

Atelier CONSOREM Québec Exploration 2010

Une nouvelle méthode pour quantifier l'altération hydrothermale dans les roches ignées : le bilan de masse par modélisation des précurseurs

Présenté par: Sylvain Trépanier



États, processus et résultats

ETAT
INITIAL

Minéraux du précurseur
Composition chimique du précurseur
Masse et volume du précurseur

PROCESSUS
(CIRCULATION
HYDROTHERMALE)

Gains ou pertes d'éléments
(**processus métasomatique**)

Changements physiques
(masse, volume)

Création et destruction de minéraux
(**processus d'altération**)

RESULTAT
FINAL

Minéraux différents de l'état initial
(altération résultante)
Composition chimique différente
de l'état initial (résultat du
métasomatisme)
Masse et/ou volume poss.
différent de l'état initial (résultat
physique)

Processus d'altération et processus métasomatique sont deux concepts distincts (Stanley et Madeisky, 1994)

Se produisent en même temps mais.. deux façons différentes de regarder les interactions eau roche → pas équivalent

Méthodes caractérisant (principalement) le résultat du métasomatisme (chimique)

- Ratios d'éléments chimiques simples (ratios « unaires »)

Méthodes caractérisant (principalement) le résultat de l'altération (minéralogique)

- Minéraux normatifs

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat du métasomatisme (chimique)

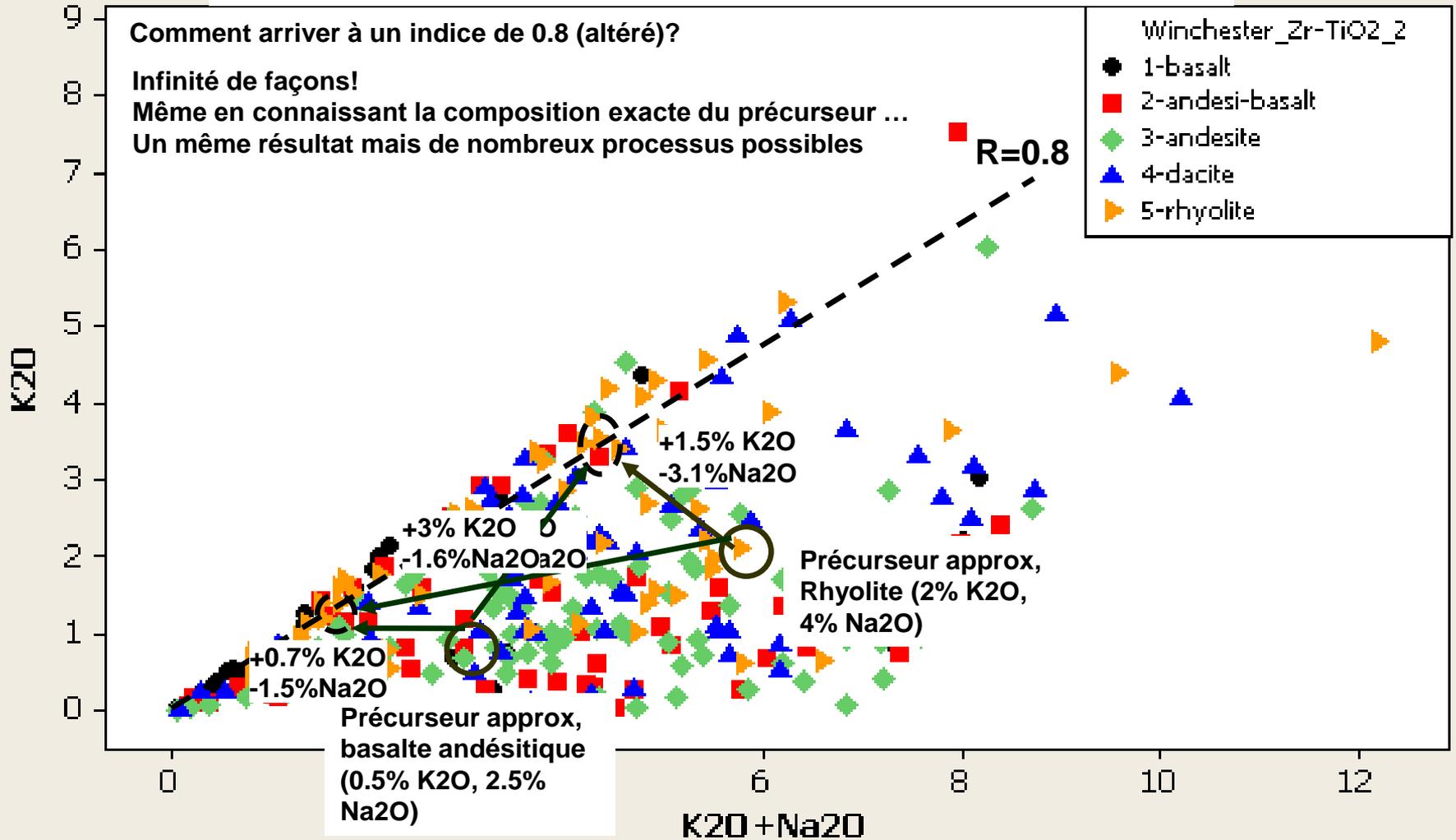
- Bilans de masse

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat de l'altération (minéralogique)

- Aucune???!!!

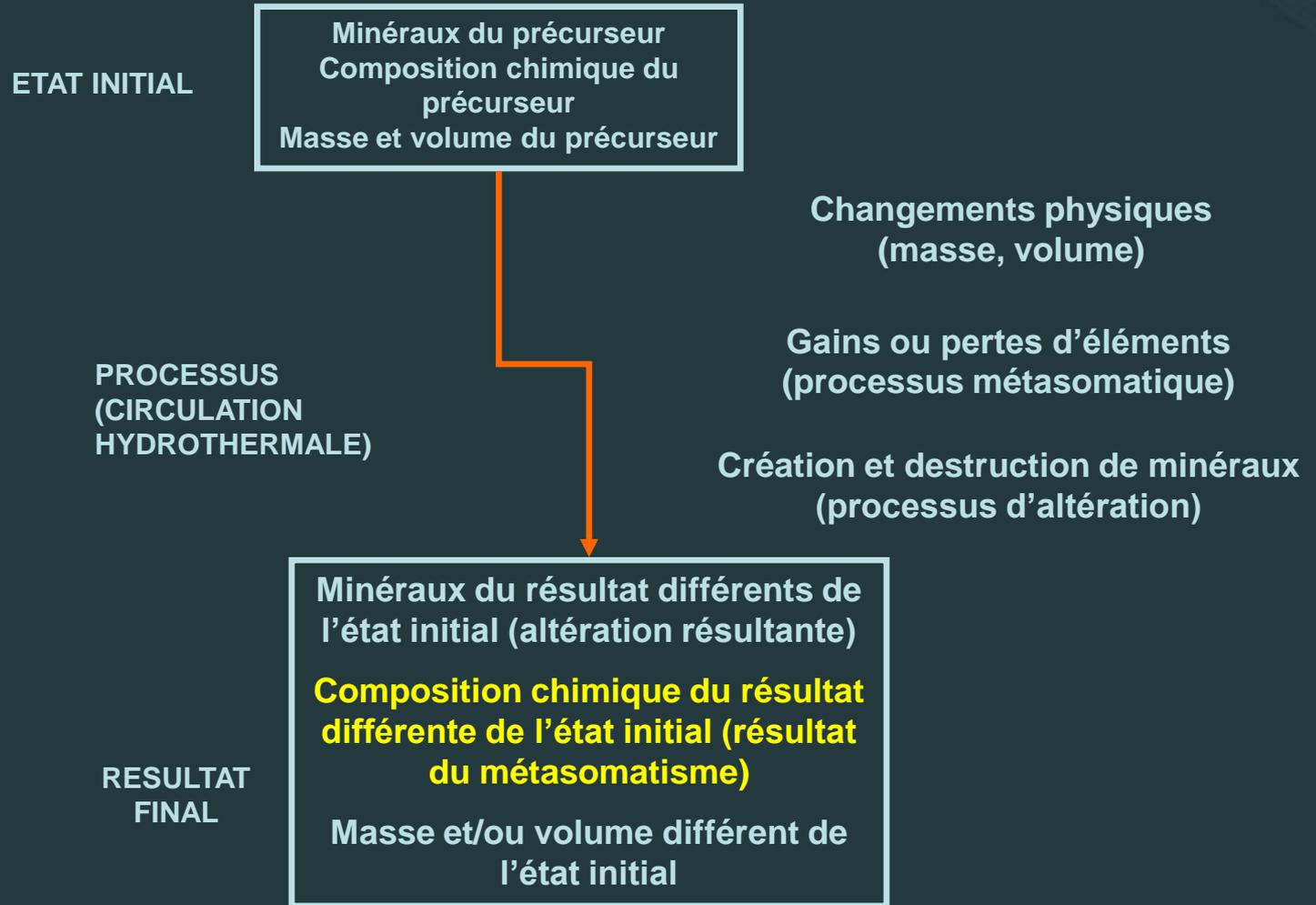
Ratios d'éléments simples (indices d'altération), métasomatisme

Diagramme K₂O vs K₂O+Na₂O
 Correspond à l'indice séricite (Saeki et Date, 1980)



Roches altérées de contextes minéralisés

Ratios d'éléments et indices d'altération



Ratios d'éléments → identifient une roche dans un état résultat différent de son état de départ.
Information floue sur le processus métasomatique, et aucune sur l'état et le processus minéralogique ou physique

Méthodes caractérisant (principalement) le résultat du métasomatisme (chimique)

- Ratios d'éléments chimiques simples (ratios « unaires »)

Méthodes caractérisant (principalement) le résultat de l'altération (minéralogique)

- Minéraux normatifs

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat du métasomatisme (chimique)

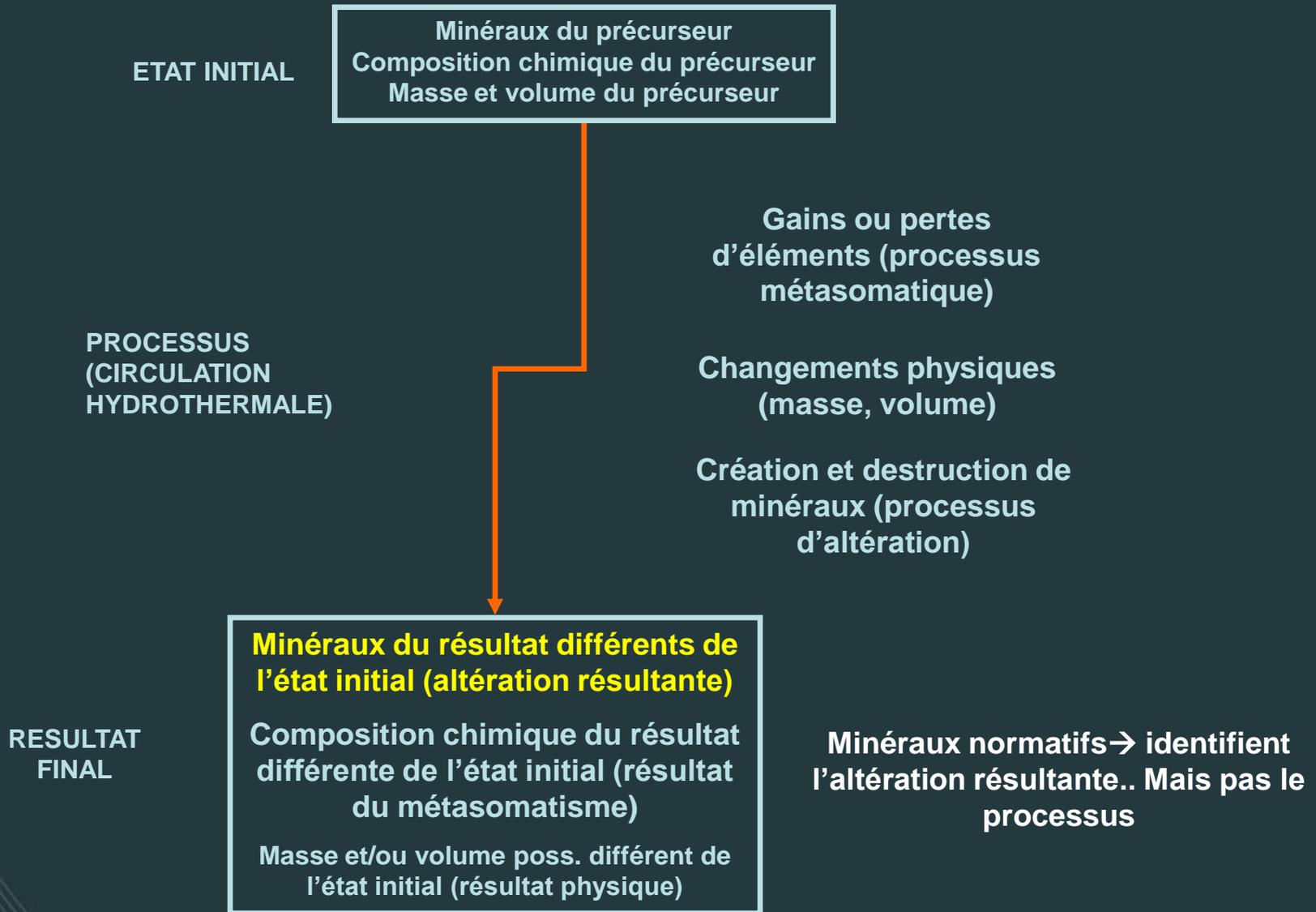
- Bilans de masse

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat de l'altération (minéralogique)

- Aucune???!!!

- Principe: calculer les minéraux que devrait « normalement » contenir une roche à partir de son analyse chimique
- Différents modèles de calcul existent selon les types de roches
 - Norme CIPW : roches ignées fraîches
 - NORMAT (Piché et Jébrak, 2004): roches métamorphiques schiste vert, altérées ou non
 - SedNorm (Cohen et Ward, 1991): roches sédimentaires
 - Etc

Minéraux normatifs



Méthodes caractérisant (principalement) le résultat du métasomatisme (chimique)

- Ratios d'éléments chimiques simples (ratios « unaires »)

Méthodes caractérisant (principalement) le résultat de l'altération (minéralogique)

- Minéraux normatifs

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat du métasomatisme (chimique)

- Bilans de masse

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat de l'altération (minéralogique)

- Aucune???!!!

Plan de la présentation

Bilans de masse

- **Principes fondamentaux**
- **Bilan de masse par modélisation du précurseur (nouvelle méthode proposée)**

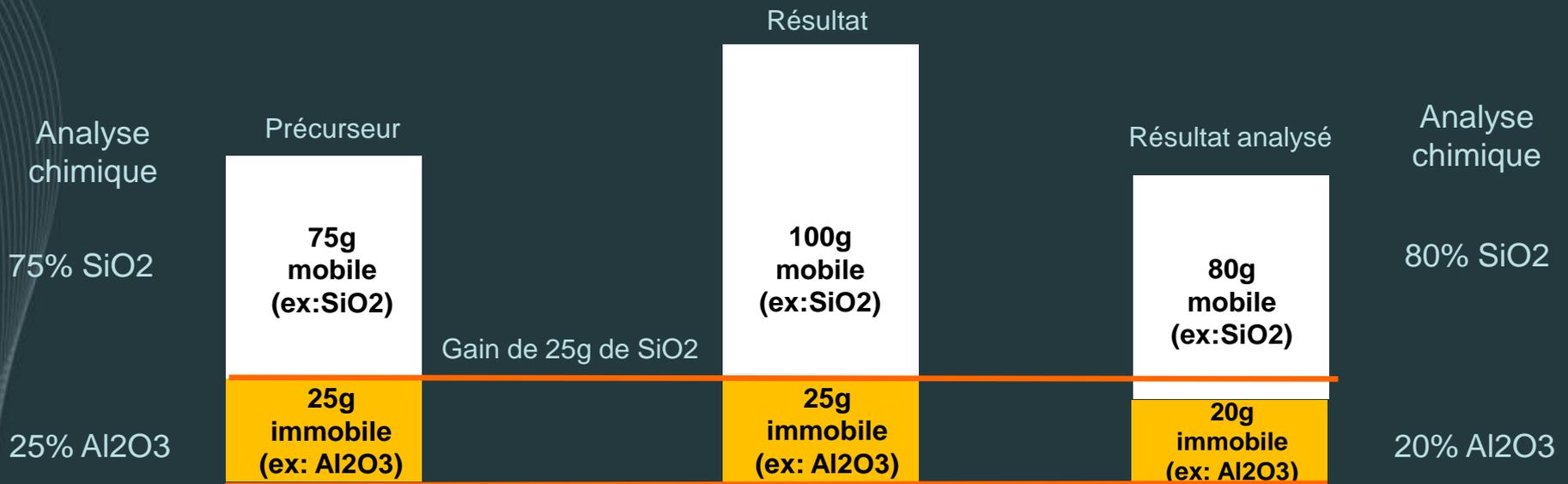
Processus métasomatiques

- Il serait intéressant de connaître le processus métasomatique en plus du résultat
- Supposons qu'on connaît la composition du **précurseur** frais d'une roche métasomatisée
- Intuitivement, on pourrait simplement penser de faire la différence entre l'analyse fraîche et métasomatisée pour connaître les changements (processus)

Roche	% Na ₂ O analysé	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃ analysé
Granite frais	4	70	13
Granite cisailé	0.5	75	11
Processus	-3.5%	+5%	-2%

NON!!!!

