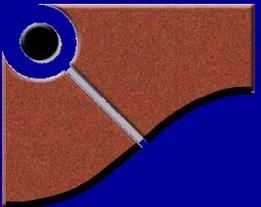


2001-10 Projet Comtois

Performance des indicateurs
d'altération hydrothermale

Par Damien Gaboury





Plan de la présentation

- 1- Paramètres physiques de Comtois et de sa banque de données
 - 2- Théorie sur les indicateurs d'altération
 - 3- Description du fonctionnement du PER-Analysis et du BMR
 - 4- Évaluation qualitative et quantitative des indicateurs
 - 5- Conclusions
- 

COMTOIS: Paramètres physiques

Route forestière
Matagami-Quévillon

Échantillon Au < 100 ppb

Échantillon Au > 100 ppb

Superficie du
secteur considéré: 13 km²

- Échantillons = 226

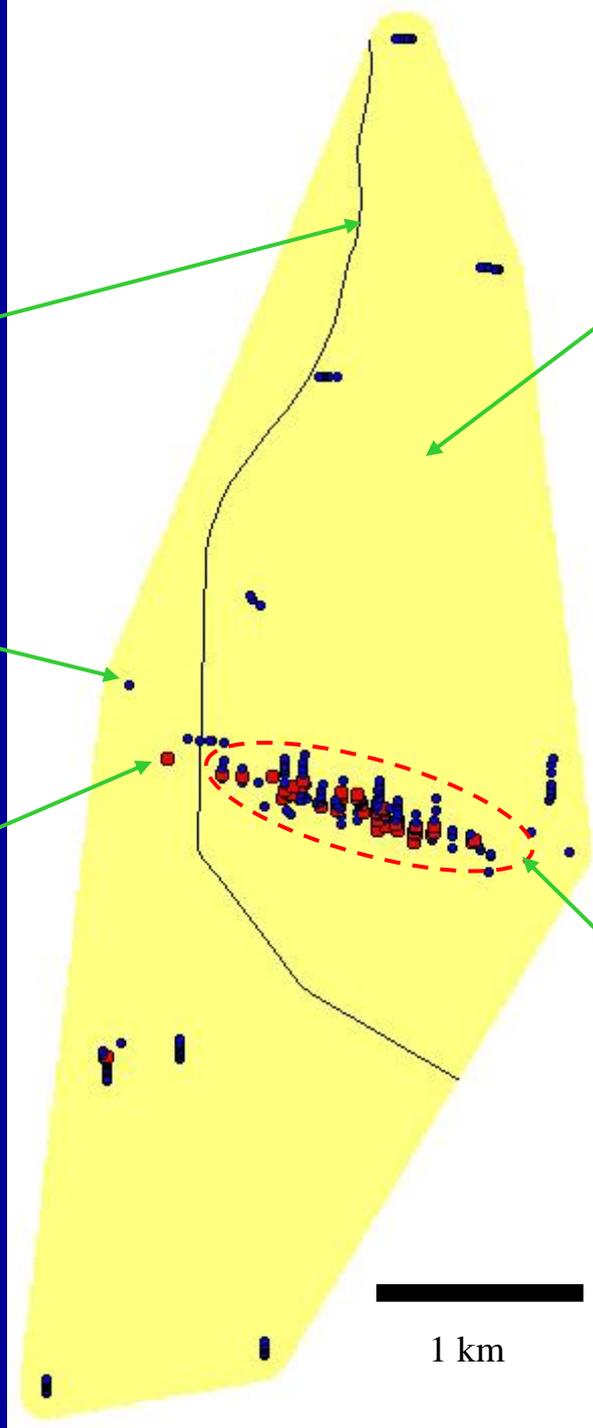
- Principalement de forages

- Projection verticale

Superficie du
secteur minéralisé : 0.5 km²

Échantillons = 144

Densité moyenne = 0.3/m²



1 km

COMTOIS: Paramètres lithologiques

n = 7
Au < 12 ppb
V1, V3, I1, I3B

n = 3
Au < 5 ppb
V1D, V2J

n = 20
Au = < 186 ppb
V1, V2, V3, I1

n = 8
Au = < 7 ppb
V2, V3

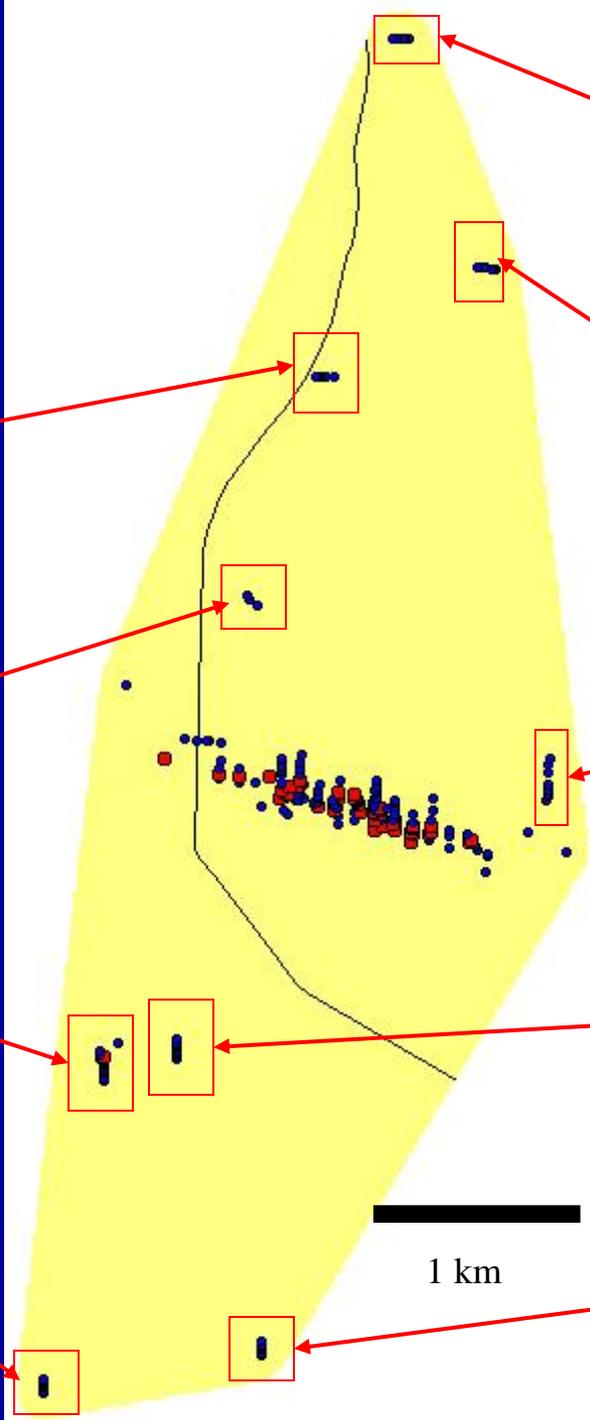
n = 6
Au < 6 ppb
V1, V2, V3

n = 6
Au < 7 ppb
V3, I3B, I2-V2

n = 8
Au = 0 ppb
V1, V2, I3B

n = 12
Au < 25 ppb
V1, V2, I1E

n = 9
Au < 9 ppb
V1, V2, V3



1 km

Performances idéalisées d'un indicateur de l'altération hydrothermale

Indicateur: un élément ou groupe d'éléments utilisé par une méthode spécifique

I SER de Normat

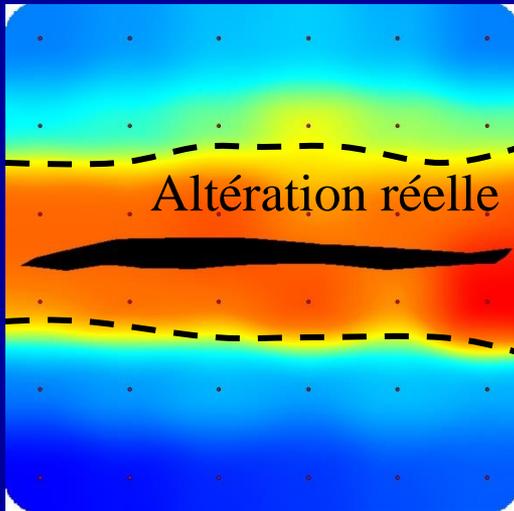
Si du BMR

PER Alkalin

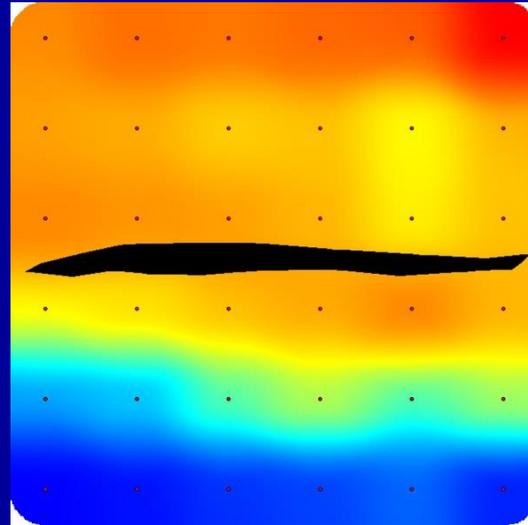
- 1) Indépendant du type de lithologie
- 2) Individualisation de la zone minéralisée (local vs régional)
- 3) Sensible mais sans créer d'artéfacts
- 4) Facilité de seuillage (la valeur qui correspond à l'altération)
- 5) Homogénéité de la signature d'altération
- 6) Correspondance entre l'altération et la minéralisation

Exemples des performances désirées

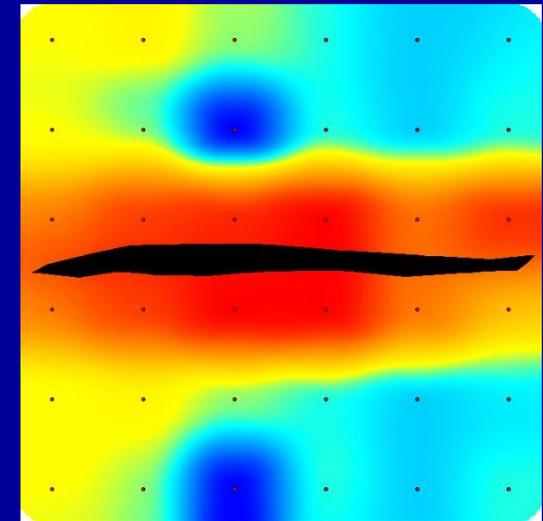
Idéalisé / Réel



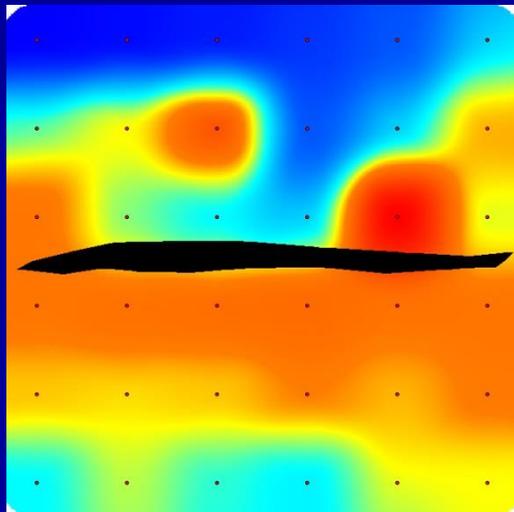
Seuillage



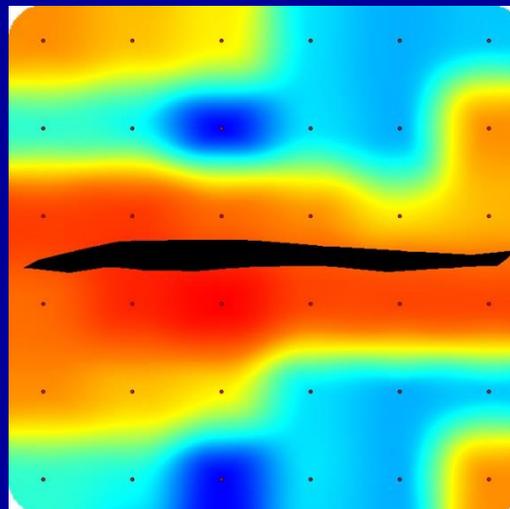
Local vs régional



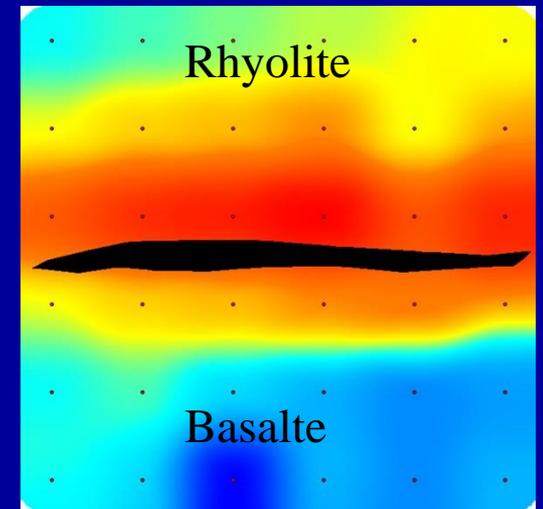
homogénéité

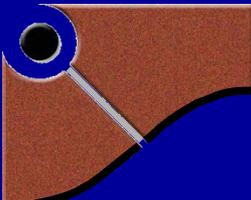


Sensibilité / Artefact



Lithologie





Démarche d'évaluation des indicateurs

Méthode inverse: on connaît la zone minéralisée et on veut déterminer quel est le meilleur indicateur selon les critères de performance

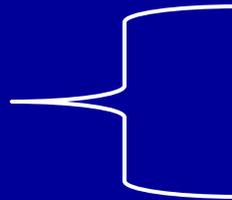
Procédure d'évaluation

- 1- Individualisation de la zone minéralisée et absence d'artéfact (sélection des meilleurs indicateurs)
 - 2- Homogénéité au sein de la zone d'altération
 - 3- Seuillage et lien entre altération et minéralisation
- 

Indicateurs considérés pour Comtois

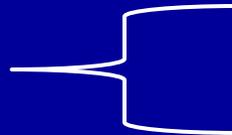
ISHIKAWA (A.I)

Normat



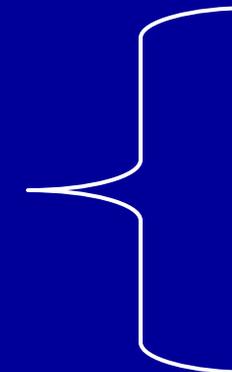
ICHLO
ISER
IPAF

PER Analysis



Alkalin
Mafic

Bilan de masse
Relatif (BMR)



Si
Fe
Mg
Ca
Na
K

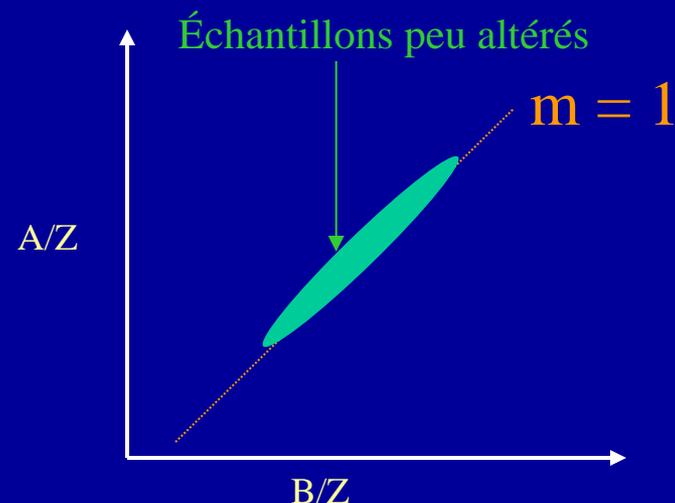


Description des
Méthodes



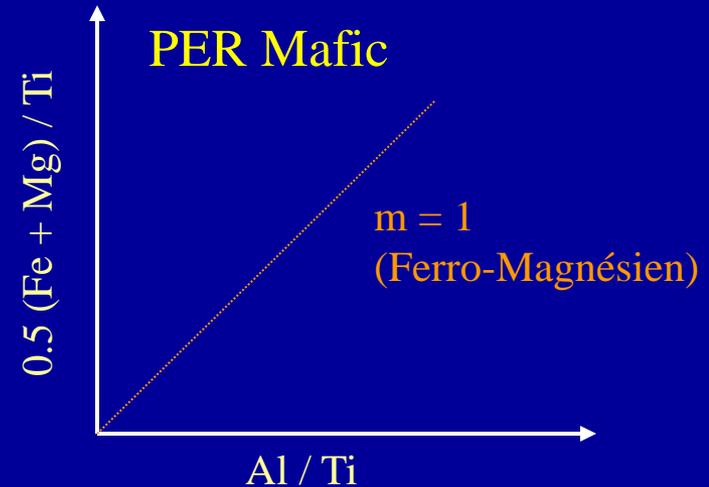
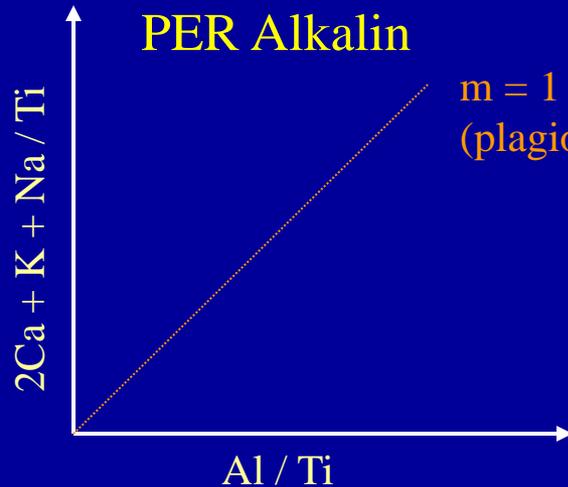
Principe du PER analysis

- 1- Normalisation à un facteur commun (élimine le problème de fermeture des analyses).
- 2- Transformation des données en rapports molaires (Oxyde / poids atomique).
- 3- Permet de visualiser l'altération en fonction de modèles minéralogiques de fractionnement(p.ex. Plagioclase, Olivine).
- 4- Ne requière pas la connaissance du protolite.



La méthode du « PER analysis » pour les altérations hydrothermales a été développée par Madeisky (1993). 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 peuvent être des éléments uniques ou des combinaisons d'éléments établies selon des rapports spécifiques. La normalisation des éléments considérés à un facteur commun (Z), non impliqué dans les transfères de masses (élément immobile), 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 (p. ex. plagioclase, olivine).

