
OPTIMISATION DES ANALYSES DES SUITES MULTIÉLÉMENTS ICM-MS POUR L'EXPLORATION MINÉRALE

PROJET 2014-05

PAR : DOMINIQUE GENNA, GEO, PH.D.

AVRIL 2015



AVERTISSEMENT

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

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

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

Genna, D., 2014. Optimisation des analyses des suites multiéléments ICP-MS pour l'exploration minérale. Rapport préliminaire, Projet CONSOREM 2014-05, 23 p.

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

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

L'évolution remarquable des moyens technologiques permet aujourd'hui de réaliser de façon routinière, et à des prix abordables, des analyses en éléments traces pour une grande partie du tableau périodique des éléments chimiques. Cependant, une proportion mineure des éléments communément analysée est utilisée en exploration minérale. Le potentiel d'utilisation des autres éléments demeure mal évalué. Dans l'optique d'optimiser l'utilisation des éléments traces en exploration minérale, deux approches ont été utilisées dans le cadre de ce projet : 1) la documentation des éléments traces d'intérêts en exploration minérale et 2) la documentation des méthodes de dissolution et d'analyse des éléments traces dans les laboratoires commerciaux.

Afin d'identifier les éléments traces d'intérêt pour l'exploration, leurs comportements ont été documentés dans les halos d'altération de 4 types de gisements hydrothermaux : porphyres, or orogénique, SMV et SEDEX. Un groupe d'éléments (Ge, As, Se, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi) identifiés comme « volatils » sont quasi-systématiquement détectés dans les halos d'altération des gisements compilés. Pour établir les seuils de concentration anormaux de ces éléments dans les roches altérées, la concentration dans les roches ignées fraîches a été établie à partir de la banque de donnée du GEOROC (projet 2012-05). En couplant avec les valeurs compilées dans la littérature, nous proposons les seuils compilés dans le tableau ci-dessous, indiquant les concentrations (en ppm), dans les roches ignées fraîches et dans les halos d'altération.

Il n'existe pas de méthode unique pour analyser tous les éléments traces. Pour des analyses ICP-MS, la méthode de digestion proposée (complète par fusion Li-métaborate ou Na-péroxyde ou partielle par eau régale ou 4 acides) est souvent fonction du type d'échantillon (sulfures ou silicates dominants) et des éléments recherchés. Les éléments du groupe des « volatils » présentent généralement un point de fusion bas et leur utilisation nécessite des précautions particulières lors de la dissolution des échantillons pour éviter leur volatilisation (typique lors des processus de fusion). Il est donc recommandé d'utiliser une méthode d'analyse qui ne fait pas intervenir de dissolution (INAA – activation neutronique). De plus, certains de ces éléments « volatils » (Sb et Tl par exemples) ont des comportements ambivalents. Ils peuvent se comporter à la fois comme des chalcophiles et lithophiles (Tl) ou sidérophiles (Sb). Ce comportement leurs permet d'être incorporés à la fois dans la structure des sulfures et celle de certains silicates (exemple du Tl : pyrite et séricite). Ce comportement ouvre des perspectives particulièrement intéressantes pour l'utilisation des « volatils » en exploration (reconnaissance des halos d'altération associés à des minéralisations économiques, dispersion dans l'environnement secondaire, etc.), mais implique une méthode de dissolution adéquate pour quantifier les éléments présents dans la structure des sulfures et des silicates. Une revue des méthodes de dissolution et d'analyse des éléments traces par les laboratoires commerciaux était donc indispensable pour identifier les méthodes analytiques fiables proposées par les laboratoires commerciaux.

TABLE DES MATIÈRES

Problématique.....	1
Approches utilisées.....	2
Partie 1 – Méthodes d’analyse des éléments traces.....	2
Méthodes de Dissolution.....	3
Méthodes alternatives.....	7
Recommandations.....	8
Partie 2 – Éléments traces d’intérêt pour l’exploration	9
Éléments volatils.....	11
Cas d’études.....	12
Faits saillants du projet – Valeurs de référence	23
Recommandations.....	23

Problématique

Comment optimiser
 l'utilisation des éléments traces
 en exploration minière?

- Avancées technologiques
- Limites de détection
- Frais analytiques abordables

Que fait-on avec ces listes de
 multitudes éléments reçus ?

Que signifie 2 ppm de
 germanium?

Sample #	5376-A	5377-A	5382-A	5432-O2	5434A2	5418-O2
Rock Type	S22	O12B	N01B	O14B4	W401B	T000B
Econ. Int. Bms	15% SF	15% SF	5-10% SF	5% SF	fr. to 5% Po	10% SF
SiO ₂	42.43	45.70	49.61	43.44	44.80	43.70
TiO ₂	0.21	0.24	0.29	0.17	0.29	0.06
Al ₂ O ₃	3.71	3.28	16.96	2.86	4.46	17.50
Fe ₂ O ₃	12.68	14.50	10.50	19.96	18.30	10.70
MnO	0.16	0.16	0.11	0.16	0.20	0.11
MgO	24.41	26.20	13.33	26.30	25.20	17.40
CaO						8.86
Na ₂ O						1.25
K ₂ O						0.06
P ₂ O ₅						0.01
Cl ₂ O ₇						0.02
S						1.02
Total						100.52
LOI						0.71
Hg ₂						76.17
Si						1.90
Sc						807.69
Ag						-0.5
As						-0.1
Au						7.00
Ba						246.00
Bi						-0.10
Br						-0.1
Cd						0.06
Ce						1.14
Co						82
Cr						17.0
Cs						-0.4
Ca	1200	1400	774	210	4.6	88.8
Dj	0.84	1.50	1.22	0.65	1.85	0.20
Ef	0.55	1.01	0.60	0.44	1.14	0.12
Eg	0.21	0.37	0.41	0.15	0.39	0.21
Ge	0.92	0.76	1.6	1.1	1.0	10
Gd	0.49	1.11	1.07	0.40	1.82	0.19
Os						
Pa						
Hf						
Hg						
Ho						
Ir						
K						
La						
Lu						
Mo						
Nb						
Nd						
Ne						
Ni						
Os	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
Pd	3	5	5	4	9	4
Pb	-0	-0	-0	2.30	2.50	1.80
Pt	0.38	0.83	0.84	0.45	1.38	0.14
Pf	+13	1.77	+2	+1	4.00	-2
Rb	2.26	3.82	9.87	2.00	10.05	-0
Rh	6.90	4.20	1.40	1.42	-0.24	3.25
Re	-0.7	0.14	0.18	+0.2	-0.08	-0.3
Ru	-0.9	-2	-0.8	+1	-2	-2
Sb						
Se						
Sm						
Sr						
Ta						
Tb						
Tm						
Tl						
U						
V	97.01	108.81	135.43	151.00	115.94	19.00
W	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Y	4.68	8.78	7.00	3.80	10.41	1.10
Yb	0.51	0.85	0.74	0.45	1.01	0.11
Zn	61	84	80	230	70	26
Zr	10	32	20	14	26	2

Exemple 1
 K₂O = 4%
 Rb = 200 ppm
 TI = 2.6 ppm
 Zone séricitisée
 → Potentiel pour VMS

Exemple 2
 Bi = 2.5 ppm
 Te = 4 ppm
 → Potentiel pour Or orogénique?

Indices de fertilité ?
 Projet à fort potentiel ?

Problématique

Définition Éléments Traces

- Pas de définition rigoureuse
- 11 éléments qui sont considérés comme majeurs (99% des roches ignées)
 - O, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe
- Éléments mineurs: 0,1% (1000 ppm)
- Éléments traces: <100 ppm
- Pas indispensables à la formation des minéraux majeurs (Substitution dans minéraux majeurs ou dans minéraux accessoires)

Approche utilisée

Partie 1
Documentation
des méthodes
d'analyses actuelles

Partie 2
Recherche d'éléments
traces d'intérêt pour
l'exploration

3

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Offre ICP-MS 2014

Pas de méthode miracle!

