

Utilisation des éléments volatils pour détecter les minéralisations aurifères: Méthodes d'analyses et exemples d'application en Abitibi

Mini-Forum UQAM

14 février 2018

Dominique Genna, Damien Gaboury (UQAC)



Au, meilleur traceur pour l'exploration aurifère?

Exemple de Lamaque

Halo de zone >10 ppb; 500 m

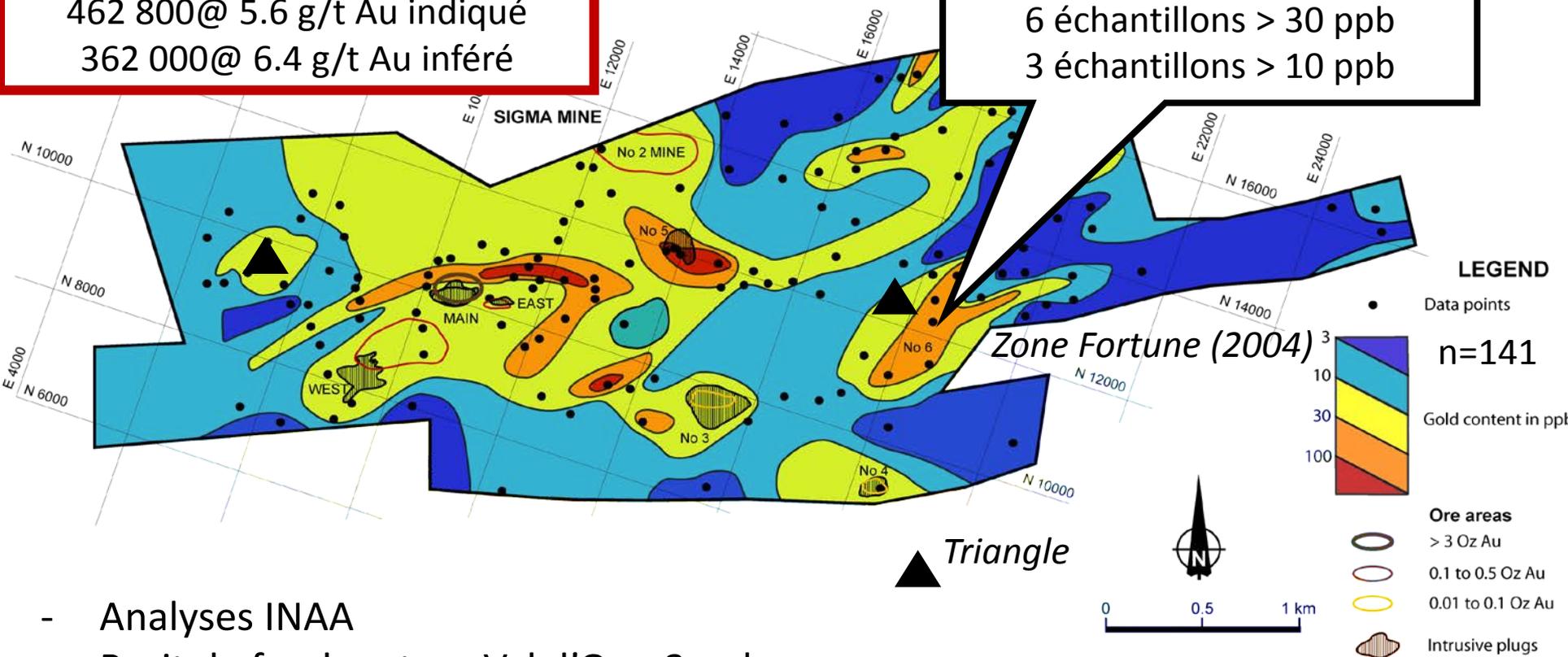
Veine No 6

462 800 @ 5.6 g/t Au indiqué
362 000 @ 6.4 g/t Au inféré

Zone Fortune

330 200t @ 5.1 g/t Au indiqué
28 000t @ 4.6 g/t Au inféré

6 échantillons > 30 ppb
3 échantillons > 10 ppb

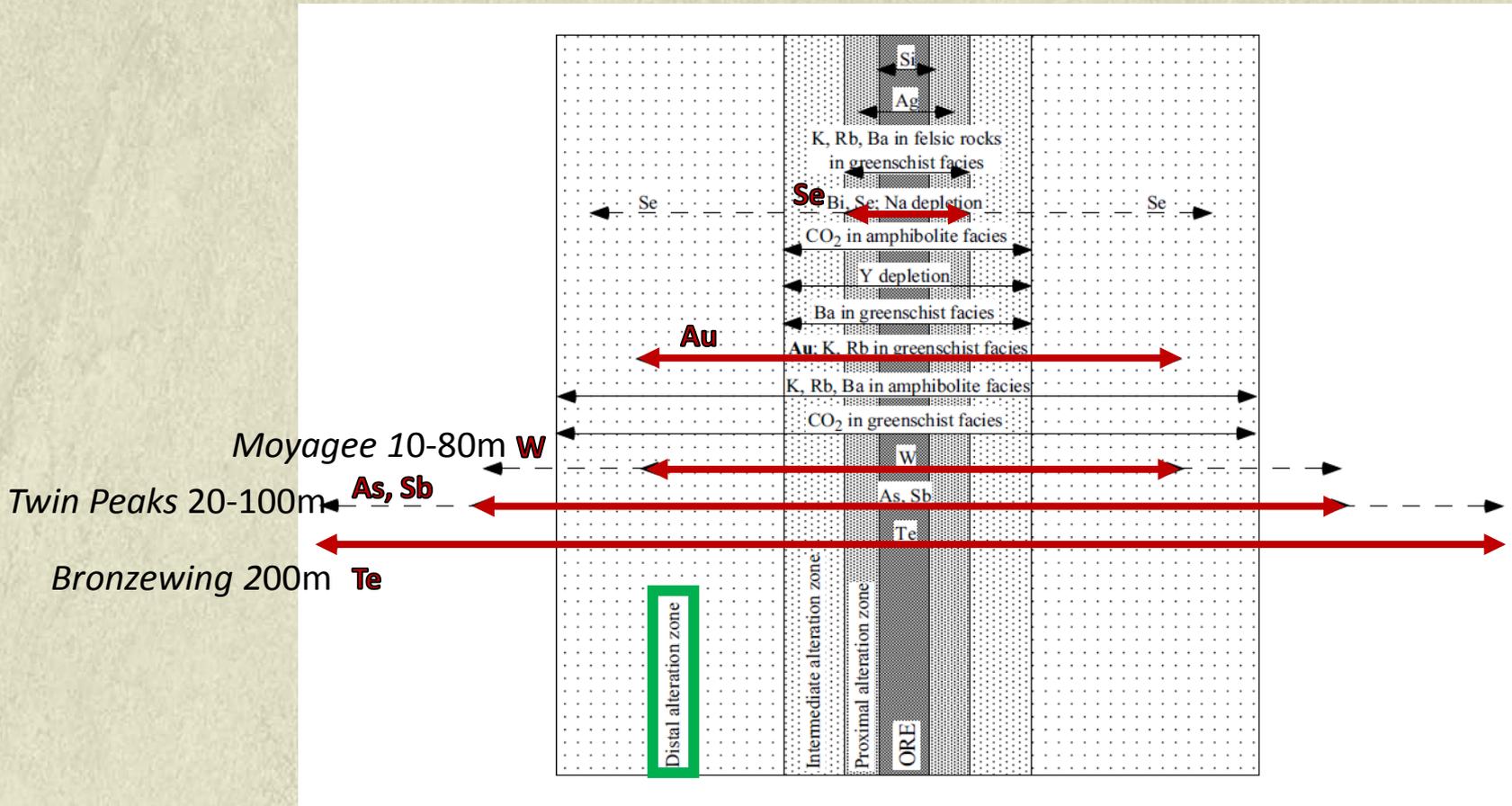


- Analyses INAA
- Bruit de fond secteur Val d'Or = 3 ppb
- Halo de valeurs anormales sur 4 km²

INAA = Instrumental Neutron Activation Analysis; RNAA = Radiochemical Neutron Activation Analysis

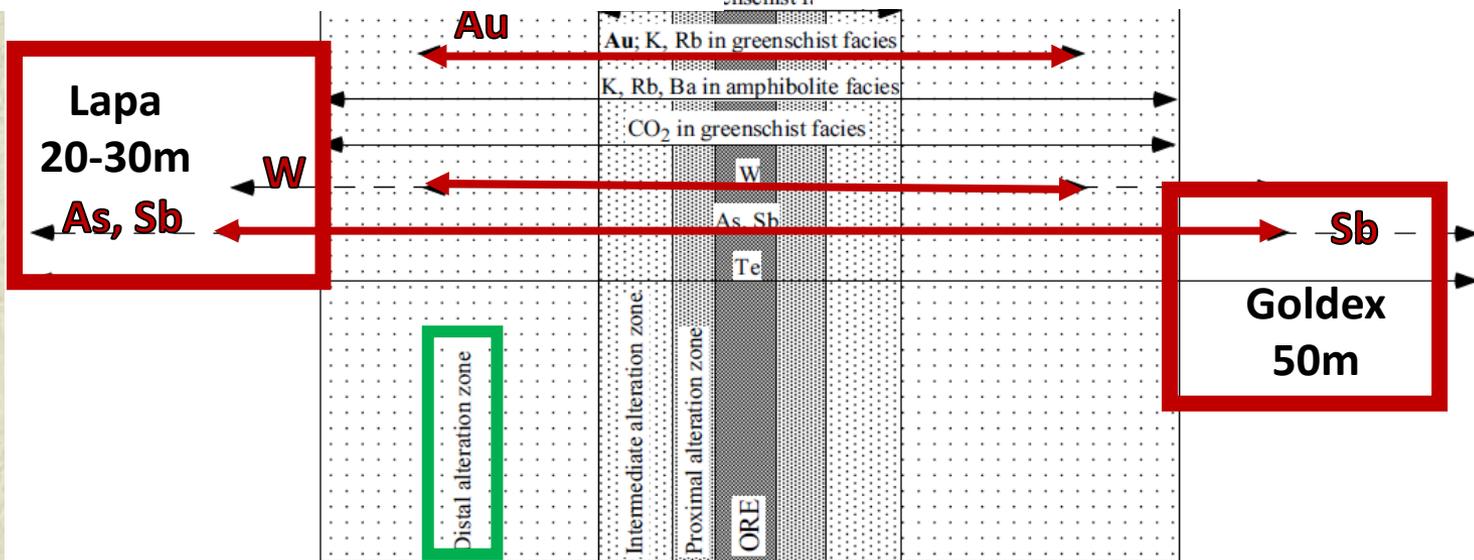
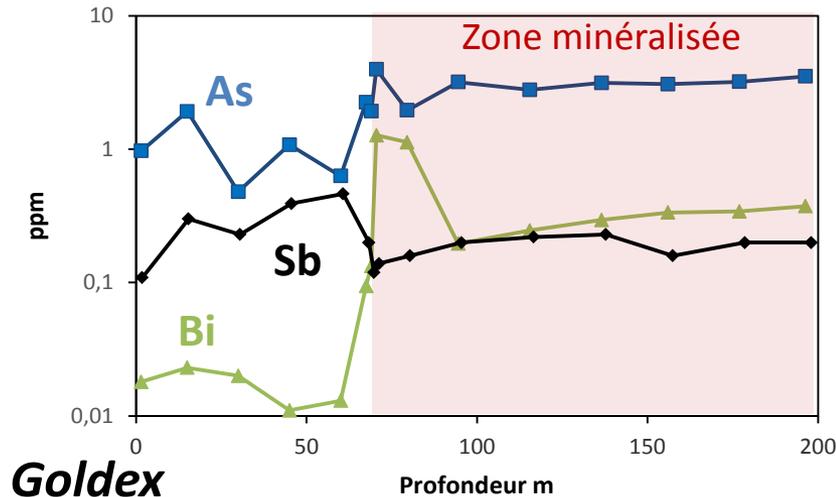
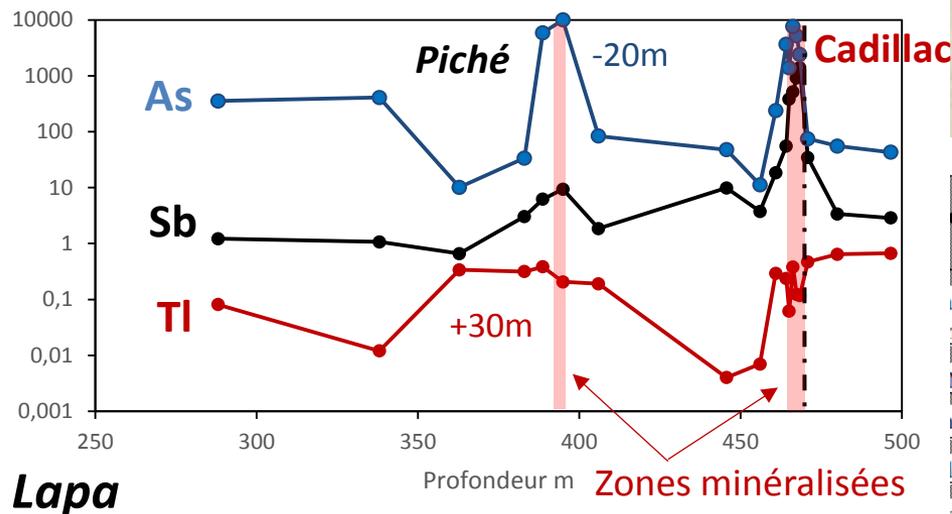
Au, meilleur traceur pour l'exploration aurifère?

Éléments traces dans les systèmes orogéniques – Zonalité latérale. Quelle échelle? Applicable en Abitibi?



Eilu et Groves, 2001

Faits saillants



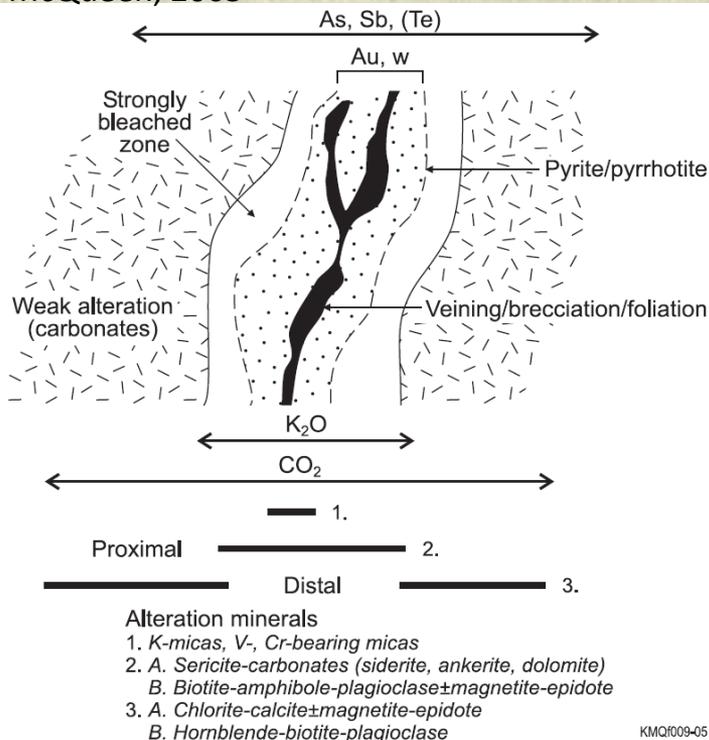
Eilu et Groves, 2001

Au, meilleur traceur pour l'exploration aurifère?

Objectif et méthodes

Au-As-Sb-W-Bi-Te

McQueen, 2005



Tester les variations latérales

- Segment minéralisé (mine Lapa)
- Segment stérile (secteur Maritime)

Comparer avec les outils classiques

- Indices de saturation
- Vecteur/Fertilité

Utilisation des éléments volatils

Kerrich, 1983; Colvine et al. 1988; Perring et al. 1990; Nurmi et al. 1991; Goldfarb et al. 1997; Eilu et Mickucki, 1998; Eilu et Groves 2001, Wang et al. 2013

Source de l'or: modèle de dévolatilisation métamorphique

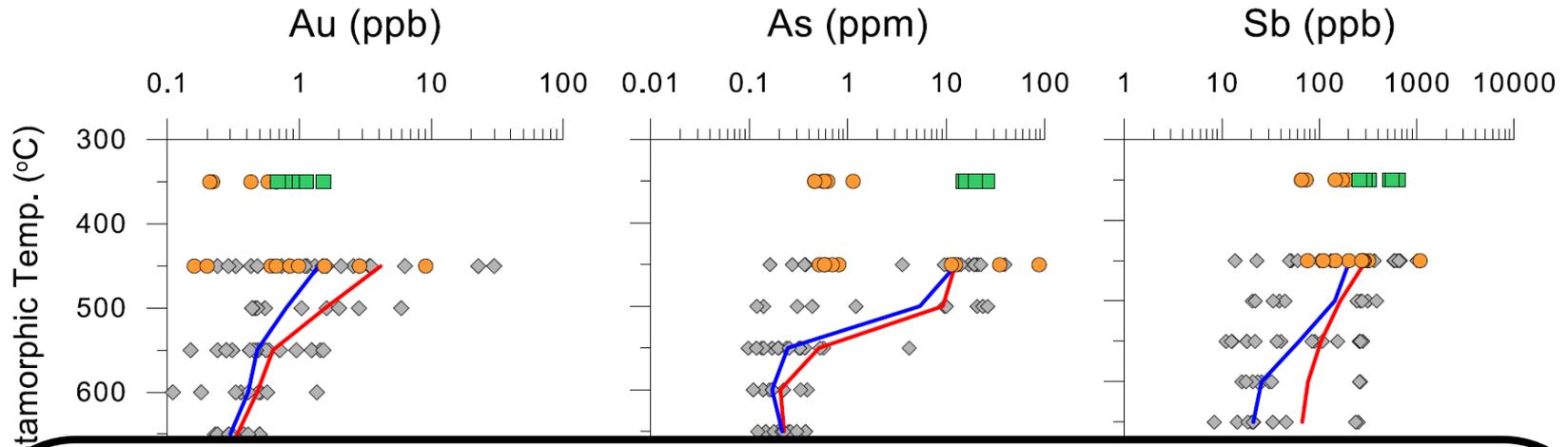


Table 7.1: The metal content of the Pontiac subprovince biotite zone rocks which are used as protolith values.