Changements de masse et fermeture à 100% des analyses chimiques



- Si on calcule directement les changements, on pourrait dire qu'on a perdu 5% de Al₂O₃. Or, Al₂O₃ n'a pas bougé...
- Il faut déterminer le changement de masse global de la roche pour ensuite calculer les changements de masse individuels des éléments

Bilans de masse: principes fondamentaux

- Méthodes BM (Isocon, Pearce Element Ratios, etc) sont basées sur l'équation de Gresens (1967).
- $X_n = W_n^M - W_n^P = w \{ [(F_v)(X_n^M)(S_M/S_P)] - X_n^P \}$
 - M est la roche métasomatisée
 - P est le précurseur
 - n est l'élément considéré
 - X_n est le changement de masse *absolu* de l'élément N
 - W_n^M est le poids de l'élément n dans la roche métasomatisée (g)
 - W_n^P est le poids de l'élément n dans le précurseur (g)
 - W est le poids du précurseur (g)
 - Fv est le ratio volume altéré / volume frais.
 - X_n^M est la concentration analysée de n dans la roche métasomatisée (fraction)
 - X_n^P est la concentration analysée de n dans le précurseur (fraction)
 - S_M est la densité de la roche métasomatisée
 - S_P est la densité du précurseur

Bilans de masse: principes fondamentaux

- Plusieurs inconnues → ne peut être solutionnée sans faire de suppositions supplémentaires
- Suppositions pour solutionner l'équation:
 - Immobilité d'un élément durant le métasomatisme (ex: Zr) OU mesures de densités du précurseur et de la roche métasomatisée
 - Volume constant
 - Connaissance de la composition du précurseur
 - Une quantité précise de précurseur (ex: 100g)
 - Par ex, si on considère Al_2O_3 immobile,
 - $X_n = W_n^M - W_n^P = 100 \{ (X^{PAl_2O_3} / X^{MAl_2O_3}) * (X_n^M) - X_n^P \}$

Bilans de masse: exemple

	Résultat			
Analyse chimique	Précurseur		Résultat analysé	Analyse chimique
75% SiO ₂	75g mobile (ex: SiO ₂)	Gain de 25g de SiO ₂	100g mobile (ex: SiO ₂)	80% SiO ₂
25% Al ₂ O ₃	25g immobile (ex: Al ₂ O ₃)		25g immobile (ex: Al ₂ O ₃)	20% Al ₂ O ₃

$$X_n = W_n^M - W_n^P = 100 * \left\{ \left(\frac{X^{PAI_2O_3}}{X^{MAI_2O_3}} \right) * (X_n^M) - X_n^P \right\}$$

(P: Précurseur, M: résultat); X: valeur analysée. n: élément mobile

$$X_{SiO_2} = W_{SiO_2}^M - W_{SiO_2}^P = 100 * \left\{ \left(\frac{X^{PAI_2O_3}}{X^{MAI_2O_3}} \right) * X_{SiO_2}^M - X_{SiO_2}^P \right\}$$

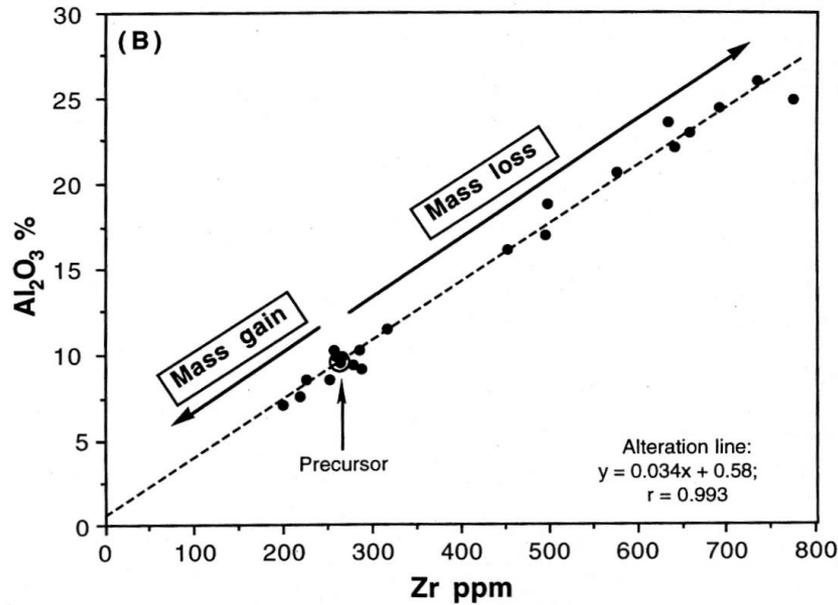
$$X_{SiO_2} = W_{SiO_2}^M - W_{SiO_2}^P = 100 * \left\{ \left(\frac{0.25}{0.20} \right) * 0.80 - 0.75 \right\} = \mathbf{+25 \text{ g par 100 de précurseur}}$$

$$X_{Al_2O_3} = W_{Al_2O_3}^M - W_{Al_2O_3}^P = 100 * \left\{ \left(\frac{X^{PAI_2O_3}}{X^{MAI_2O_3}} \right) * X_{Al_2O_3}^M - X_{Al_2O_3}^P \right\}$$

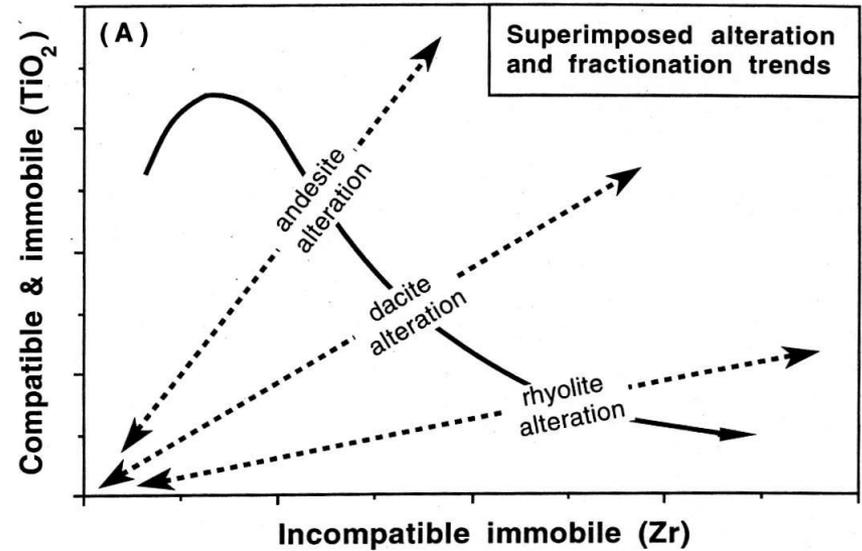
$$X_{Al_2O_3} = W_{Al_2O_3}^M - W_{Al_2O_3}^P = 100 * \left\{ \left(\frac{0.25}{0.20} \right) * 0.20 - 0.25 \right\} = \mathbf{0 \text{ g par 100 de précurseur}}$$

Connaître la composition d'un précurseur

- Principal problème des méthodes de bilans de masse existantes (Leitz et Lentz, 1994)



Cas d'un précurseur unique (roche homogène)



Cas de précurseur multiples

Plan de la présentation

Bilans de masse

- Principes fondamentaux
- **Bilan de masse par modélisation du précurseur (nouvelle méthode proposée)**

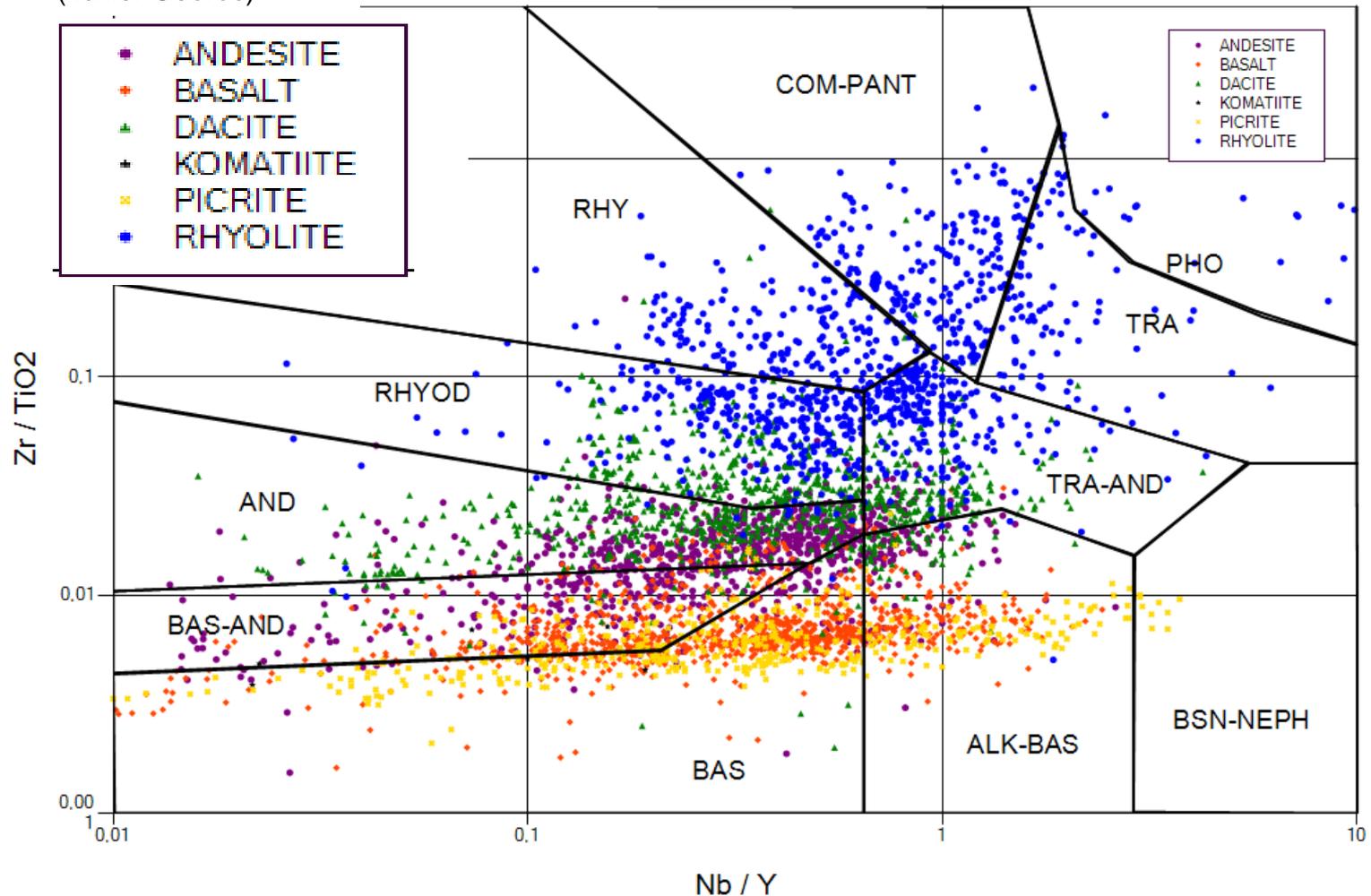
Bilans de masse

- Problème des méthodes de bilan de masse existantes → choix d'un précurseur approprié
- Mais les roches ignées constituent un système qui est (relativement) restreint minéralogiquement et chimiquement
- Peut-on estimer la composition du précurseur en éléments mobiles d'une roche ignée altérée ?

Classification des roches ignées par ratios d'éléments immobiles

Identification originale
(fichier Georoc)

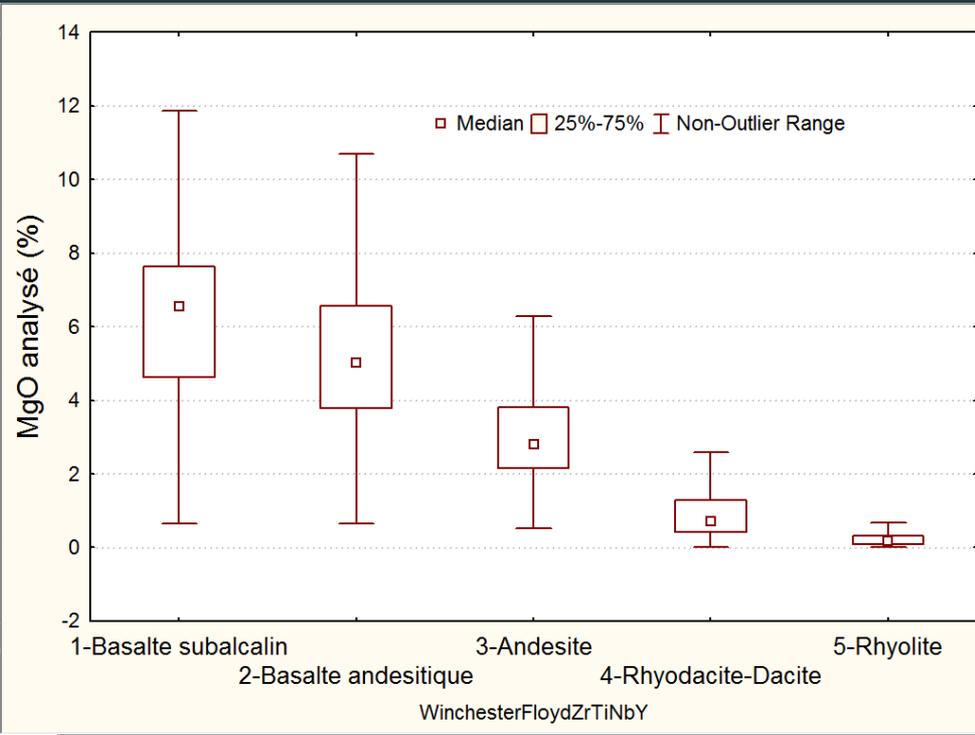
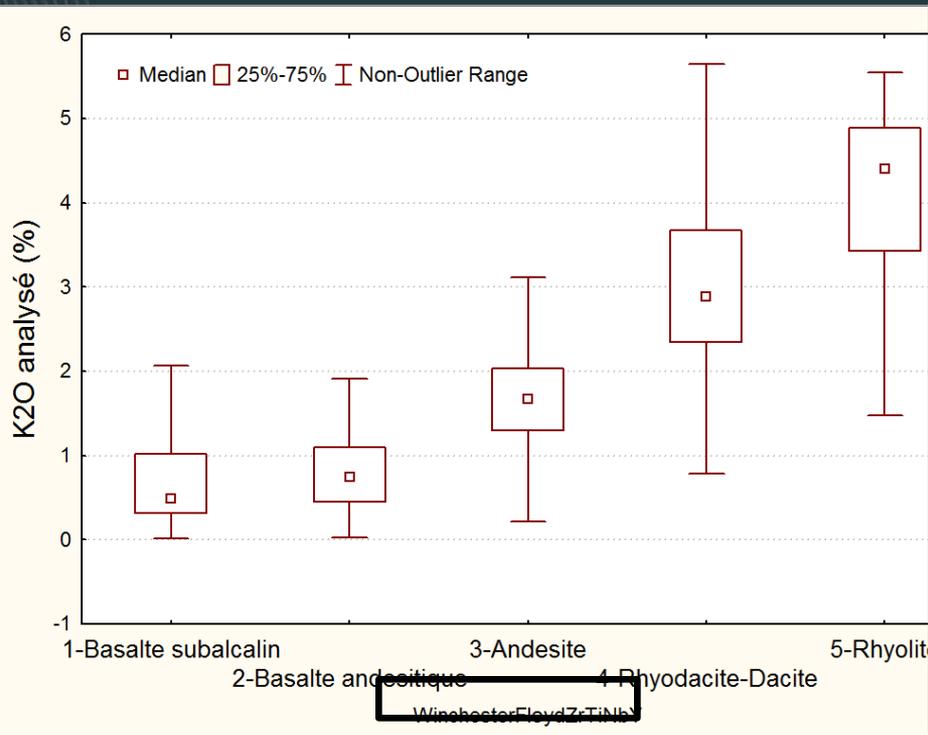
Nb/Y vs Zr/TiO₂ (Winchester et Floyd, 1977)



Ce diagramme utilise des ratios d'éléments peu mobiles. Ces ratios sont conservés durant la plupart des processus d'altération hydrothermale.

