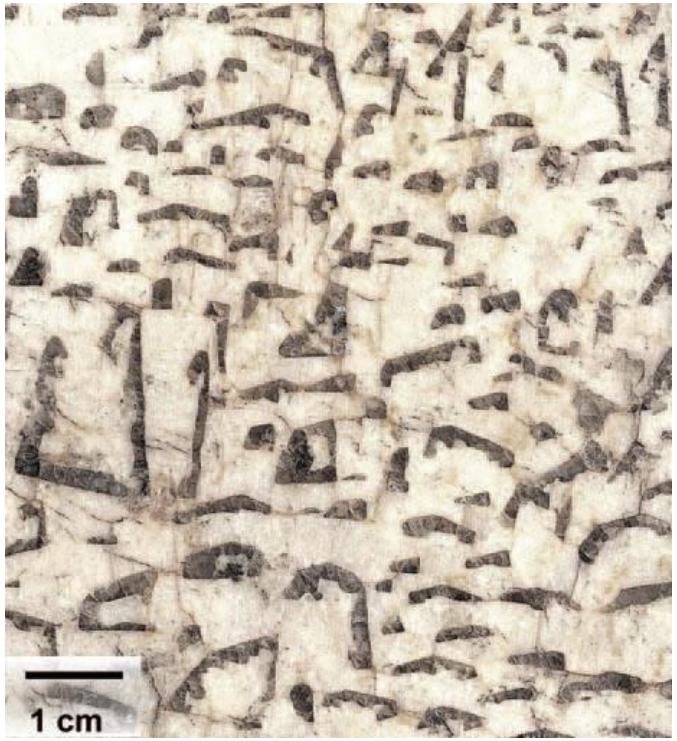
Les granites et roches felsiques à métaux rares

Processus métallogéniques (UE 902) magmatiques - Master SMGE

2025-2026



Christophe Ballouard
christophe.ballouard@univ-lorraine.fr - A634

Les gisements de métaux d'origine « magmatique »

Minéralisation syn-génétique encaissée dans une roche ignée; l'enrichissement en métal est majoritairement contrôlé par des processus magmatiques comme la fusion partielle, la cristallisation fractionnée ou l'immiscibilité liquide-liquide.

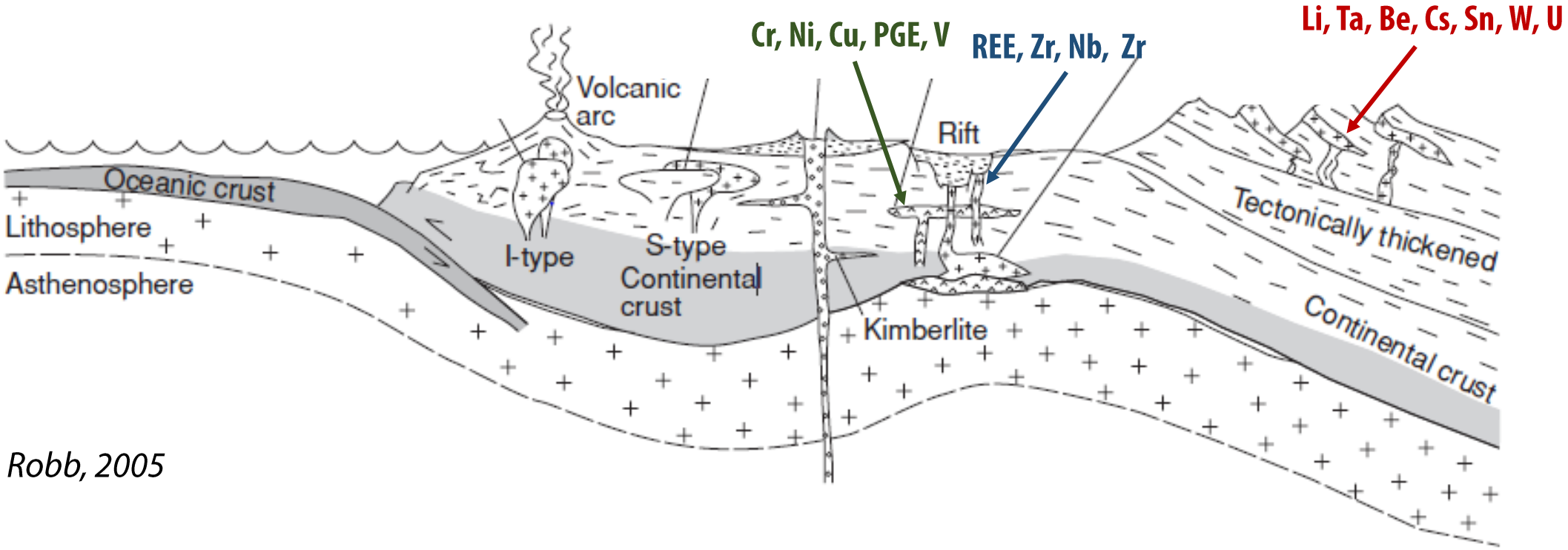
Surimpression hydrothermale ou altération de surface « limitée »

Les gisements de métaux d'origine « magmatique »

Minéralisation syn-génétique encaissée dans une roche ignée; l'enrichissement en métal est majoritairement contrôlé par des processus magmatiques comme la fusion partielle, la cristallisation fractionnée ou l'immiscibilité liquide-liquide. Surimpression hydrothermale ou altération de surface « limitée »

- *Magmatisme mafique à ultramafique:* Cr, Ni, Cu, PGE, V
- **Magmatisme felsique peralumineux: Li, Ta, Be, Sn, Cs (Nb, W, U)**
- **Magmatisme carbonatitique et felsique (per)alcalin : REE, Zr, Nb, (Ta, Hf, U)**

} **Magmatisme à métaux rares**



Robb, 2005

Plan du sous-module

UE Ecole de terrain

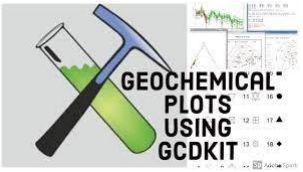
UE Anglais et internationalisation

CM (6h) - *15-16-17 septembre (14-16h)* **:**

- Introduction: les métaux rares
- Les lignées ou suites magmatiques felsiques à potentiel à métaux rares
- Granites et syénites à métaux rares: caractéristiques et processus minéralisateurs
- Les pegmatites

TD (6h): ne pas oublier son ordinateur - *12-13-14 novembre* (14-16h)
Projet en groupe : évaluation du potentiel et des processus minéralisateurs en métaux rare d'un complexe ou d'une province magmatique

- Descriptions pétrographique macroscopique et microscopiques
Traitement et interprétation de données géochimiques « roche-totale » (GCDKIT)

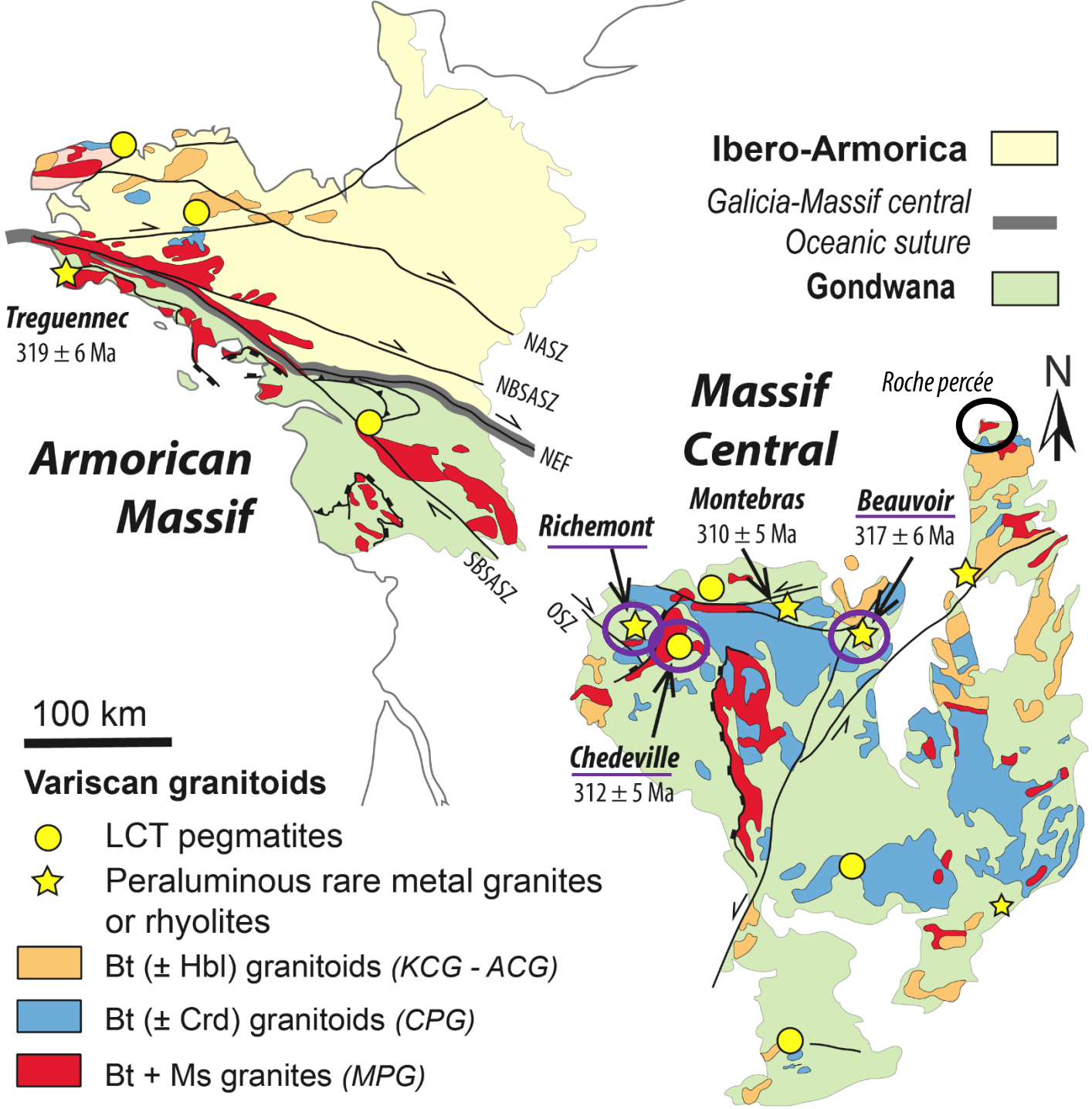


- Evaluation: Oral (2h supplémentaires)? ou rapport?

Conference Yoram Teitler

"Finding what's next: new paths to Australia's orebodies"

Salle de conférence **A111** de la FST à l'entrée 3B **le mercredi 17 septembre à 13h00**.



Ecole de Terrain du 21 au 26 septembre

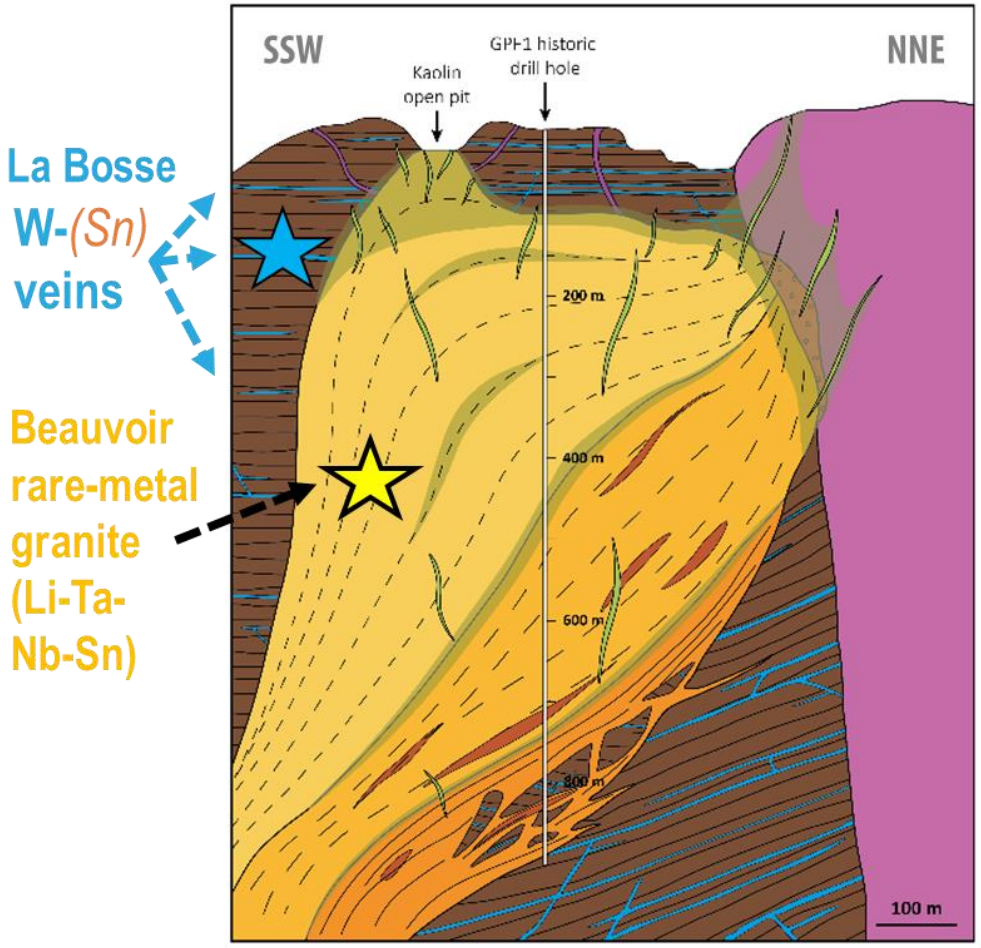
Occurrences magmatiques minéralisées en Li-(Nb-Ta-Sn-Be)

- Granite de Beauvoir - *22/09*
- Pegmatites des Monts d'Ambazac (Chédeville) – *23/09*
- Complexe magmatique de Blond-Richemont – *24-25/09*

Discordance (Ba-F)

- Roche percée – 26/09

The Echassières complex (Sioule region)

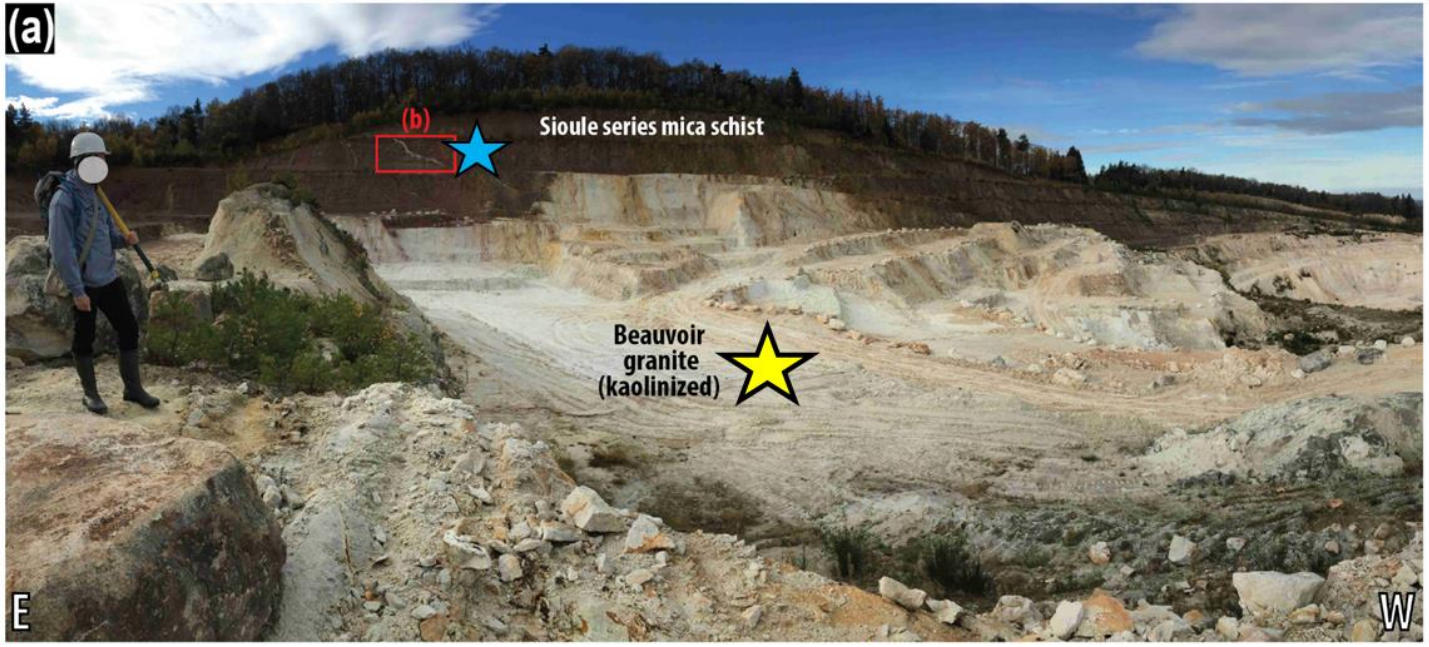


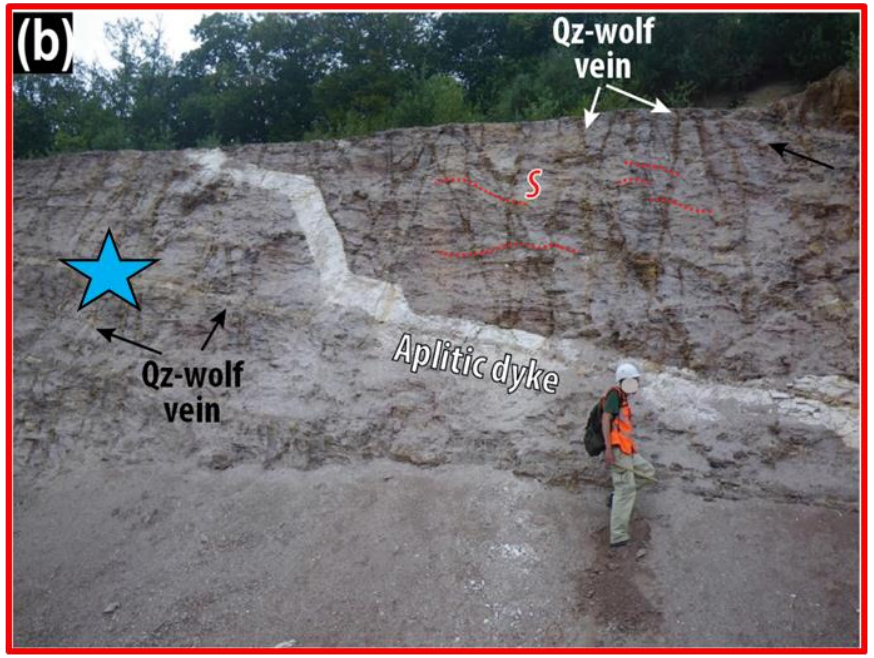
(Rocher et al. 2024)

Beauvoir granite
- B1 facies
- B2 facies
- B3 facies

- Colettes granite
- Micaschist
- Metasomatic contact
- Greisen alteration

- La Bosse stockwork
- Aplitic dyke
- Beauvoir porphyry enclave
- Greisen vein

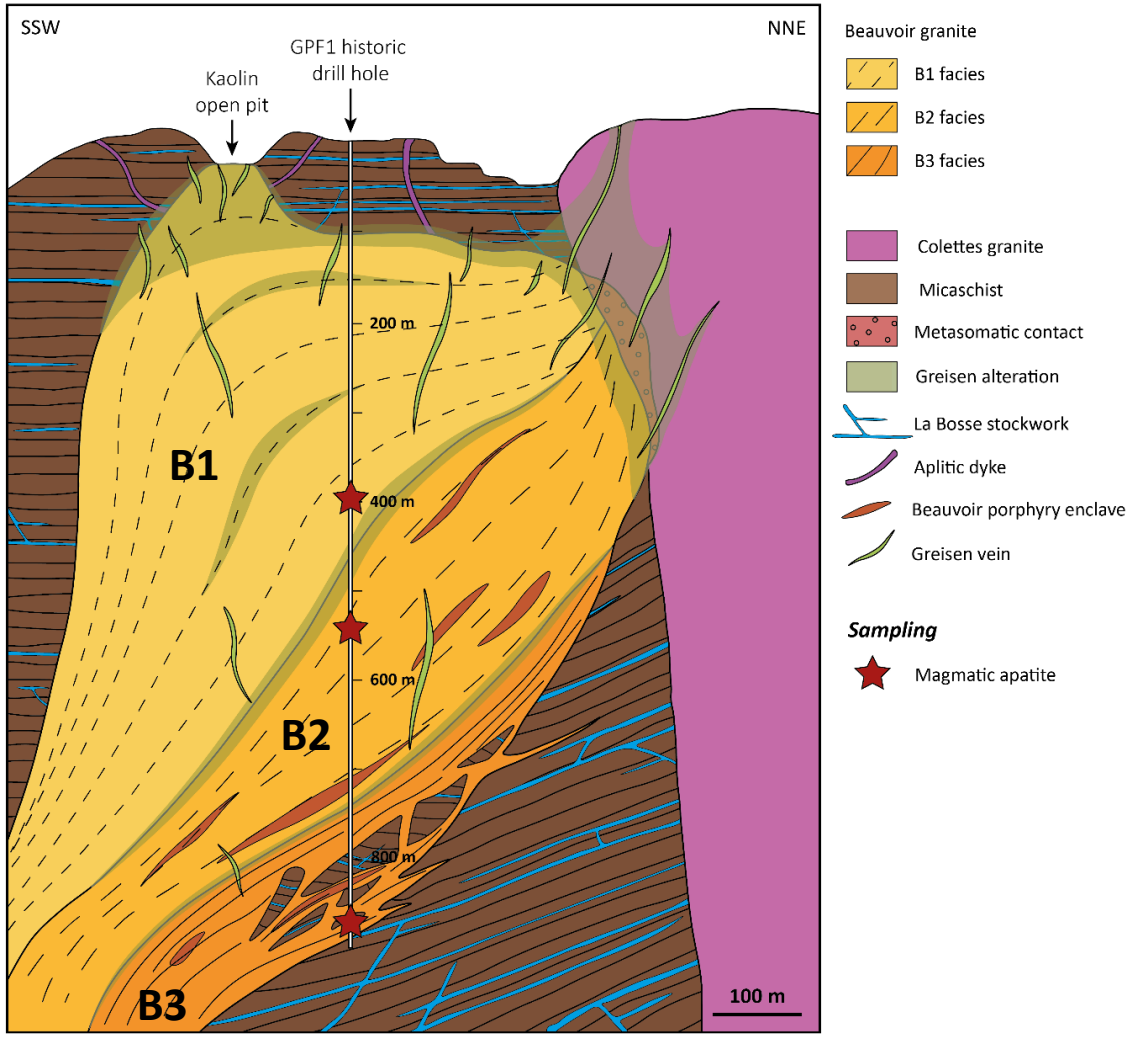




Wolframite (W) ± cassiterite (Sn)

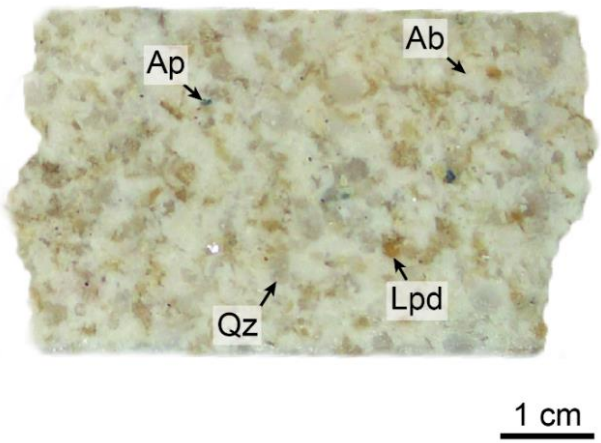
La Bosse stockwork (W±Sn)

Granite de Beauvoir



Rocher et al. 2024
(d'après Cuney et al. 1992)

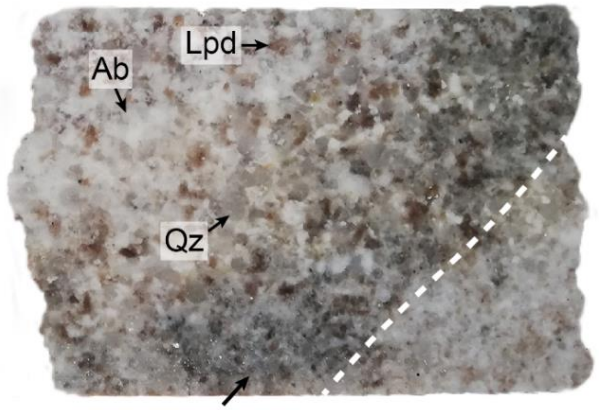
a) B1 unit (-391 m)



Core logging et observations de terrain

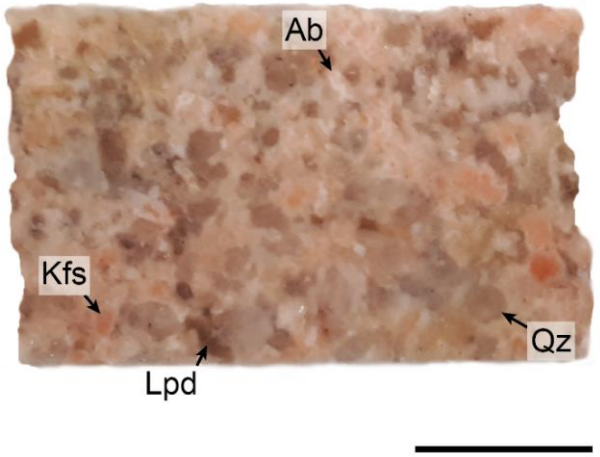
IMERYS

b) B2 unit (-546 m)



Magmatic foliation enriched in magmatic blue apatite

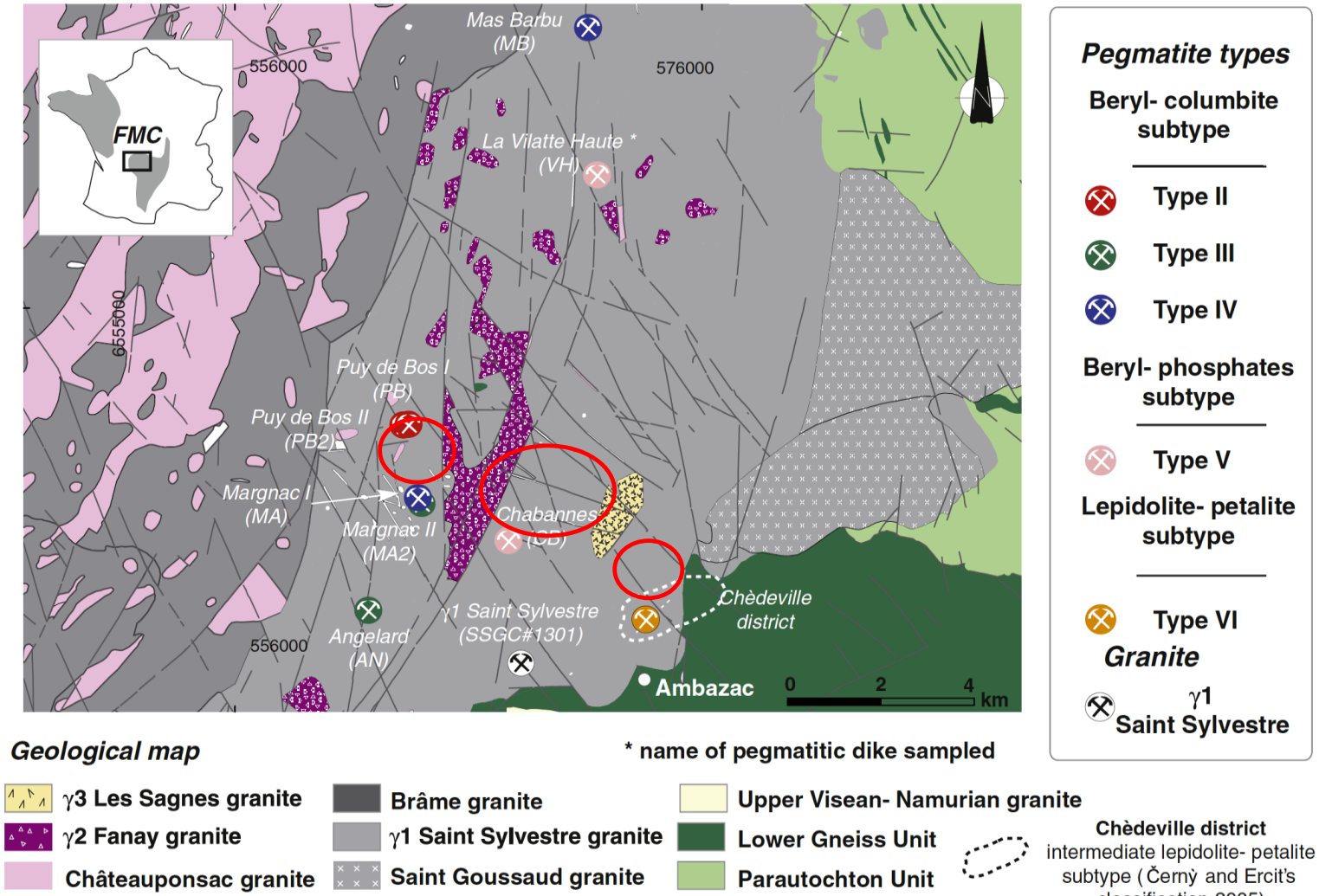
c) B3 unit (-824 m)



Rocher et al. 2024

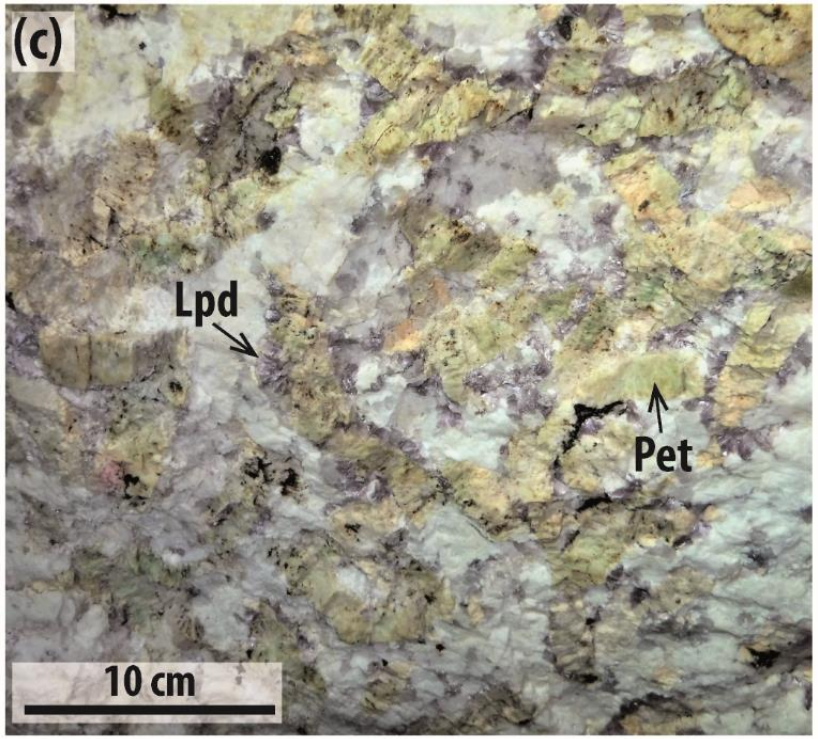
Pegmatites des Mont d'Ambazac

Comprendre et apprendre à prédire les zonations internes de pegmatites minéralisées



Deveaud et al. 2015

Chabanne
Type V

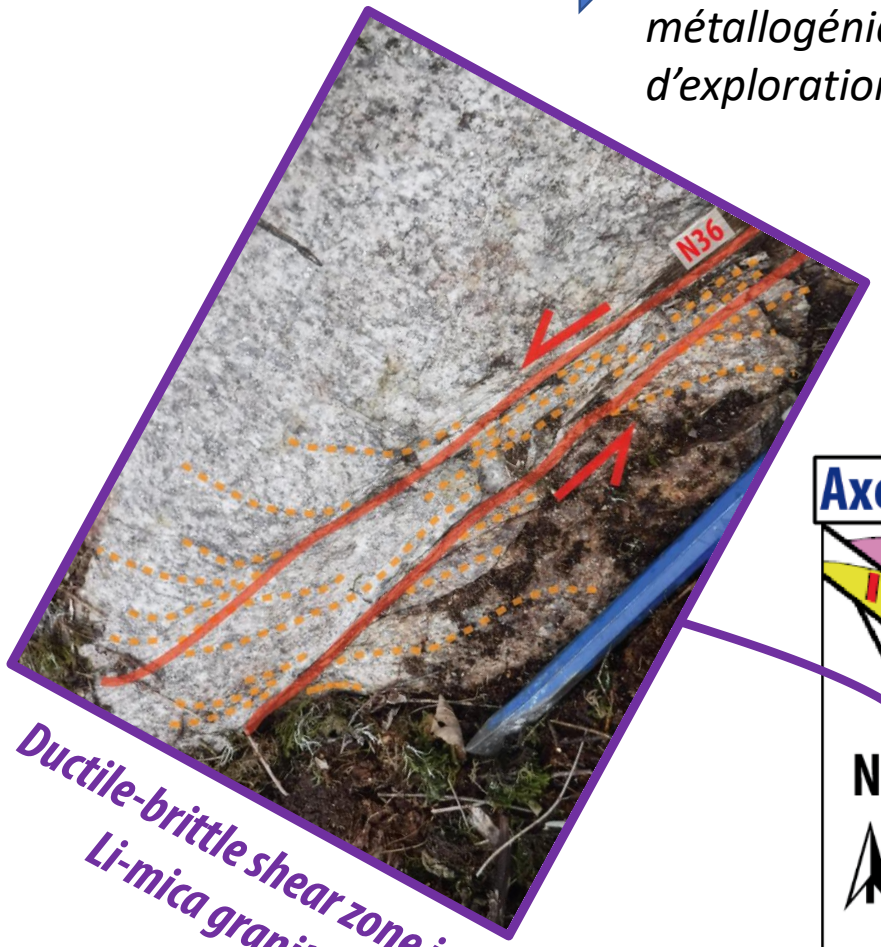


Chedeville
Type VI

Complexe magmatique de Blond-Richemont

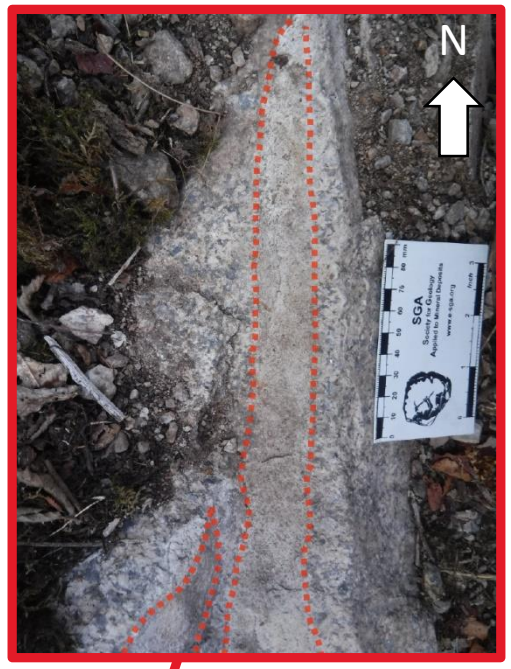
Observations de terrain, géologie structurale et cartographie en autonomie

Aboutir à un modèle métallogénique et d'exploration

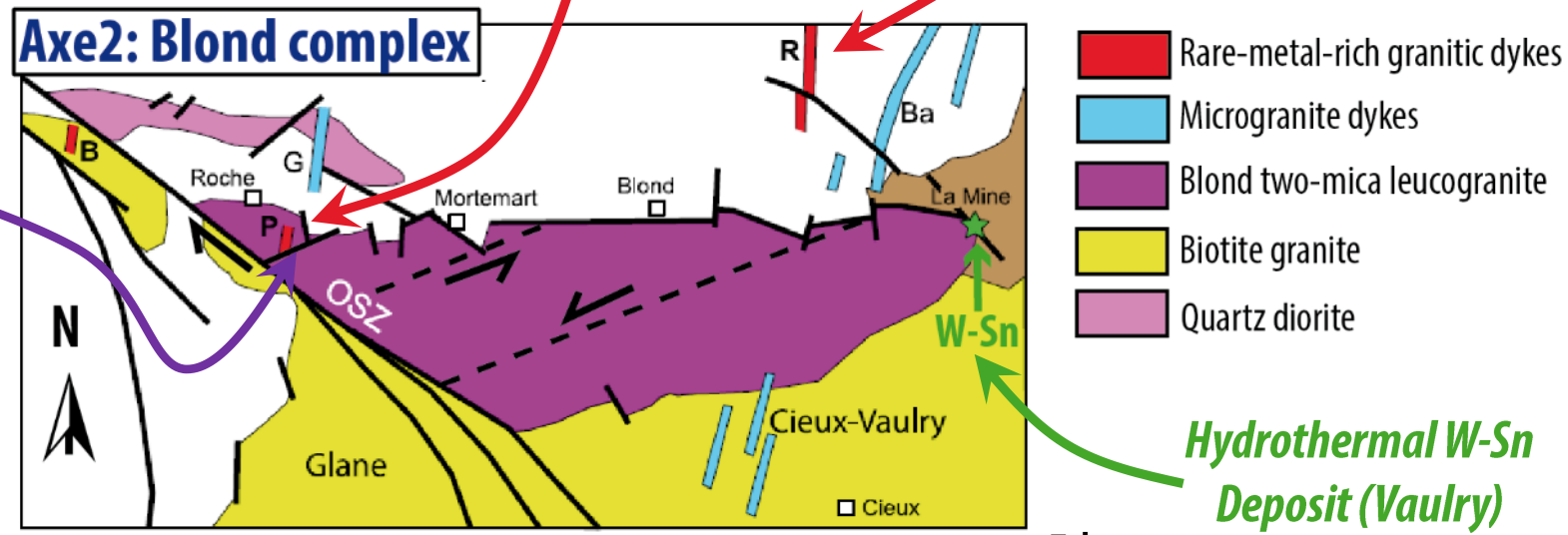


Ductile-brittle shear zone in Li-mica granite

Syntectonic cassiterite-bearing aplite (tension gash?)



Collection thèse Ebougué 1995



Cuney et Marignac 2015, Soufi 1988

Hydrothermal W-Sn Deposit (Vaulry)

Deux stages M2 sur la thématique proposés

1) Caractérisation cristallochimique et géochronologique des circulations fluides associées à l'anomalie géochimique (W, Sn, Li, F) du sud du granite à métaux rares de Beauvoir

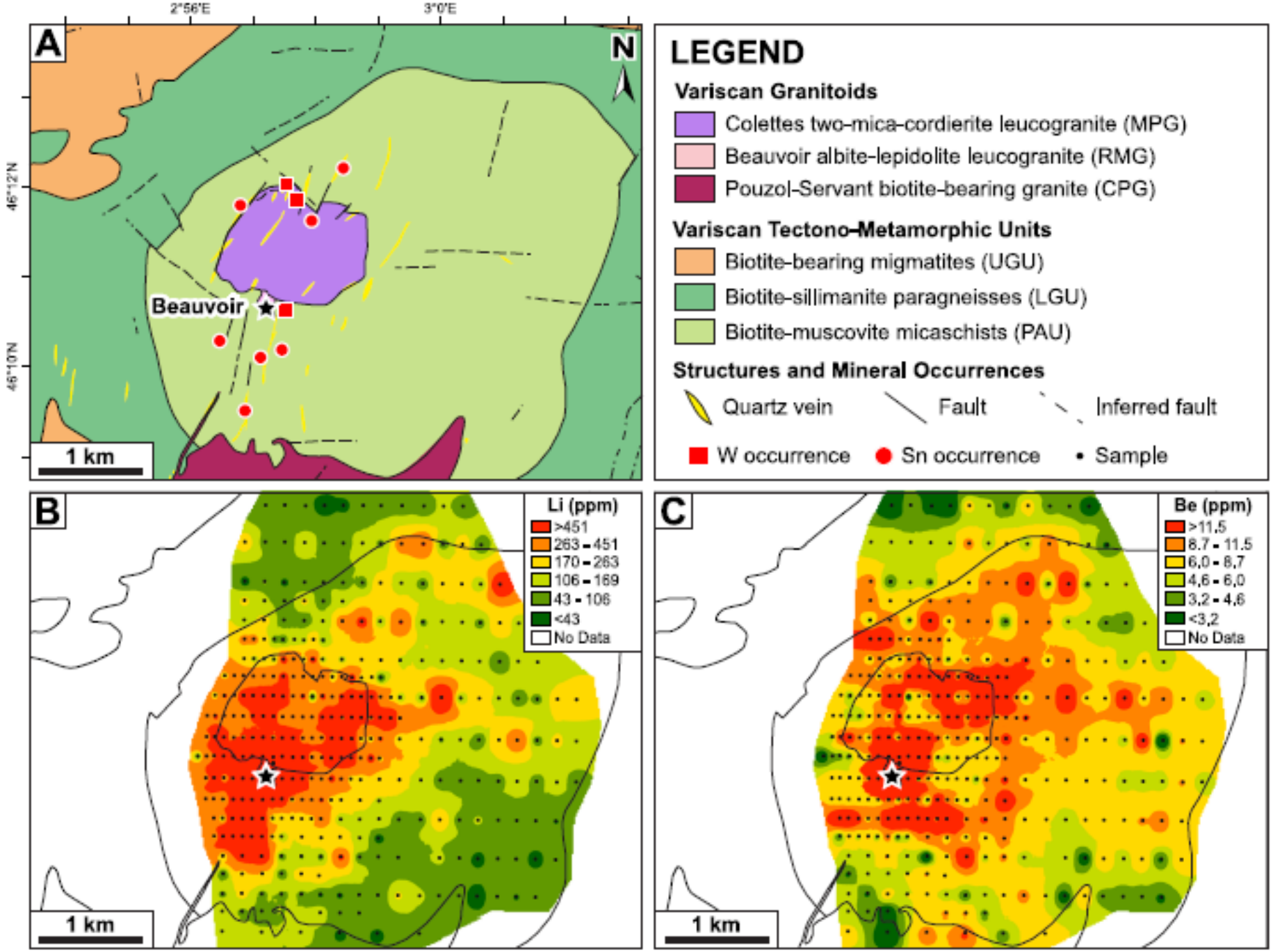
Encadrement: C. Ballouard, M. Cuney en partenariat avec Imerys

2) Evolution magmatique-hydrothermale des pegmatites à lithium du Projet Rose (Bay James, Québec)

Encadrement: A.S. André-Mayer, Y. Foucault, C. Ballouard

Méthodologie:

Observations texturales (microscopie, MEB), cristallochimie (µXRF, EPMA, LA-ICP-MS), géochronologie U-Pb (LA-ICP-MS)



Harlaux et al. 2025

Plan du cours

Introduction: Les métaux (ou éléments) rares

Les lignées ou suites magmatiques felsiques à potentiel à métaux rares

Granites et syénites à métaux rares: caractéristiques et processus minéralisateurs

Les pegmatites

Introduction: Les métaux (ou éléments) rares

Les métaux (ou éléments) rares

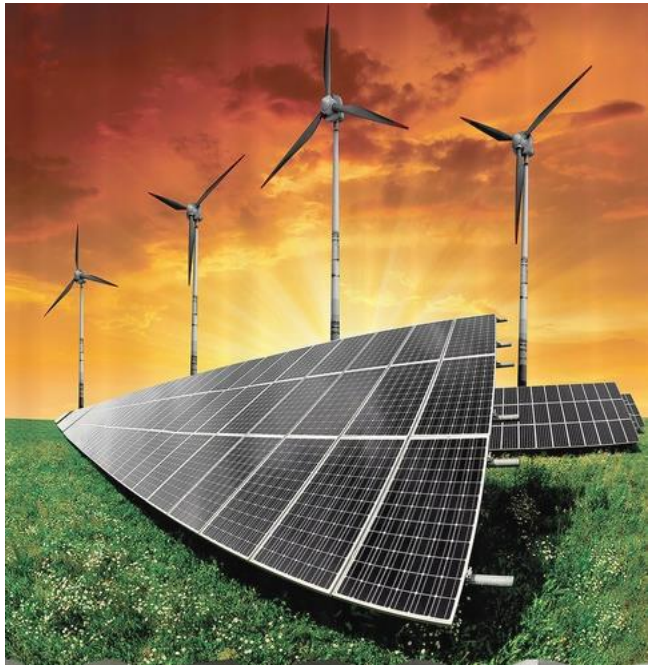
Incluent les éléments de terres rares (REE), tantale (Ta), niobium (Nb), lithium (Li), béryllium (Be), Césium (Cs), étain (Sn), tungstène (W), uranium (U), thorium (Th) …

Exclut les métaux de bases (Pb, Zn, Cu, ..) ou précieux (Au, Ag, …)