Modèles utilisés: Alkalin et mafic



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. Les modèles utilisés sont ceux du feldspath ($2\text{Ca} + \text{Na} + \text{K} / \text{Ti}$) versus Al / Ti et mafique (Olivine-pyroxène : $0.5 * (\text{Fe} + \text{Mg}) / \text{Ti}$) versus Al / Ti . Ces deux modèles définissent des droites de pente $m = 1$. Dans le but de quantifier le métasomatisme, la pente de la droite, qui passe par les deux points suivants : origine et position de l'échantillon, est comparée à celle du modèle ($m = 1$), selon les équations suivantes :

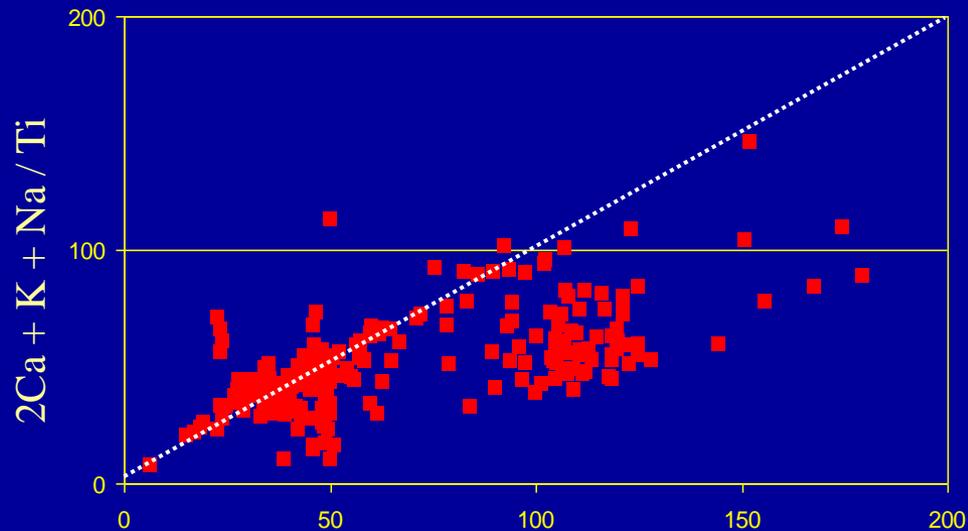
$$R = -(1 - [((2\text{Ca} + \text{Na} + \text{K}) / \text{Ti}) / (\text{Al} / \text{Ti})]) * 100 \text{ (modèle feldspath)}$$

$$R = -(1 - [((0.5 * (\text{Fe} + \text{Mg})) / \text{Ti}) / (\text{Al} / \text{Ti})]) * 100 \text{ (modèle mafique)}$$

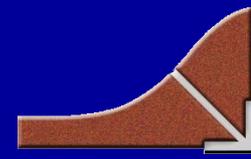
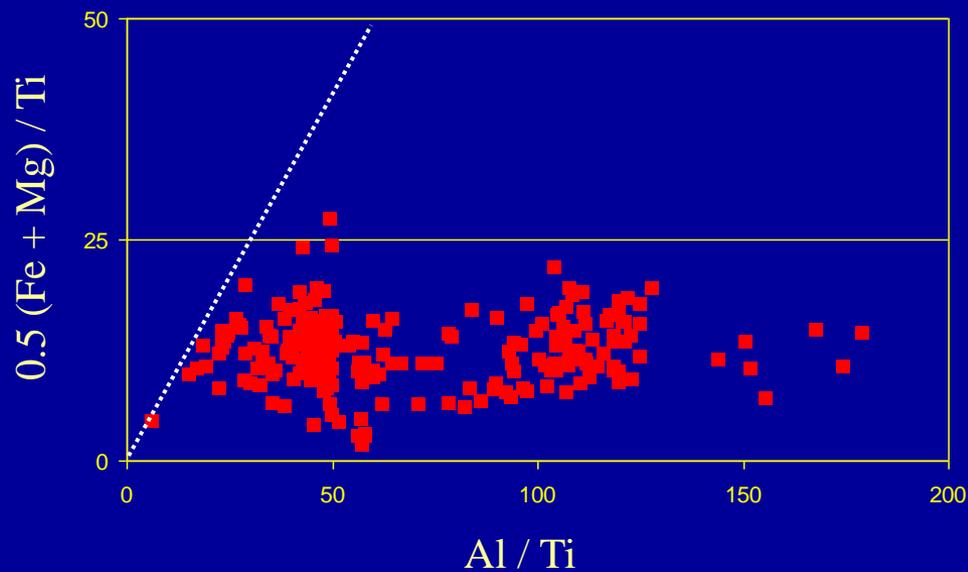
Des valeurs inférieures à 1 indiquent un appauvrissement des éléments considérés (en ordonnée) et des valeurs supérieures à 1 indiquent un enrichissement.

Diagrammes PER

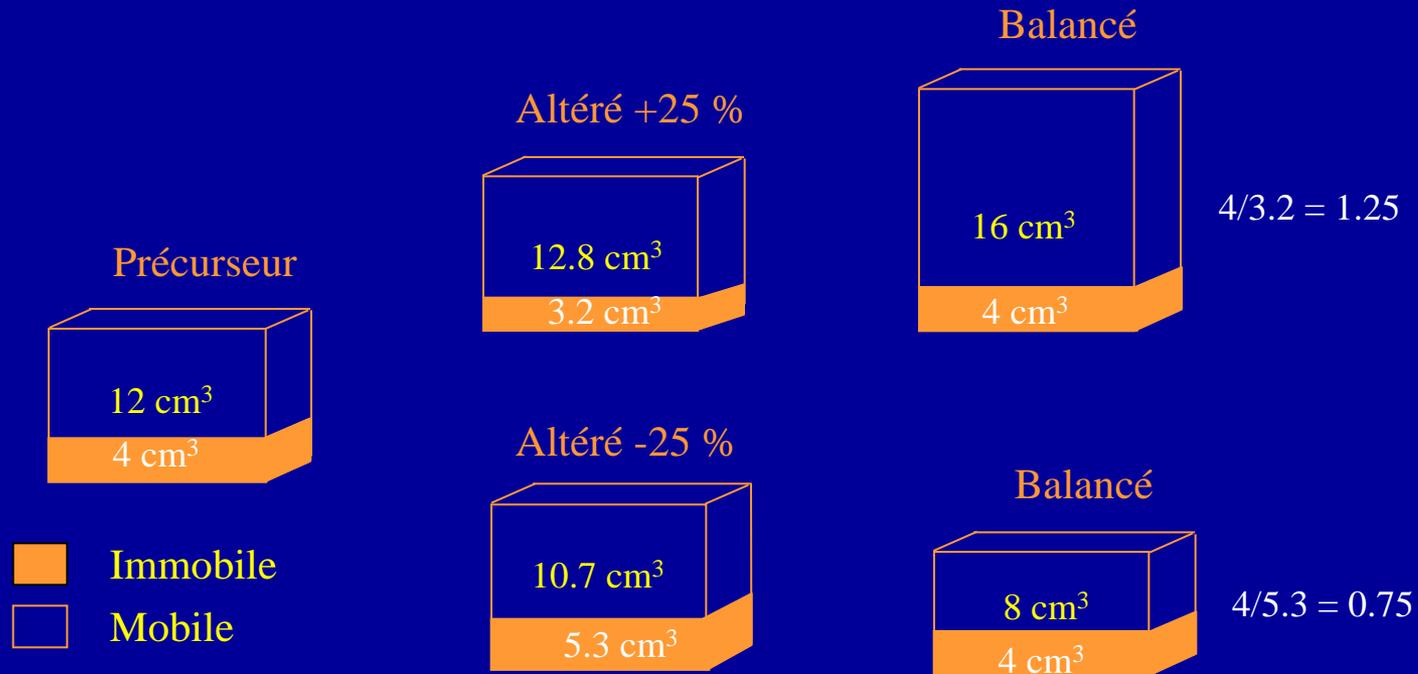
Indice alcalin



Indice mafique

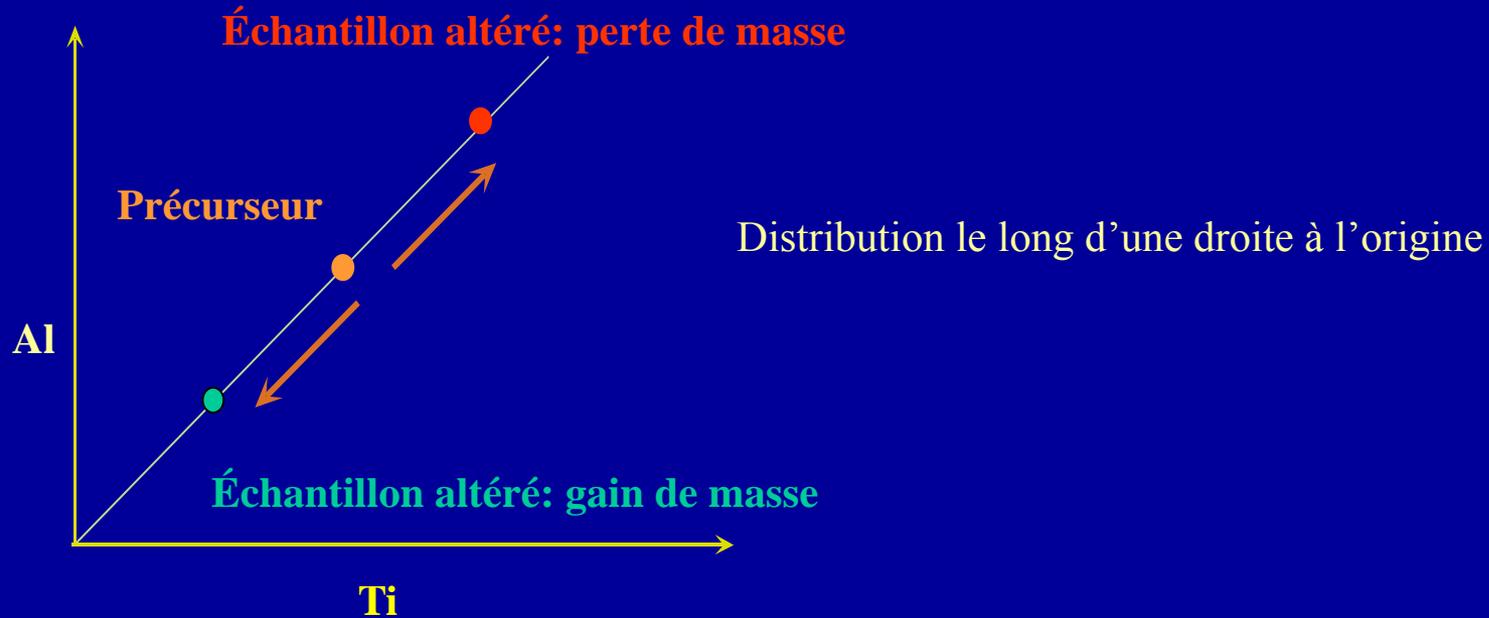


Principe de base du calcul de bilan de masse



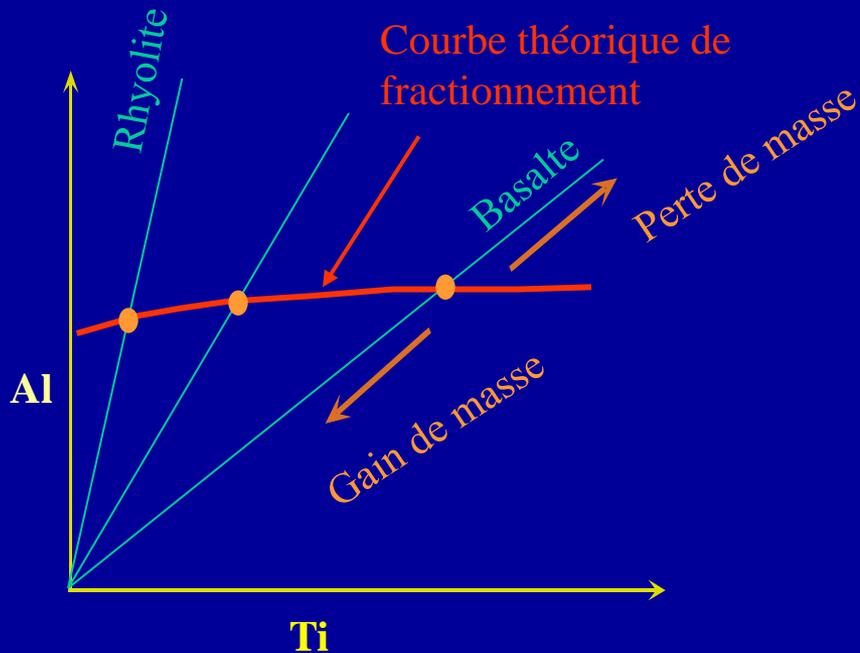
Dans les analyses lithogéochimiques, le contenu en éléments majeurs est exprimé sous la forme de pourcentage poids oxydes. Les processus métasomatiques impliquent des pertes et des gains de masses. Si des éléments sont réfractaires aux processus métasomatiques (éléments immobiles), leur quantité rapportée dans les analyses sera néanmoins affectée à cause de la variation du contenu des éléments impliqués dans les transferts chimiques de la normalisation à 100% des analyses. Ainsi, des processus de gains et de pertes de masses vont faire diminuer et augmenter respectivement le contenu en éléments immobiles. 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 roches altérée versus son protolites.

Rapport éléments immobiles



Le principe du calcul de bilan de masses repose sur l'immobilité de certains éléments durant le métasomatisme. Assumant cette immobilité, le rapport de deux éléments devrait demeurer le même pour une même roche indépendamment du degré de métasomatisme. Dans un diagramme binaire d'éléments immobiles, par exemple Al versus Ti, si la roche subit un gain ou une perte de masse durant l'altération hydrothermale, la composition de la roche se déplacera le long d'une lignée reliant sa position initiale et l'origine. Ce déplacement le long d'une telle lignée 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 masse vise donc à déterminer le degré de déplacement de la composition des roches altérées le long de lignées spécifiques d'altération. Cette méthode implique la connaissance de la composition du protolithe (précurseur) ou du moins sa modélisation.

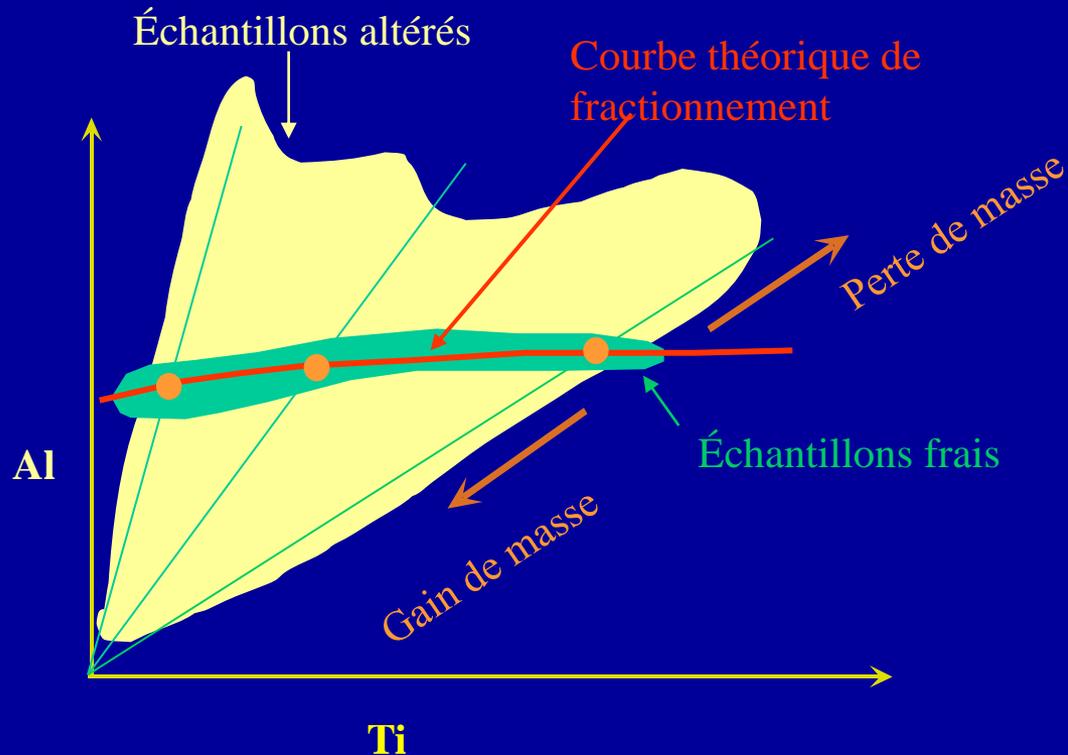
Bilans de masse à précurseurs multiples



Principe: modélise la composition du précurseur

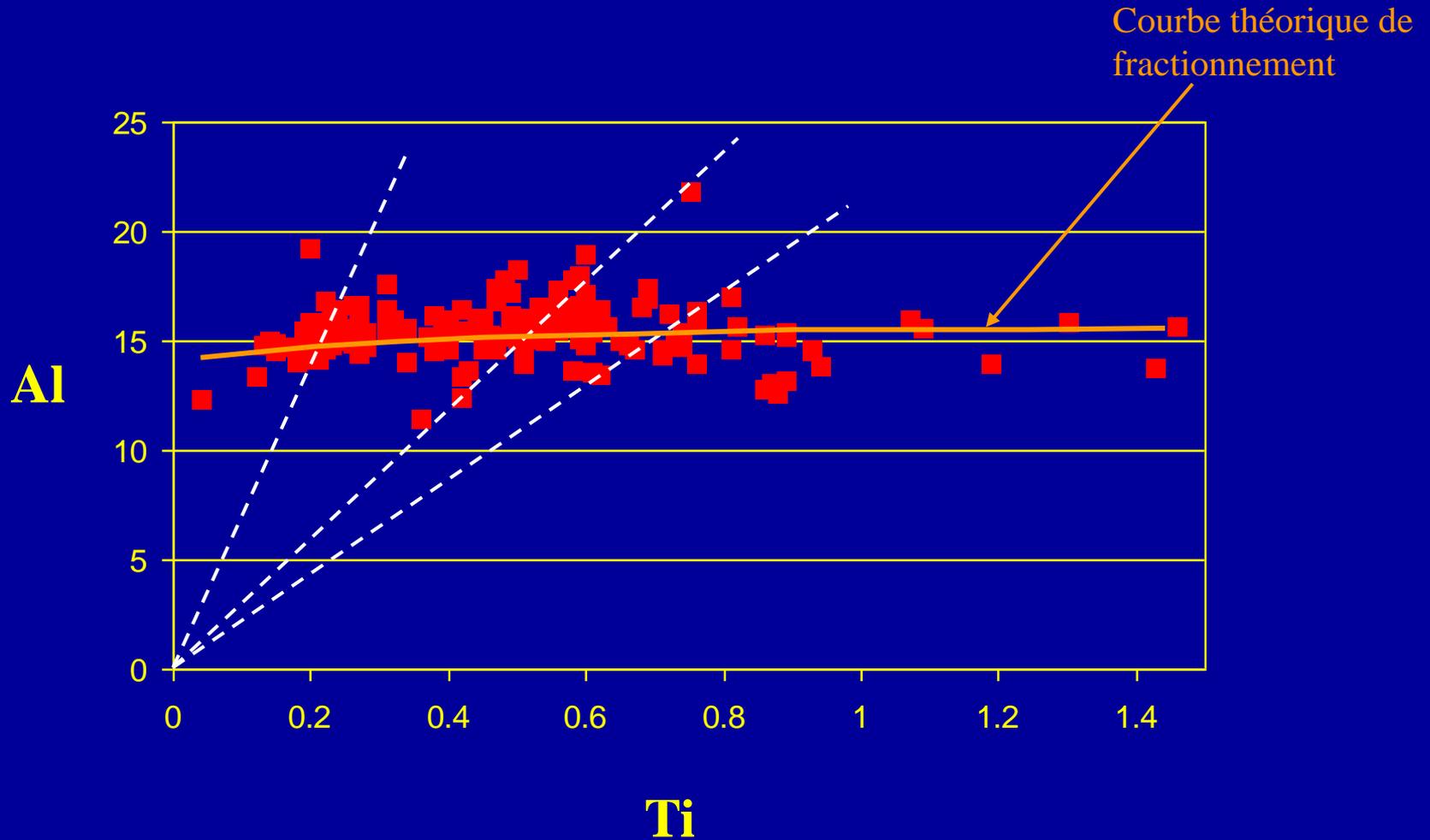
Le principe du calcul de bilan de masses à précurseurs multiples implique une modélisation de la composition initiale des roches non-altérées. Cette modélisation peut se faire de différentes manières (présentées plus loin). Une courbe de fractionnement est produite en utilisant un élément immobile et compatible (Al) versus un élément immobile mais incompatible (Ti). Cette courbe est définie par une équation du deuxième degré. Cette équation est considérée comme représentative d'une suite comagmatique de roches dont les compositions varient de basalte à rhyolite.