Éléments mobiles vs ratios d'éléments immobiles

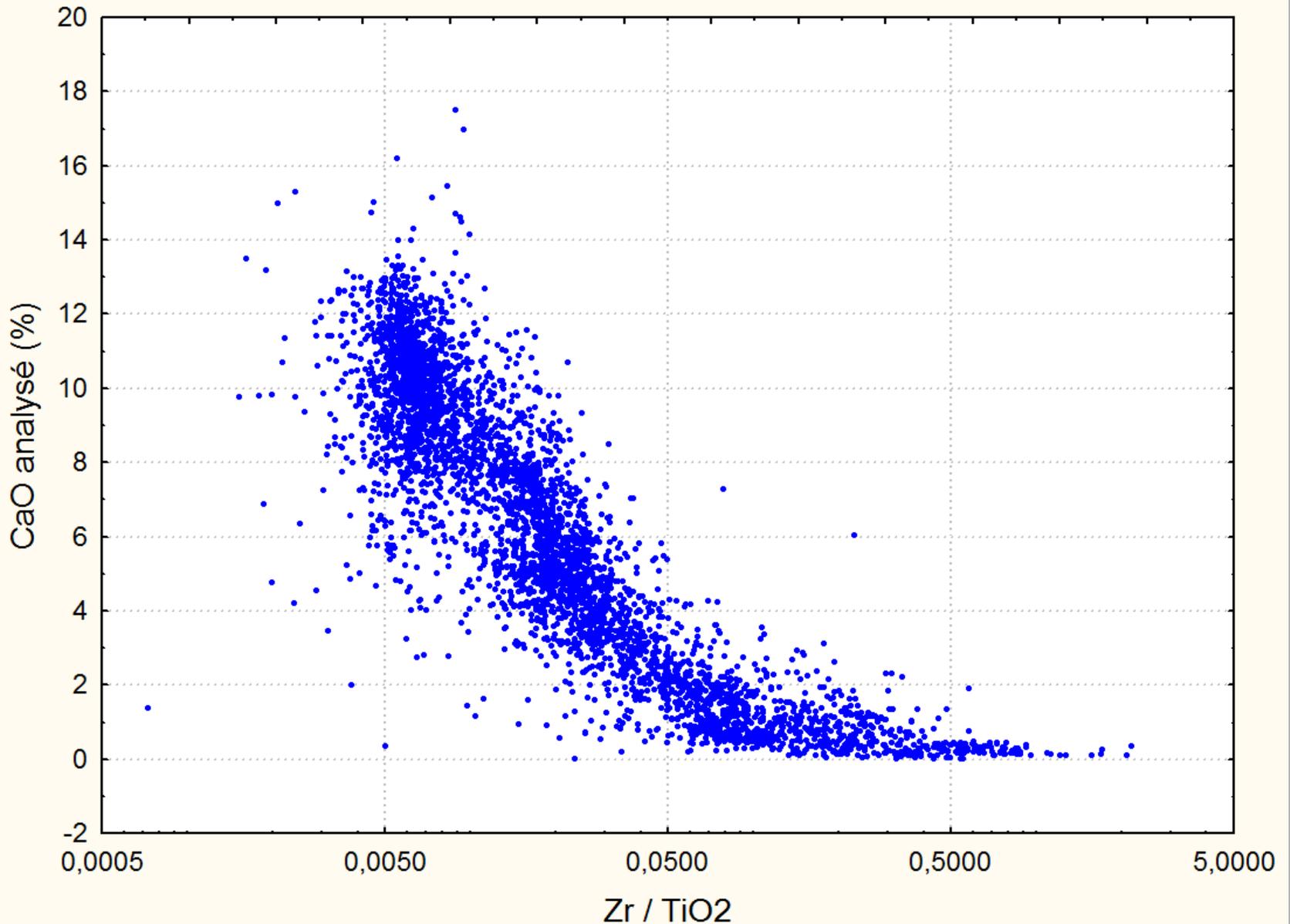
Source: Base de données Georoc, roches peu altérées seulement (filtré par diagrammes X-Y d'identification des roches métasomatisées/altérées)



Pour roches peu altérées → les catégories déterminées sur le diagramme Winchester et Floyd par les ratios Zr/TiO₂ et Nb/Y correspondent à des compositions distinctes en éléments mobiles

On peut donc prévoir approximativement la composition en majeurs d'une roche fraîche à partir des ratios d'éléments peu mobiles

Éléments mobiles vs ratios d'éléments immobiles



Bilan de masse par modélisation du précurseur

- Prédire la composition en SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 , K_2O ... d'une roche ignée fraîche à partir de ratios de quelques éléments peu mobiles comme Zr/TiO_2 , $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$, etc.
→ précurseur modélisé
- Développer la prédiction sur une banque de roches ignées fraîches de différentes compositions, affinités, contextes
- Banque de référence de roches volcaniques fraîches utilisée:
 - Volcaniques subalcalines de GEOROC (données de la littérature, de komatiites à rhyolites) ayant au moins Zr comme élément trace. $N = \sim 30000$. Proviennent de partout dans le monde, différentes affinités (calco-alc à thol.)
 - Filtre des roches altérées par diagrammes de Hughes et de Large et al. 2001 modifié. Aussi $\text{PAF} < 8 \text{ V}3$, $\text{PAF} < 4 \text{ V}1$ (Harris et al., 1997).
 - $N = \sim 5000$ (environ 500 des ceintures de roches vertes archéennes)

Réseaux neuronaux

- Optimisation mathématique d'une fonction complexe, quelconque
 - 50% de la banque de référence a été utilisée pour optimiser
 - 25% pour contre-validation en cours d'entraînement
 - 25% comme **test à posteriori des résultats**

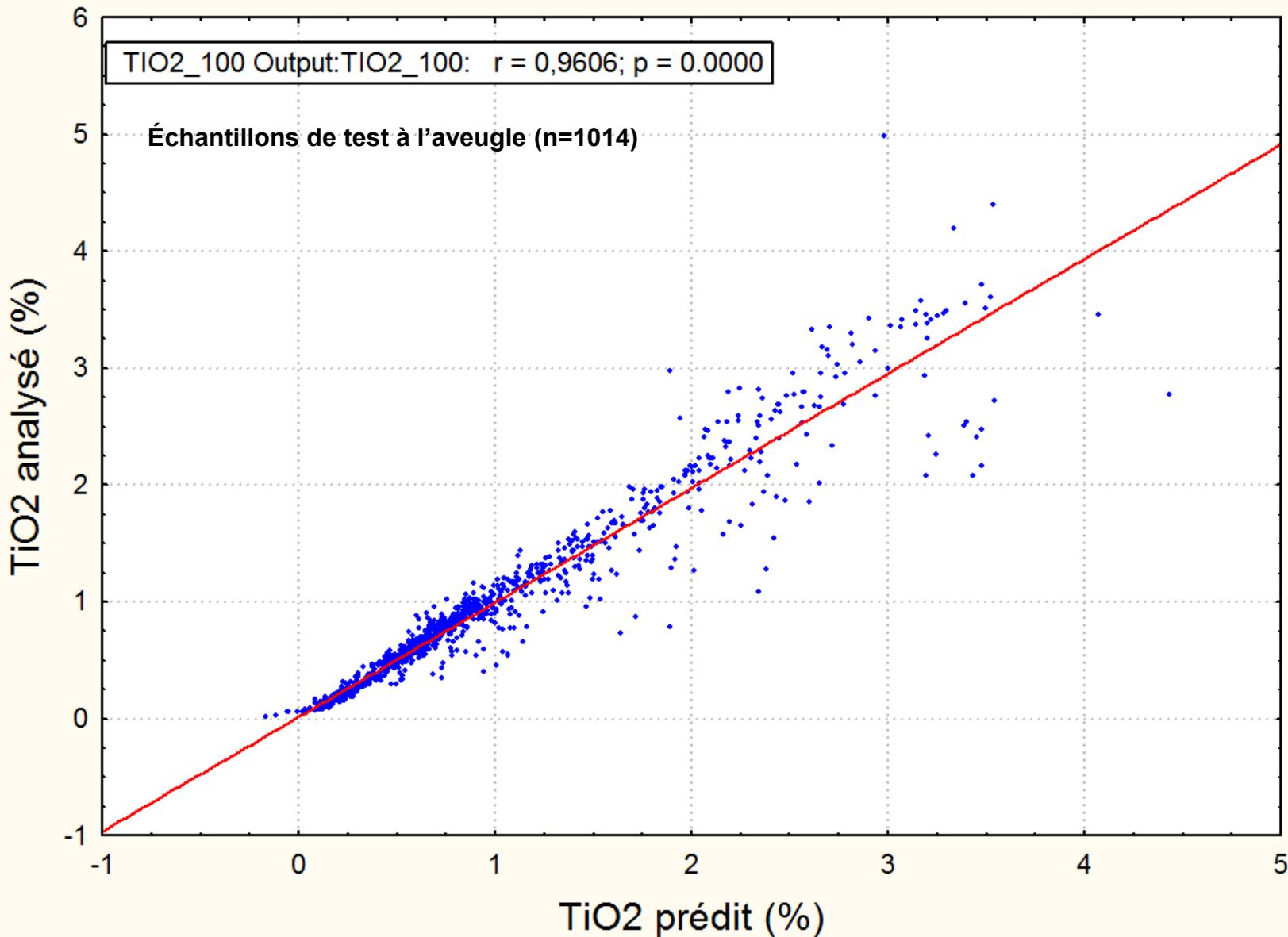
Résultats de l'optimisation

Corrélations entre la valeur prédite par le modèle et la valeur analysée, calculée sur les échantillons de test de la banque de roches fraîches

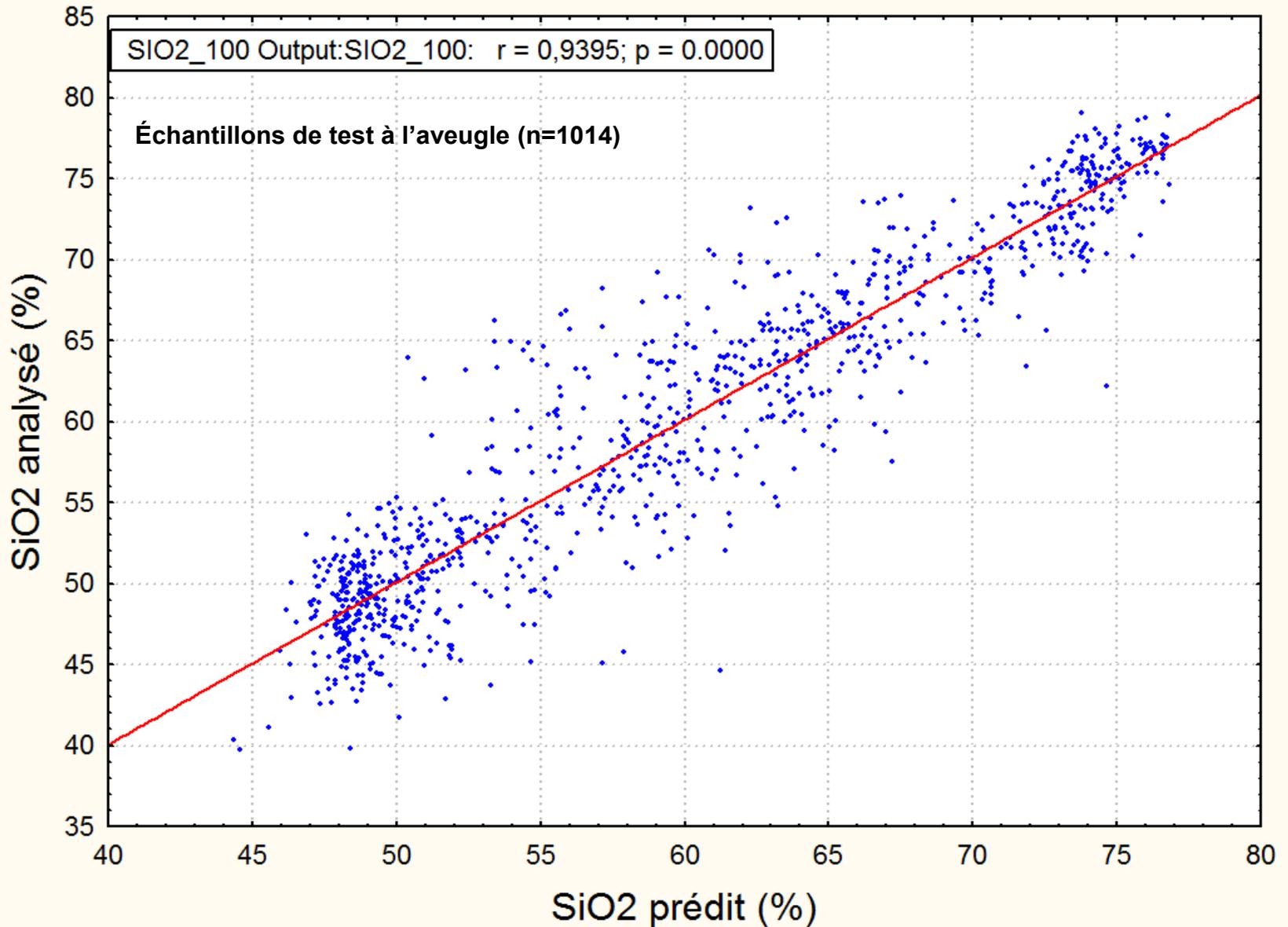
Ratios d'éléments immobiles	n	SiO ₂	Zr	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃	1014	0.93	0.97	0.96	0.94	0.90	0.72	0.86	0.74
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr	786	0.95	0.99	0.99	0.94	0.91	0.95	0.87	0.84
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Y	786	0.95	0.99	0.96	0.95	0.92	0.75	0.90	0.78
Zr, TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr, Y	786	0.95	0.99	0.99	0.95	0.92	0.96	0.89	0.84

- 32 modèles selon l'élément à prédire et les éléments peu mobiles utilisés
- Pour Zr, TiO₂, CaO, SiO₂, Fe₂O₃, K₂O, les corrélations sont très bonnes pour tous les modèles ($r > 0.85$)
- Pour MgO et Na₂O, l'ajout du Cr comme élément peu mobile est nécessaire pour obtenir de meilleures corrélations