Li : batteries, électronique, céramiques

Ta: électronique (condensateurs), aérospatiale

REE: panneaux solaires, éoliennes, électronique …



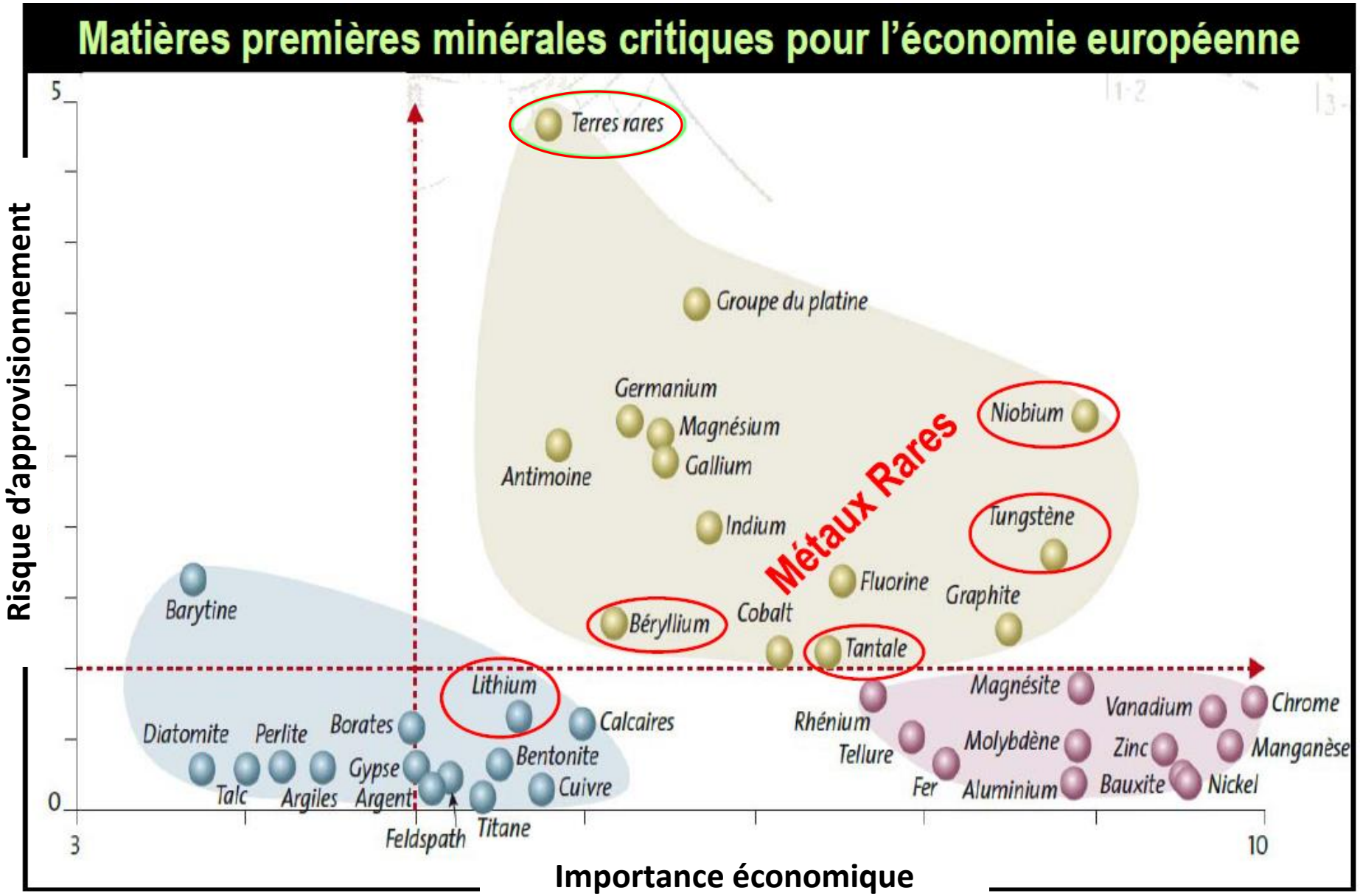
Les métaux (ou éléments) rares

Incluent les éléments de terres rares (REE), tantale (Ta), niobium (Nb), lithium (Li), béryllium (Be), Césium (Cs), étain (Sn), tungstène (W), uranium (U), thorium (Th) …

Exclut les métaux de bases (Pb, Zn, Cu, ..) ou précieux (Au, Ag, …)

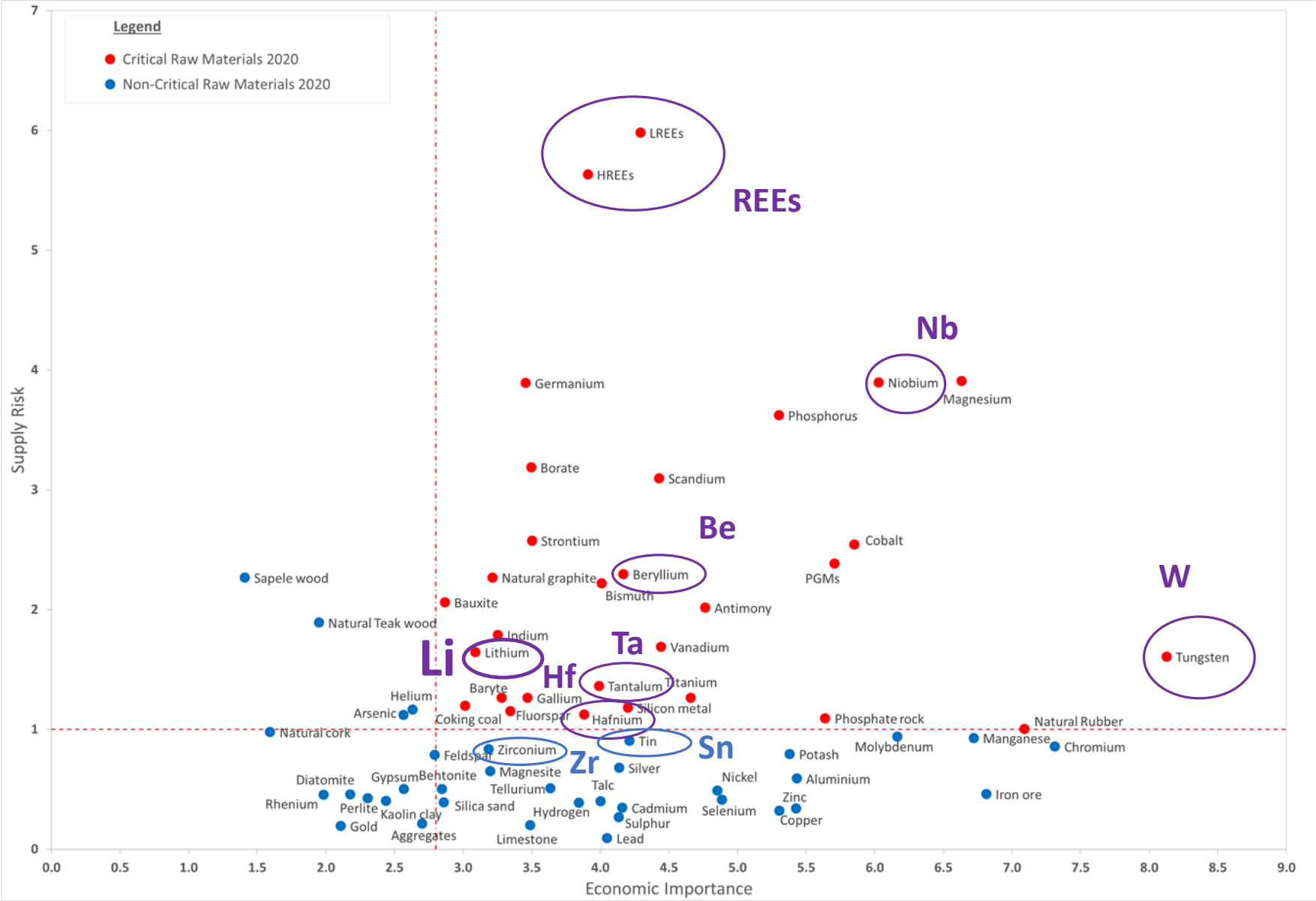
Les élements de terres rares (ETR ou REE) sont des métaux rares mais tous les métaux rares ne sont pas des éléments de terres rares

Les métaux (ou éléments) rares: notions de criticité



Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 2013

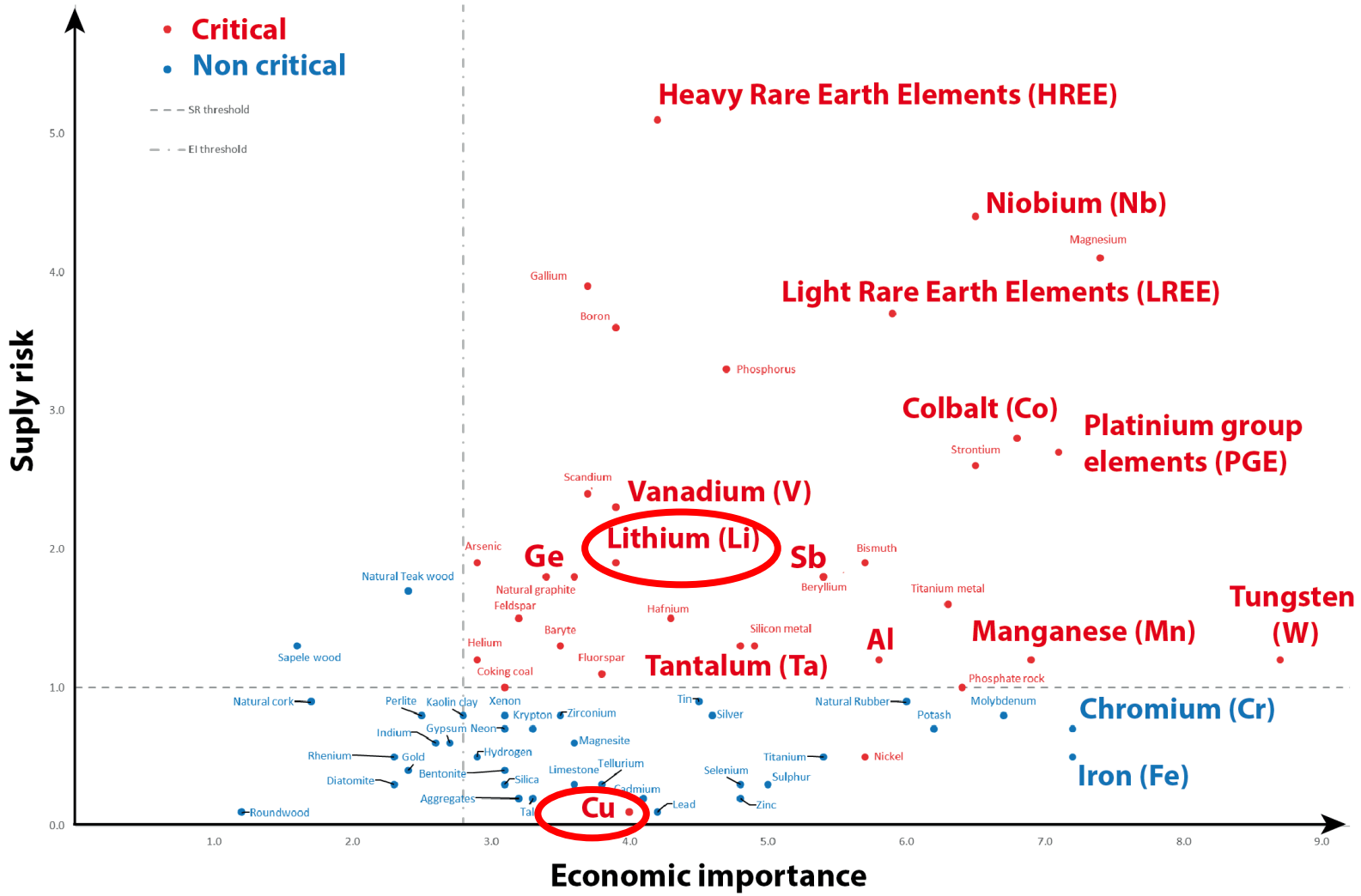
Les métaux (ou éléments) rares: notions de criticité



Le caractère critique d'un élément est un paramètre changeant qui peut évoluer d'une année à l'autre

Commission européenne [COM(2020) 474 final]

Les métaux (ou éléments) rares: notions de criticité



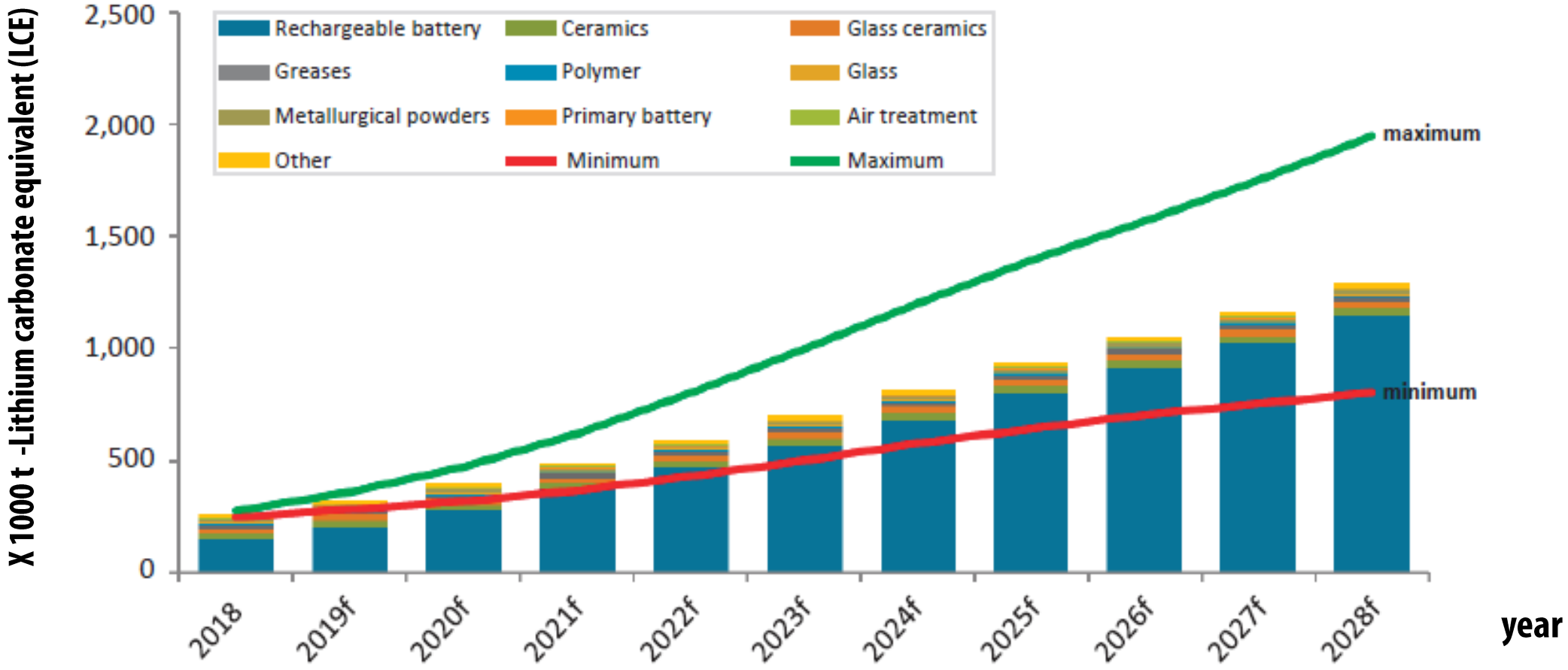
En 2020, Li devient une matière crique pour l'UE

En 2023, le Cu est considéré comme critique par l'UE malgré qu'il ne réponde pas aux critères de criticité

Commission européenne [2023]

Les métaux (ou éléments) rares: notions de criticité

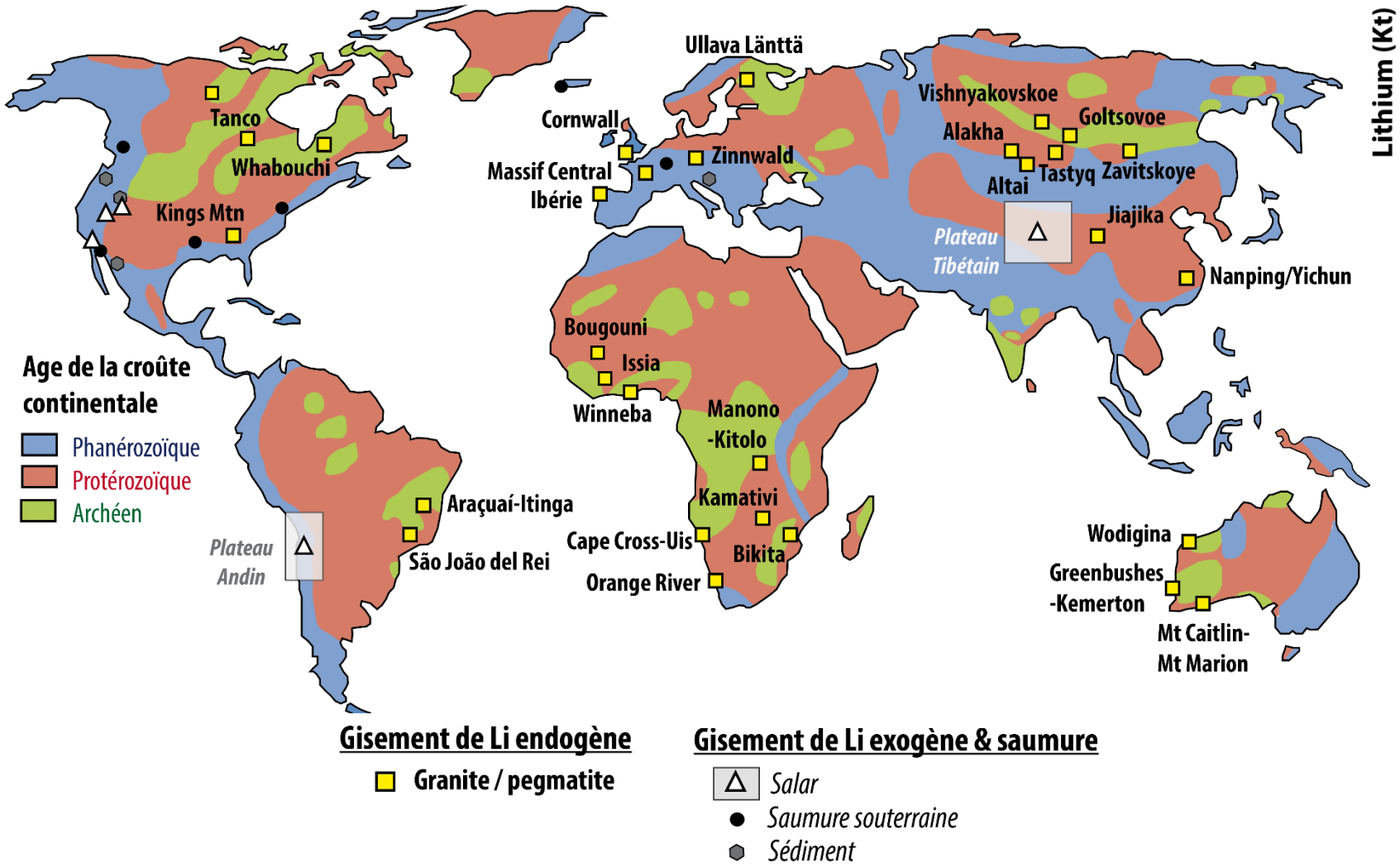
Graph of forecasts of world demand for lithium by first use *(Bibienne et al. 2020)*

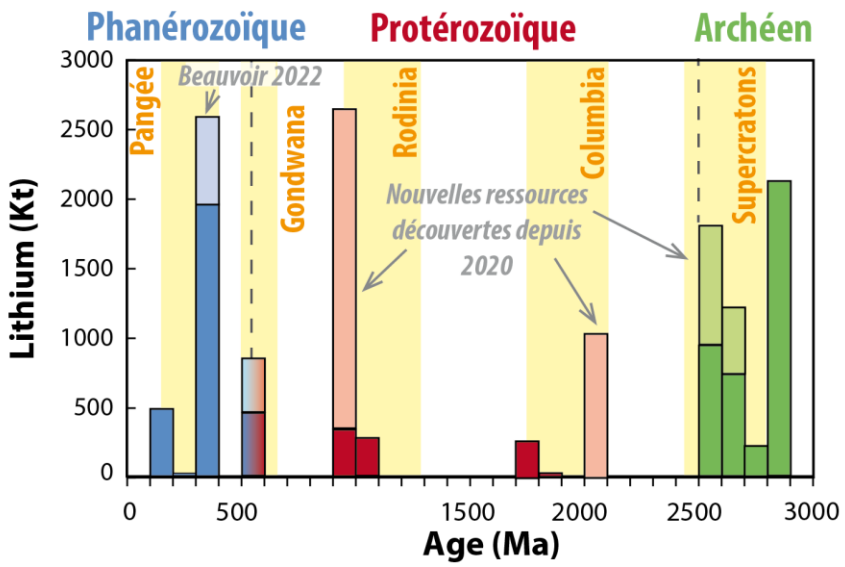


En 2020, la commission européenne a estimé que l'UE aura besoin de 18 fois plus de Li en 2030 et 60 fois plus en 2050 par rapport à son approvisionnement actuel si elle veut assurer ses objectifs climatiques [COM(2020) 474 final]

⇨ Nécessité de trouver des nouveaux gisements en Europe pour tenter d'assurer une souveraineté énergétique?

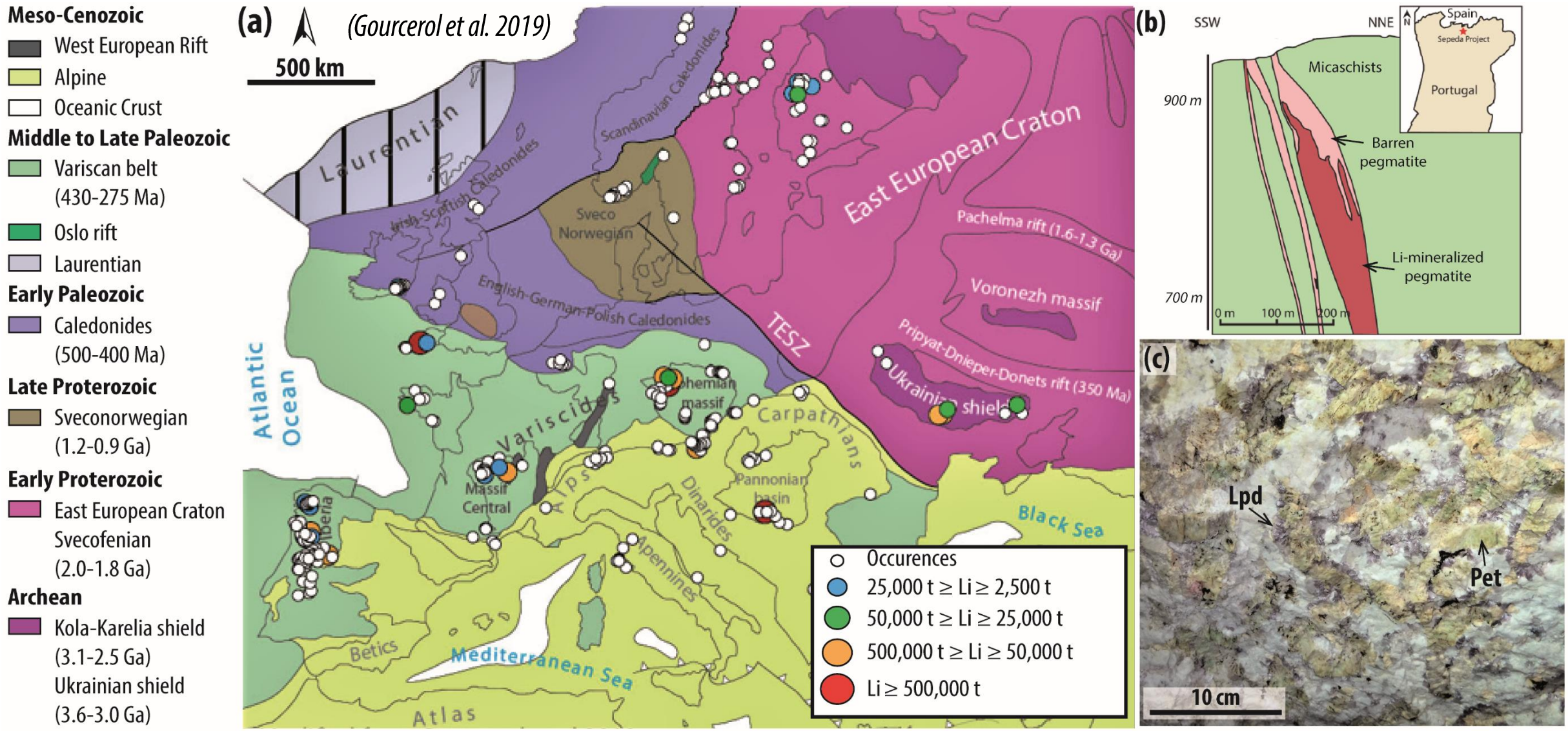
Répartition spatiale et temporelle des ressources en Li associées aux granites et pegmatites





Carte simplifiée de l'âge de la lithosphère continentale (après Saunders et al. 2018)

Les gisements de Li type « roche-dure » en Europe

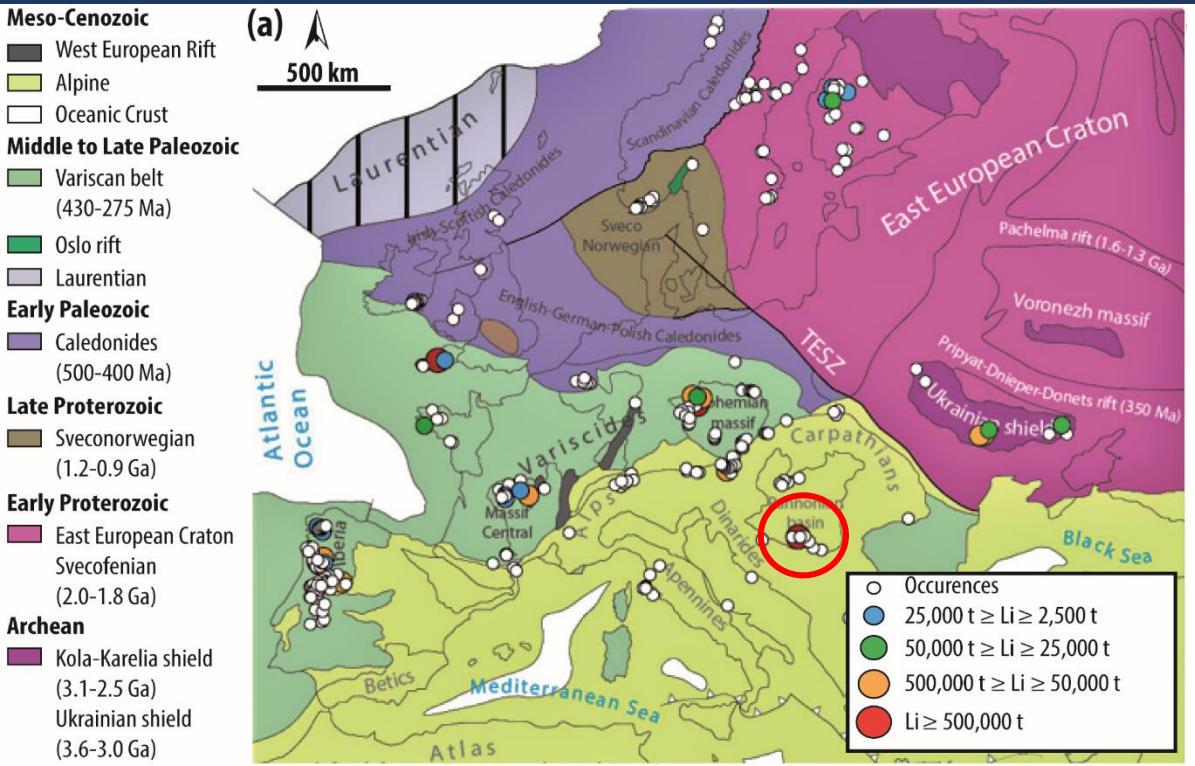


Principalement granites ou pegmatites à métaux rares et roches métasomatiques associées (greisen)

Problème: *gisements rares, de petites tailles (< 1 km³) difficiles à localiser par la géophysiques*

Pet: pétalite, $LiAlSi_4O_{10}$
Lpd: lépidolite $(K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$

Les gisements de Li type « roche-dure » en Europe

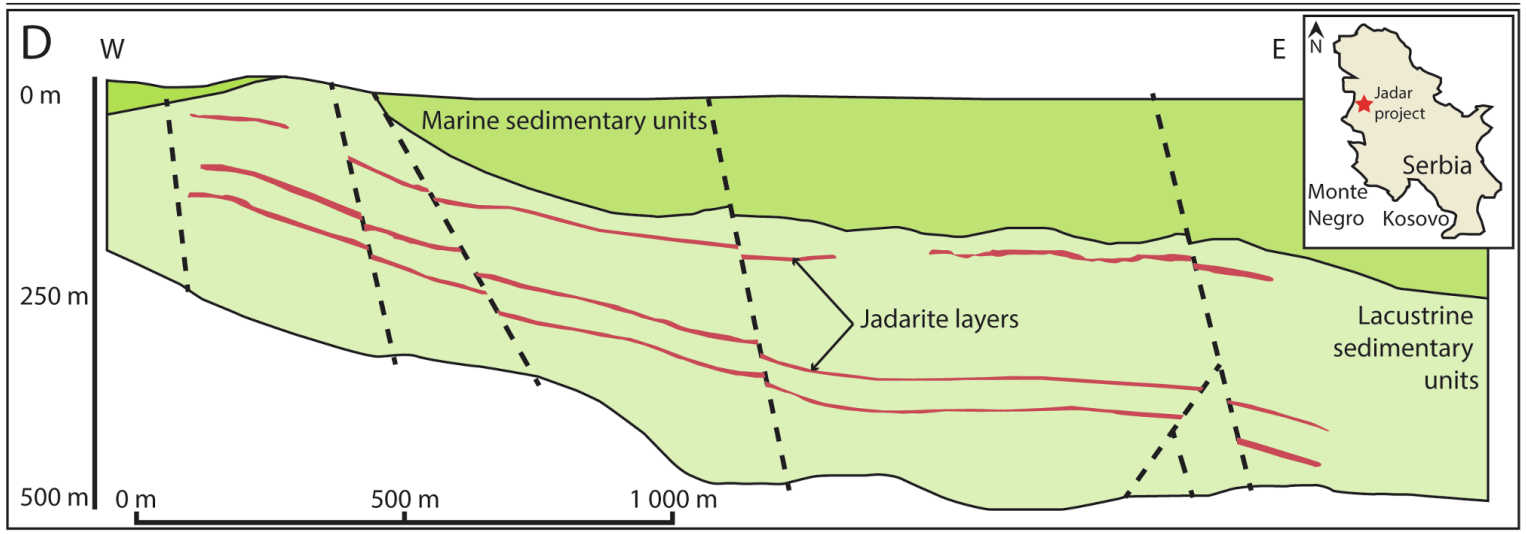


(Gourcerol et al. 2019)

Jadarite ($LiNaSiB_3O_7(OH)$)

Bassin de Jadar

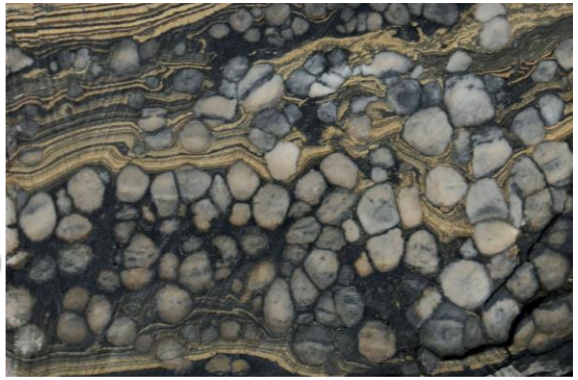
Une des rares occurrences « supergènes » de Li en Europe



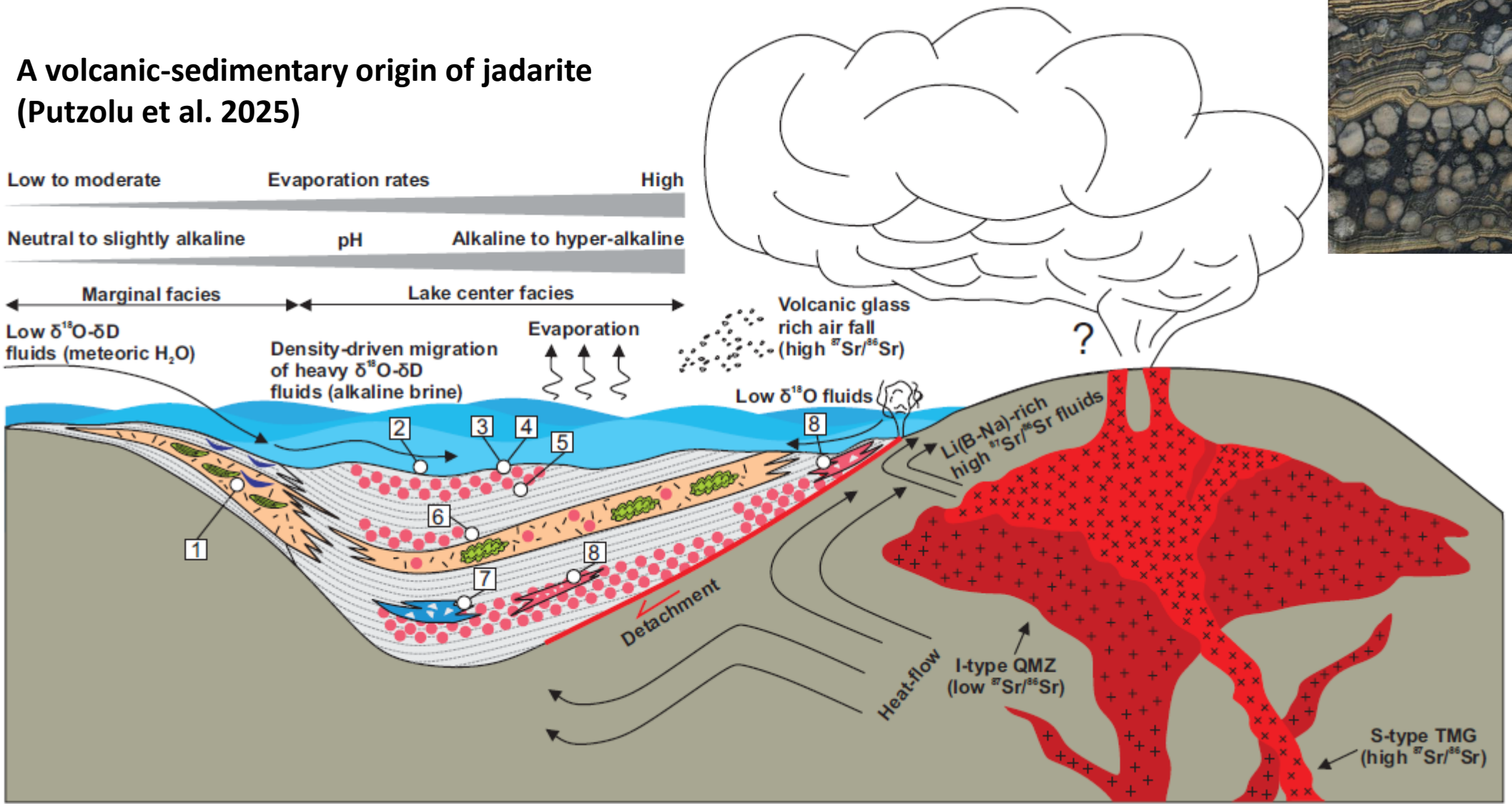
Les gisements de Li type « roche-dure » en Europe

Jadarite (**Li**$NaSiB_3O_7(OH)$)

Bassin de Jadar

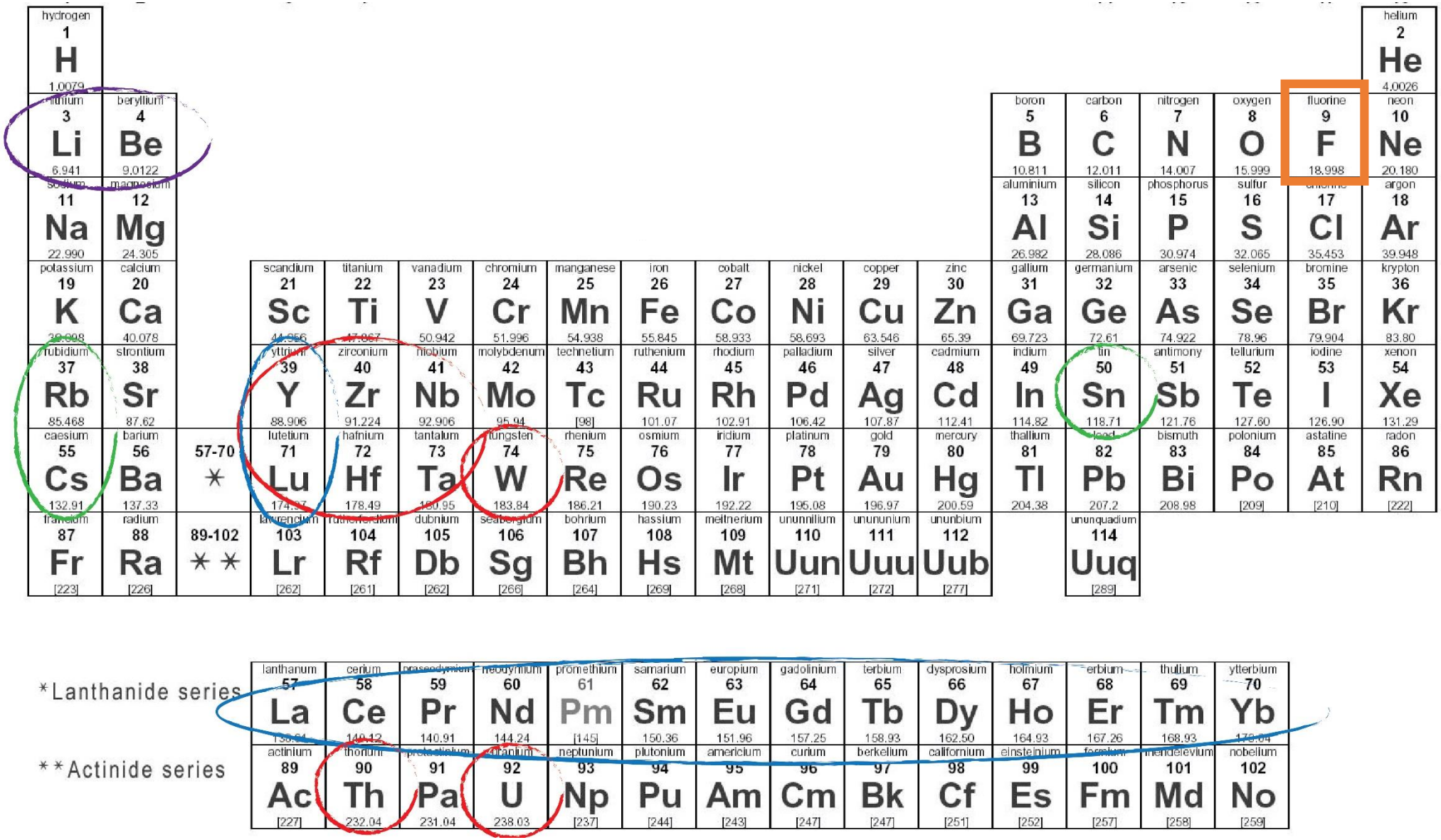


A volcanic-sedimentary origin of jadarite (Putzolu et al. 2025)



Involve the alteration of volcanic glass in evaporitic environement, high pH brines and specific diagenetic processes

Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie



Lithium (Li), Caesium (Cs), Tantalum (Ta), Niobium (Nb), Beryllium (Be), Tin (Sn), Tungsten (W), Rare earth elements (REE), Yttrium (Y), Rubidium (Rb), …

Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie

Halogène communément associé

High field strengh elements (HFSE)
Large ion lithophile elements (LILE)
Rare Earth Elements (REE)
Others incompatible elements

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminium 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078		scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62		yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29
caesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 *	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 * *	lawrencium 103 Lr [262]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]	ununnilium 110 Uun [271]	unununium 111 Uuu [272]	ununbium 112 Uub [277]		ununquadium 114 Uuq [289]				

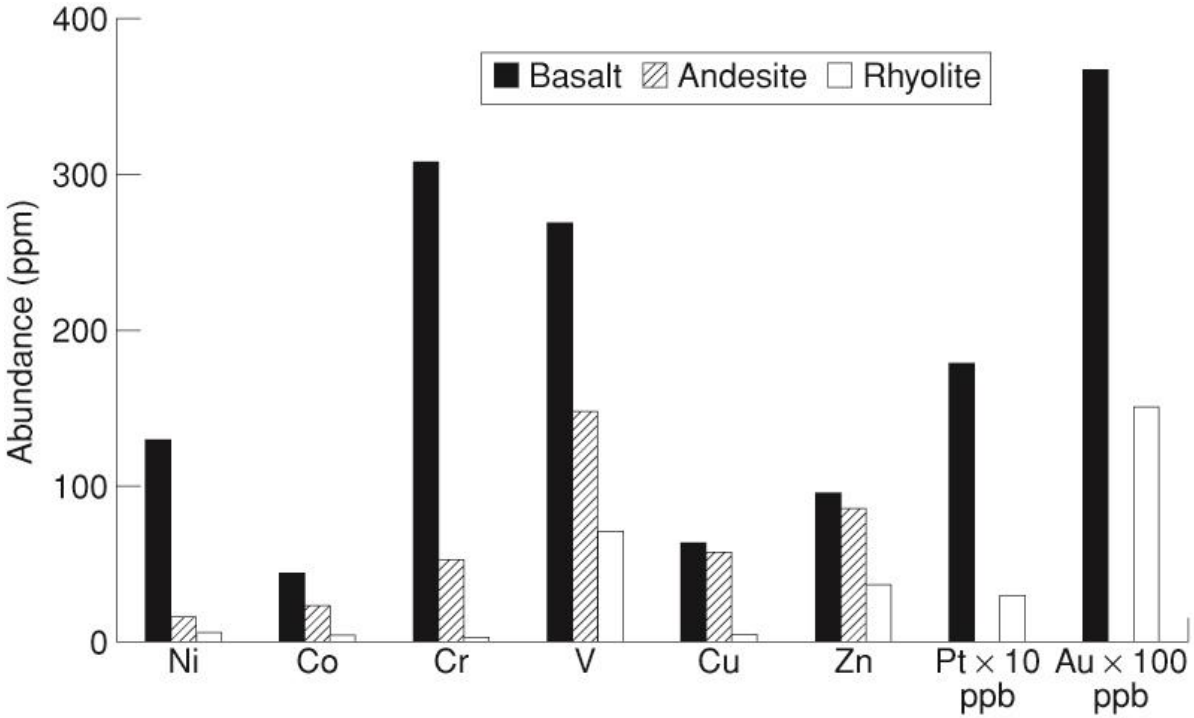
*Lanthanide series	lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
**Actinide series	actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]

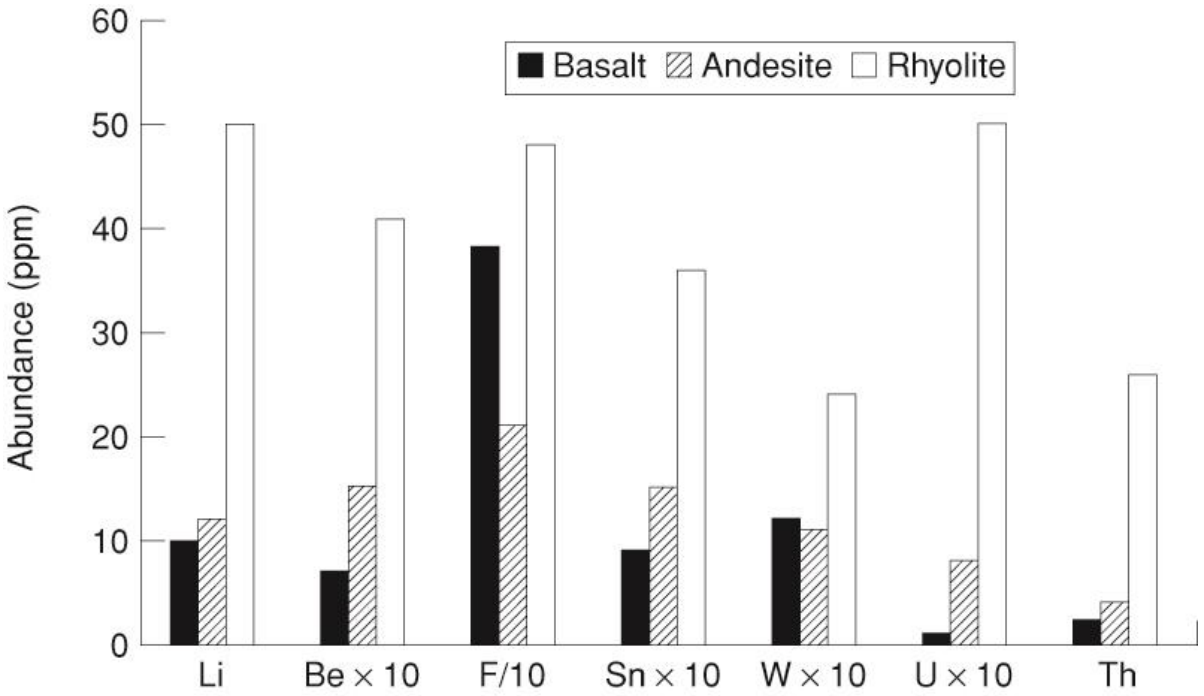
N.B.: Sn est en fait sidérophile mais il se comporte comme un élément lithophile dans la Terre silicatée.