Altération ??? Géométrie en éventail



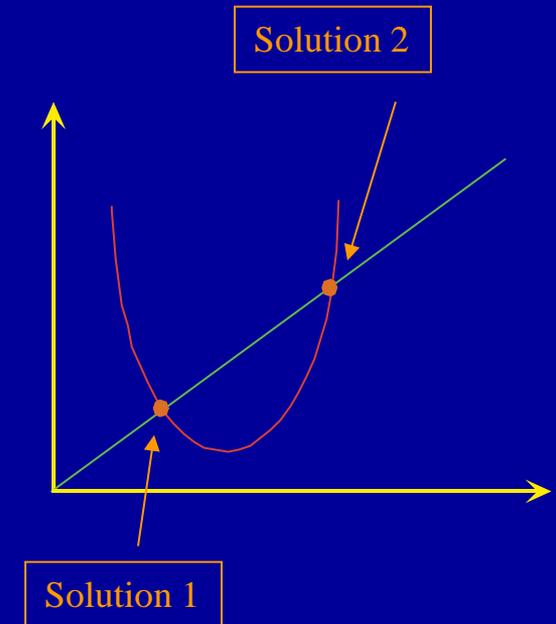
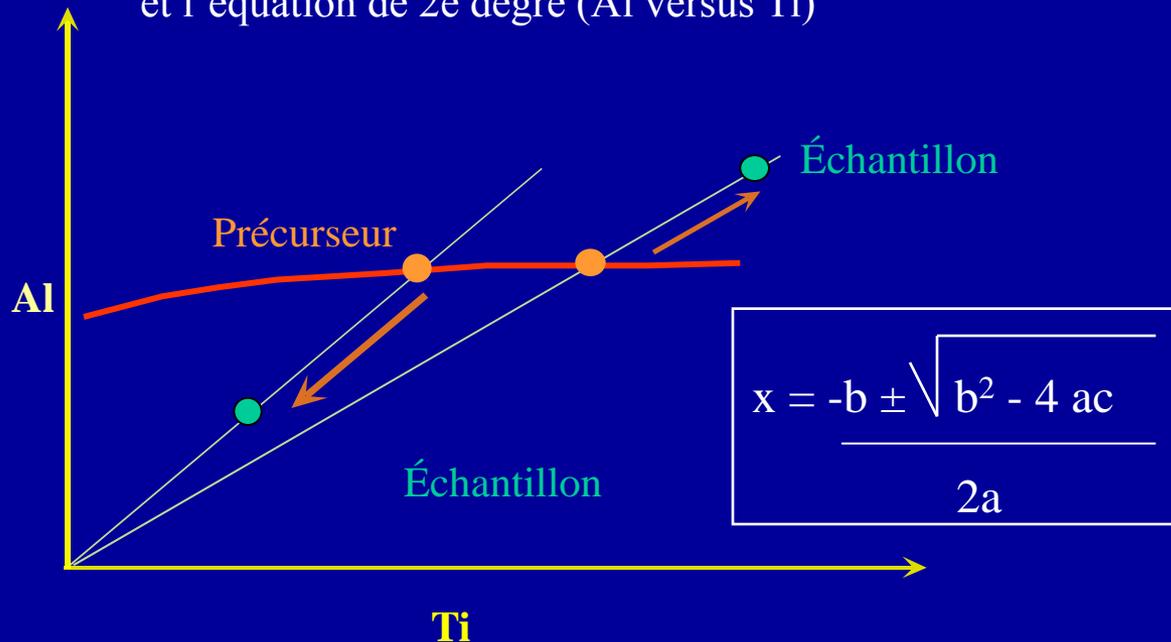
Au sein d'une banque de données contenant des échantillons altérés, la présence d'altération se manifeste par une distribution en éventail le long de lignes d'altération dans un diagramme binaire Al versus Ti. Ce teste rapide de la distribution des échantillons permet d'évaluer empiriquement l'importance des phénomènes d'altération et l'applicabilité du calcul de bilan de masses pour la banque de données. Les diagrammes suivants Al versus Ti présentent la distribution en éventail des échantillons pour les quatre banques de données traitées dans le cadre du projet.

Distribution en éventail Al_2O_3 vs TiO_2 (faible)



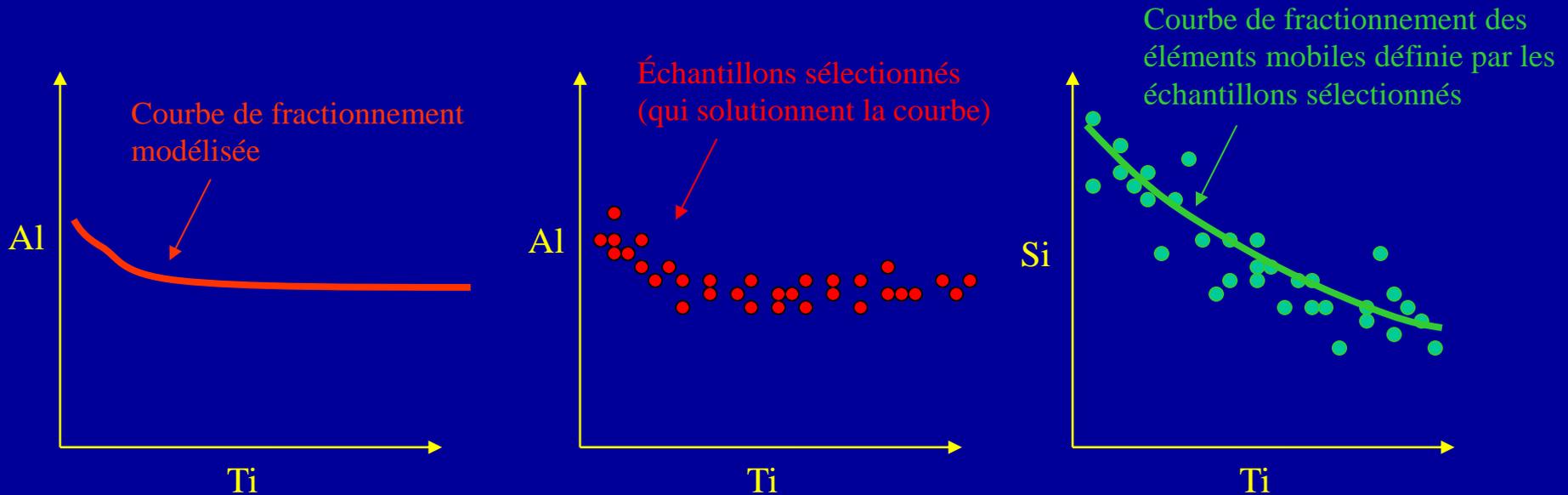
Bilans de masse à précurseurs multiples

Calcul du précurseur = Intersection entre la droite (origine) et l'équation de 2e degré (Al versus Ti)



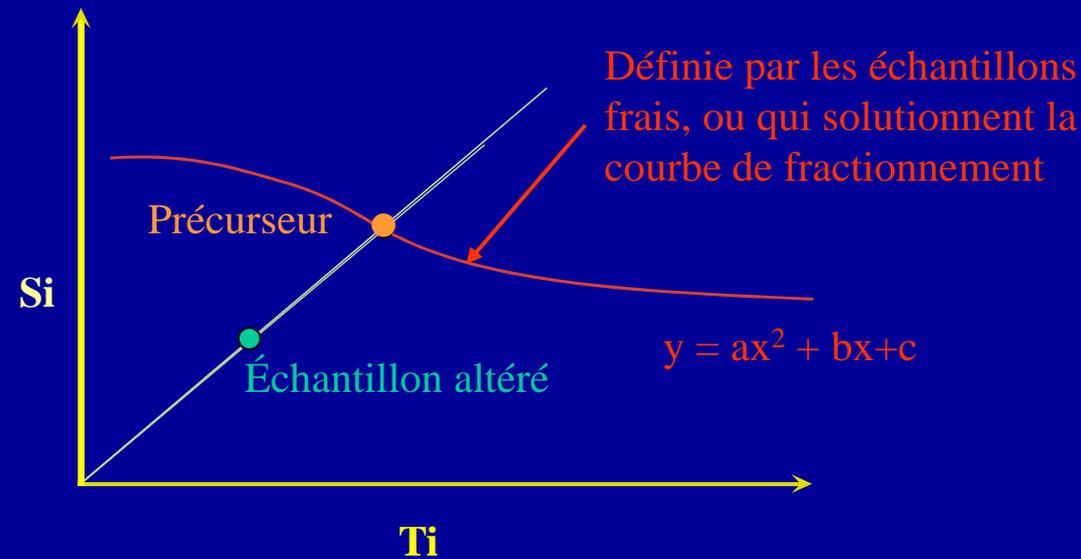
En utilisant la courbe de la différenciation magmatique (ligne rouge sur le diagramme), on peut déterminer la composition en Ti du protolite. Cette opération doit être réalisée pour tout les échantillons. La composition du protolite correspond au point d'intersection entre la courbe de différenciation et la droite passant par l'origine et le point définie par le rapport Al/Ti de la roche. La composition en Ti du protolite est déterminée mathématiquement selon la formule donnée. L'intersection entre une ligne et une parabole génère au maximum deux solutions (voir diagramme). Dans les cas concernés, l'une des solutions est irréaliste et doit être rejetée.

Définition des courbes d'éléments mobiles



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 sont sélectionnés. Ces échantillons sont considérés comme peu altérés et donc leur contenu en éléments mobiles est également considéré comme représentatif de la roche fraîche. En utilisant Excel, la courbe idéale de fractionnement des éléments mobiles est modélisée en fonction du Ti. 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.

Bilans de masse à précurseurs multiples



Gain ou perte: Si - Si Calculé

$$Si - [a(Ti_{\text{précurseur}})^2 + b(Ti_{\text{précurseur}}) + c]$$

Une fois que la composition initiale en Ti est déterminée pour chaque échantillon, on peut calculer les gains et les pertes en résolvant l'équation caractérisant la différenciation magmatique pour chaque éléments mobiles en utilisant la composition calculé en Ti du précurseur. 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. 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, en valeur absolue, des gains et des pertes pour les éléments mobiles suivants: Si, Fe, Mg, Na, Ca et K. 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 élevé.

Bilans de masse à précurseurs multiples: Résultats

Gain (+) et Perte (-) des éléments mobiles en %

Si - Fe - Mg - Na - Ca - K

INDICE VARIATION = Σ Si-Fe-Mg-Na-Ca-K
(en valeur absolue)

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, en valeur absolue, des gains et des pertes pour les éléments mobiles suivants: Si, Fe, Mg, Na, Ca et K. 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 élevé.

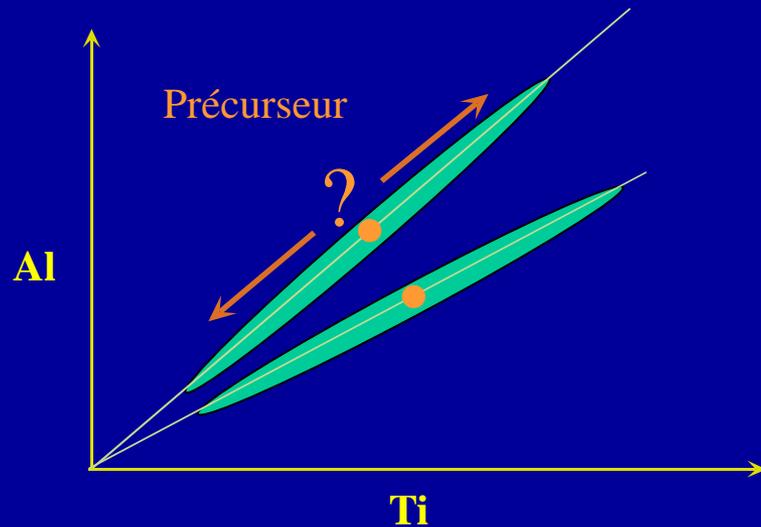
Aspect qualitatif de la méthode

1- modélisation du précurseur sur diagramme Al-Ti
(facteur de correction)

2 - modélisation de la composition en éléments mobiles
(Si, Na, K, Ca, Fe, Mg, Mn) du précurseur

Degré de confiance de la composition des précurseurs
augmente avec la quantité d'échantillons frais dans la
banque de données.

Al et Ti du précurseur: définition



Méthodes directes

- Pétrographie (LM)
- Équivalent distal

Méthodes indirectes

- Sélection d'échantillons peu altérés dans la banque
- Courbes de fractionnement théoriques ou sectorielles
- Méthode inverse (BMR)



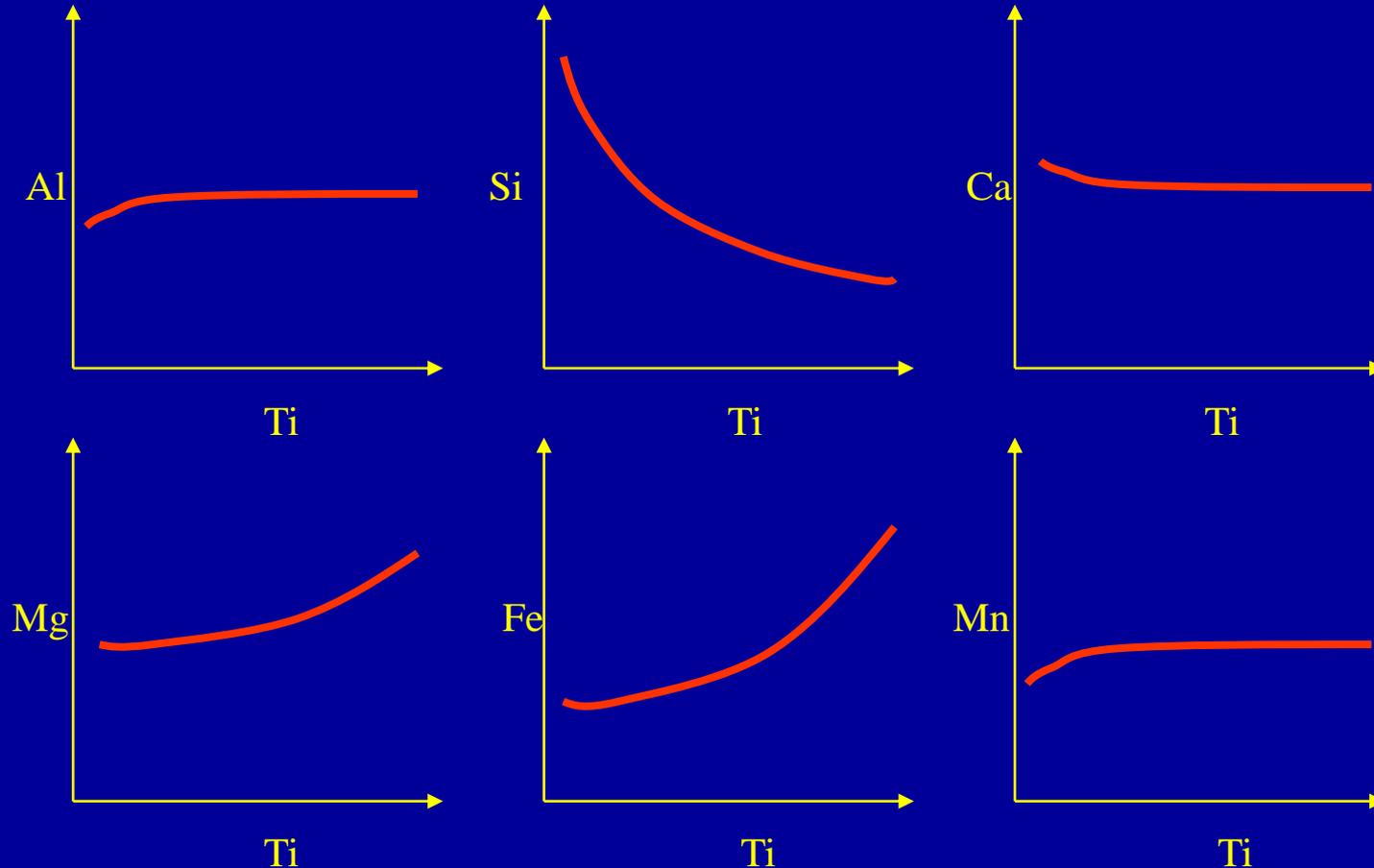
La détermination de la composition chimique des précurseurs est le paramètre le plus qualitatif du calcul de bilan de masses. Deux groupes de méthodes sont utilisés, soit celles directes et celles indirectes. Les méthodes directes reposent sur l'utilisation de la composition chimique d'une ou de plusieurs 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 l'échantillon 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 faire à partir de trois approches : 1) par une sélection de roches peu altérées dans la banque de données; 2) directement en utilisant une courbe modèle de fractionnement; et 3) par méthode inverse en testant différentes courbes. Dans le cas de la banque de donnée de Comtois, la méthode du bilan de masse relatif (BMR) a été utilisée. Cette méthode est décrite en détail dans les diapositives suivantes.

Méthode inverse: Prémisse du BMR

Suite magmatique
de roches fraîches



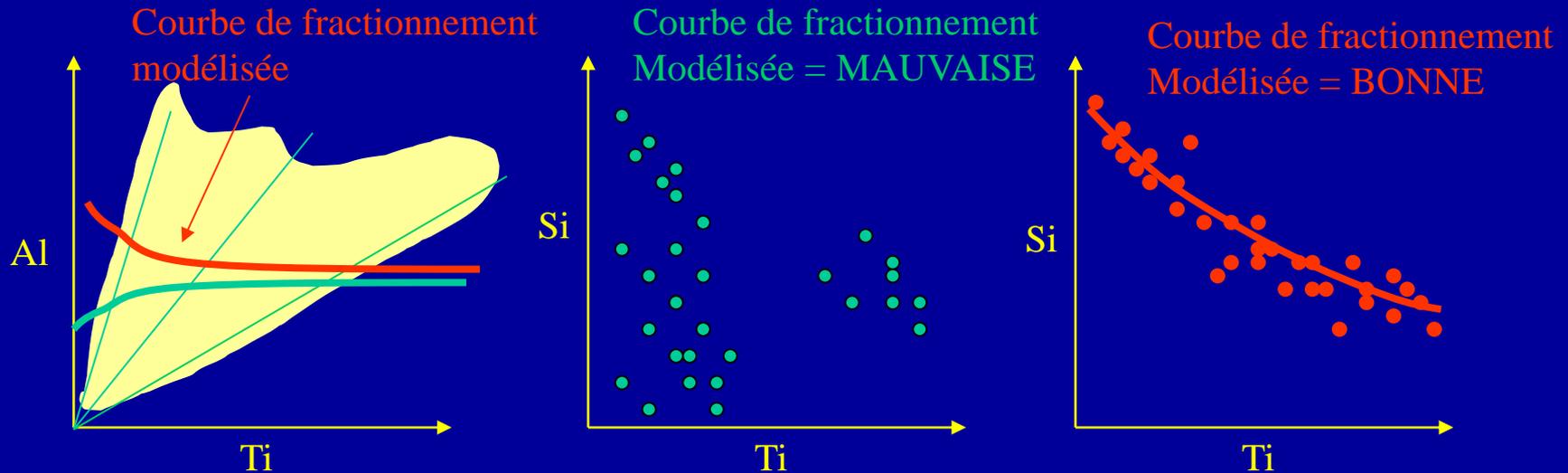
Distribution cohérente des
Éléments en fonction du Ti



La méthode du bilan de masses relative vise à déterminer des courbes de différenciation par la méthode inverse. La prémisse de base est que les échantillons peu altérés définissent des courbes de fractionnement cohérentes des éléments mobiles. On entend ici par courbes cohérentes, une distribution linéaire ou de deuxième ordre des échantillons dans un diagramme des éléments mobiles (Na, Si, K, Fe, Mg, Ca) versus Ti.

Méthodologie du BMR

- 1- Modélise une courbe de fractionnement
- 2- Définie son équation (Excel): 1er ou 2e ordre
- 3- Extrait les échantillons qui solutionnent l'équation selon un certain degré de tolérance.
- 4- Test du degré de cohérence des éléments Si, Fe, Mg, Mn, Ca versus Ti.