Element	Average	SD	Max	Min	Element	Average	SD	Max	Min
Au (ppb)	4.17	7.82	29.98	0.24	Se (ppb)	106.61	43.47	177.05	10.51
As (ppm)	12.39	9.97	39.29	0.16	Te (ppb)	33.69	15.53	65.56	11.69
Sb (ppb)	303.28	287.25	1005.74	13.66	Bi (ppb)	181.25	78.44	377.68	63.55

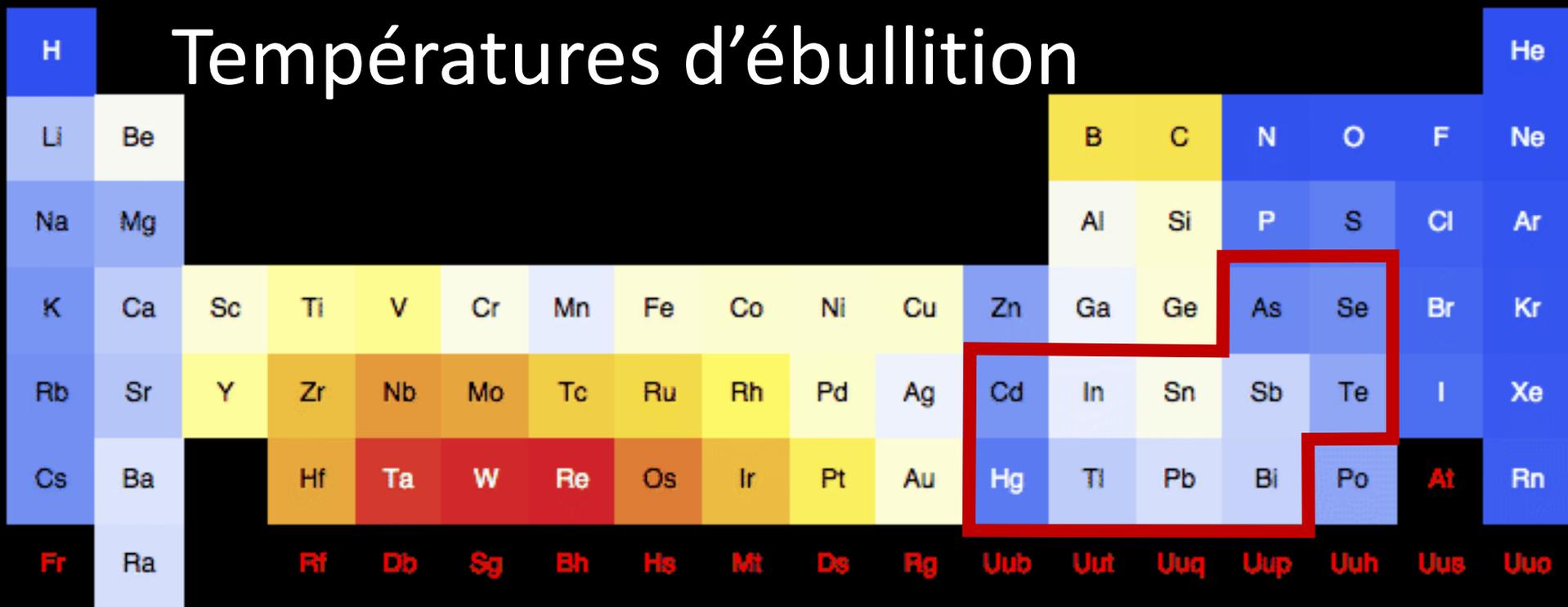
**1km³ de Pontiac (zone à biotite) =
10t Au; 32800t As; 630t Sb; 20Mt H₂O et 2.4Mt C
faciès Amphibolite; zone sillimanite**

Éléments « volatils »

- Pas des volatils au sens strict du terme
- Volatilité: capacité d'un élément à se vaporiser
- Éléments qui présentent un point d'ébullition relativement bas
- Éléments qui sous certaines conditions vont être dispersés au-delà des zones minéralisées, voire même altérées.
- Éléments indicateurs SMV, SEDEX, Porphyre, Or Orogénique, etc.
- Dispersion dans l'environnement secondaire
- ... mais aussi les plus difficiles à analyser

30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Selenium
48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Tin	51 Sb Antimony	52 Te Tellurium
80 Hg Mercury	81 Tl Thallium	82 Pb Lead	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium

Températures d'ébullition



Fusion Li-métaborate: 1050°C

Boiling Point (°C)

Periodictable.com

Fusion Peroxyde de sodium: 650°C

Méthodologie

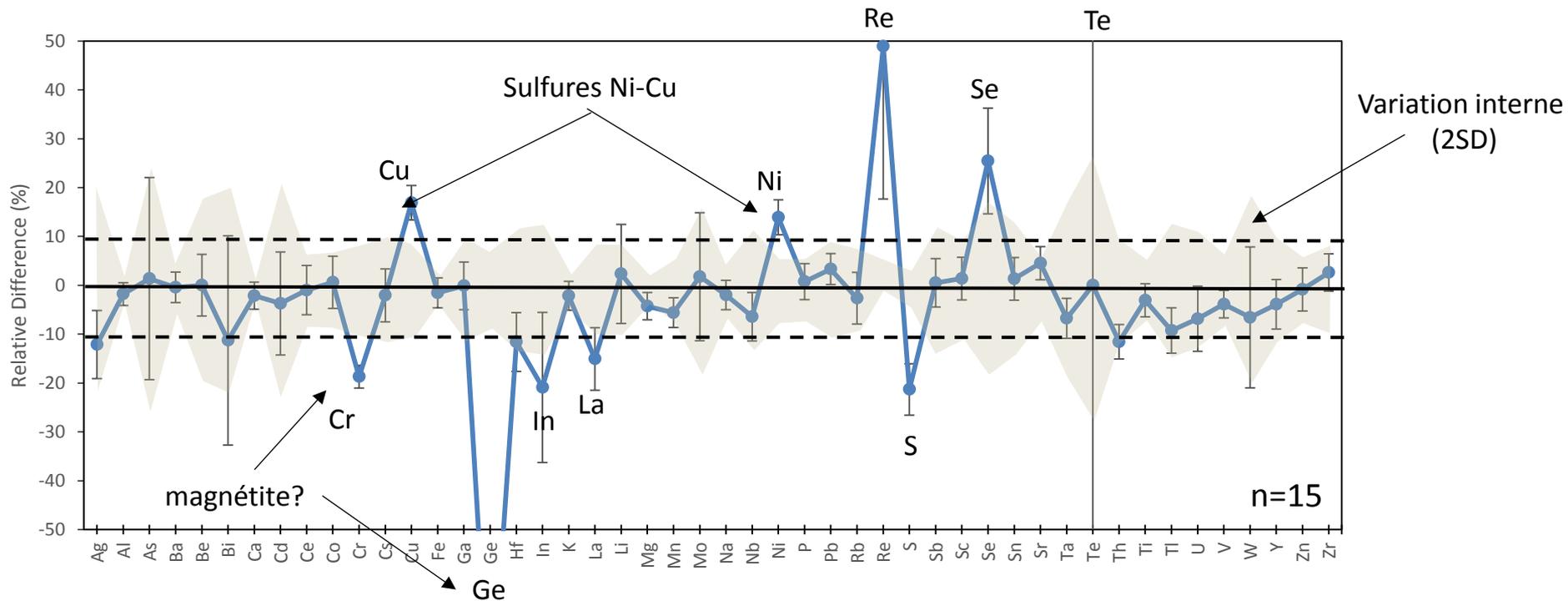
- *Package* ME-MS61L de ALS (Partenaire du projet, -25%)
Dissolution 4 acides optimisée pour conserver les éléments volatils – Analyse ICP-MS (48 éléments)
- Pas de PAF, ni de Si
- 2 cas d'étude
 - Lapa (n=54); Goldex (n=53)

ANALYTES & RANGES (ppm)				« Super traces »				CODE	PRICE PER SAMPLE (\$)
Ag	0.002-100	Cu	0.02-10,000	Na	0.001%-10%	Sr	0.02-10,000	ME-MS61L	46.75
Al	0.01%-25%	Fe	0.002%-50%	Nb	0.005-500	Ta	0.01-500		
As	0.05-10,000	Ga	0.05-10,000	Ni	0.08-10,000	Te	0.04-500		
Ba	1-10,000	Ge	0.05-500	P	0.001%-1%	Th	0.004-10,000		
Be	0.02-1,000	Hf	0.004-500	Pb	0.01-10,000	Ti	0.001%-10%		
Bi	0.005-10,000	In	0.005-500	Rb	0.02-10,000	Tl	0.004-10,000		
Ca	0.01%-25%	K	0.01%-10%	Re	0.002-50	U	0.01-2,500		
Cd	0.005-1,000	La	0.005-10,000	S	0.01%-10%	V	0.1-10,000		
Ce	0.01-500	Li	0.2-10,000	Sb	0.02-10,000	W	0.008-10,000		
Co	0.005-10,000	Mg	0.01%-25%	Sc	0.01-10,000	Y	0.01-500		
Cr	0.3-10,000	Mn	0.2-50,000	Se	0.2-1000	Zn	0.2-10,000		
Cs	0.01-500	Mo	0.02-10,000	Sn	0.02-500	Zr	0.1-500		

Qualité des données

Standard – Précision et répétitivité

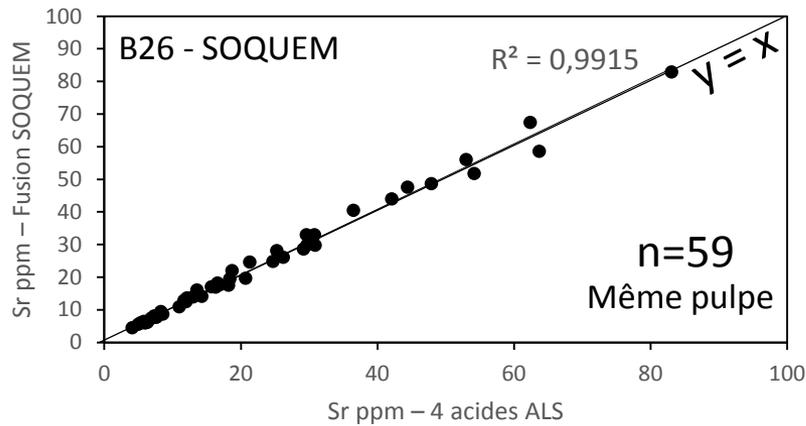
KPT-1 – Dyke Diorite à Quartz de Sudbury (3% Sulfures)



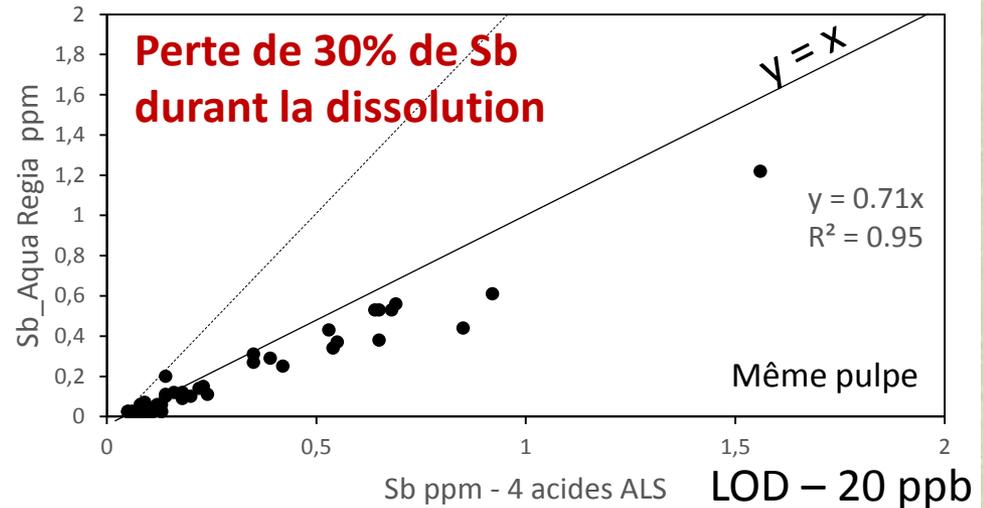
Résultats sont très satisfaisants pour la plupart des éléments

Qualité des données

Fusion vs 4 acides

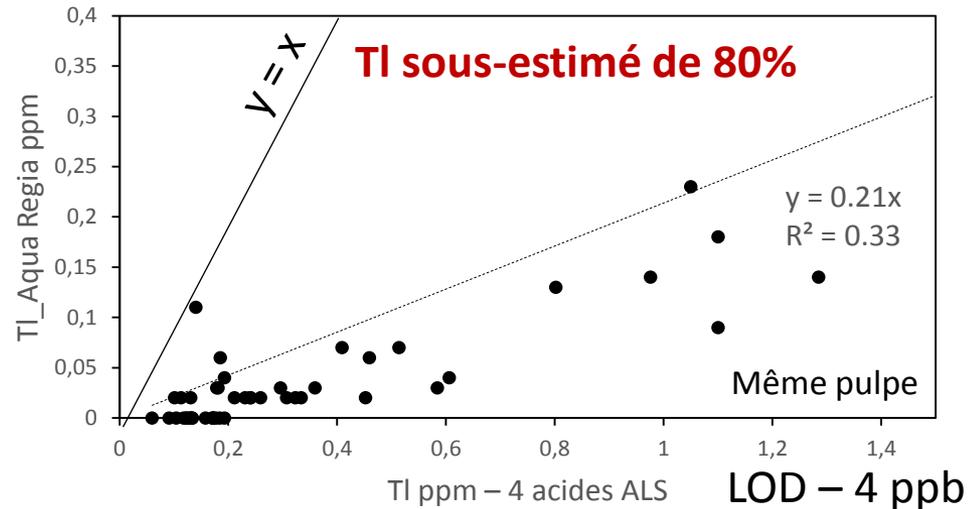


Aqua Regia vs 4 acides

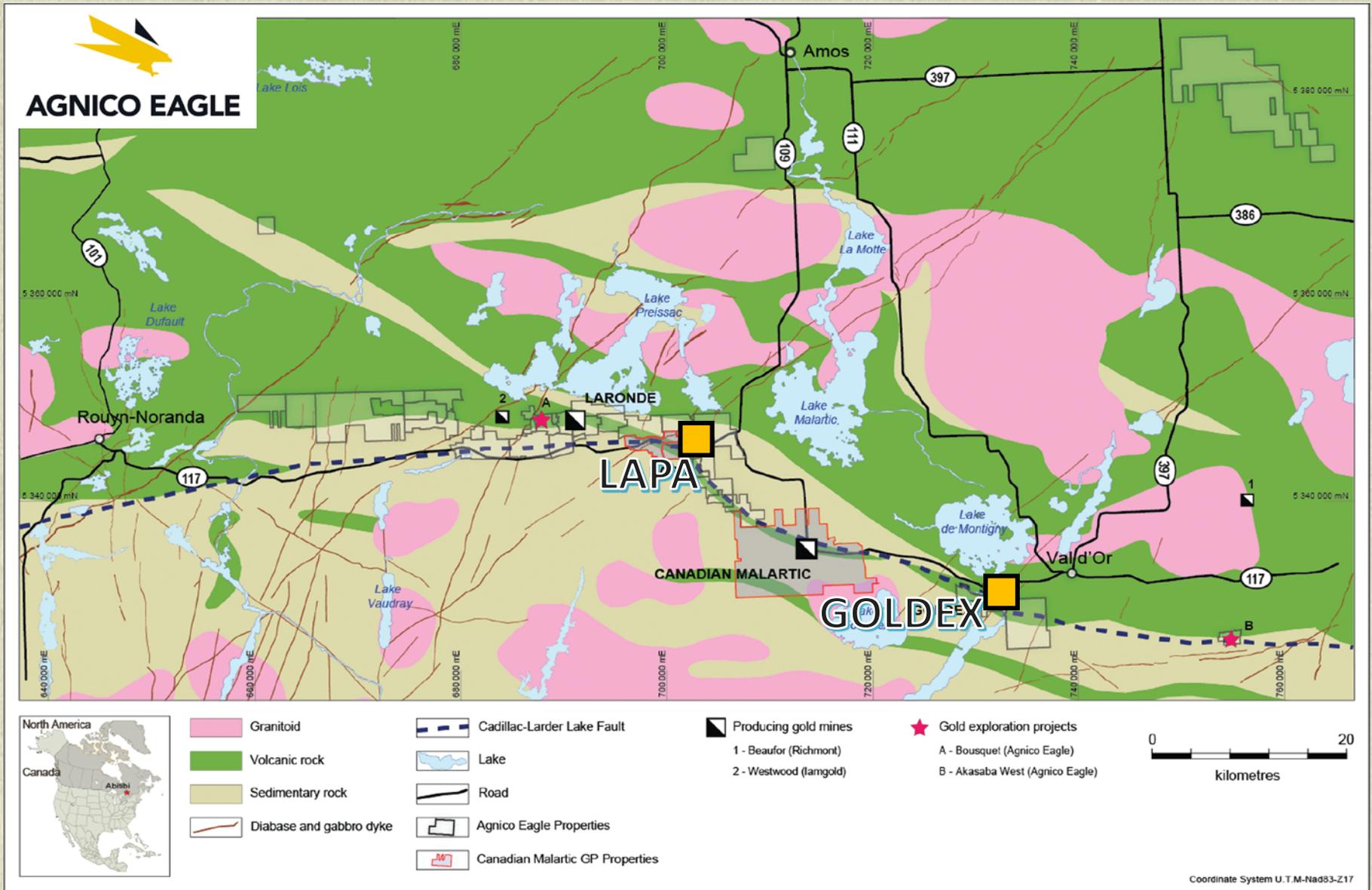


La nouvelle méthode 4 acides ALS permet:

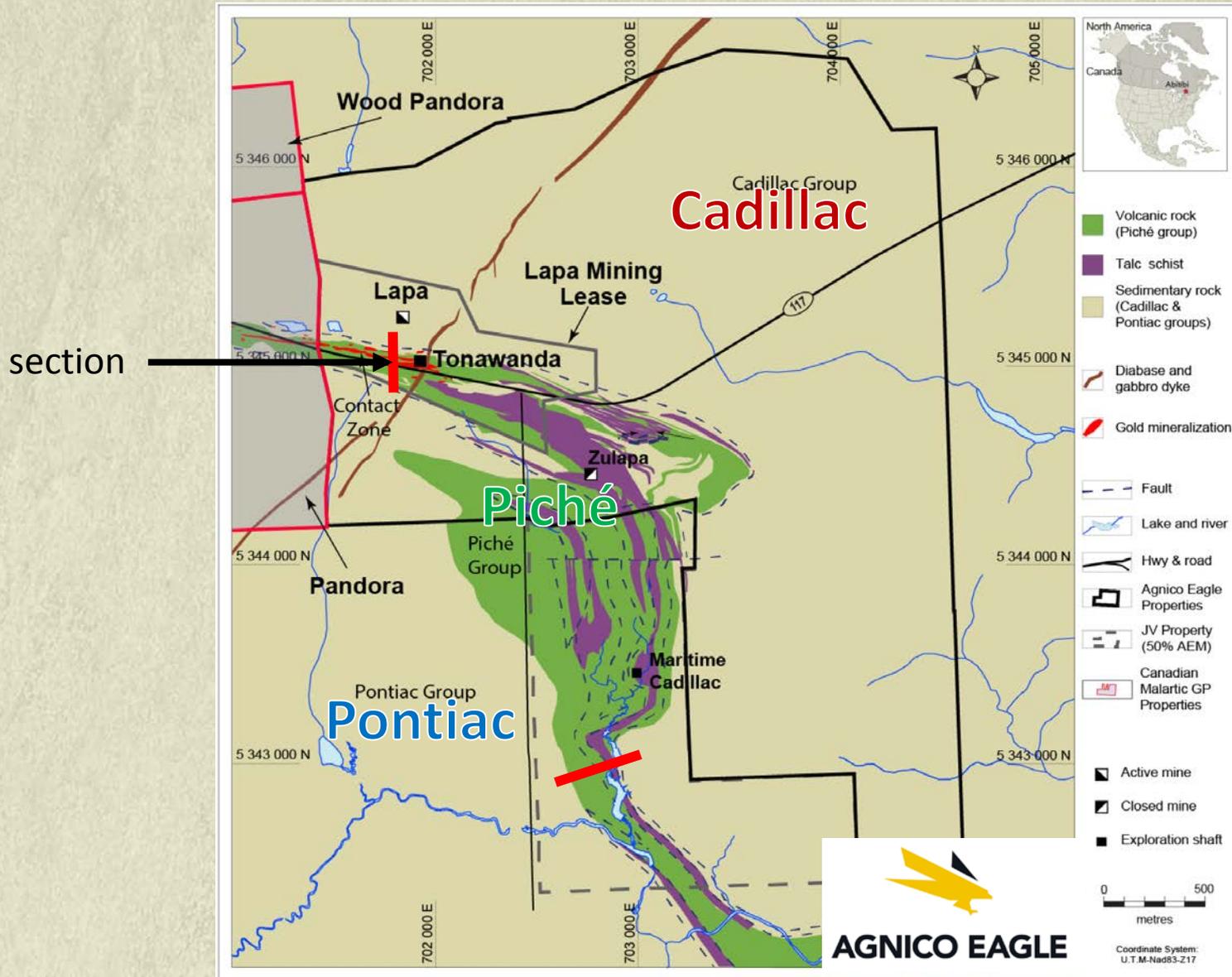
- Conserver les éléments volatils durant le processus de dissolution
- Abaisser significativement les limites de détection (ppm vs ppb)
- Obtenir le TI des sulfures et des silicates



Cas d'étude

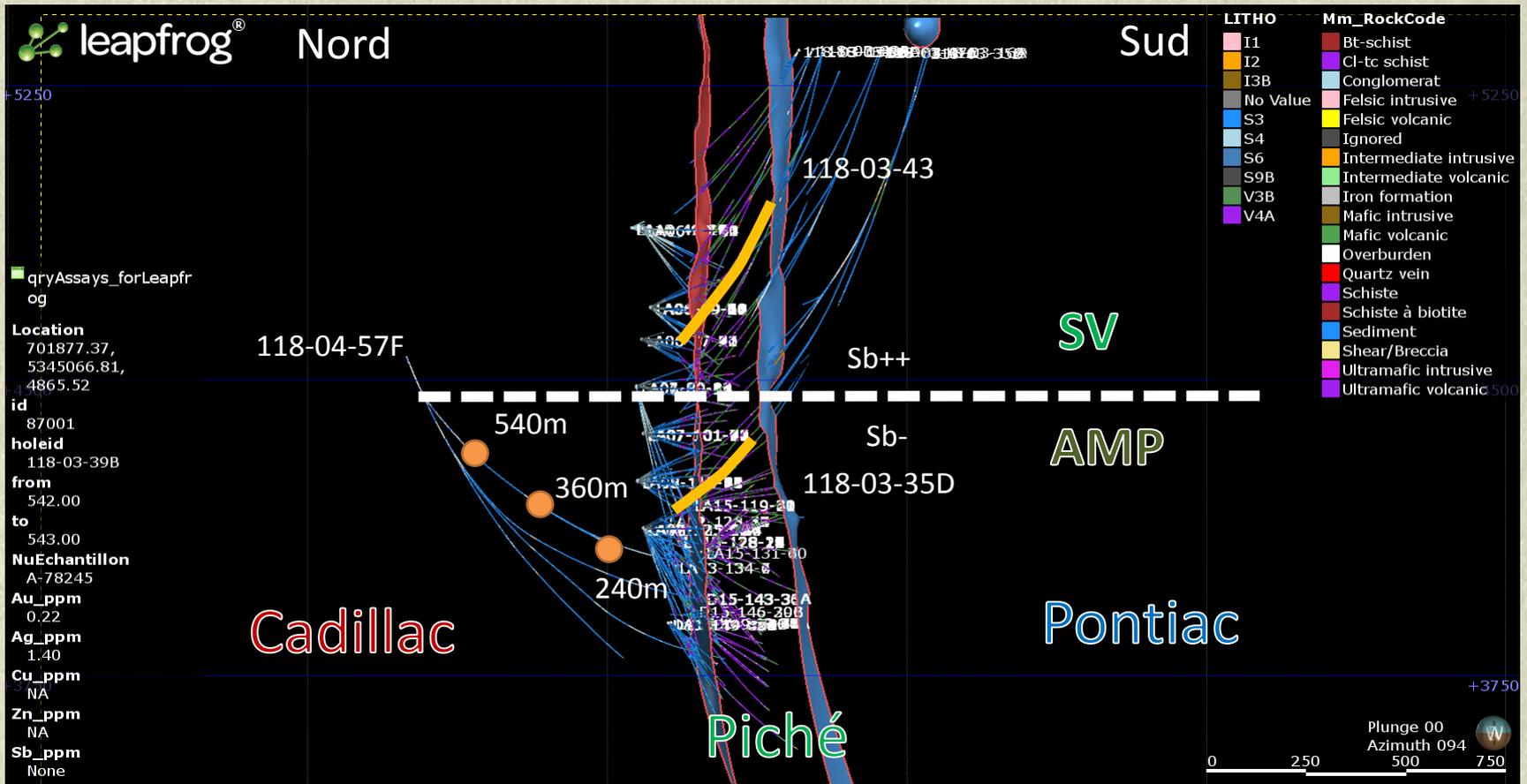


Lapa, Agnico Eagle



Lapa - Échantillonnage

Zone Contact

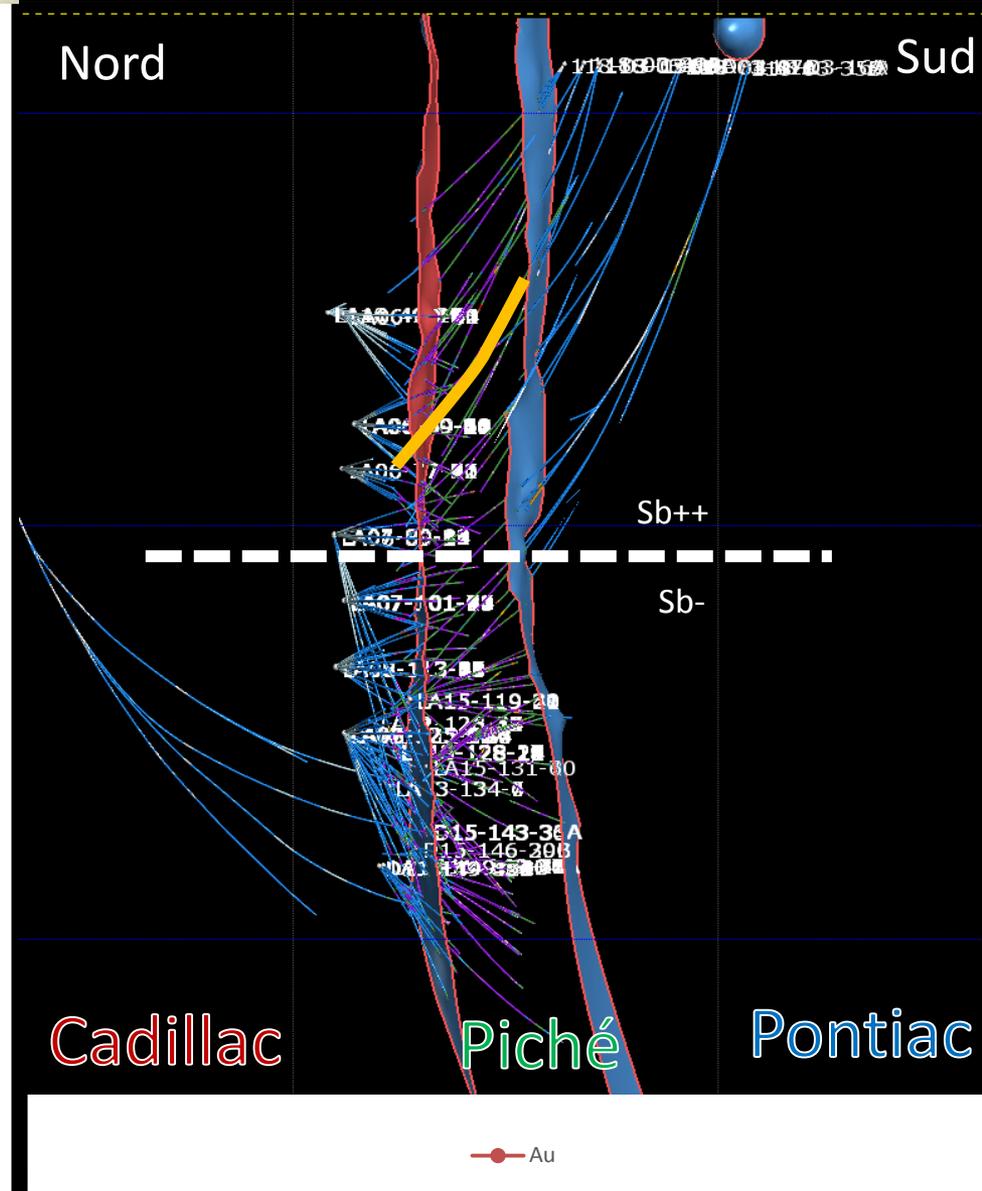
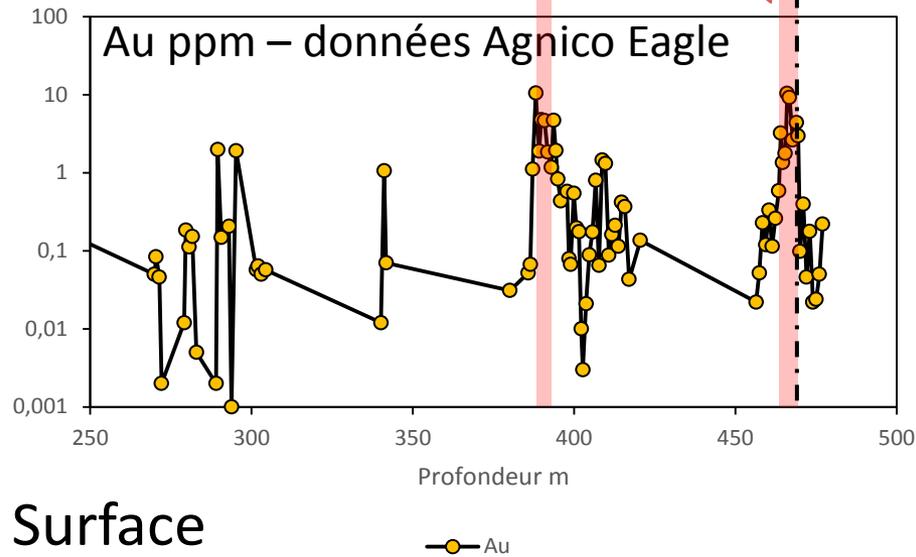
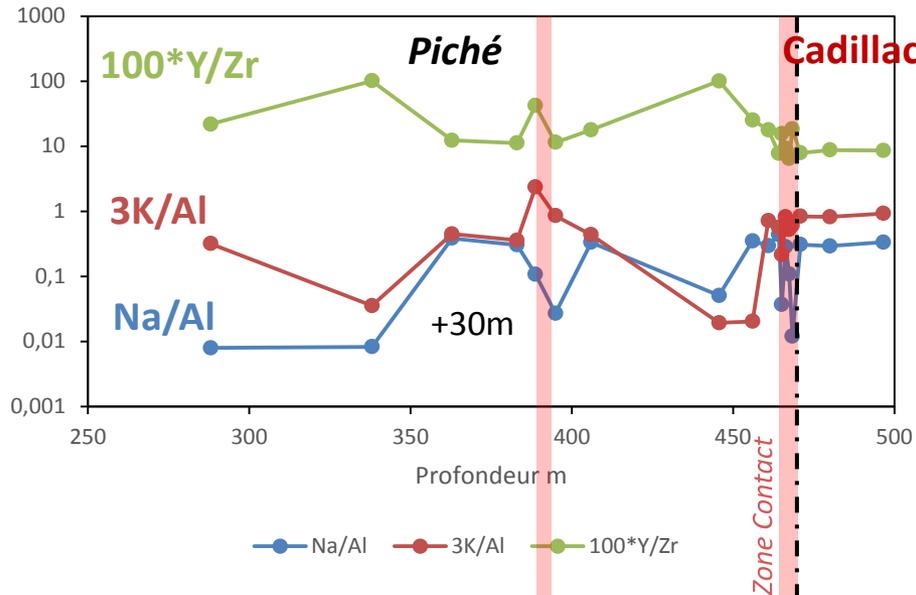


Regard vers l'Est

Stratégie d'échantillonnage: 15 cm (carottes de forage) tous les 1m à 20m

Lapa, Agnico Eagle

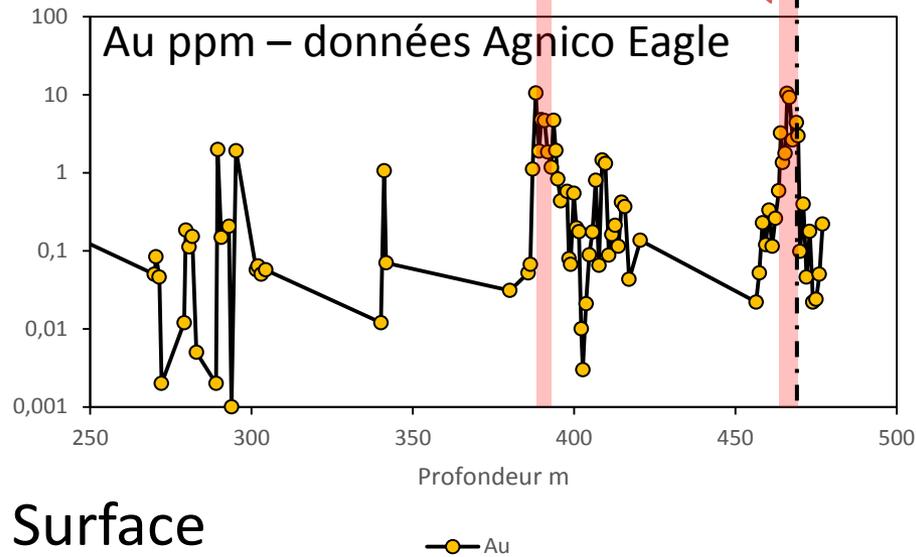
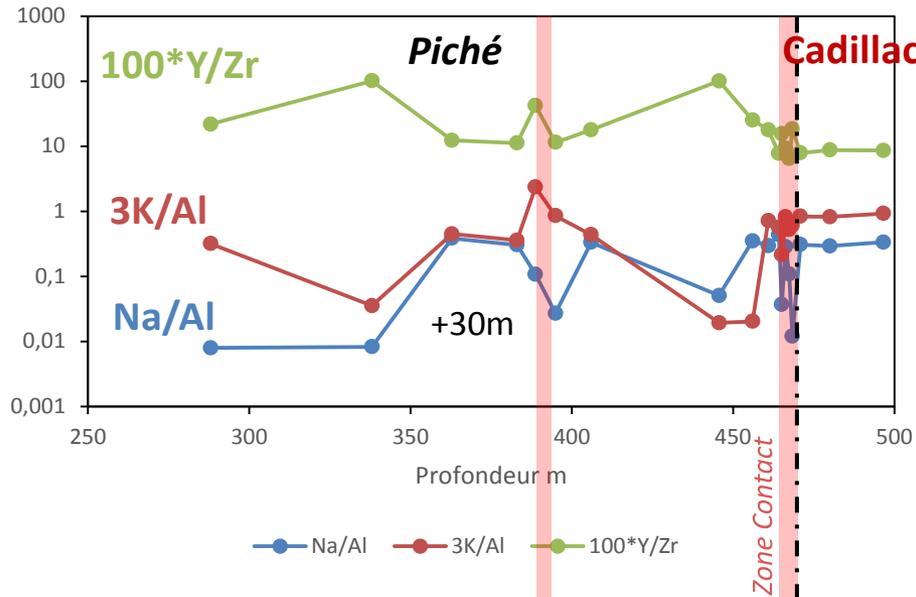
Na/Al = Indice Saturation Albite
 $3\text{K}/\text{Al}$ = Indice Saturation Séricite
 $100*\text{Y}/\text{Zr}$



