

MINERALISATIONS ASSOCIEES AUX MAGMAS ACIDES

1- Rappels d'ordre général

Les lignées des magmas acides (felsiques) ont des origines diverses, mettant en jeu la croûte continentale moyenne ou inférieure avec probablement une contribution des magmas mafiques.

On peut identifier trois groupes de magmas felsiques :

- Lignée calco alcaline de type I mettant en jeu des magmas de fusion partielle de la croûte continentale inférieure (CCI) en présence d'eau et leur mélange avec des magmas basiques. Ces magmas sont des tholéites d'arc, les lignées I caractérisent essentiellement les contextes de subduction :
 - o Les lignées d'arc insulaires où le phénomène essentiel et dominant reste le fractionnement des magmas mafiques où le mélange (contamination / assimilation).
 - o Les lignées d'arcs andins, où le phénomène dominant reste la fusion partielle de la CCI où les mélanges produisent des magmas granitiques à granodioritiques vers des compositions plus basiques (diorites).
- Lignées calco alcalines de type A, où les magmas acides sont produits par la fusion partielle de la CCI (amphibolites, gneiss et granodiorite).
- Lignée peralumineuse où un excès d'aluminium existe dans les magmas granitiques dès l'origine, en raison d'une composante issue de la fusion partielle de méta sédiments à dominante pélitique. Selon que la fusion partielle a lieu en conditions « sèche » (CCI) ou en présence d'eau (CCM), on obtiendra deux lignées très contrastées de granites peralumineux : - lignée de type S
- - lignée alumino potassique

Il existe une autre lignée (moins fréquente), qu'on appelle lignée peralcaline dont les magmas résultent soit de la fusion partielle anhydre de gabbro ; soit de la cristallisation fractionnée de basaltes alcalins.

2- Potentialités des magmas calco alcalins (lignées I)

Il est bien connu que les magmas acides ou siliceux concentrent les éléments lithophiles, surtout les plus incompatibles.

On distingue les grands groupes à métaux rares (RMG) suivants:

- Groupe peralcalin
- Groupe peralumineux qui est le plus important.

Les magmas peralumineux (issus de la fusion partielle de croûte continentale supérieure) sont enrichis en éléments incompatibles caractéristiques de la CCS tels que U, Sn, W. Le fractionnement de tels magmas conduit à des magmas très enrichis en Na et Li, B, F et métaux rares, se mettant en place à des niveaux proches de la surface (sub volcaniques) et à solidus relativement bas (entre 500 et 600°C).

SYSTEMES MAGMATIQUES – HYDROTHERMAUX

Sachant que tous les magmas acides contiennent de l'eau et qu'à partir du moment où ils commencent à cristalliser, l'eau se concentre dans les fluides résiduels jusqu'à atteindre la saturation (5% H₂O). Les magmas peralumineux sont souvent proche de la saturation dès leur formation et sont en plus riches en Li, F et B. La séparation de la phase fluide se produit avant la fin de la cristallisation : il y a donc démixion de la phase fluide et du liquide résiduel.

1- Cristallisation des métaux

La solubilité des métaux décroît généralement avec la température à quelques exceptions près : l'étain et le tungstène ont des solubilités très faibles à basse température et se déposeront à des températures élevées (350 – 450°C) ; ceux comme U, Pb, Cu et Zn restent solubles à de plus basses températures.

1a- Facteurs conduisant à la précipitation

- **Les variations de pH** : elle joue un grand rôle pour de nombreux éléments dont la solubilité varie fortement avec le pH (solubilité minimale pour des pH neutres ; maximale pour des solutions alcalines ou acides).
*On peut citer l'exemple de l'étain et du tungstène qui peuvent précipiter en développant des altérations de lessivage acide (**greisen** et minéralisations associés).

*A l'inverse, les solutions alcalines (sous saturées en silice) peuvent se neutraliser en réagissant avec un milieu siliceux et former des gisements de type albitites à uranium.

- **La dilution** : Elle accompagne souvent une baisse de température et elle est aussi considérée comme le facteur responsable de la précipitation des métaux. La solubilité est d'autant plus grande que les solutions sont plus salines.

- **Les variations de pression** : La solubilité de nombreux métaux dépend fortement de la pression (cas de l'étain et du tungstène).