Lithium (Li), Caesium (Cs), Tantalum (Ta), Niobium (Nb), Beryllium (Be), Tin (Sn), Tungsten (W), Rare earth elements (REE), Yttrium (Y), Rubidium (Rb), …

Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie

Robb, 2005



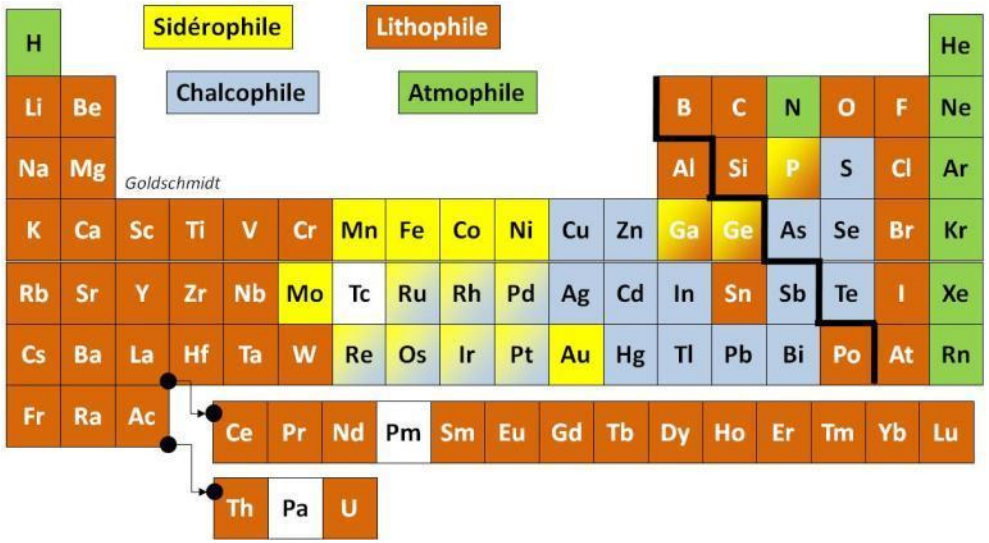


Roches basiques – Ni, Co, Cr, V, Pt, Au

Roches acides – Li, Be, F, Sn, W, U, Th

Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie

	Basalte	Andésite	Rhyolithe	Clarke
Pt	*17-30*	-	3-12	10
Co	48	24	4,4	25
Ni	134	18	6	75
Au	3,6	-	1,5	4
Cu	65	60	6	55
Zn	94	87	38	70
Pb	6,4	5	21	13
Bi	0,02	0,12	0,12	0,17
Li	10	12	50	20
Be	0,7	1,5	4,1	2,8
Sn	0,9	1,5	3,6	2
Ta	0,9	-	2,3	2
W	1,2	1,1	2,4	1,5
U	0,1-0,6	0,8	5	2,7
Th	0,2	1,9	26	7,2

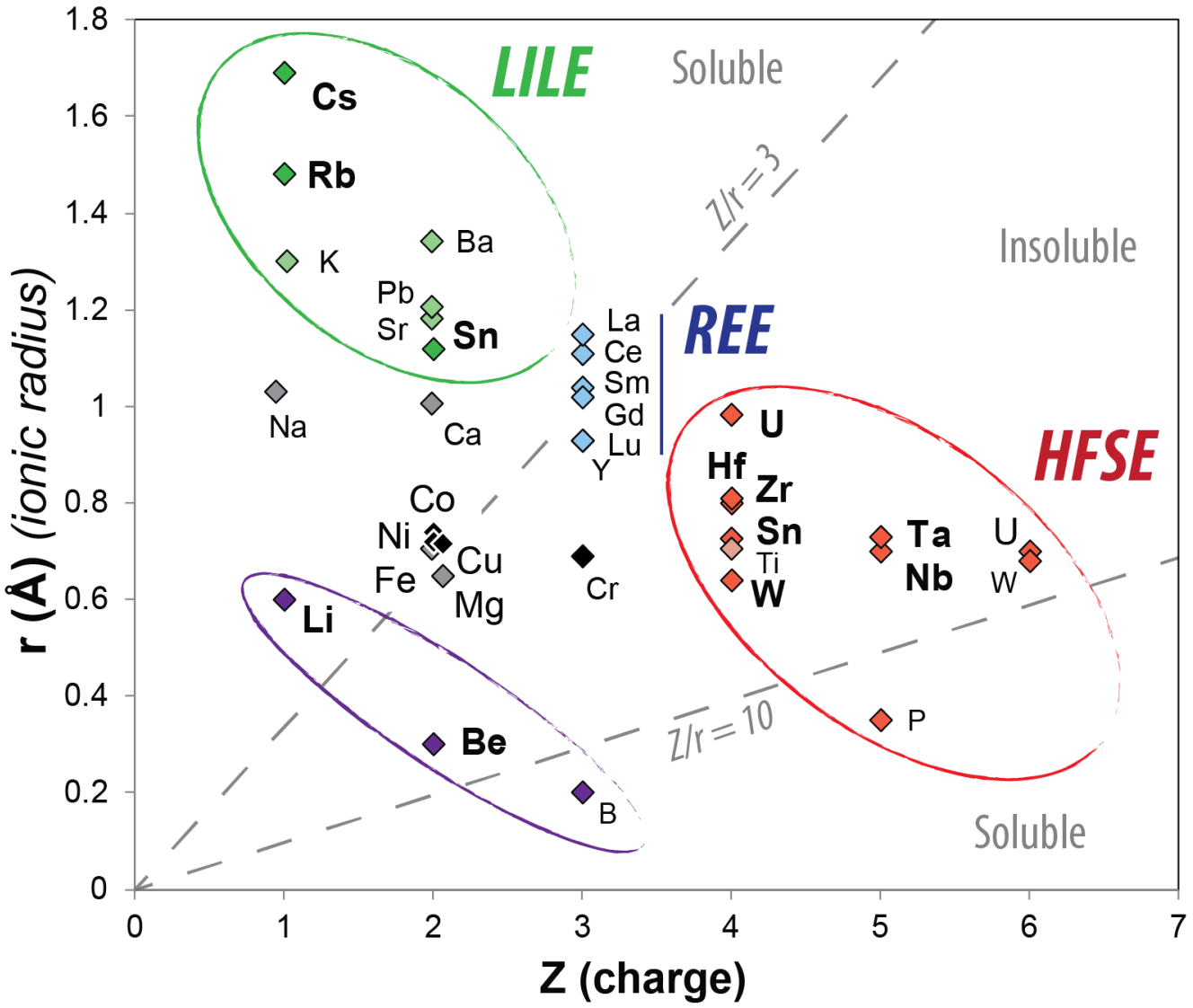


Eléments **sidérophiles** et **chalcophiles**
ROCHES MAFIQUES

Eléments **lithophiles**
ROCHES FELSIQUES
et carbonatites

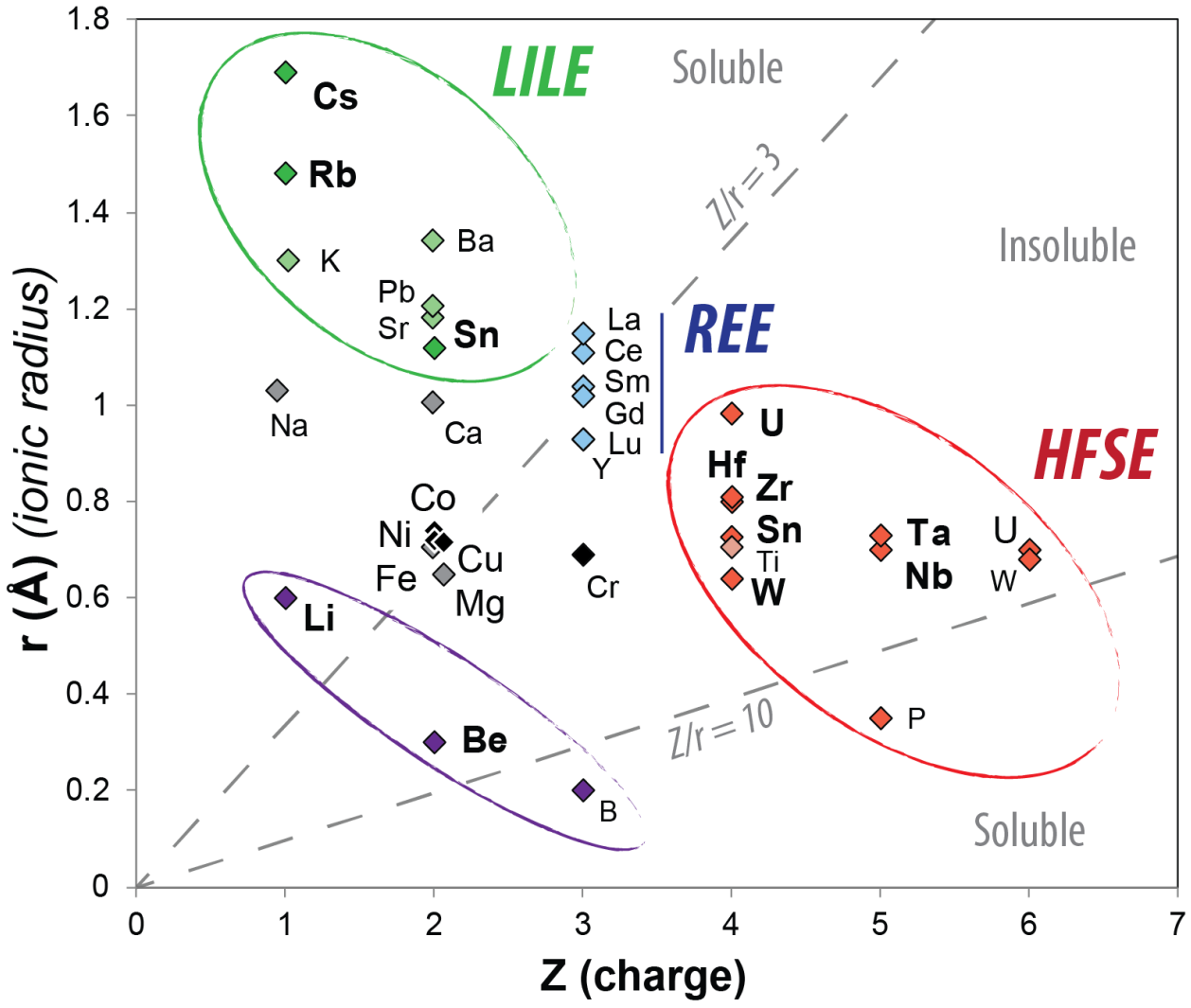
N.B.: Sn est en fait sidérophile mais il se comporte comme un élément lithophile dans la Terre silicatée.

Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie

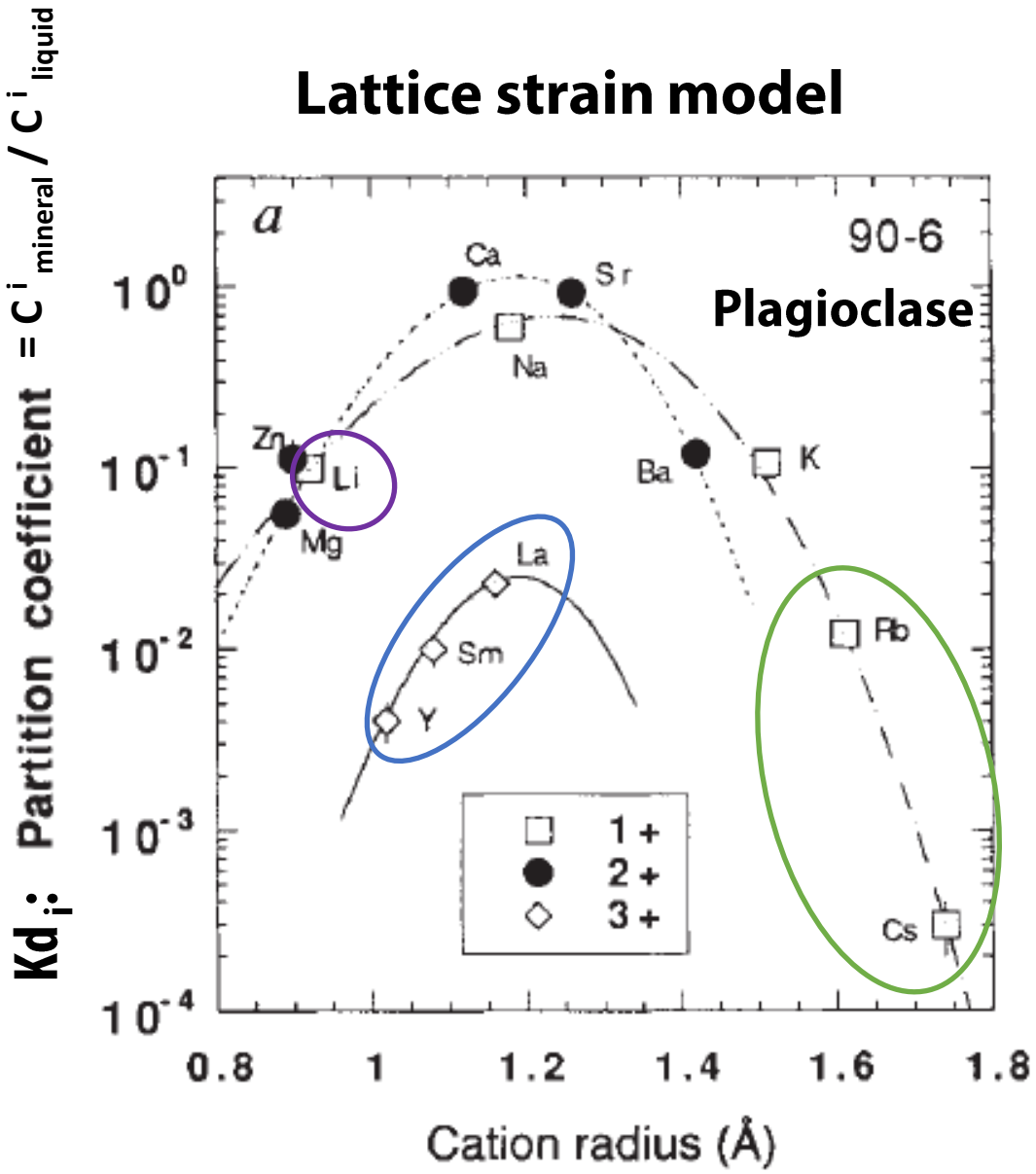


Lithium (Li), Caesium (Cs), Tantalum (Ta), Niobium (Nb), Beryllium (Be), Tin (Sn), Tungsten (W), Rare earth elements (REE), Yttrium (Y), Uranium (U), Thorium (Th), Fluorine (F), Rubidium, …

Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie

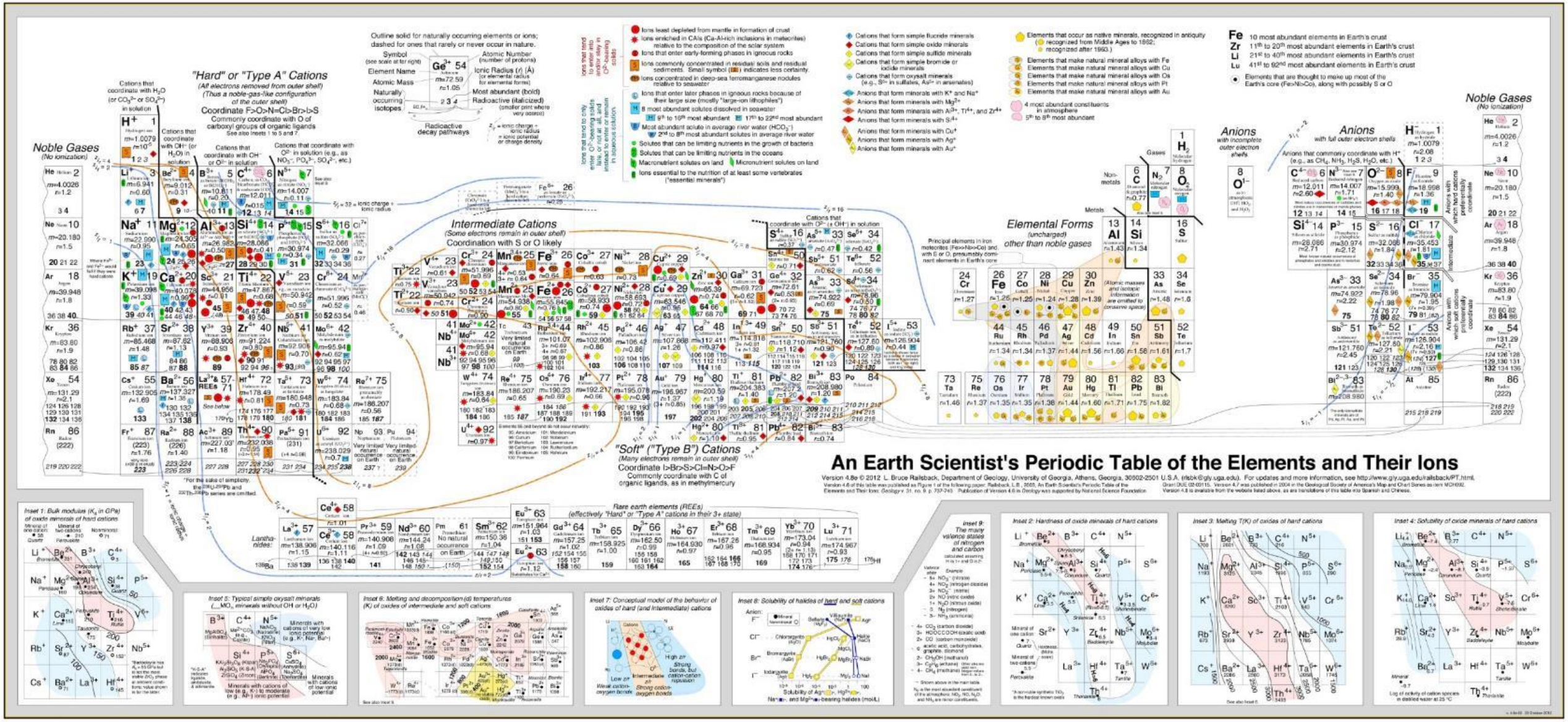


Lattice strain model



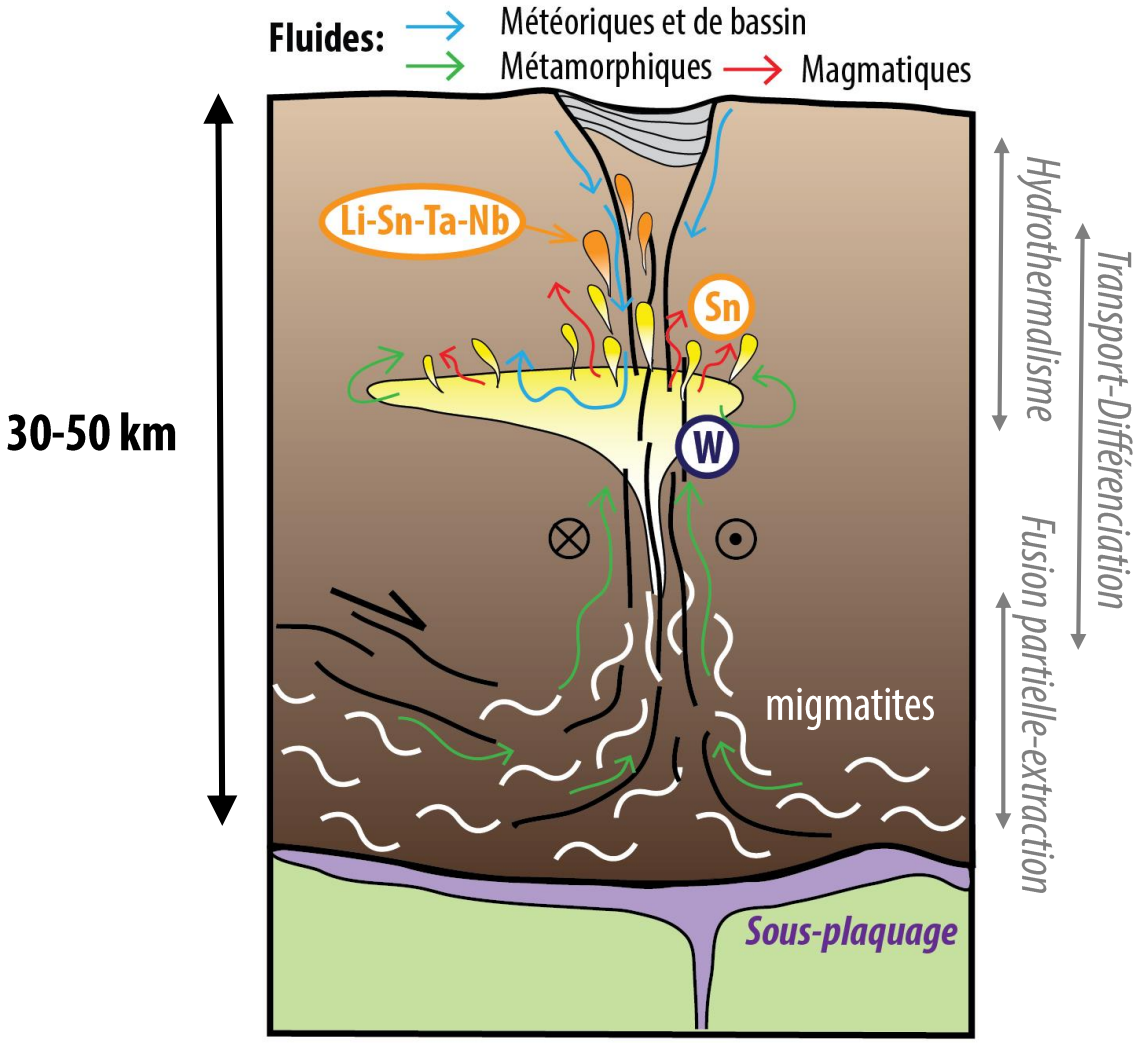
Blundy and Wood, 1994

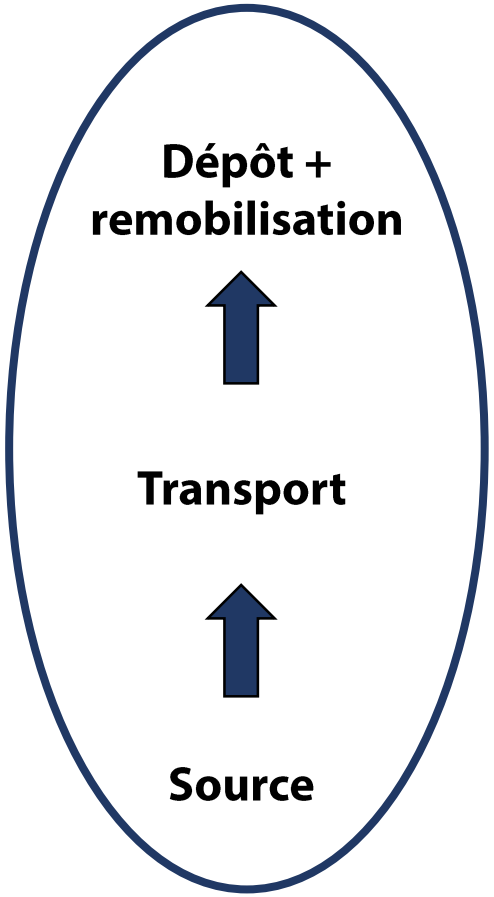
Les métaux (ou éléments) rares: rappels de géochimie



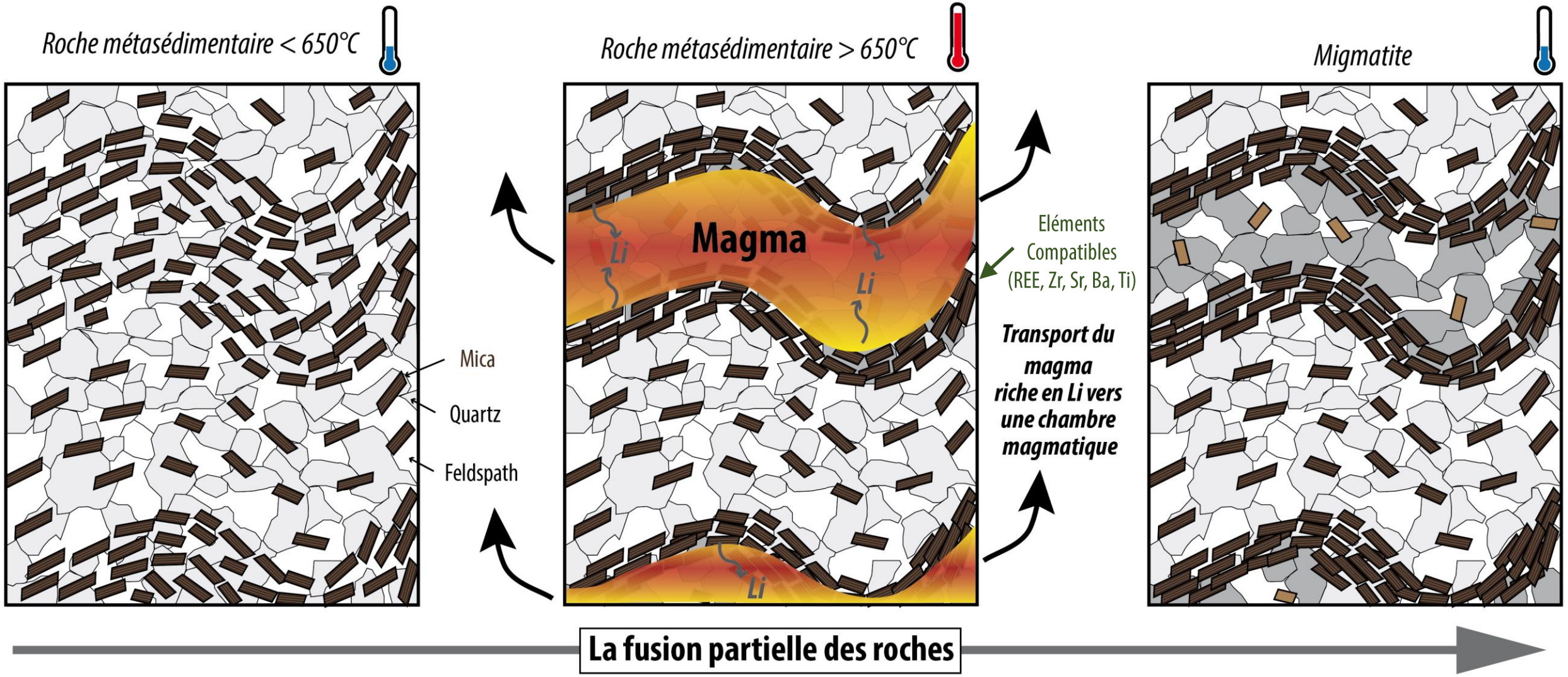
Raislback 2005

Les processus d'enrichissement et mobilité en métaux dans les systèmes magmatiques



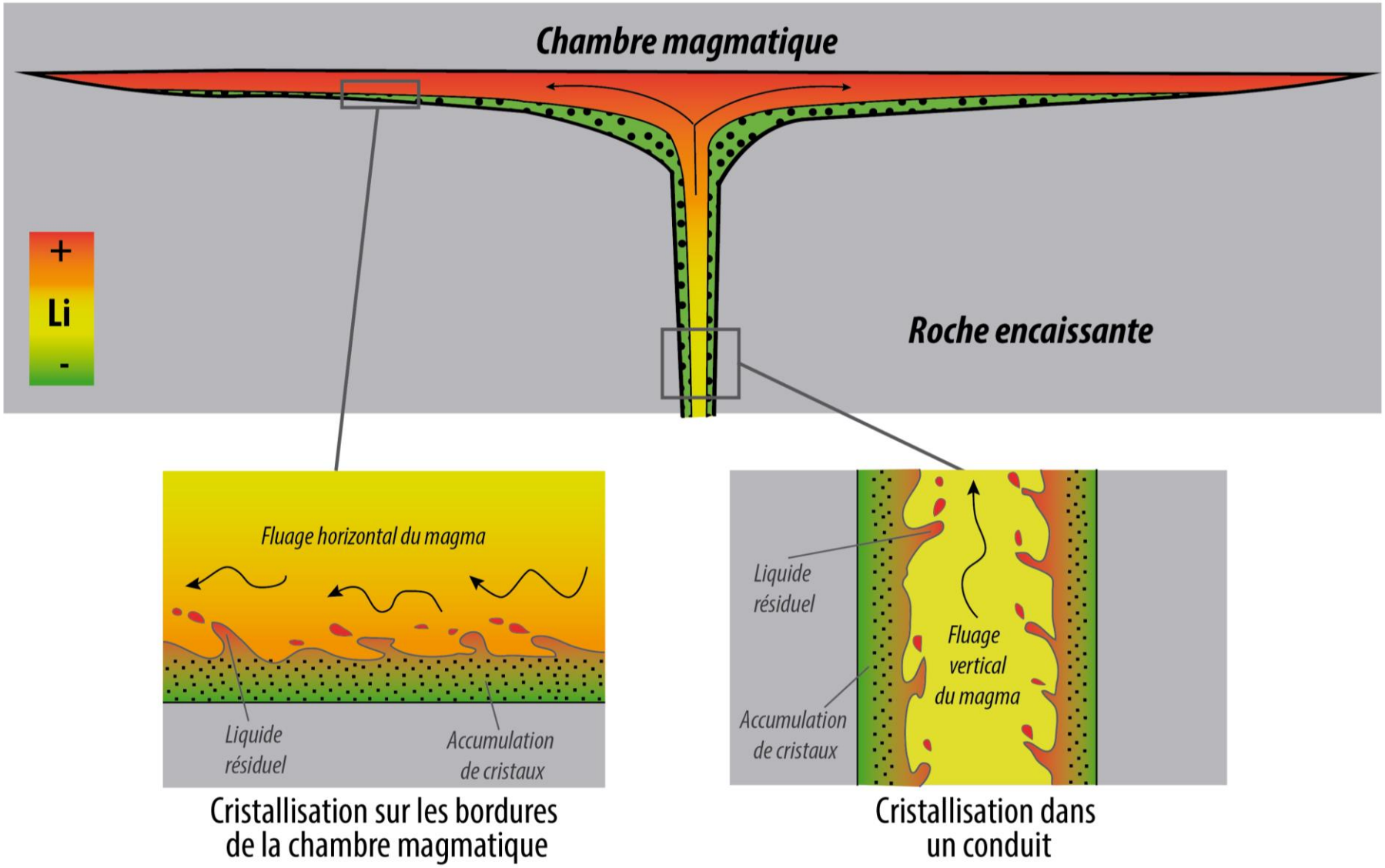


Les processus d'enrichissement et mobilité en métaux dans les systèmes magmatiques



Les processus d'enrichissement et mobilité en métaux dans les systèmes magmatiques

Cristallisation fractionnée

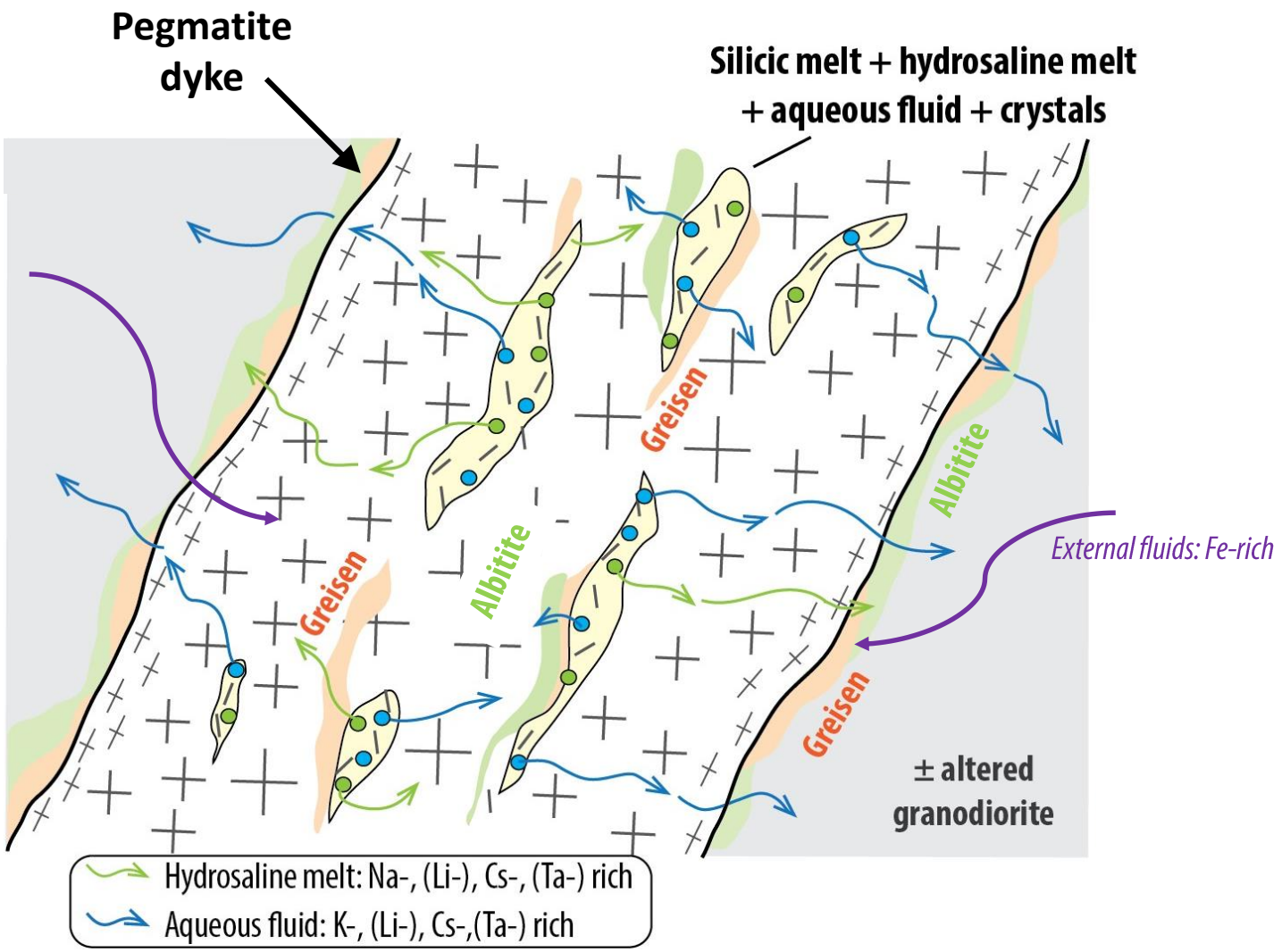


L'évolution magmatique

Les processus d'enrichissements en métaux dans les systèmes magmatiques

Transition magmatique-hydrothermale

Exsolution de fluides et métasomatisme (greisen-albitite)



Ballouard et al. 2020, OGR

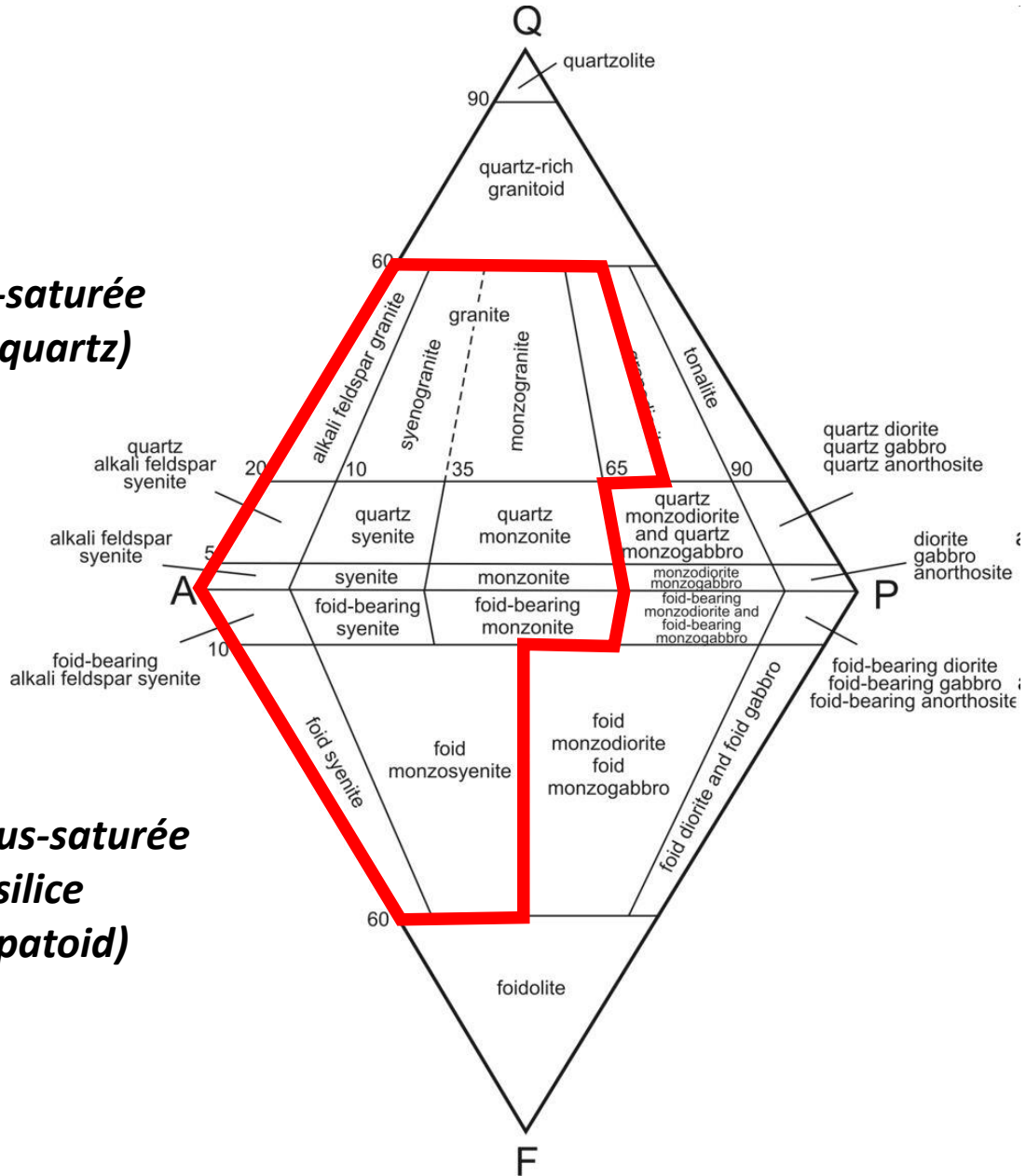
Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

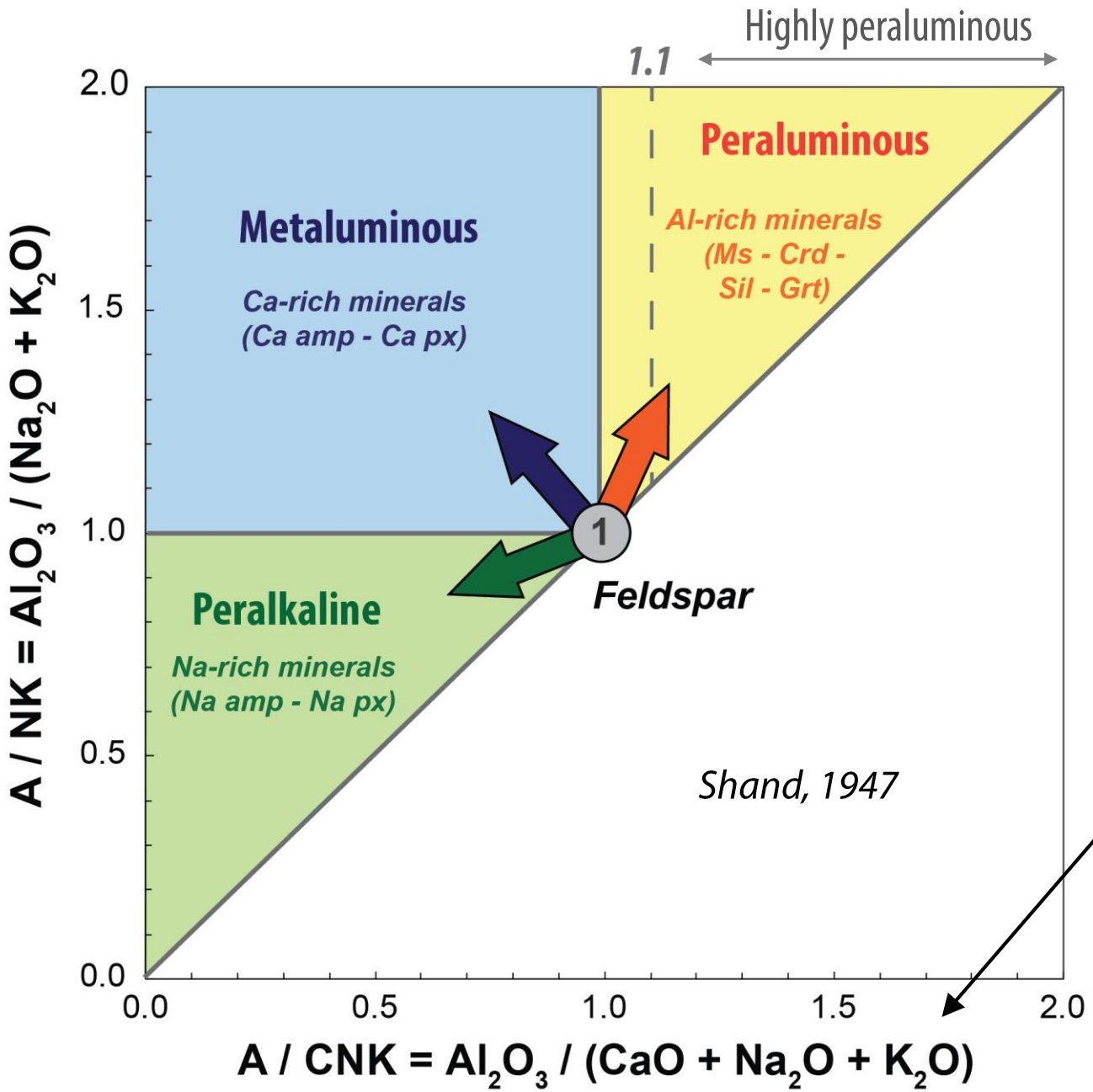
On parle ici de roches magmatiques felsiques "classiques" – sans minéralisation en métaux disséminée

Roche sur-saturée en silice (quartz)

Roche sous-saturée en silice (feldspatoid)



Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares



Lien géochimie - Minéralogie

Proportion molaire d'oxides

Exemple:

Al_2O_3 (proportion molaire) =
Al_2O_3 (% poids) / M Al_2O_3 (masse molaire)

$M\ Al_2O_3 = 2 \times 26.982\ (M_{Al}) + 3 \times 15.999\ (M_O)$
$= 101.961\ g.mol^{-1}$

Les lignées/suites magmatiques felsiques à potentiel à métaux rares

Li-Cs-Ta-Sn deposits

Nb-REE-Zr-Y-Th deposits

Highly peraluminous leucogranites

Two-mica or muscovite-bearing peraluminous granites (MPG)

~S-type magmatism

&

Li–Cs–Ta (LCT) pegmatites

Metaluminous to slightly peraluminous granites and syenites

&

Nb-Y-F (NYF) pegmatites

= A2-type (KCG) magmatism

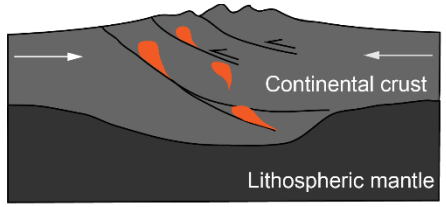
Peralkaline to metaluminous granites and (feldspathoid) syenites

&

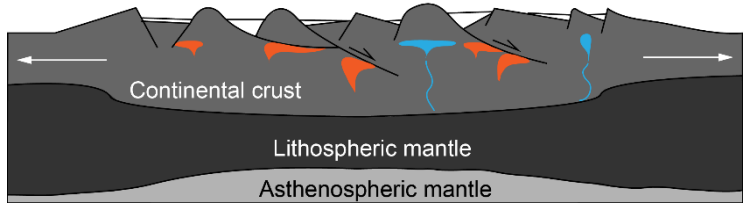
Nb-Y-F (NYF) pegmatites

= A1-type (PAG) magmatism

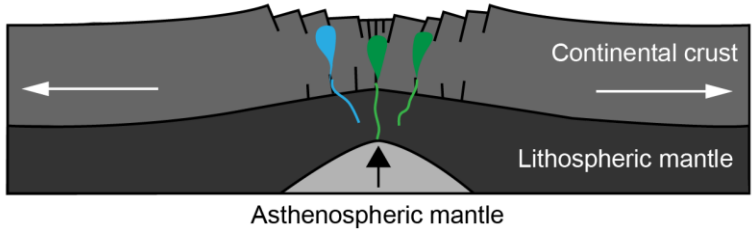
Continental collision



Late-orogenic extension



Continental rifting



Les lignées/suites magmatiques felsiques à potentiel à métaux rares

Li-Cs-Ta-Sn deposits

Nb-REE-Zr-Y-Th deposits

Highly peraluminous leucogranites

Two-mica or muscovite-bearing peraluminous granites (MPG)

~S-type magmatism

&

Li–Cs–Ta (LCT) pegmatites

Partial melting of siliciclastic sediments and felsic igneous rocks

Metaluminous to slightly peraluminous granites and syenites

&

Nb-Y-F (NYF) pegmatites

= A2-type (KCG) magmatism

Partial melting of residual crust or partial melting of metasomatized lithospheric mantle followed by magmatic differentiation

Peralkaline to metaluminous granites and (feldspathoid) syenites

&

Nb-Y-F (NYF) pegmatites

= A1-type (PAG) magmatism

Partial melting of deep mantle or metasomatized lithospheric mantle followed by magmatic differentiation

Les lignées/suites magmatiques felsiques à potentiel à métaux rares

Limited rare-metal potential

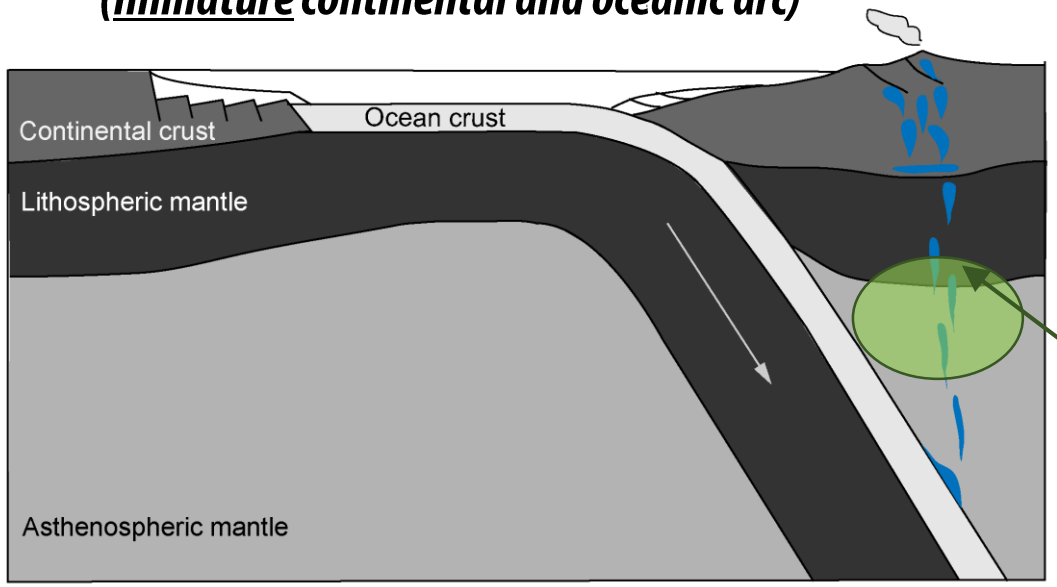
Significant potential for Cu, Mo, Au…

Metaluminous to slightly peraluminous granitoids

= I-type / calc-alkaline

Oceanic subduction setting

(Immature continental and oceanic arc)