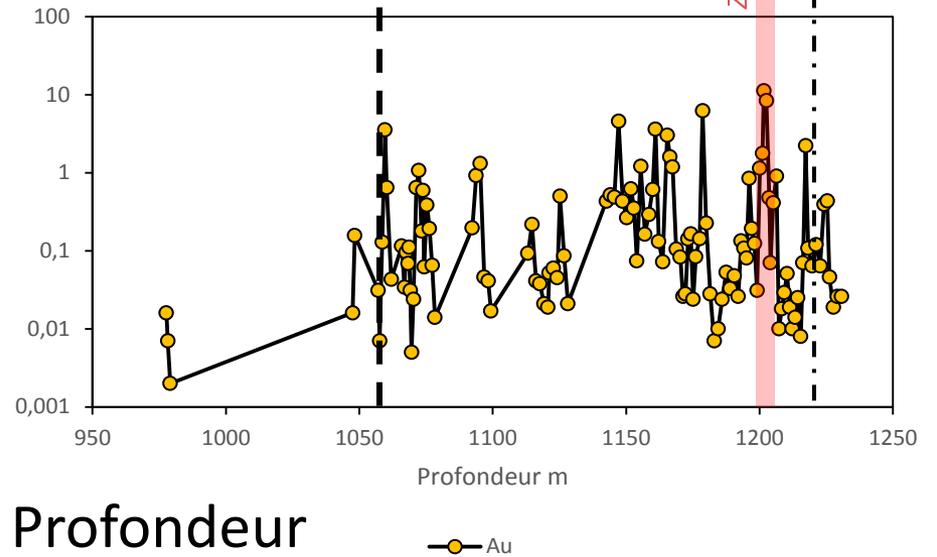
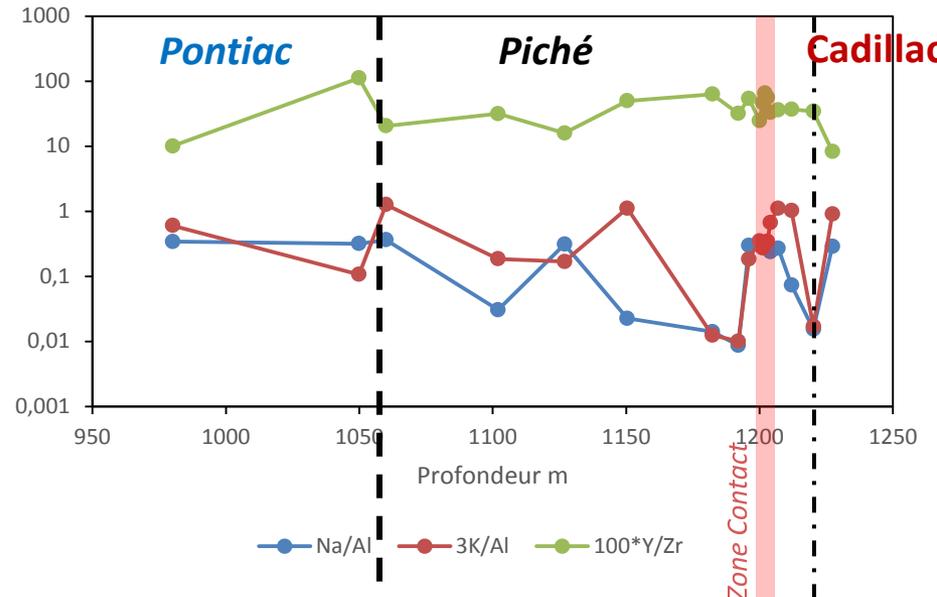
Surface

Lapa, Agnico Eagle

Na/Al = Indice Saturation Albite
 3K/Al = Indice Saturation Séricite
 100*Y/Zr

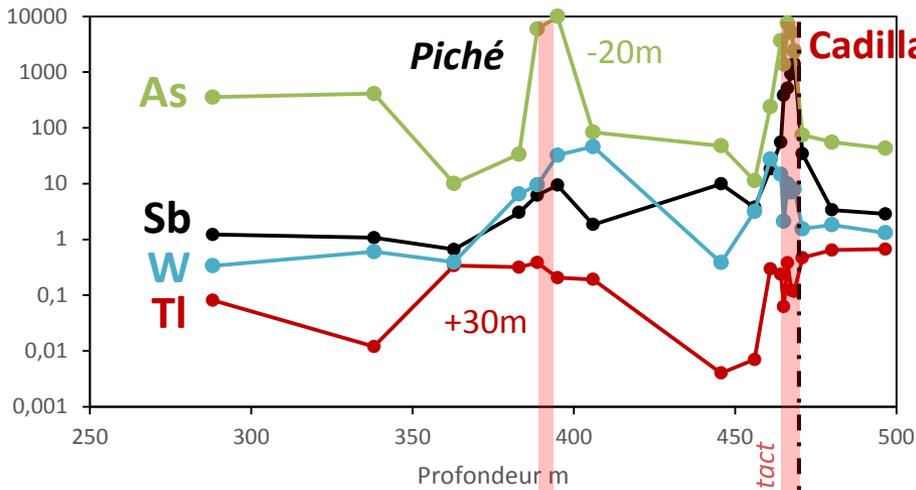


Surface

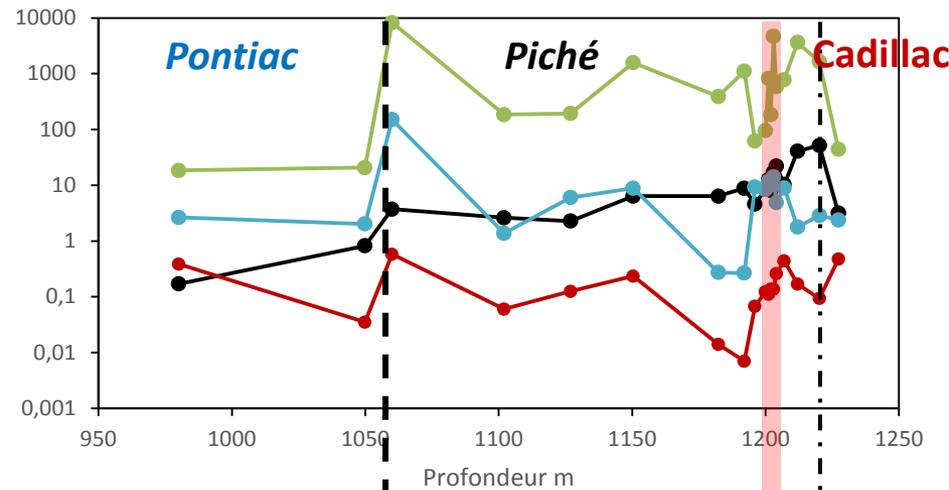


Profondeur

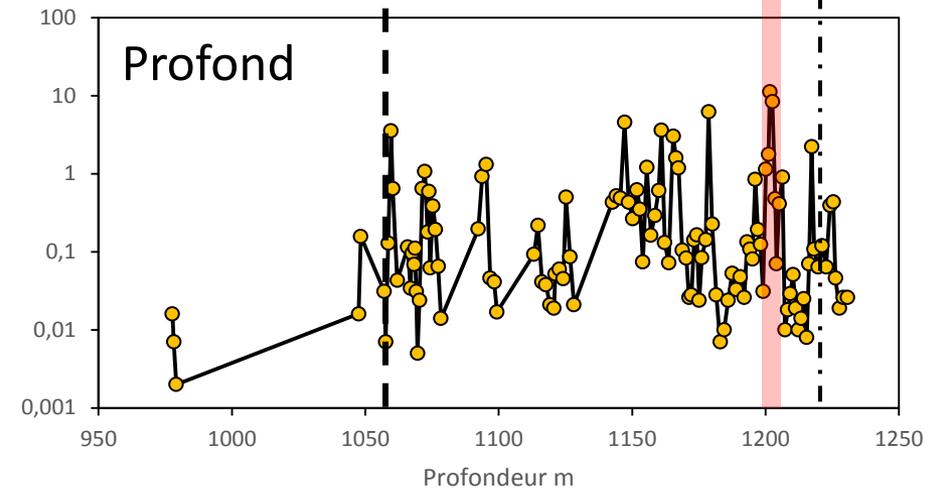
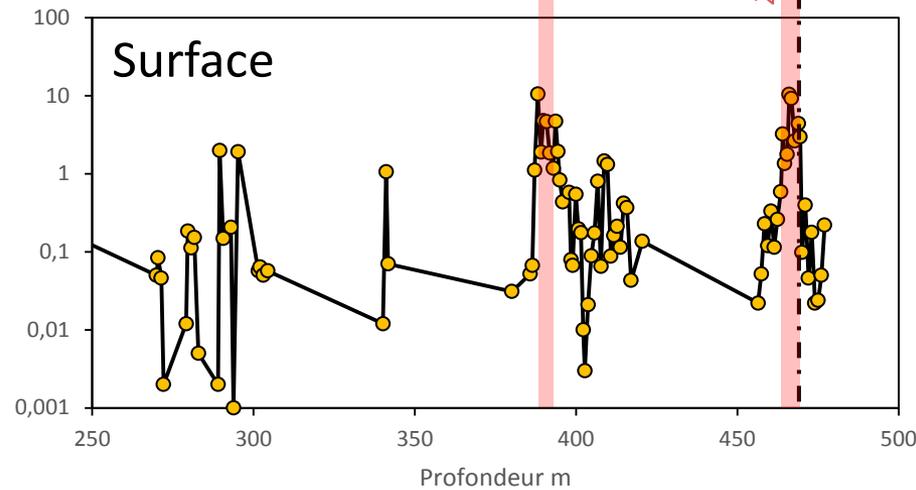
Lapa, Agnico Eagle



—●— Sb —●— As —●— Tl —●— W

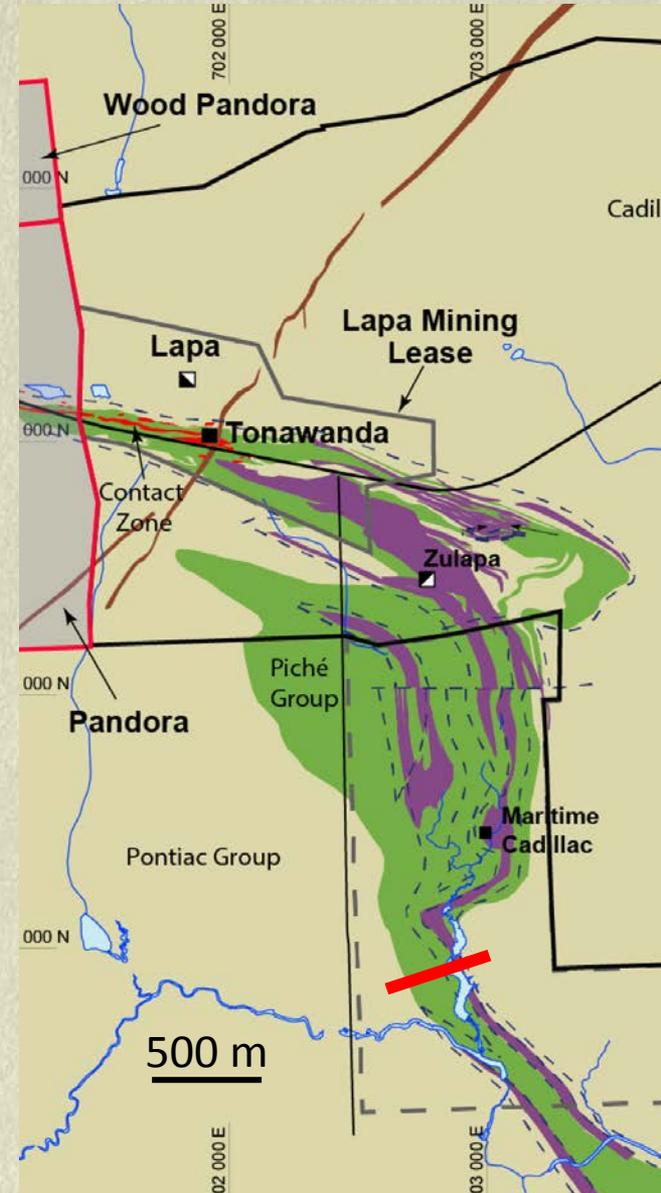
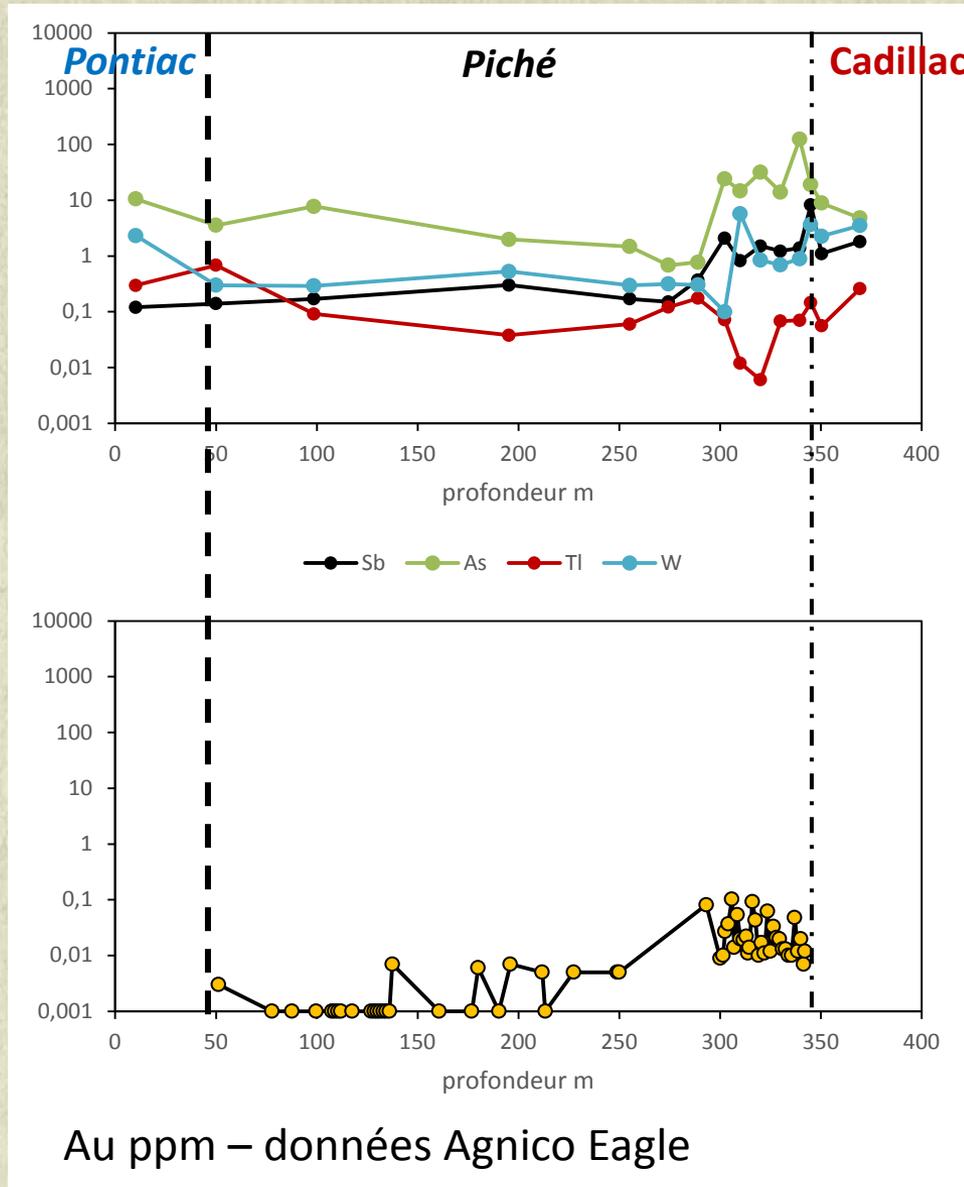