- Les phénomènes d'oxydo réduction : les variations de la fugacité d'oxygène (f_{O_2}) jouent un rôle très significatif sachant que les métaux sont transportés en solution sous une autre valence que les minéraux qui vont cristalliser. Il faut noter que certains métaux éléments sont en solution sous un état plus réduit que dans les minéraux : cas de l'étain ou du cuivre à haute température. D'autres, par contre, sont solubles dans des conditions oxydantes et précipitent ou cristallisent dans des conditions réductrices : c'est le cas de l'uranium.

2- LES GISEMENTS DE TYPE « PORPHYRE »

2a- Cas des intrusions de faible profondeur

Le fluide (ou saumure) magmatique qui peut être représenté dans le système $H_2O-NaCl$ ne peut coexister avec des liquides magmatiques des systèmes felsiques qu'à des profondeurs plus grandes (5.5 km et 130MPa de pression lithostatique).

La séparation des deux phases (liquides et vapeur) s'accompagne donc d'une augmentation de volume. Dans la partie apicale de l'intrusion, là où s'accumulent les fluides exsolvés, il y a donc augmentation de pression, jusqu'au déplacement de la résistance mécanique des roches encaissantes : il y'aura alors fracturation hydraulique et les fluides magmatiques pourront s'échapper. Il a été constaté que des éléments comme le soufre et l'arsenic se concentrent préférentiellement dans la phase vapeur (ceci s'explique par le fait que ces éléments sont réputés volatils). Le cuivre et l'or peuvent aussi avoir plus d'affinité pour la phase vapeur que pour la saumure hypersaline.

Toutes ces observations sont à la base des modèles de la relation entre minéralisation de type porphyre et de type épithermale.

2b- Caractérisation d'un système hydrothermal-magmatique « type porphyrique »

A partir de ce que nous venons de voir, il est donc possible de concevoir l'existence de minéralisations hydrothermales étroitement associées à l'emplacement à faible profondeur de granitoïdes calco alcalins. De telles intrusions apparaissent ainsi comme des machines thermiques, à la fois sources de métaux et des fluides qui les transportent et aussi responsables de la création et du fonctionnement du piège qui capture ces métaux.

3- EXEMPLE DE SYSTEMES MAGMATIQUES – HYDROTHERMAUX : LES GISEMENTS DE TYPE PORPHYRE CUPRIFERE

3.1- Caractères généraux : Les porphyres cuprifères représentent une classe de gisements de cuivre à basses teneurs et forts tonnages (Tab. 1).

D'un point de vue géologique, ce sont des gisements en stockwerks (**chercher la définition de ce terme ?**), dans des intrusions acides de faibles profondeurs, de forme globalement cylindrique, souvent caractérisés par une texture microgrenue porphyrique (**voir la définition de cette texture ?**). Les gisements de ce type sont essentiellement liés aux environnements d'arcs magmatiques (insulaires ou de type cordillère) associés à la subduction. Les extrusions sont représentées le plus souvent par des basaltes et des andésites. Les intrusions sont représentées par des diorites, granodiorites ou encore des granosyérites.

Le minerai principal primaire représentant le cuivre est la bornite (Cu_5FeS_4), associée à la chalcopryrite (Cu Fe S_2). Accessoirement, on trouve de l'or et du molybdène (sous forme de molybdénite « MoS_2 »). Ces éléments accessoires valorisent les porphyres qui sont à très faibles teneurs en cuivre.

3. 2. Altérations autour des porphyres cuprifères :

Les porphyres cuprifères sont caractérisés par une association d'altérations hydrothermales typiques, développées le long du réseau des veinules et stockwerks.

3.2.1 Typologie des altérations : On distingue cinq (05) types d'altérations :

* Altération propylitique : Cette altération s'effectue à des températures inférieures à 400 °C, en présence de fluides ; albite-Fth K (adulaire)-chlorite-actinolite-épidote-calcite.

* Altération argileuse : elle est de basse température et donne naissance aux variétés d'argiles ferromagnésiennes suivantes : des smectites qui remplacent la chlorite et l'actinolite.

