plus fortement altérées. [Retour au texte](#).

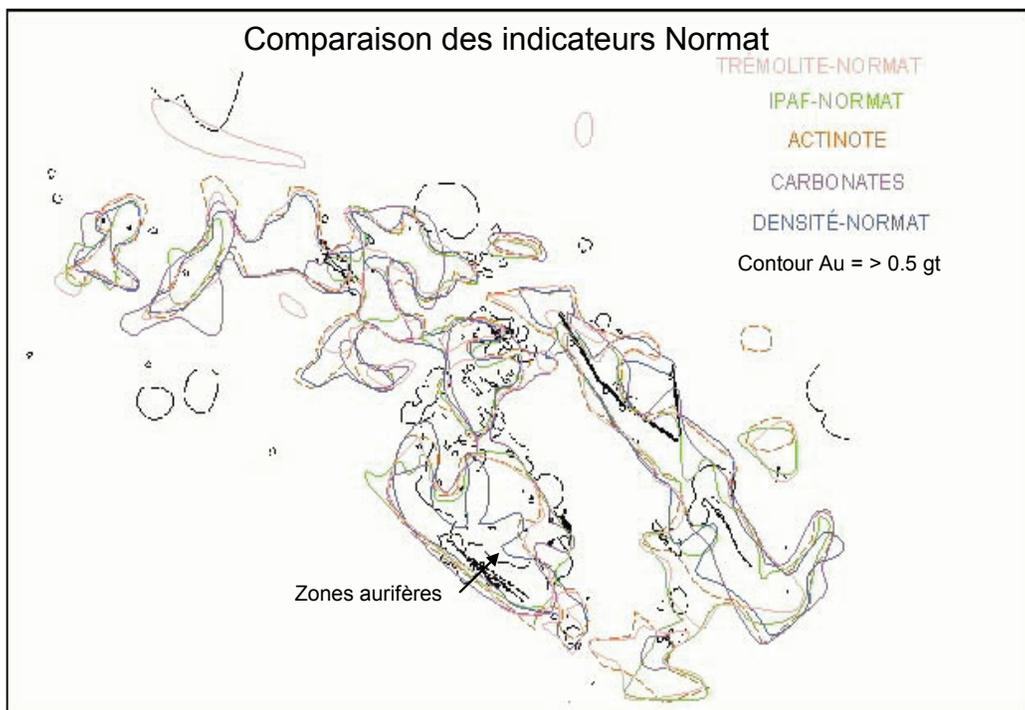


Figure 66: Comparaison des différents indicateurs d'altération déterminés à partir de la méthode Normat. Les zones aurifères sont tracées en noir. Les indicateurs générés par Normat illustrent essentiellement les mêmes patrons d'altérations. [Retour au texte](#).