Partial melting of a metasomatized lithospheric mantle or melting of mantle-derived igneous rocks within the crust followed by magmatic differentiation

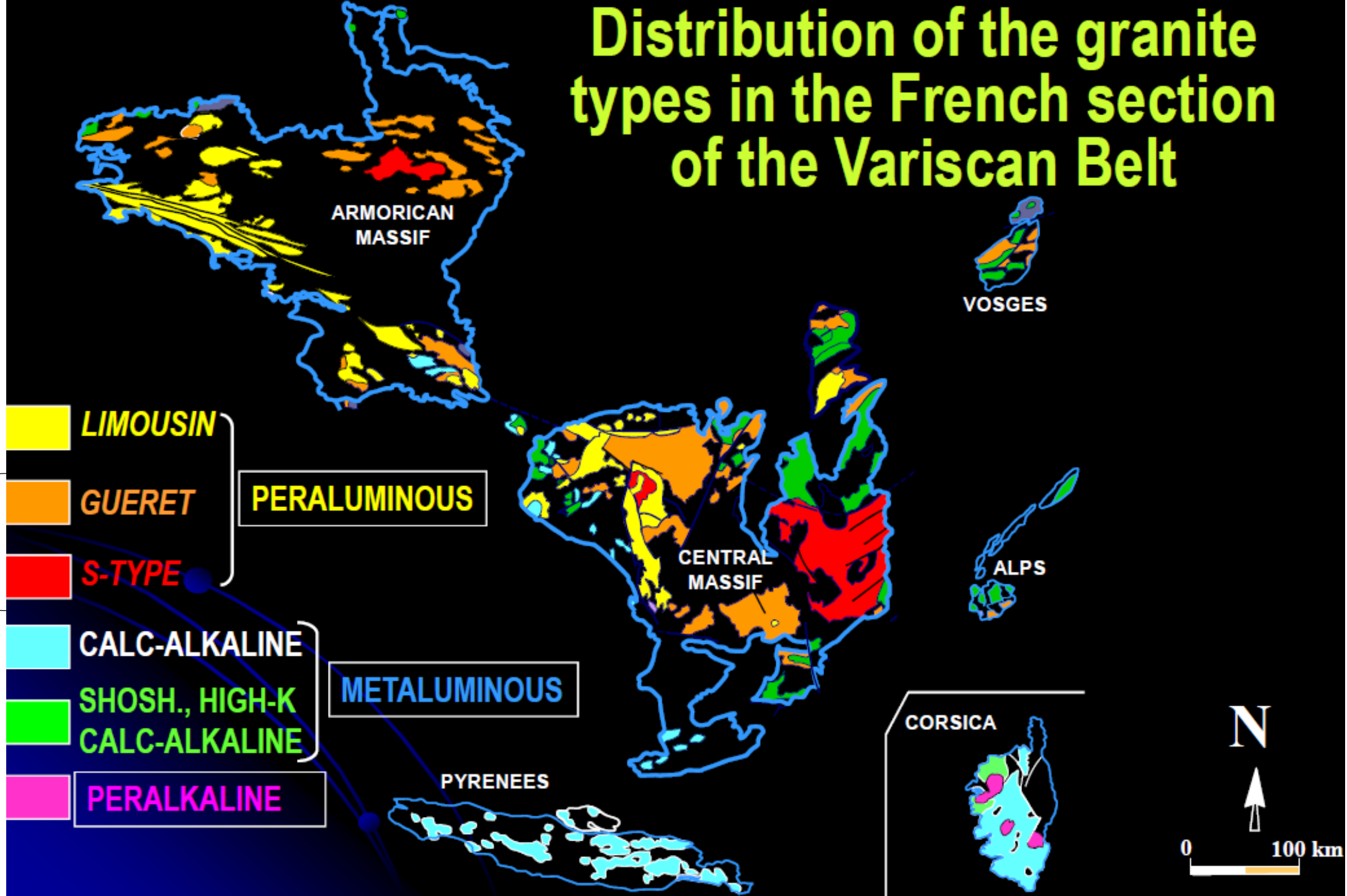
Metasomatism of the mantle wedge by fluids or melts derived from the oceanic slab

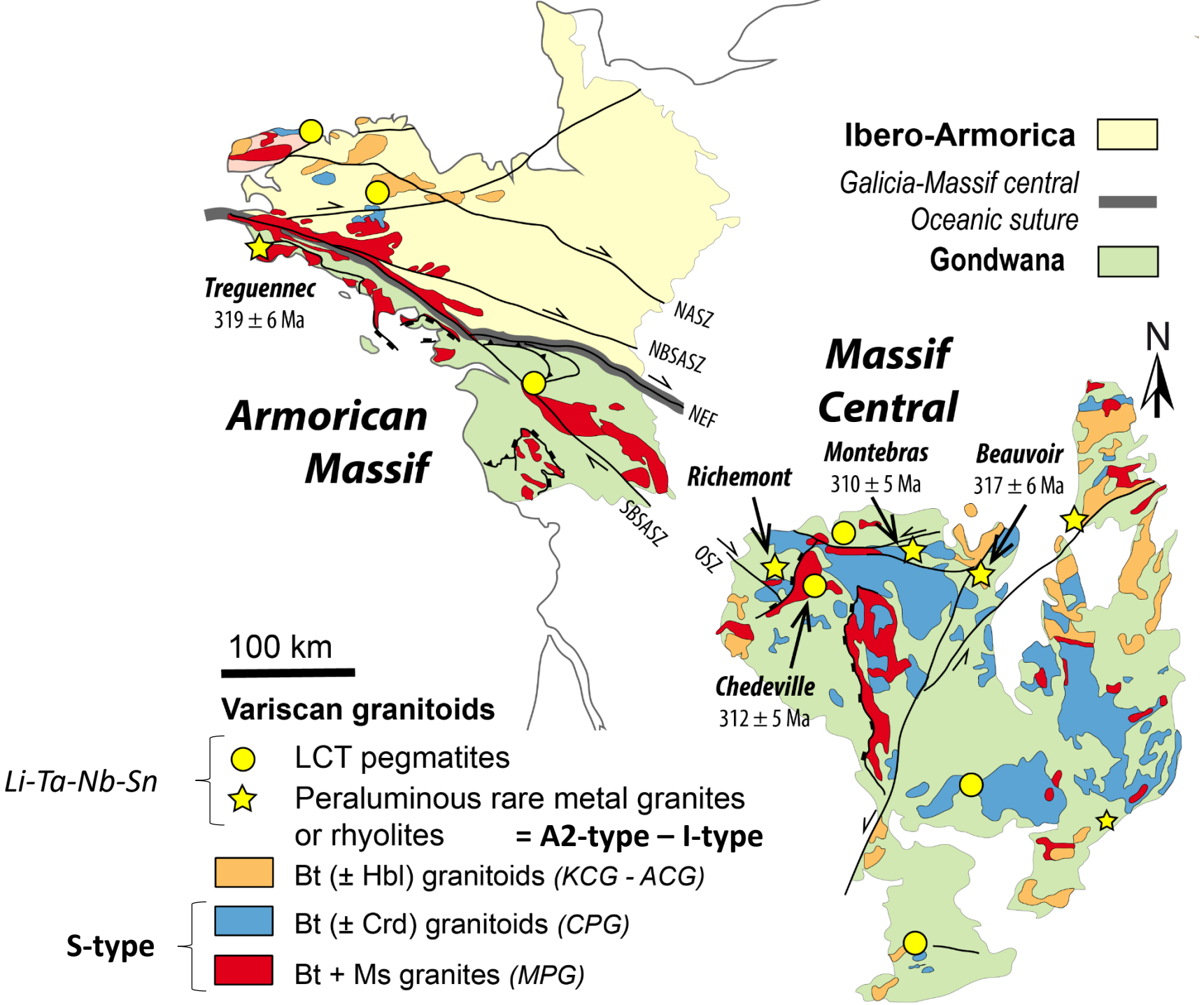
Exception: peraluminous magmatism associated to mature continental arc – Macusani rhyolites – Peru
(e.g., Pichavant et al. 1987; Ramirez-Briones et al. 2025)

Caractéristiques minéralogiques et géochimiques

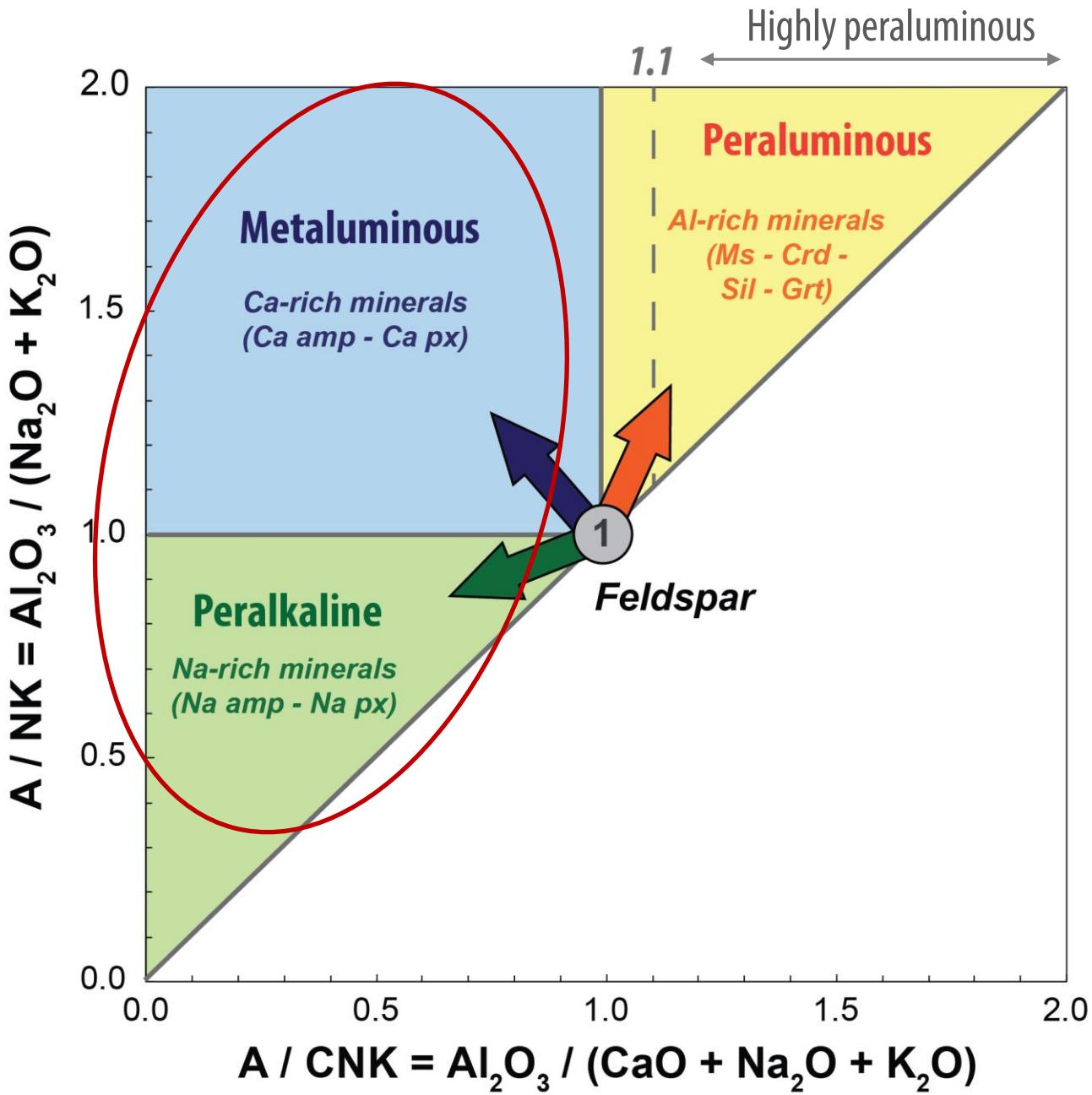
Et exemples en France métropolitaine

Carte de
M. Cuney




Ibero-Armorica
Galicia-Massif central
Oceanic suture
Gondwana
Treguennec
319 ± 6 Ma
NASZ
NBSASZ
NEF
SBSASZ
Armorican Massif
Massif Central
N
Richemont
Montebras
310 ± 5 Ma
Beauvoir
317 ± 6 Ma
OSZ
Chedeville
312 ± 5 Ma
100 km
Variscan granitoids
Li-Ta-Nb-Sn
LCT pegmatites
Peraluminous rare metal granites or rhyolites
= A2-type – I-type
Bt (± Hbl) granitoids (KCG - ACG)
S-type
Bt (± Crd) granitoids (CPG)
Bt + Ms granites (MPG)

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares



1) **Suites magmatiques felsiques peralcalines à métalumineuses (A/CNK < 1.0)**

- Roches felsiques saturées en silice : **granites et syénites de type A1** (Eby 1992), granites peralcalins ou PAG de Barbarin (1999)

- Roches felsiques sous-saturées en silice : **syénites à feldspathoïdes (néphéline typiquement)**

- Minéraux typiques: pyroxène sodique (aegyrine), amphibole sodique (arfvedsonite), biotite (Fe), fluorite, (olivine-fayalite), magnétite-ilménite, très grande variabilité en type de minéraux accessoires (astrophyllite, eudialyte)

- **Enrichies en HFSE, REE, Th, U, F**

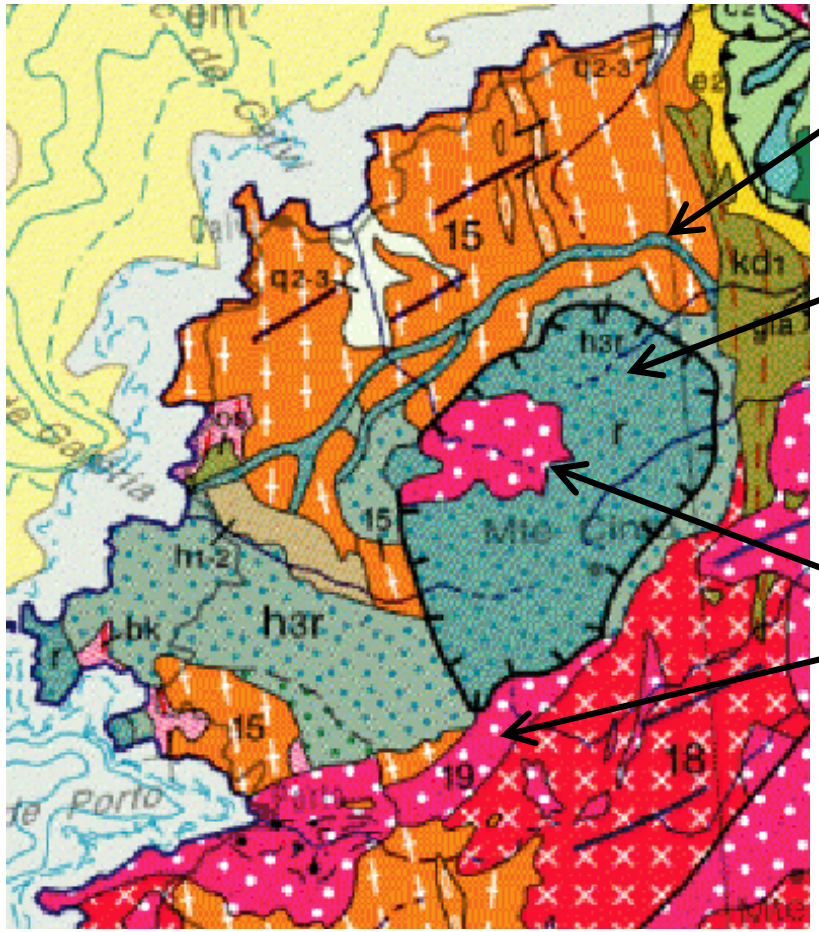
- Fusion du manteau

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

1) Suites magmatiques felsiques peralcalines à métalumineuses *(Granites et syénites de type **A1**)*

Magmatisme granitique peralcalin de Corse du nord (Tardi-Hercynien – Permien : ca. 290 Ma)

Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000, BRGM

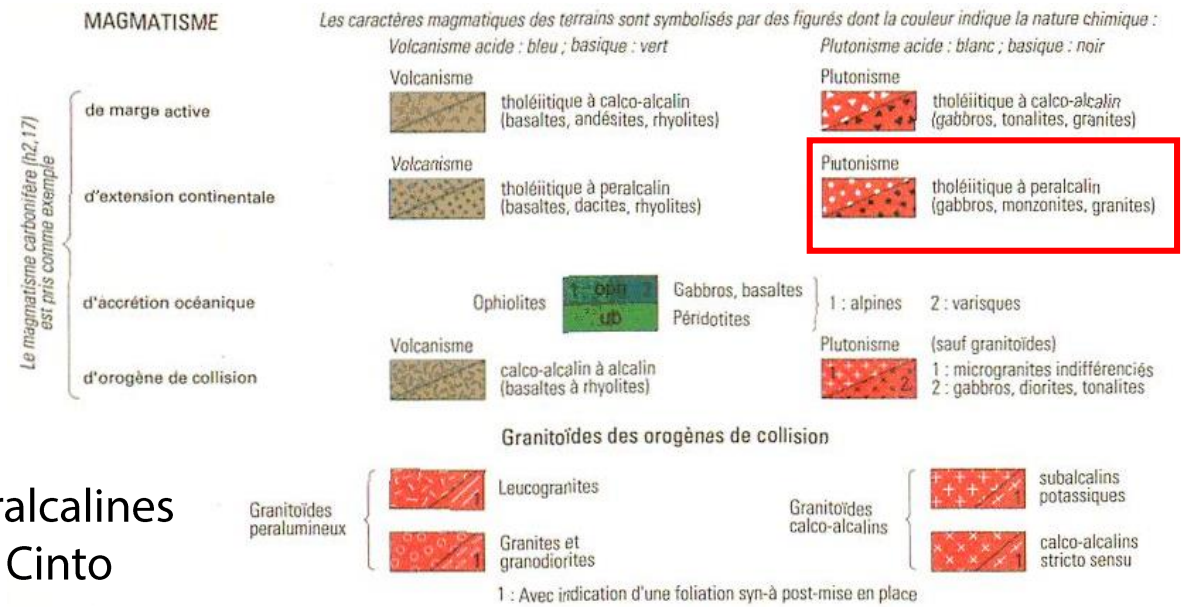


Dyke de microgranite peralcalin

Rhyolites peralcalines du Massif de Cinto (caldeira)

Granite peralcalin à aegyrine (Col d'Aitone, Corse)
Photo de J.F. Moyen

(https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/granite-granitoide.xml)



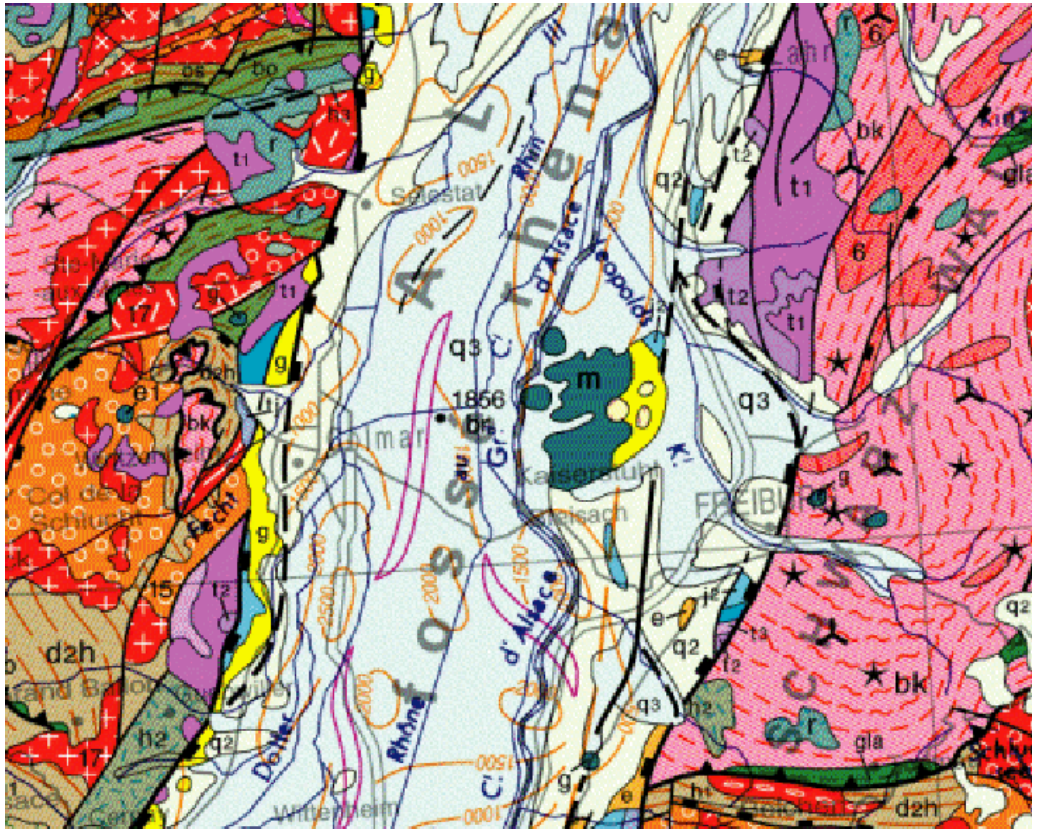
Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

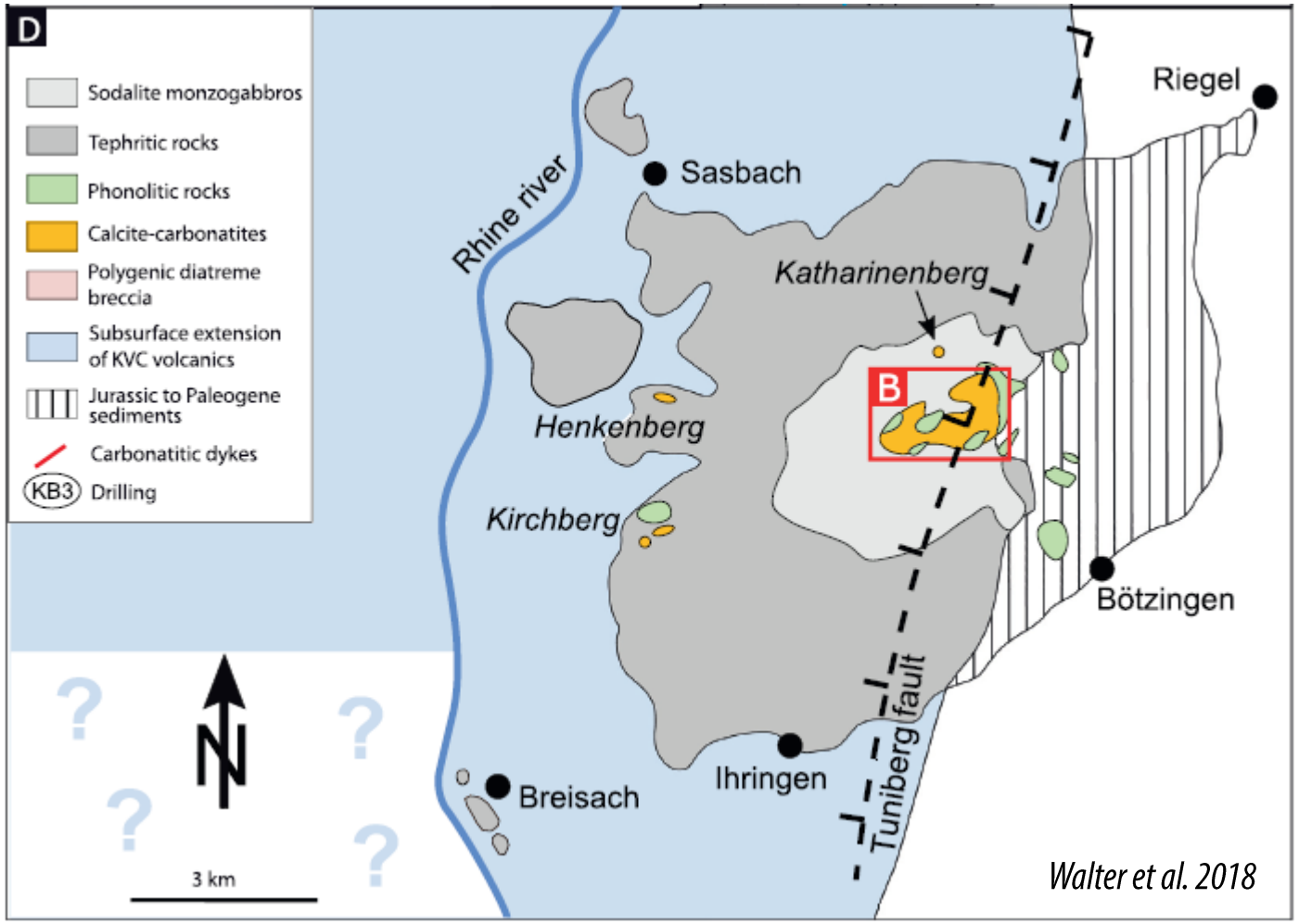
1) Suites magmatiques felsiques peralcalines à métalumineuses *(Roches felsiques sous-saturées en silice)*

Complexe volanique alcalin du Kaiserstuhl, graben du Rhin (Miocène: 19-16 Ma)

Principalement téphrites, phonolites (*équivalent extrusif de syénites à felspathoïde)* et carbonatites

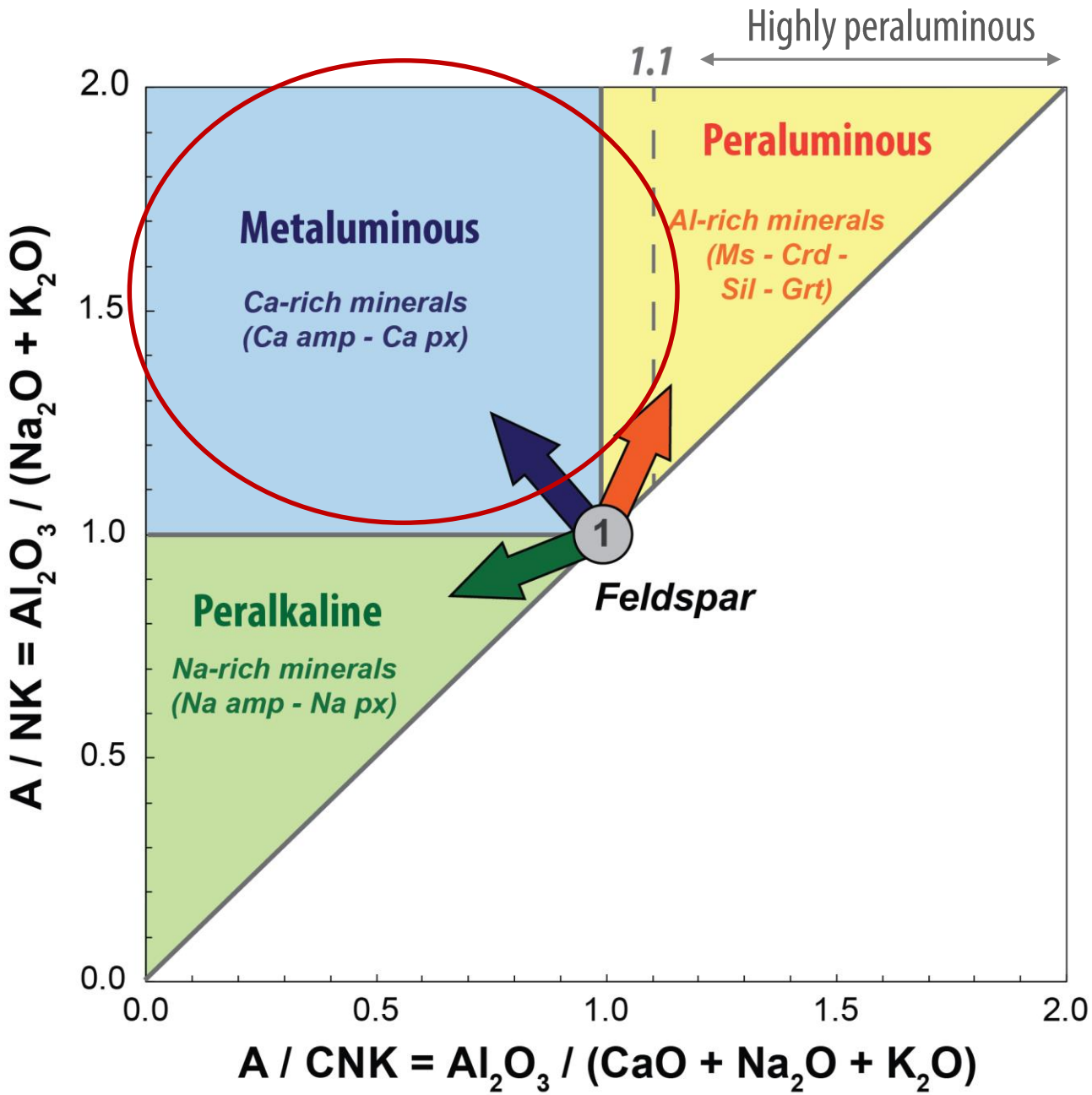
Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000, BRGM





Walter et al. 2018

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares



2) Suites felsiques métalumineuses à légèrement peralumineuses (A/NK ≥1 et A/CNK ≤ 1.1)

- Roches felsiques saturées en silice : **granites et syénites de type A2** (Eby 1992) ou « K-rich calc-alkaline granitoids - **KCG** » de Barbarin (1999)

- Minéraux typiques: mégacristaux de feldspath K, biotite (Fe), amphibole calcique, titanite, allanite, magnétite-ilménite

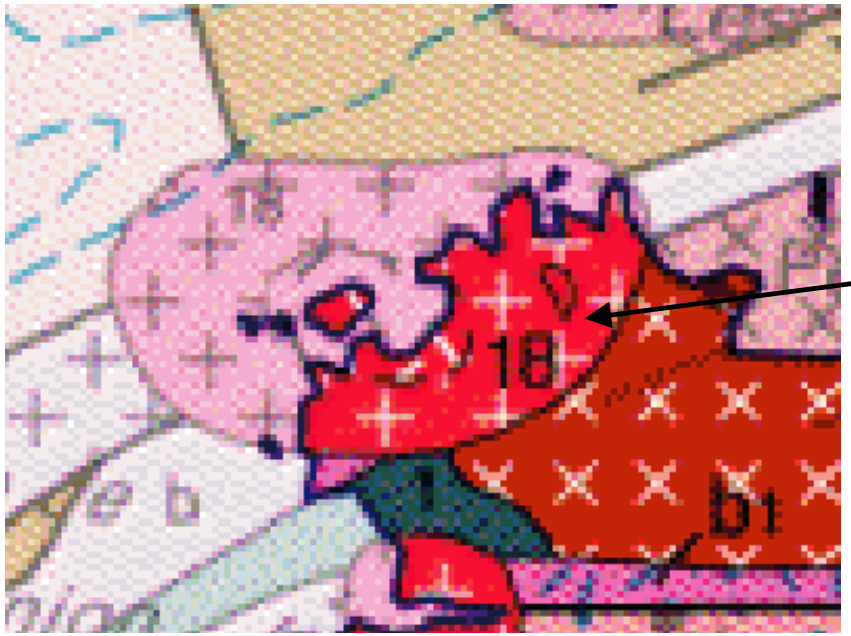
- Enrichies en HFSE, REE, Th, U, F (mais moins que les suites A1)

- Fusion de la croûte inferieure (réstitique), mélange de magmas crustaux et mantelliques ou fusion d'un manteau lithosphérique métasomatisé: différenciation de magmas mafiques tardi-orogéniques (e.g. vaugnérites)

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

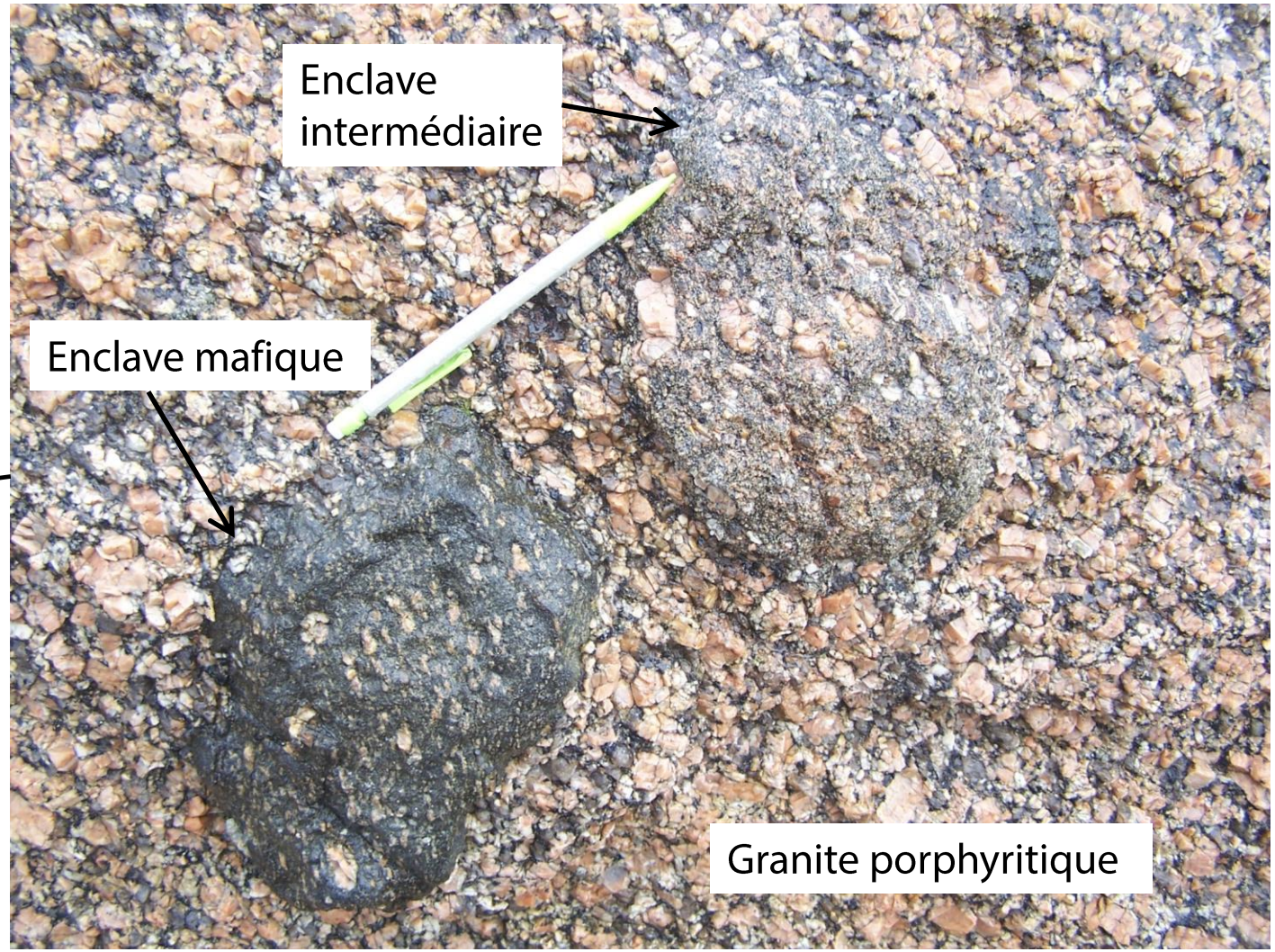
2) Suites felsiques métalumineuses à légèrement peralumineuses (A/NK ≥1 et A/CNK ≤ 1.1) – granites type « A2 » ou KCG

Complexe granitique de Ploumanac'h – Massif Armoricain (Tardi Hercynien : ca. 310 – 300 Ma)

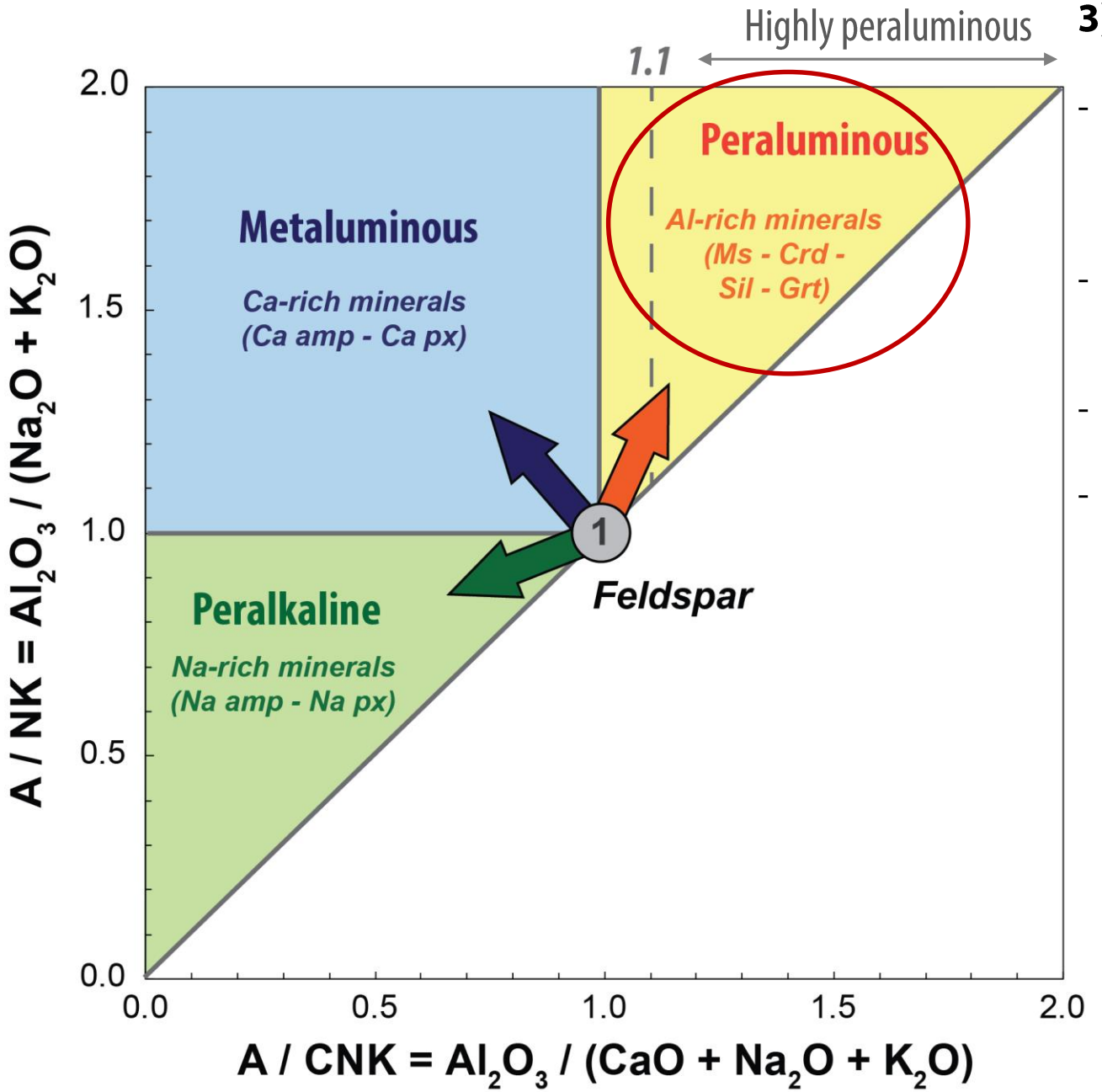


Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000, BRGM

Granite porphyroïde à biotite-amphibole
(unité externe, facies La Clarté)



Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares



3) Suites felsiques fortement peralumineuses (A/CNK ≥ 1.1)

- **Leucogranites peralumineux à muscovite ou deux micas** (« **Musovite-bearing Peraluminous Granites - MPG** de Barbarin 1996, 1999)
- Minéraux typiques: muscovite, biotite, grenat, tourmaline, apatite, (monazite, ilménite)
- **Appauvris en Zr, Hf, REE, Th**
- Fusion partielle de metasédiments alumineux riches en micas (pélitique) ou de métagranites

Ms-Bt leucogranite
Guérande
(Armorican Massif)

Aparté sur les granitoïdes peralumineux (A/CNK ≥ 1)

Les deux types principaux de granites peralumineux (Barbarin, 1996; 1999)

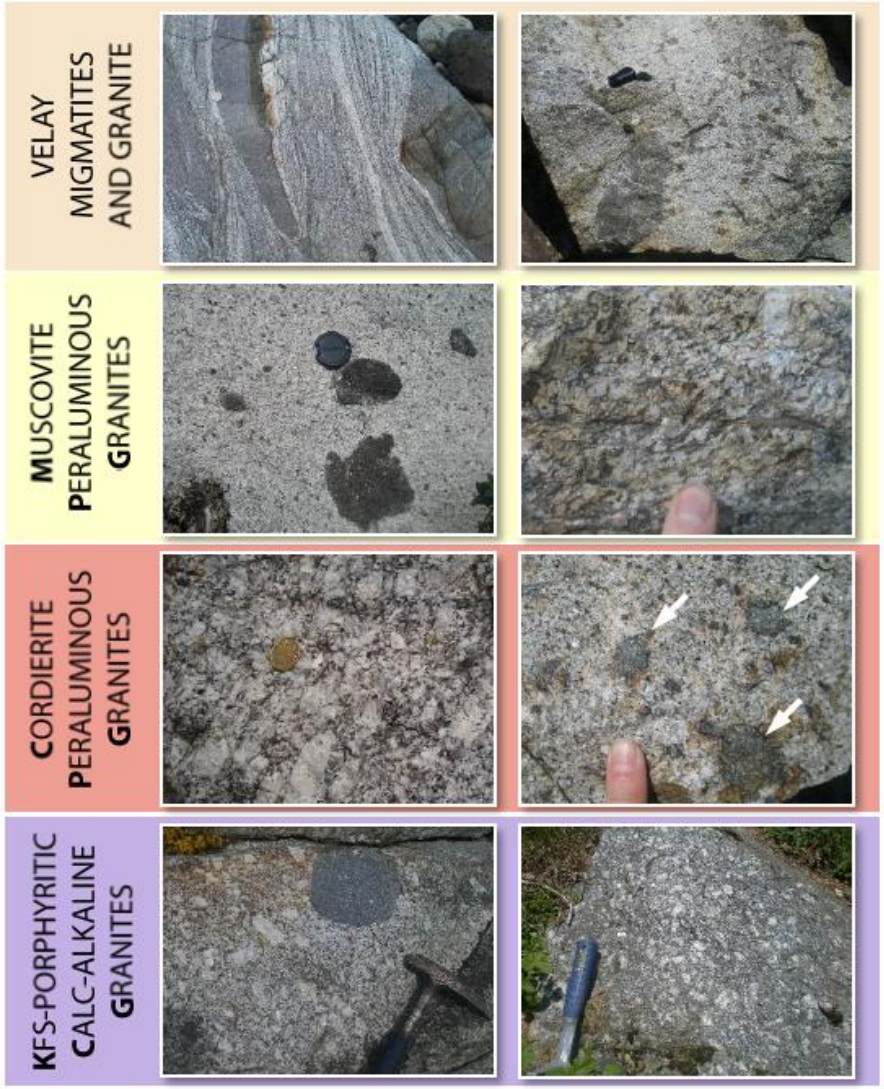
« Muscovite-bearing peraluminous granites » (MPG) vs « cordierite-bearing peraluminous granites » (CPG)

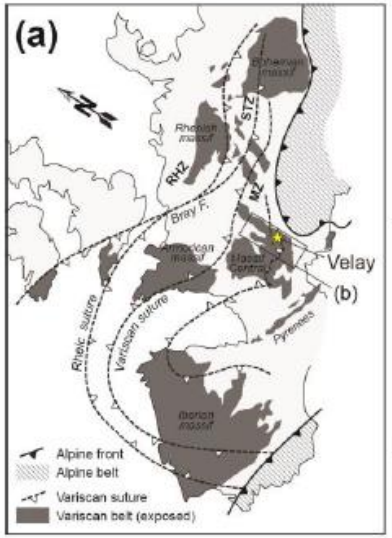
O. Laurent et al.
(Variscan Conference, 2015)

CPG ~Granite de type S (Chapelle and White, 1974)

The eastern French Massif Central

- Large proportion of Carboniferous **granitoids + migmatites**





Post-Permian cover

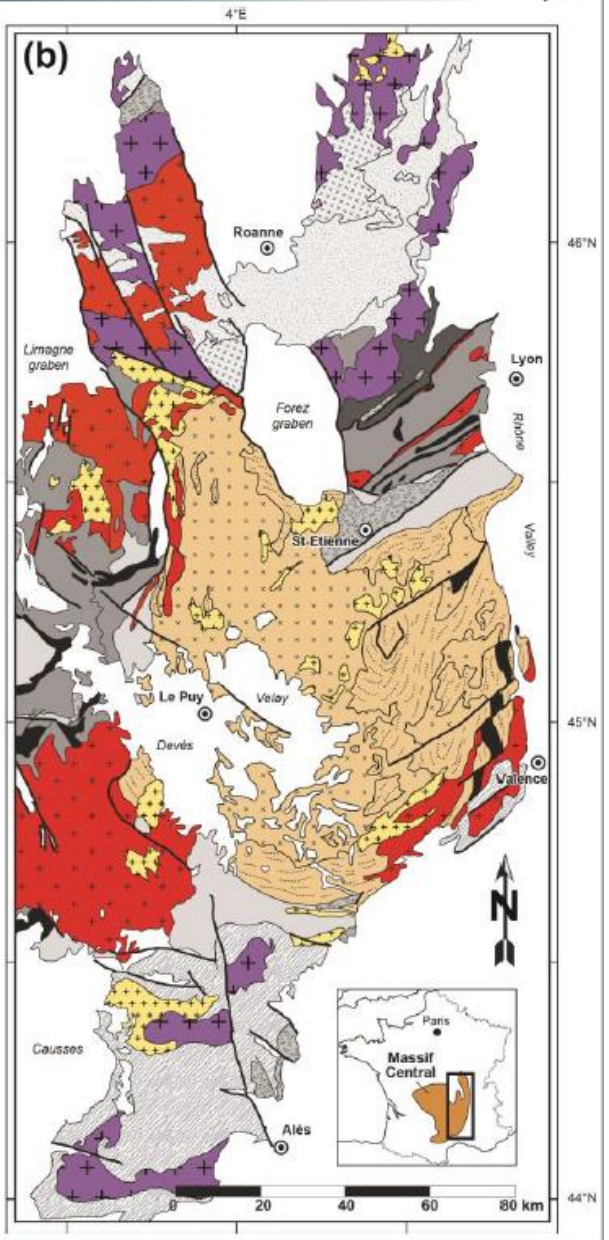
Variscan units and nappe stack

- Major fault / shear zone
- Upper Carboniferous and Permian detrital basins
- Lower Carboniferous volcano-sediments (a) : associated granophyres
- Devonian volcano-sediments (Brévenne unit)
- Upper Gneiss Unit (UGU) (a) : Leptyno-amphibolitic complex
- Lower Gneiss Unit (LGU)
  - Migmatitic LGU
  - Velay complex (heterogeneous granite, migmatites)
- «Parautochtonous» (Cévennes schists)

Variscan plutonic rocks

- Bt ± Ms peraluminous leucogranites (MPG)
- Bt ± Crd peraluminous granites and granodiorites (CPG)
- Bt ± Am peral- to metaluminous granites to quartz-diorites (KCG)

(Laurent et al., in prep.)