ANALYTES AND RANGES (ppm)								ALS Chemex	CODE
SiO ₂	0.01-100%	MgO	0.01-100%	TiO ₂	0.01-100%	BaO	0.01-100%	ME-ICP06 Fusion ou press-pellet	
Al ₂ O ₃	0.01-100%	Na ₂ O	0.01-100%	MnO	0.01-100%	LOI	0.01-100%		
Fe ₂ O ₃	0.01-100%	K ₂ O	0.01-100%	P ₂ O ₅	0.01-100%				
CaO	0.01-100%	Cr ₂ O ₃	0.01-100%	SrO	0.01-100%				
Ba	0.5-10,000	Hf	0.2-10,000	Sn	1-10,000	Y	0.5-10,000	ICP-MS	
Ce	0.5-10,000	Ho	0.01-1,000	Sr	0.1-10,000	Yb	0.03-1,000		
Cr	10-10,000	La	0.5-10,000	Ta	0.1-2,500	Zr	2-10,000		
Cs	0.01-10,000	Lu	0.01-1,000	Tb	0.01-1,000				
Dy	0.05-1,000	Nb	0.2-2,500	Th	0.05-1,000				
Er	0.03-1,000	Nd	0.1-10,000	Tm	0.01-1,000				
Eu	0.03-1,000	Pr	0.03-1,000	U	0.05-1,000				
Ga	0.1-1,000	Rb	0.2-10,000	V	5-10,000				
Gd	0.05-1,000	Sm	0.03-1,000	W	1-10,000				
Ag	0.5-100	Cu	1-10,000	Ni	1-10,000	Zn	2-10,000		
Cd	0.5-1,000	Li	10-10,000	Pb	2-10,000			ME-4ACD81 4 acides	
Co	1-10,000	Mo	1-10,000	Sc	1-10,000				
As	0.1-250	Hg	0.005-25	Se	0.2-250	Tl	0.02-1,000	ME-MS42 Aqua régia	
Bi	0.01-250	Sb	0.05-250	Te	0.01-250				
C	0.01-50%	S	0.01-50%					ME-IR08	

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Offre ICP-MS 2015

... en évolution constante! (Ajout de Ge, In, Re)

ANALYTES AND RANGES (ppm)				ALS Chemex				CODE
SiO ₂	0.01-100%	MgO	0.01-100%	TiO ₂	0.01-100%	BaO	0.01-100%	ME-ICP06 Fusion ou press-pellet
Al ₂ O ₃	0.01-100%	Na ₂ O	0.01-100%	MnO	0.01-100%	LOI	0.01-100%	
Fe ₂ O ₃	0.01-100%	K ₂ O	0.01-100%	P ₂ O ₅	0.01-100%			
CaO	0.01-100%	Cr ₂ O ₃	0.01-100%	SrO	0.01-100%			
Ba	0.5-10,000	Gd	0.05-1,000	Sm	0.03-1,000	W	1-10,000	ICP-MS
Ce	0.5-10,000	Hf	0.2-10,000	Sn	1-10,000	Y	0.5-10,000	
Cr	10-10,000	Ho	0.01-1,000	Sr	0.1-10,000	Yb	0.03-1,000	
Cs	0.01-10,000	La	0.5-10,000	Ta	0.1-2,500	Zr	2-10,000	
Dy	0.05-1,000	Lu	0.01-1,000	Tb	0.01-1,000			
Er	0.03-1,000	Nb	0.2-2,500	Th	0.05-1,000			
Eu	0.03-1,000	Nd	0.1-10,000	Tm	0.01-1,000			
Ga	0.1-1,000	Pr	0.03-1,000	U	0.05-1,000			
Ge	5-1,000	Rb	0.2-10,000	V	5-10,000			
Ag	0.5-100	Cu	1-10,000	Ni	1-10,000	Zn	2-10,000	
Cd	0.5-1,000	Li	10-10,000	Pb	2-10,000			ME-4ACD81 4 acides
Co	1-10,000	Mo	1-10,000	Sc	1-10,000			
As	0.1-250	In	0.005-250	Se	0.2-250			ME-MS42 Aqua regia
Bi	0.01-250	Re	0.001-250	Te	0.01-250			
Hg	0.005-25	Sb	0.05-250	Tl	0.02-250			
C	0.01-50%	S	0.01-50%					ME-IR08

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Méthodes de dissolution

Fusion

Digestion complète

Li-métaborate

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



Destruction des liaisons covalentes et ioniques
Et réorganisation avec des atomes O libres

GERMANIUM - ATTENTION

Ajout de 0.01 à 1% d'Oxyde de Germanium
Permet d'abaisser la température de fusion de
200°C



+ dissolution HF-HNO₃

Totland et al. 1992; Yu et al. 2001

6

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

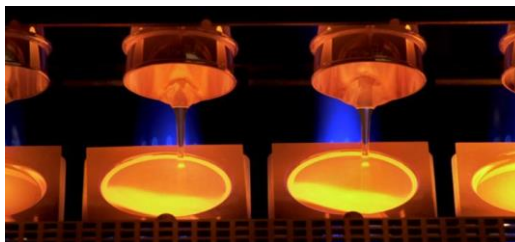
Méthodes de dissolution

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 mx réfractaires
- REE, Sc, Y, HFSE
- Récupération basse Sn, Sb, Tl



Totland et al. 1992; Yu et al. 2001

7

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Dissolution Peroxyde de sodium

Taux de récupération faible de certains éléments

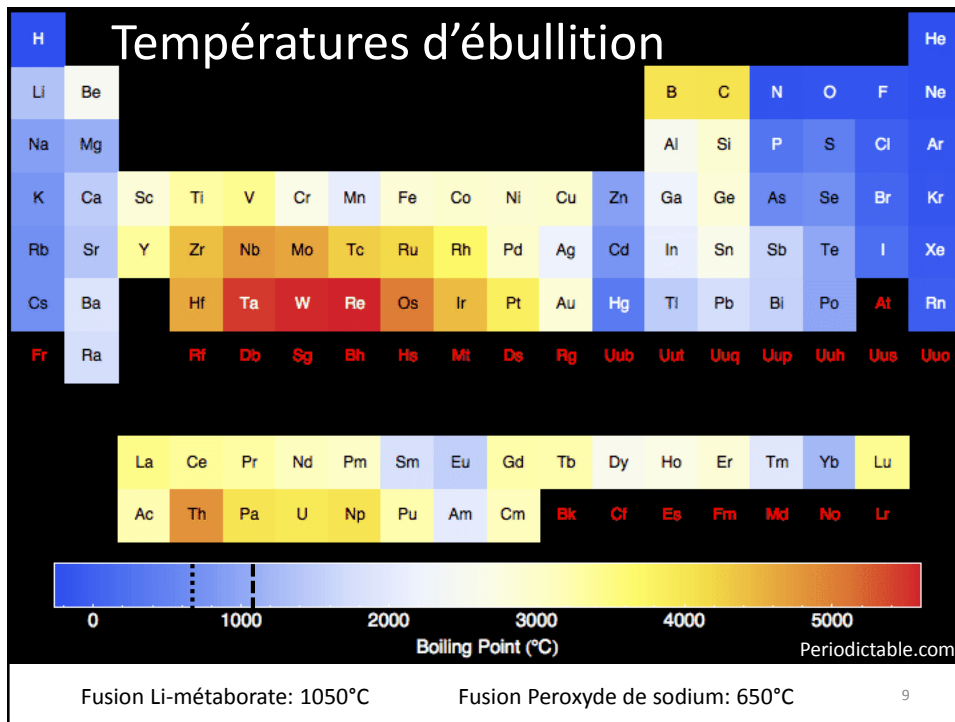
Recovery (% yield) for nine selected geological reference materials using the Na_2O_2 sinter method

	AC-E n = 3	GSR-1 n = 2	G2 n = 2	TASGRAN n = 2	BHVO1 n = 2	TASBAS n = 4	TAFahi n = 4	FeR-2 n = 2	FeR-4 n = 2	Average (%)
Rb	3	4.6	5	5	3	4	7	1.1	1.3	4
Sr	-	104	97	105	98	89	111	117	111	104
Zr	90	53	37	85	81	90	87	-	-	75
Nb	98	91	85	93	76	94	100	-	-	91
Mo	1	1.1	0	-	2	6	12	3	-	4
Sn	86	51	60	48	59	48	100	-	-	65
Sb	45	73	-	-	26	-	-	-	-	48
Cs	4	5	7	6	20	4	13	1.3	1.2	7
Ba	93	80	90	89	89	90	101	70	71	86
Hf	88	53	37	98	92	94	93	-	-	79
Ta	76	73	23	96	59	86	-	-	-	69
Tl	67	79	72	50	65	-	-	-	-	66
Pb	85	68	66	72	70	75	70	45	72	69
Bi	63	94	79	-	-	-	-	-	-	78
Th	93	97	91	106	93	94	-	106	100	98
U	74	58	53	70	58	61	53	56	40	58

Missing data indicates elements either too low in concentration or preferred values unavailable. n = number of digestions.