Résultats de l'optimisation: TiO₂, modèle TiO₂-Al₂O₃-Zr

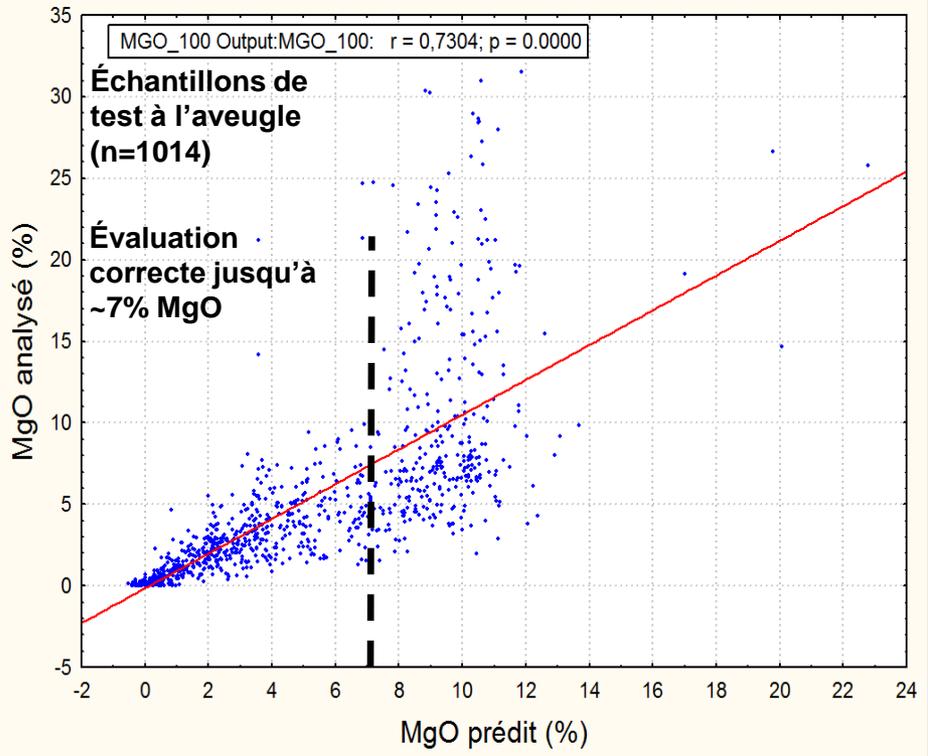


Résultats de l'optimisation: SiO₂, modèle TiO₂-Al₂O₃-Zr

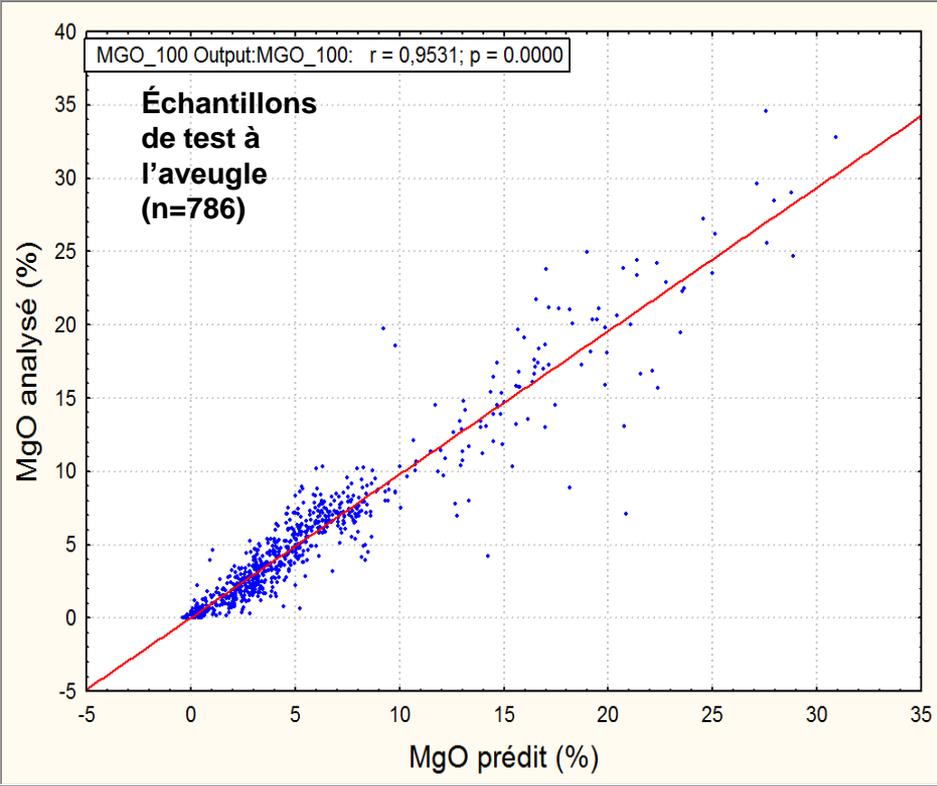


Résultats de l'optimisation: MgO

Modèle TiO2-Al2O3-Zr



Modèle Cr-TiO2-Al2O3-Zr



Bilan de masse par modélisation du précurseur

- La composition (%) du précurseur modélisé permettra de résoudre complètement l'équation de Gresens.
- Le changement de masse absolu, en grammes, pour un élément, avec TiO₂ comme élément immobile modélisé:

$$\Delta MAn = (C_{TiO_2, \text{frais}} / C_{TiO_2, \text{altéré}}) * C_{n, \text{altéré}} - C_{n, \text{frais}} \text{ (pour 100g de précurseur)}$$

- $C_{TiO_2, \text{altéré}}$ et $C_{n, \text{altéré}}$ proviennent directement de l'analyse d'une roche altérée.
- $C_{TiO_2, \text{frais}}$ et $C_{n, \text{frais}}$ sont calculés par le système réseaux neuronaux.

- Le changement de masse relatif (%) pour un élément n, avec TiO₂ comme élément immobile modélisé:

$$\Delta MRn = ((C_{n, \text{altéré}} / C_{TiO_2, \text{altéré}}) / (C_{n, \text{frais}} / C_{TiO_2, \text{frais}}) - 1) * 100$$

Assurance de la qualité des résultats

- Ratios d'éléments immobiles → doivent être à l'intérieur des ratios connus dans la banque de référence. Sinon, pas de calcul de bilans de masse.

Ex: Ratios acceptés pour modèle TiO₂-Al₂O₃-Zr

Ratios d'éléments immobiles	Ratio minimum acceptable	Ratio maximum acceptable
Zr/TiO ₂	15	15000
Zr/Al ₂ O ₃	0,7	198
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,0014	0,935

- Valeur prédite pour un élément mobile → doit être à l'intérieur des bornes acceptées dans la banque de référence

Ex: Valeurs prédites acceptables pour modèle TiO₂-Al₂O₃-Zr

Élément	Valeur prédite minimale acceptable	Valeur prédite maximale acceptable
CaO	0.001	15
Fe ₂ O ₃ T	0.67	19.62
K ₂ O	0.001	5.95
MgO	0.0001	6.5
Na ₂ O	0.05	4.38
SiO ₂	40.77	80
TiO ₂	0.04	4.38
Zr	10	2215

Exemples d'application: Phelps Dodge, Caber-Nord

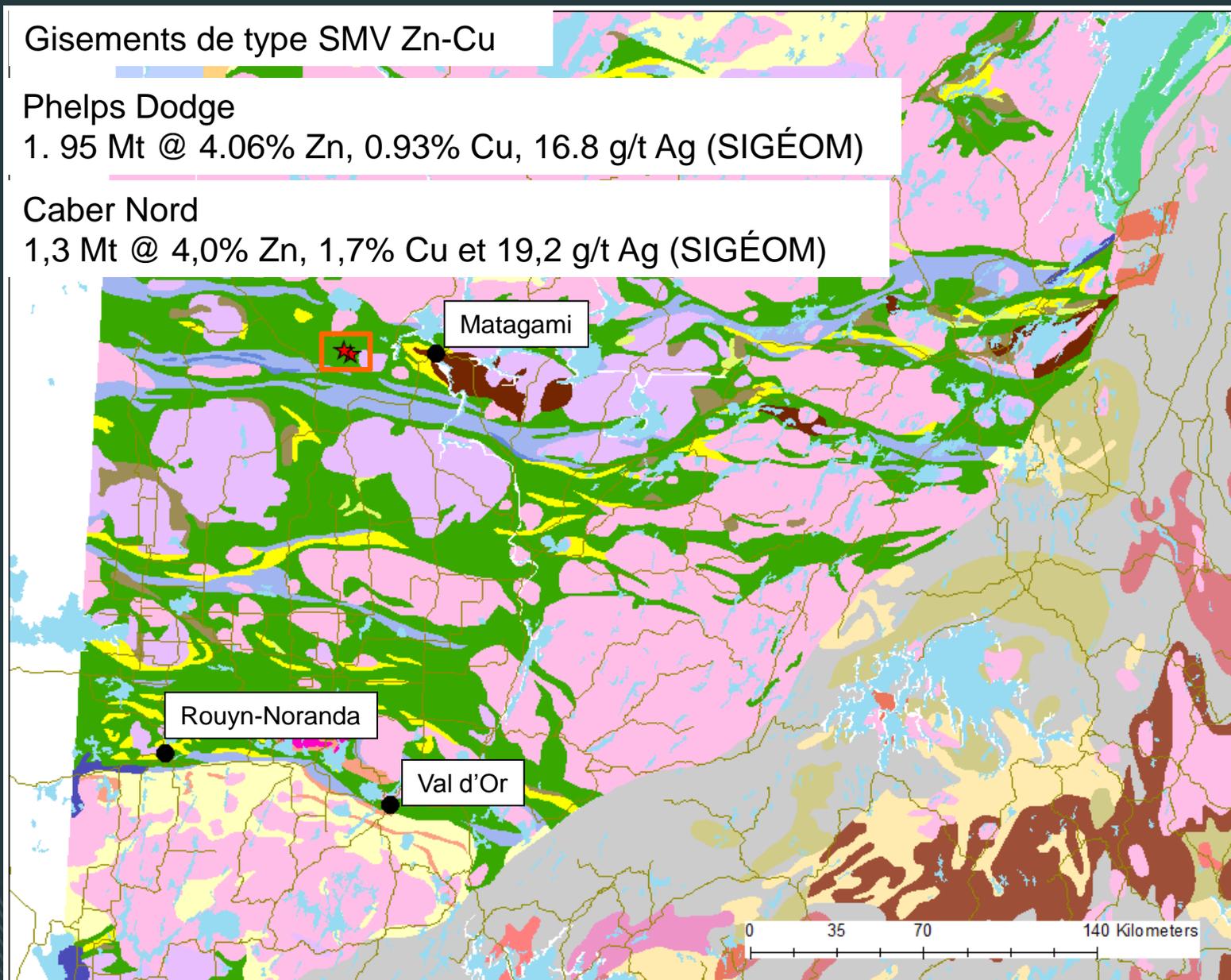
Gisements de type SMV Zn-Cu

Phelps Dodge

1.95 Mt @ 4.06% Zn, 0.93% Cu, 16.8 g/t Ag (SIGÉOM)

Caber Nord

1,3 Mt @ 4,0% Zn, 1,7% Cu et 19,2 g/t Ag (SIGÉOM)



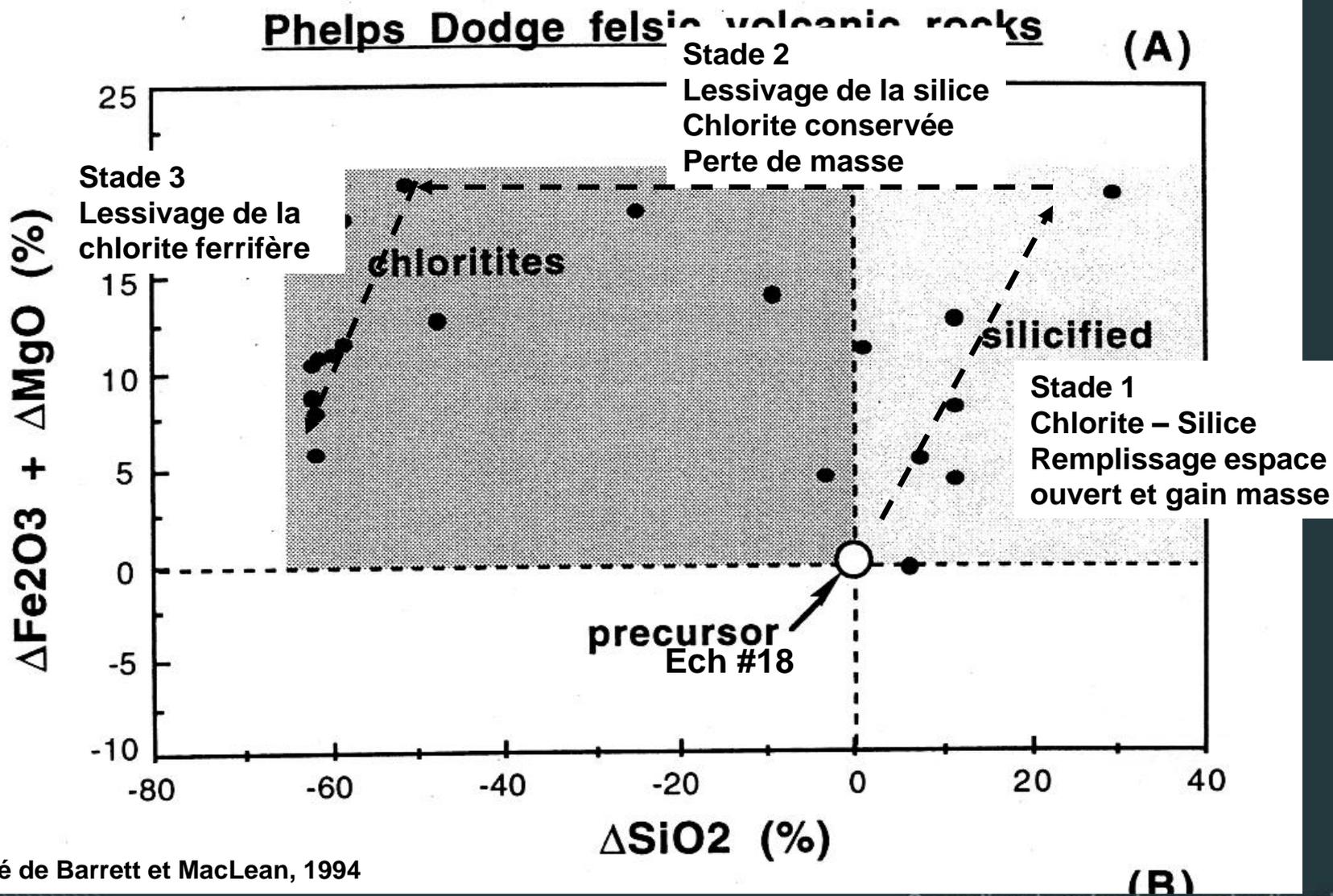
Exemple d'application: un précurseur unique (Phelps Dodge, MacLean et Kranidiotis, 1987)

- 22 analyses de rhyodacite avec éléments traces
- Calcul de bilans de masse avec méthode de précurseur unique.
- Un échantillon précurseur a été choisi (#18). Mais:
 - « The original rhyodacite was apparently mainly glass, but even the least altered samples contain much chlorite »

Échantillon	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃ t	MgO
#18	74.48	0.43	7.12	3.21
Précurseur modélisé de #18	70.65	0.49	3.05	0.49