—●— Sb —●— As —●— Tl —●— W



Au ppm – données Agnico Eagle

Maritime, Agnico Eagle

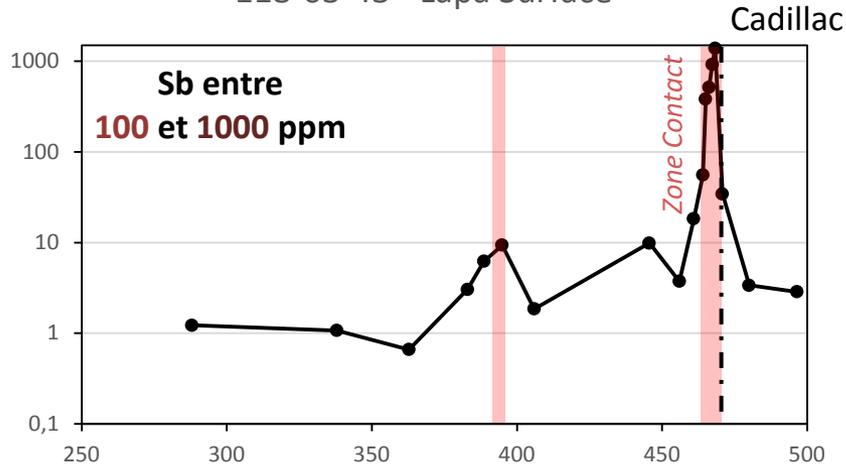


Site web Agnico Eagle

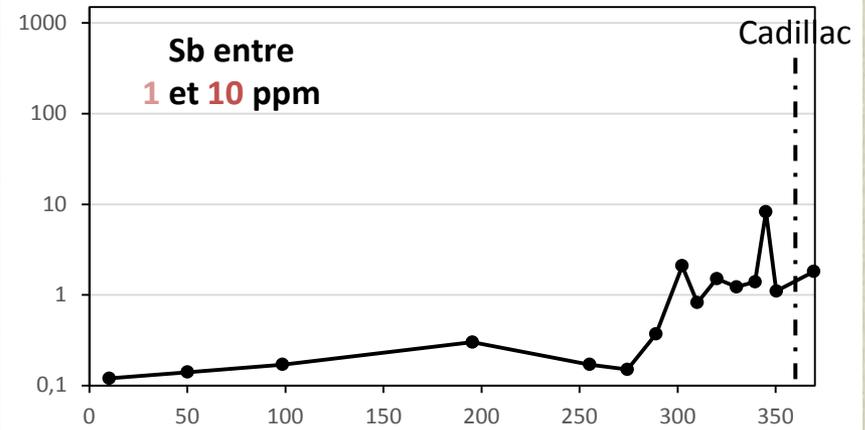
Lapa, Agnico Eagle

Sb – Traceur (quasi) indépendant des lithologies

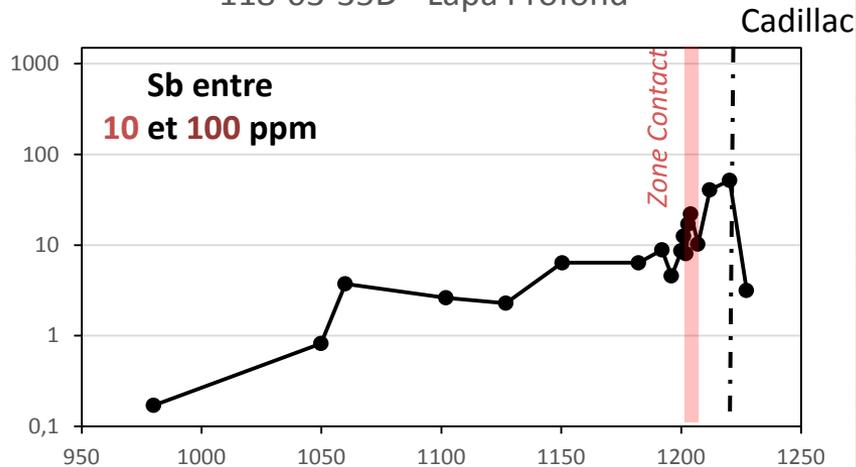
118-03-43 - Lapa Surface



141-06-01 - Maritime - Stérile



118-03-35D - Lapa Profond

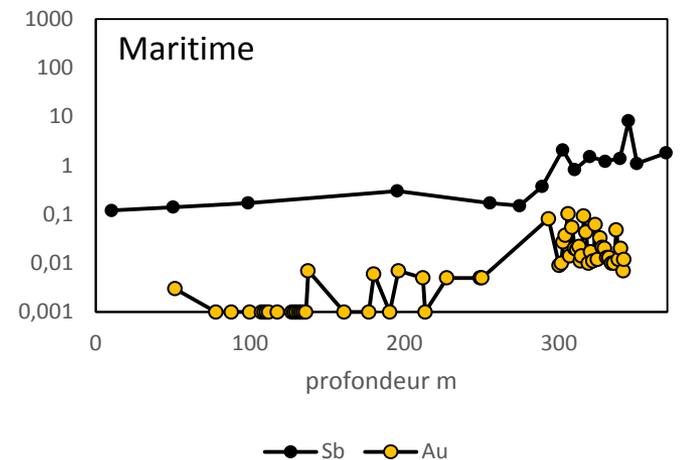
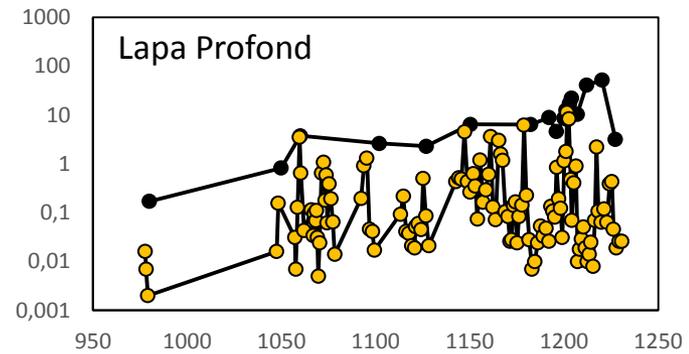
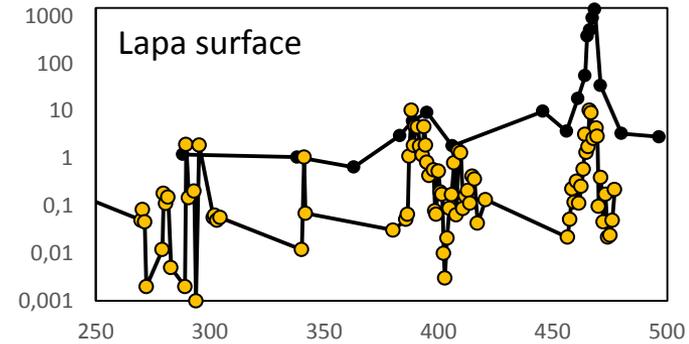
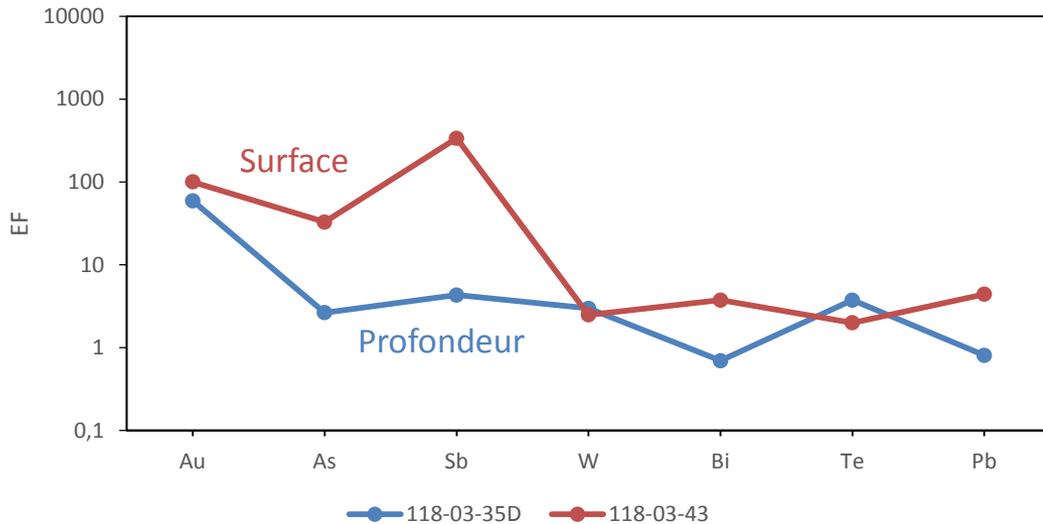


Implications:

Association Au-Sb

- Sb représente le dernier épisode minéralisateur et une circulation de fluide importante au contact du Groupe de Cadillac.
- Potentiel le long du cisaillement?

Conclusions, Lapa

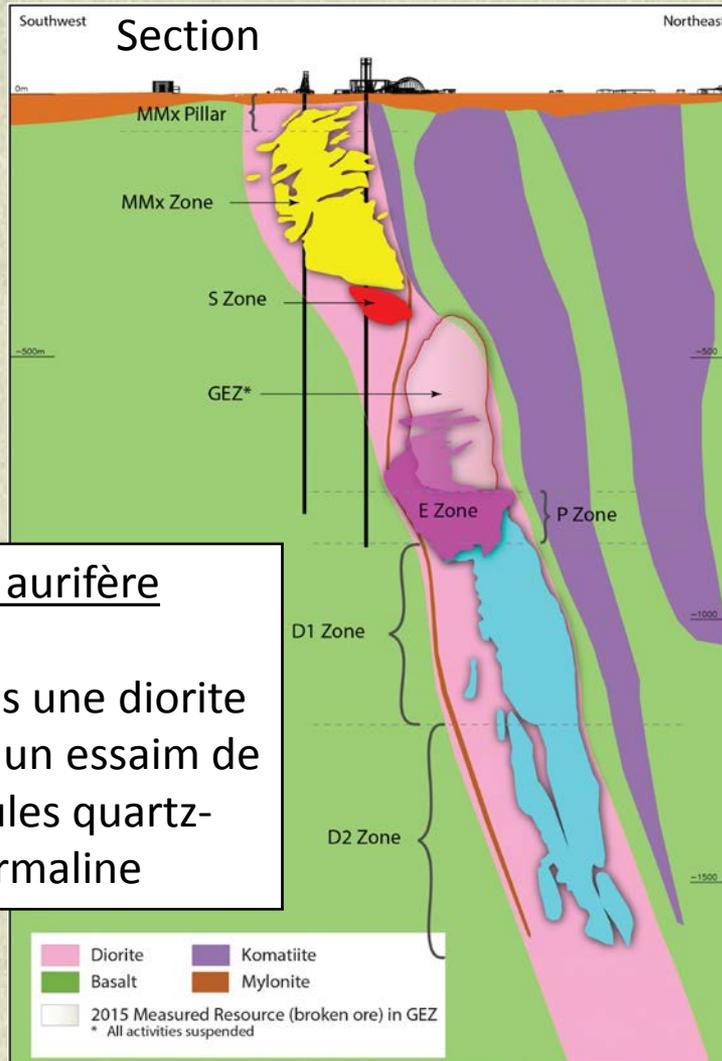


-Concentration en éléments volatils plus importante vers la surface

-W	halo de 10-20m	+2.5	} Facteur d'enrichissement
-As	halo de 10-20m;	+30	
-Tl	halo de 30m;	+4	
-*Cs	halo de 30m;	+8	
-Sb	halo de 30m;	+330	

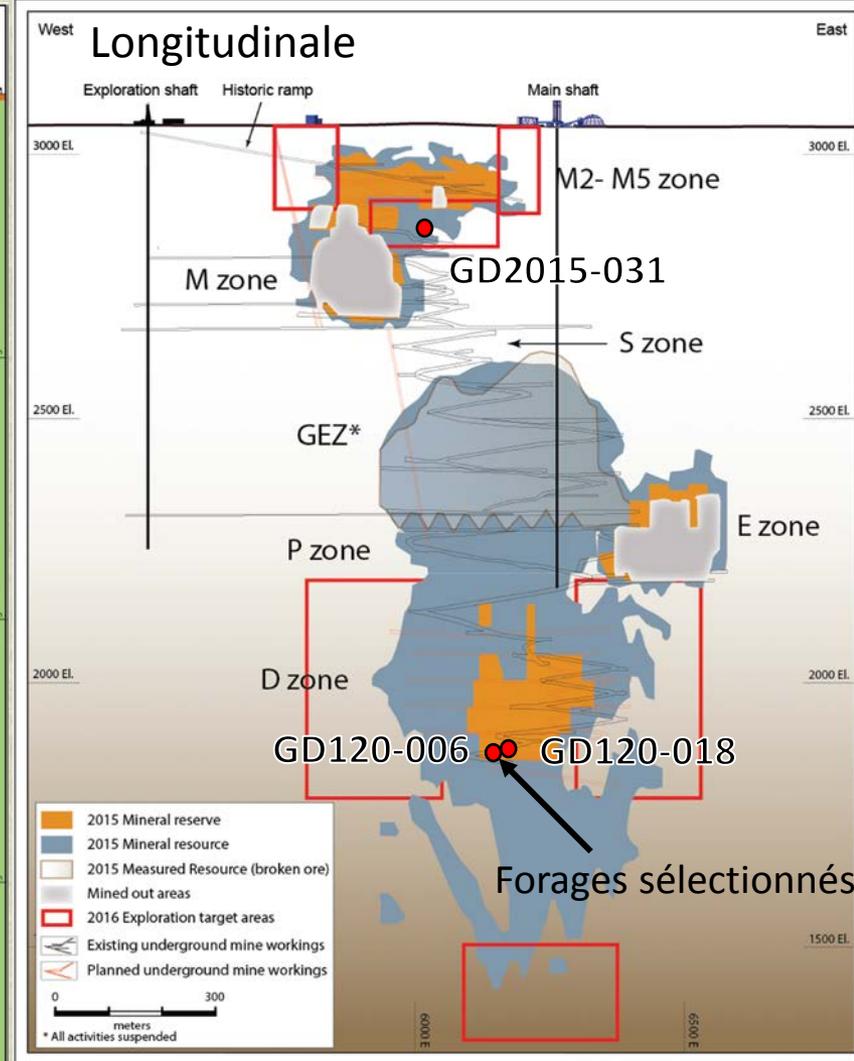
-Sb, meilleur traceur, mais parallèle à l'Au

Le cas de Goldex, Agnico Eagle

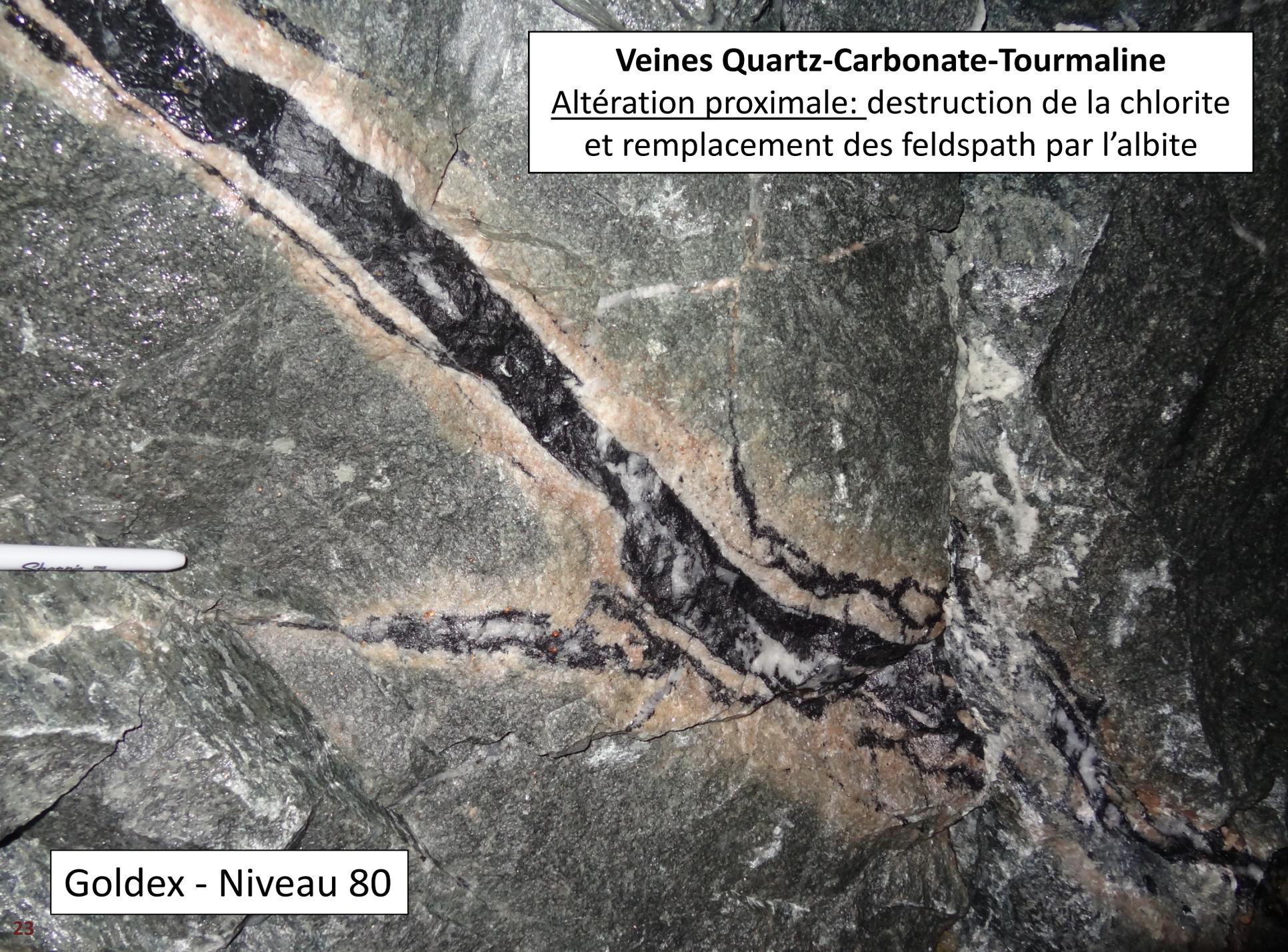


Minéralisation aurifère filonienne

- encaissée dans une diorite
- associée avec un essaim de veines et veinules quartz-carbonate-tourmaline



Site web Agnico Eagle

A photograph of a rock face showing several veins of quartz, carbonate, and tourmaline. The veins are light-colored, ranging from white to light brown, and are set against a darker, greyish-green rock matrix. The veins are irregular in shape and orientation, with some showing a distinct texture. A white marker is visible on the left side of the image, providing a scale. The overall appearance is that of a mineral-rich rock formation.