Yu et al. 2001

8



Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

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, oxydes
- Pas de perte de volatils

Exemple Zn:

Sphalérite ✔

Gahnite ⊘

behr-labor.com



Totland et al. 1992; Yu et al. 2001

10

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces Offre ICP-MS 2015 Problématique des Volatils

ANALYTES AND RANGES (ppm)								CODE
SiO ₂	0.01-100%	MgO	0.01-100%	TiO ₂	0.01-100%	BaO	0.01-100%	ME-ICP06
Al ₂ O ₃	0.01-100%	Na ₂ O	0.01-100%	MnO	0.01-100%	LOI	0.01-100%	
Fe ₂ O ₃	0.01-100%	K ₂ O	0.01-100%	P ₂ O ₅	0.01-100%			
CaO	0.01-100%	Cr ₂ O ₃	0.01-100%	SrO	0.01-100%			ICP-MS
Ba	0.5-10,000	Gd	0.05-1,000	Sm	0.03-1,000	W	1-10,000	
Ce	0.5-10,000	Hf	0.2-10,000	Sn	1-10,000	Y	0.5-10,000	
Cr	10-10,000	Ho	0.01-1,000	Sr	0.1-10,000	Yb	0.03-1,000	
Cs	0.01-10,000	La	0.5-10,000	Ta	0.1-2,500	Zr	2-10,000	
Dy	0.05-1,000	Lu	0.01-1,000	Tb	0.01-1,000			
Er	0.03-1,000	Nb	0.2-2,500	Th	0.05-1,000			
Eu	0.03-1,000	Nd	0.1-10,000	Tm	0.01-1,000			
Ga	0.1-1,000	Pr	0.03-1,000	U	0.05-1,000			
Ge	5-1,000	Rb	0.2-10,000	V	5-10,000			
Ag	0.5-100	Cu	1-10,000	Ni	1-10,000	Zn	2-10,000	
Cd	0.5-1,000	Li	10-10,000	Pb	2-10,000			ME-4ACD81
Co	1-10,000	Mo	1-10,000	Sc	1-10,000			Volatils ME-MS42 Aqua regia ME-IR08
As	0.1-250	In	0.005-250	Se	0.2-250			
Bi	0.01-250	Re	0.001-250	Te	0.01-250			
Hg	0.005-25	Sb	0.05-250	Tl	0.02-250			
C	0.01-50%	S	0.01-50%					ME-IR08

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces 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%)

Totland et al. 1992; Yu et al. 2001

Acides

Digestion partielle

Aqua Regia

- Dissolution partielle
- Sulfures, oxydes
- Pas de perte de volatils

HF-HClO₄-HNO₃-HCl

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

Open vessel



Bomb reaction vessel



Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

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, oxydes
- Pas de perte de volatils

HF-HClO₄-HNO₃-HCl

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

Micro-onde

Micro-onde

- Problème avec mx résistants (Zr, Hf...)
- Récupération souvent <80%



Totland et al. 1992; Yu et al. 2001

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Méthode alternative ? – Activation neutronique

- Forfaits multi-méthodes
- INAA, analyses en ppb/ppm, sans mise en solution!
- Interférences

Irradiation dans un réacteur nucléaire.
Mesure du rayonnement gamma émis.

1																	2				
H																	He				
3	4															5	6	7	8	9	10
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
11	12															13	14	15	16	17	18
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86				
Cs	Ba	¹ La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
87	88	89	104	105																	
Fr	Ra	² Ac	Rf	Db																	
¹ Lanthanide		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71						
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
² Actinide series		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103						
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						
No n-gamma radioactive isotopes																					
Radioactive isotopes can be produced. Limitation is short half-life or flux energy																					
Elements routinely determined by INAA ~205																					

14

Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Méthode alternative ?

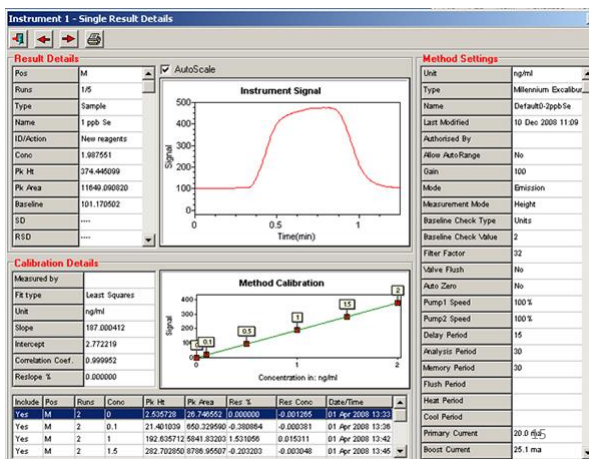
Spectrométrie par Fluorescence Atomique

- Analyse de As, Se, Sb, Bi, Te (ppt)

PSA 10.055 Millennium Excalibur



<http://www.psanalytical.com/>



Partie 1 - Méthodes d'analyse des éléments traces

Recommandations

- Choix de la méthode de dissolution et d'analyse sont des paramètres importants pour la qualité de vos données
 - Identifier les limites de détection nécessaires
 - (ex: Ge, LD 5 ppm par fusion + ICP-MS)
 - Perte des volatiles (ex: fusion, 4 acides)
- Ne pas hésiter à contacter les analystes!

16

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Méthodologie et objectifs

- Identifier des éléments traces d'intérêts
 - Documentation et compilation de la répartition des éléments traces dans différents contextes métallogéniques hydrothermaux:
 - Porphyres
 - Or orogénique
 - SMV
 - Sedex
 - Documentation du comportement géochimique
 - Associations métalliques
 - Définir des seuils anormaux pour chaque élément
- Charte des éléments traces utiles en exploration

17

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Éléments traces dans les roches fraîches

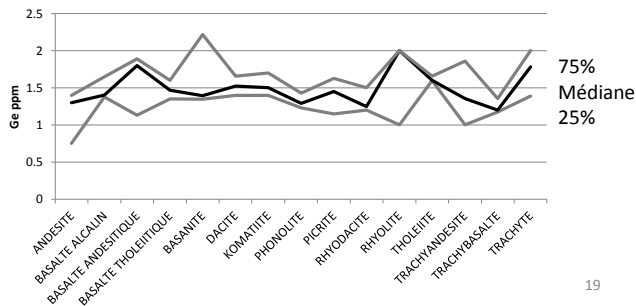
- Utilisation des roches fraîches du GEOROC
- Banque de données du projet 2012-05
- 30 éléments:
 - Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Cs, Ba, W, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th, U