Aparté sur les granitoïdes peralumineux (A/CNK ≥ 1)

Barbarin (1996, 1999)

	Bt	Ms	Crd	Sil-And	Amp	Px	Ap	Zrn
MPG	x	xxx	o	o	o	o	xxx	x
CPG	xxx	x	xx	x	o	o	xxx	xx

	Mnz	Grt	Turm	Aln	Ttn	Ilm	Mnt	Pl - An%
MPG	x	xx	xxx	o	o	x	o	0 - 20
CPG	x	x	xx	o	o	x	o	15 - 40

	Petrographic type	A/CNK	I_{sr}	εNd(t)	$\delta^{18}O$ (‰)	$\delta^{34}S$ (‰)
MPG	Leucogranites - (granites)	>1	> 0.705	< 0	+ 10 to + 14	- 12 to + 2
CPG	(Leucogranites) - granites - granodiorites - Qtz diorites					

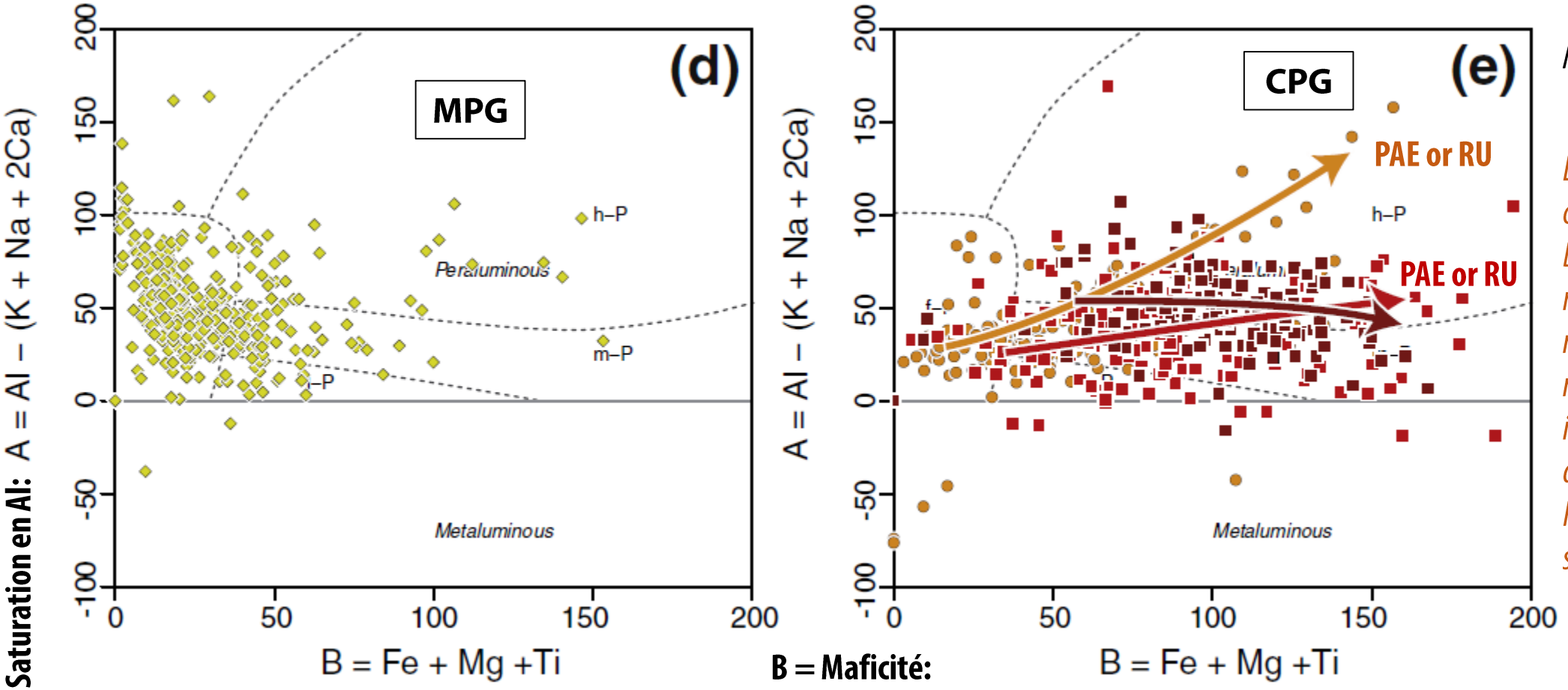
	Enclaves			Associated mafic rocks
	Restite or xenoliths	*Felsic M.E.*	*Mafic M.E.*	
MPG	x	x	o	o
CPG	xxx	o-x	x	x

Table I.1 : Caractéristique pétrographiques et géochimiques générales des granites peralumineux à muscovite (MPG) et des granites peralumineux à cordiérites (CPG) selon Barbarin (1999). o = absent ; x = rare ; xx = commun ; xxx = abondant. Abréviation minéralogiques selon Kretz (1983). I_{Sr} représente le rapport ^{87}Sr / ^{86}Sr initial. M.E. : Enclaves microgrenues

Aparté sur les granitoïdes peralumineux (A/CNK ≥ 1)

Les deux types principaux de granites peralumineux (Barbarin, 1996; 1999):

« Muscovite-bearing peraluminous granites » (MPG) vs « cordierite-bearing peraluminous granites » (CPG)



Moyen et al. 2017

La forte « maficité » des CPG comparé aux MPG (paramètre B) est interprétée comme un reflet de l'entrainement de minéraux peritectiques (PAE) mafiques, type grenat ou ilménite, ou l'entrainement de réstites (Restite unmixing : RU) par le magma depuis la source

A = Saturation en Al: A = Al – (K + Na + 2Ca)

B = Maficité:

~ concentration en Biotite ± Cordierite ± Grenat ± Ilmenite

Diagramme A-B de Debon et Lefort (1983), modifié par Villaseca et al. (1988)

Paramètres A et B en proportion molaire de cation multipliée par 1000 (millications)

Aparté sur les granitoïdes peralumineux

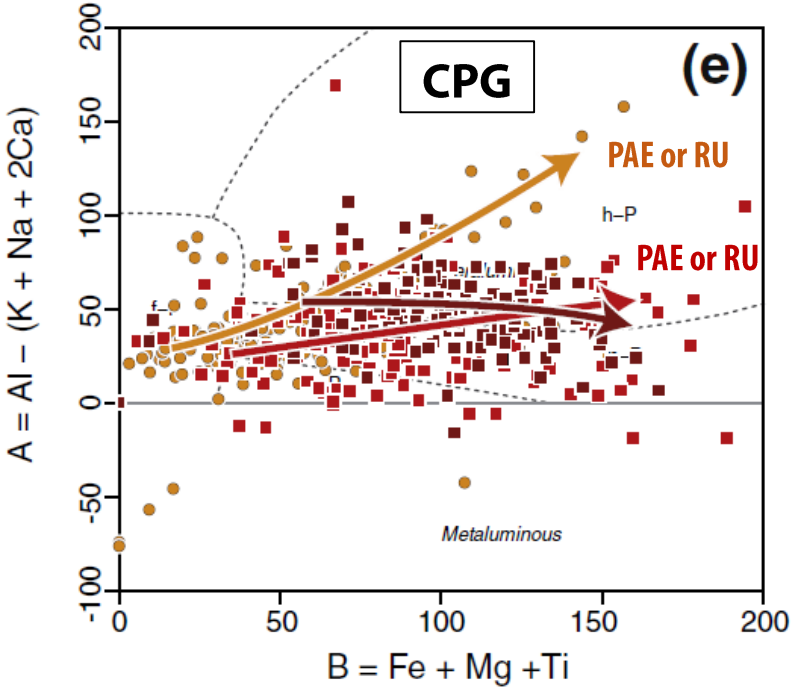
Entrainement d'assemblage péritectique (PAE) et de minéraux accessoires depuis la source:

Exemple de réactions de fusion incongruente par déshydratation de la biotite de métapelite

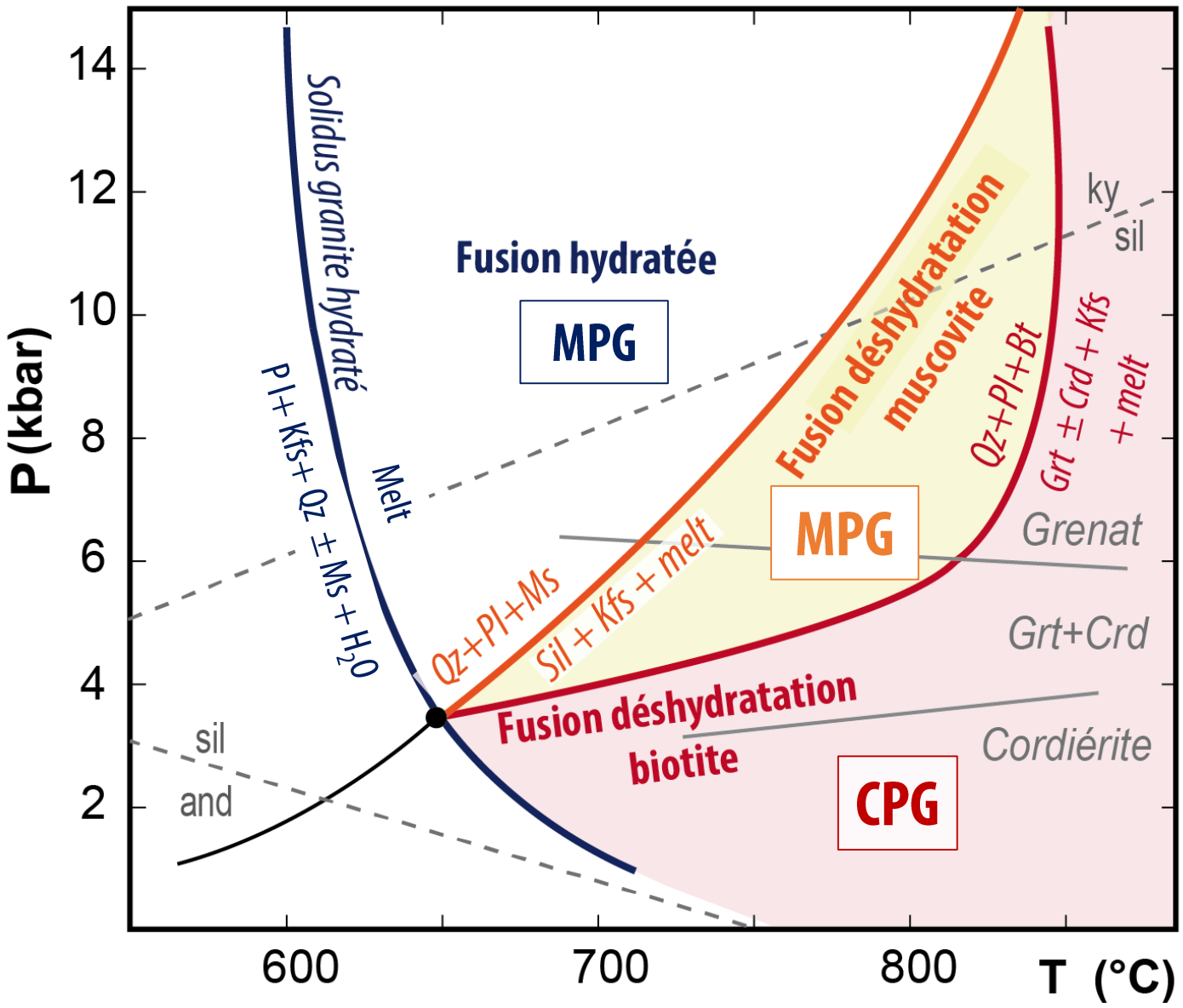
1/ Bt + Qtz + Pl + Sil = Grt ± Crd + melt + Ilm ± Kfs

2/ Bt + Qtz + Pl = Grt ± Crd + Opx + melt + Ilm ± Kfs

Les phases péritectiques formés lors des réactions de FP ainsi que les minéraux accessoires peu solubles (zircon, monazite) vont être entrainés par le magma depuis la source migmatitique

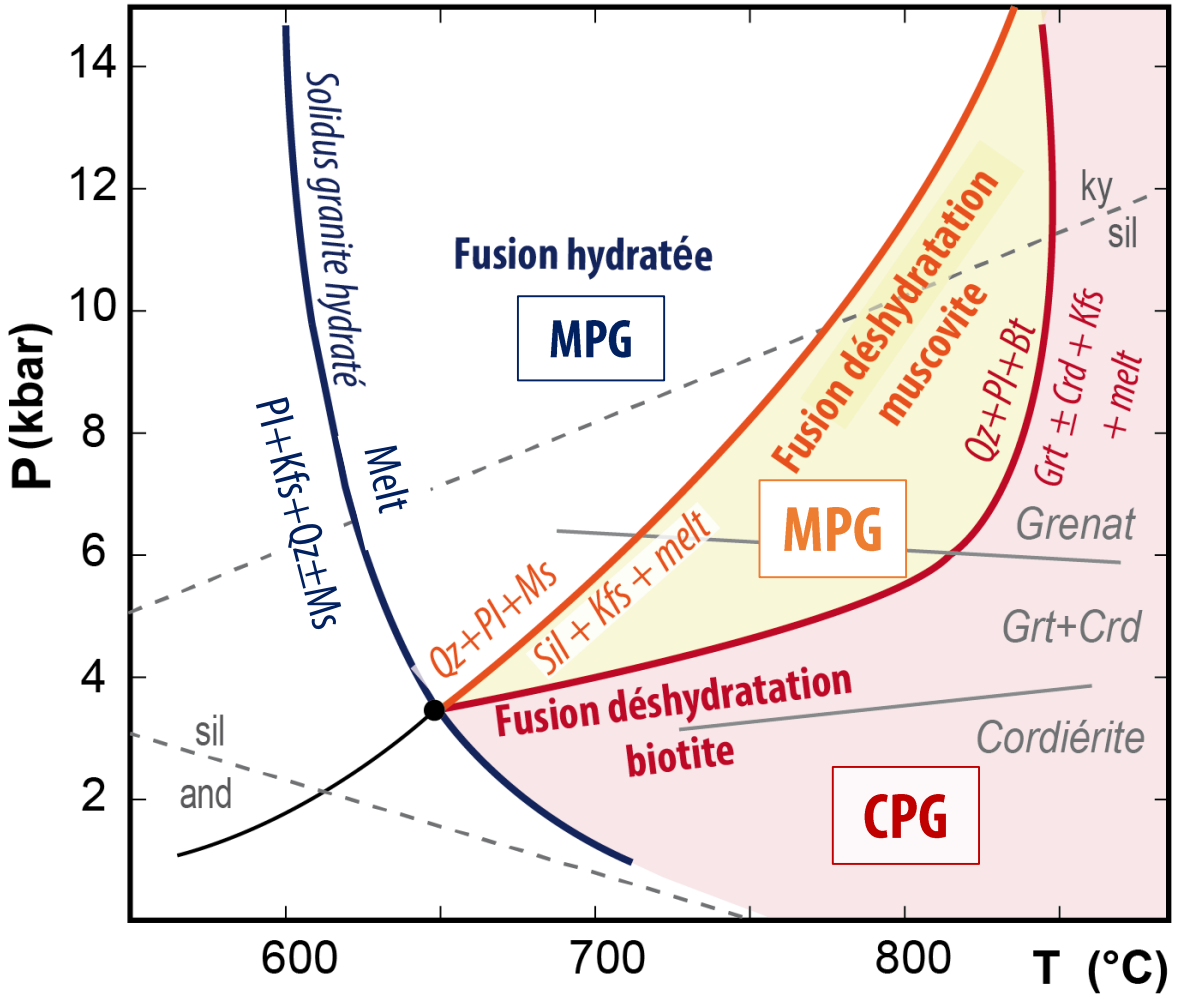


Ajout de grenat péritectique augmente la maficité des liquides (PAE)



Aparté sur les granitoïdes peralumineux (A/CNK ≥ 1)

« Muscovite-bearing peraluminous granites » (MPG) vs « cordierite-bearing peraluminous granites » (CPG)



CPG: "Hot and dry"

Fort taux de fusion partielle (~50%) d'une source metasédimentaire par déshydratation de la biotite - magma pauvre en eau (< 4%) et de forte viscosité qui facilite l'entrainement de minéraux péritectiques ou réstite depuis la source mais qui limite la ségrégation entre liquide et cristaux

➡ ***Potentiel métallogénique limité***

MPG: "Cold and wet"

Faible taux de fusion partielle (< 30%) d'une source metasédimentaire par déshydratation de la muscovite ou fusion hydratée – magma riche en eau (7-8%) et de faible viscosité qui facilite la ségrégation entre liquide et cristaux et donc la cristallisation fractionnée.

➡ ***Potentiel métallogénique significatif***

Aparté sur les granitoïdes peralumineux (A/CNK ≥ 1)

« Muscovite-bearing peraluminous granites » (MPG) vs « cordierite-bearing peraluminous granites » (CPG)

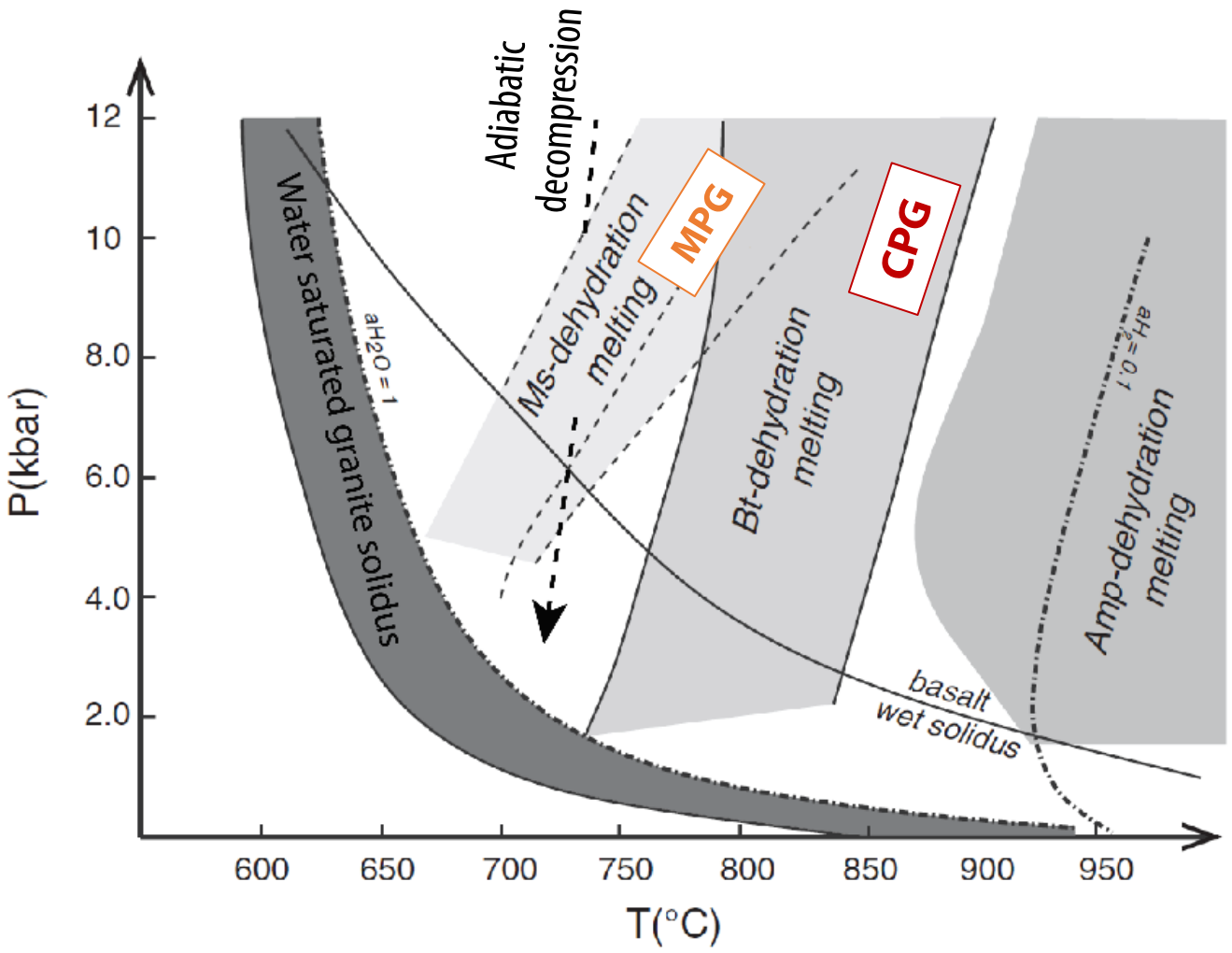


Diagramme P-T repris de Weinberg and Hasalová (2015)

CPG: "Hot and dry"

Fort taux de fusion partielle (~50%) d'une source metasédimentaire par déshydratation de la biotite - magma pauvre en eau (< 4%) et de forte viscosité qui facilite l'entrainement de minéraux péritectiques ou réstite depuis la source mais qui limite la ségrégation entre liquide et cristaux

➡ ***Potentiel métallogénique limité***

MPG: "Cold and wet"

Faible taux de fusion partielle (< 30%) d'une source metasédimentaire par déshydratation de la muscovite ou fusion hydratée – magma riche en eau (7-8%) et de faible viscosité qui facilite la ségrégation entre liquide et cristaux et donc la cristallisation fractionnée.

➡ ***Potentiel métallogénique significatif***

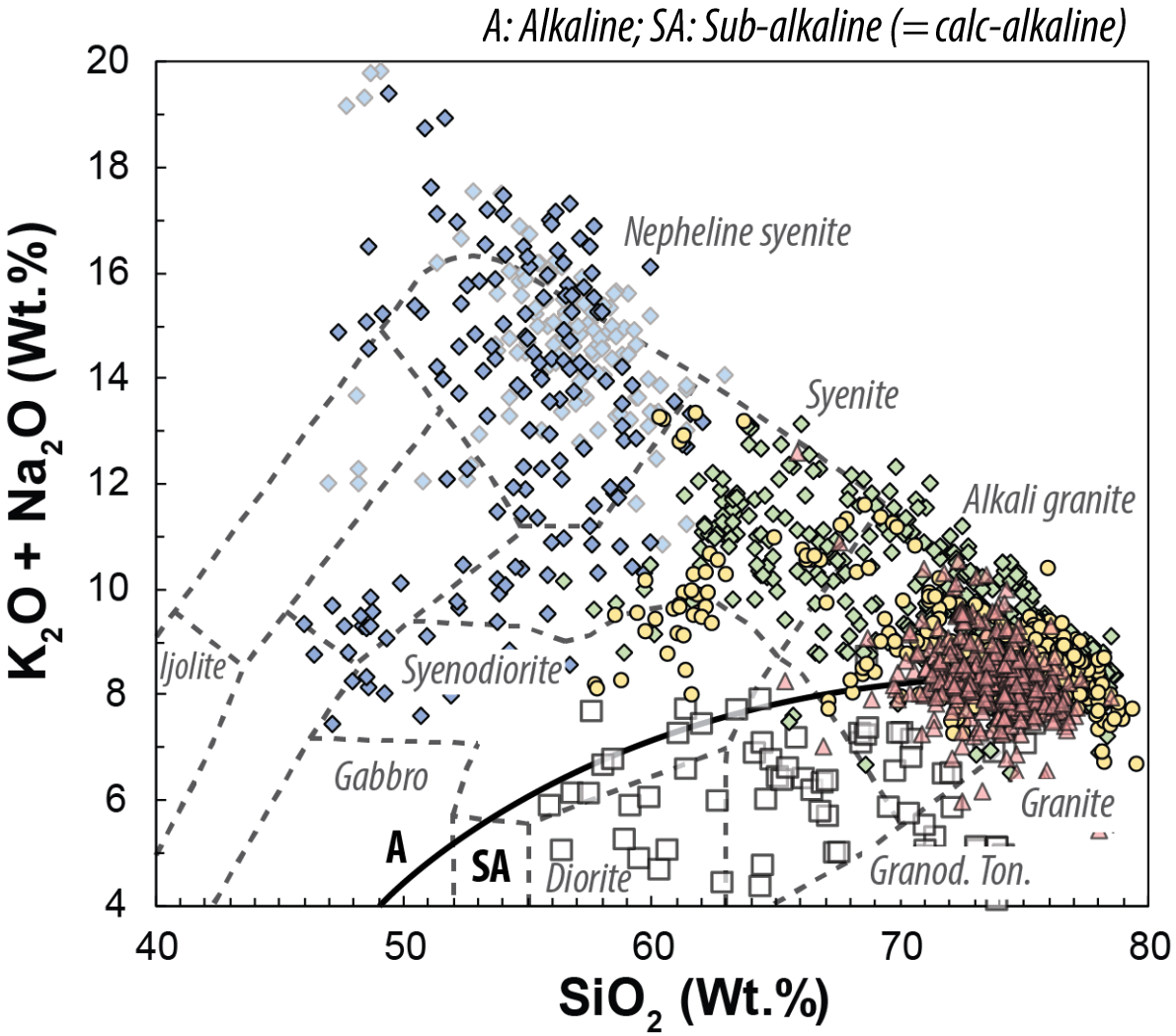
Discriminations géochimiques

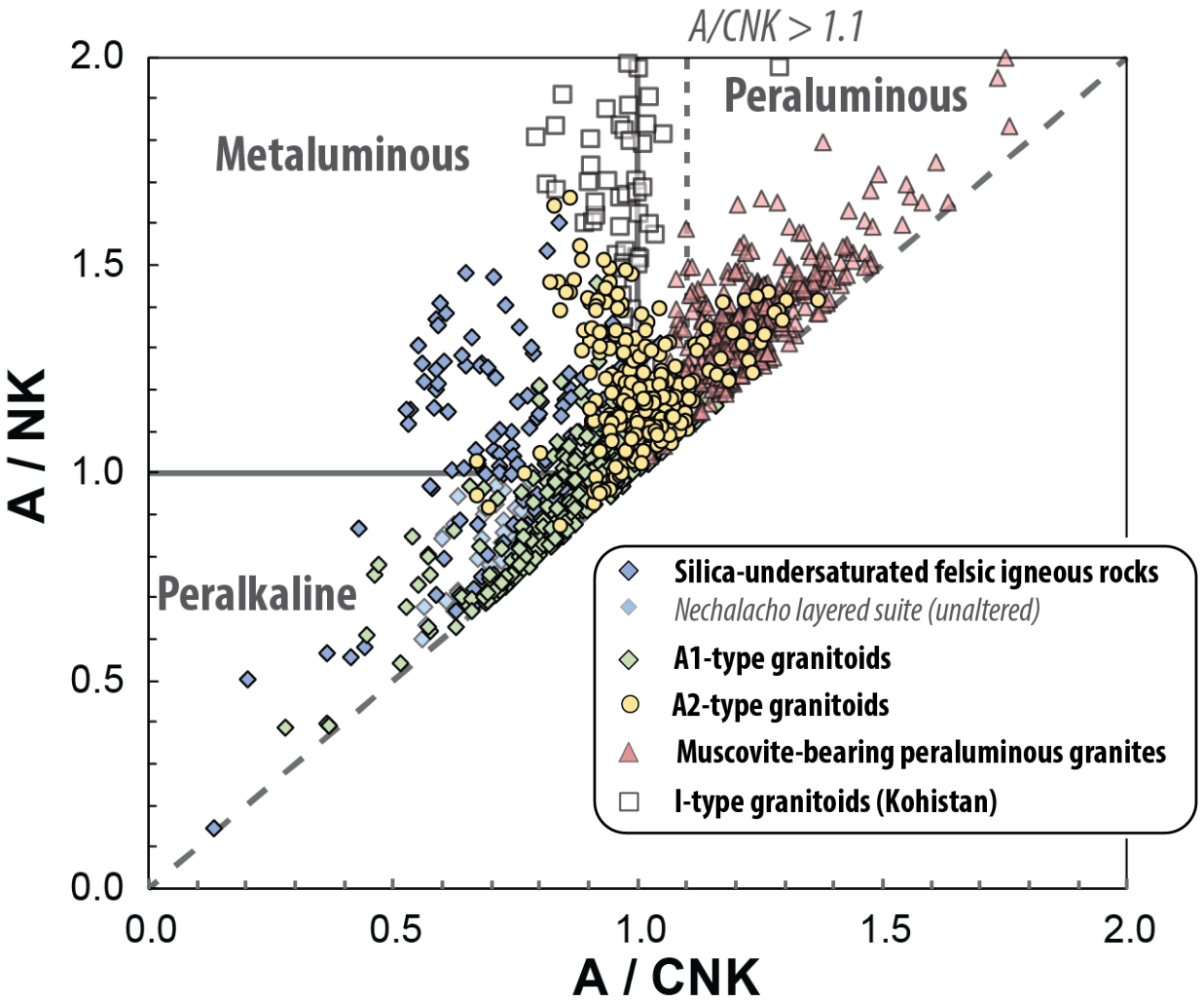
-

Concept et effet de la polymérisation

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

Ballouard et al. (2020)

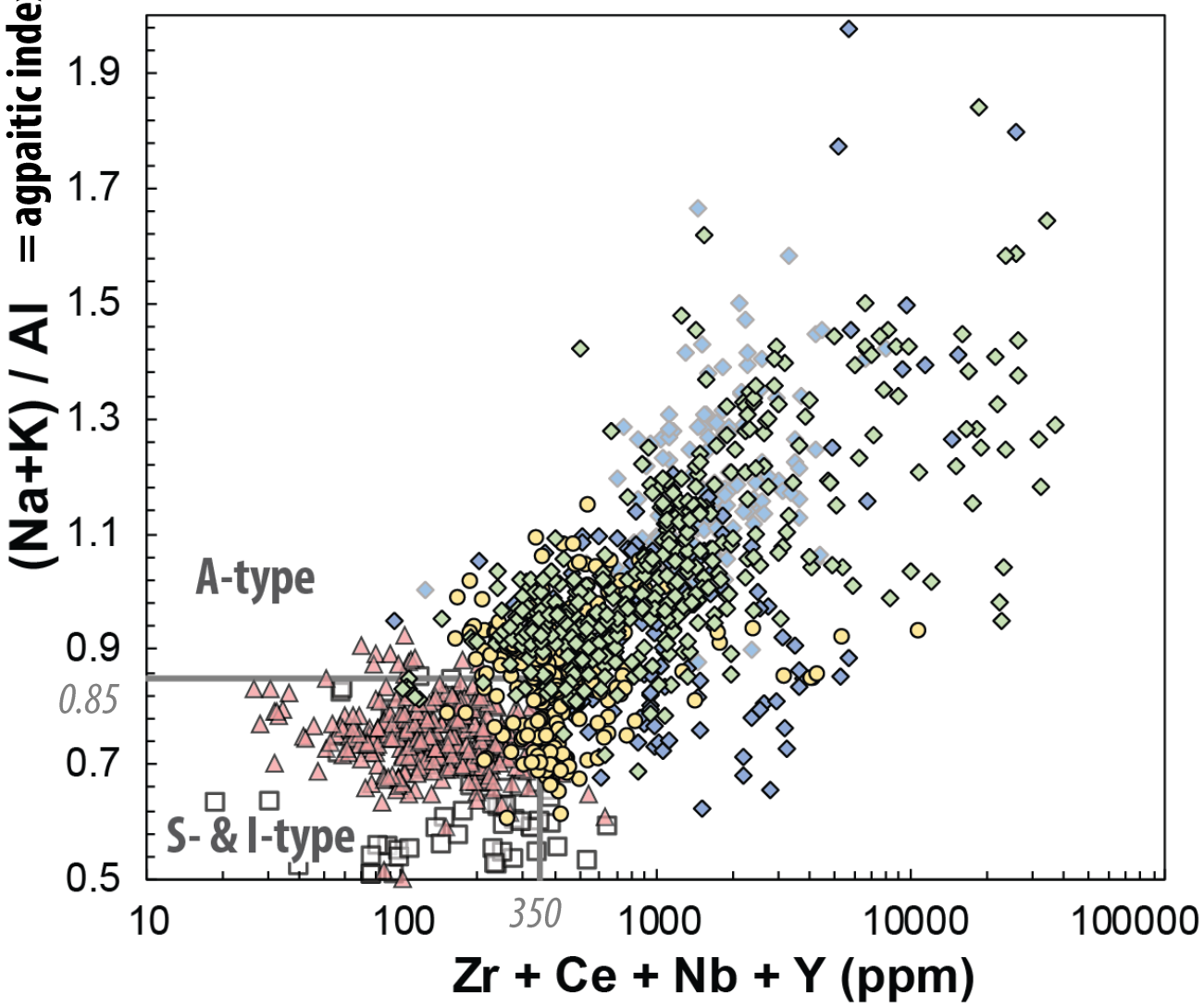




Total Alkalis versus SiO_2 (TAS) diagram (plutonic rocks; Cox et al., 1979; Wilson, 1989).
(le %.pds d'oxides est recalculé sur une base anhydre: on ne prend pas en compte la perte au feu)

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

Ballouard et al. (2020)

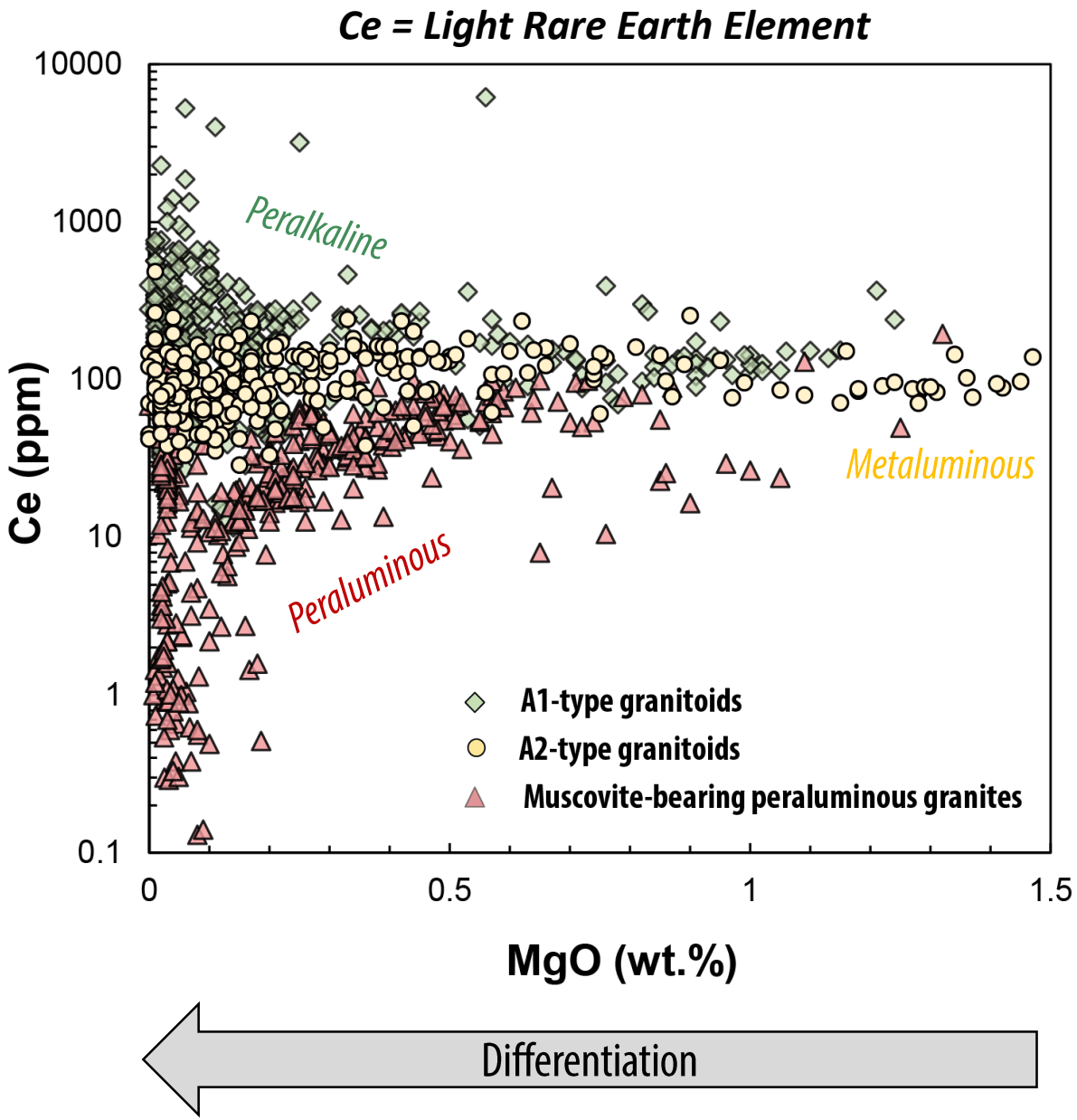


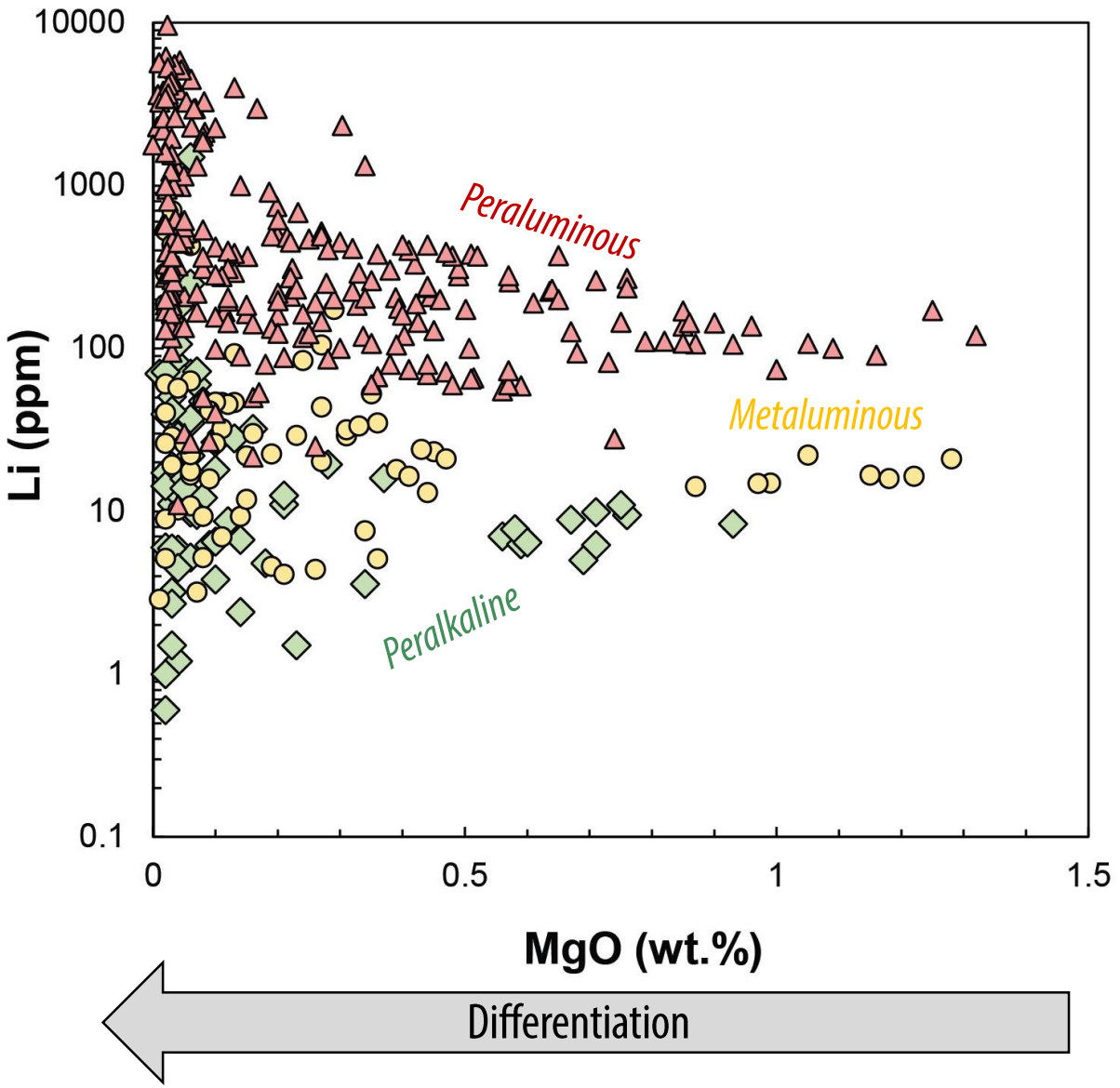
Caractéristique des granitoïdes de types A et syénites à feldspathoïdes: l'enrichissement en REE et HFSE

- **Silica-undersaturated felsic igneous rocks**
- *Nechalacho layered suite (unaltered)*
- **A1-type granitoids**
- **A2-type granitoids**
- **Muscovite-bearing peraluminous granites**
- **I-type granitoids (Kohistan)**

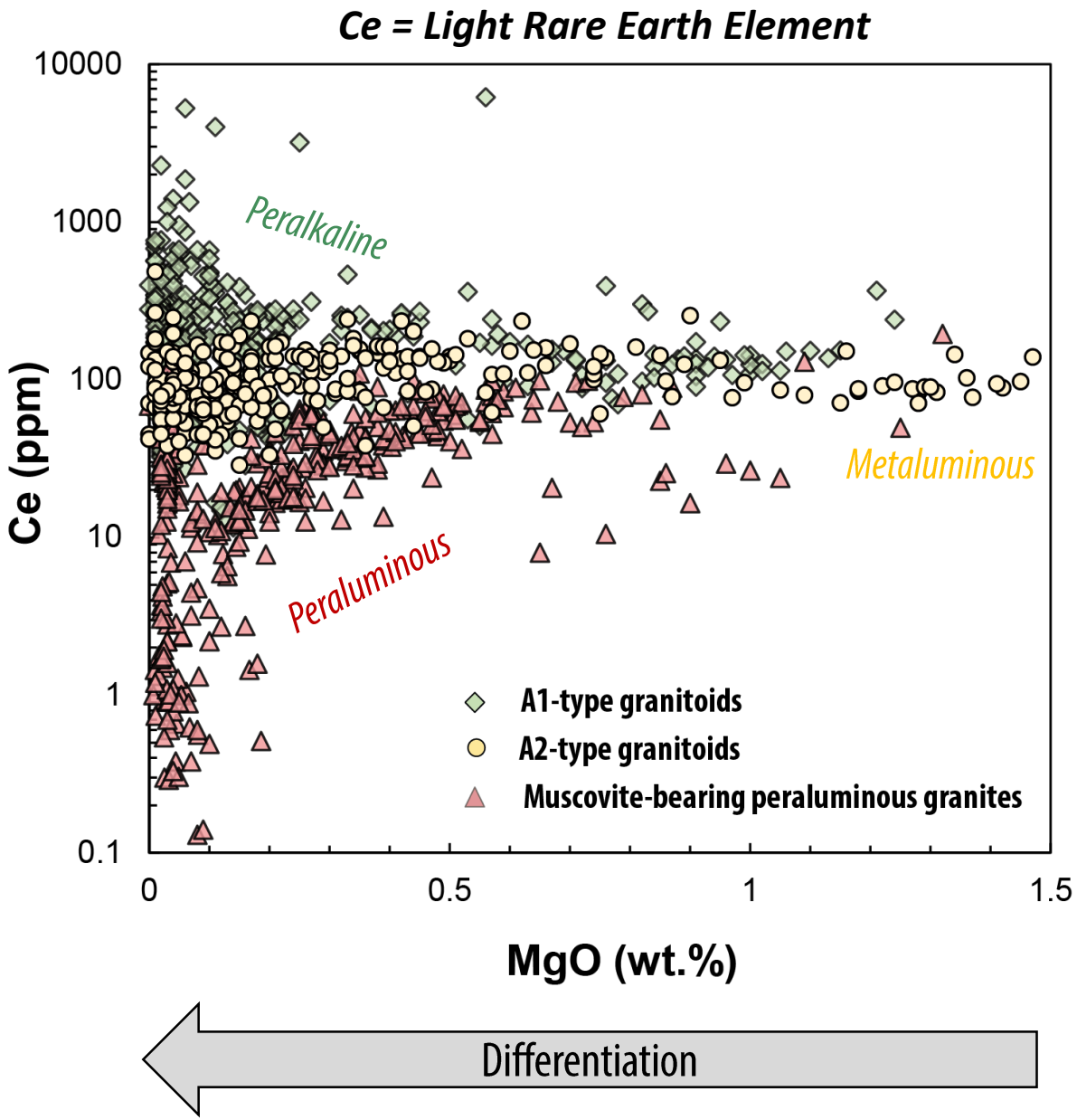
Agpaitic index (Na+K)/Al (molar proportion) vs Zr+Ce+Nb+Y (ppm) – Whalen et al. (1987)

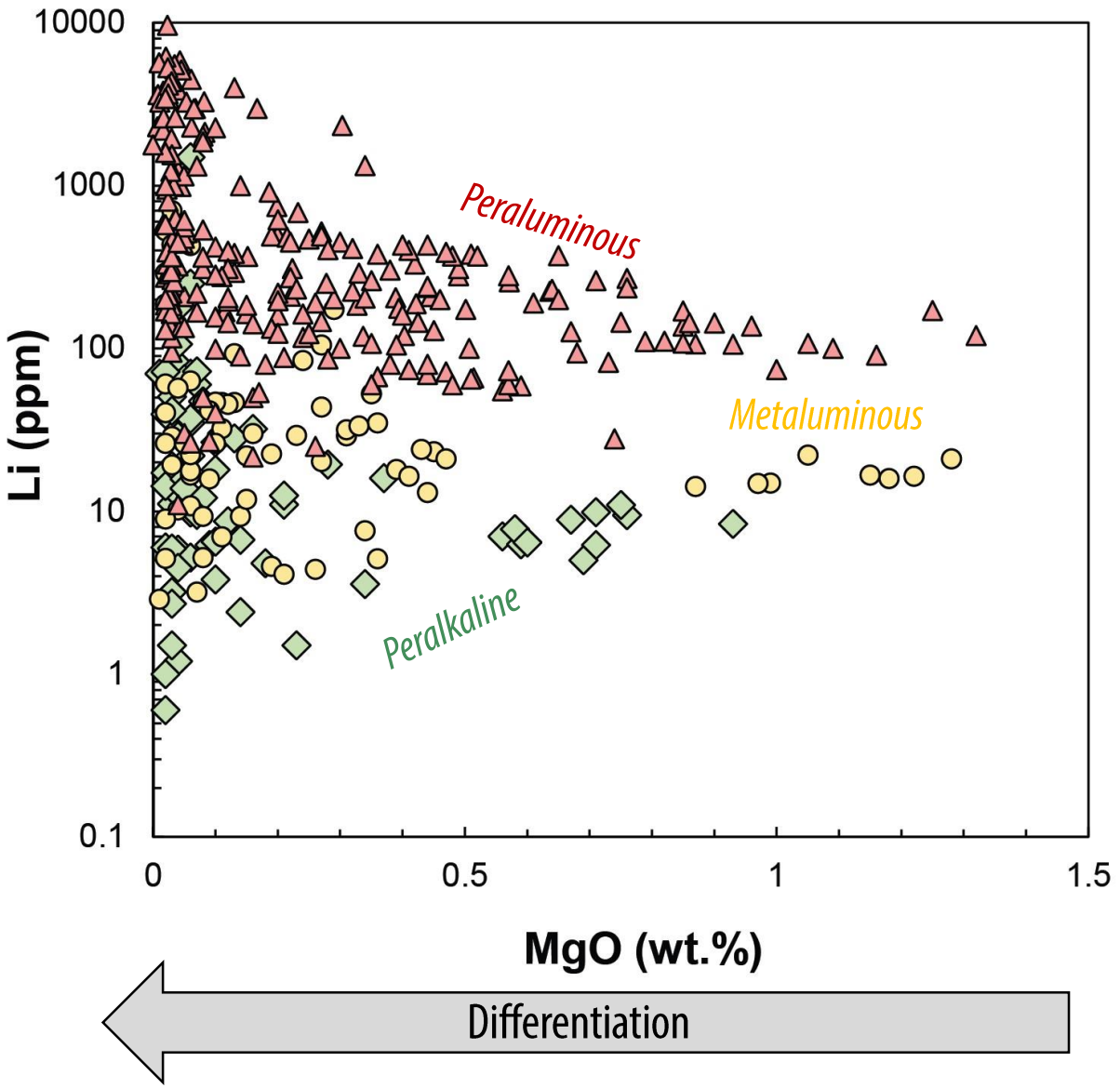
Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares





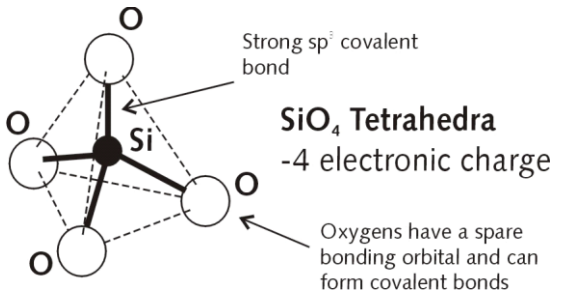
Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares





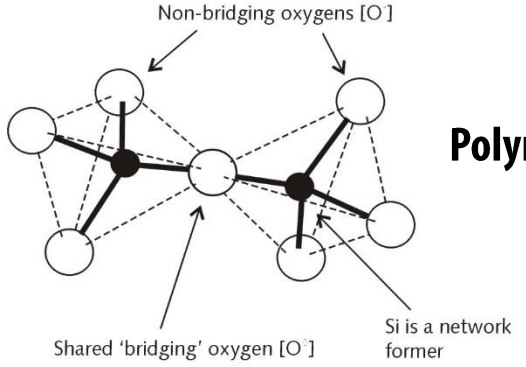
Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés

La viscosité des liquides silicatés et la solubilité des éléments traces dans ces liquides silicatés va être en grande partie contrôlée par la structure atomique de ces liquides. La structure des liquides silicatés (et minéraux silicatés) est basée autour des tétraèdres de silices qui consiste en un atome de silice (Si^{4+}) entouré de 4 oxygènes (O^{2-}).