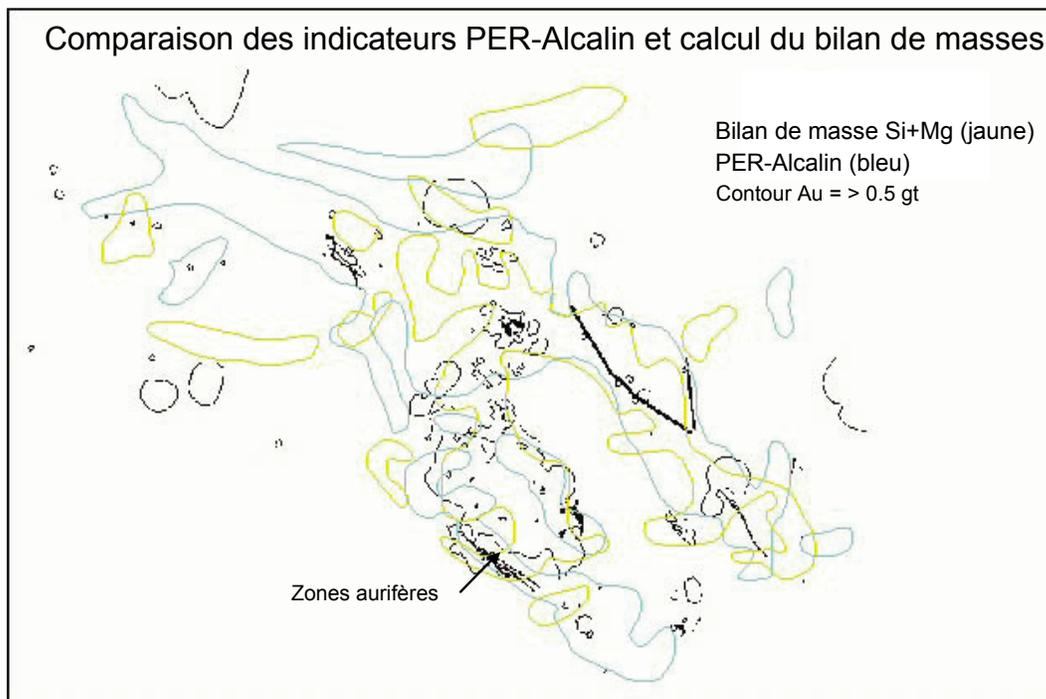


Figure 67: Comparaison des indicateurs PER-Alcalin et calcul du Bilan de masses (Si + Mg). [Retour au texte.](#)

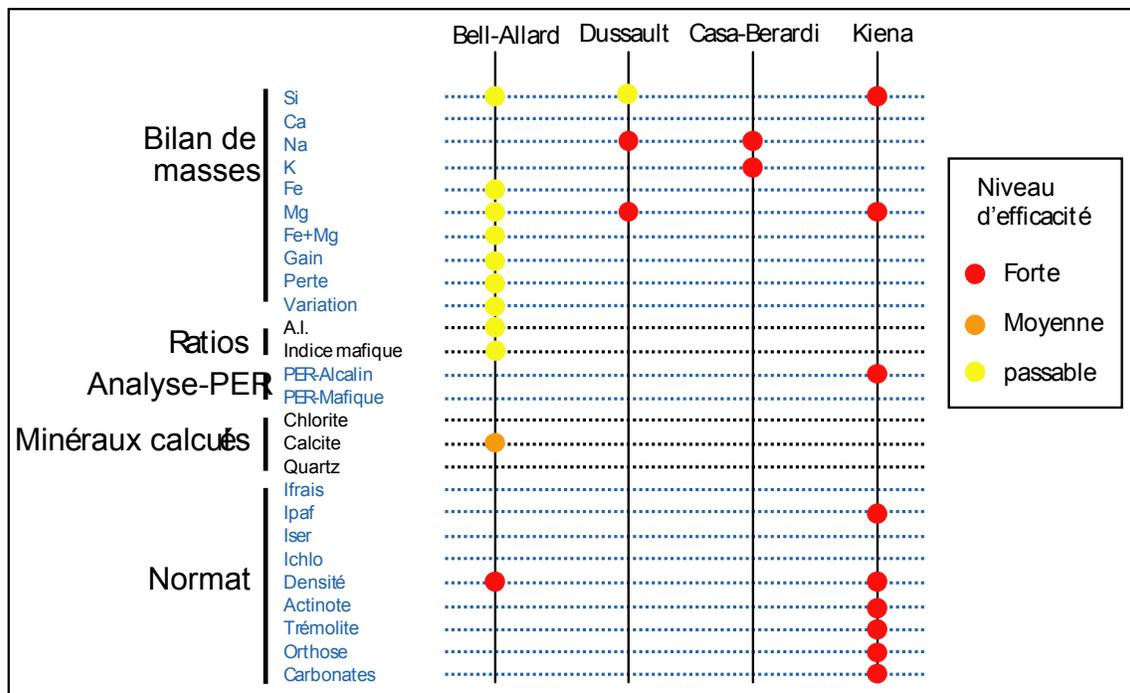


Figure 68: Résumé de l'efficacité des méthodes de détermination de l'altération par rapport aux différents cas étudiés. [Retour au texte.](#)