18

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration Exemple du Ge

GE(PPM)	Level	#	Mean	Std Dev	Std Err									
					Mean	Lower 95%	Upper 95%	Minimum	10%	25%	Median	75%	90%	Maximum
ANDESITE		42	1.17	0.46	0.07	1.03	1.32	0.00	0.58	0.75	1.30	1.40	1.90	1.95
BASALTE ALCALIN		32	1.60	0.41	0.07	1.46	1.75	1.31	1.35	1.37	1.40	1.65	2.25	3.00
BASALTE ANDESITIQUE		3	1.61	0.42	0.24	0.58	2.64	1.13	1.13	1.13	1.80	1.89	1.89	1.89
BASALTE THOLEITIQUE		26	1.49	0.32	0.06	1.36	1.61	0.90	1.17	1.35	1.47	1.60	1.73	2.75
BASANITE		16	1.79	0.78	0.20	1.38	2.21	1.13	1.21	1.35	1.39	2.22	3.38	3.44
DACITE		32	1.50	0.50	0.09	1.32	1.67	0.00	0.94	1.40	1.53	1.66	1.77	3.38
KOMATIITE		35	1.55	0.27	0.05	1.45	1.64	1.10	1.20	1.40	1.50	1.70	1.90	2.30
PHONOILITE		7	1.31	0.15	0.06	1.17	1.45	1.06	1.06	1.23	1.29	1.43	1.51	1.51
PICRITE		10	1.40	0.32	0.10	1.17	1.63	0.90	0.91	1.15	1.45	1.63	1.88	1.90
RHYODACITE		13	1.33	0.26	0.07	1.17	1.49	0.90	1.00	1.20	1.25	1.50	1.82	1.90
RHYOLITE		24	1.61	0.73	0.15	1.30	1.91	1.10	0.56	1.00	2.00	2.00	2.40	3.00
THOLEIITE		9	1.60	0.08	0.03	1.54	1.67	1.40	1.40	1.59	1.60	1.66	1.70	1.70
TRACHYANDESITE		4	1.41	0.47	0.24	0.65	2.16	1.00	1.00	1.00	1.36	1.86	1.91	1.91
TRACHYBASALTE		6	1.24	0.10	0.04	1.13	1.35	1.10	1.10	1.18	1.20	1.35	1.37	1.37
TRACHYTE		15	2.46	2.24	0.58	1.22	3.70	1.09	1.21	1.39	1.78	2.00	7.57	8.96

Roche volcanique
 ou
 sédimentaire non
 altérée
1.3-1.6 ppm



19

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration Éléments mobiles

20

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

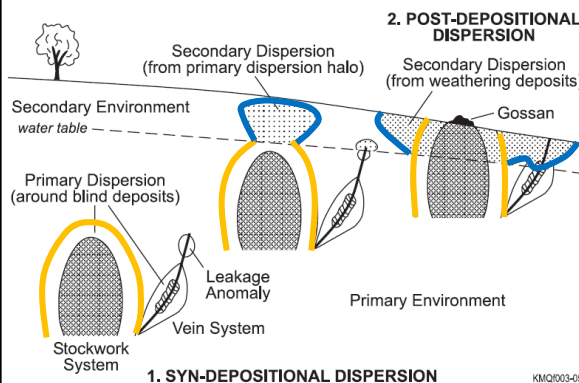
Éléments « volatils »

- 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
 - Transport sous forme de vapeur
- Éléments qui sous certaines conditions vont être dispersés au-delà des zones minéralisées, voire même altérées.
- + potentiel de dispersion dans l'environnement secondaire!

21

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Éléments volatils: éléments indicateurs à fort potentiel



- Dans différents contextes métallogéniques (hydrothermaux)

- ... mais aussi les plus difficiles à analyser

Figure 3. The generalized occurrence and possible relationships between primary and secondary geochemical dispersion patterns around ore deposits.

McQueen, 2005

22

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Cas d'études

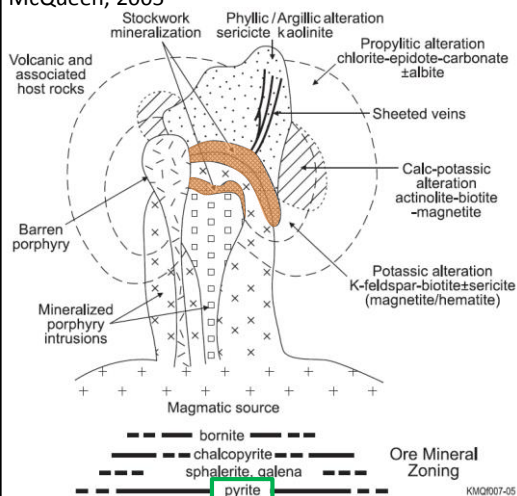
- Porphyriques
- Or orogénique
- SEDEX
- SMV

23

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Gisements porphyriques

McQueen, 2005



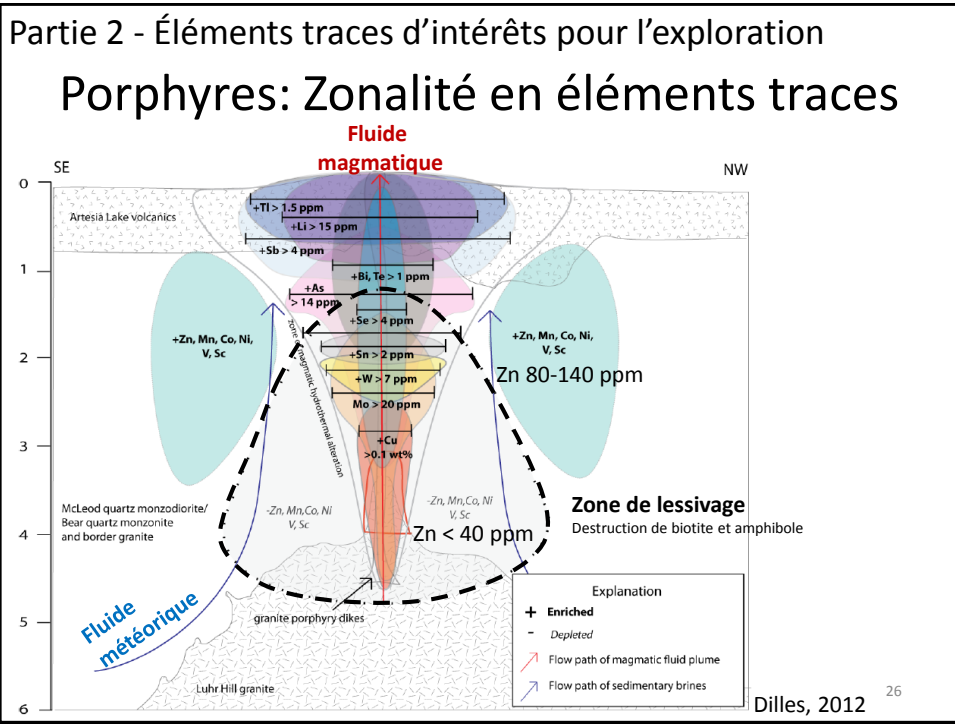
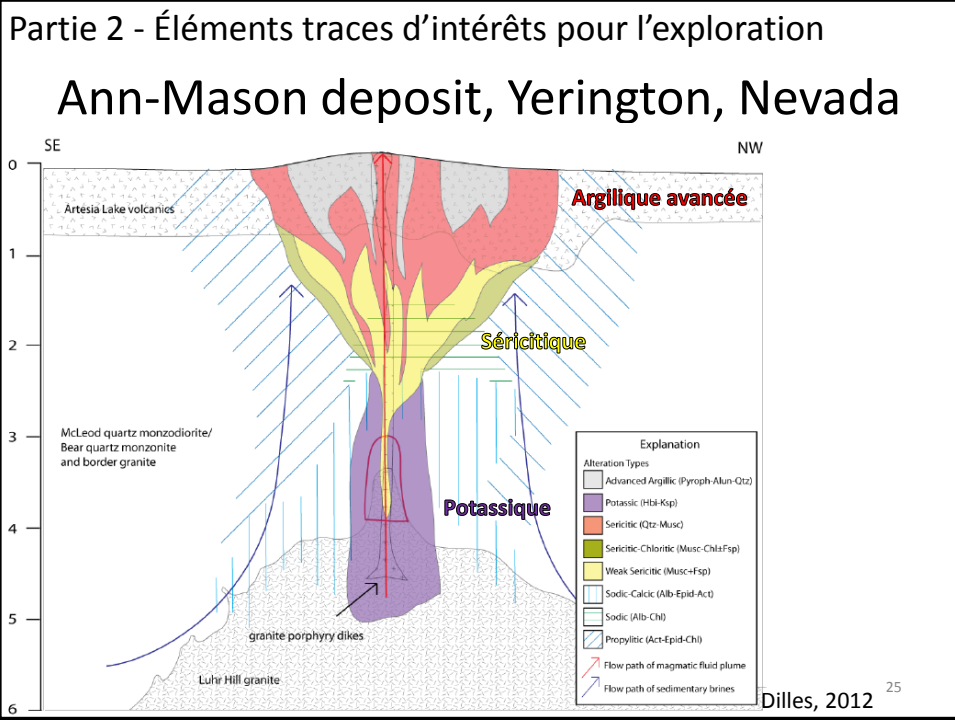
**As-Hg-Li-Sb-Te-
 Tl-Zn**