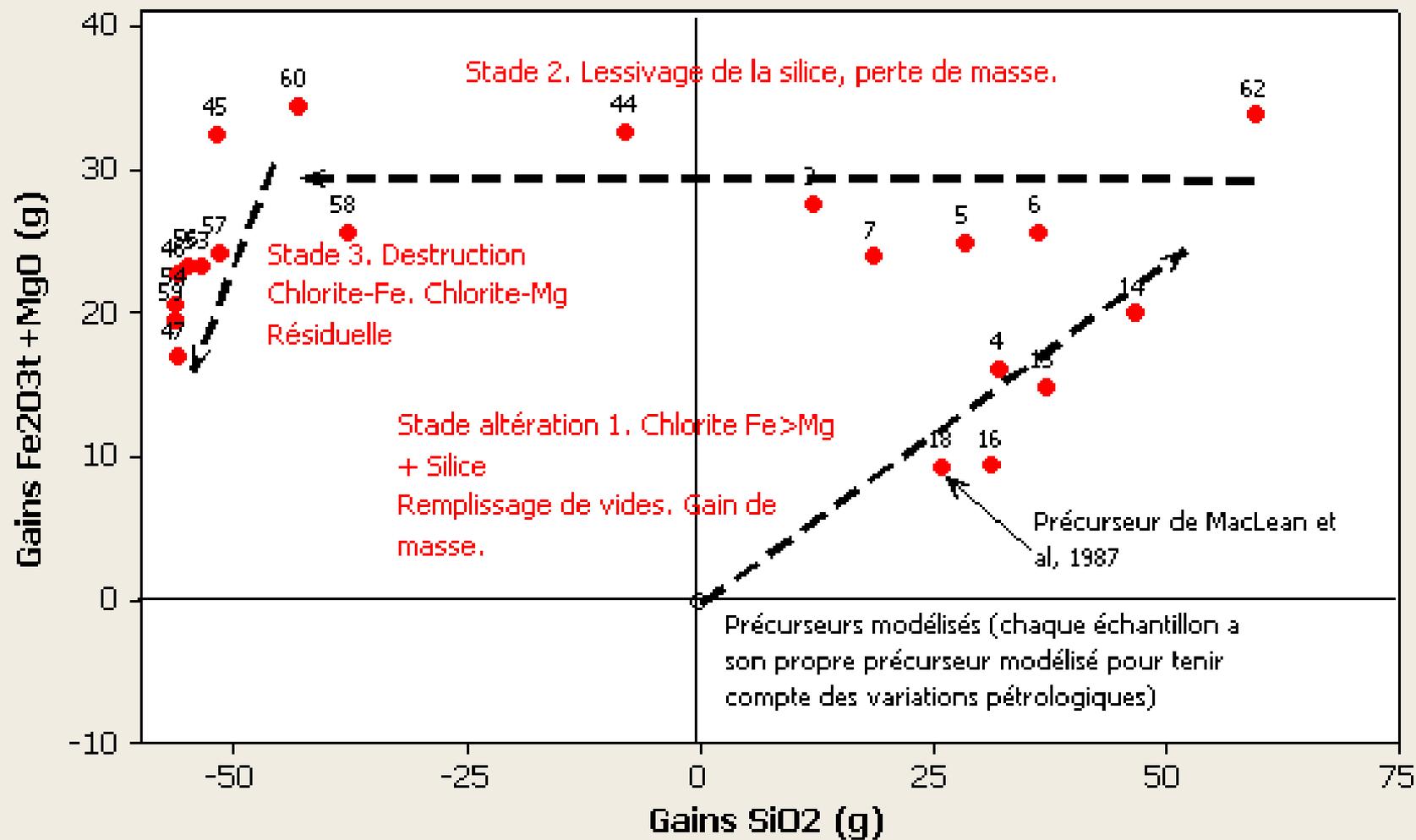
- Prédiction de Fe₂O₃ et MgO par modélisation des précurseurs est nettement plus basse que le protolithe de MacLean et al.

Phelps Dodge, bilans de masse originaux (MacLean et Kranidiotis, 1987)

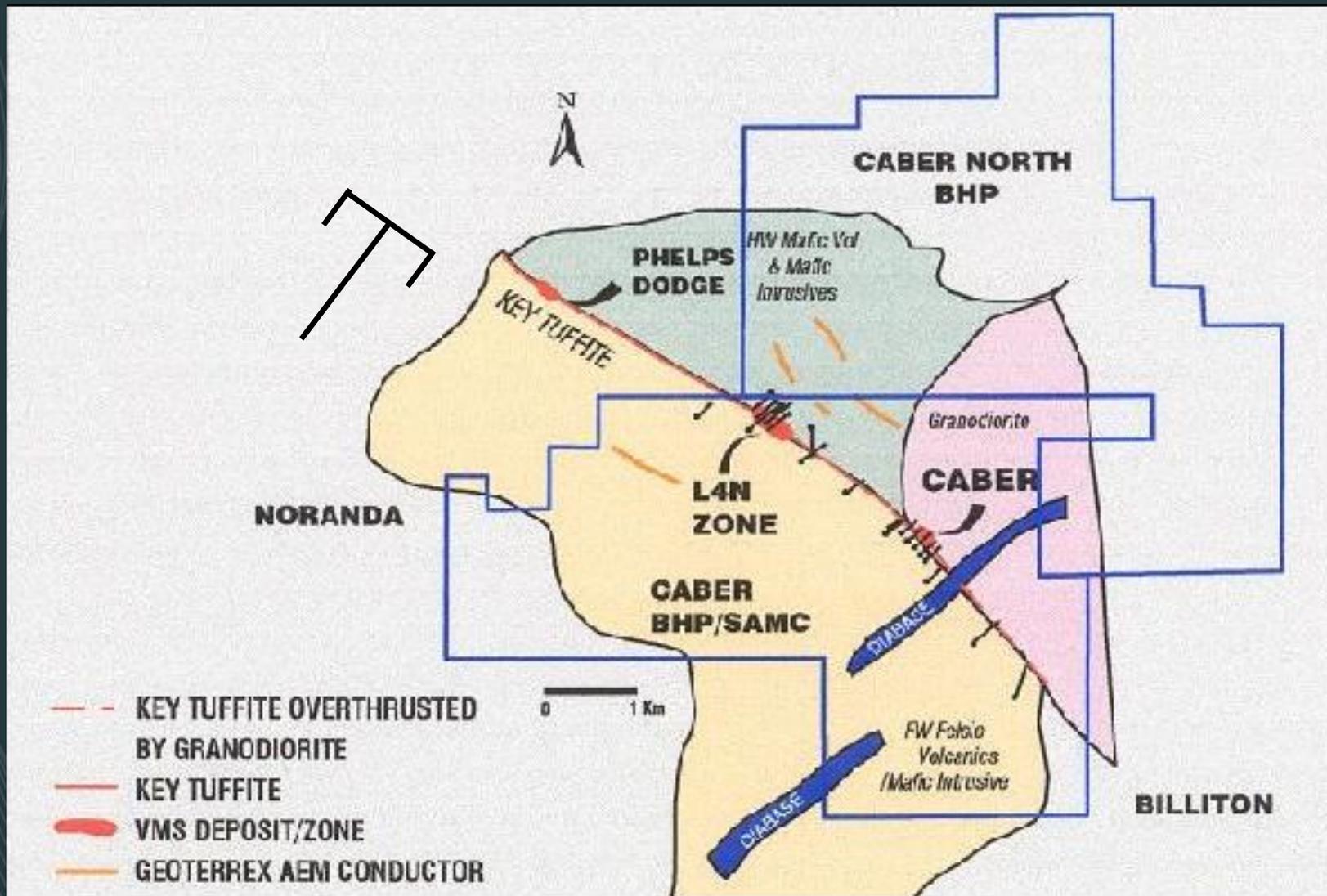


Calculs par le bilan de masse par modélisation des précurseurs, données de MacLean et al. 1987

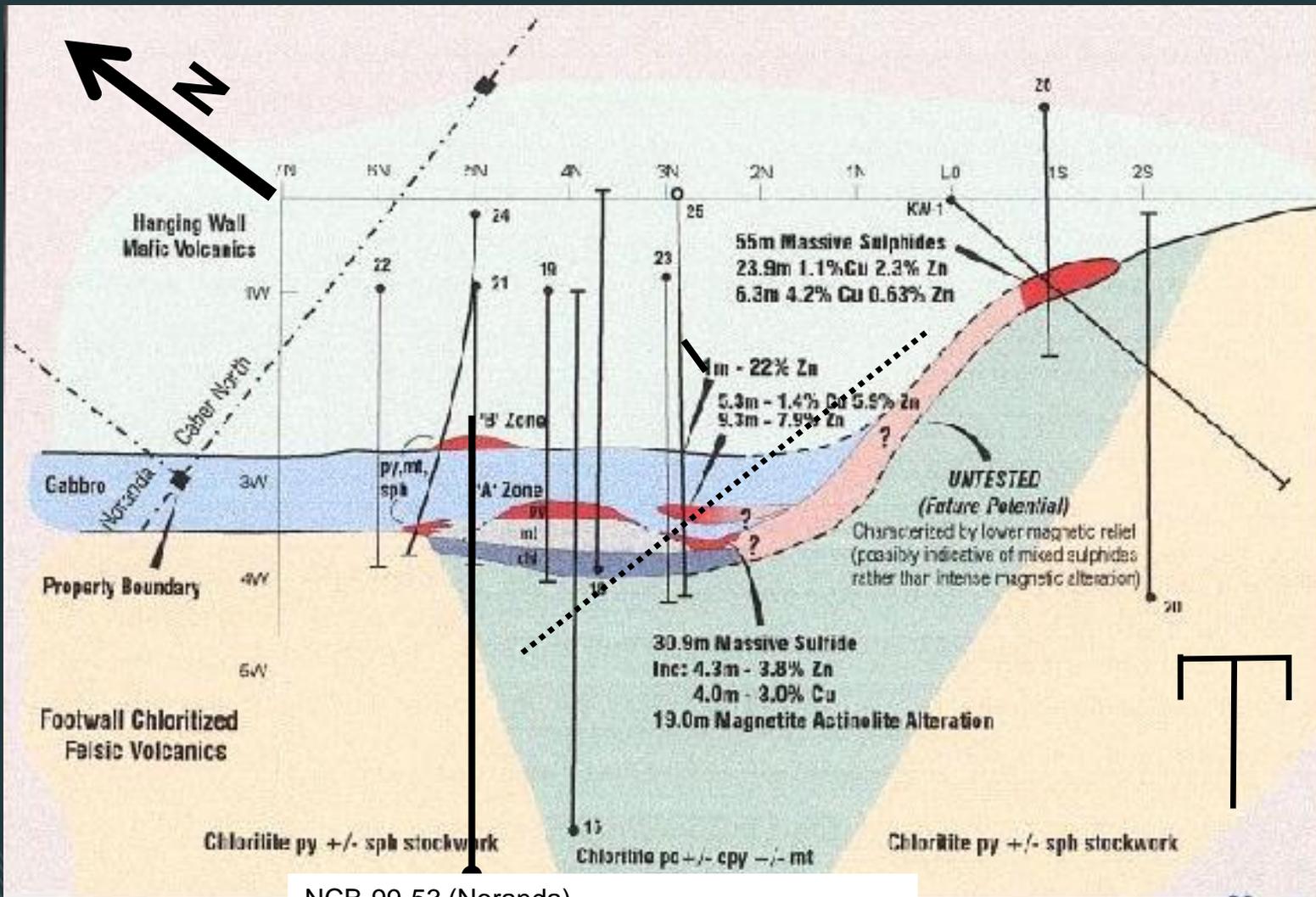
Nuage de points de Gains_Fe2O3t+MgO et Gains_SiO2



**Exemple d'application: précurseur multiples.
Forage Caber-Nord NCB-99-53 (GM-58356 - Noranda)**

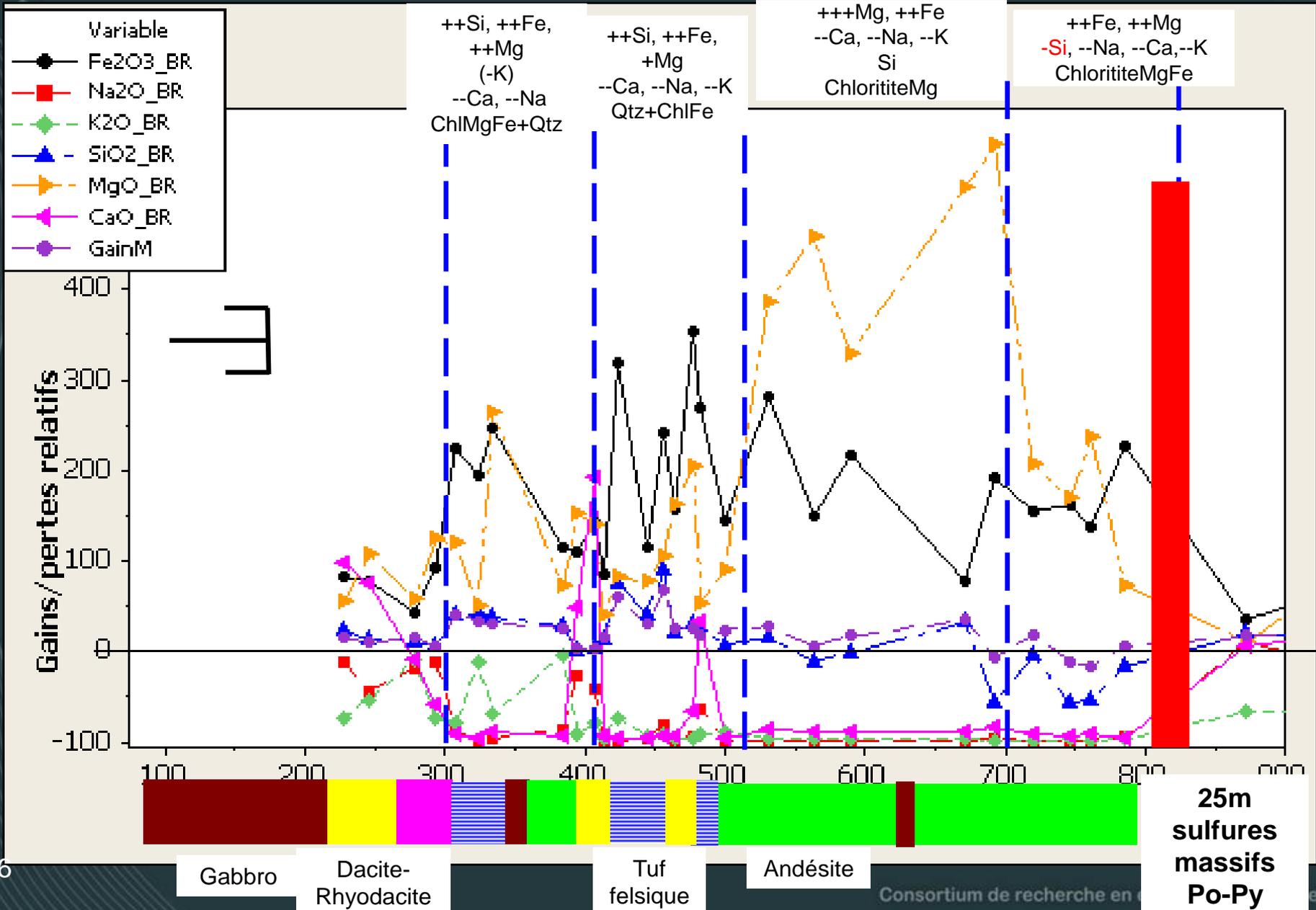


Exemple d'application: précurseur multiples. Forage Caber-Nord NCB-99-53 (GM-58356 - Noranda)