Veines Quartz-Carbonate-Tourmaline
Altération proximale: destruction de la chlorite
et remplacement des feldspath par l'albite

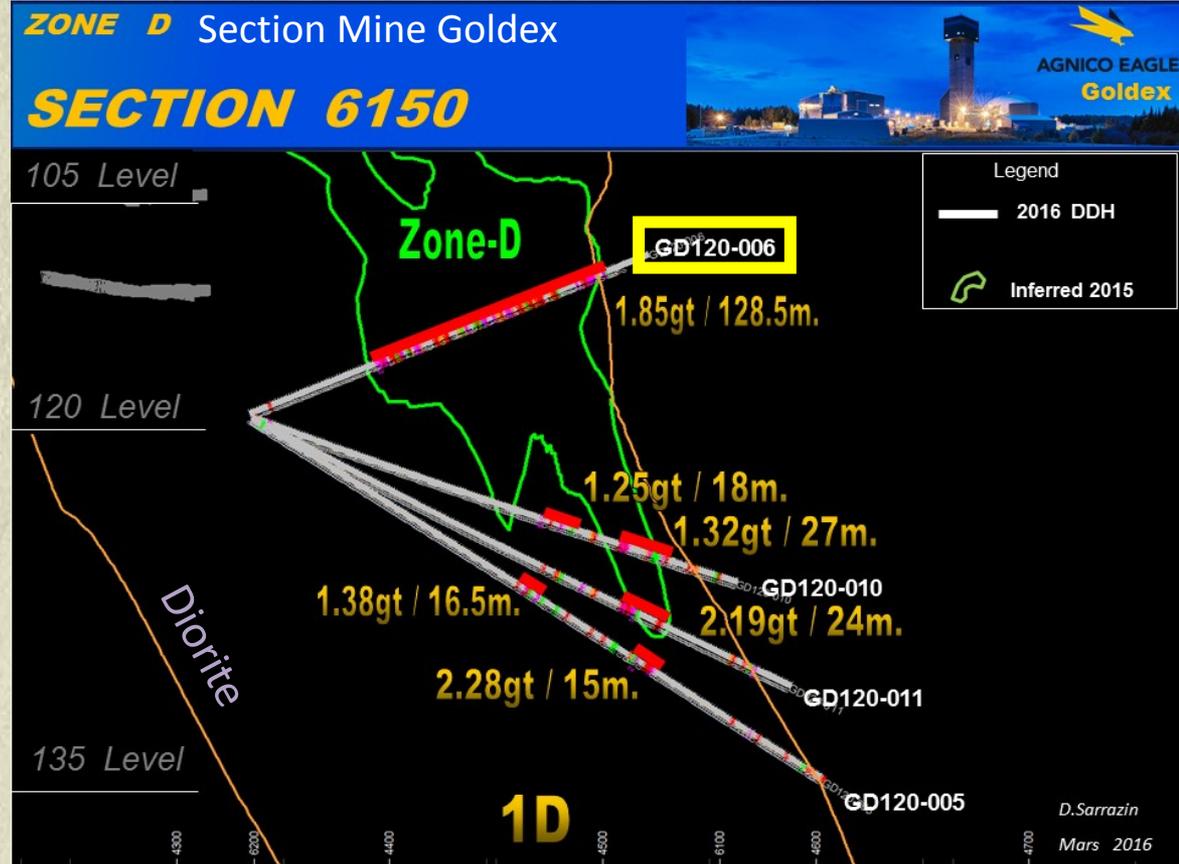
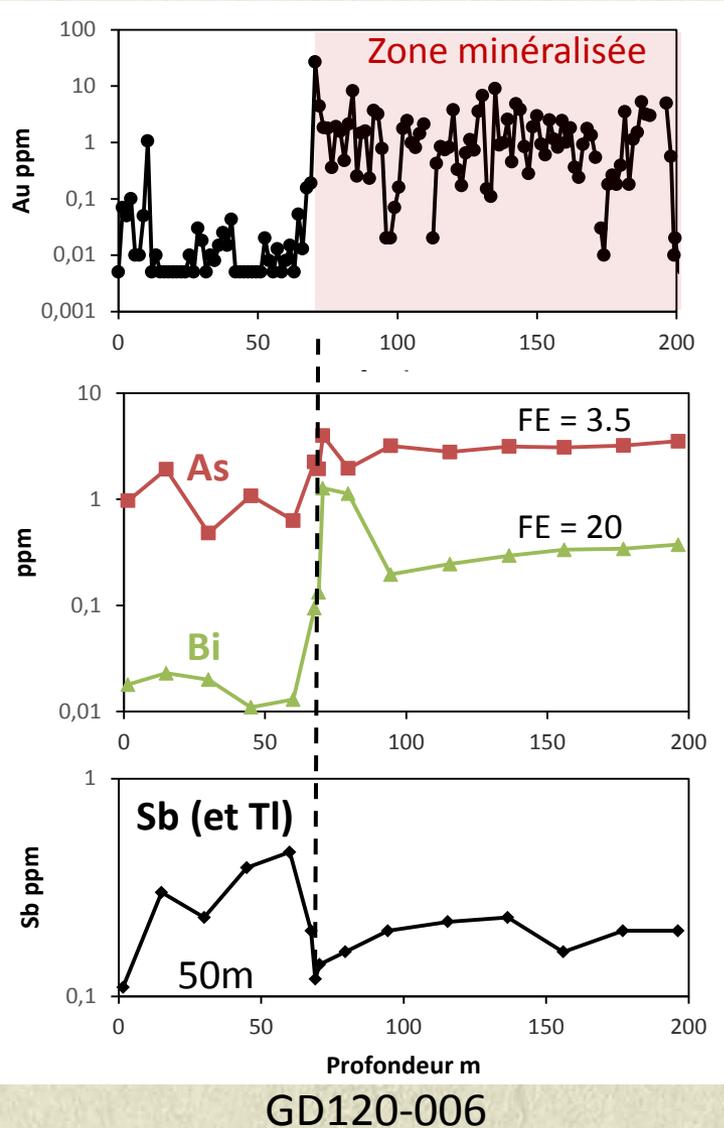
Goldex - Niveau 80



Minéralisation de type *Stockwork*

Les veines et veinules sont interconnectées et ne se recoupent pas.
Épisode minéralisateur unique (non pulsatif)

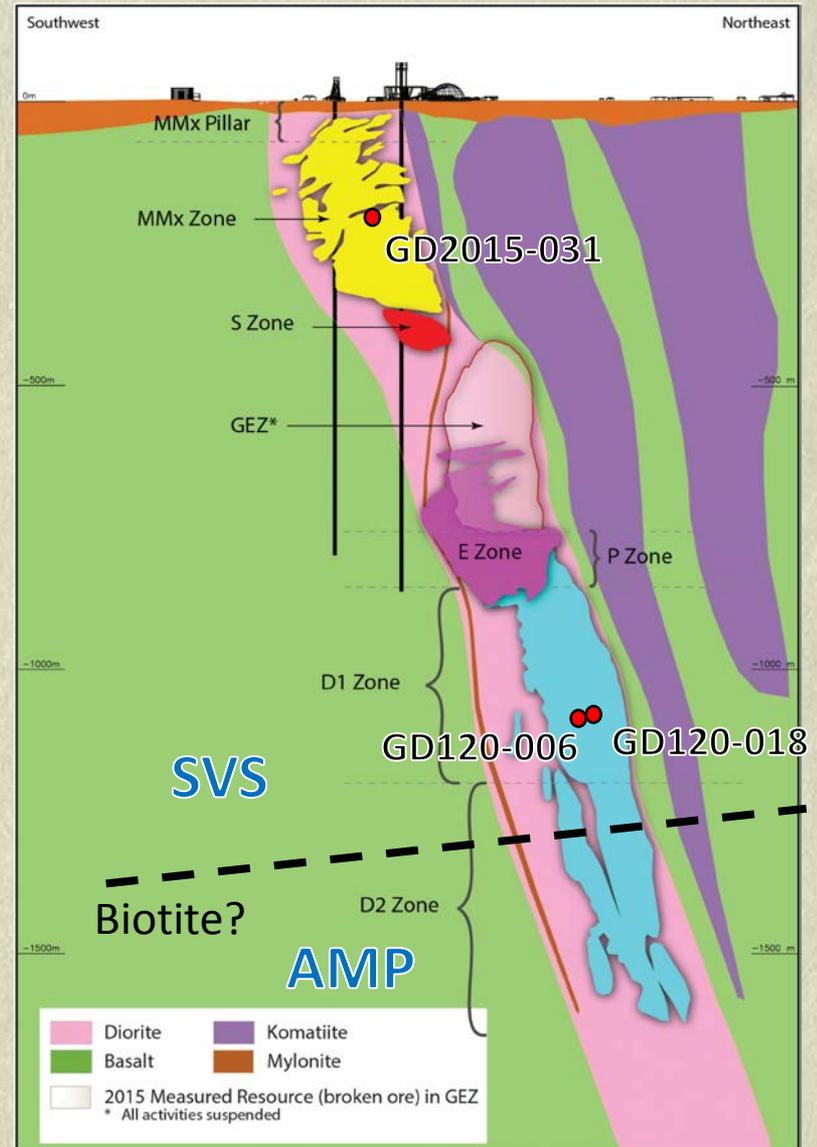
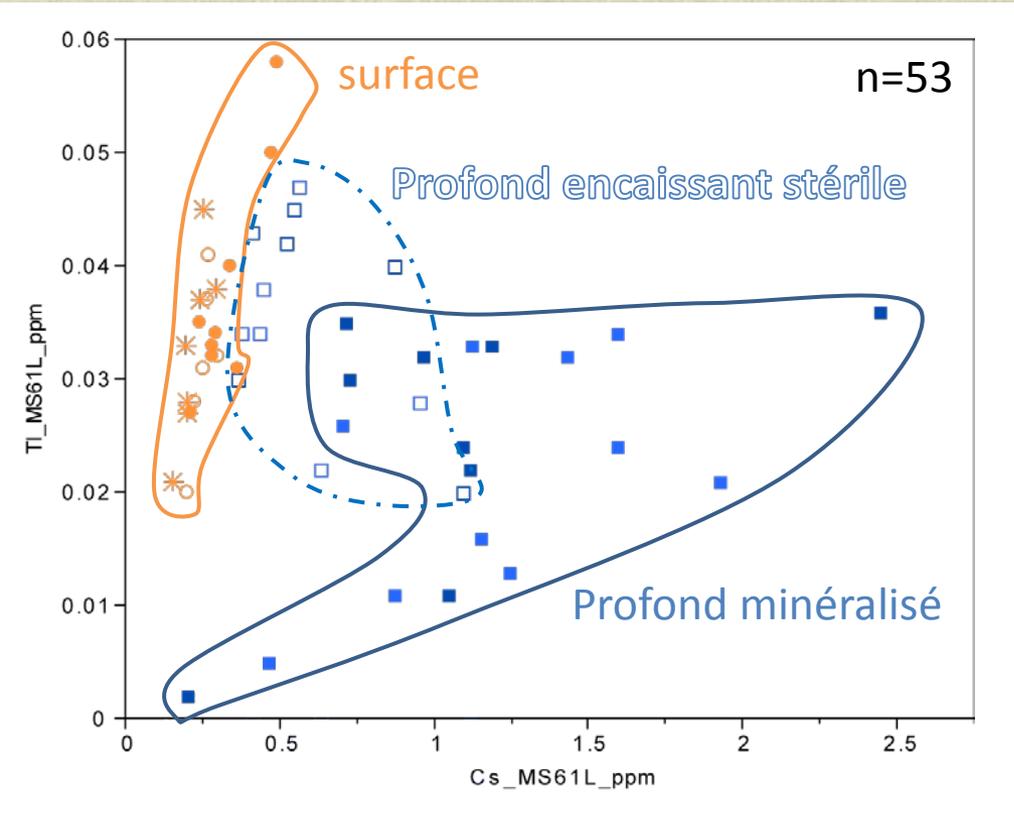
Goldex - Résultats



- Minéralisation caractérisée par une association Au-Bi-Te
- Indices de saturation inefficaces
- Potentiel d'utilisation de Sb et Tl

FE = Facteur Enrichissement

Goldex - Résultats



- Plus d'éléments volatils vers la surface: Tl, Sb
- Plus de Cs vers la profondeur: isograde de la biotite?

Utilisation du Cs

Contrib Mineral Petrol (2016) 171:36

DOI 10.1007/s00410-016-1239-7

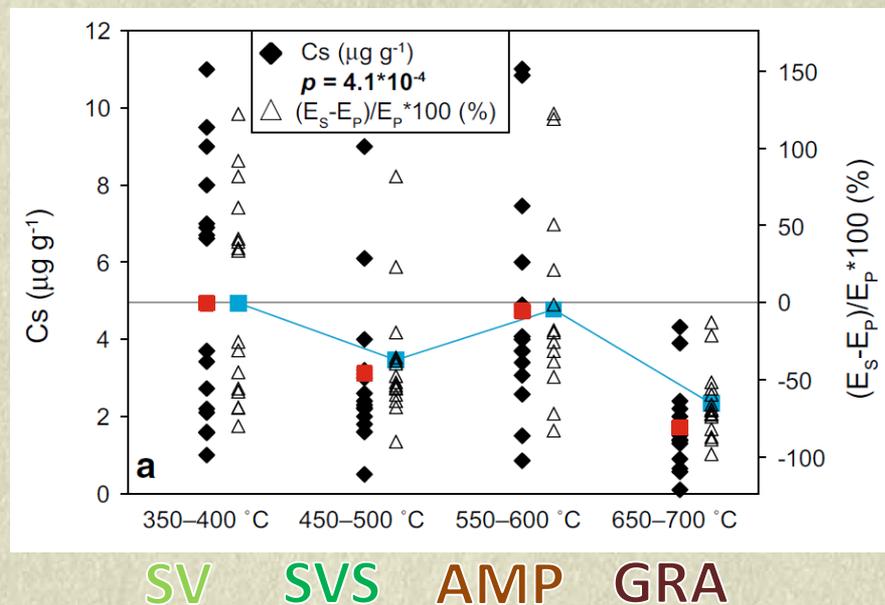
ORIGINAL PAPER

Element redistribution and mobility during upper crustal metamorphism of metasedimentary rocks: an example from the eastern Mount Lofty Ranges, South Australia

Johannes Hammerli^{1,3} · Carl Spandler¹ · Nicholas H. S. Oliver^{1,2}

Redistribution du Cs avec l'enfouissement de Sédiments

- Cs enrichi dans les zones profondes de Goldex
- Cs enrichi dans les zones minéralisées de Lapa
- Cs, traceurs des isogrades?
- Éléments mobiles:
 - Cs, Zn, Pb, Ag, As, Sb, Bi



Hammerli et al. 2016

Conclusions, Goldex

- Signature métallique très différente de celle de Lapa (Bi et Te; Sb absent dans la zone minéralisée)
- Halo en Sb (et Tl) de 50m, mais interprétations limitées par les échantillons disponibles
- Système hydrothermal relativement “simple”. Un seul épisode minéralisateur qui n’a pas laissé d’empreinte géochimique importante
- Plus d’éléments volatils vers la surface
- Potentiel d’utilisation du Cs pour tracer les isogrades métamorphiques?

Faits saillants du projet

Utilisation des éléments traces en exploration minérale

- Méthode ME-MS61L
 - Avantage: Éléments volatils fiables et limites de détection très basses
 - Limite: Pas tous les éléments (majeurs SiO₂, PAF)
- *Or orogénique*
 - Résultats concrets
 - Lapa: Halo en éléments volatils 10-30m autour de la zone minéralisée en surface. Sb donne des résultats intéressants.
 - Goldex: système hydrothermal simple qui n'a pas laissé d'empreinte géochimique significative en dehors de la zone minéralisée. Sauf Sb et Tl: halo de 50m.
 - Meilleur traceur de l'Au est: Au... mais potentiel de le combiner avec l'utilisation des éléments volatils

MERCI

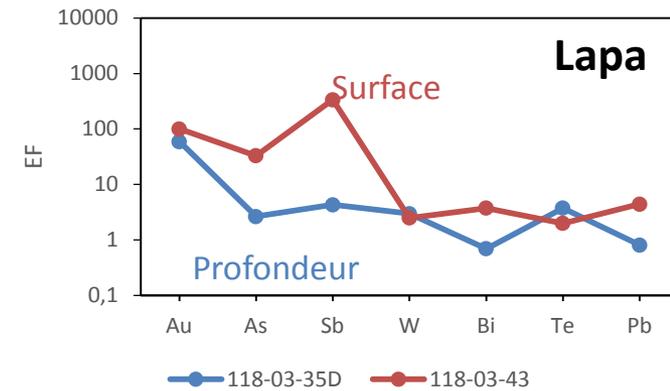
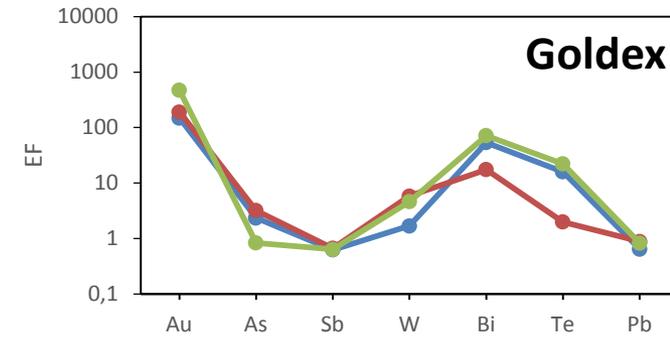
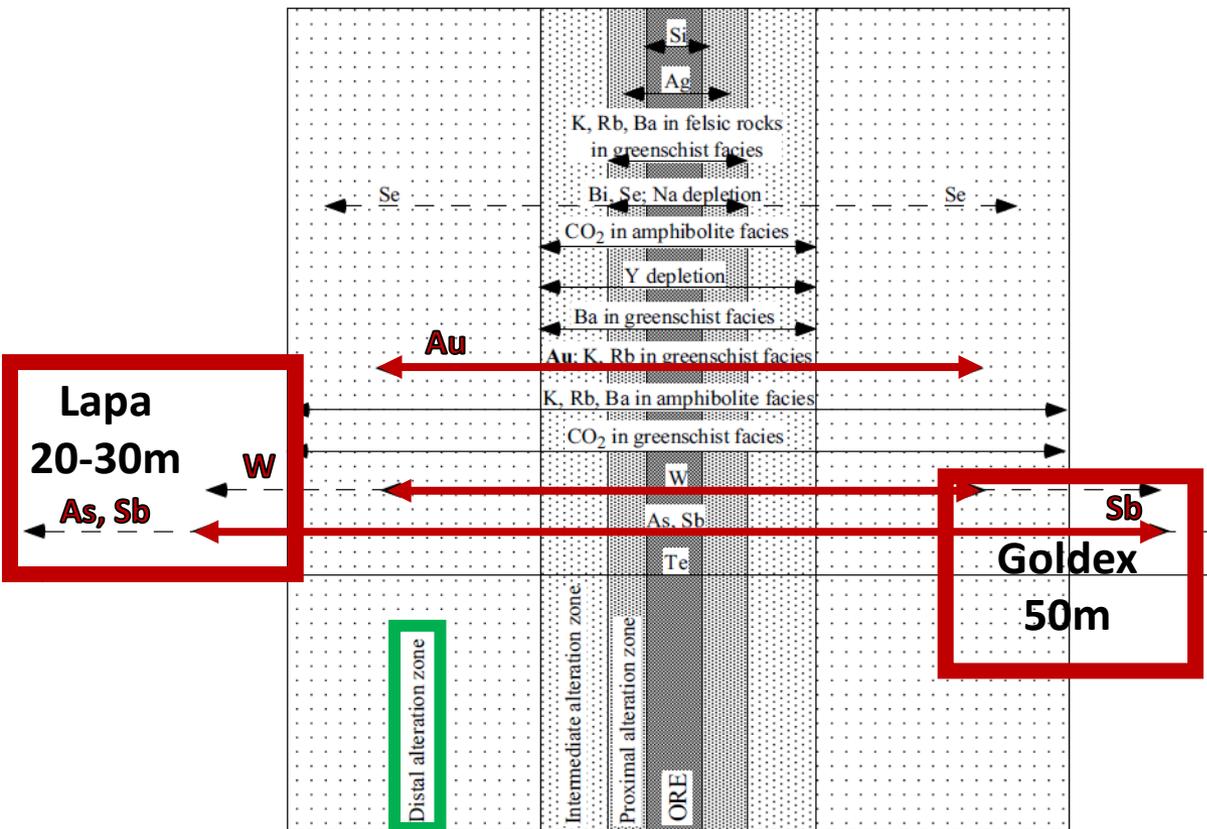
Laboratoire ALS