**Sulfures
 Chlorite et séricite**

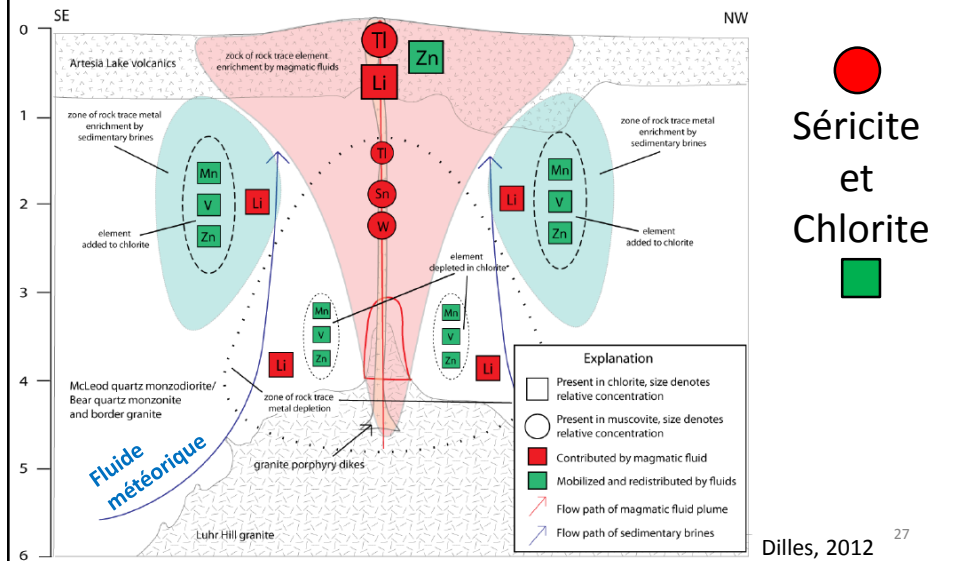
Figure 7. Summary of spatial and temporal wall rock alteration patterns around porphyry copper-gold systems, also showing key alteration minerals and distribution of major sulphides in the mineralized stockwork (adapted from Wilson et al., 2003; Corbett, 2004).

Olade et Fletcher, 1976; Dilles, 2012;
 Halley et al. 2015

24



Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration Minéraux hôtes des éléments traces



●
 Séricite
 et
 Chlorite
 ■

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

TABLE 1. Typical Pathfinder Elemental Ranges (ppm) Halley et al, 2015 – SEG Newsletter

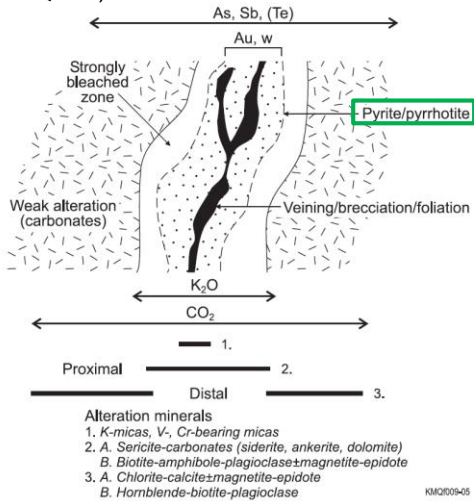
Metal	Average crust abundance ¹	Potassic	Deep sericitic	Shallow sericitic
Cu	75	>200-ore	100	50
Mo	1	0.5-ore	2-20	0.5-5
Sn	2.5	0.5-10	2-30	bkgd
W	1	bkgd	2-20	0.5-5
Mn	1,400	<bkgd	1,000-5,000	400-1,000
Zn	80	<bkgd	200-1,000	10-100
Pb	8	50	200-1,000	10-100 ²
Ag	0.08	0.5-3	1-50	1-10 ²
Ni	20	<bkgd	bkgd-30	<bkgd
Co	10	<bkgd	bkgd-20	<bkgd
Se	0.05	5-20	1	1
Te	0.001	0.1	1-5	0.1-1
Bi	0.06	0.05	1-10	0.05-1
As	1	<bkgd	10-50	50-1,000
Sb	0.2	<bkgd	1-3	3-100
Li	13	<bkgd	<bkgd	15-50
Tl	0.36	0.2	0.2	1-50
Hg	0.08	0.05	0.05	0.2-10
Cs	1	<bkgd	1-10	1-20

¹Background concentration (bkgd) varies by rock unit; this is the average crustal abundance (Ni and Co = average upper crust; Taylor and McLennan, 1985); alteration zones are potassic from ore zone, deep sericitic above ore zone, and shallow sericitic and associated advanced argillic near surface

²Alunite is commonly enriched in Pb, Ag, Ba, and Sr in advanced argillic alteration

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration Gisements orogénique

McQueen, 2005



Au-As-Sb-W-Bi-Te

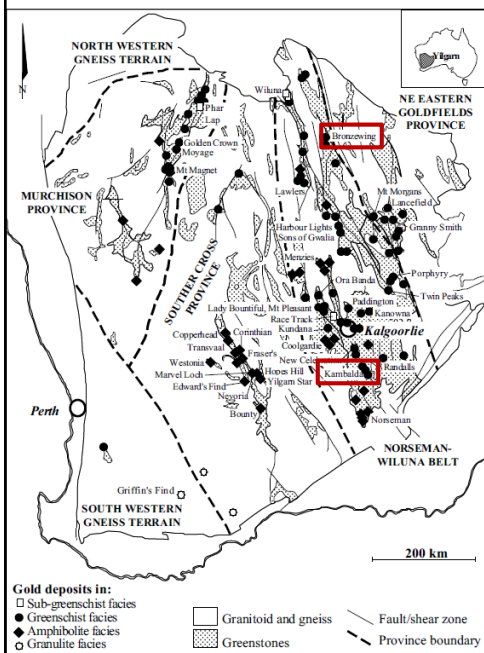
**Sulfures
 Carbonates-Quartz**

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

Figure 9. Typical alteration patterns and element zonation around Archean greenstone hosted orogenic gold deposits in mafic rocks. A and B are key assemblages in low- and high-grade metamorphic terrains respectively (adapted from Yeats and Vanderhor, 1998).

29

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration



Eilu et Groves, 2001

Exemple du Yilgarn

30

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration Facteurs d'enrichissements dans les roches encaissantes

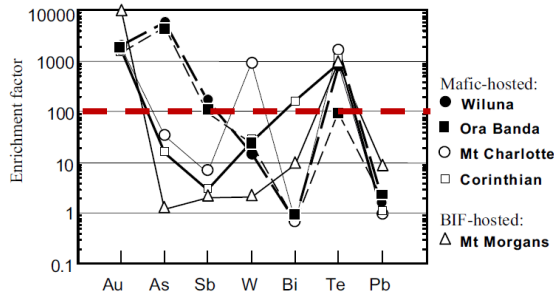


Fig. 4. Trace-element enrichment factors for selected orogenic Au deposits of the Yilgarn Craton, Australia. The enrichment factors are produced by the standard method where $EF = C_{ore} / C_{host\ rock}$ (e.g. Kerrich 1983). Data from Perring *et al.* (1990) and Kelly (1998).