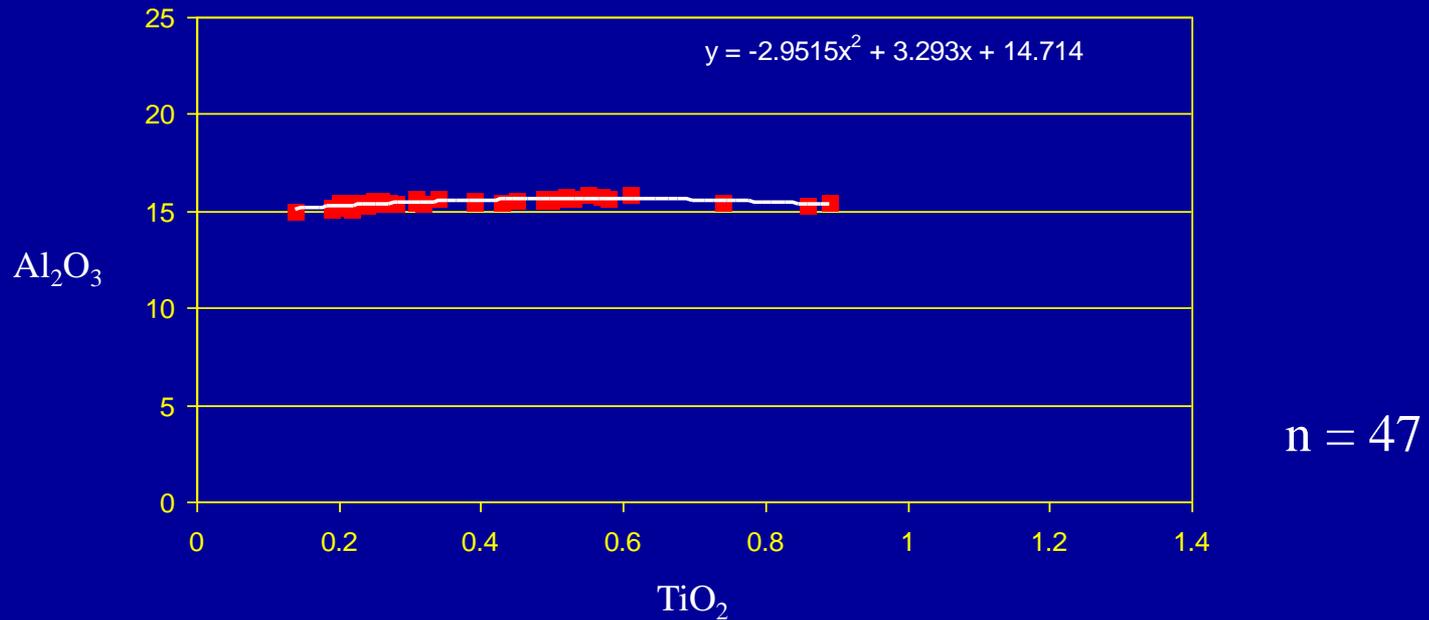
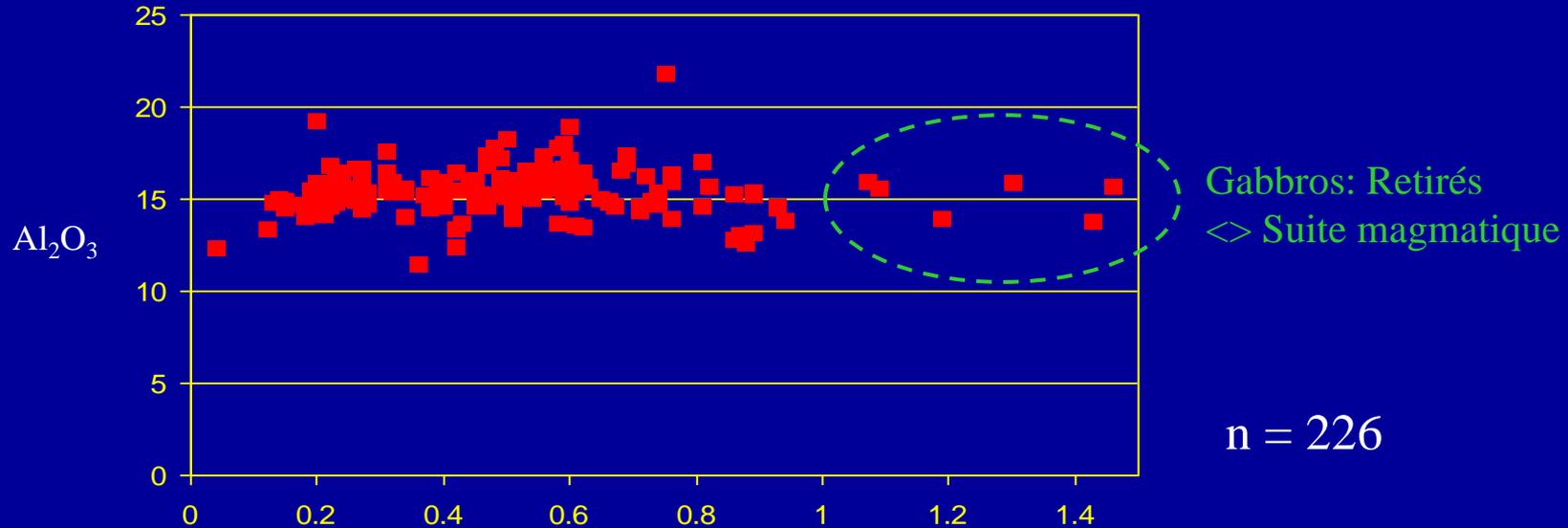
1- On définit une courbe test dans le diagramme Al versus Ti des échantillons. Au sein de la distribution en éventail des échantillons, il devrait se dessiner des groupements d'échantillons définissant une courbe cohérente des échantillons frais.

2- On détermine l'équation de cette courbe test en utilisant Excel. Pour se faire, on isole quelques échantillons représentatifs et on les utilise dans un nouveau diagramme pour définir l'équation du premier ou deuxième ordre.

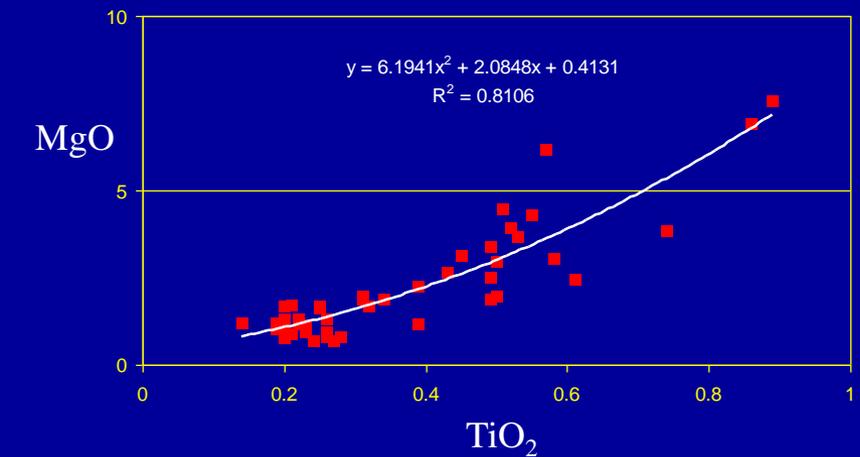
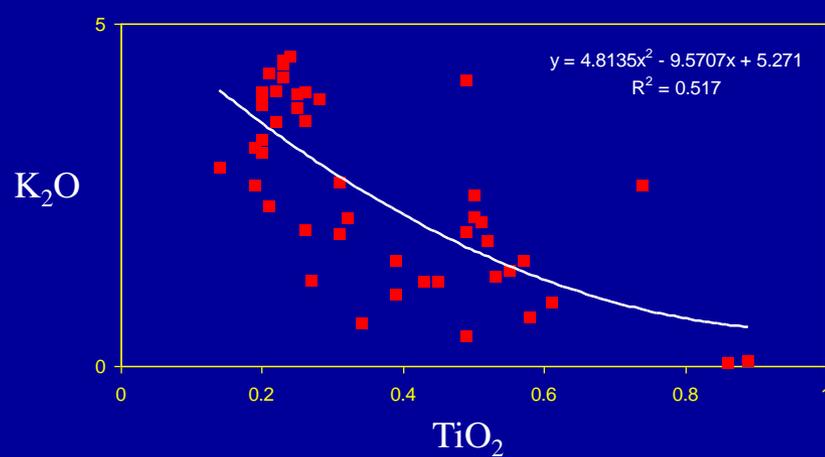
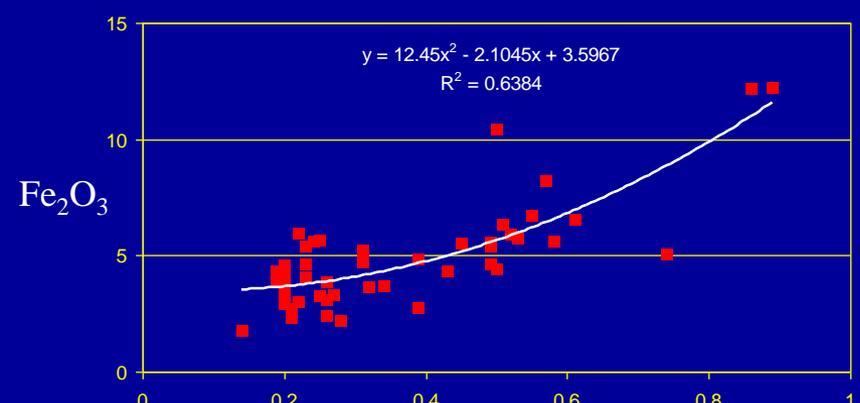
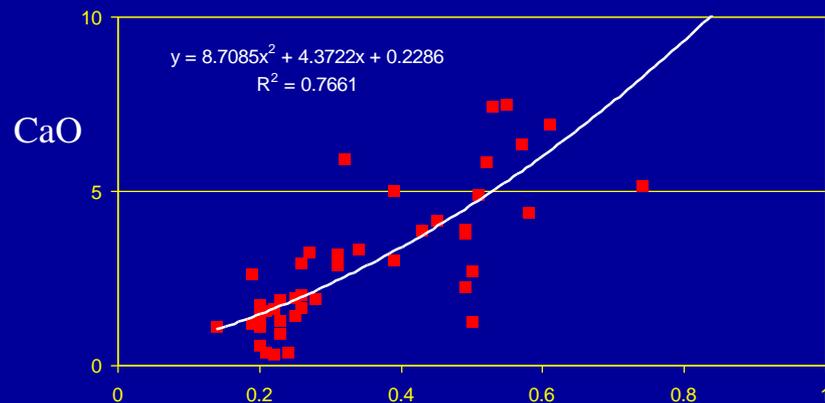
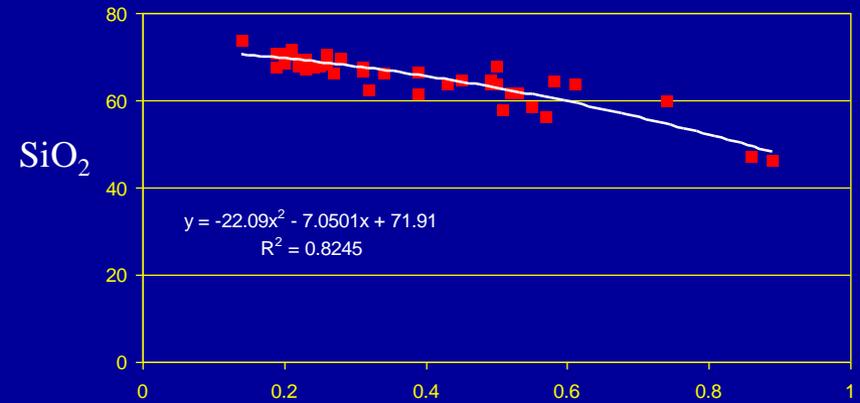
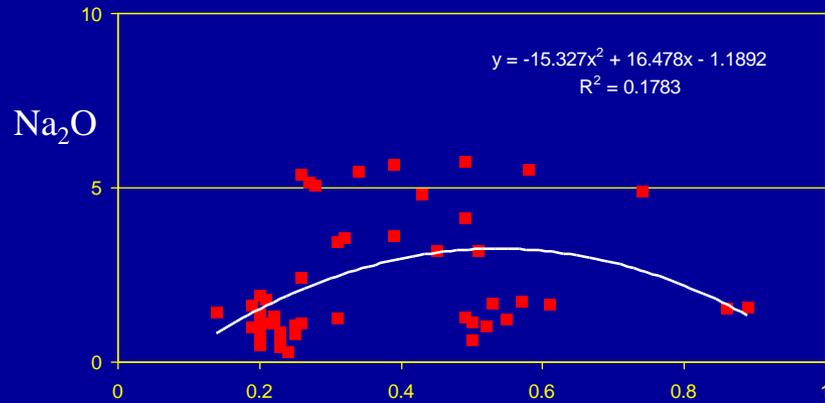
3- En utilisant cette équation, on extrait de la banque de données les échantillons qui solutionnent l'équation selon un certain degré de tolérance. Le degré de tolérance est fonction du nombre d'échantillon de la banque de données. Par exemple, avec un banque volumineuse, on peut se permettre un faible niveau de tolérance puisque plusieurs échantillons vont nécessairement solutionner l'équation.

4- On projette les échantillons sélectionnés dans des diagrammes éléments mobiles (Na, Si, K, Fe, Mg, Ca) versus Ti pour tester la cohérence des courbes en fonction de la prémisse de base. On recommence les étapes 1 à 4 pour arriver, par essais et erreurs, à sélectionner les échantillons qui répondent aux critères.

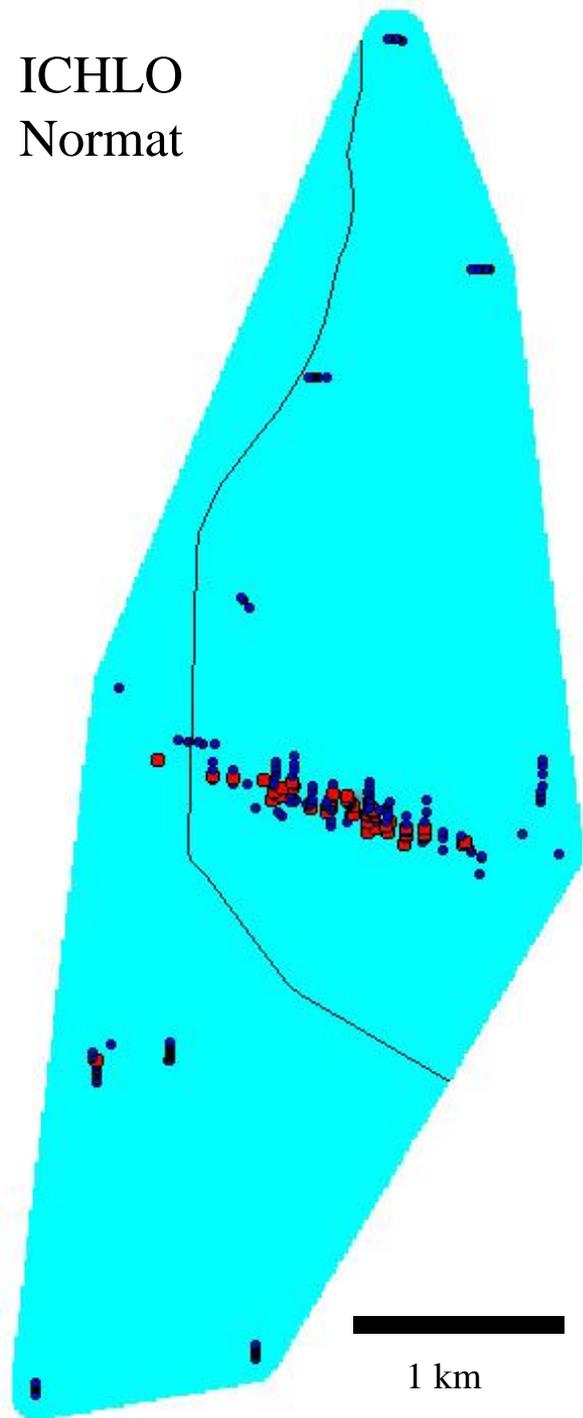
Définition de la courbe de fractionnement



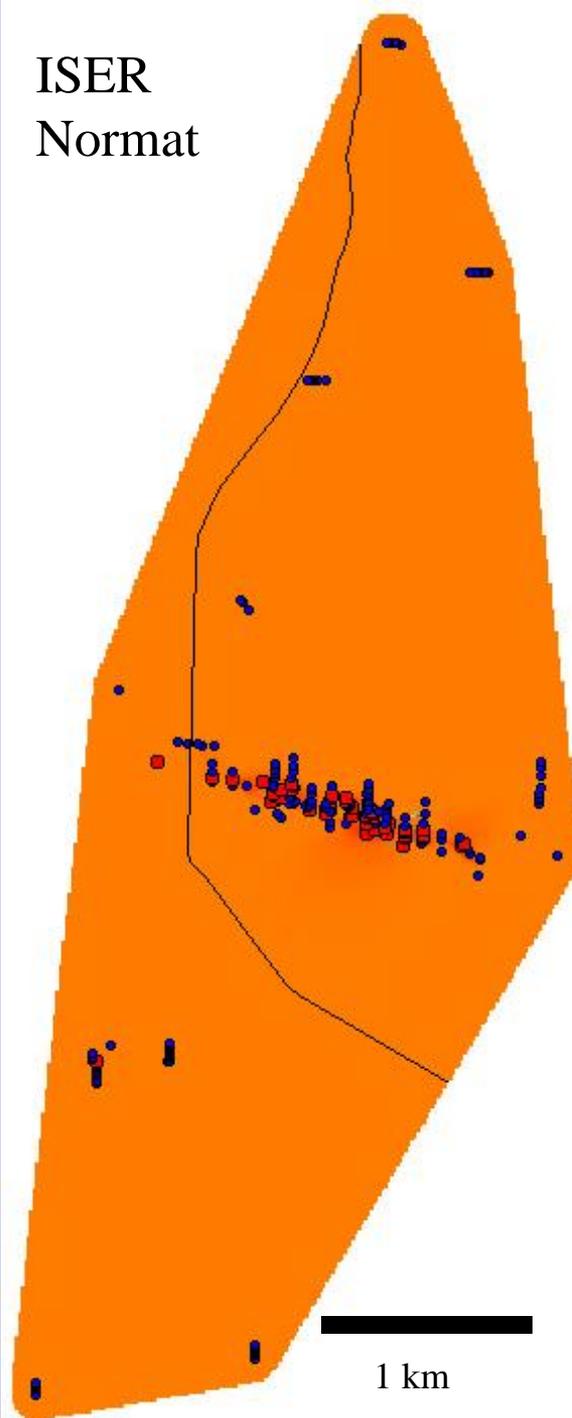
Équations quadratiques définies pour le BMR