* Altération potassique : c'est un apport massif de potassium (K) à la roche sous forme de feldspath potassique ou de biotite magnésienne (phlogopite) à des températures qui restent toujours supérieures à 400°C ; on note un apport massif de soufre et de métaux (Fe, Cu, Mo) et la présence possible d'anhydrite (Ca SO₄). On considère que c'est à cette altération qu'est associée la minéralisation sulfurée primaire.

* Altération séricitique : c'est un lessivage acide qui s'effectue suite à un apport de H⁺ ; elle est représentée par l'association Quartz-Séricite. Cette altération s'effectue aux dépens des plagioclases et feldspaths potassiques.

* Altération argileuse avancée : c'est un lessivage acide plus poussé qui conduit à l'association kaolinite-quartz.

4- GISEMENTS EPITHERMAUX D'OR ET D'ARGENT

4.1. Définition :

Le développement d'anomalies thermiques de sub surface (en relation avec une activité volcanique ou sub volcanique) induit des circulations convectives ($\leq 300^{\circ}\text{C}$) et très basse pression ($\leq 50\text{MPa}$), caractéristiques des champs géothermiques.

Les minéralisations associées à ces systèmes sont de type filonien, avec des circulations dominées par des fluides météoriques. En fonction de la profondeur de formation et de la température, on distingue les types suivants :

- Filons mésothermaux à métaux de base, formé à 250°-300°C et des pressions de quelques dizaines de MPa.
- Filons épithermaux à métaux précieux, formés à des températures $\leq 250^{\circ}\text{C}$ et sous une très faible pression.

4.2. Gisements épithermaux d'or et d'argent :

Ces gisements concentrent essentiellement l'or et l'argent, mais aussi l'étain, le mercure l'antimoine ou encore l'uranium. En ce qui concerne l'or par exemple, ces gisements sont caractérisés, par opposition aux porphyres Cu-Au, par leurs fortes teneurs et leurs faibles tonnages. Ces gisements sont célèbres parce qu'elles contiennent des accumulations exceptionnelles (Tab. 2).

a- Typologie :

On distingue deux grands groupes :

- Le type à adulaire - séricite
- Le type à quartz – alunite

5- SYSTEME MAGMATIQUE-HYDROTHERMAUX DES LIGNEES PERALUMINEUSES.

Dans les magmas peralumineux, seuls ceux dont la saturation en eau est la plus forte (magmas de type GMR ou RMG : granites à métaux rares) ont la possibilité de s'approcher de la surface pour donner naissance à des minéralisations magmatiques – hydrothermales, représentées par les éléments Sn, W, Li, Ta, Nb, Be.

6- INTRUSIONS PROFONDES

Les intrusions de moyenne et de grande profondeur ne peuvent donner des systèmes magmatiques – hydrothermaux que dans les conditions suivantes :

- Intrusion dans des formations carbonatées dont la dissolution et remplacement par des fluides magmatiques va donner des skarns.
- La géométrie des intrusions favorise une interaction entre fluides internes (magmatiques) et externes (métamorphiques), amplifie la cristallisation magmatique des minéraux de métaux rares.

Les skarns sont des roches développées par dissolution/remplacement de roches carbonatées, en contact de roches magmatiques. Ces skarns sont porteurs de minéralisations variées, mais les plus importants sont les skarns à scheelite (CaWO_4).

7- MINÉRALISATIONS HYDROTHERMALES LIÉES À LA MISE EN PLACE DES MAGMAS FELSIIQUES

Ces minéralisations sont dues à des fluides qui sont entraînés dans des circulations convectives autour des intrusions. Cette convection est d'autant plus efficace que l'intrusion est moins profonde.

7.1. Minéralisations péri-batholitiques

- Intrusions de granodiorites calco alcalines dans des environnements riches en roches carbonatées : gisements de skarns.
- Intrusions de granites peralumineux dans des séries grésopélitiques : gisements de quartz à wolframite et quartz cassitérite.

Des altérations typiques sont associées à ces minéralisations :

- Dans les granites, c'est la greisenisation : lessivage acide, selon la réactiontype :



Le lessivage peut être plus poussé, avec l'élimination totale des alcalins ; l'aluminium, reste stocké sous forme de topaze pour aboutir au greisen à topaze. Dans les granites riches en lithium, on aboutit à des greisens à zinwaldite (mica Li). Cette altération (greisenisation) peut être fissurale ou en masse avec une minéralisation disséminée.