- Dans les shales noirs, facteur d'enrichissement est beaucoup plus faible (2 à 100)

Eilu et Groves, 2001

31

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration Éléments traces dans les systèmes orogéniques Zonalité latérale

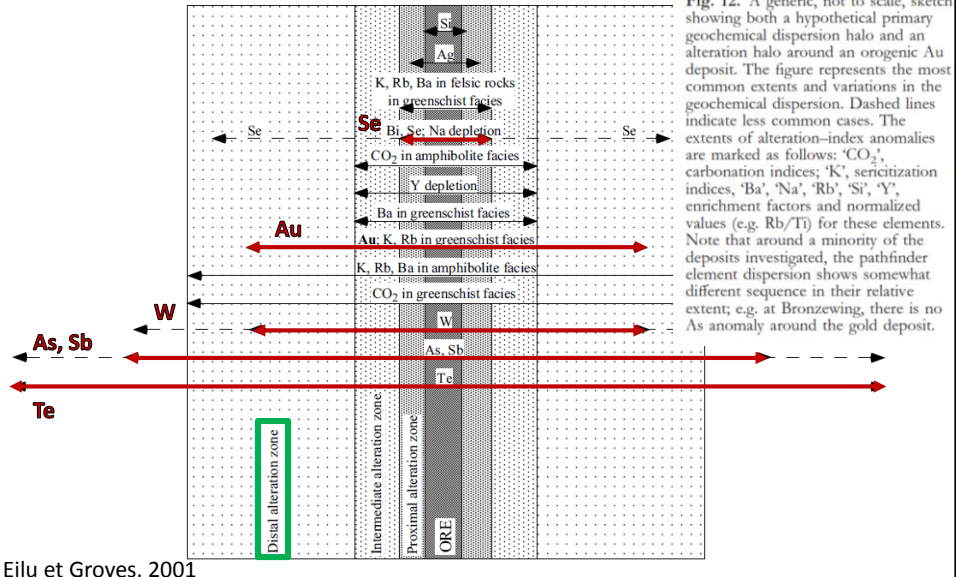


Fig. 12. A generic, not to scale, sketch showing both a hypothetical primary geochemical dispersion halo and an alteration halo around an orogenic Au deposit. The figure represents the most common extents and variations in the geochemical dispersion. Dashed lines indicate less common cases. The extents of alteration-index anomalies are marked as follows: 'CO₂', carbonation indices; 'K', sericitization indices; 'Ba', 'Na', 'Rb', 'Si', 'Y', enrichment factors and normalized values (e.g. Rb/Ti) for these elements. Note that around a minority of the deposits investigated, the pathfinder element dispersion shows somewhat different sequence in their relative extent; e.g. at Bronzewing, there is no As anomaly around the gold deposit.

Eilu et Groves, 2001

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration 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

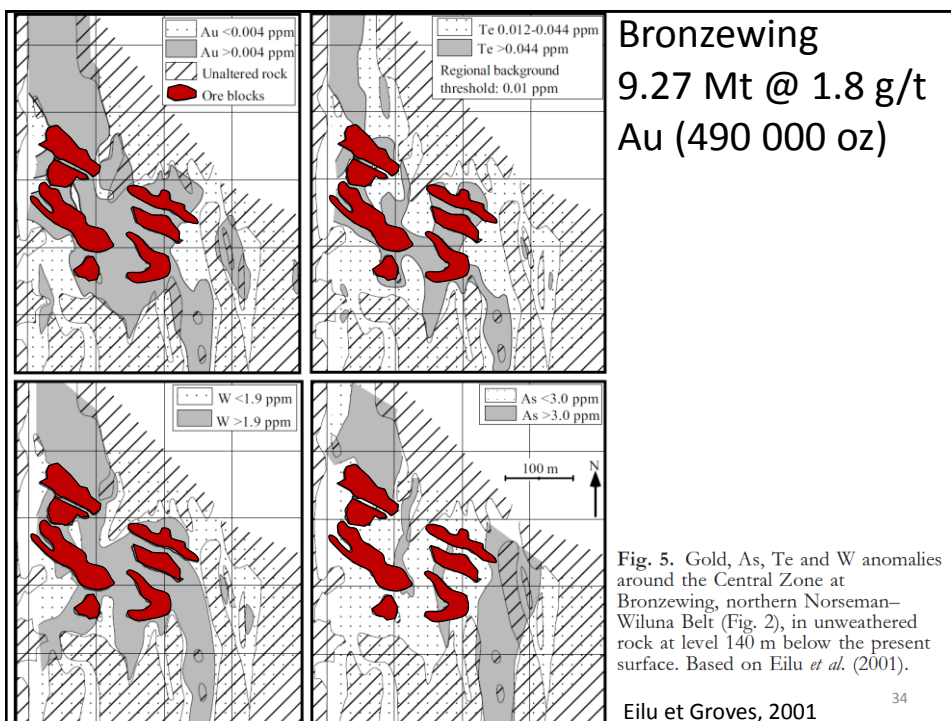
	Granny Deeps		Twin Peaks	Bulletin	Kings Cross	Bronzewing	Moyagee
	Granodiorite	Sedimentary rocks	Sedimentary rocks	Basalt	Basalt	Basalt	Komatite
Au	25-70	5-30	0-10	5-20	5	>80	10-35
Ag	0	0	0-20	0-10	0	>40	0-20
As	0	0-5	20-100	>150	>50	0	20-50
Bi	0	0	0	0	0	0-10	
Sb	0	0-5	0	>150	0-20	>100	1-20
Se	0	0	0	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	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.

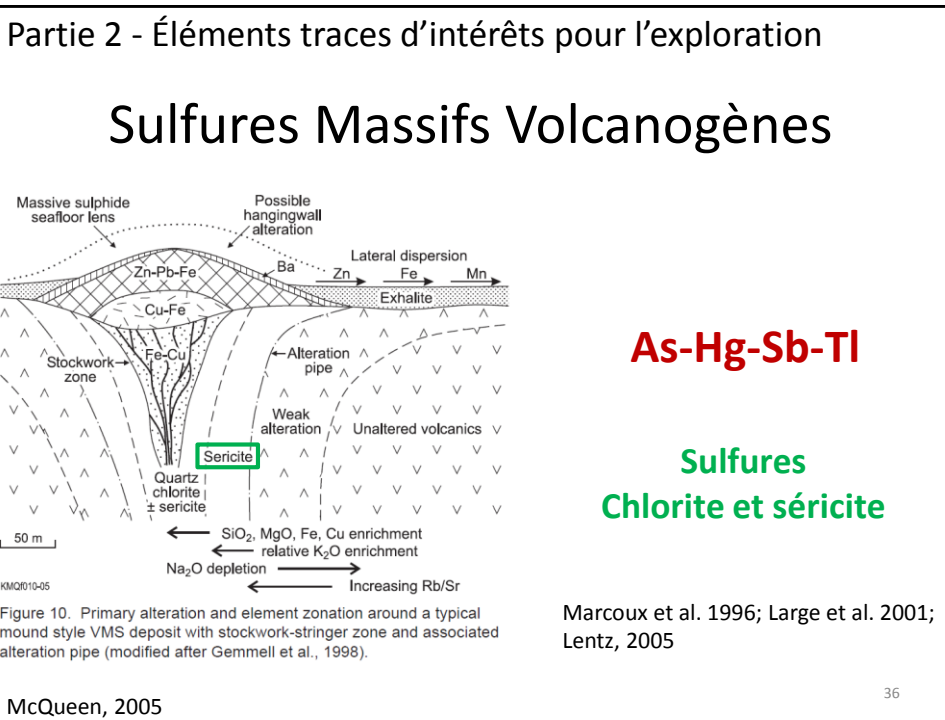
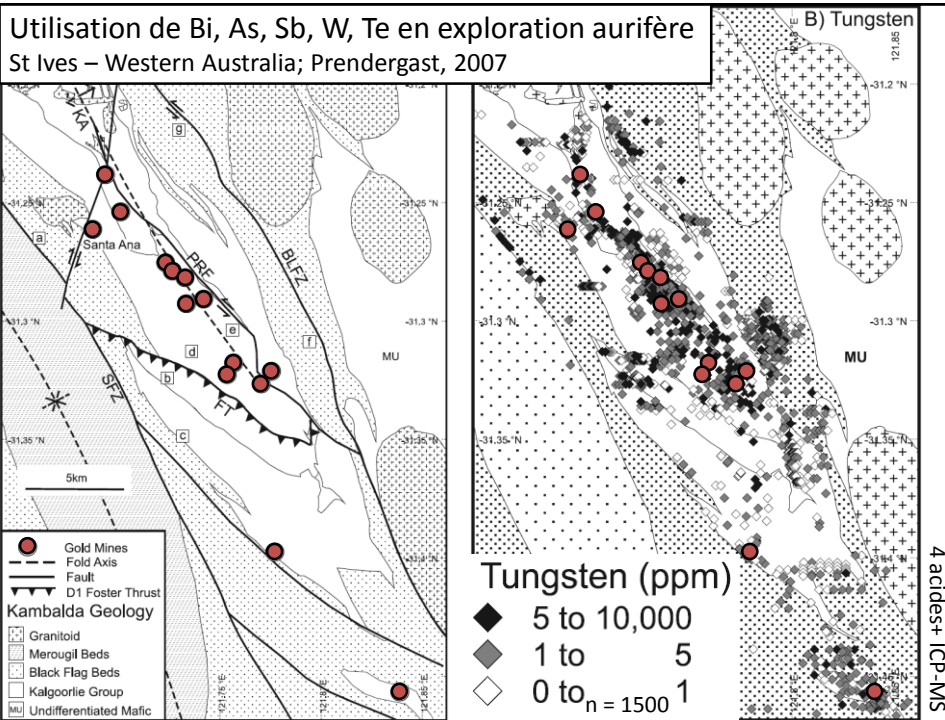
As-Au-Sb-Te-W