Équipe de **Agnico Eagle**, Marjorie Simard, Jill-Annette Marcotte, Denis Mercier



Conclusions

Éléments traces dans les systèmes orogéniques – Zonalité latérale



Eilu et Groves, 2001

Éléments traces dans les systèmes orogéniques

Table 6. Extent of the primary geochemical dispersion defined by Au and potential pathfinder elements laterally away from ore, in metres

	Granny Deeps		Twin Peaks	Bulletin	Kings Cross	Bronzewing	Moyagee
	Granodiorite	Sedimentary rocks	Sedimentary rocks	Basalt	Basalt	Basalt	Komatiite
Au	25–70	5–30	0–10	5–20	5	>80	10–35
Ag	0	0	0–20	0–10	0	>40	0–20
As	0	0–5	20–100	>150	>50		20–50
Bi	0	0	0		0	0–10	
Sb	0	0–5	0	>150	0–20	>100	1–20
Se	0	0	0		0–3		5–50
Te	2–60	1–30	0	10–>150	>90	>200	>80
W	1–60	3–30	5–30	5–25	0–5	>70	10–>80
Max. lateral extent ¹	70 m (Au)	30 m (Au) ³	100 m (As)	>150 m (As, Sb)	>90 m (Te)	>200 m (Te)	>80 m (Te)
Into unaltered ²	Au, Te, W		Au, As, W	As, Sb, Te	As, Sb, Te	Au, Sb, Te, W	Te, W

¹Maximum lateral extent of dispersion from ore; the elements defining the most extensive anomalies are indicated in brackets. ²Anomaly extends, at least locally, into area of unaltered rock. ³Note that, in the sedimentary host at Granny Deeps, Ca and CO₂ enrichments have a wider extent than that of Au (see Table 8). The sign larger than (>) indicates that the anomaly extends beyond the area accessible for continuous sampling of unweathered rock. A blank cell indicates that the element is not significantly enriched in the gold mineralization. Source of data as in Table 5.

As-Au-Sb-Te-W

Lapa, Agnico Eagle

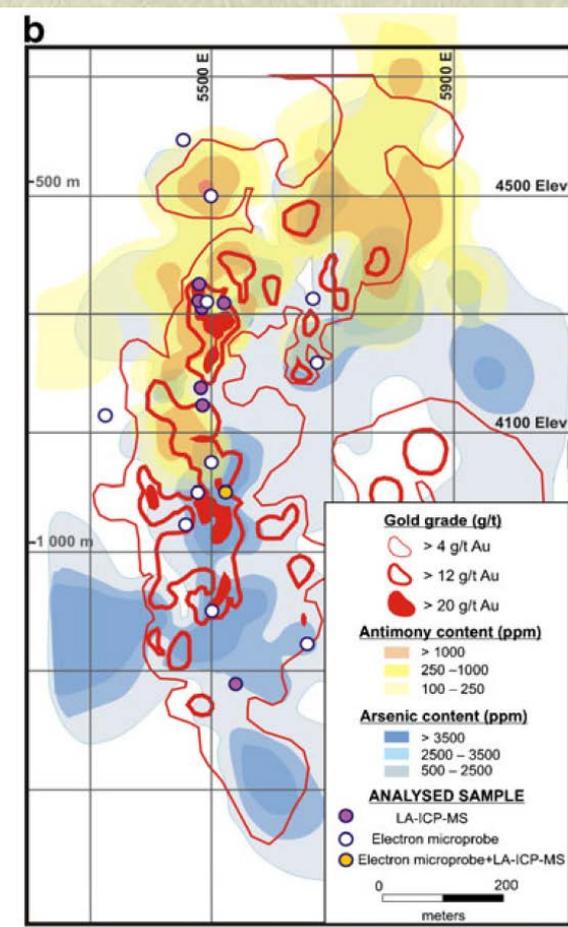
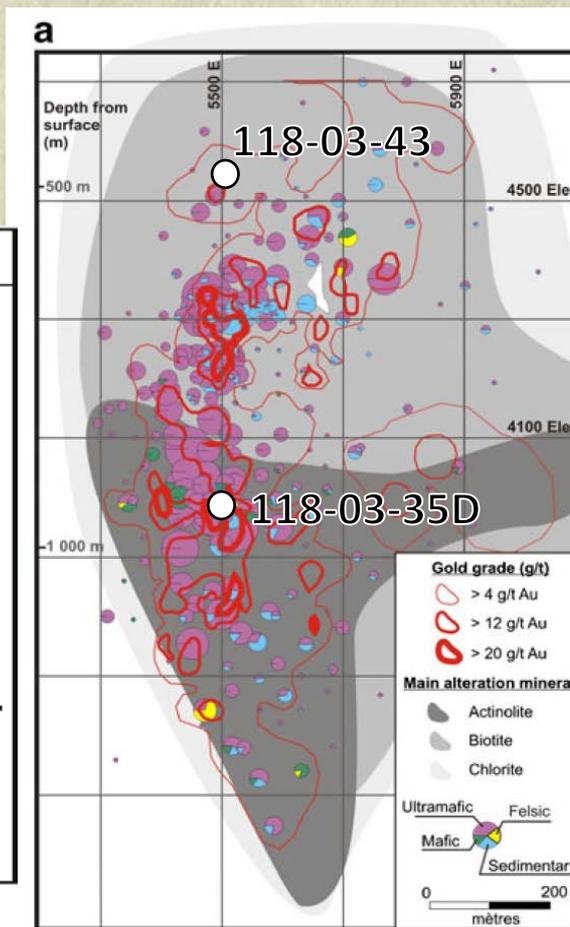
Hydrothermalisme polyphasé

STAGE	Pre-gold stage	Low-grade gold stage (< 4 g/t Au)	High-grade gold stage (> 4 g/t Au)
Arsenopyrite		Major ore mineral	Minor ore mineral
Gold		Submicroscopic	Major ore mineral
Aurostibnite ¹			Major ore mineral
Stibnite ¹			Major ore mineral
Pyrrhotite	Major ore mineral	Minor ore mineral	Major ore mineral
Gudmundite ¹			Major ore mineral
Pyrite		Major ore mineral	Minor ore mineral
Chalcopyrite	Major ore mineral		Minor ore mineral
Sphalerite ²			Minor ore mineral
Pentlandite	Major ore mineral		
Chromite	Major ore mineral		
Ilmenite	Major ore mineral		

¹ Minerals occurring only at shallower levels (< 1 km)

² Minerals occurring only at deeper levels (> 1km)

Major ore mineral
Minor ore mineral

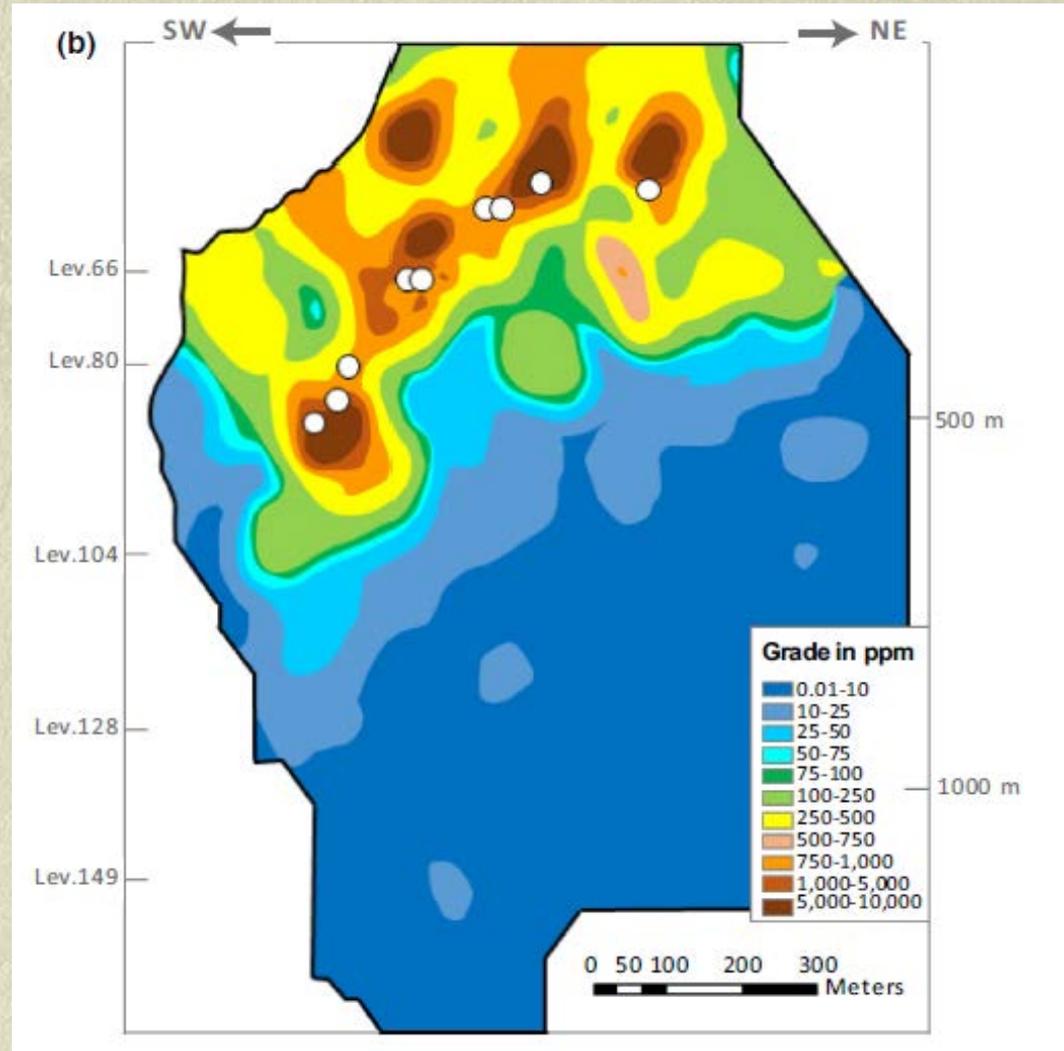


Association Au-As-Sb
Altération potassique

Simard et al. 2013

Jébrak et al. 2017

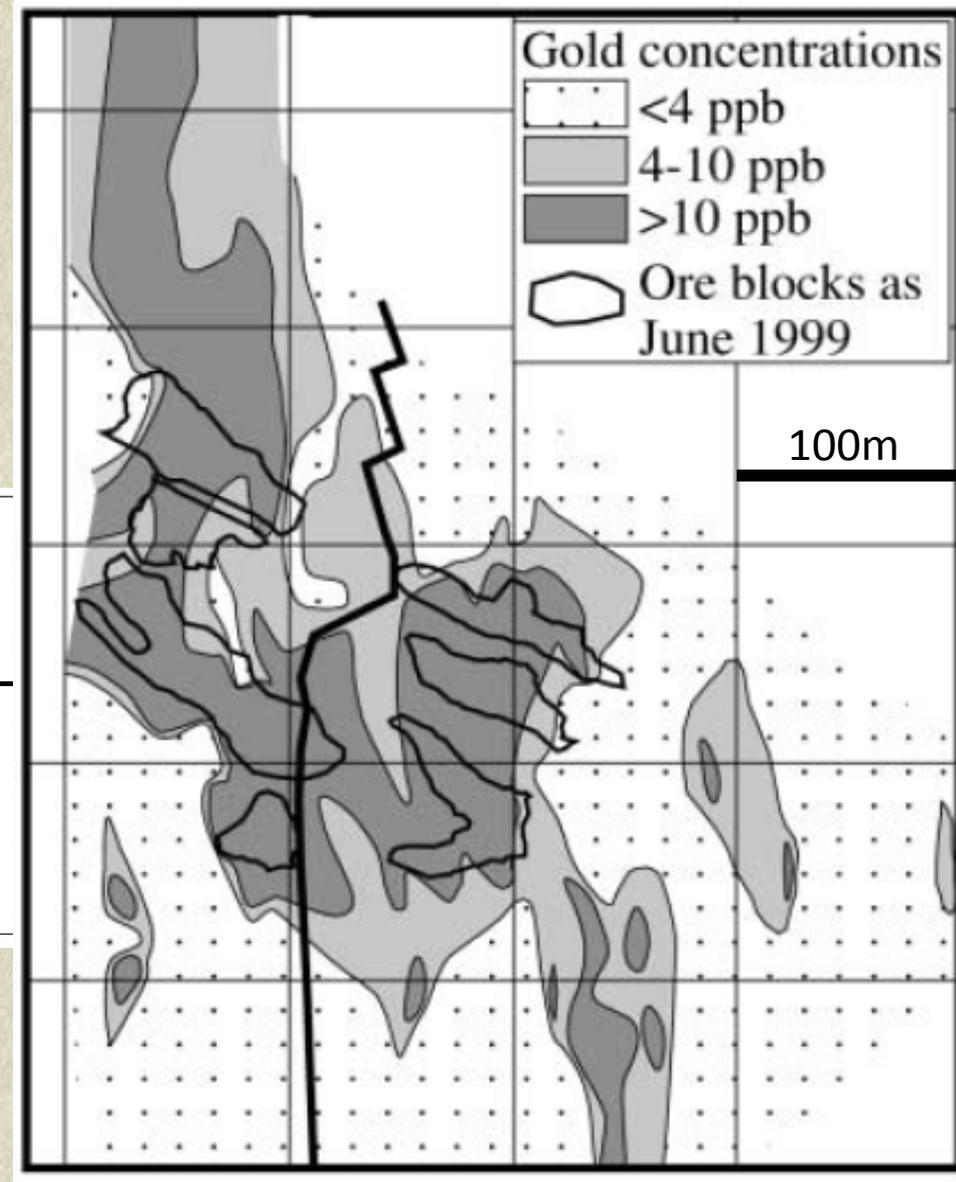
- Antimoine natif dans la partie supérieure du gisement
- Lien avec CH_4
- Une source possible du CH_4 est la serpentinization de roche ultramafique
- Zonation Sb ne reflète pas une zonation verticale réelle, mais la superposition d'environnements métallogéniques différents: riche en CO_2 , riche en CH_4



Distribution de l'Au

Exemple de Bronzewing, Ouest Australie

Ressources 124 t Au (1998)