Dans les encaissements métamorphiques, la tourmalinisation est fréquente aux épontes des veines quartzeuses.

Dans le cas général, les fractures minéralisées appartiennent à des réseaux de fractures préexistantes, liées à la mise en place des granites ou résultant de la déformation de l'encaissant.

Les circulations hydrothermales autour des plutons minéralisés se traduisent par l'existence d'un halo d'**anomalies positives** en éléments en traces (Sn, W, li, B, F, Mo, As,...) qui peut servir en prospection géochimique.

Country	Deposit	Tonnage (million tonnes)	Grade			
			Cu (%)	Mo (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)
USA	Bagdad (Arizona)	800	0.50	0.03	—	0.6
	Morenci (Arizona)	500	0.9	0.007	—	—
	Safford-Keunecott (Arizona)	2000	0.5	—	—	—
	San Manuel- Kalamazoo (Arizona)	1000	0.74	0.015	—	—
	Butte (Montana)	500	0.8	—	Yes	Yes
	Santa Rita (New Mexico)	500	0.95	—	—	—
	Bingham (Utah)	1700	0.71	0.053	—	—
	Mexico	El Arco (Baja California)	600	0.6	—	—
	La Caridad (Sonora)	750	0.67	0.02	—	—
Canada	Lornex	500	0.41	0.015	—	—
	Valley Copper	900	0.48	—	—	—
Papua New Guinea	Frieda River	800	0.46	0.005	0.2	—
	Panguna	1000	0.47	0.005	0.48	1.6
Cebu Island	Atlas	1100	0.55	—	Yes	Yes
Panama	Cerro Colorado	2000	0.6	0.015	0.06	4.6
Chile	Chuquicamata	10000	0.56	0.06	—	Yes
	El Abra	1200	0.7	—	—	—
	El Teniente	8000	0.68	0.04	—	—
Peru	Santa Rosa	1000	0.55	—	—	—

Tableau I.
Exemples de porphyres de classe mondiale.