Eilu et Groves, 2001

33



34



Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Éléments traces dans les SMV

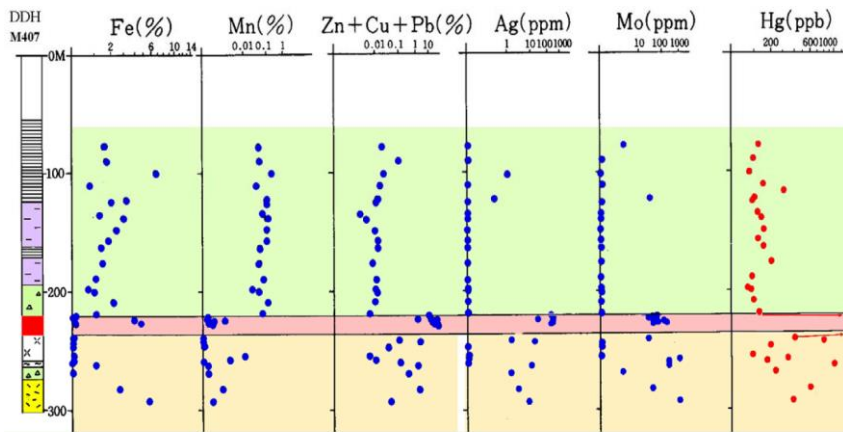
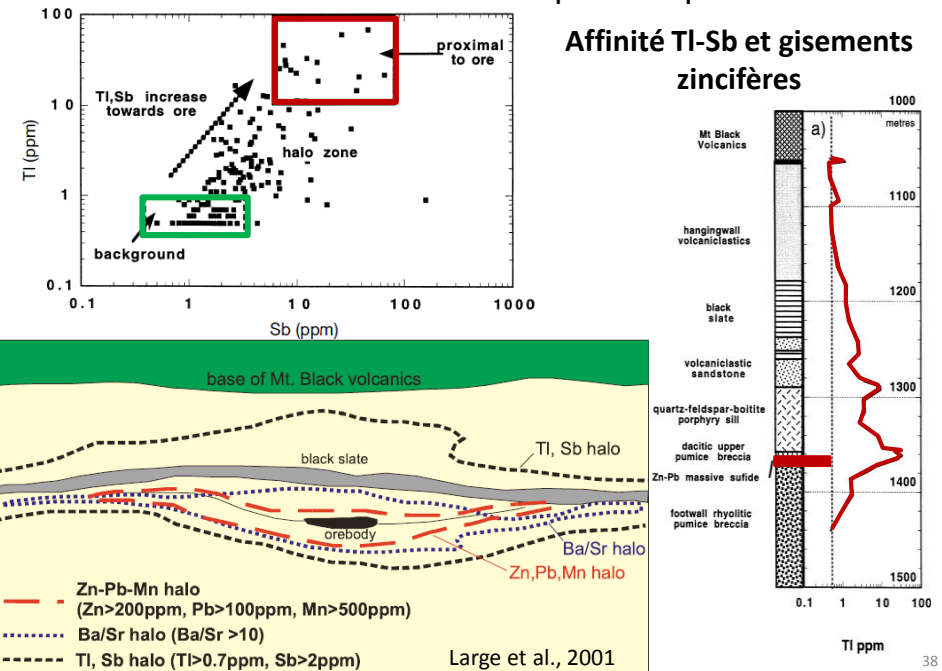


Fig. 2. Geochemical profiles for Fe, Mn, base-metals, Ag, Mo, and Hg in drill hole M407 through the hanging wall and into the footwall of the Uwamuki First deposit, Japan (modified after Tono, 1974).

Lentz, 2005

37

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration



38

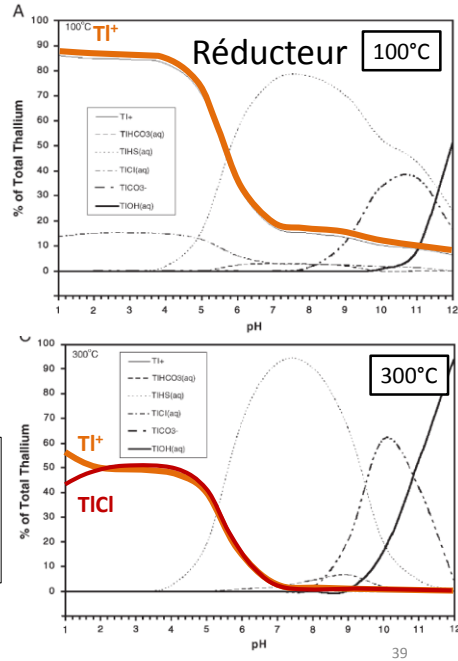
Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Solubilité du Tl

- Lessivage roche >250°C
- Précipitation par neutralisation des fluides (mélange avec eau de mer)

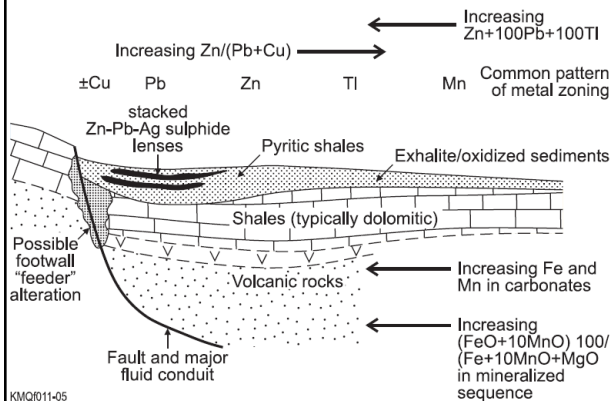
Conditions identiques au transport et à la précipitation du zinc!

Xiong, 2007



Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

SEDEX



As-Ge-Sb-Tl

**Sulfures
Quartz**

Figure 11. Some major features and common element zoning of SEDEX deposits (based on Large and McGoldrick, 1998; McGoldrick and Large, 1998).

Slack et al. 2004; Graham et al. 2004

McQueen, 2005

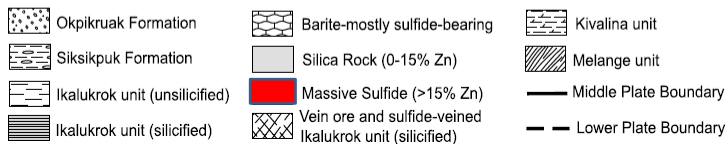
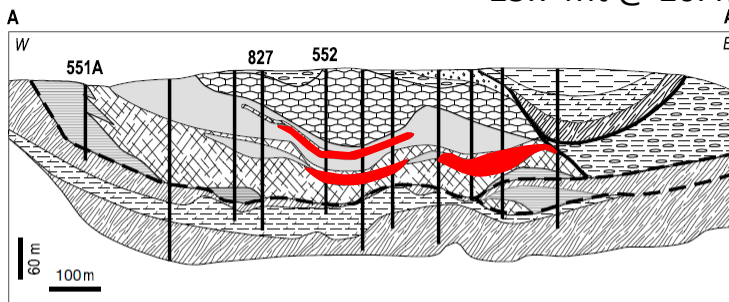
40

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Seuils de concentrations et exemples