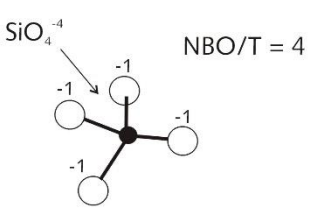
Polyèdre

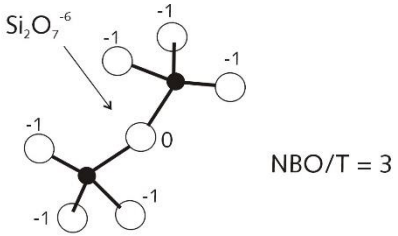
Les tétraèdres de silice vont pouvoir se lier entre eux en partageant un atome d'O pour former un réseau 3D de tétraèdres. L'atome de Si sur lequel est basé le réseau est vu comme un formeur de réseau ou « **network former** ». Les atomes d'O partagés entre les tétraèdres sont des « **bridging oxygen ou BO**» et les atomes d'O non-partagés sont nommés « **non-bridging oxygen ou NBO** »



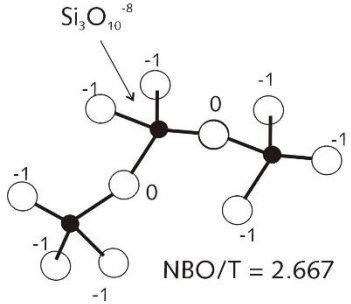
Polymère

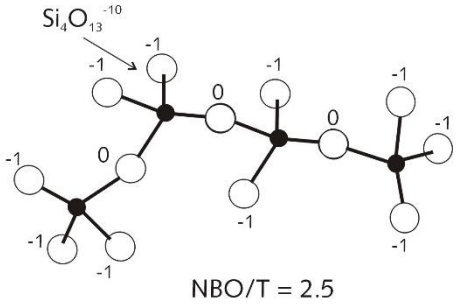
Pour construire un réseau silicaté, nous devons ajouter des tétraèdres de silices a notre structure et donc transformer les NBO en BO. Ce processus de créer de plus grosses molécules en ajoutant de façon répétée des petites molécules s'appelle la **polymérisation** et le réseau crée s'appelle un polymère. Les propriétés physiques (et chimiques) des magmas sont contrôlés par la polymérisation. Par exemple, **plus un magma est polymérisé, plus il est visqueux!**





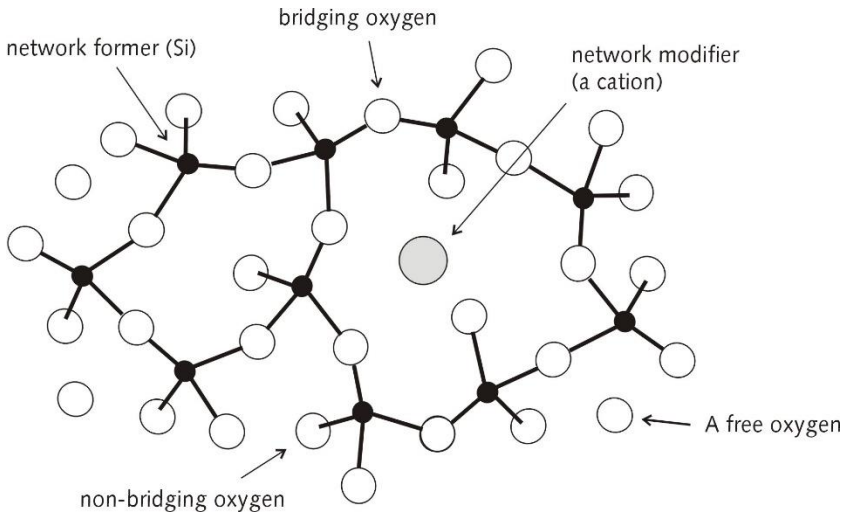
Le degré de polymérisation du liquide est quantifiable en mesurant le rapport du nombre de « non-bridging oxygens » ou NBOs sur le nombre de tétraèdre (T) : **NBO/T**.
La valeur de NBO/T diminue quand le degré de polymérisation augmente.





Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés

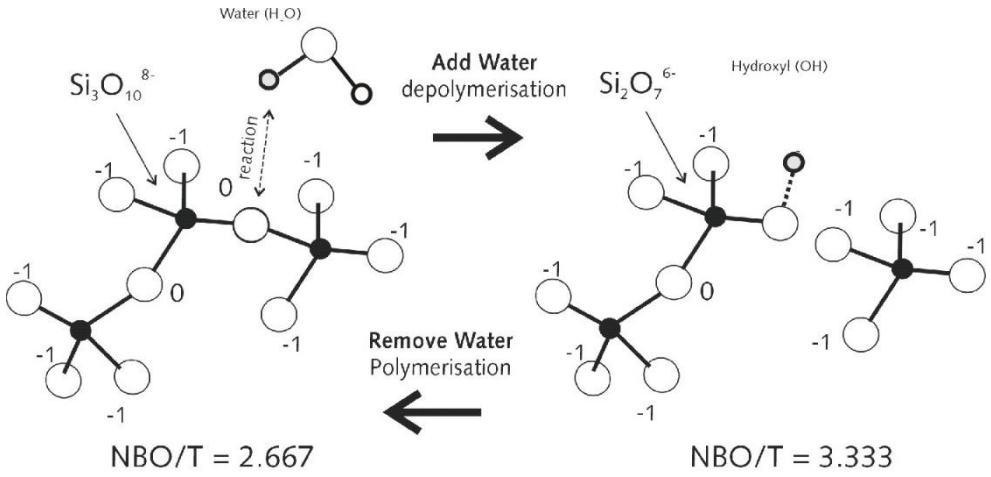
Les atomes qui vont gêner la polymérisation du liquide et la structuration du réseau sont appelés des modificateurs de réseau **(« network modifier »)**. Ils incluent Fe, Mg, Na, K, Ca, P, … Ce sont quasi tous les éléments sauf **Si et Al qui sont les deux principaux « network former »**, Al^{3+} se substituant a Si^{4+} dans le tétraèdre.



Ainsi, **les magmas riches en Fe, Mg, Na, K et pauvres en Si et Al vont être peu polymérisés**. C'est pour ca que les liquides basaltiques sont moins visqueux que les liquides granites! De même, un granite peralcalin va être moins polymérisé et moins visqueux qu'un granite peralumineux car moins riche en Al (et plus chaud…)

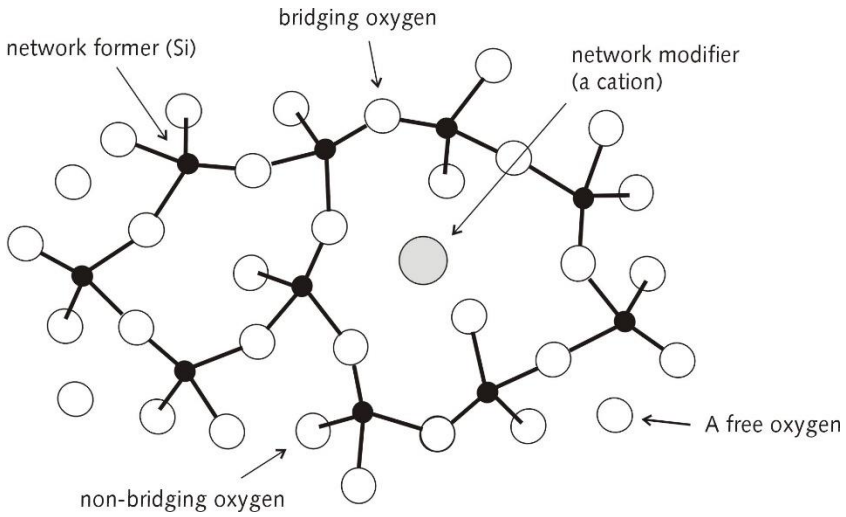
Les autres paramètres qui vont jouer sur la polymérisation sont:

- **la température:** décroît la polymérisation (augmente l'énergie cinétique)
- **la pression:** augmente la polymérisation
- **La concentration en eau:** décroît la polymérisation
- **Fugacité en oxygène (**proportion d'oxygène libre) : décroît la polymérisation



Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés

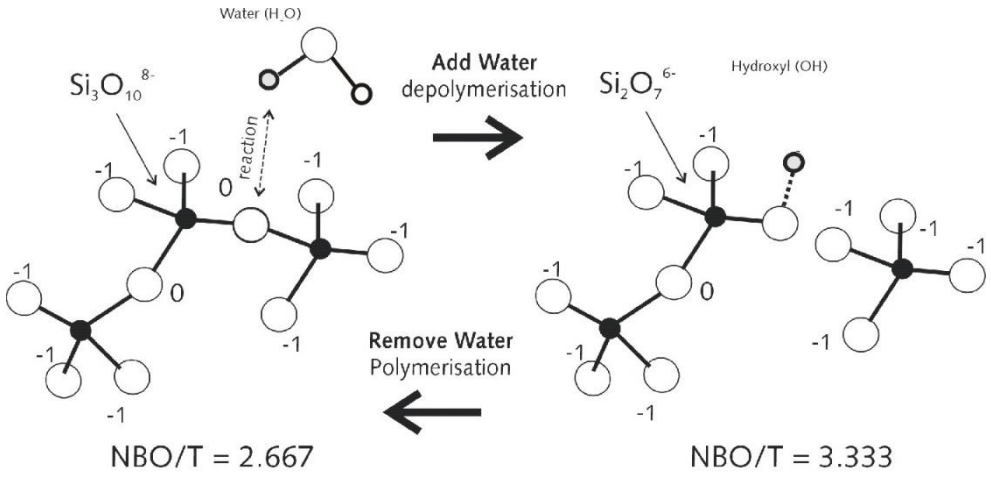
Les atomes qui vont gêner la polymérisation du liquide et la structuration du réseau sont appelés des modificateurs de réseau **(« network modifier »)**. Ils incluent Fe, Mg, Na, K, Ca, P, . . . Ce sont quasi tous les éléments sauf **Si et Al qui sont les deux principaux « network former »**, Al^{3+} se substituant a Si^{4+} dans le tétraèdre.



Ainsi, **les magmas riches en Fe, Mg, Na, K et pauvres en Si et Al vont être peu polymérisés**. C'est pour ca que les liquides basaltiques sont moins visqueux que les liquides granites! De même, un granite peralcalin va être moins polymérisé et moins visqueux qu'un granite peralumineux car moins riche en Al (et plus chaud. . .)

Les autres paramètres qui vont jouer sur la polymérisation sont:

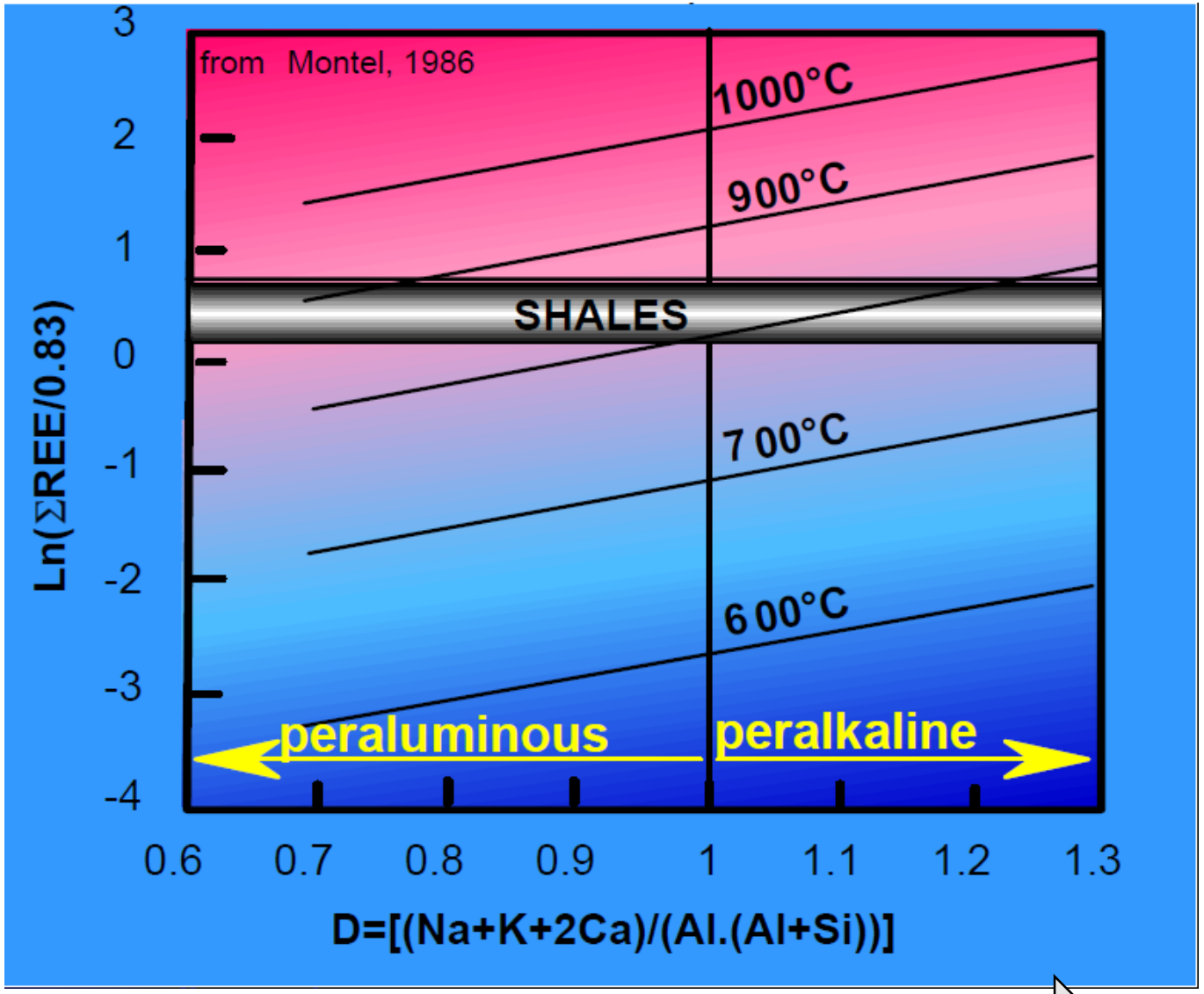
- **la température:** décroît la polymérisation (augmente l'énergie cinétique)
- **la pression:** augmente la polymérisation
- **La concentration en eau:** décroît la polymérisation
- **Fugacité en oxygène (**proportion d'oxygène libre) : décroît la polymérisation



Rapport avec les métaux rares ??

C'est le degré polymérisation qui va en grande partie contrôler la solubilité des HFSE et REE dans les magmas

Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés



NBO/T

Degré de polymérisation

Solubilité de la monazite -(Ce, La, Th)PO_4 dans les liquides silicatés

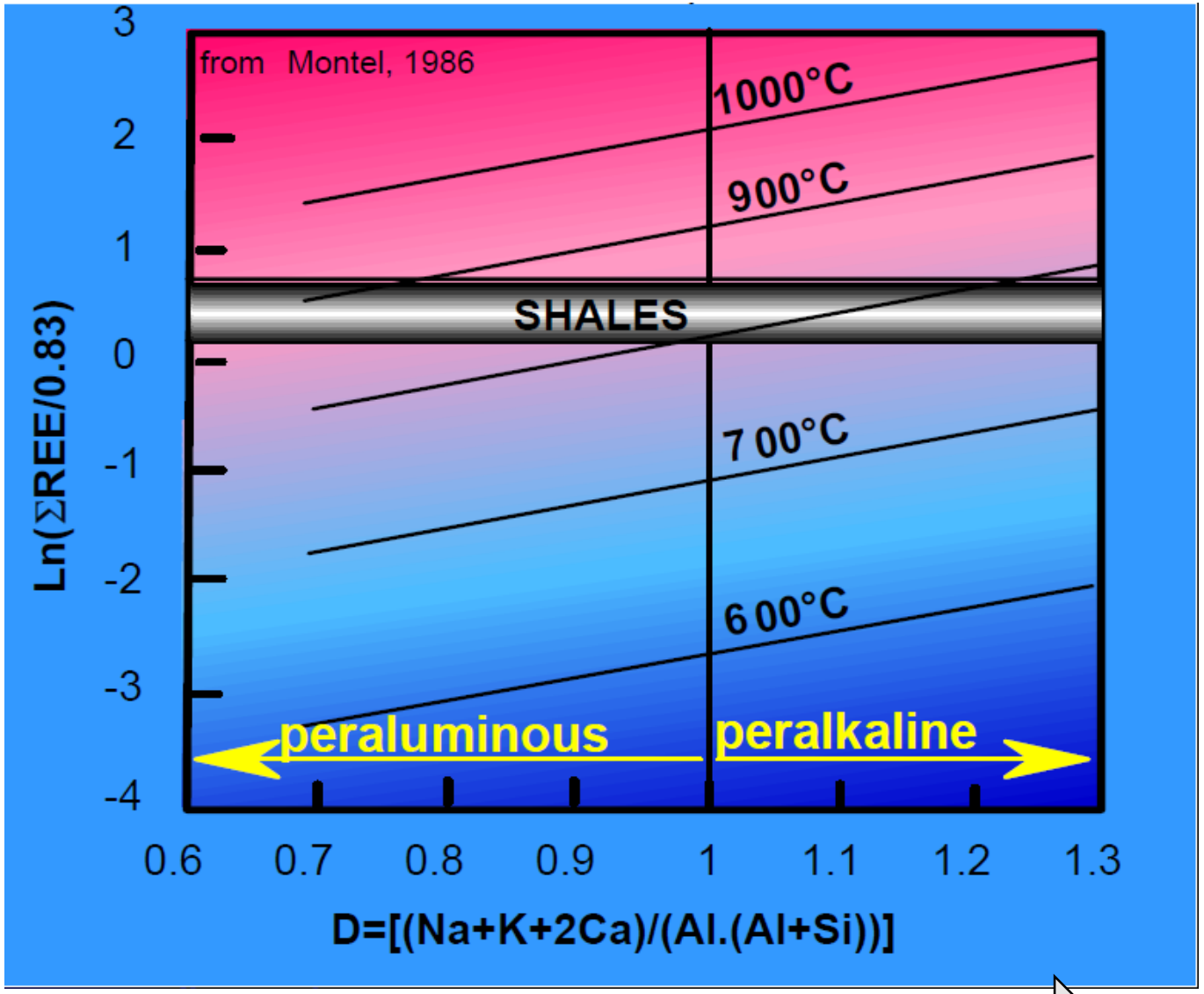
(données expérimentales, Montel 1986)

Concentration maximale en REE d'un liquide silicaté
en en fonction de sa composition et température

$$\mathrm{Ln}\,(REE_t) = 9.50 + 2.34\,D + 0.3879\,\sqrt{H_2O} - 13318\,/\,T$$

(Montel 1993)

Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés



NBO/T

Degré de polymérisation

Solubilité de la monazite -(Ce, La, Th)PO_4 dans les liquides silicatés

(données expérimentales, Montel 1986)

Concentration maximale en REE d'un liquide silicaté
en en fonction de sa composition et température

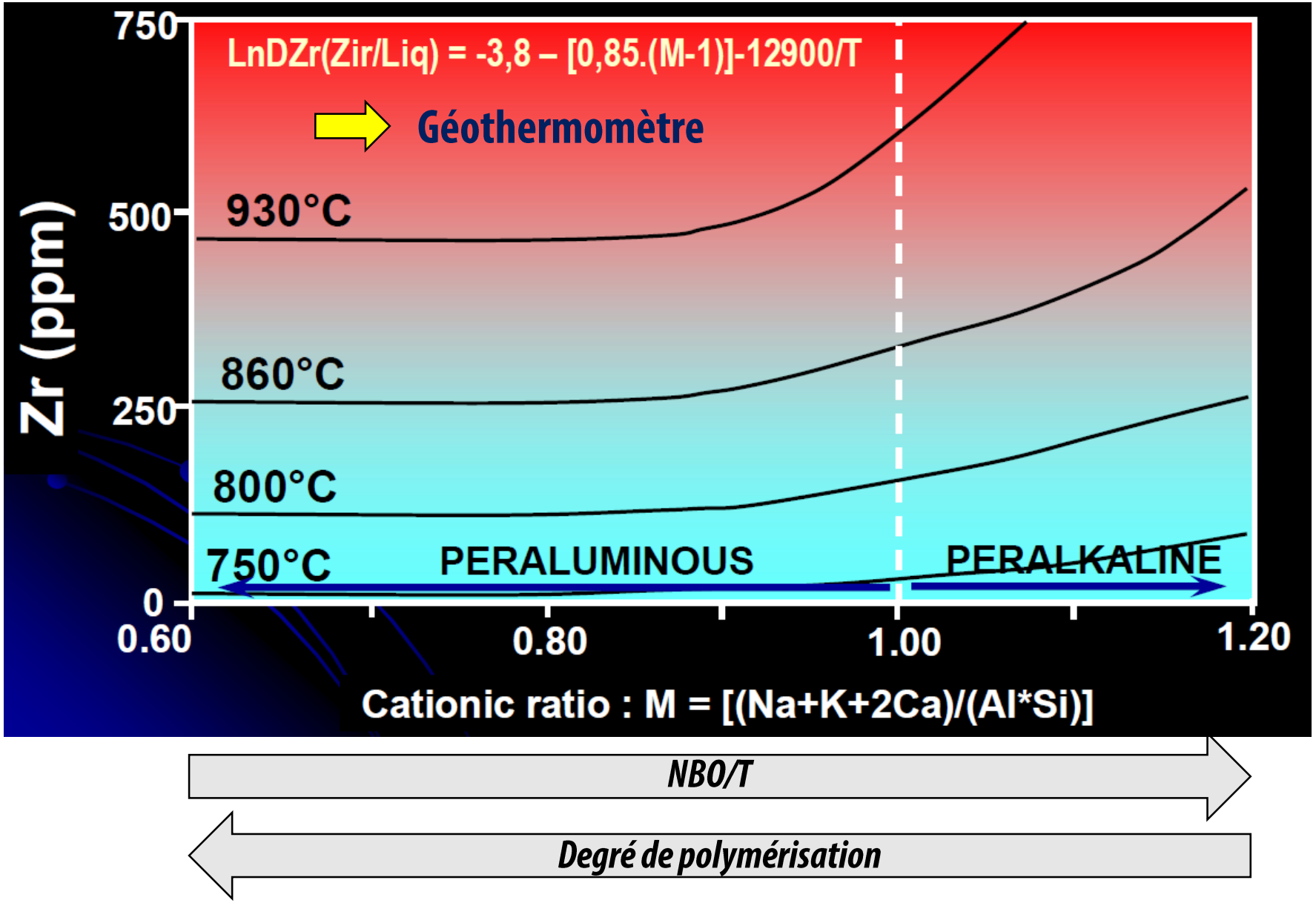
$$\mathrm{Ln}\,(REE_t) = 9.50 + 2.34\,D + 0.3879\,\sqrt{H_2O} - 13318\,/\,\mathbf{T}$$

(Montel 1993)

Géothermomètre

Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés

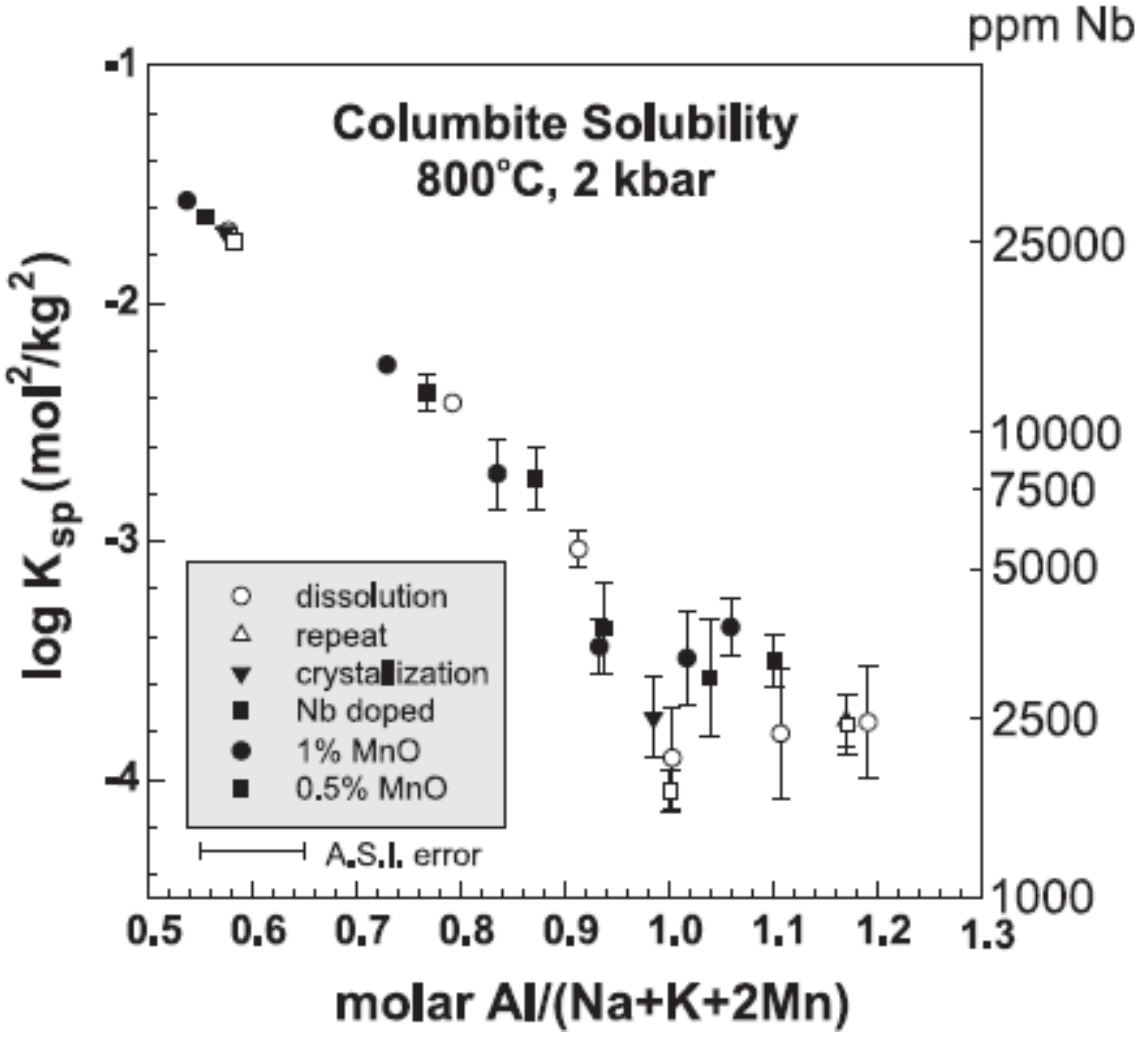
Solubilité du zircon-$ZrSiO_4$ dans les liquides silicatés *(données expérimentales, Watson et Harrison 1983)*



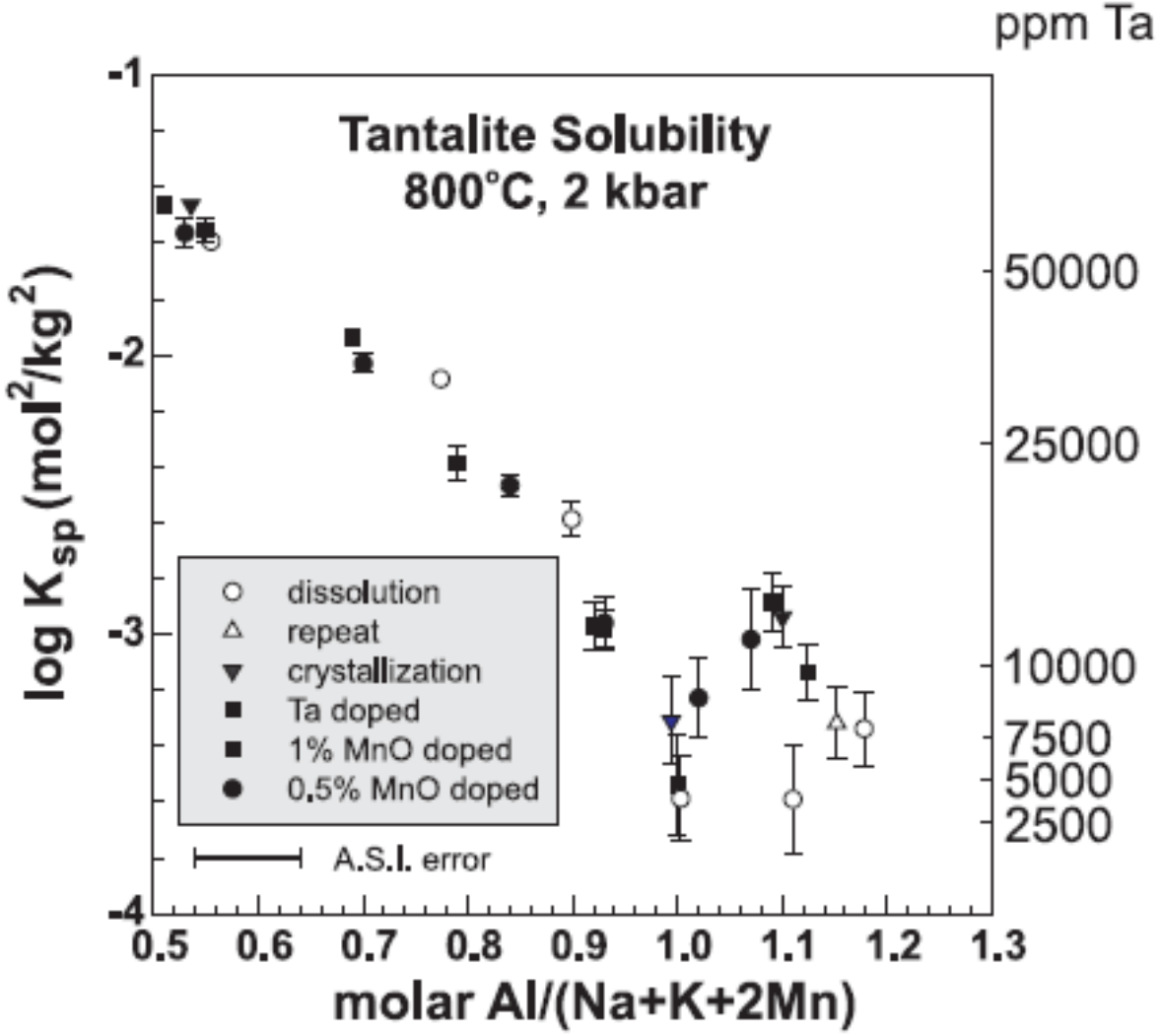
Aparté sur la solubilité des métaux dans les liquides silicatés

Solubilité de la colombite-Mn ($MnNb_2O_6$) et tantalite-Mn ($MnTa_2O_6$) dans les liquides silicatés

(données expérimentales, Linnen and Cuney, 2005)

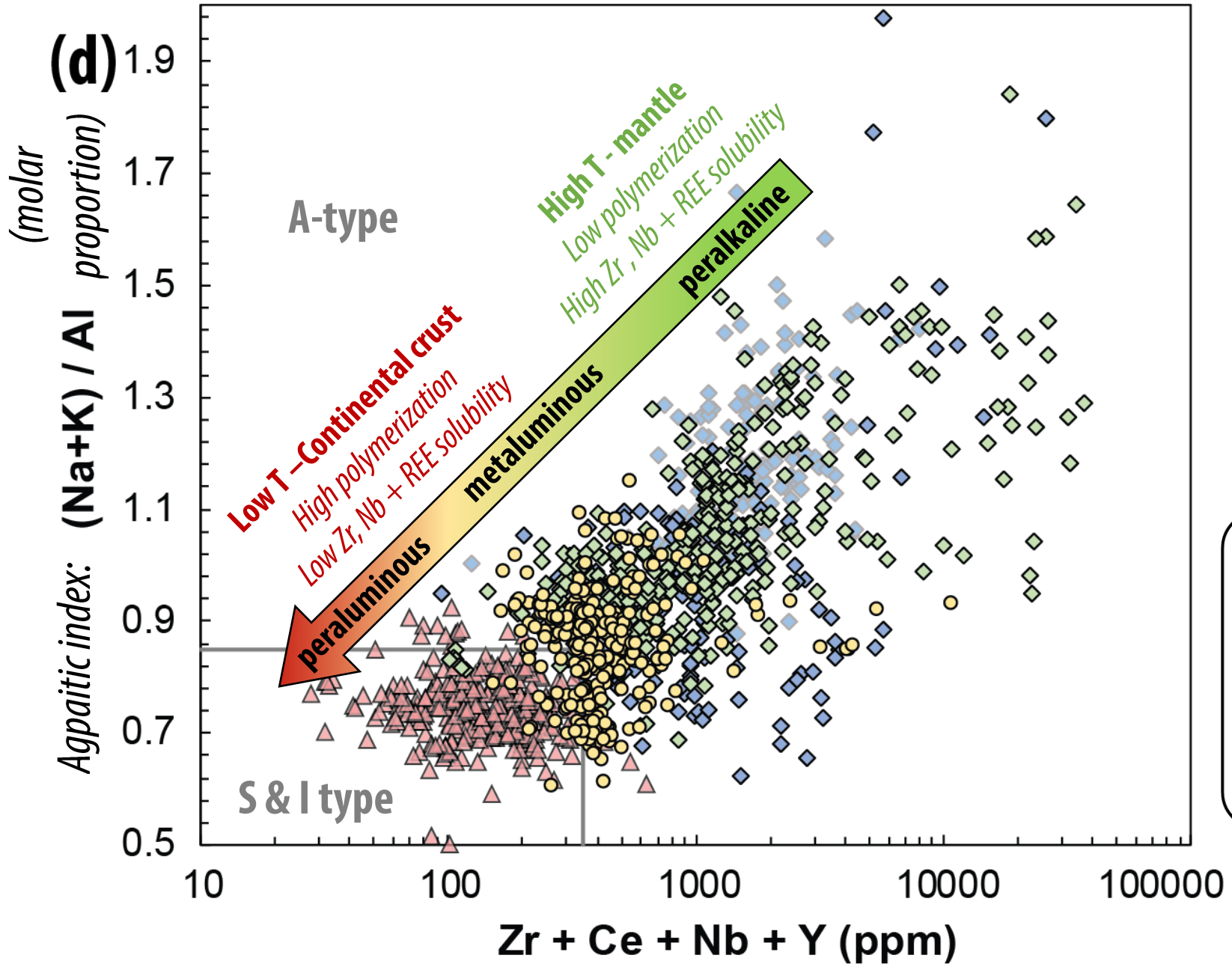


Peralcalin ⟷ Peralumineux



Peralcalin ⟷ Peralumineux

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares



Le caractère enrichie en HFSE et REE des lignée de type A et sous-saturées en silice reflète la nature de leur source ainsi que la température et composition de leur magma parent (la faible polymérisation de leur magma implique une forte solubilité des phases porteuses de REE et HFSE).

- **Silica-undersaturated felsic igneous rocks**
- *Nechalacho layered suite (unaltered)*
- **A1-type granitoids**
- **A2-type granitoids**
- **Muscovite-bearing peraluminous granites**

Exercice “spectre de terres rares”

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

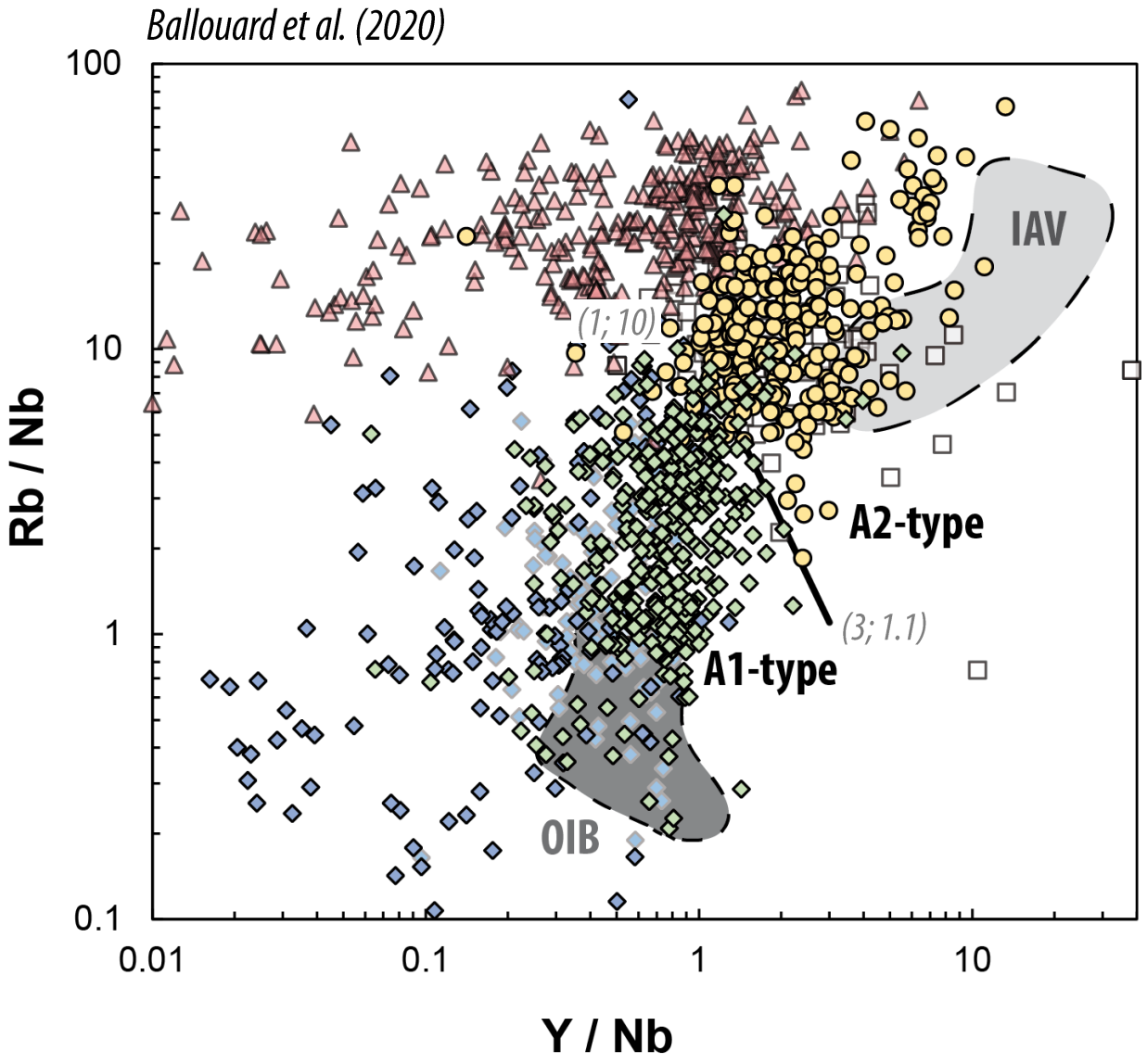


Diagramme de discrimination des granites type A (Eby 1992).