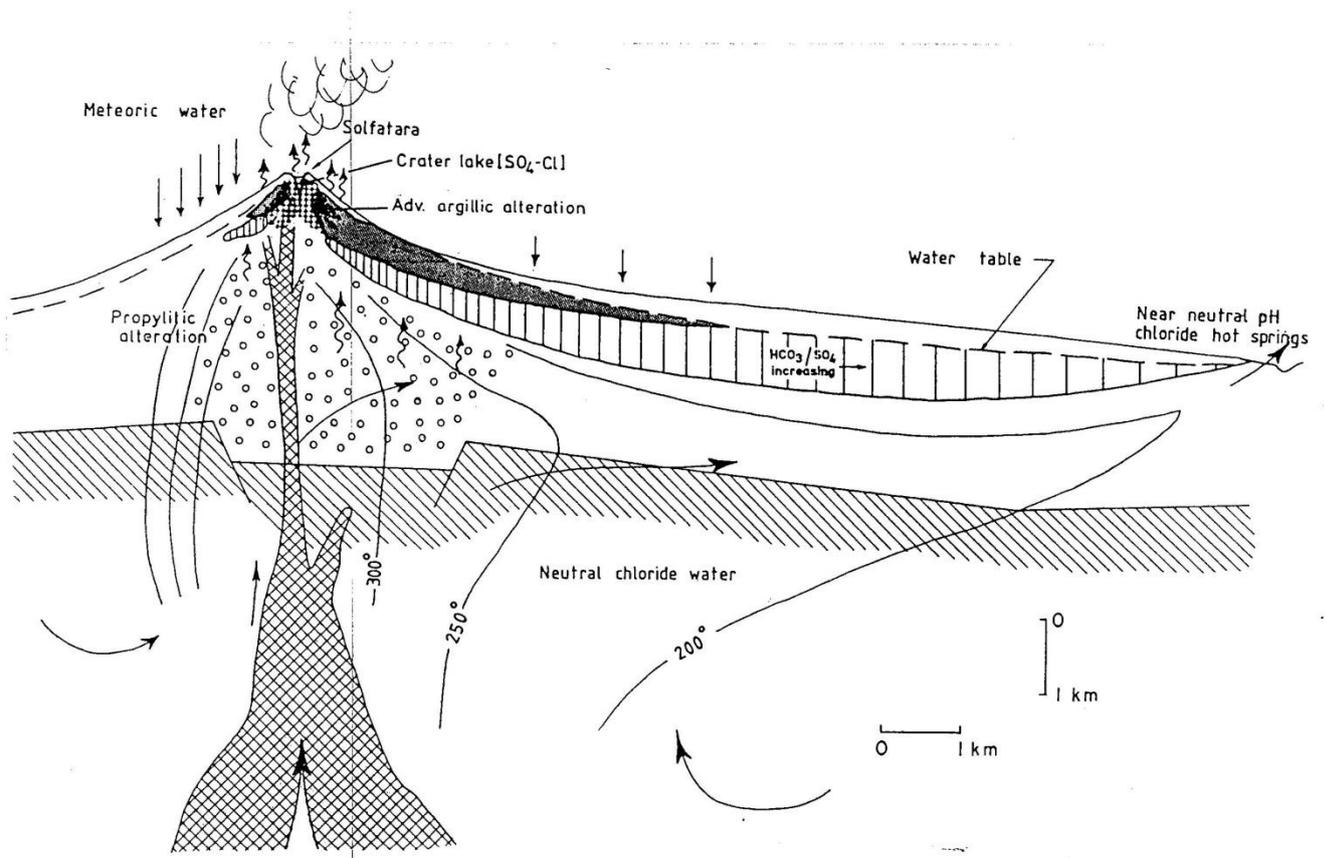
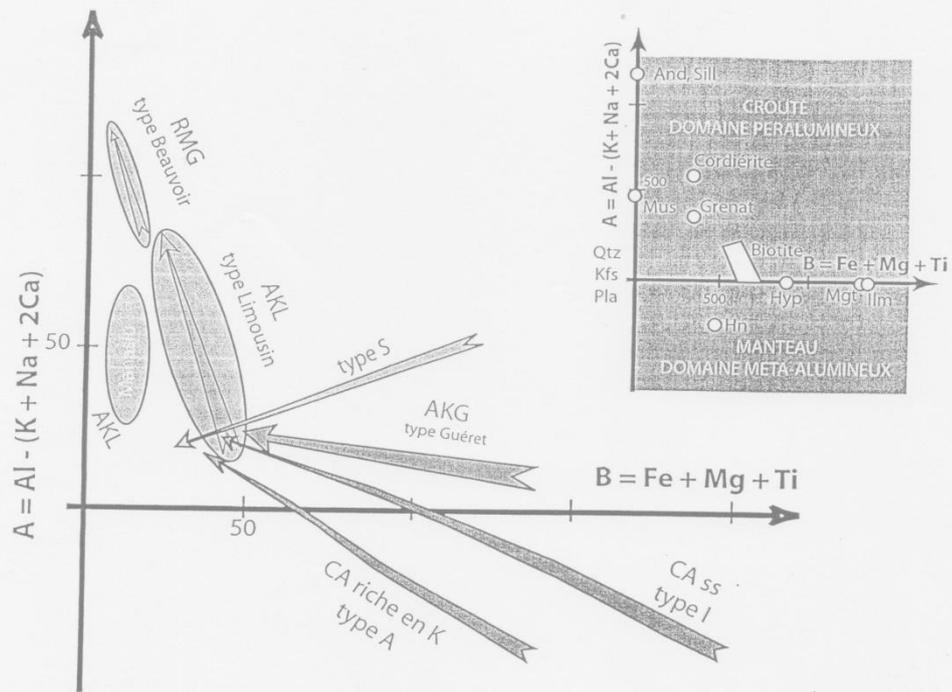
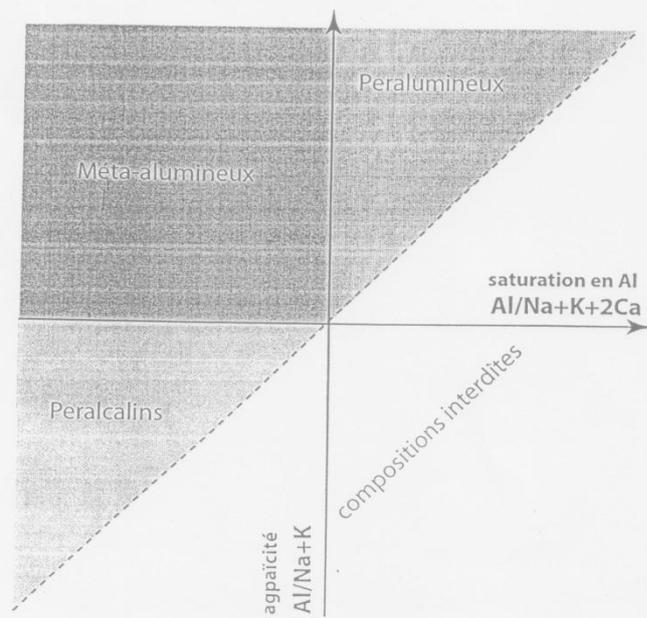