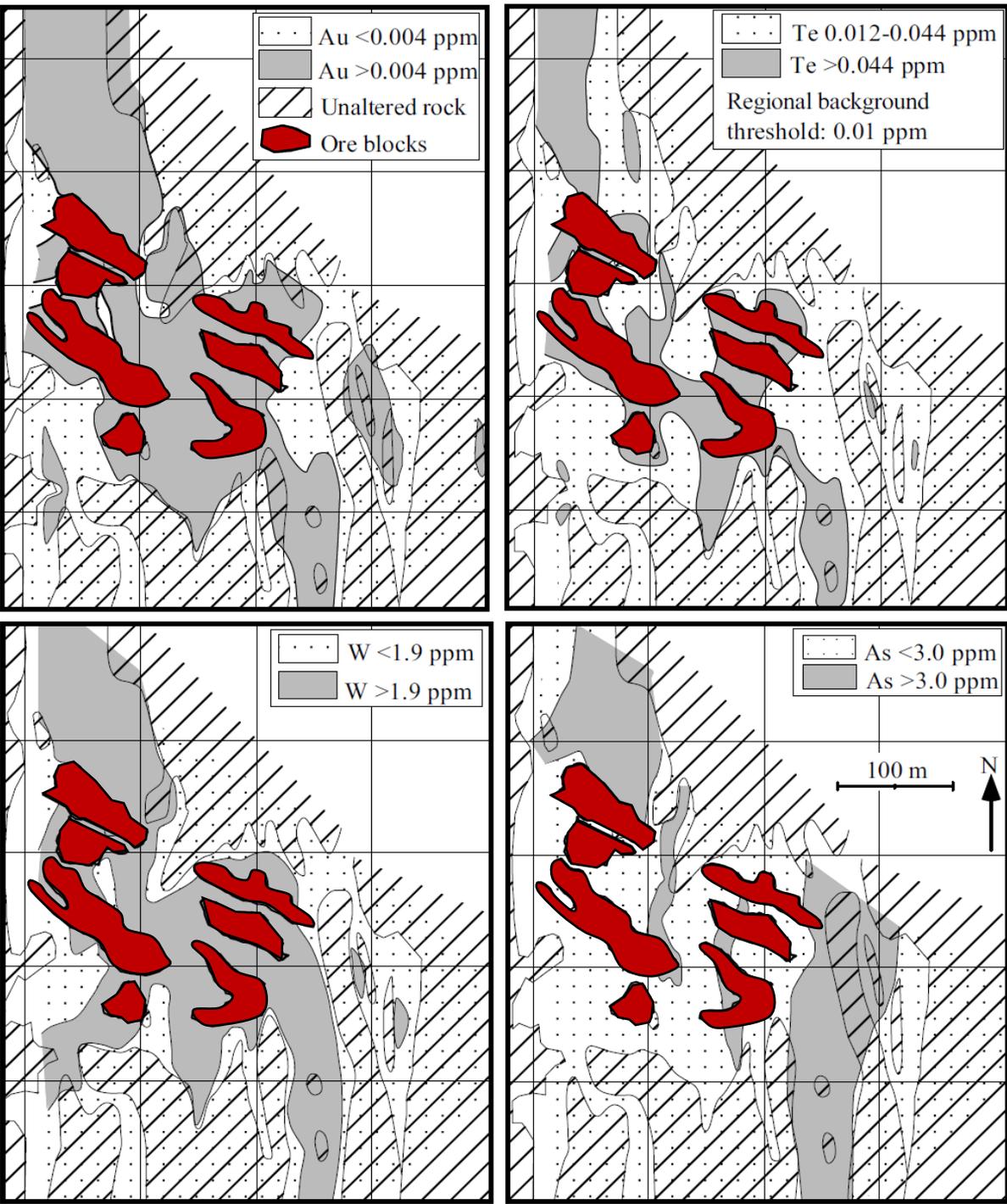


Element	Background threshold (ppm)	Size of anomaly (m)	Extent of anomaly (m) away from	
			Ore	Gold anomaly
Au	0.004	50-200 × >600	1-80	-
Ag	0.16	20-100 × >600	0-40	0
Bi	0.11	5-130 × 10-150	0(-20)	0
Sb	0.4	50-250 × >600	0-100	0-40
Te, regional	0.010	>400 × >600	>200	>100
Te, local	0.044	10-100 × >600	0-20	0
W	1.9	20-300 × >600	0-50	0-30

Analyses par AAS et GFAAS

AAS = Atomic Absorption Spectrometry

GFAAS = Graphite Furnace Atomic Absorption



Bronzewing, 9.27 Mt @ 1.8 g/t Au
(490 000 oz)

Fig. 5. Gold, As, Te and W anomalies around the Central Zone at Bronzewing, northern Norseman–Wiluna Belt (Fig. 2), in unweathered rock at level 140 m below the present surface. Based on Eilu *et al.* (2001).

Méthodes de dissolution

Fusion

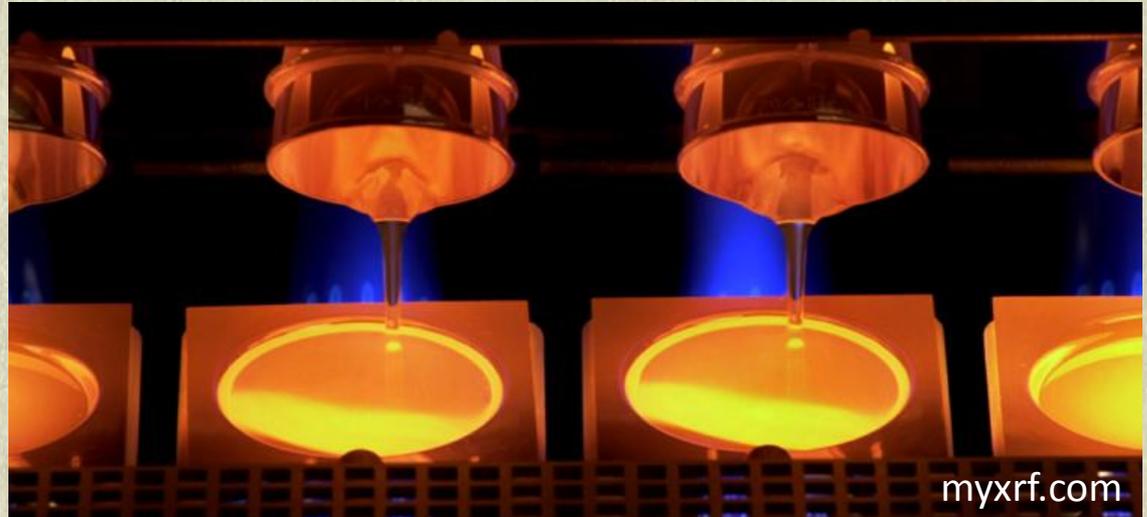
Digestion complète

Li-métaborate

- 1050°C
- Digestion efficace même des minéraux résistants
- Perte des volatils

Na-peroxyde

- 480-650°C
- Méthode pour sulfures et minéraux réfractaires
- REE, Sc, Y, HFSE
- Récupération basse Sn, Sb, Tl



myxrf.com

Méthodes de dissolution

Fusion

Digestion complète

Li-métaborate

- 1050°C
- Digestion efficace même des mx résistants
- Perte des volatils

Na-peroxyde

- 480-650°C
- REE, Sc, Y, HFSE
- Récupération basse Sn, Sb, Tl (50%)

Acides

Digestion partielle

Aqua Regia

- Dissolution partielle
- Sulfures
- Pas de perte de volatils

Exemple Zn:

Sphalérite ✓

Gahnite ✗

behr-labor.com



Exemple Tl:

Pyrite ✓

Séricite ✗

Méthodes de dissolution

Fusion

Digestion complète

Li-métaborate

- 1050°C
- Digestion efficace même des mx résistants
- Perte des volatils

Na-peroxyde

- 480-650°C
- REE, Sc, Y, HFSE
- Récupération basse Sn, Sb, Tl (50%)

Acides

Digestion partielle

Aqua Regia

- Dissolution partielle
- Sulfures
- Pas de perte de volatils

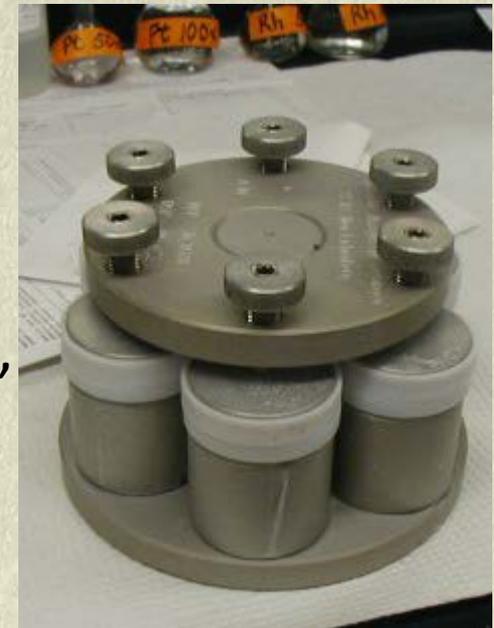
HF-HClO₄-HNO₃-HCl

- Dissolution quasi complète
- Problème avec zircon, chromite, barite...
- Perte de certains volatils (F⁻)

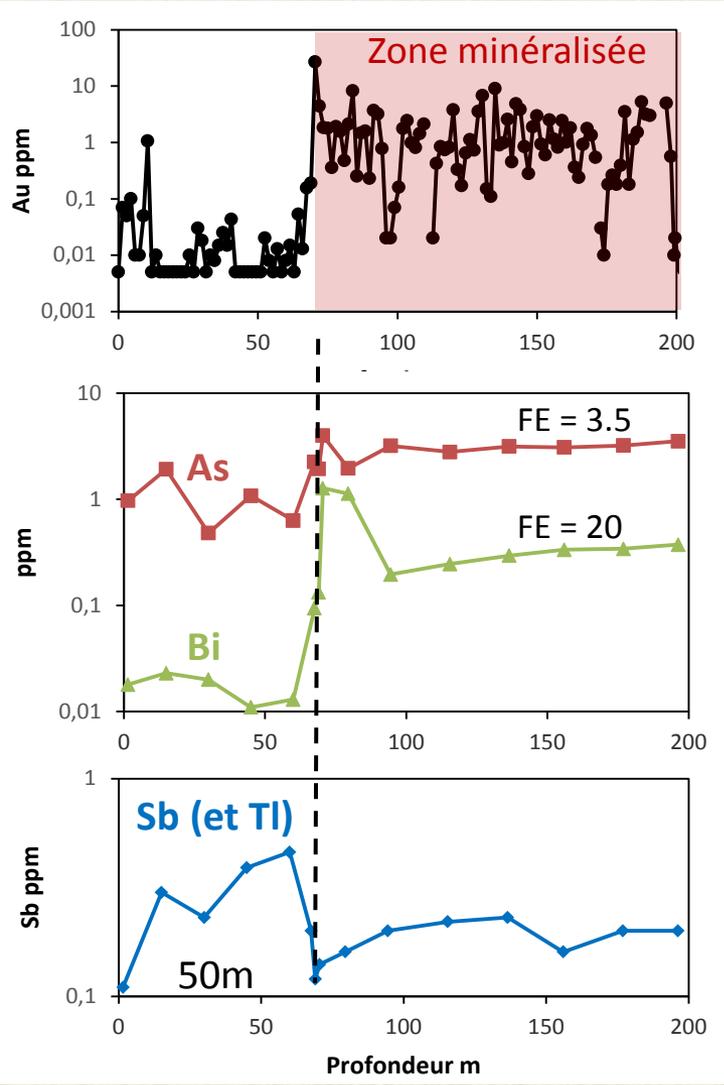
Open vessel



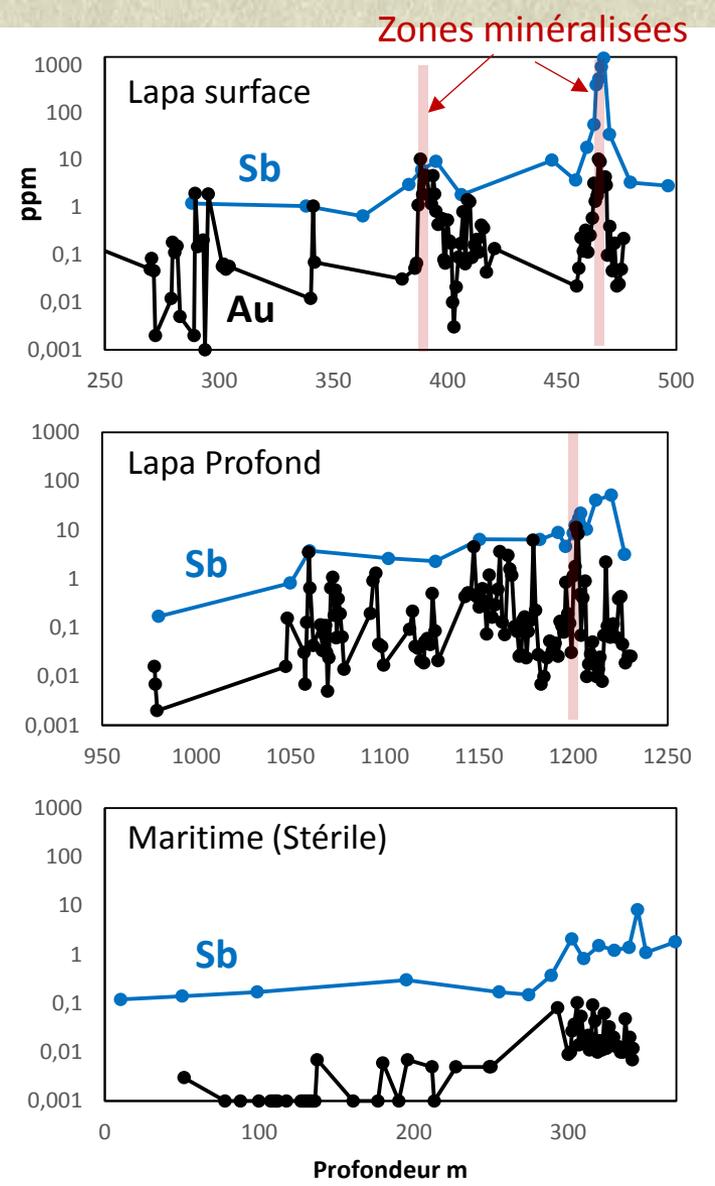
Bomb reaction vessel



Totland et al. 1992; Yu et al. 2001



GOLDEX

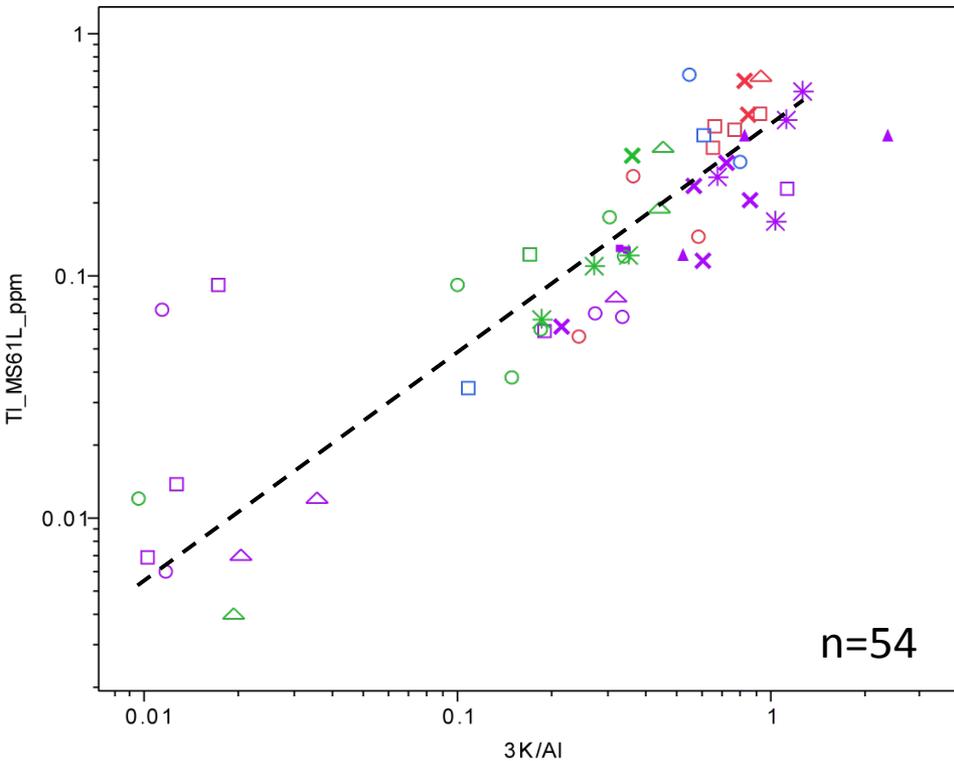


- W halo de 10-20m
- As halo de 10-20m
- Tl halo de 30m
- Cs halo de 30m
- Sb halo de 30m

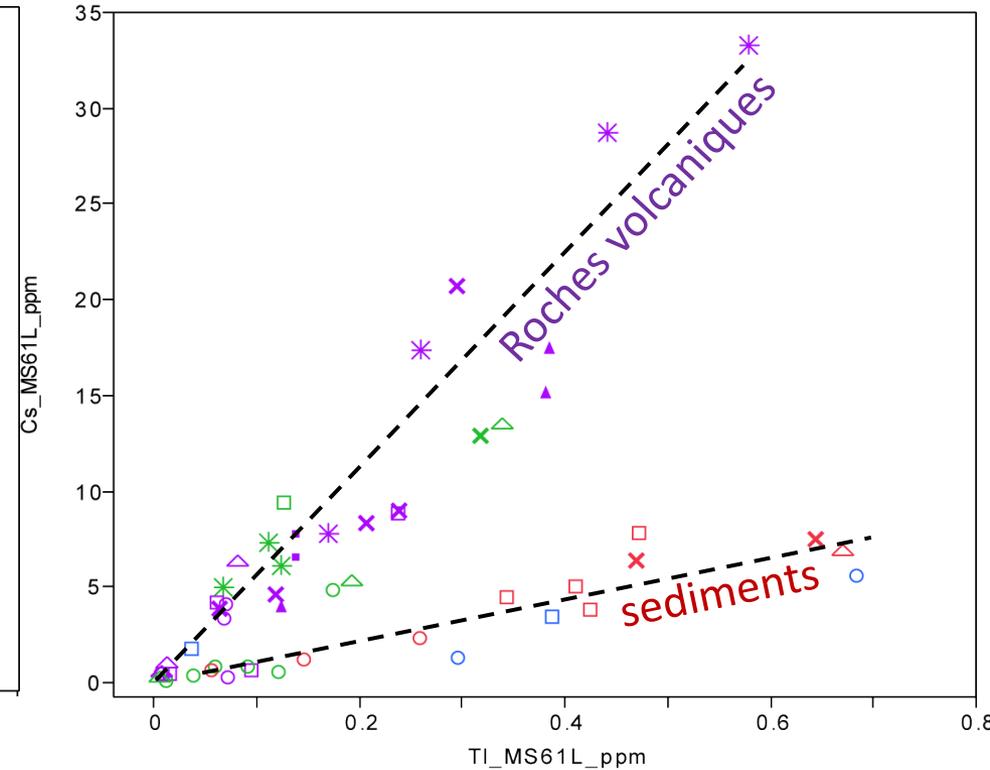
LAPA

—●— Sb —●— Au

Lapa, Agnico Eagle



Indice Saturation Séricite



		Profond (Sb-)	Surface (Sb+)
Ultramafique M8	■	▪	▲
Mafique V3	■	✱	✕
Sédiments Pontiac S3	■	□	△
Sédiments Cadillac S3	■	○	