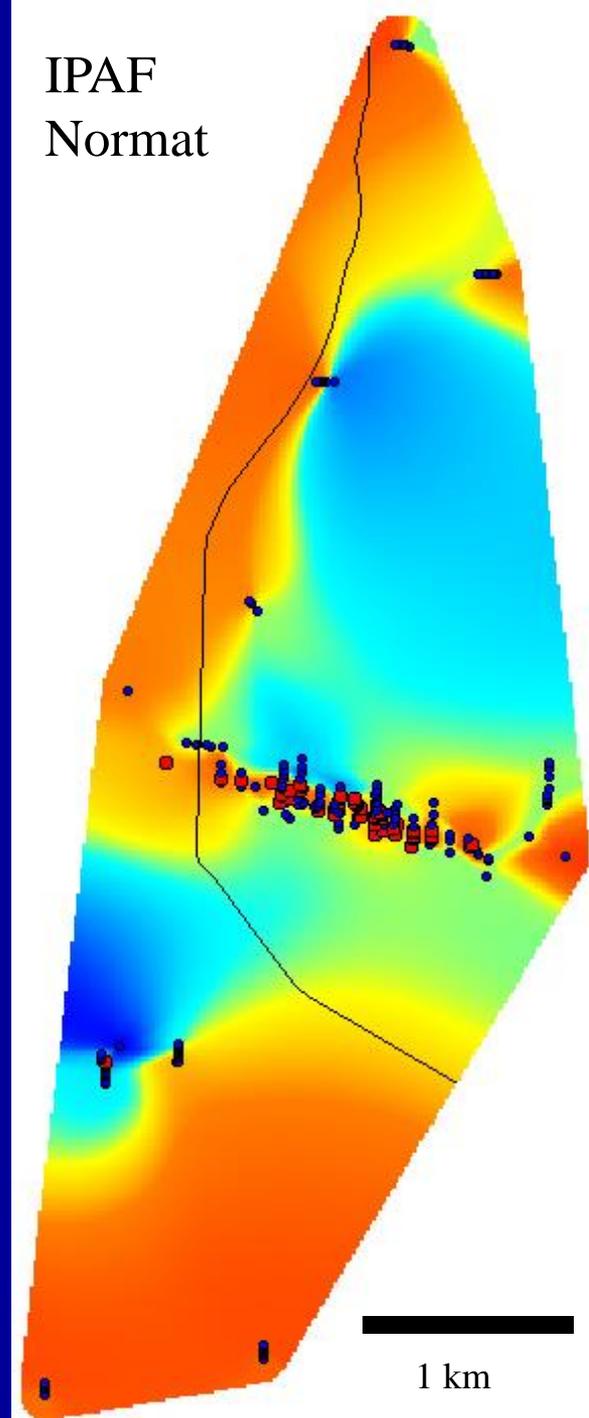
ICHLO
Normat



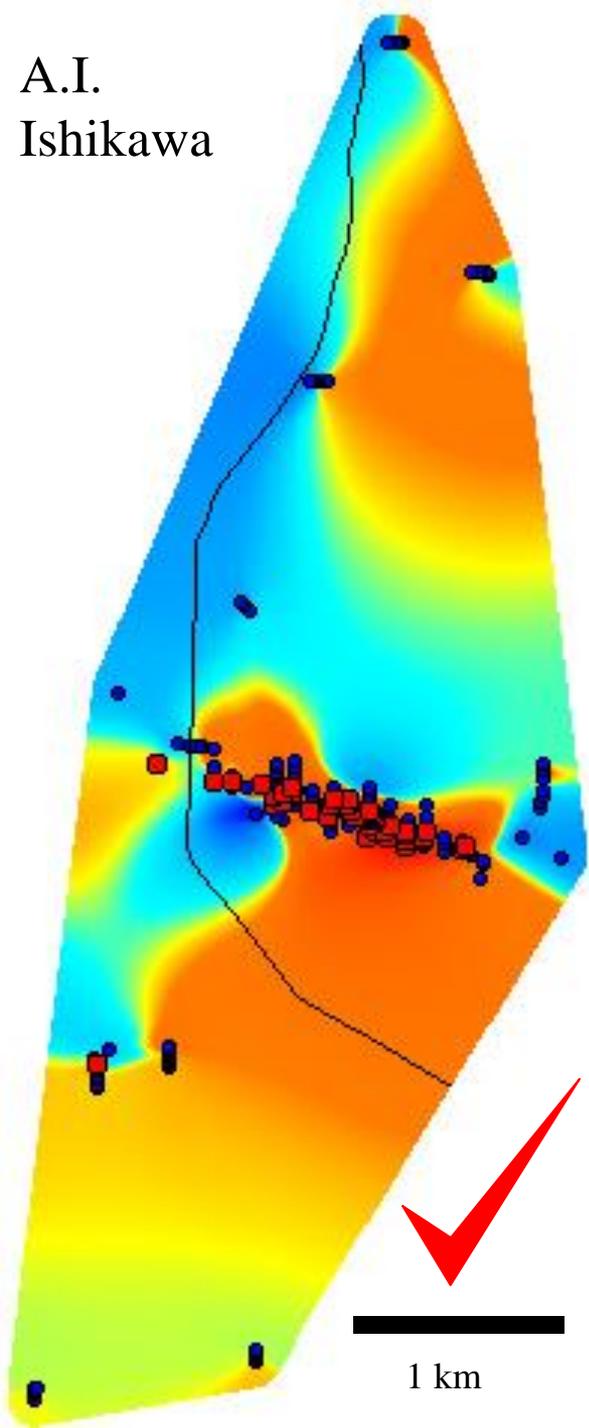
ISER
Normat



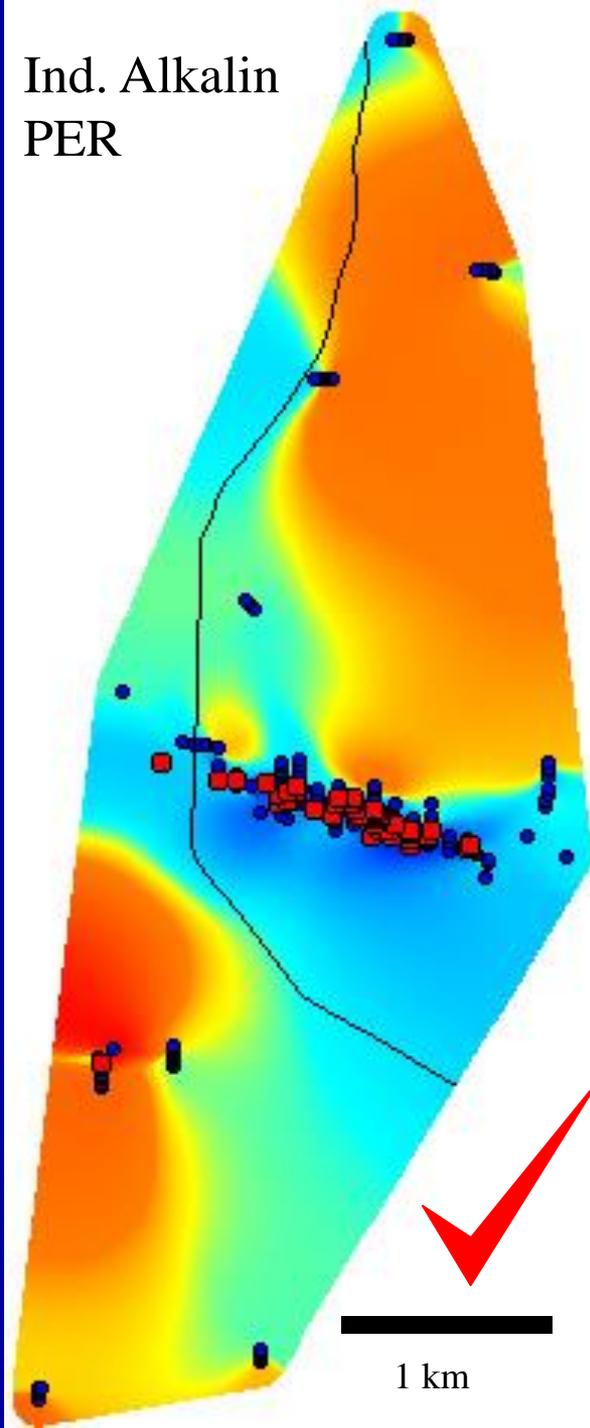
IPAF
Normat



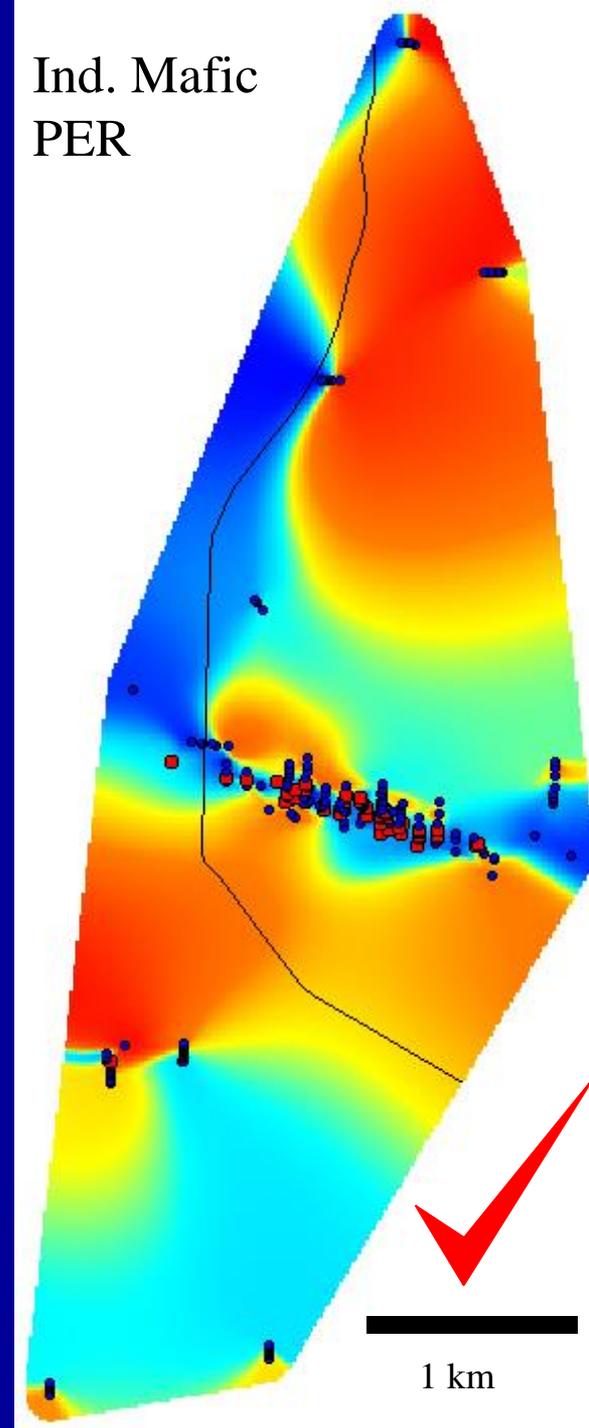
A.I.
Ishikawa

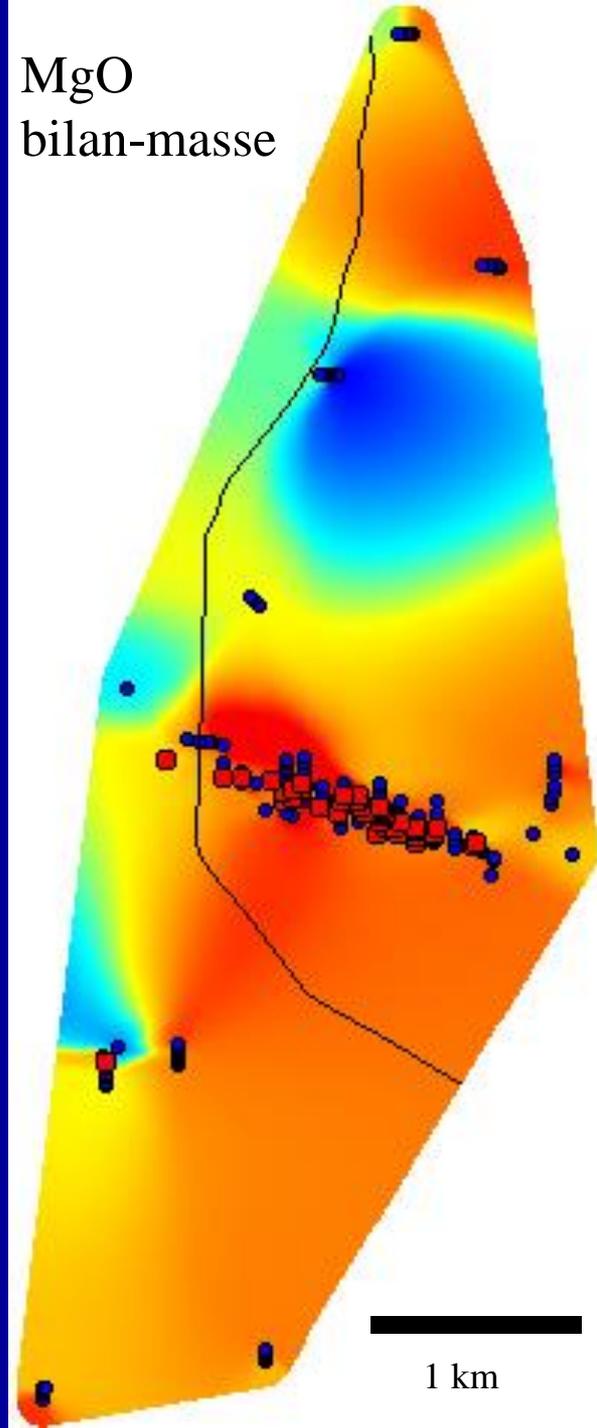
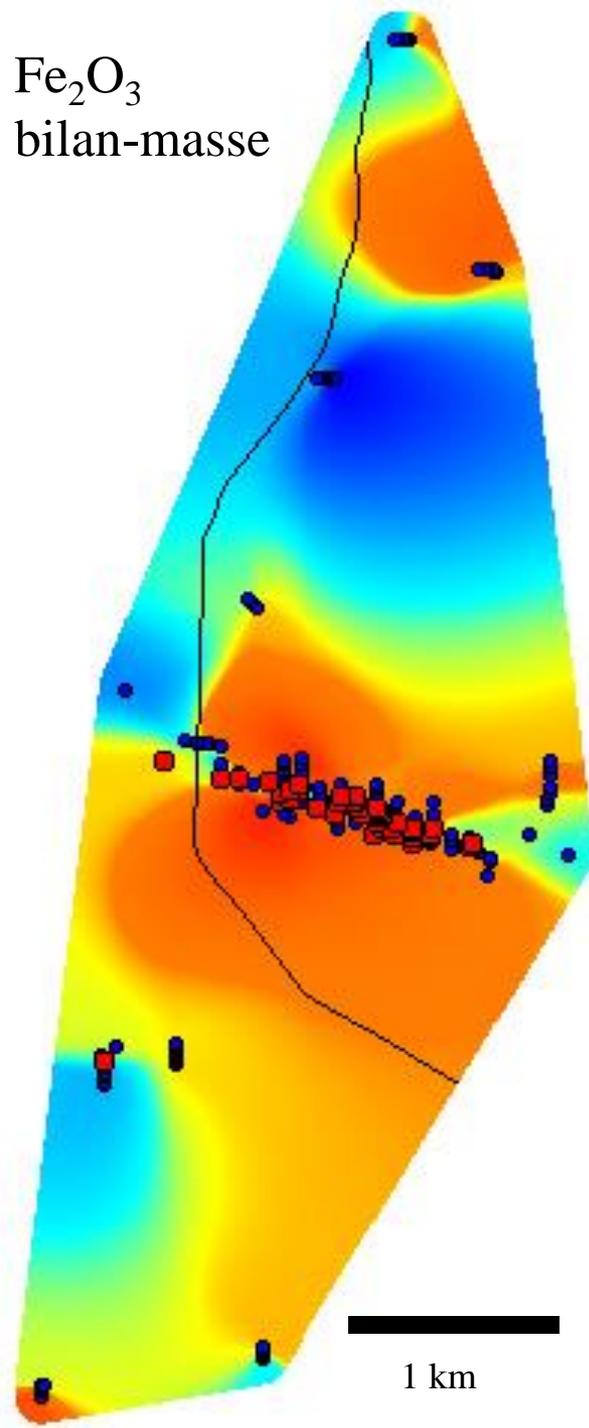
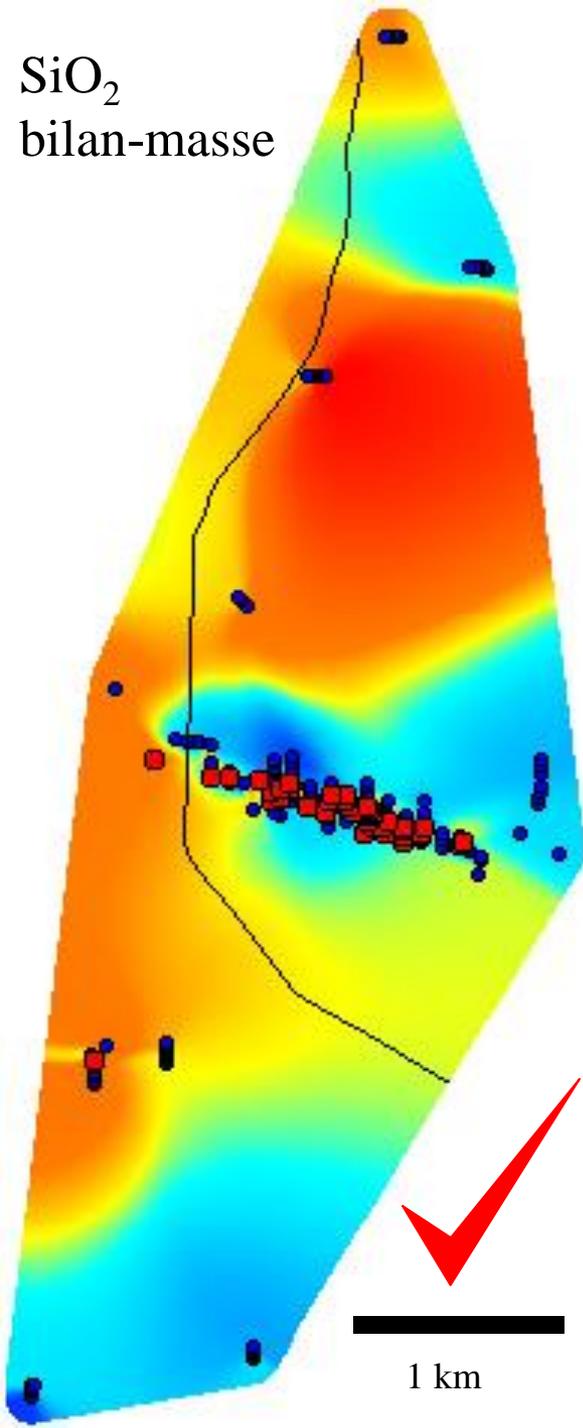