Figure 39.
 Modèle de relation entre la genèse des gisements épithermaux de type HS et le volcanisme explosif des strato-volcans.



Typologie des lignées granitiques dans le diagramme A-B de Debon & Le Fort

AK Almino-potassique
 CA Calco-alcalin



Typologie des magmas felsiques

Typologie des pegmatites à métaux rares

The Three Petrogenetic Families of the Rare Element Class of Granitic Pegmatites¹

Family	Pegmatite types	Geochemical signature	Associated granites	Granite bulk composition ²	Source lithologies
LCT	Beryl complex albite-spodumene albite elbaite	Li, Rb, Cs, Be, Sn, Ca, Ta > Nb (B, P, F)	(Synorogenic to) Late orogenic (to anorogenic); largely heterogeneous	Peraluminous S, I or mixed S+I types	Undepleted upper- to middle-crust supracrustals and basement gneisses
NYF	Rare earth	Nb > Ta, Ti Y, Sc, REE Zr, U, Th, F	(Syn-, late, post to) mainly anorogenic, in part orogenic; largely homogeneous	(Peraluminous to) subaluminous and metaluminous (rarely peralkaline); A and (I) types	Depleted middle to lower crustal granulates, or juvenile granitoids, mantle metasomatized crust
Mixed	Cross-bred LCT and NYF	Mixed	(Postorogenic to) anorogenic; moderately heterogeneous	Subaluminous to slightly peraluminous	Mixed protoliths or assimilation or supracrustals by NYF granites

¹ Modified from Černý and Ercit (2005)

² Definitions: Peraluminous = A/CNK > 1; subaluminous = A/CNK - 1; metaluminous = A/CNK < 1 at A/NK > 1; subalkaline = A/NK - 1; peralkaline = A/NK < 1, where A = Al₂O₃, CNK = CaO + Na₂O + K₂O, and NK = Na₂O + K₂O (all in molecular values)

Les trois classes de pegmatites à métaux rares selon Cerny

On remarque la grande similitude avec la classification es RMG

TYPE	Sous-type signature géochimique	Minéraux typiques	Potentiel économique
BÉRYL	<i>Béryl-colombite</i> Be, Nb <> Ta	Béryl, colombite-tantalite	Be (Nb-Ta)
	<i>Béryl-colombite-phosphate</i> Be, Nb <> Ta, P	Béryl, colombite-tantalite, triplite, triphylite	
COMPLEXE	<i>Spodumène</i> Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb	Spodumène, béryl, tantalite, (amblygonite, lépidolite, pollucite)	Li, Rb, Cs, Be
	<i>Pétalite</i> Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb	Pétalite, béryl, tantalite, (amblygonite, lépidolite, pollucite)	Ta (Sn, Ga, Hf)
	<i>Lépidolite</i> F, Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb	Lépidolite, topaze, béryl, microlite, (pollucite)	Li, Rb, Cs, Ta, Be (Sn, Ga)
	<i>Amblygonite</i> P, F, Li, Rb, Cs, Be, Ta > Nb	Amblygonite, béryl, tantalite, (lépidolite, pollucite)	Li, Rb, Cs, Ta, Be (Sn, Ga)
ALBITE-SPODUMÈNE	Li	Spodumène, (cassitérite, béryl, tantalite)	Li, Sn (Be, Ta)
ALBITE	Ta <> Nb, Be	Tantalite, béryl, (cassitérite)	Ta, (Sn)