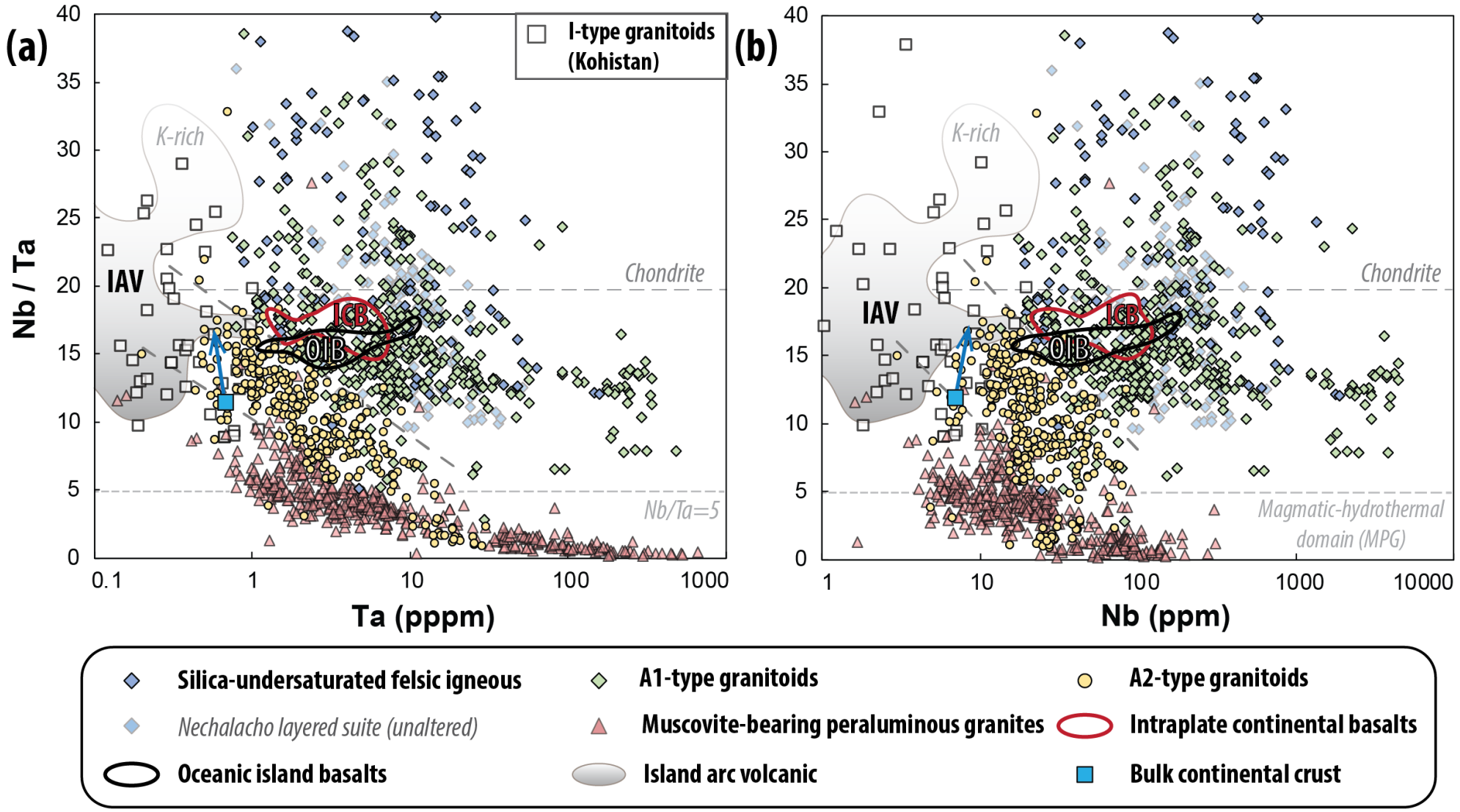
- **Silica-undersaturated felsic igneous rocks**
- *Nechalacho layered suite (unaltered)*
- **A1-type granitoids**
- **A2-type granitoids**
- **Muscovite-bearing peraluminous granites**
- **I-type granitoids (Kohistan)**

IAV: Island arc volcanic rocks
OIB: Oceanic island basalts

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

Ballouard et al. (2020)

Autres diagrammes de discriminations

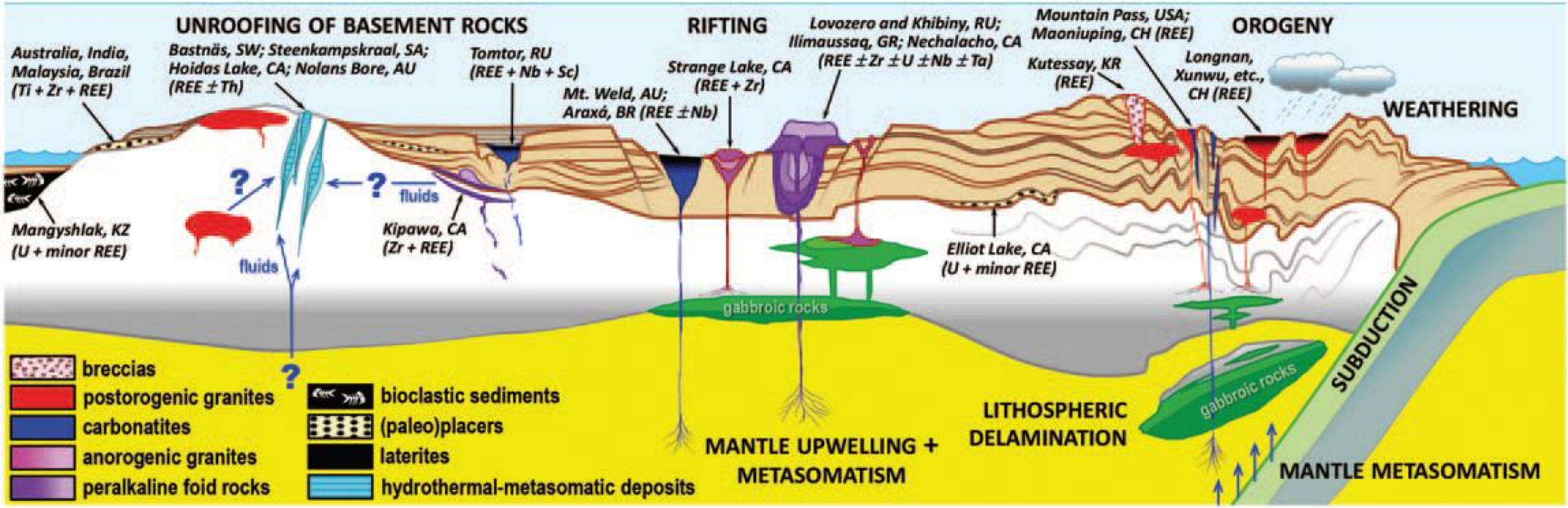


*Oblique dashed lines delimit the common fields of silica-undersaturated + A1-type igneous rocks and A2-type igneous rocks ((**a**) Ta = 0.3, 20; Nb/Ta = 21.5, 6.5; (**b**) Nb= 8, 100; Nb/Ta = 22, 8) as well as A2-type igneous rocks and MPG ((**a**) Ta= 0.2, 9; y = 15.5, 3; (**b**) Nb= 3, 40; Nb/Ta= 16, 3)*

Le magmatisme felsique à potentiel à métaux rares

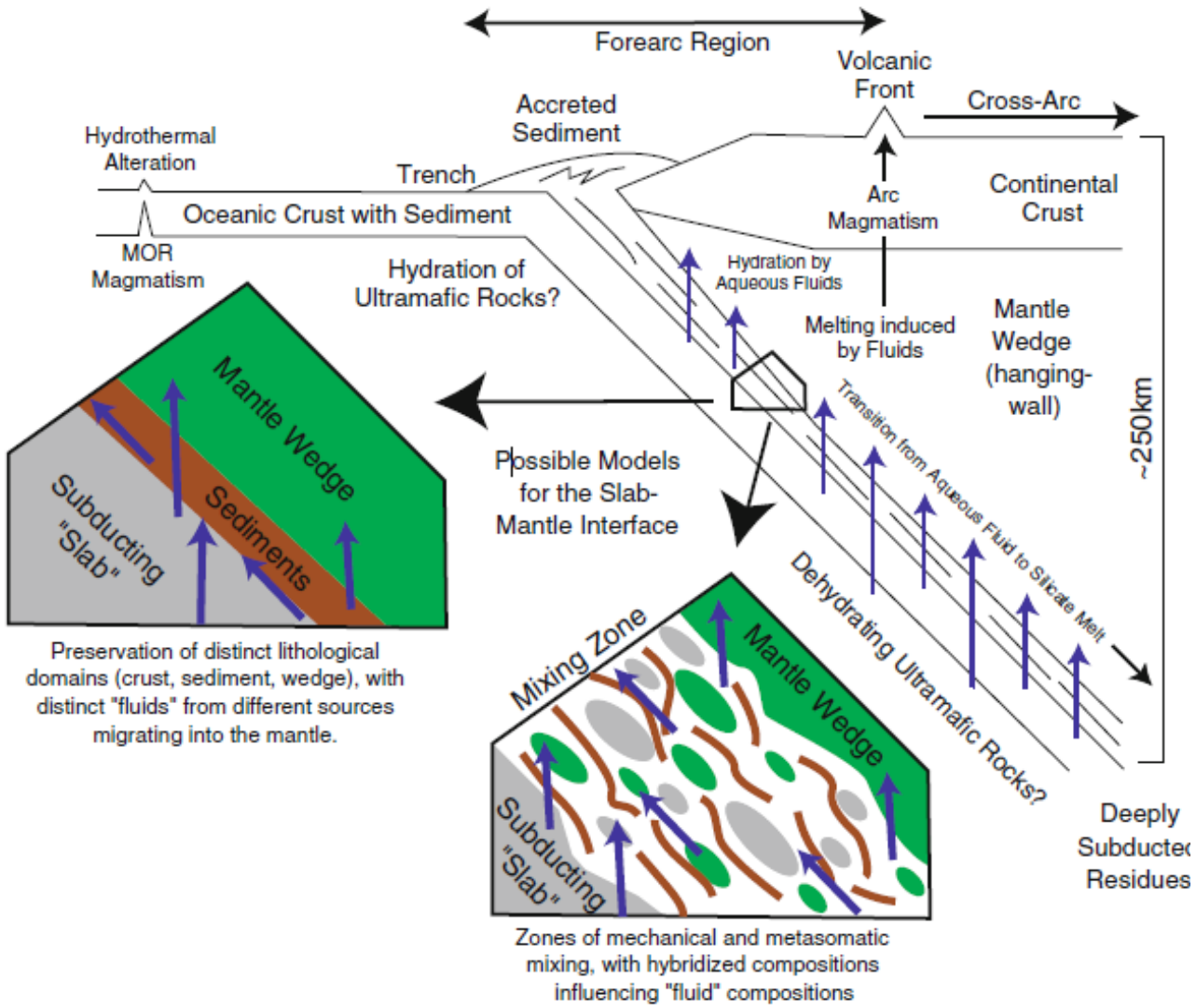
A1-type granite + nepheline syenites (metaluminous – peralkaline) + carbonatites

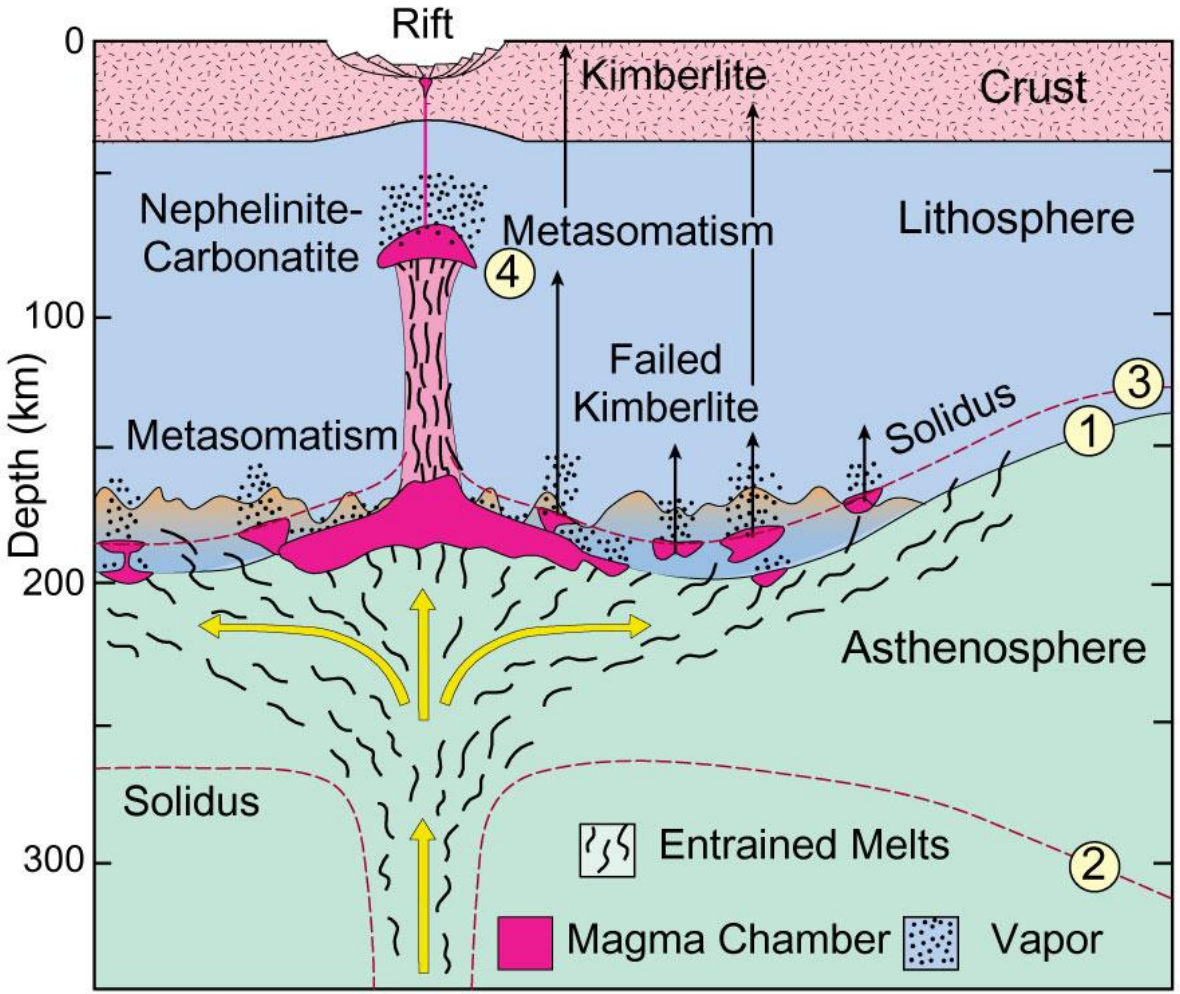
A2-type granites (metaluminous –peraluminous)



Major REE deposit types in a tectonic context (Chakhmouradian and Wall, Elements, 2012)

« Melt- vs fluid-related mantle metasomatism »





After Wyllie et al. 1990

Bebout et al. 2013

Les différents types et leurs caractéristiques

Les lignées/suites magmatiques felsiques à potentiel à métaux rares

Li-Cs-Ta-Sn deposits

Nb-REE-Zr-Y-Th deposits

Highly peraluminous leucogranites

Two-mica or muscovite-bearing peraluminous granites (MPG)

~S-type magmatism

&

Li–Cs–Ta (LCT) pegmatites

Metaluminous to slightly peraluminous granites and syenites

&

Nb-Y-F (NYF) pegmatites

= A2-type (KCG) magmatism

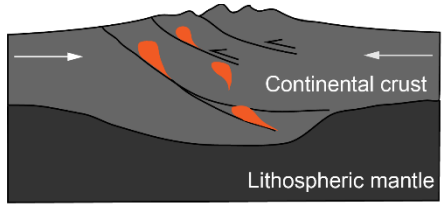
Peralkaline to metaluminous granites and (feldspathoid) syenites

&

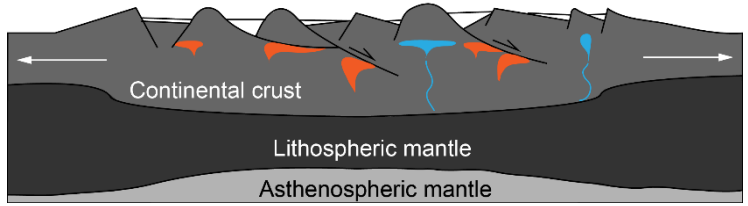
Nb-Y-F (NYF) pegmatites

= A1-type (PAG) magmatism

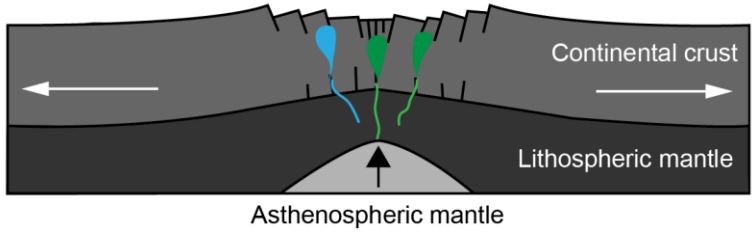
Continental collision



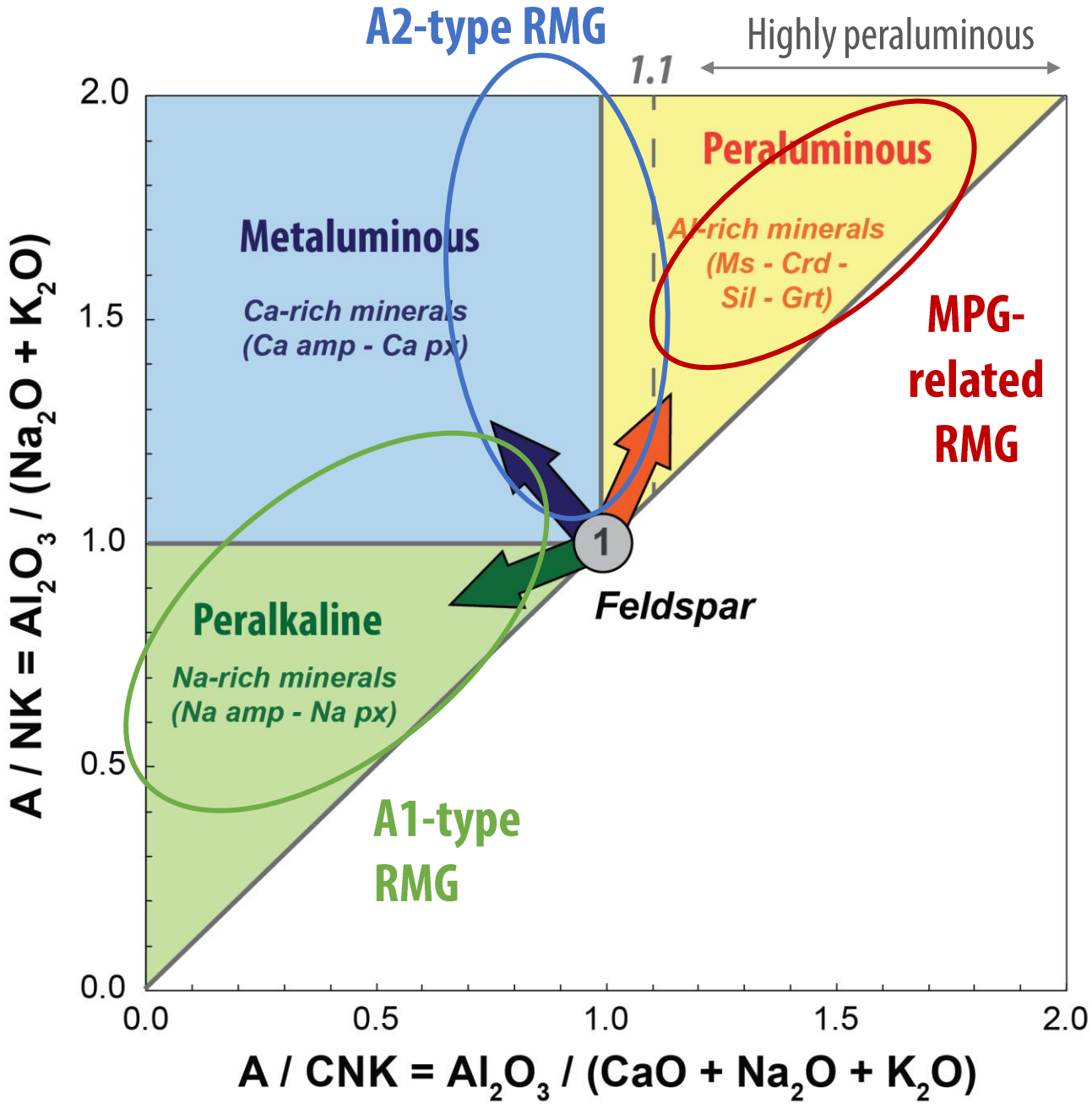
Late-orogenic extension



Continental rifting



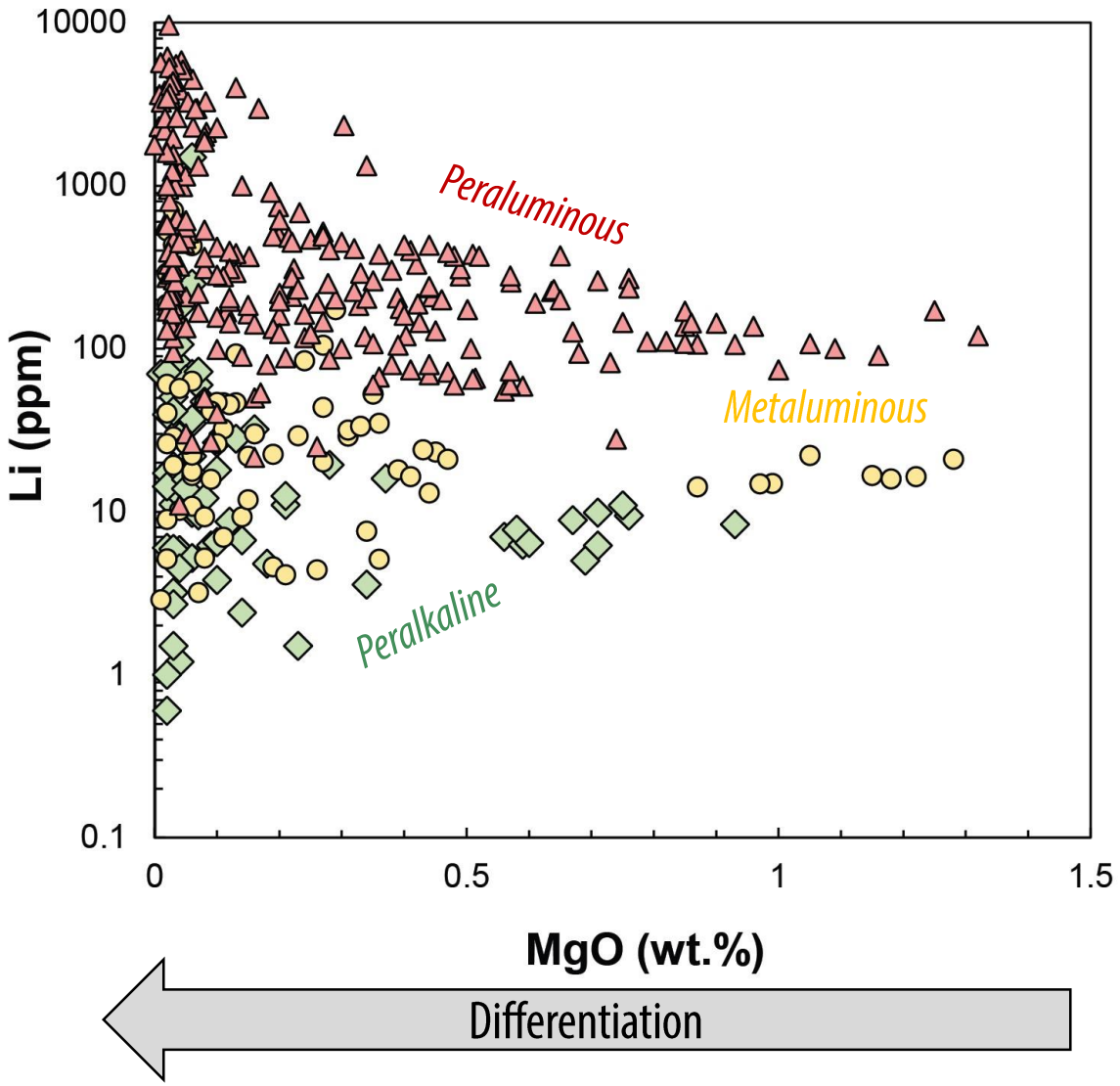
Les granites à métaux rares

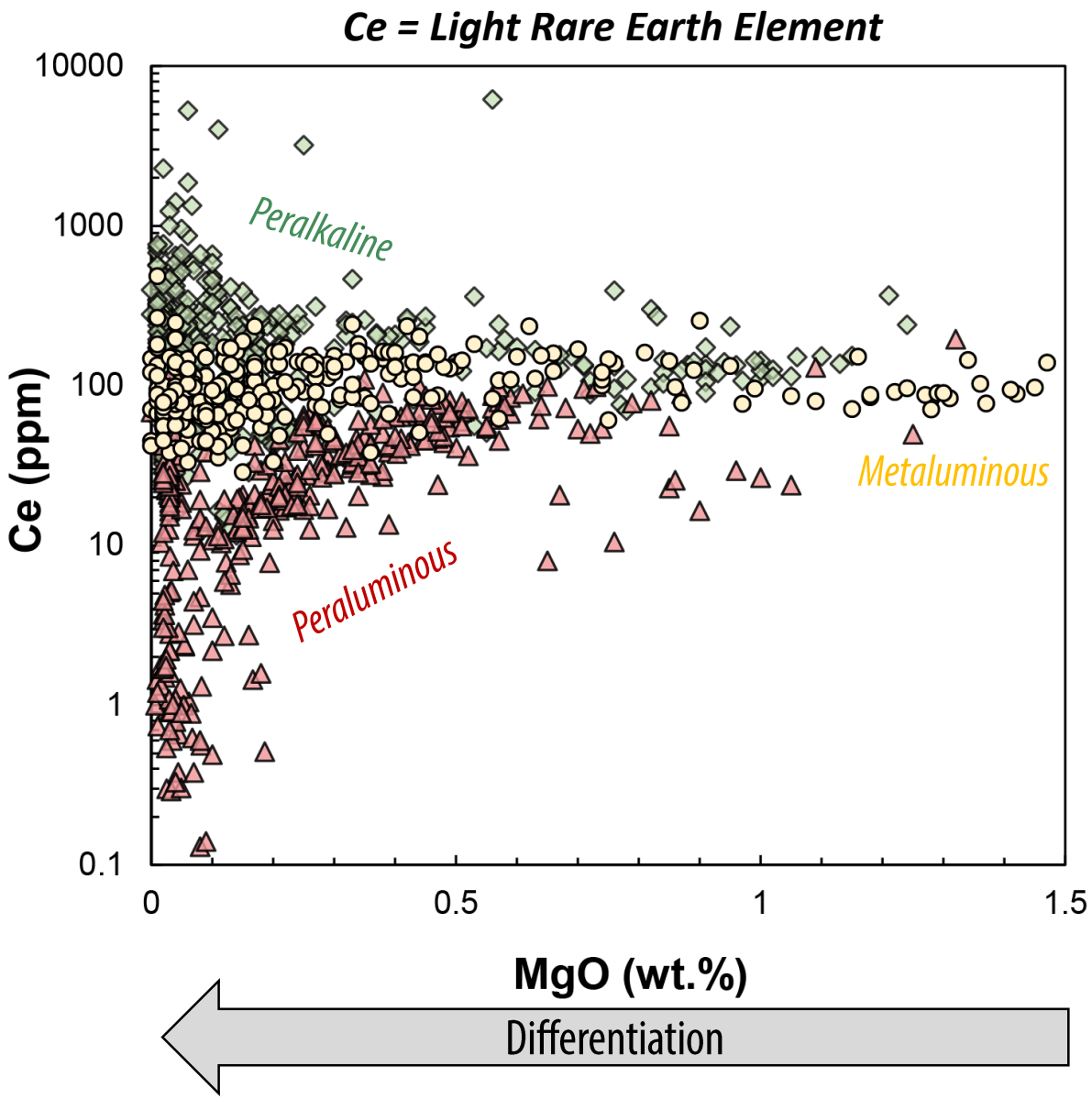


Les granites à métaux rares *(Rare metal granites-RMG)* représentent des intrusions de généralement petite taille interprétées comme les termes les plus évolués d'une série magmatique saturée en silice . Ils se différencient des autres granites par la présence d'une minéralisation disséminée en métaux rares (e.g. oxides de Nb-Ta) indiquant que leur magma parent a atteint la saturation en métaux rares au stade « magmatique ». Ils se mettent en place dans des niveaux crustaux supérieures, voir sub-volcaniques et peuvent avoir des équivalents volcaniques.

Ils ont une composition variable allant de peralcaline, métalumineuse à fortement peralumineuse.

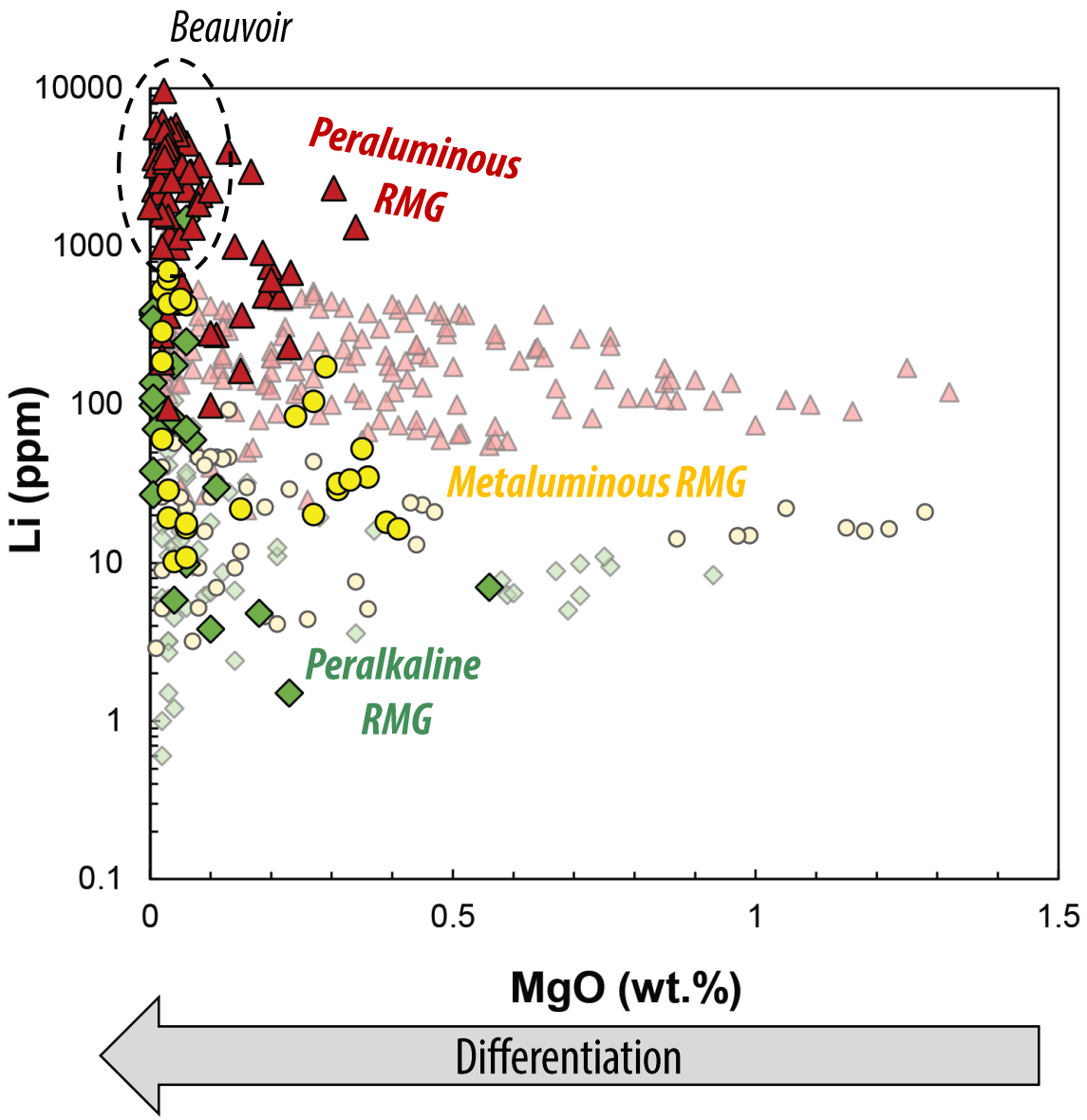
Les lignées/suites magmatiques felsiques à métaux rares

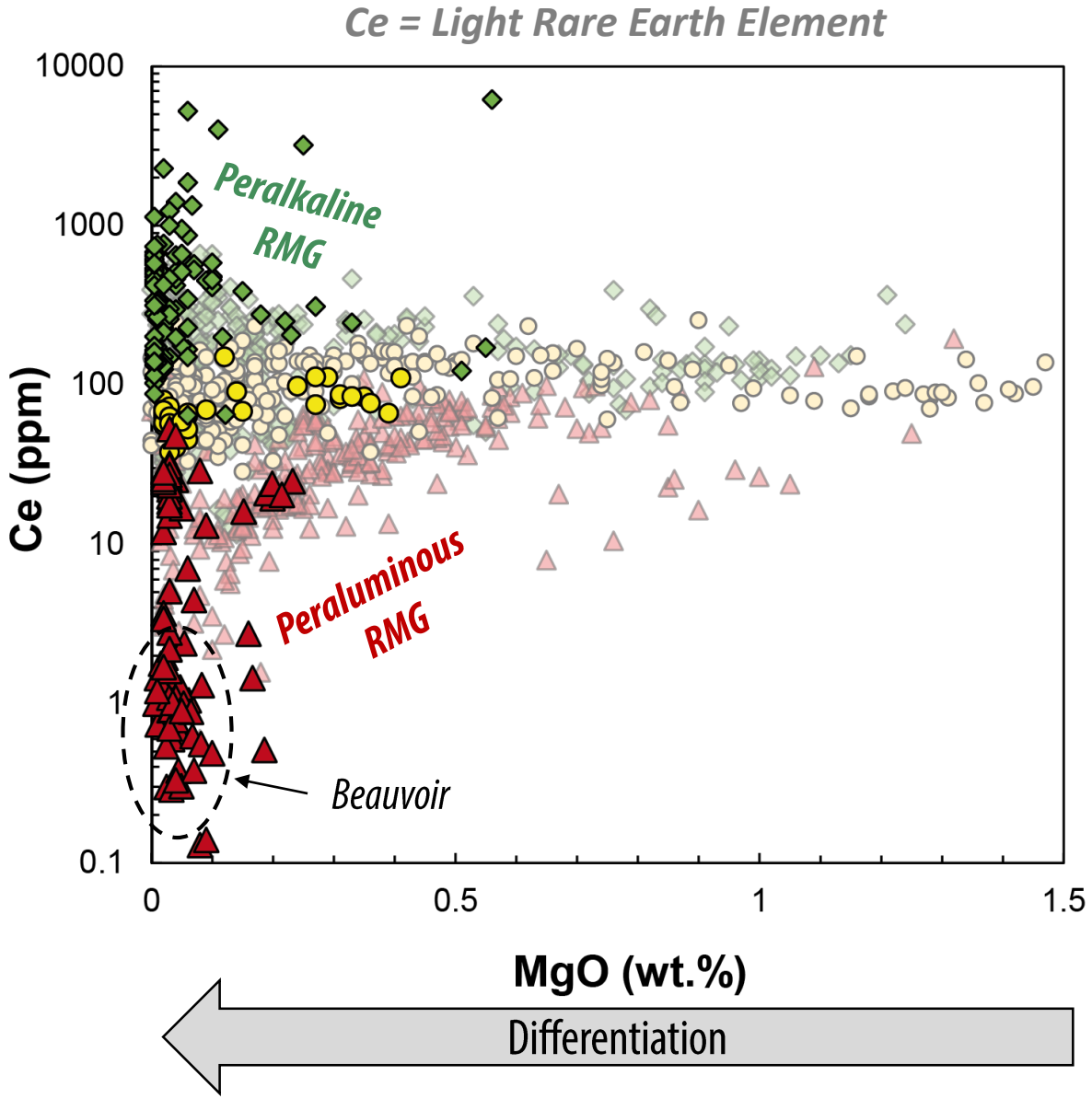




Les lignées/suites magmatiques felsiques à métaux rares

Rare-metal granites : RMG





Les granites à métaux rares

Type 1 Peralkaline rare metal granites [(Na + K)/Al>1]

- very low P,
- **very high Zr, REE, Y, Nb, F,**
- high Fe (aegirine, riebeckite, and/or arfvedsonite), very low Mg
- Low Li-F micas(zinnwaldite-polylithionite-astrophyllite because low Li

, - **low Ta/Nb** (pyrochlore)
- high Th, Sn, Be, Rb,U,

= **NYF pegmatites** of Cerny

= **riebeckite-albite granites, agpaitic class** of Kovalenko (1978),

= **highly fractionated A1-type** granites of Eby (1992).

Si-undersaturated felsic peralkaline rocks same type of metal enrichments

Typically **anorogenic**.,

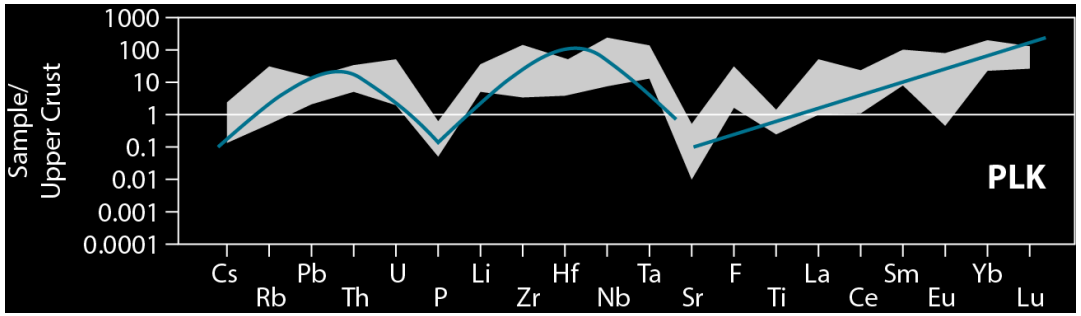
Mineralization: **Zr** (zircon, baddeleyite, elpidite, eudialyte, and wadeite)
Nb (pyrochlore)
REE (fluorocarbonates rather than monazite),
U and **Th** (uranothorite, steenstrupine …).

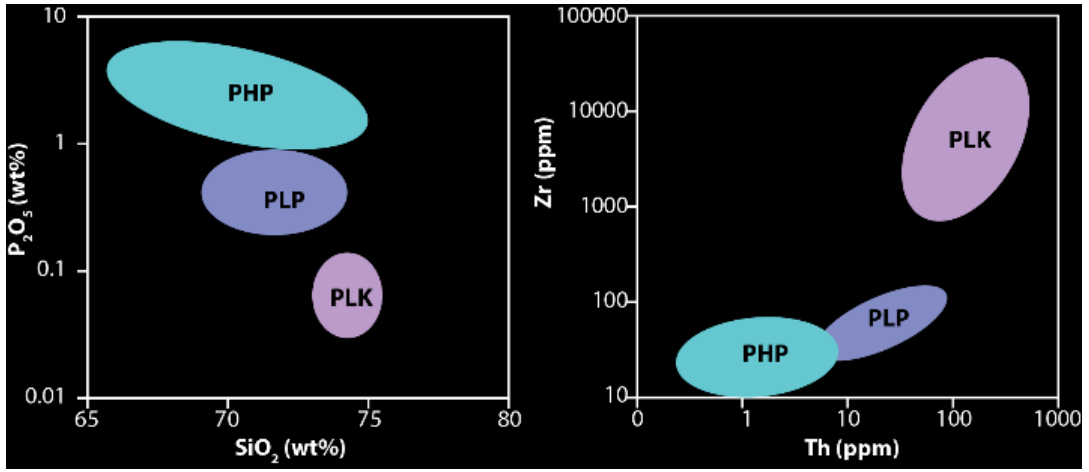
Les granites à métaux rares

❶ Type A1 - peralcalin (PLK), caractérisé par:

- un enrichissement en F, REE, Y, Zr, Nb, Th, U, un rapport Nb/Ta élevé (> 10) et une faible teneur en P.
- Présence d'amphibole et de pyroxène sodiques car magma riche en Fe et Na
- Minéralisation à Zr (zircon, **eudialyte**), Nb (**pyrochlore**) et REE (fluorocarbonates, …)

Exemple: Granite de Strange Lake, Canada





Linnen and Cuney, 2005

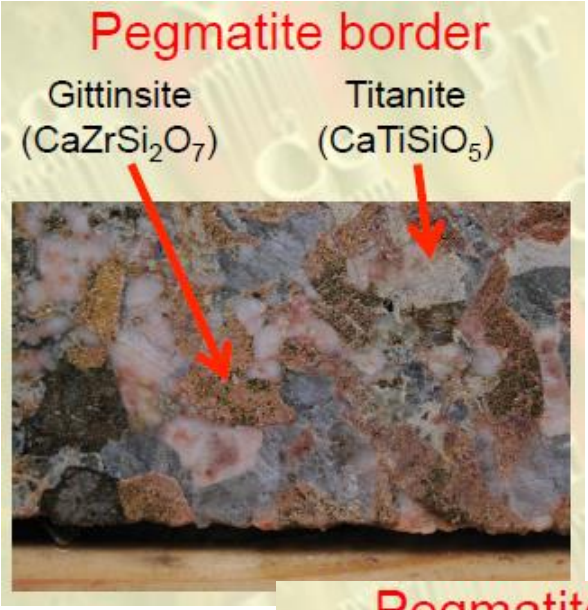
Zircon
$ZrSiO_4$

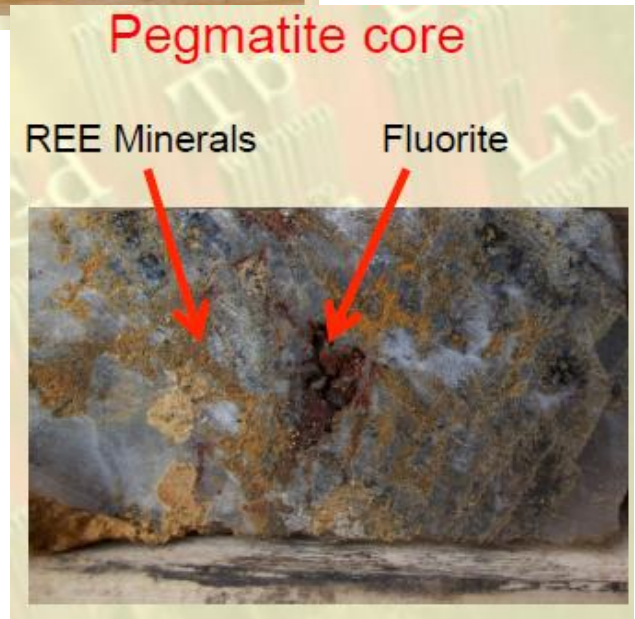
Pyrochlore
$(Na,Ca)_2Nb_2O_6(OH,F)$

Bastnaésite
$(Ce,La,Y)CO_3F$

Les granites à métaux rares

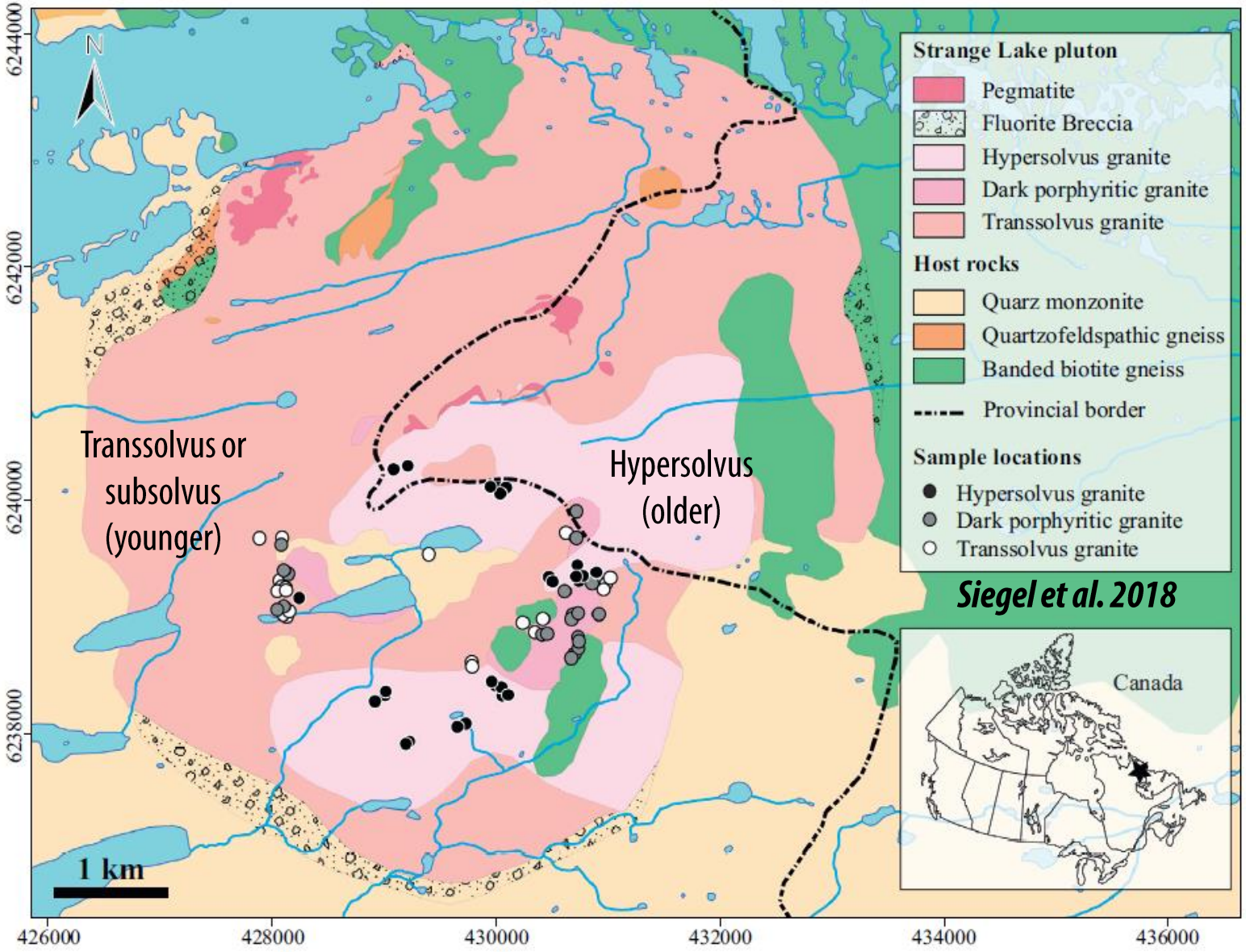
❶ Type A1 - peralcalin (PLK)





William-Jones, DIVEX, 2015

Strange Lake complex



Siegel et al. 2018

Afs: arfvedsonite, Gag-(Ce): gagarinite-(Ce), Afs: alkaline feldspar, Qtz: quartz