Ind. Alkalin
PER

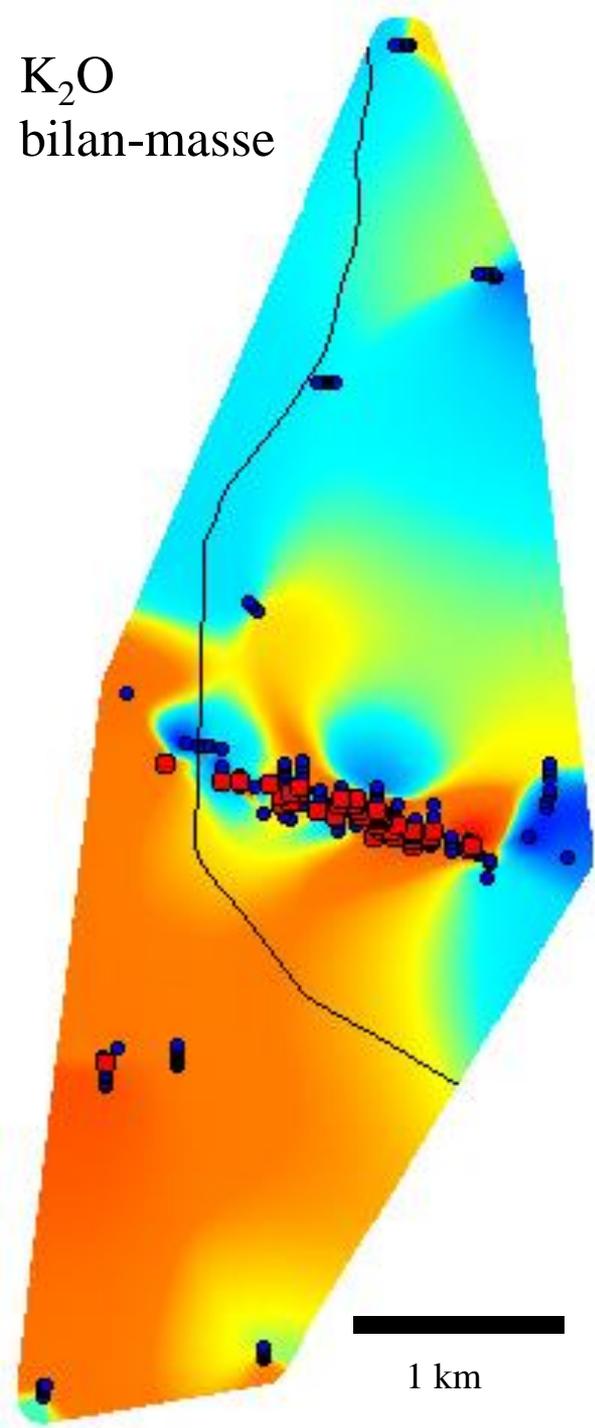


Ind. Mafic
PER

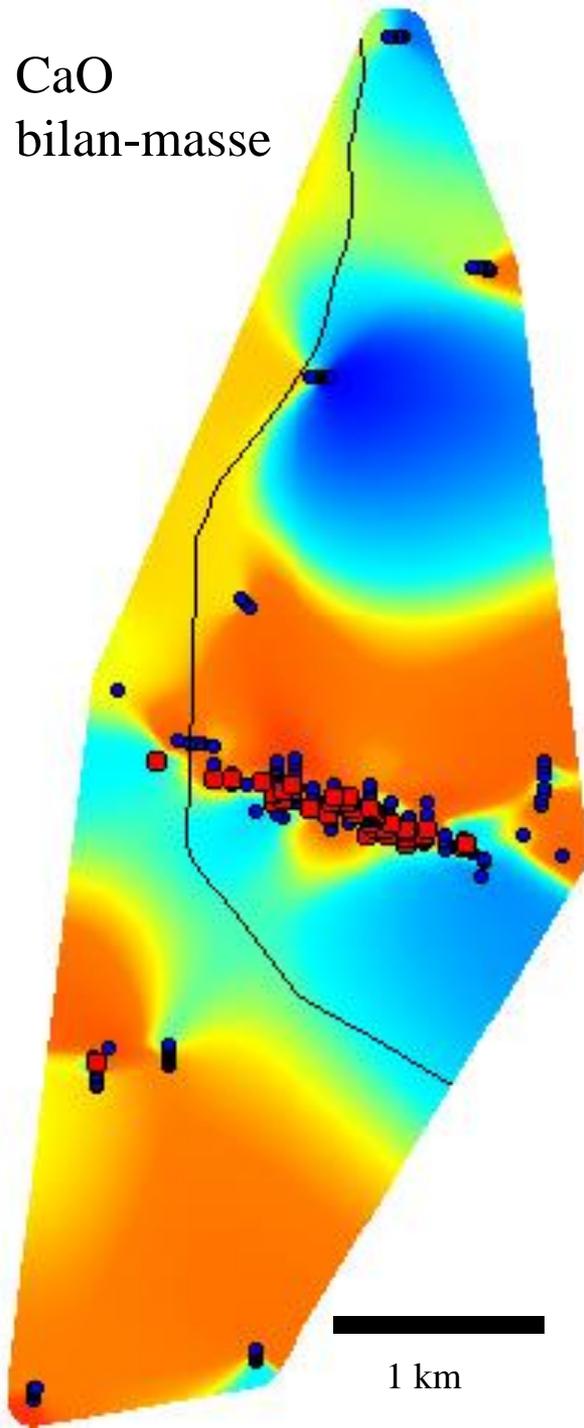




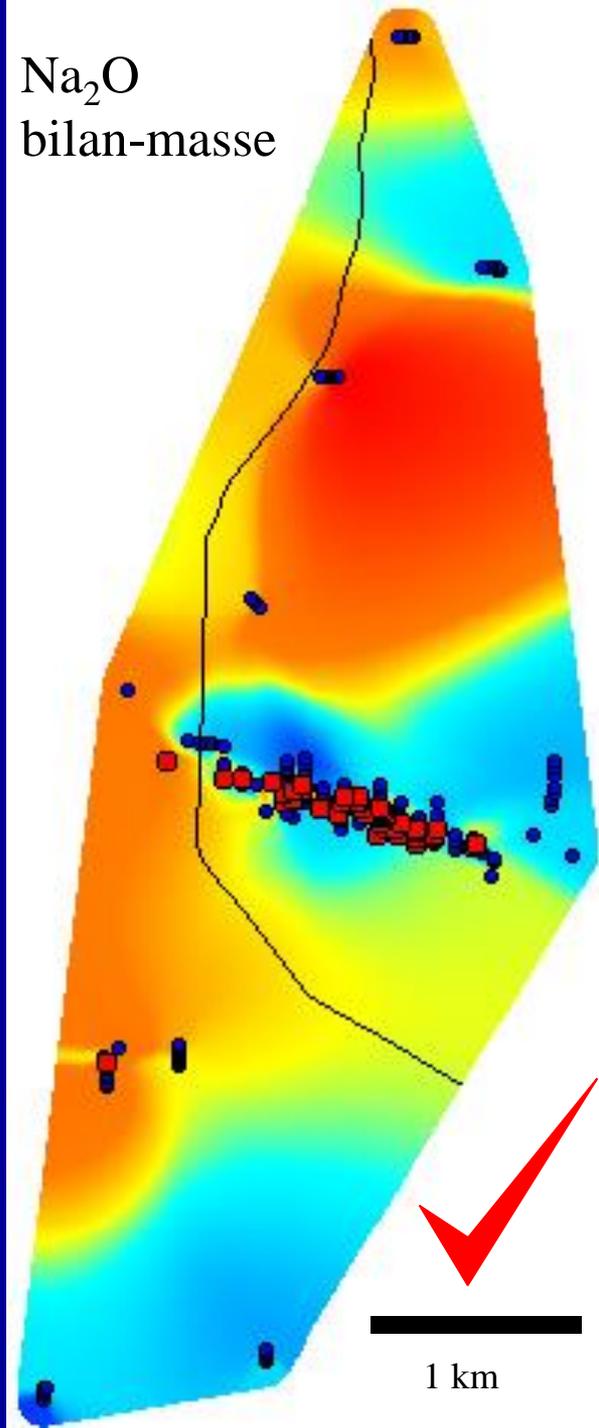
K_2O
bilan-masse



CaO
bilan-masse



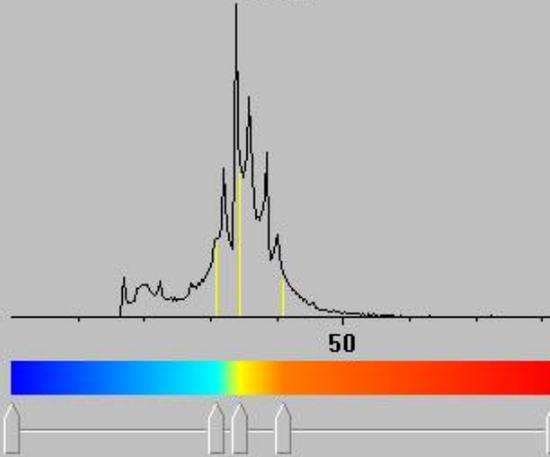
Na_2O
bilan-masse



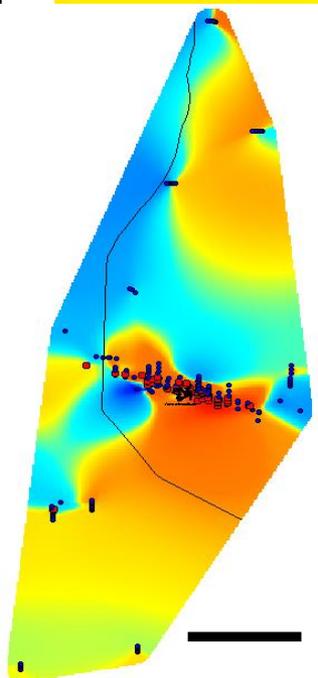
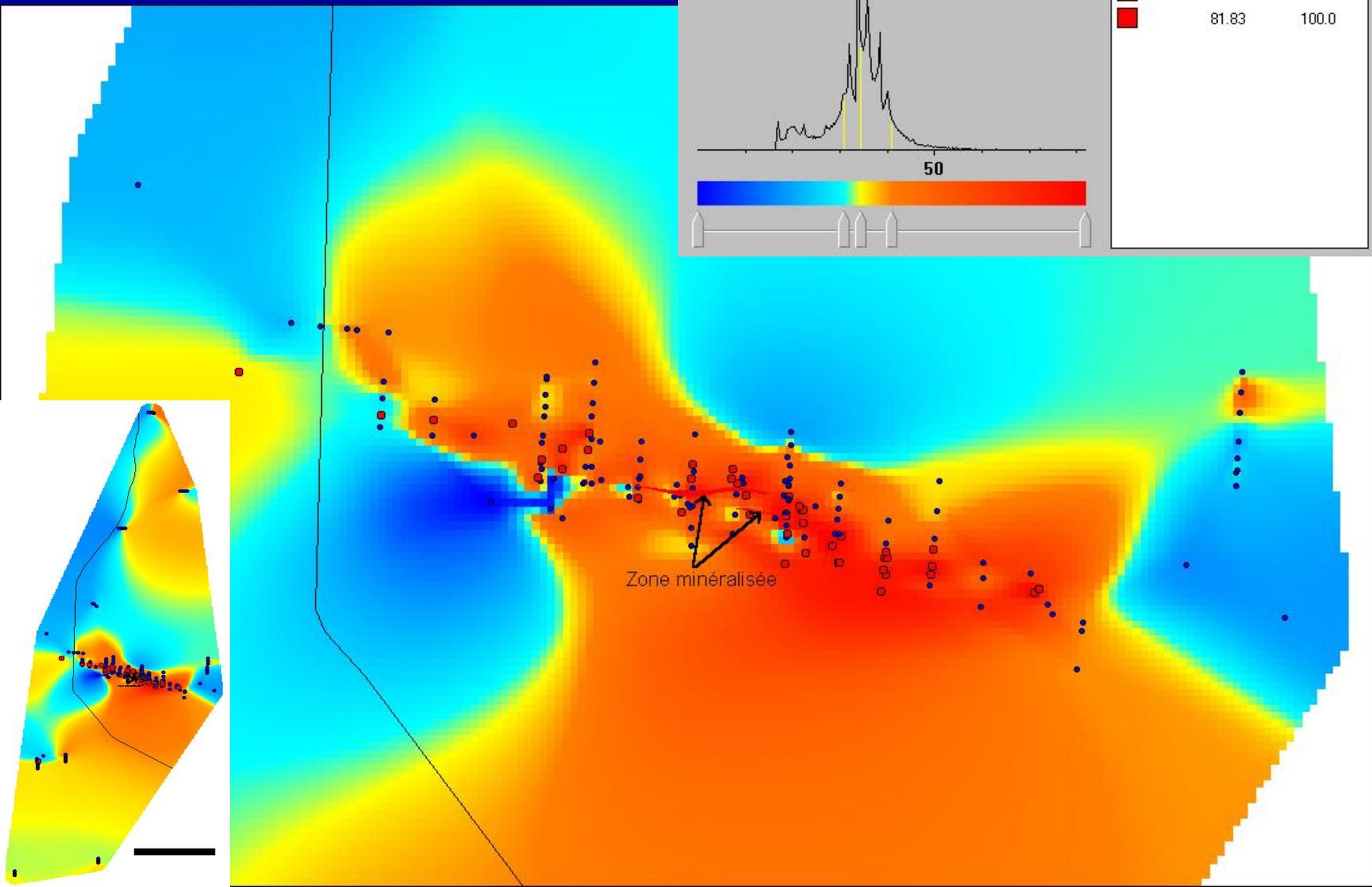
A.I. (homogénéité)

Data Histogram

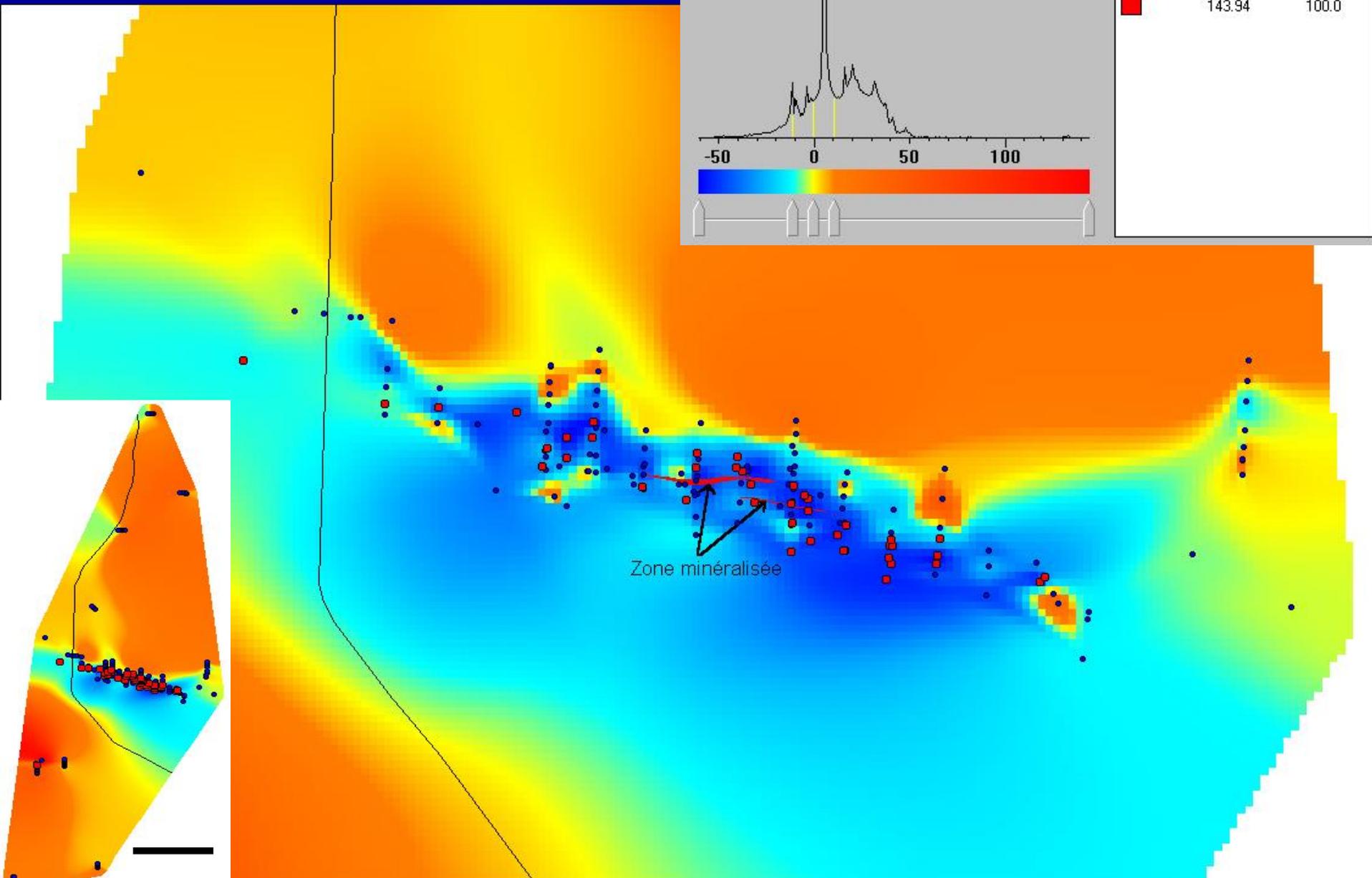
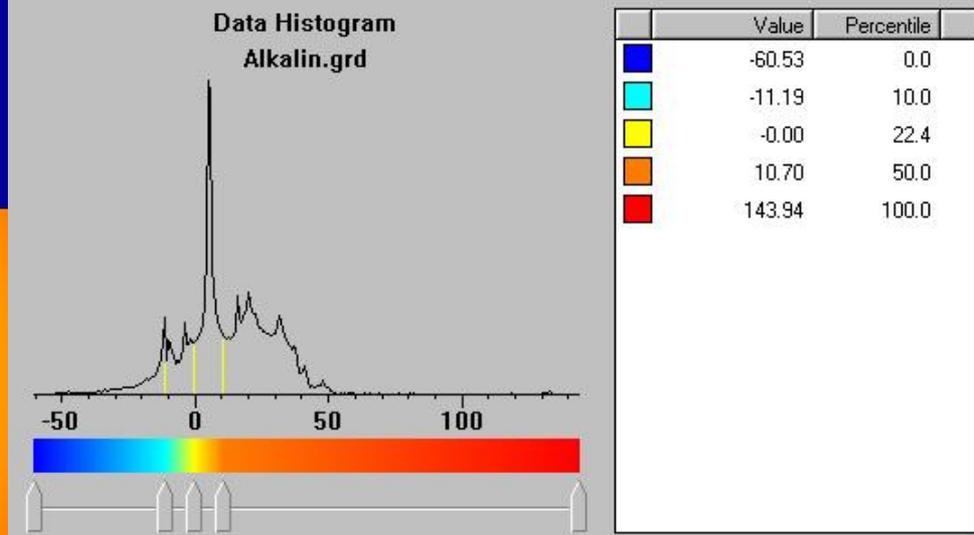
A_I_.grd



	Value	Percentile
■	0.04	0.0
■	30.99	25.0
■	34.47	50.0
■	41.11	90.0
■	81.83	100.0

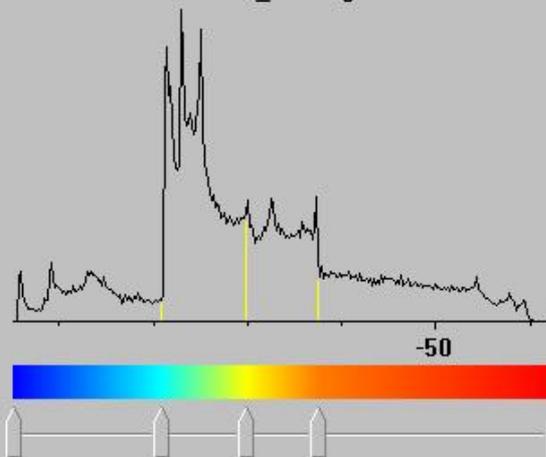


PER-Alkalin (homogénéité)

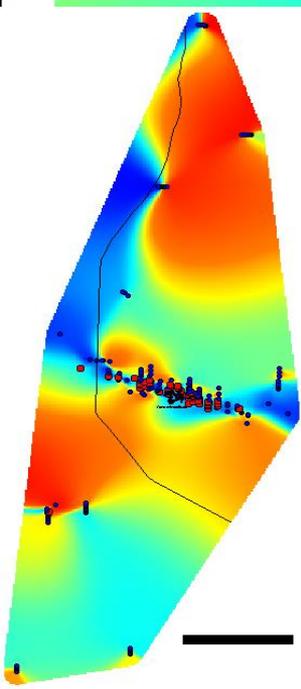
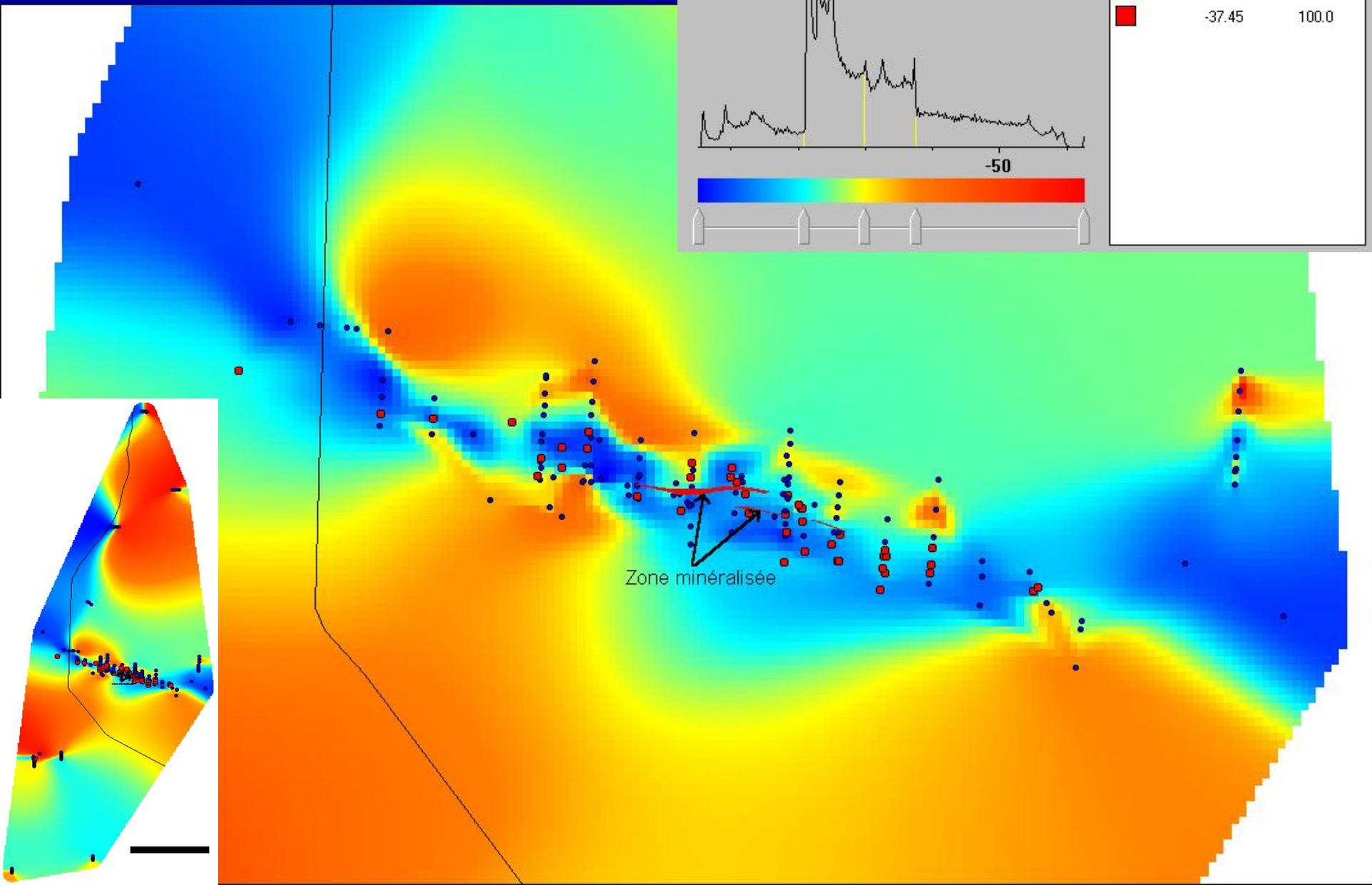


PER-Mafic (homogénéité)