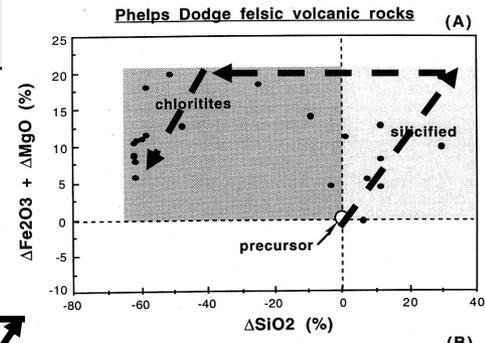
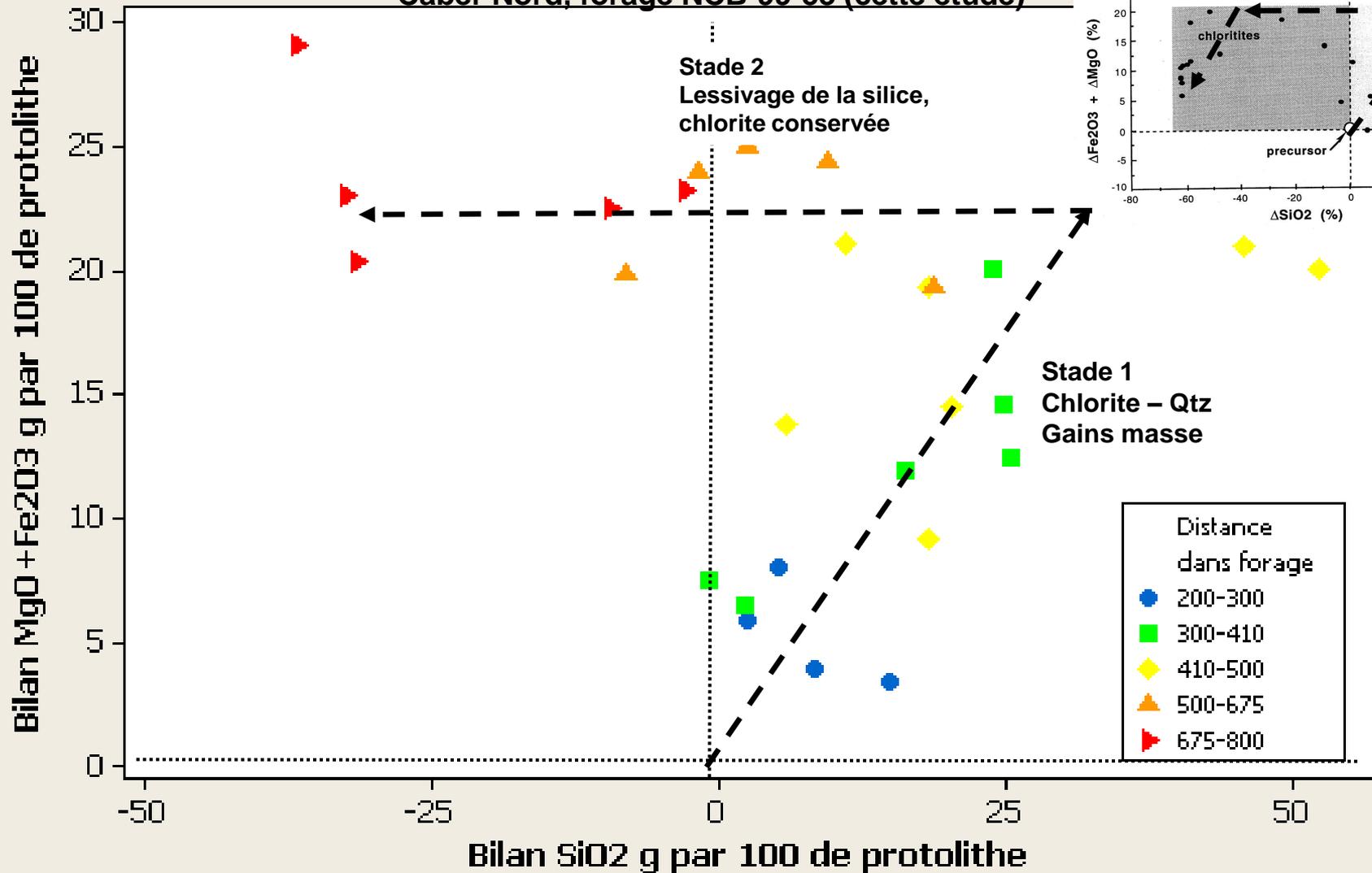
NCB-99-53 (Noranda)
Test de l'extension en profondeur de la lentille
Passe dans le mur (« footwall ») altéré

Forage NCB-99-53: bilans de masse avec précurseurs modélisés



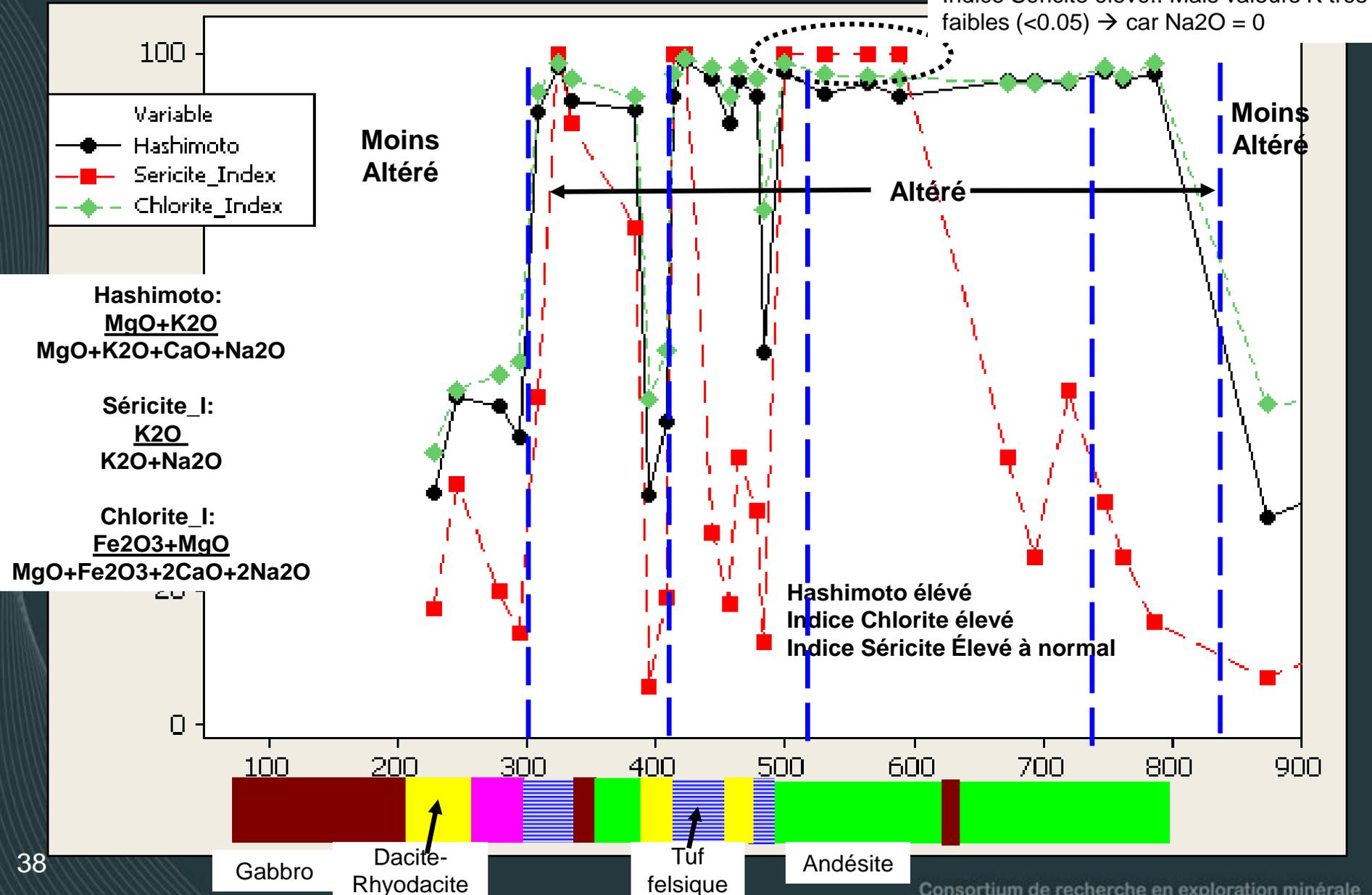
Forage NCB-99-53 et Phelps Dodge

Caber Nord, forage NCB-99-53 (cette étude)



Forage NCB-99-53: indices d'altération classiques

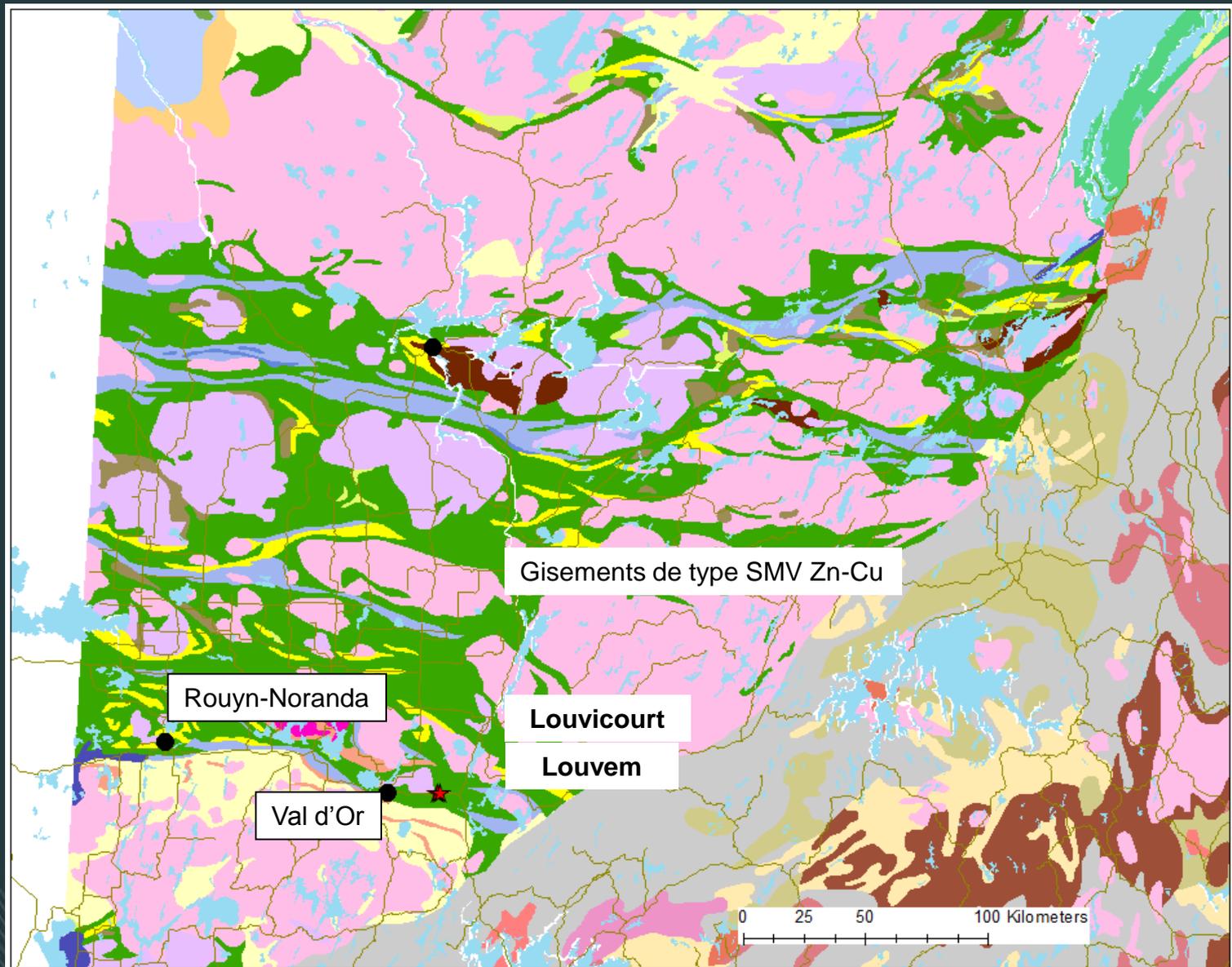
Indice Séricite élevé.. Mais valeurs K très faibles (<0.05) → car Na2O = 0



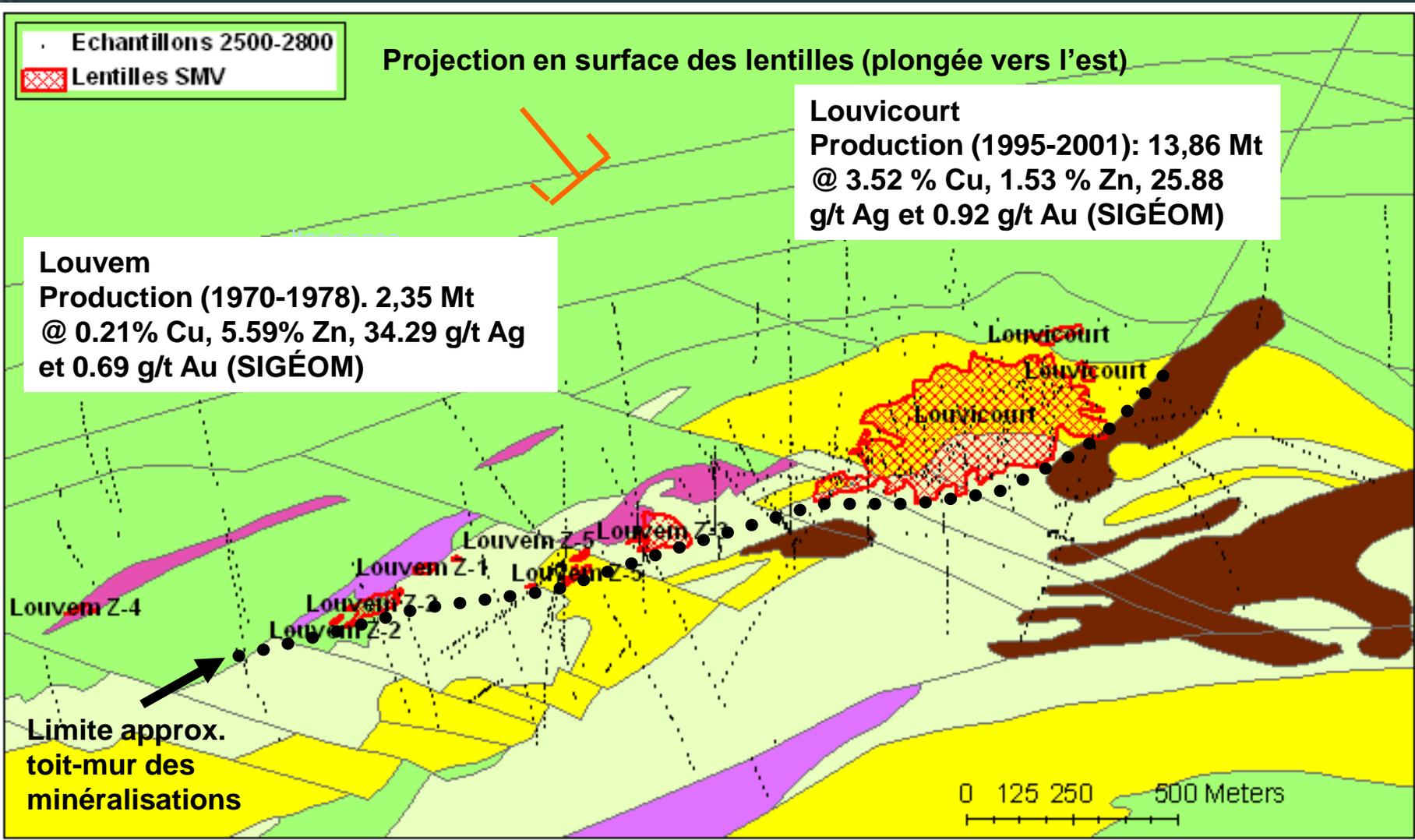
Exemple de NCB-99-53: conclusions

- Les bilans de masse permettent de raffiner l'interprétation du métasomatisme et de l'altération
 - Suivre les gains/pertes de SiO_2 → Caber Nord: lessivage progressif SiO_2 à l'approche de la minéralisation
 - Distinguer les ajouts de Mg vs. Fe lors de la chloritisation → distinguer les sous-zones d'altération