Red Dog, Alaska

1989 à 2001
 25.7 Mt @ 20.4% Zn, 5.5% Pb



Slack et al. 2004

Fusion lithium métaborate/tétraborate + ICP-MS

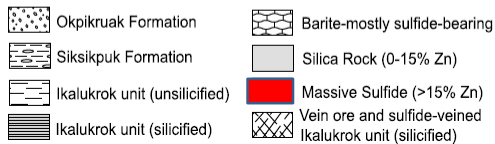
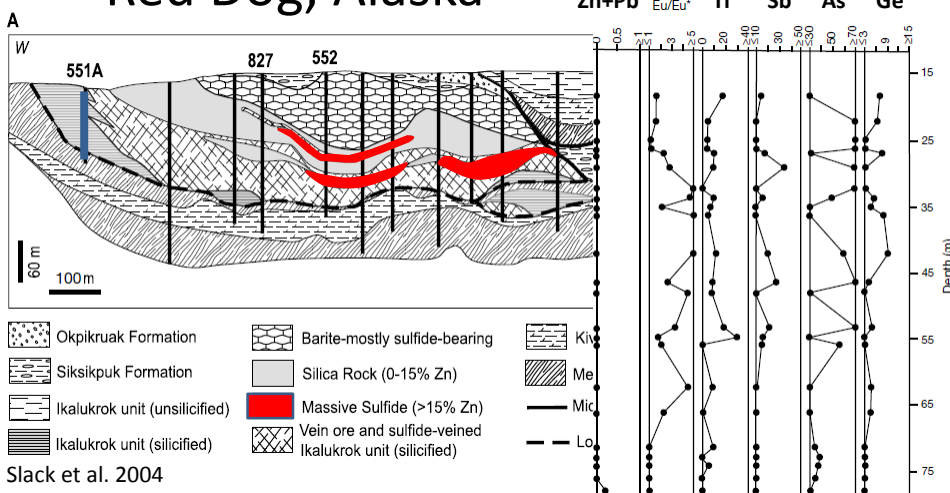
41

Partie 2 - Éléments traces d'intérêts pour l'exploration

Seuils de concentrations et exemples

Red Dog, Alaska

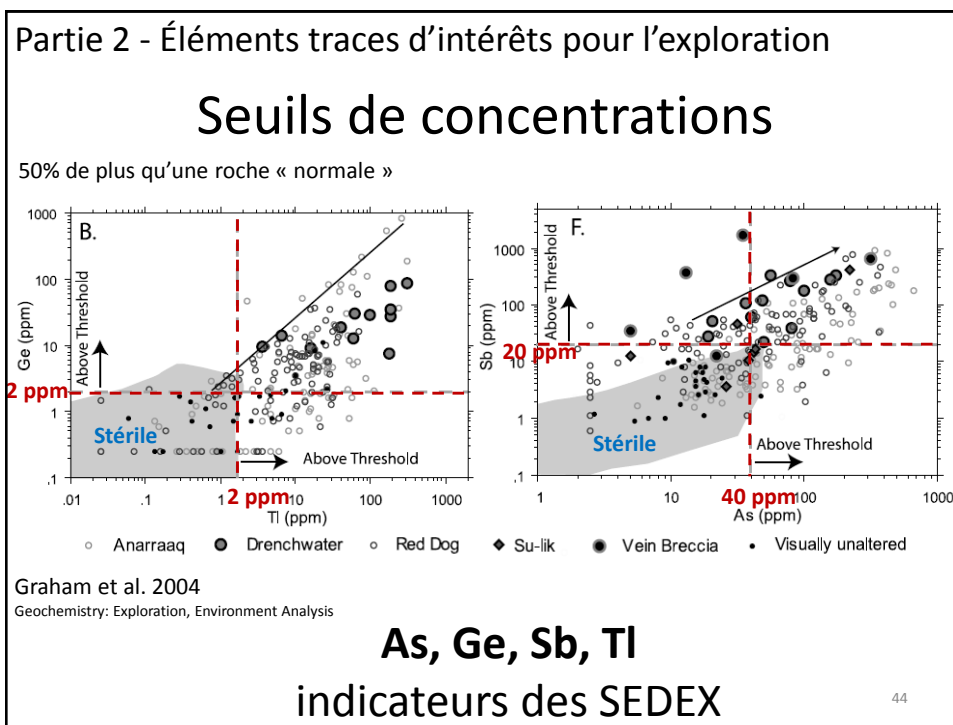
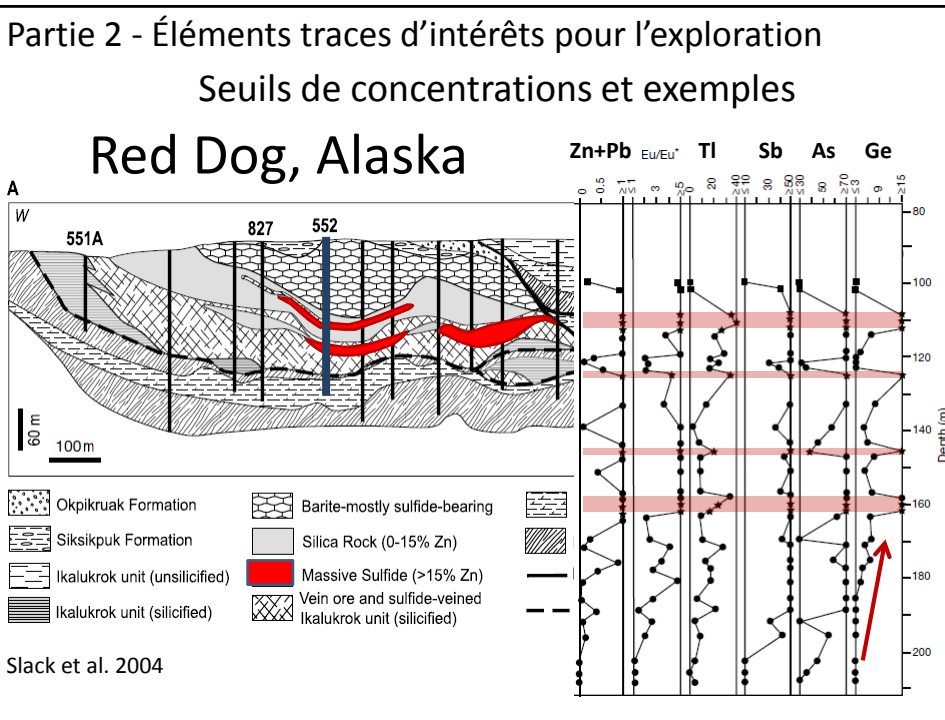
3.5ppm
 >250%



Slack et al. 2004

Fusion lithium métaborate/tétraborate + ICP-MS

42



Faits saillants du projet – Valeurs de référence

		Ge	As	Se	Sn	Sb	Hg	Tl	Pb
Litho Faure, 1998	Ultramafique	1.3	0.8	0.05	0.5	0.1	0.01	0.04	0.5
	Mafique	1.4	2.2	0.05	1.5	0.6	0.09	0.21	7
	Felsique	1.3	1.5 - 1.9	0.05	1.5 à 3	0.2	0.08	0.72 à 2.3	15 à 19
	Shale	1.6	13	0.6	6	1.5	0.4	1.4	20
Porphyre	Potassique	N.A.	-	5 à 20	0.5 à 10	-	0.05	0.2	50
	Séricitique profonde		10 à 50	1	2 à 30	1 à 3	0.05	0.2	200 à 1000
	Séricitique surface		50 à 1000	1	-	3 à 100	0.2 à 10	1 à 50	10 à 100
Or	Granodiorite	N.A.	5	0.1		0.9			
	Basalte		4 à 30	0.3		0.9			
	Sédiment		6 à 40			0.9			
	Komatiite		5	0.15		0.45			
VMS		3	300	10	10	10	0.7	2	75
SEDEX		2	40			12		1.5	55
Méthodes Analyses		fusion ou 4A ICP-MS	INAA ou 4A ICP-MS	INAA	fusion ou 4A ICP-MS	INAA ou 4A ICP-MS	Vapeur froide FIMS	fusion ou 4A ICP-MS	fusion ou 4A ICP-MS

Certains éléments sont présents dans les halos d'altération de plusieurs types de minéralisations hydrothermales

Eilu et Groves, 2001; Large et al. 2001; Slack et al. 2004; Hannington 2005; Halley et al. 2015; etc.

45

Recommandations

- Ajouter les éléments « volatils » à vos analyses. Attention aux méthodes
- Ajouter une colonne « méthodes d'analyse » et « méthodes dissolution » dans vos banques de données
- Ajouter des standards pour la lithogéochimie

46