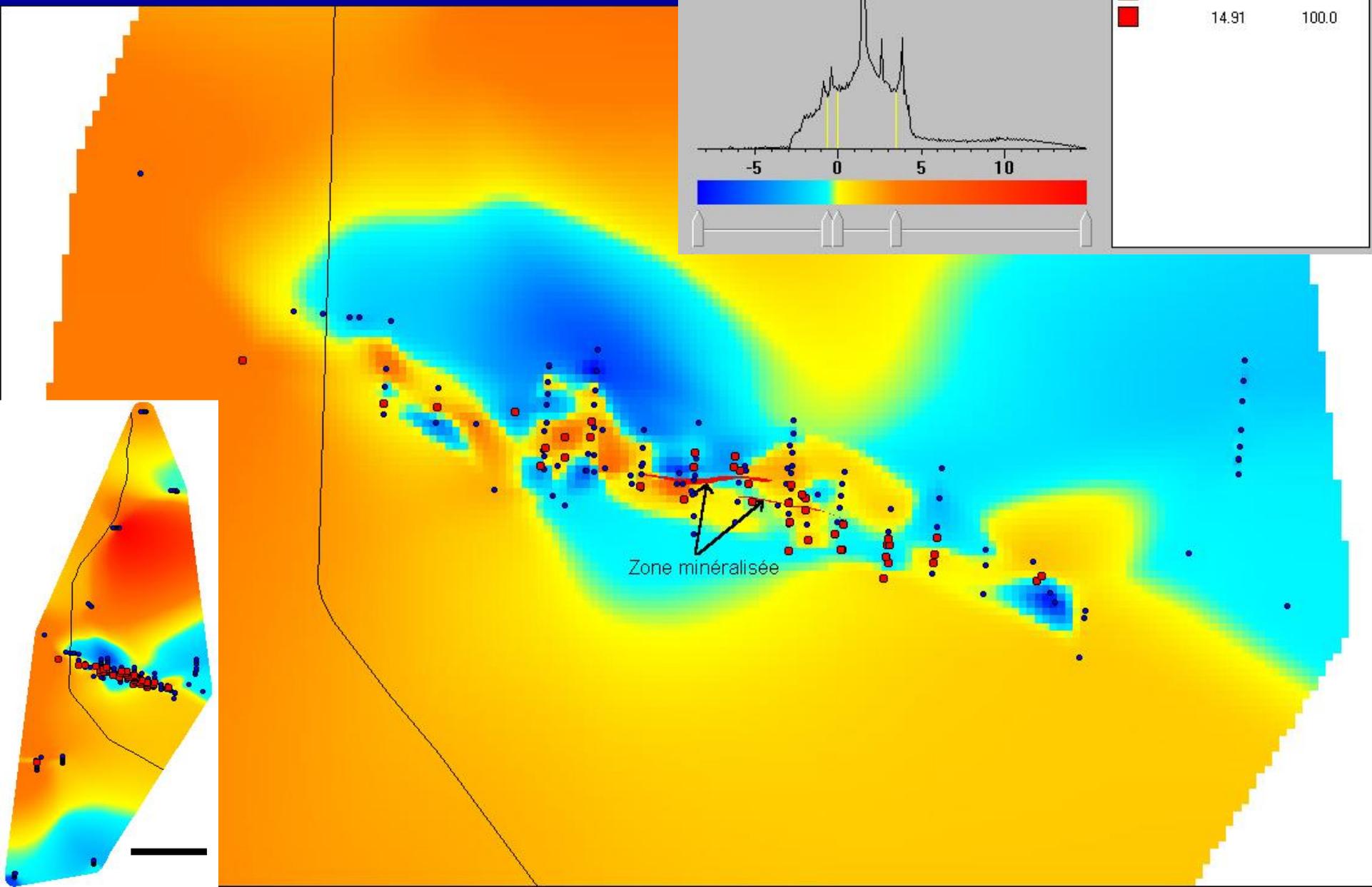
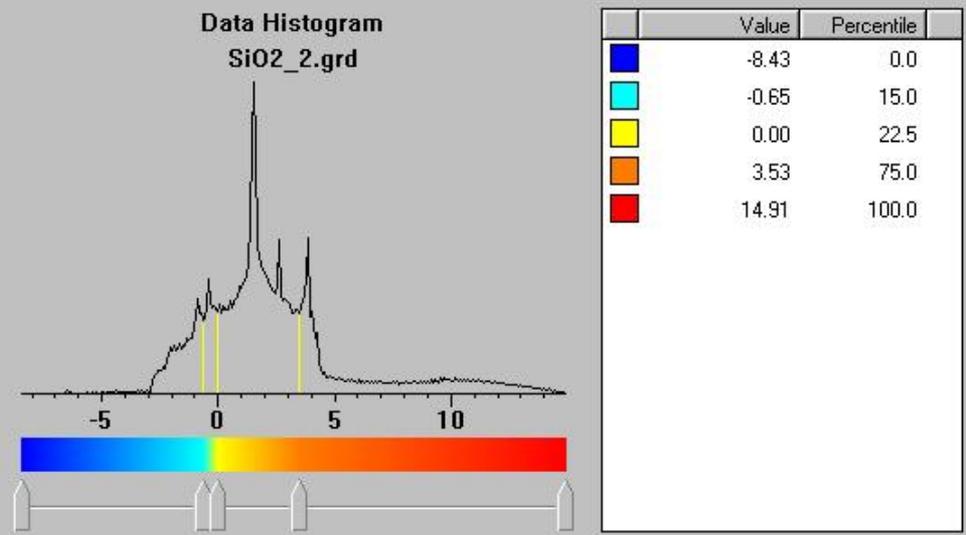
Data Histogram
Indice_Mafic.grd



	Value	Percentile
■	-94.83	0.0
■	-79.15	13.2
■	-70.16	55.4
■	-62.32	76.7
■	-37.45	100.0

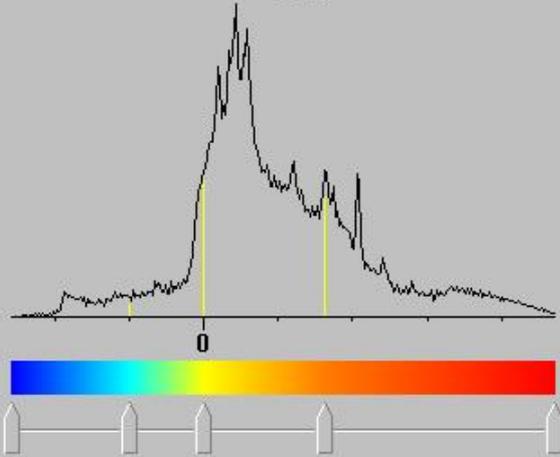


Si-BMR (homogénéité)

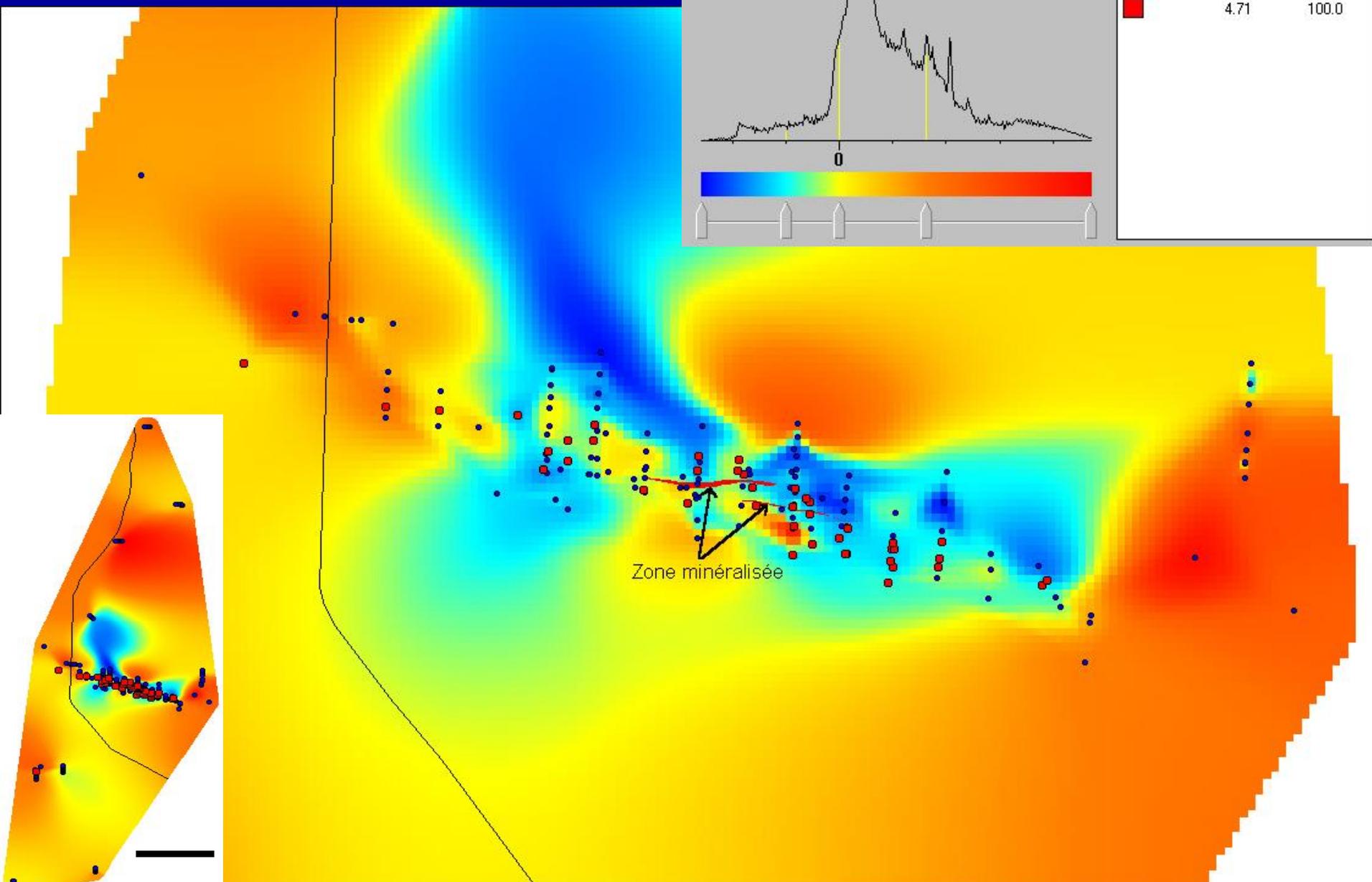


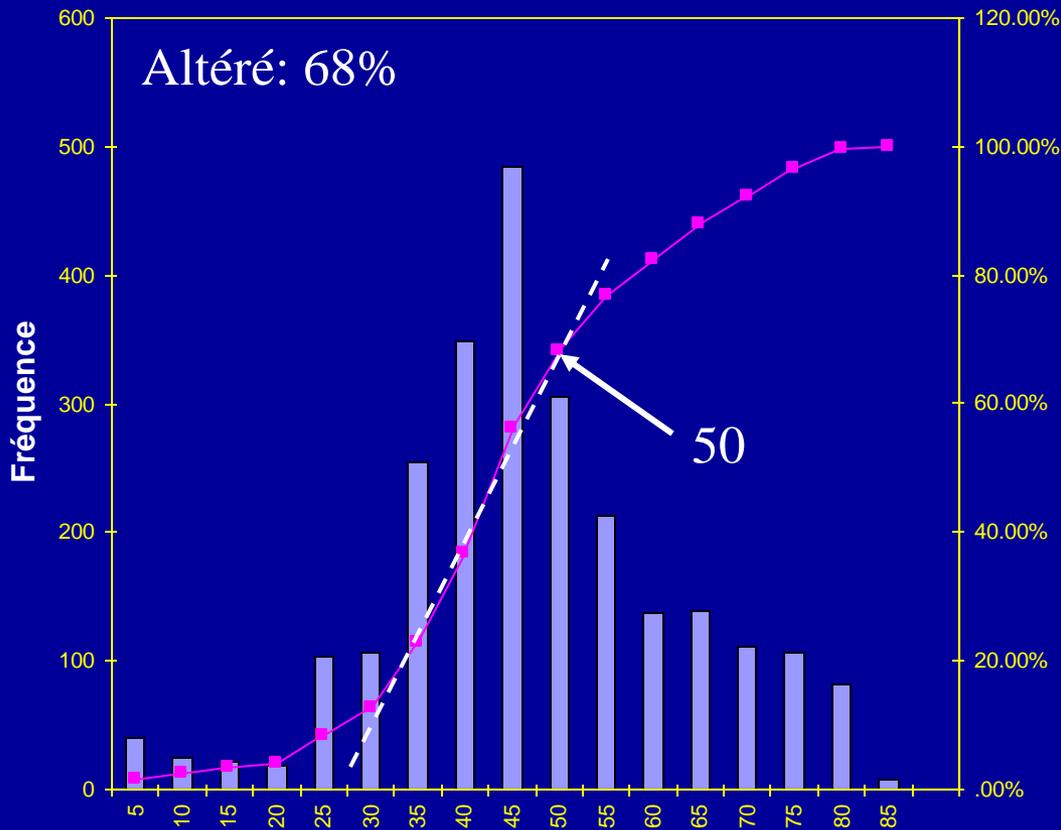
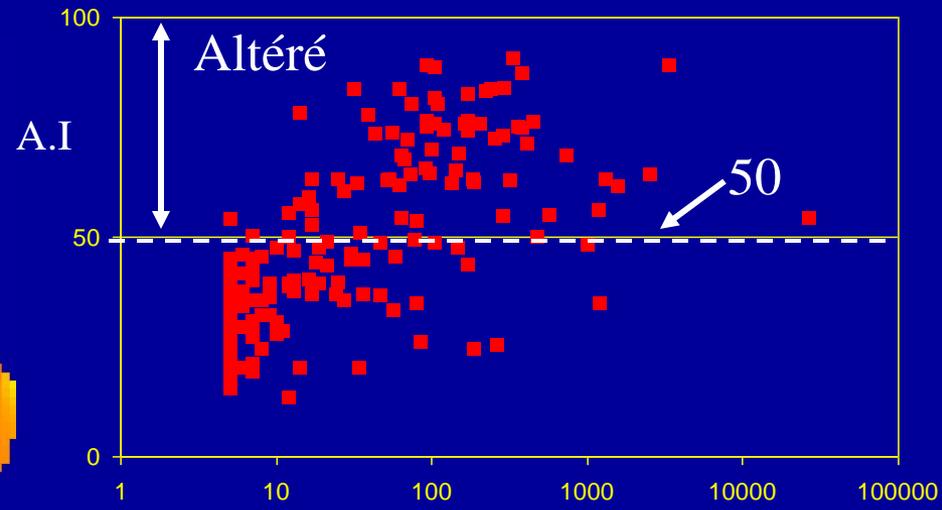
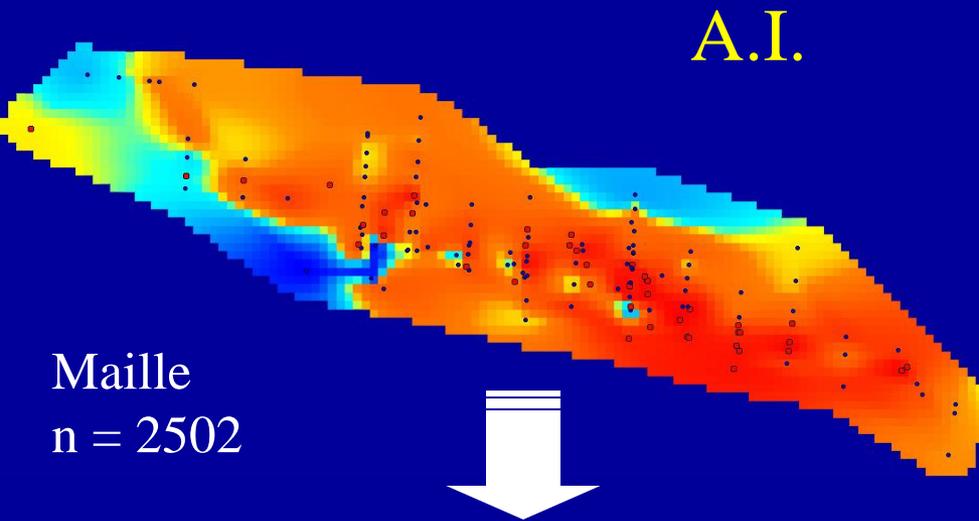
Na-BMR (homogénéité)

Data Histogram
Na2O_2.grd



	Value	Percentile
■	-2.59	0.0
■	-1.01	4.3
■	-0.00	14.2
■	1.63	75.0
■	4.71	100.0





Paramètres du seuillage

Seuil = 50

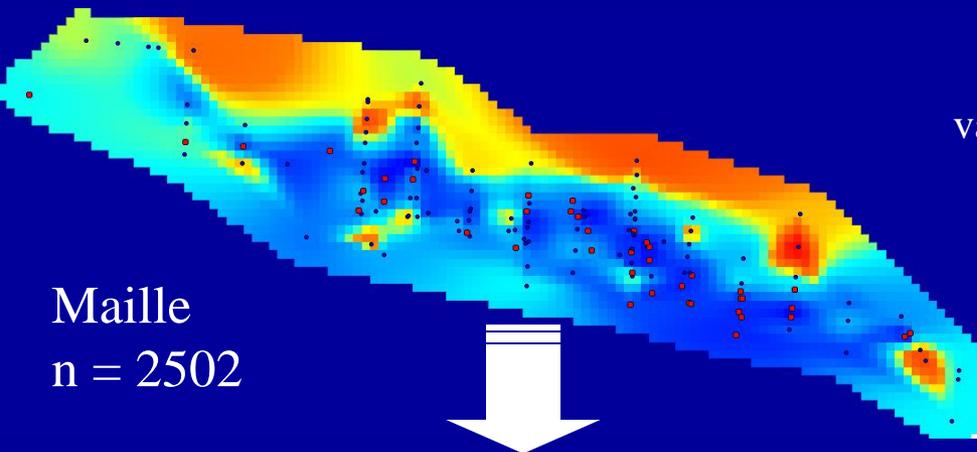
Surface d'altération: 68%

Altération vs Au (discordance)

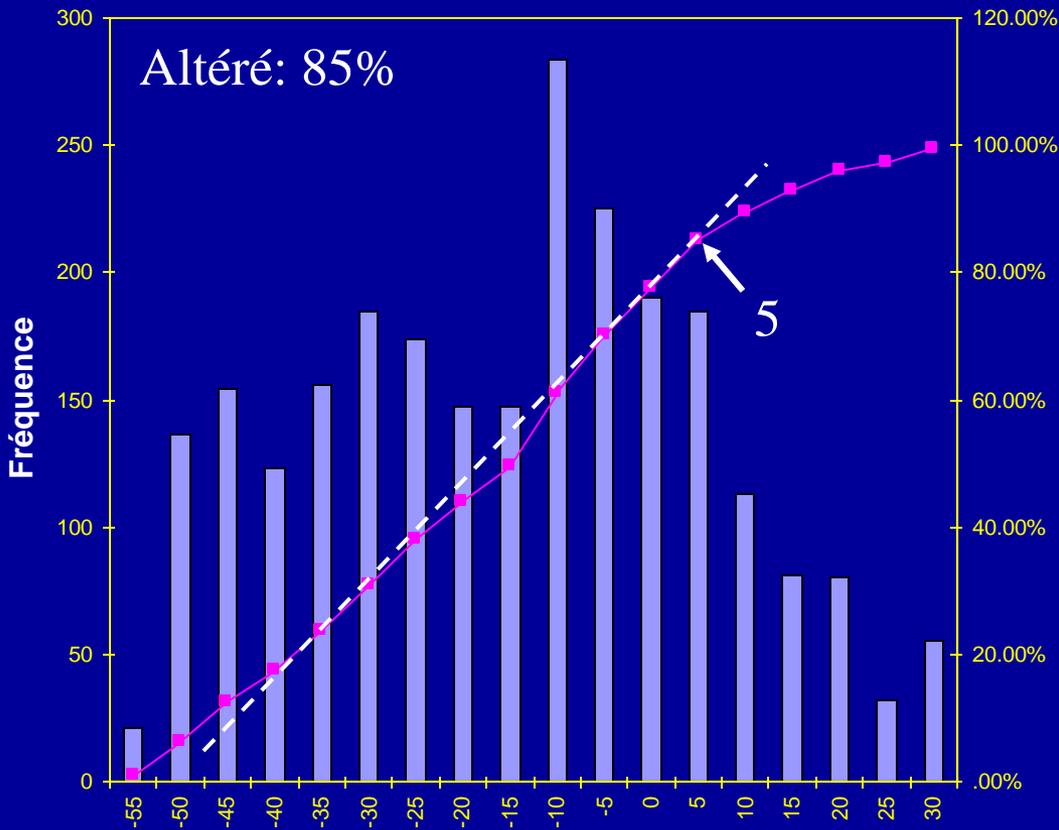
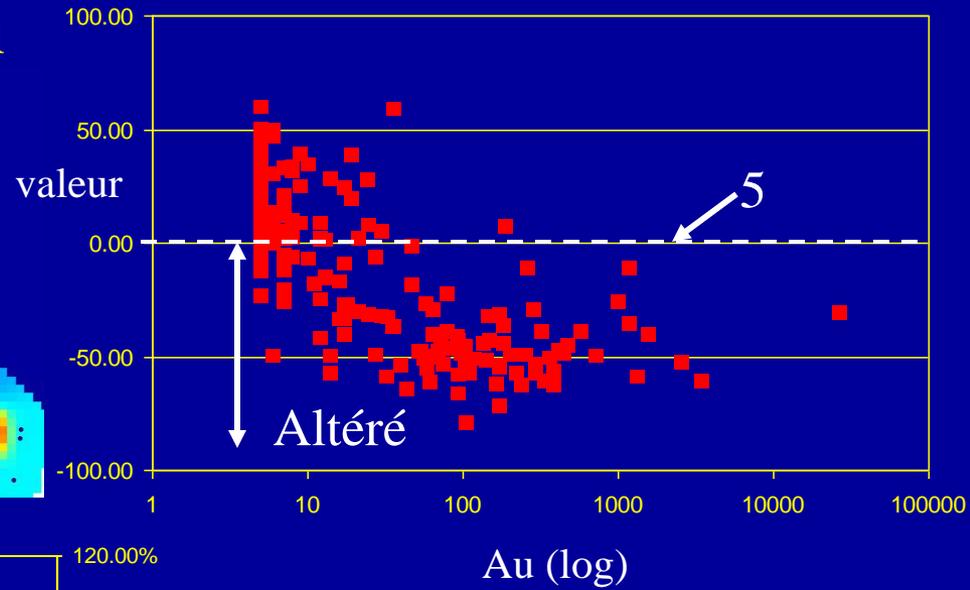
> 100 ppb: n = 7