Modifié à partir de Černý 1991a&c
() en faible quantité

Subdivisions de la classe LCT des pegmatites à métaux rares

	manteau primitif	basalte	andésite	rhyolite	tendance
Li	0.8	10	12	50	} ↗
Sn	0.6	0.9	1.5	3.6	
Th	0.06	0.2	1.9	26	
Ta	0.04	0.13	--	2.3	
U	0.018	0.1-0.6	0.8	5	
W	0.016	1.2	1.1	2.4	
Mo	0.06	0.9-2.7	0.8-1.2	1	↘
Zr	8.3	87	205	136	↘
Zn	50	94	87	38	} ↘
Cu	28	65	60	6	
Ni	2 000	134	18	6	} ↘
Cr	1 800	307	55	4	
Co	175	48	24	4.4	

Grandes lignes des fractionnements magmatiques

Caractéristiques	Contexte	Minéralisation		
Al/Na+K < 1				
RMG peralcalins				
Très pauvres en P,Ta/Nb faibles Très riches en Zr, REE, Y, Nb, F Riches en Th, Sn, Be, Rb, U	"Anorogéniques"	Zr	zircon baddeleyite elpidite eudyalite wadéite	Zr(SiO ₄) ZrO ₂ Na ₂ Zr(Si ₆ O ₁₅).3H ₂ O Na ₄ (Ca,Ce) ₂ (Fe,Mn,Y)Zr(Si ₈ O ₂₂)(OH) K ₂ Zr(Si ₃ O ₉)
Amphiboles et pyroxènes riches en Fe riebeckite Na ₂ Fe ²⁺ ₃ Fe ³⁺ ₂ (Si ₈ O ₂₂)(OH) ₂ arfvedsonite NaNa ₂ Fe ²⁺ ₄ Fe ³⁺ ₄ (Si ₈ O ₂₂)(OH) ₂ aegyrine NaFe ³⁺ (Si ₂ O ₆)		Nb	pyrochlore	(Na,Ca) ₂ Nb ₂ O ₆ (OH,F)
		REE	F-carbonates	
Très peu de Li-micas (faible enrichissement en Li)		U,Th	uranothorite steenstrupine	(U,Th)(SiO ₄) Na ₁₄ Ce ₆ Mn ²⁺ Mn ³⁺ Fe ²⁺ ₂ (Zr(Si ₆ O ₁₈) ₂ (PO ₄) ₇ .3H ₂ O
1 < Al/Na+K < 1.15				
RMG peralumineux LP (pauvres en P)				
Teneurs moyennes en REE, Y, Zr, Hf Spectre REE plat à forte anomalie <0 Eu	Association aux roches méta-alumineuses calco-alkalines riches en K	Nb-Ta-Sn	columbo-tantalite cassitérite	(Fe,Mn)(Nb,Ta) ₂ O ₆ SnO ₂
Micas Li-F-Fe (zinnwaldite) KLiFe ₂ +Al(aSi ₃ O ₁₀)(F,OH) ₂	Post-orogéniques à "anorogéniques"			
Al/Na+K > 1.15				
RMG peralumineux HP (riches en P)				
Très pauvres en REE (< chondrites), Th, Y, Zr, Hf Ta/Nb > 1	Association aux granites S et aux plutons paeralumineux à Ms-Bt (AKL)	Ta-Sn-Li-(W)	microlite columbo-tantalite cassitérite lépidolite	(Na,Ca) ₂ Ta ₂ O ₆ (O,OH,F) (Mn,Fe)(Ta,Nb) ₂ O ₆ SnO ₂ K(Li,Al) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (F,OH) ₂
Li-micas (Li-Ms, lépidolite) très riches en Rb, Cs P dans apatite amblygonite (Li,Na)Al(PO ₄)(F,OH) montebrasite LiAl(PO ₄)(OH,F) feldspaths (jusqu'à 1%)	Post-orogéniques des collisions continentales			

Différents types de granites à métaux rares

Les magmas minéralisateurs et leurs sources