Application à l'échelle d'une carte: secteur de Louvicourt



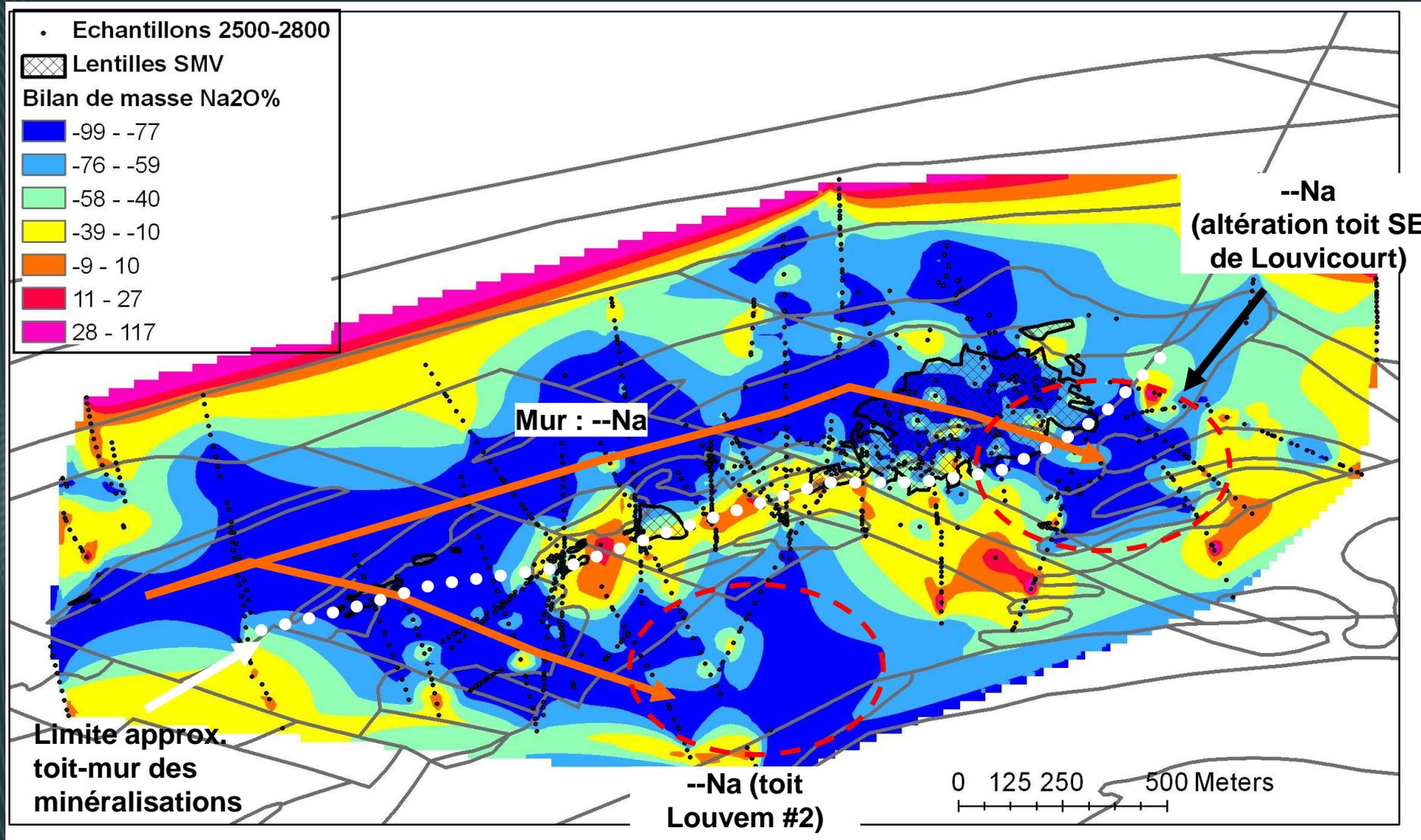
Application à l'échelle d'une carte: secteur de Louvicourt



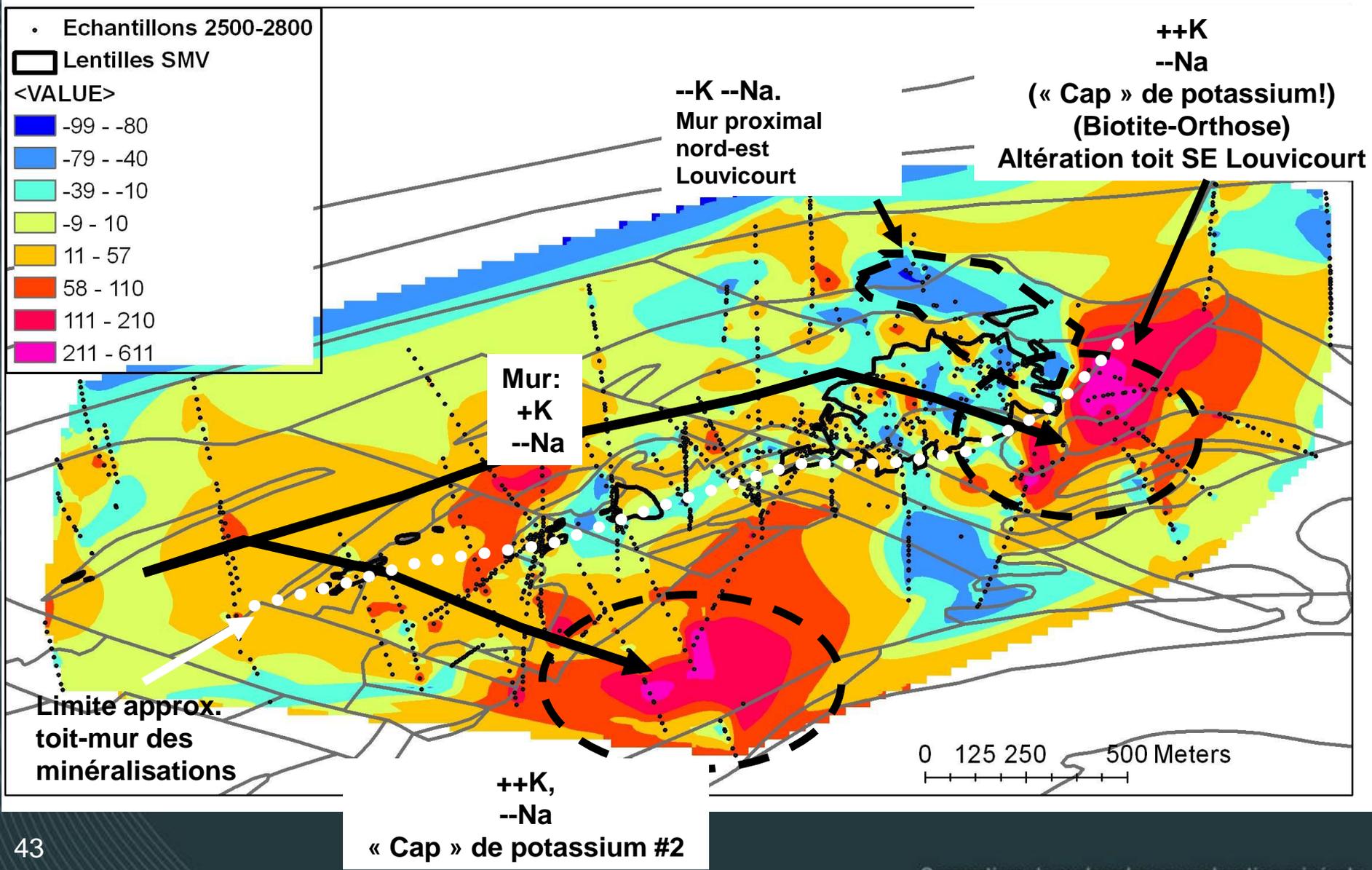
Tranche de niveau 2500m à 2800 m (-200 à -500m).