> 050 ppb: n = 12

PER-Alkalin



Maille
n = 2502



Paramètres du seuillage

Seuil = 5

Surface d'altération: 85%

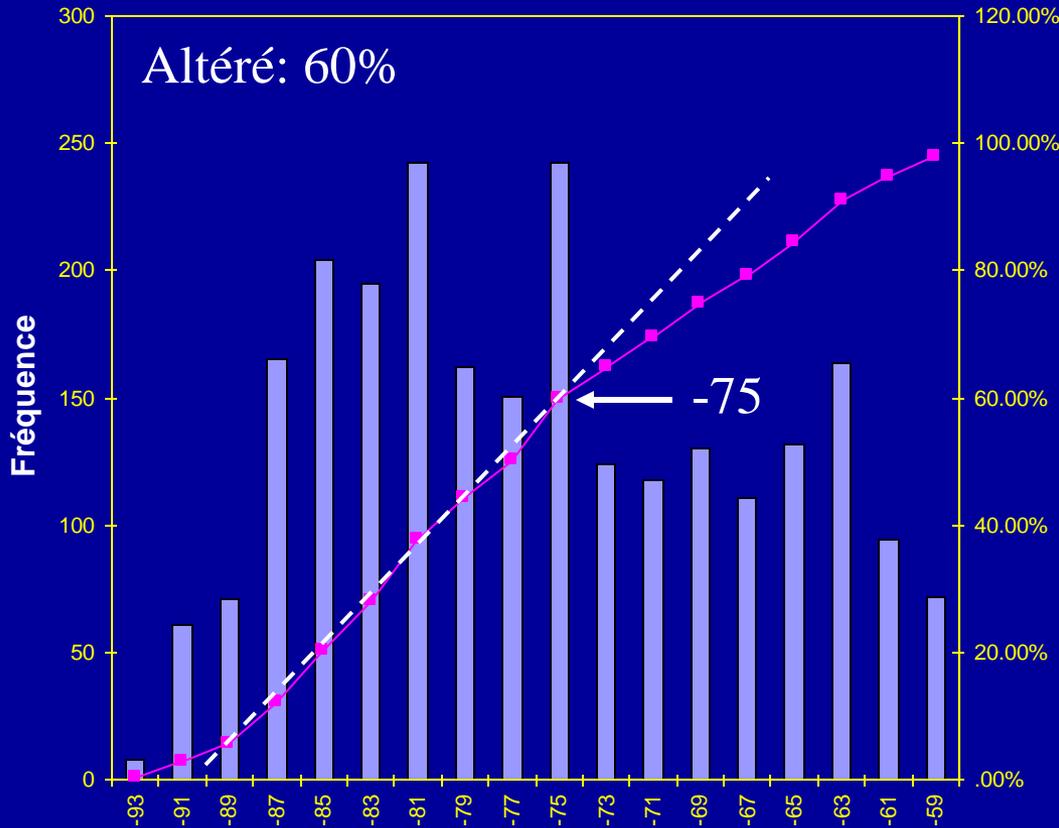
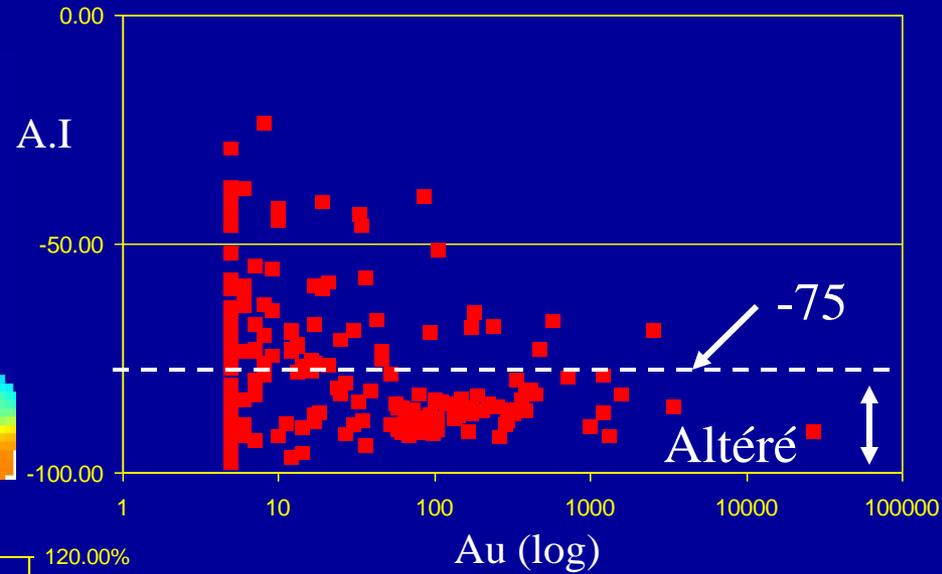
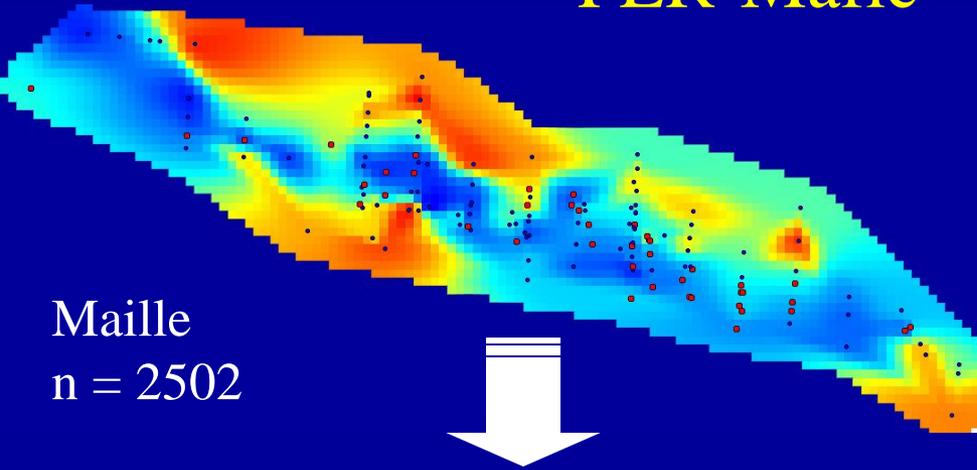
Altération vs Au (discordance)

> 100 ppb: n = 1

> 050 ppb: n = 2

PER-Mafic

Maille
n = 2502



Paramètres du seuillage

Seuil = -75

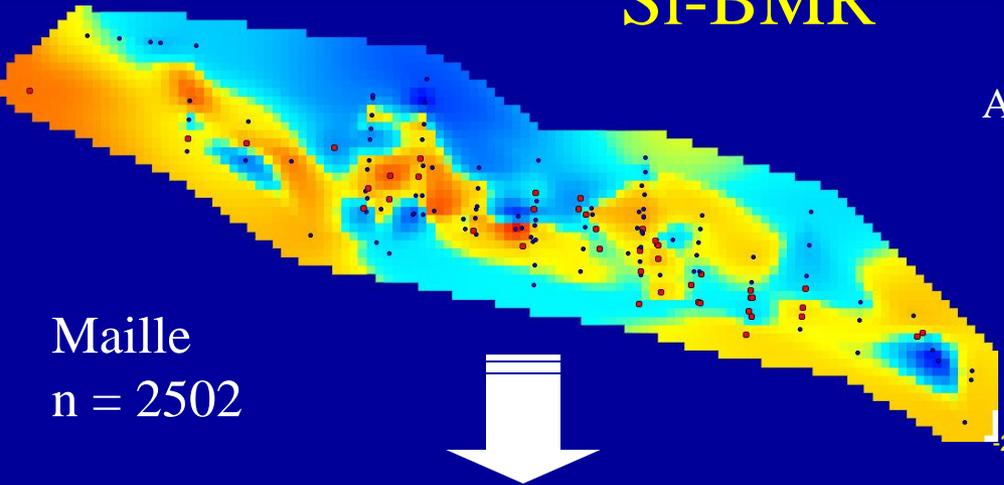
Surface d'altération: 60%

Altération vs Au (discordance)

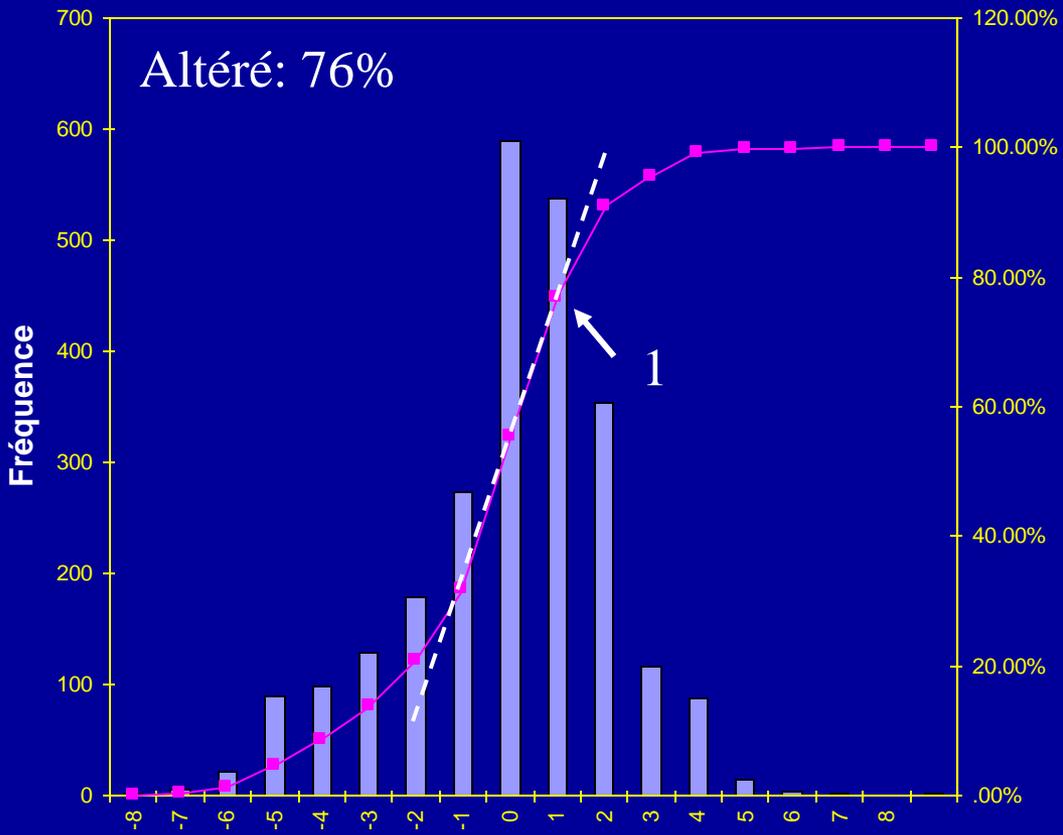
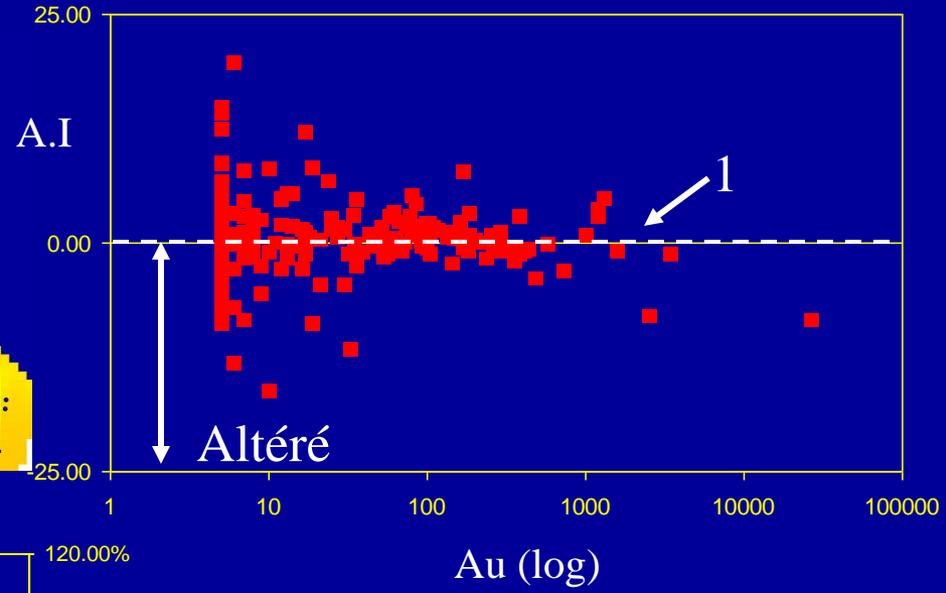
> 100 ppb: n = 7

> 050 ppb: n = 9

Si-BMR



Maille
n = 2502



Paramètres du seuillage

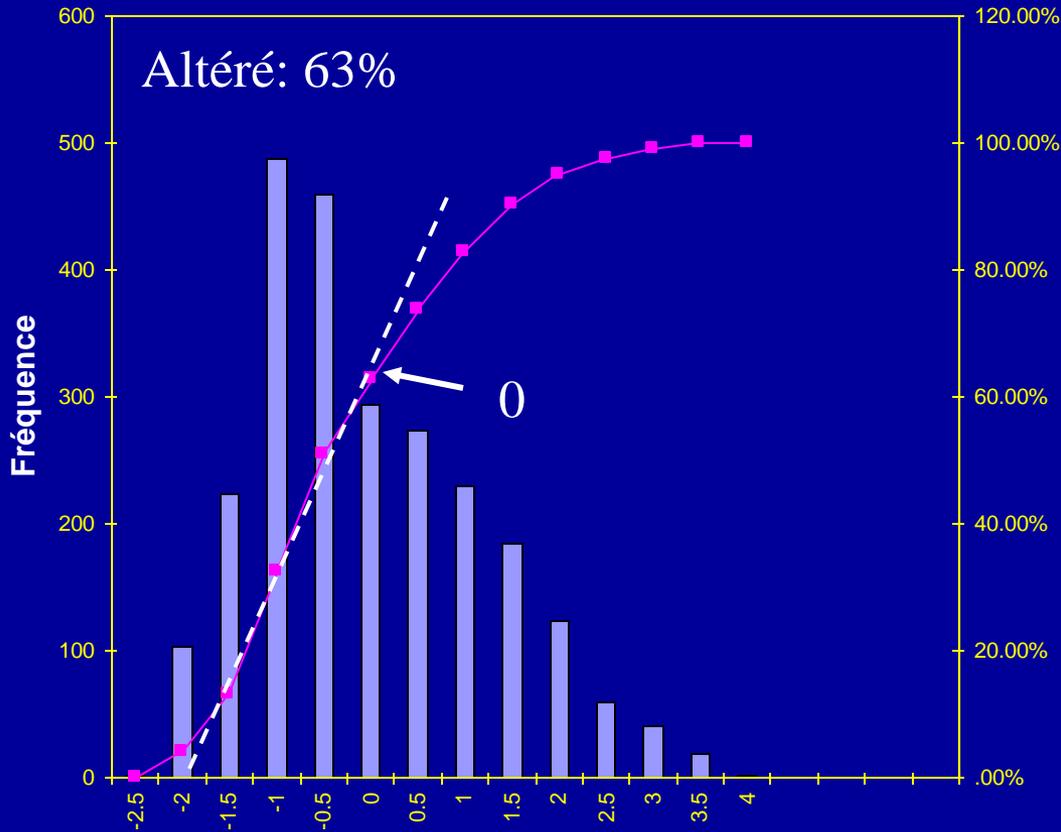
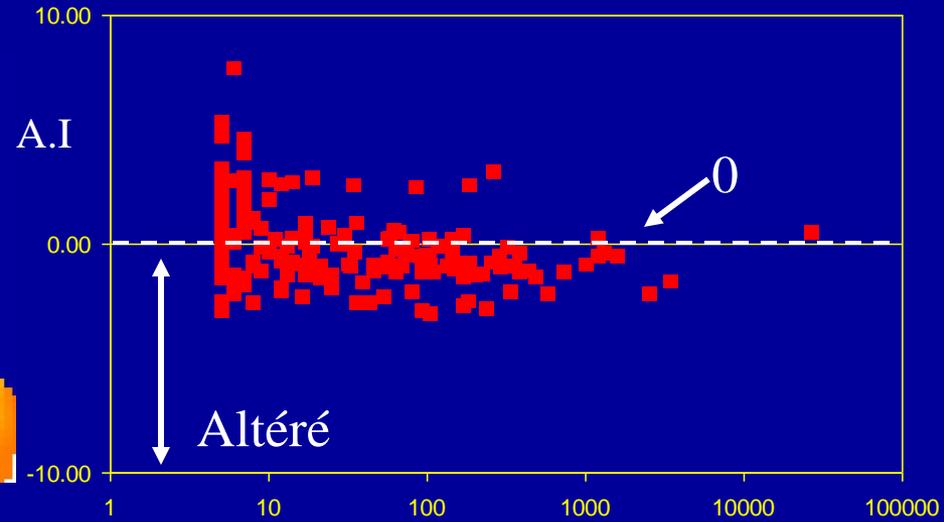
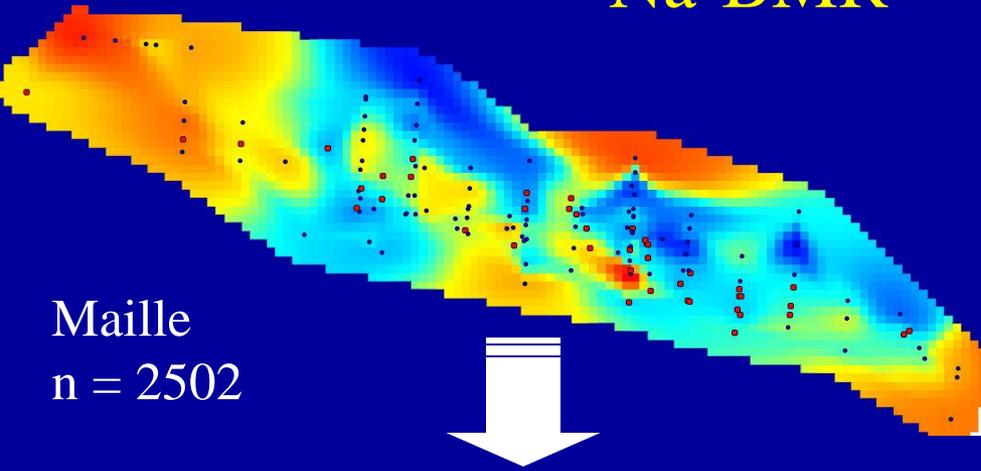
Seuil = 1

Surface d'altération: 76%

Altération vs Au (discordance)

- > 100 ppb: n = 13
- > 050 ppb: n = 24

Na-BMR



Paramètres du seuillage

Seuil = 0

Surface d'altération: 63%

Altération vs Au (discordance)

> 100 ppb: n = 7

> 050 ppb: n = 14

Évaluation des 5 indicateurs les plus performants

	Individualisation locale	Indépendance litho	Artefact	Homogénéité	Représentativité Au	Total
A.I.	●	●	●	●	●	●
PER-Alkalin	●	●	●	●	●	●
PER-Mafic	●	●	●	●	●	●
Si-BMR	●	●	●	●	●	●
Na-BMR	●	●	●	●	●	●

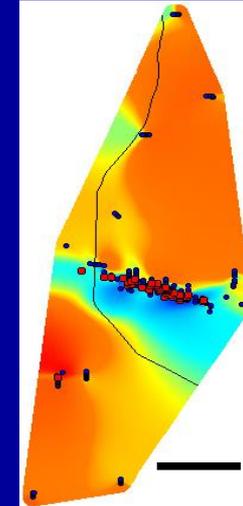
Bon Moyen Faible



Conclusions

1) L'indicateur PER-Alkalin est le plus performant pour la propriété Comtois

- Il permet de bien délimiter la zone minéralisée
- Il permet d'élargir le secteur d'intérêt
- Il génère une zone altérée = 2000 m X 200 m
- Il ne génère aucun artéfact régional
- Il est très cohérent avec les valeurs Au
- Il peut être utilisée d'une manière absolue



2) ISHIKAWA (A.I) est relativement performant compte tenu de sa simplicité d'utilisation.

3) Normat n'est pas applicable car les calculs ont été calibrés pour le faciès des schistes verts. Une évaluation avec Normat « amphibolite » s'impose donc à court terme pour valider les performances de cette méthode.

4) Les indicateurs du BRM génèrent des résultats moyens à faibles.