Géologie tirée Lamothe, 2006

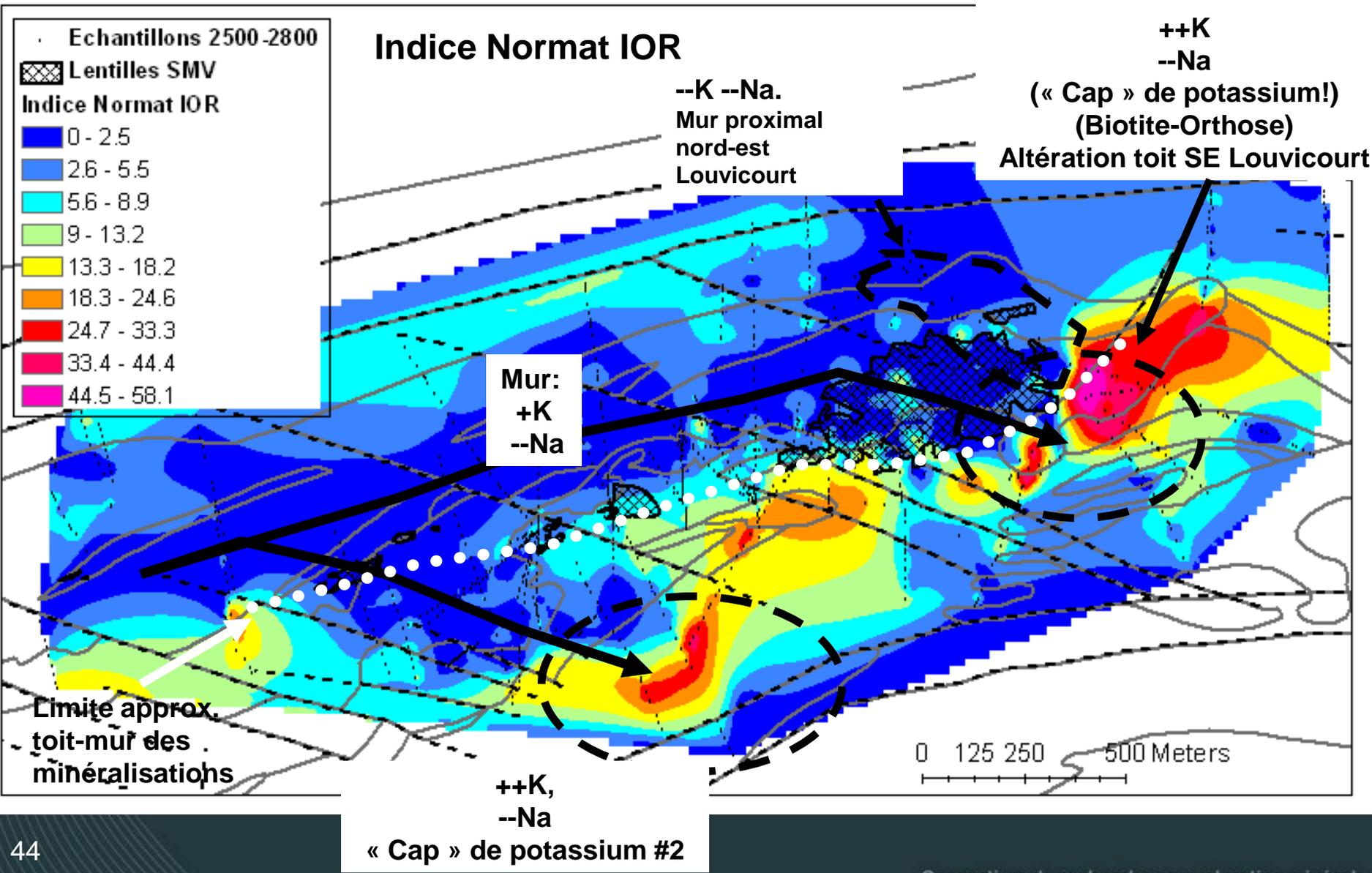
Bilan Na2O



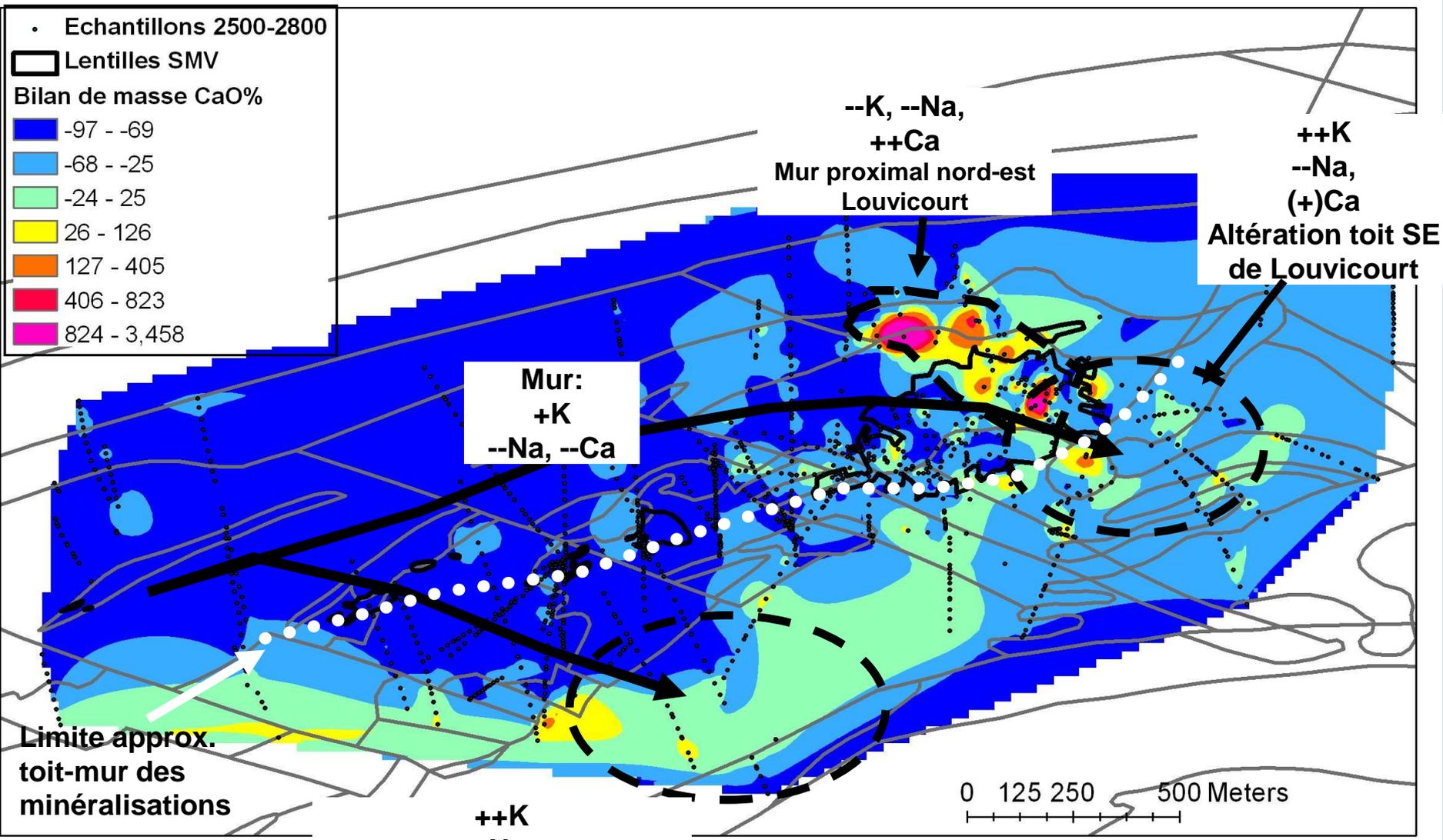
Bilan K2O



Indice Normat IOR

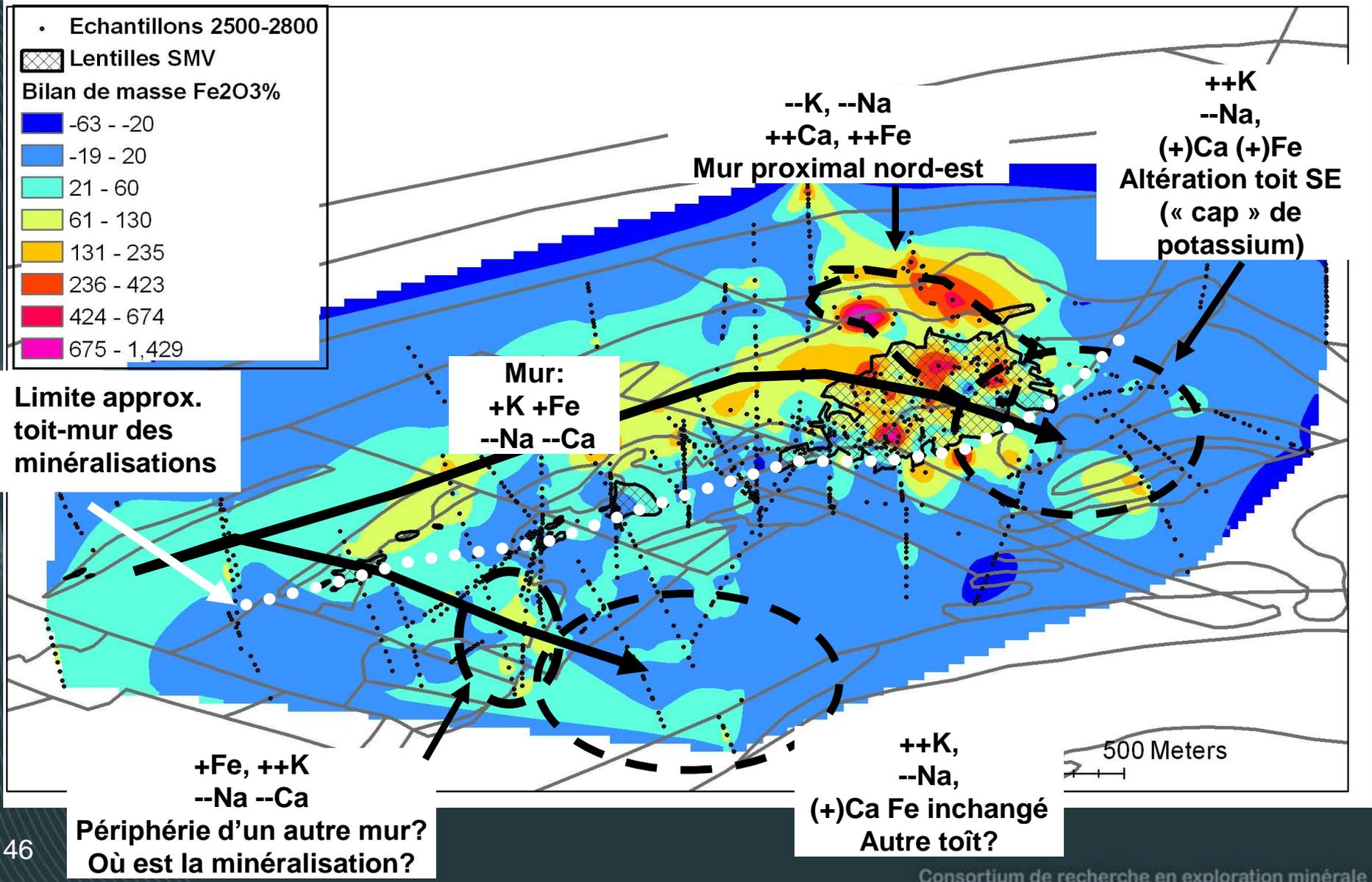


Bilan CaO



++K
--Na,
(+)Ca (toit)
« Cap » de potassium #2

Bilan Fe2O3



Bilan de masse par modélisation des précurseurs: avantages et inconvénients

- Avantages
 - Pas besoin de trouver les précurseurs sur le terrain (souvent ils n'existent probablement même pas) → solutionne le problème des protolithes multiples
 - Calcul direct de tous les bilans de masse des éléments majeurs (absolus ou relatifs); caractérise efficacement le métasomatisme (initial, processus, final)
 - Applicable à des banques de données régionales (contrairement aux autres méthodes de BM)
 - Une des seules méthodes qui quantifie la silicification

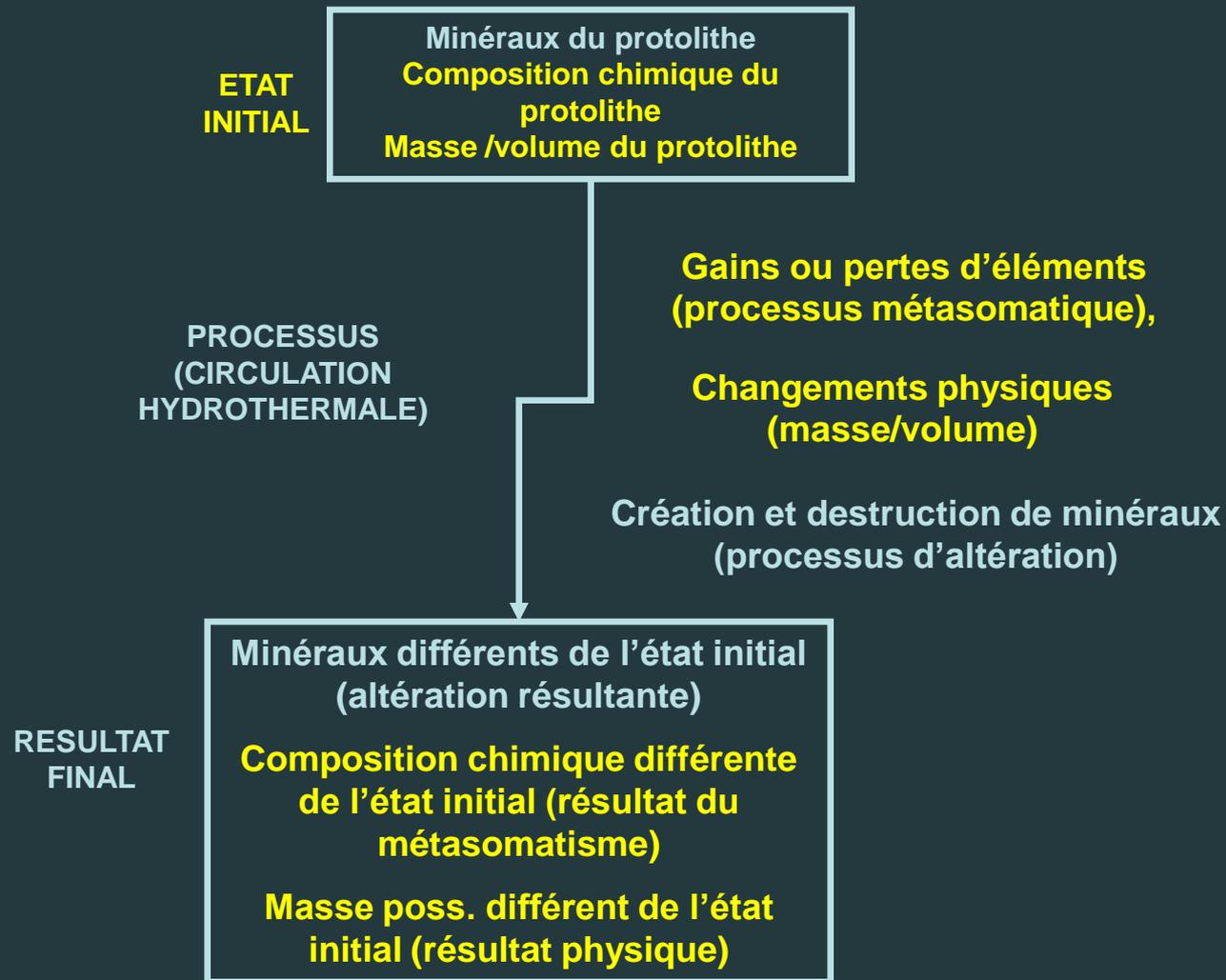
Bilan de masse par modélisation des précurseurs: avantages et inconvénients

- Désavantages
 - Seulement pour roches volcaniques et intrusives subalcalines (sans cumulats)
 - Il faut supposer l'immobilité de Zr, Al_2O_3 , TiO_2 (Y, Cr) → pas vrai dans 100% des cas
 - Demande au moins Zr comme élément mineur analysé (pas toujours disp.)
 - Cr nécessaire pour calculer correctement MgO pour basaltes
 - Reste une certaine incertitude sur la composition exacte du protolithe
 - Seulement majeurs; ne permet pas de calculer la composition du protolithe pour autres éléments mineurs et traces

Bilan de masse par modélisation des précurseurs: utilisations

- Utilisation
 - Calcul rapide de bilans de masse des majeurs dans un contexte d'exploration
 - Variations lithologiques importantes
 - Contrôle stratigraphique faible
 - Ne devrait pas remplacer le choix d'un protolithe peu altéré dans le cas d'études très détaillées (ex: une seule coulée dans une mine que l'on suit latéralement)
 - **Protolithe calculé → « raisonnable ». Il ne prétend pas être « exact ».**

Bilan de masse par modélisation des précurseurs



Méthodes caractérisant (principalement) le résultat du métasomatisme (chimique)

- Ratios d'éléments chimiques simples (ratios « unaires »)

Méthodes caractérisant (principalement) le résultat de l'altération (minéralogique)

- Minéraux normatifs

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat du métasomatisme (chimique)

- Bilans de masse

Méthodes caractérisant l'état initial, le processus et résultat de l'altération (minéralogique)

- Aucune???!!!

Processus d'altération?

- Si on connaît la composition du précurseur, on peut calculer ses minéraux normatifs (ex: Normat) → minéraux du précurseur
 - Normat permet de calculer les minéraux normatifs en mole% (par défaut), poids% ou volume% → choisir poids %
- Calculer ensuite la norme sur l'analyse de la roche métasomatisée → minéraux du résultat
- Calculer ensuite les bilans de masse des minéraux → processus d'altération (minéralogique!)
- Déjà proposé par Cheng et Sinclair, 1995

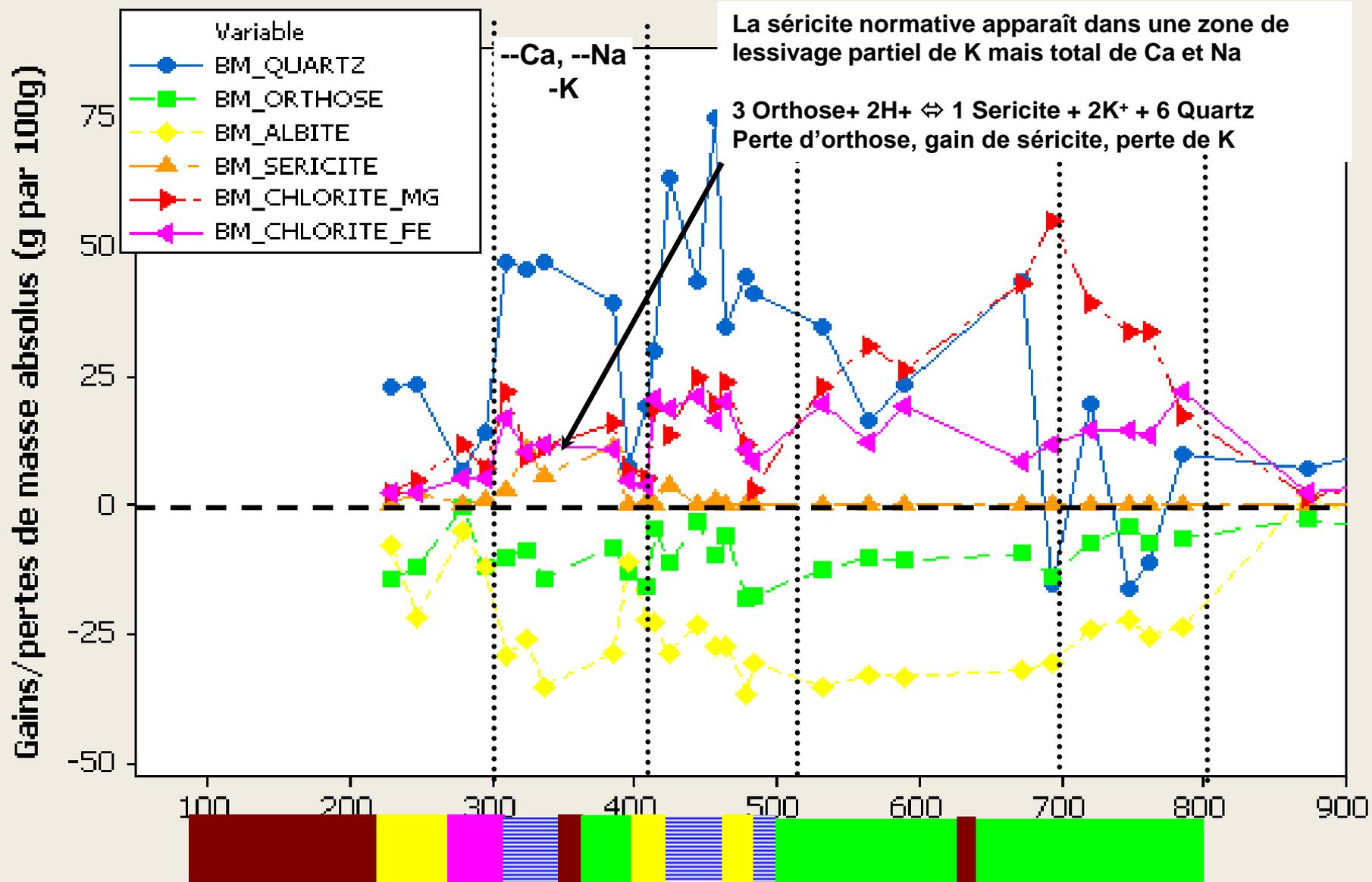
Processus d'altération?

- Changement de masse absolu d'un minéral (g);(bilan de masse des minéraux!) par rapport à son précurseur

$$\Delta MA_{\text{minéral}} = (C_{\text{TiO}_2, \text{frais}} / C_{\text{TiO}_2, \text{altéré}}) * C_{\text{minéral, altéré}} - C_{\text{minéral, frais}} \text{ (pour 100g de protolithe)}$$

- (Normat calcule aussi une densité modélisée. Pourrait être utilisé pour calculer les changements de masse durant l'altération).

Gains et pertes absolus de minéraux (g), forage NCB-99-53



Conclusions

- Bilans de masse par modélisation des précurseurs:
 - Nouvelle méthode développée au CONSOREM pour calculer rapidement et efficacement les bilans de masse pour les roches ignées subalcalines
 - Utilisable en contexte de précurseurs multiples

Conclusions

- Pour une étude complète et **quantitative** du métasomatisme et de l'altération (processus, état initial, résultats), il faut combiner
 - Bilans de masse (précurseur unique ou modélisation des précurseurs) →
 - État chimique initial, processus métasomatique, résultat chimique final
 - Minéralogie normative →
 - État minéralogique final
 - Combinaison des bilans de masse et minéralogie normative
 - État minéralogique initial, changements minéralogiques
- Les bilans de masse et la minéralogie normative devraient être les méthodes « standardisées » choisies pour le traitement de l'altération

Outil logiciel CONSOREM de traitement de la lithogéochimie

- Outil logiciel intégrant notamment
 - Calcul du bilans de masse par modélisation des précurseurs
 - Indices et diagrammes d'altération et pétrogénétiques (binaires, ternaires, arachnides)
 - Norme CIPW
 - Fonctions utilitaires (recalculs molaires, à 100%, anhydres, cationiques...)
 - Mise en carte Mapinfo, sélections interactives diagrammes-carte
 - Etc
- Disponibles pour tous les membres du CONSOREM

Logiciel CONSOREM de traitement de la lithogéochimie

Outil d'assistance pour le traitement de la lithogéochimie

Fichier Carte Configuration Manipulation des données Indices unaires Diagrammes Analyses



Carte Mapinfo et tableur intégrés

Rhyolites

Mise à jour

Noir: Colonnes numériques. (NB: seules colonnes numeriques peuvent etre utilisées comme d
Rouge: Autres types de colonnes

TriOrig	CSREM ID	Lab ID	Date	Auteur
127	R-2003-68	03-0328-0069	2003	DG
129	R-2003-70	03-0328-0071	2003	DG
132	R-2003-73	03-0328-0074	2003	DG
57	4006	05-0550-0057	2005	ST
58	4007	05-0550-0058	2005	ST