Les granites à métaux rares

Type 2: Peraluminous low P_2O_5 RM granites [1<Al/(Na + K)<1.15]

- Less peraluminous than class 3
- intermediate REE, Y, Zr, Hf, Th contents
- **Flat REE patterns with strong negative Eu anomaly**
- **Zinnwaldite** is the main Fe-rich Li-F mica

Associated with high K calc-alkaline metaluminous rocks, rich in Th, REE, Y,
= standard class of Kovalenko (1978)
= **highly fractionated of I- or A2-type** granites (Eby, 1992)
Postorogenic and anorogenic geotectonic settings

Mineralization: **Nb-Ta** (columbite)
Sn (cassiterite)

Les granites à métaux rares

❷ Type A2 faiblement peralumineux (PLP) pauvre en P :

Enrichissement intermédiaire en REE, Y, Zr, Hf, Th

Rapports Nb/Ta intermédiaire (> 1)

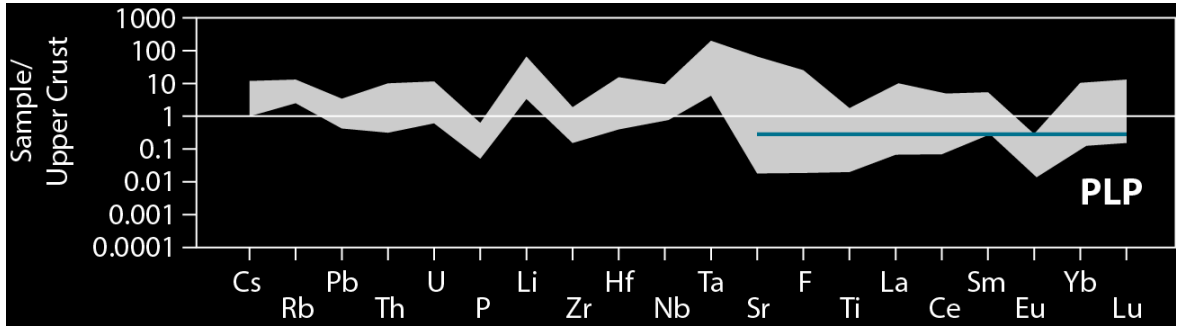
- Contient de la biotite ou mica lithinifère type **zinnwaldite**
- Minéralisation à Sn (cassitérite), Nb-Ta (**colombite**-tantalite), F (topaze, fluorite)

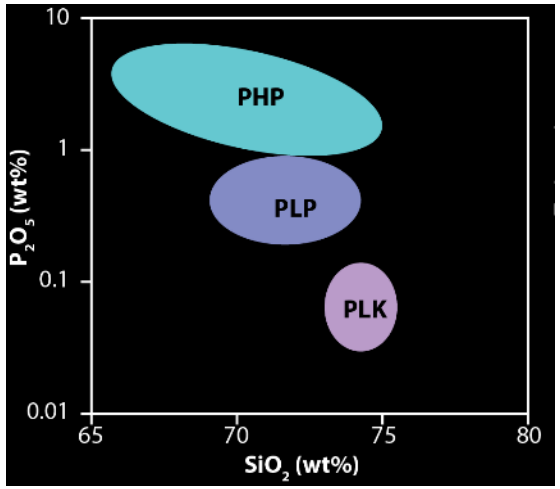
Exemple: complexe de Zinnwald/Cínovek, Allemagne/République tchèque

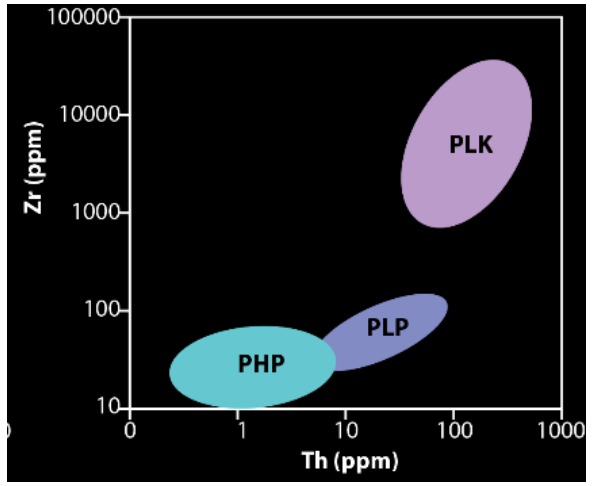
Cassitérite
SnO_2

Colombo-tantalite
$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$

Linnen and Cuney, 2005

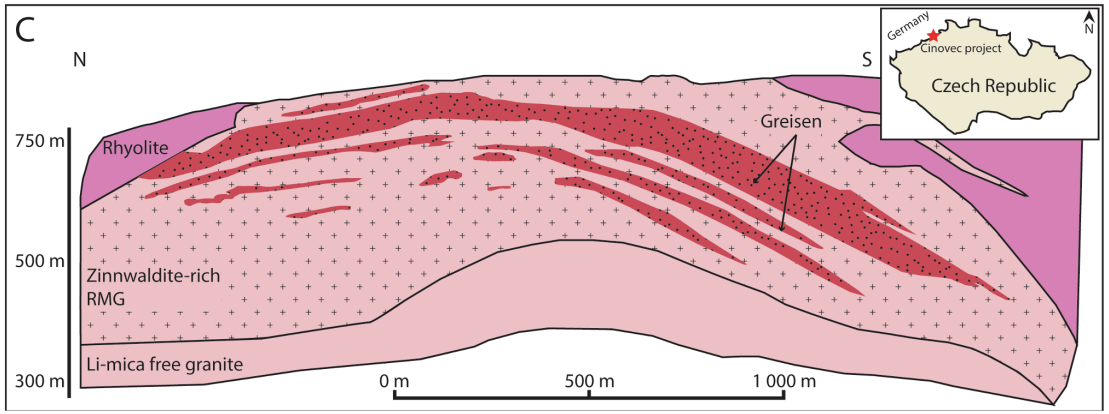




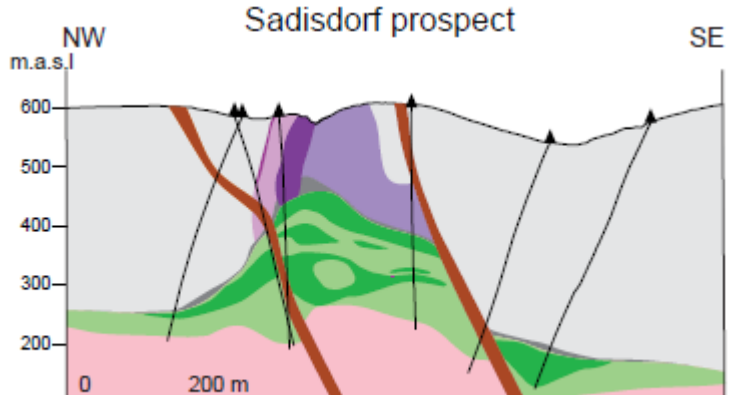


Les granites à métaux rares

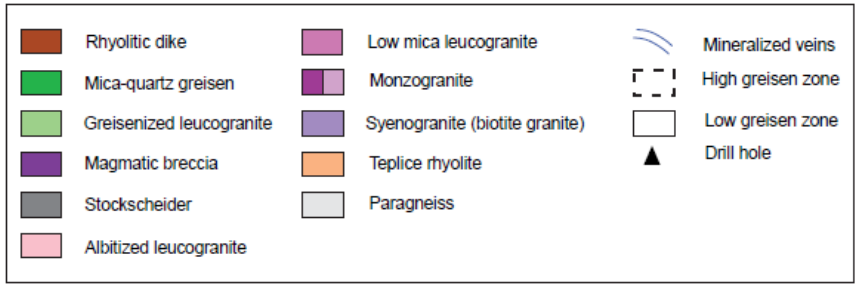
❷ Type A2 faiblement peralumineux (PLP) pauvre en P : Zinnwald-Cínovec deposit



Gourcerol et al. 2019



Burish et al. 2025



Burish et al. 2025

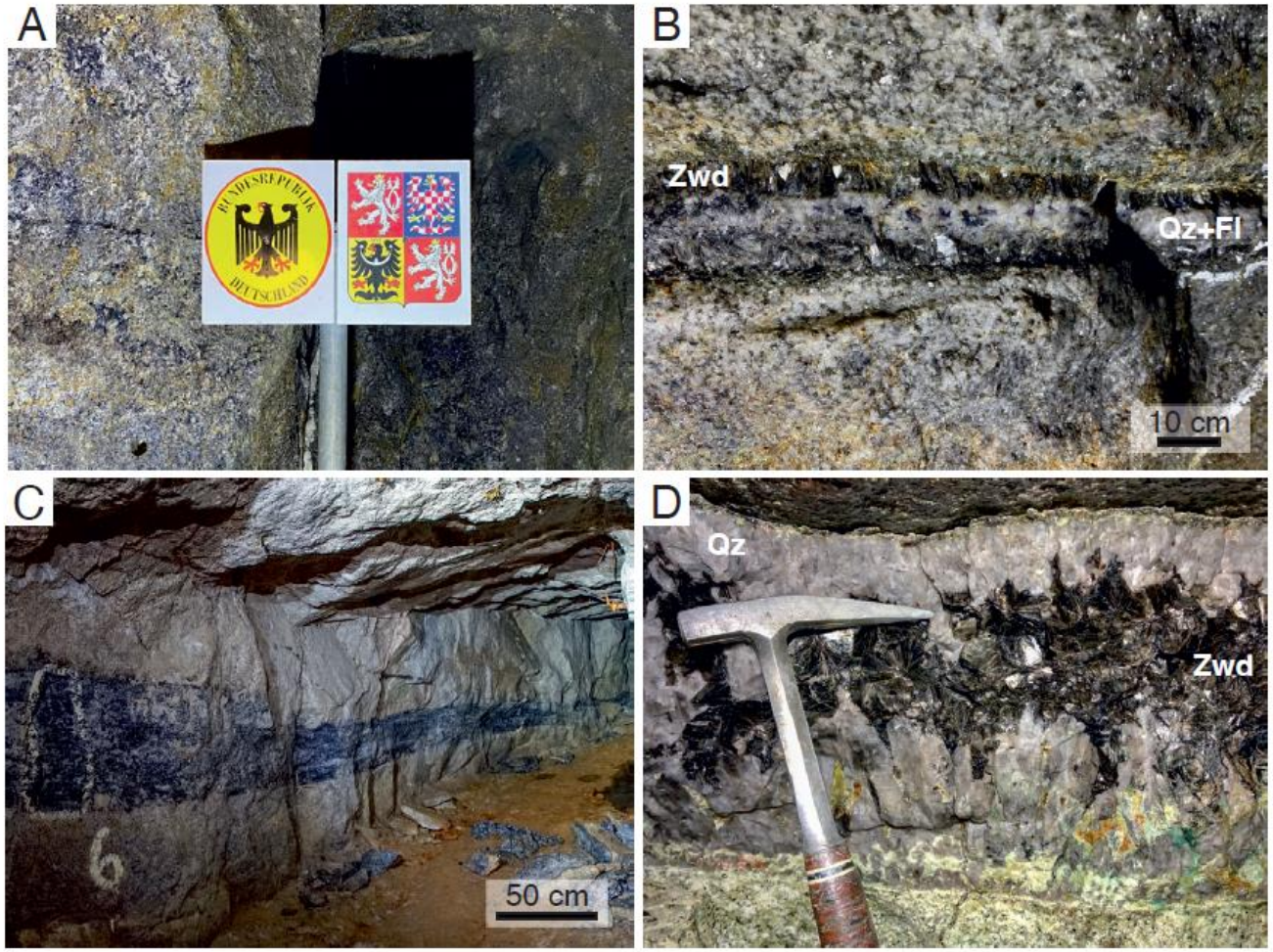


Fig. 5. Photographs from the historical Zinnwald-Cínovec underground mine. (A) Sign of the German/Czech border in front of quartz-mica greisen in the underground mine. (B) Flat zinnwaldite-quartz-fluorite vein hosted in zinnwaldite-rich quartz-mica greisen, Tiefer Bünau Stollen (Germany). (C) Horizontal zinnwaldite-rich greisen zone exposed in level III of the historical underground mine (Czech Republic). (D) Flat quartz-zinnwaldite vein hosted by greisen (Czech Republic). Abbreviations: Fl = fluorite, Qz = quartz, Zwd = zinnwaldite.

Les granites à métaux rares

Type 3: Peraluminous high P_2O_5 RM granites [Al/(Na+K)>1.15]

- extremely low REE (≤ chondritic values), Th, Y, Zr, Hf, Sc, Pb
- Ta/Nb ≥ 1
- Very high Li, Rb, Cs, Ta, Be, F
- Li-rich muscovite or lepidolite (Li-F class of Kovalenko, 1978)

= LCT pegmatites of Cerny = S type granites

- High P in apatite, amblygonite $(Li,Na)AlPO_4(F,OH)$, montebrasite $LiAlPO_4(F,OH)$ herdérite $CaBe(F,OH)PO_4$, up to 1 wt % in feldspars

Associated with large postorogenic strongly peraluminous muscovite-biotite leucogranitic plutons, abundant in continental collision belts (Variscan mid-European and Jurassic Yanshanian SE China belts)

Mineralization: -**Ta-Sn** as microlite, columbite, Ta-rich cassiterite,
- **Li** in lepidolite, and amblygonite.

Types 2 and 3 are the latest intrusions emplaced in extensional regimes, in internal part of continental collision belts.

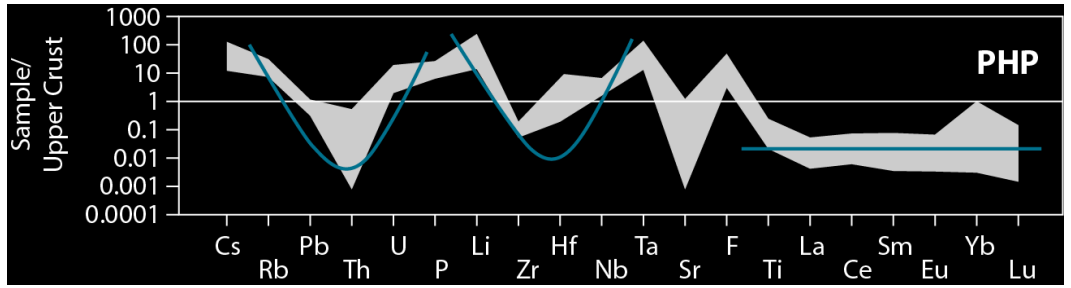
Les granites à métaux rares

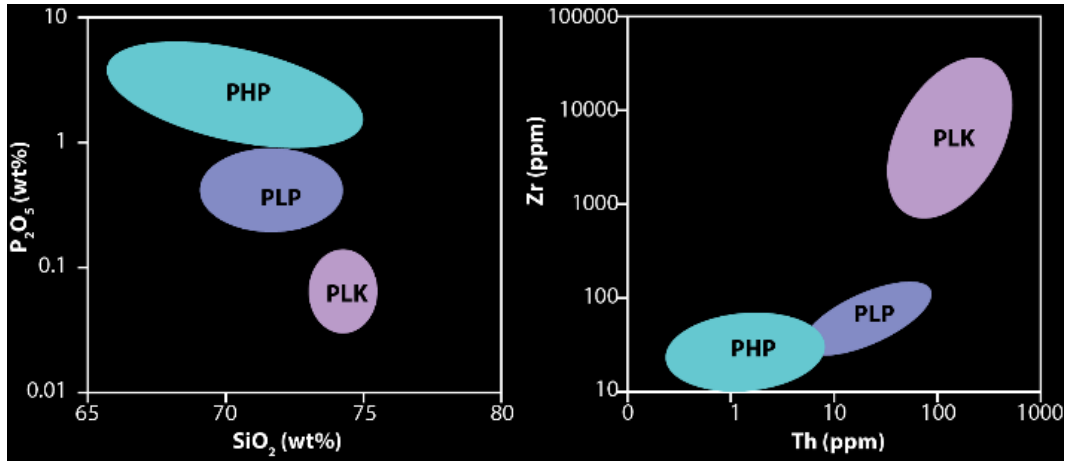
❸ Type fortement peralumineux riche en P (PHP)

=> affinité pour les granites peralumineux à muscovite (MPG)

- Très faibles teneur en REE, Y, Zr, Hf, Th
- Enrichissement en P, Li, F, Ta ± Nb, Sn
- Rapports Zr/Hf = 0.1 -18 et Nb/Ta = 0.1 - 5
- Minéralisation en Ta (columbite-**tantalite, microlite**), Li (**lépidolite, amblygonite**), F (topaze), Sn (**Cassitérite)**

Exemple: granite de Beauvoir, France; granite de Yichun, China

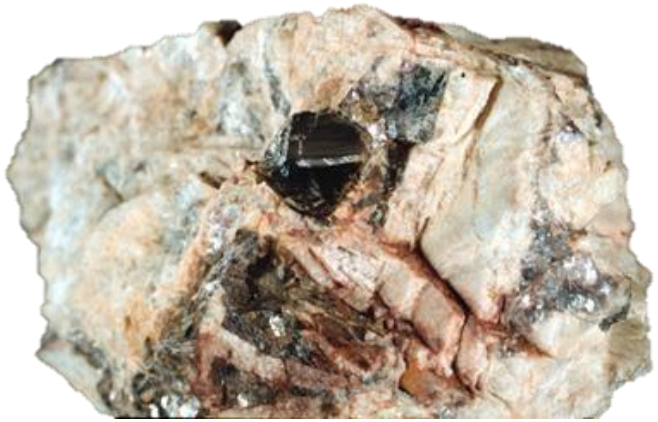




Lépidolite
$K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$

Colombo-tantalite
$(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$

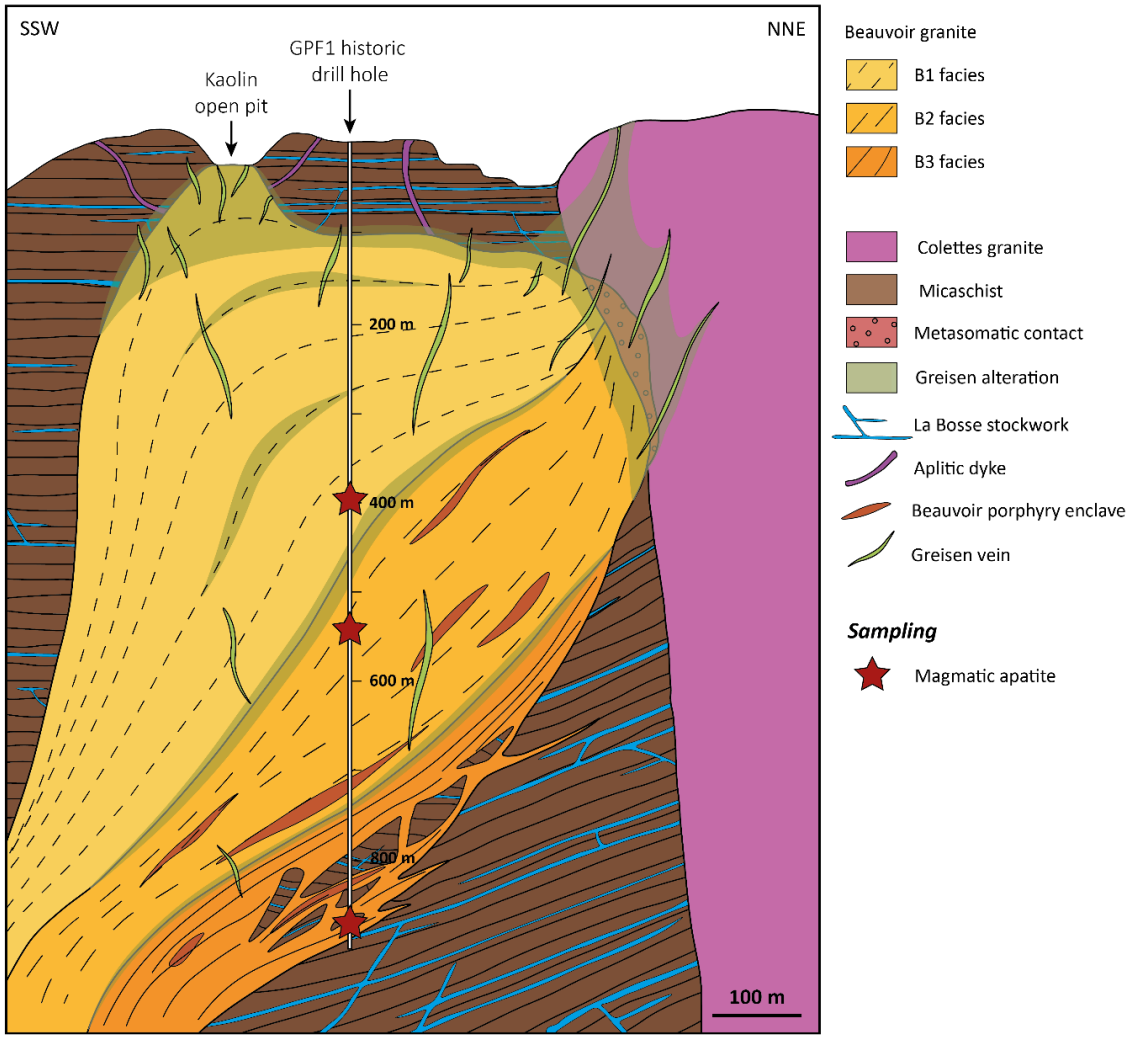
Amblygonite
$LiAlF(PO_4)$



Microlite
$(Ca,Na)_2Ta_2O_6(O,OH,F)$

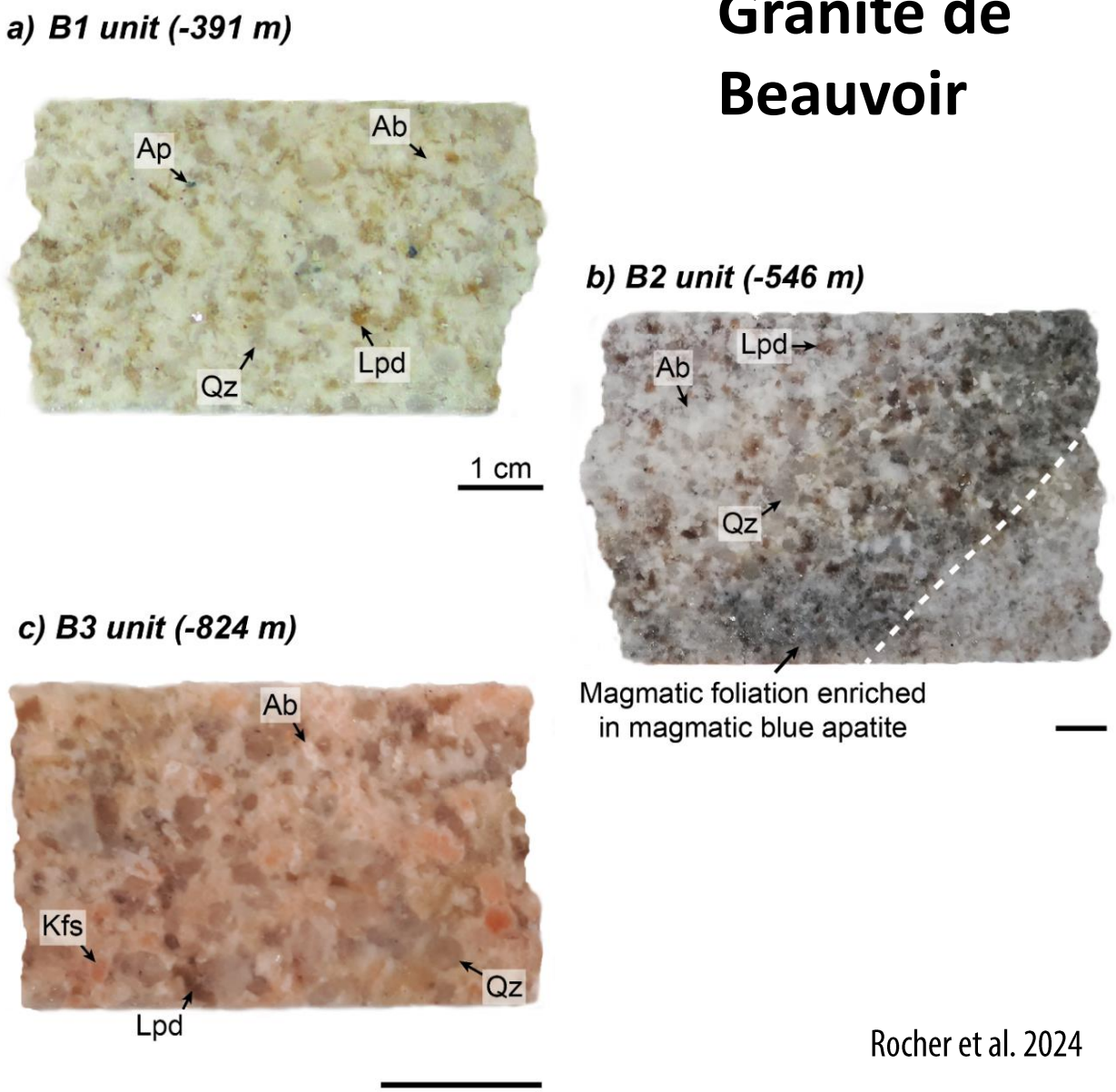
Les granites à métaux rares

❸ Type fortement peralumineux riche en P (PHP)



Rocher et al. 2024
(d'après Cuney et al. 1992)

Granite de Beauvoir



Rocher et al. 2024

Caractéristiques texturales (termes peralumineux)

Granites et syénites à métaux rares: caractéristiques et processus minéralisateurs

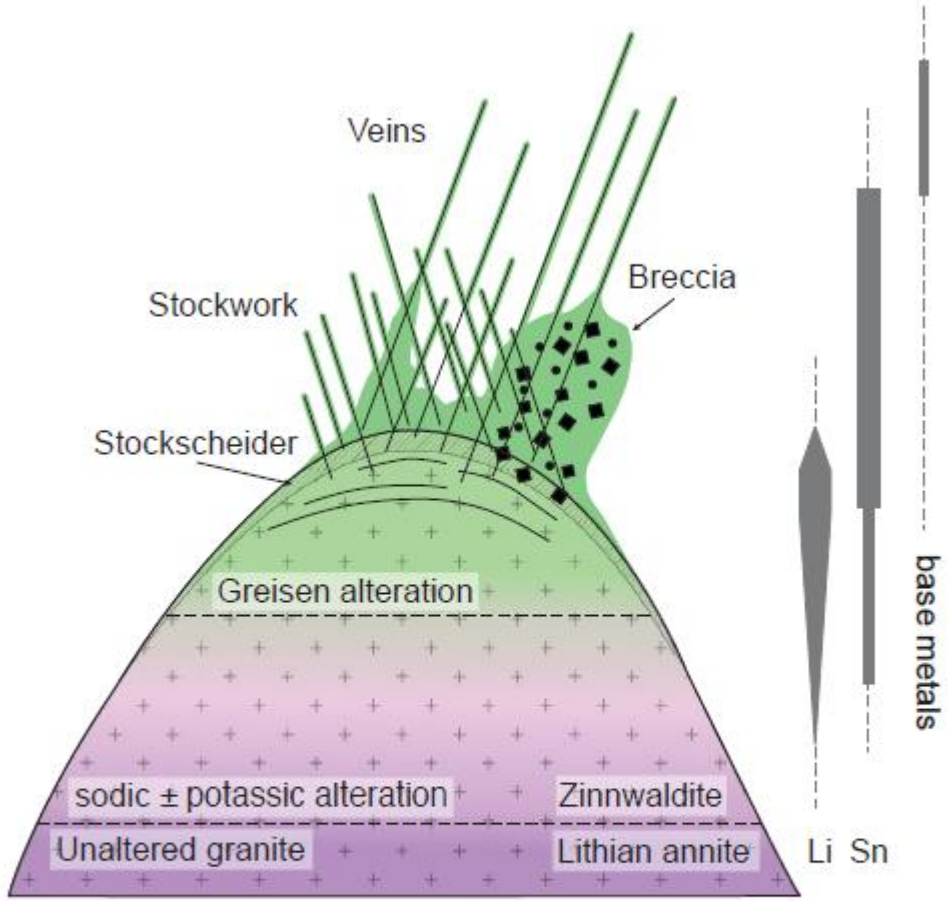
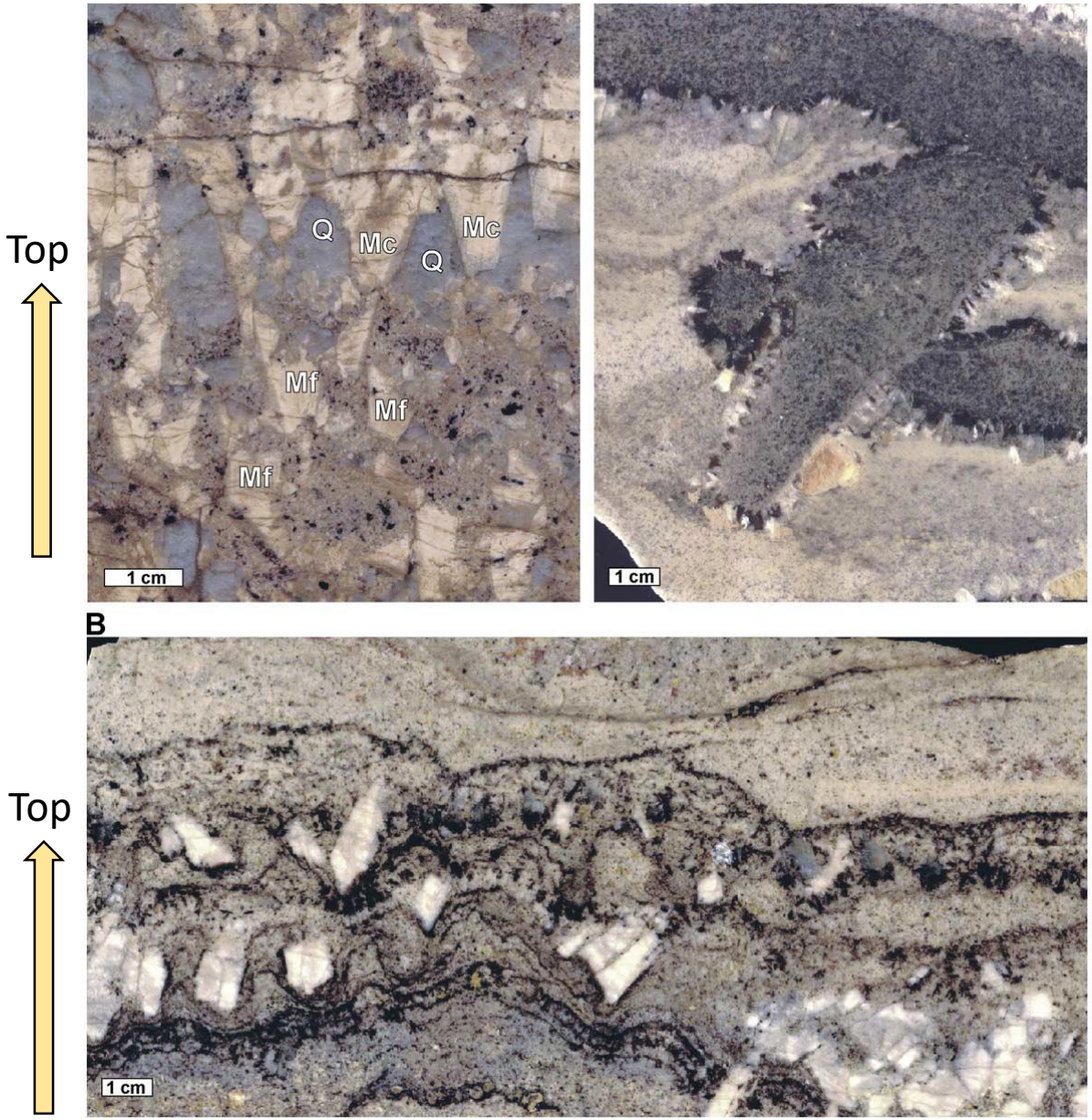


Fig. 3. Schematic diagram of a greisen-related Li mica system from deep to shallow: unaltered biotite granite, sodic ± potassic alteration, greisen alteration, stockscheider, stockwork zone, breccia zone, and distal veins. The gray bars indicate elemental zoning within the mineralized portion in the granite cupola and exocontact.

Burish et al. 2025

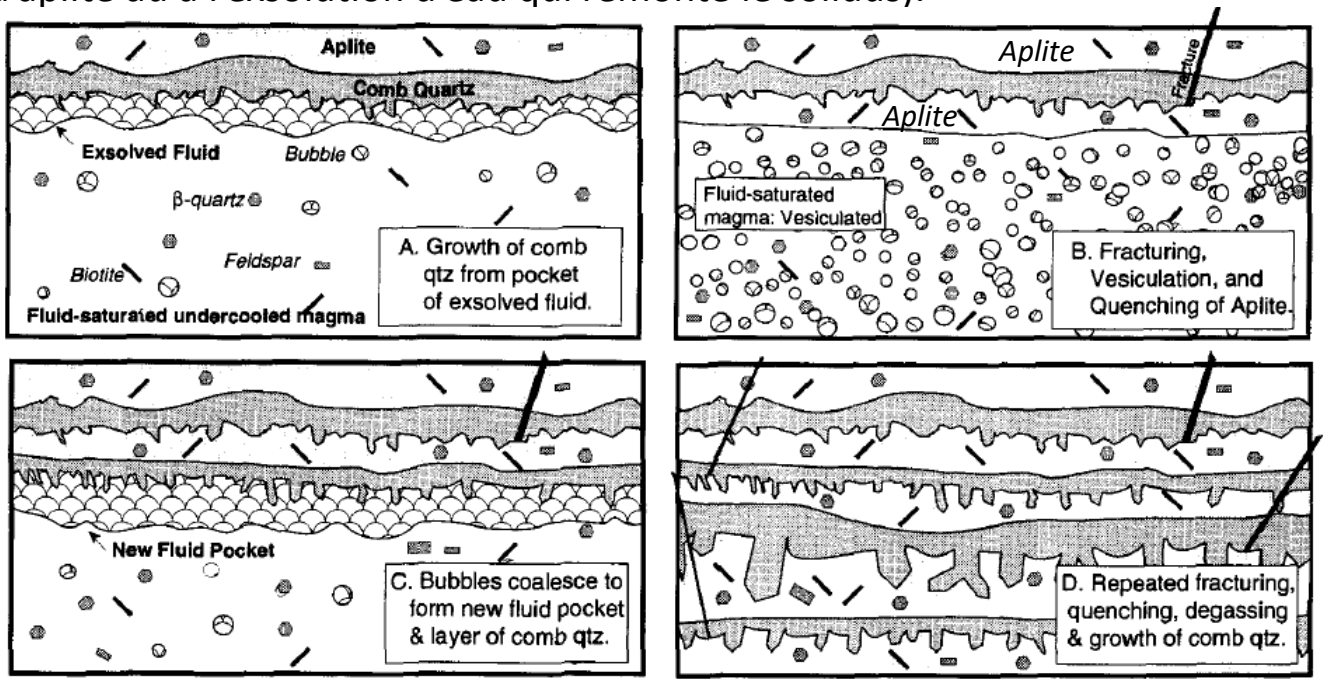
Les granites à métaux rares: caractéristiques texturales

Les “Stockscheider” et textures de solidifications unidirectionnelles (USTs)

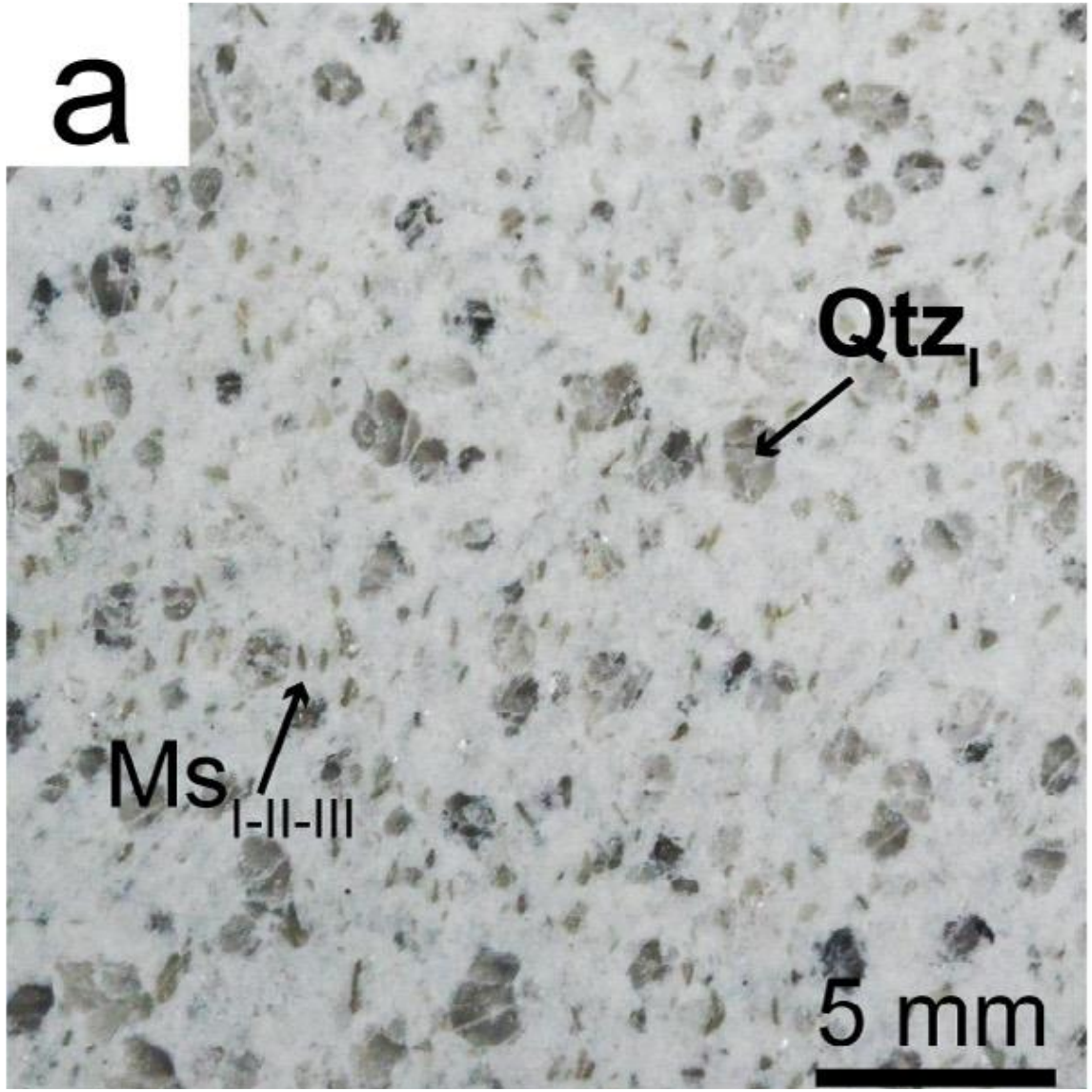


Breiter et al., 2005; Podlesı´ stock, Czech Republic

La zone apicale des granites à métaux rares est communément marquée par un facies appelé « stocksheider » (*séparation entre deux granites en allemand*). On va y retrouver des textures particulières orientées comme des peignes de quartz et feldspath en plume à textures pegmatitiques alternants avec des niveaux aplitiques a grains fins. Ils forment des rubanements parallèles au contact du granite et son encaissant. Ces USTs cristallisent vers le bas et peuvent être expliquées par la succession de cycles de (i) exsolution/accumulation de fluides à l’apex des intrusions (cristallisation de cristaux pegmatitiques), (ii) fracturation hydraulique/dégazage puis (iii) sursaturation du magma (cristallisation d’aplite du à l’exsolution d’eau qui remonte le solidus).



Lowenstern and Sinclair, 1996



Les phénocristaux de quartz sont communs dans les granites à métaux rares.
Ceci traduit une cristallisation précoce du quartz

Granite à métaux rares d'Argemela (Portugal)

Michaud et al. 2019

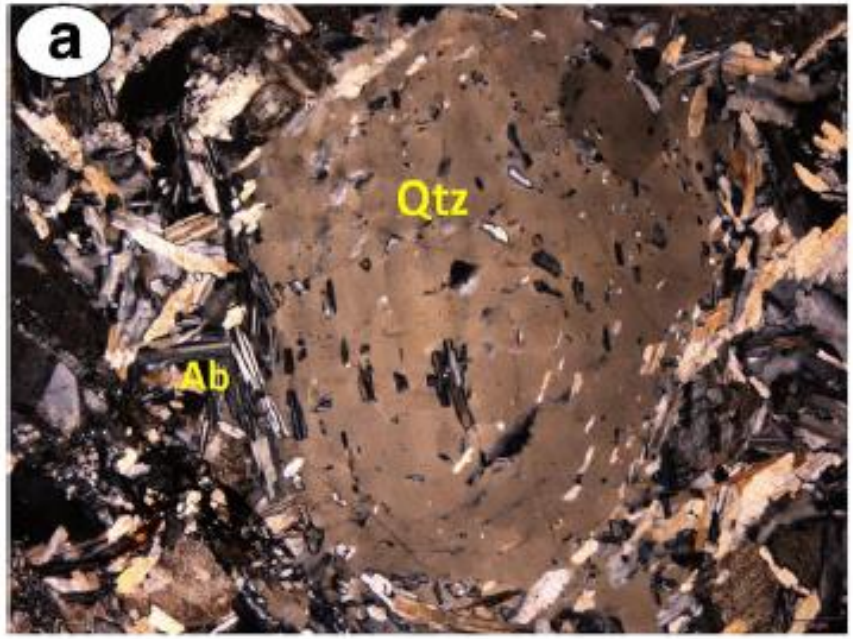
Les granites à métaux rares: caractéristiques texturales

Les quartz boule de neige ou « snow-ball quartz »

Müller, 1999

Figure 1. Synoptical scheme of CL-contrasted growth textures in snowball quartz as observed in the Schellerhau SG3 granite and in the Podlesi dyke granite. Quartz crystal size usually 1 mm up to 1 cm.

Emam et al., 2018



Wu et al., 2017

Les granites à métaux rares: caractéristiques texturales

Greisens et albitites

Les granites peralumineux à métaux rares et en particulier leur zone apicale est souvent caractériséepar la présence de greisens (muscovite+quartz) et d'albitites. **Pourquoi?**

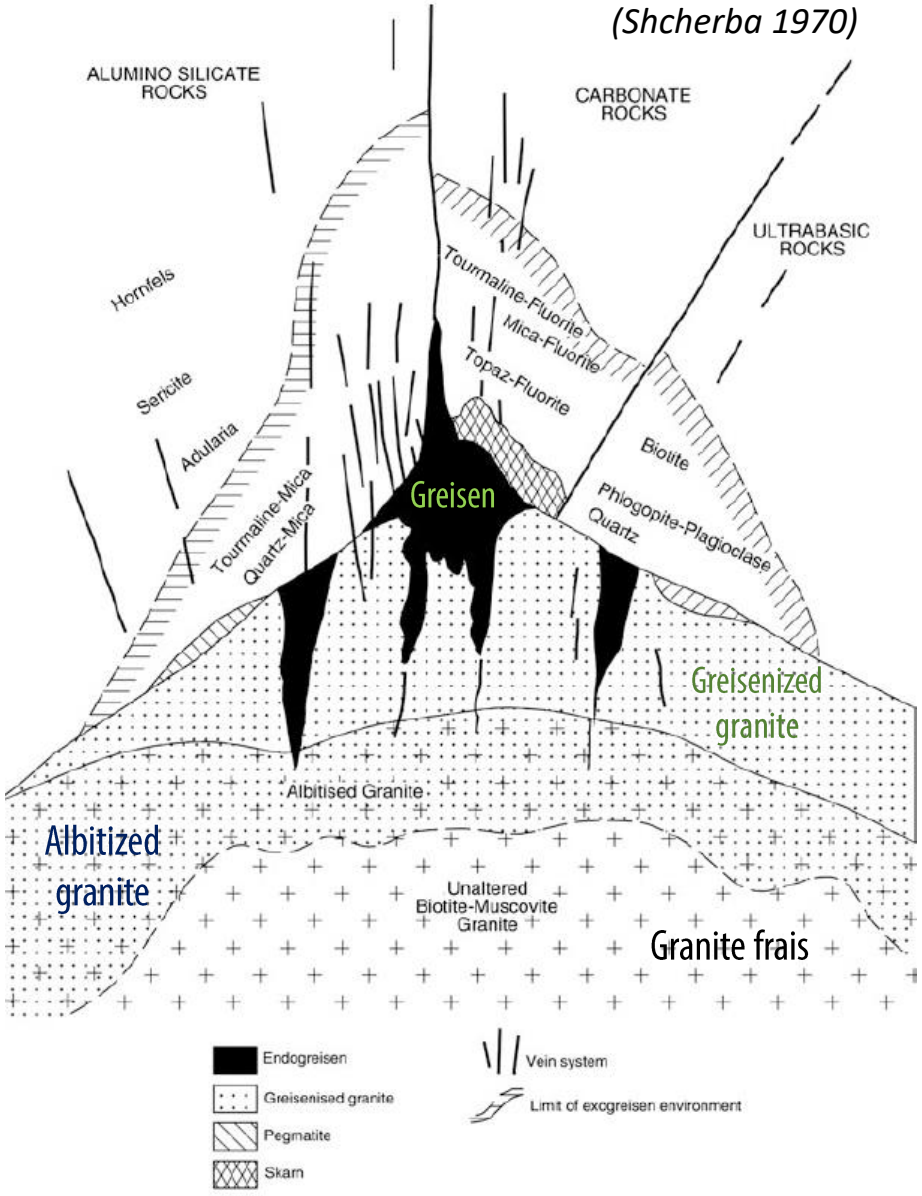
Albitization:

Reaction?

Greisenization:

Reaction?

(Shcherba 1970)



Les granites à métaux rares: caractéristiques texturales

Greisens et albitites

Les granites peralumineux à métaux rares et en particulier leur zone apicale est caractérisée par une intense altération magmatique-hydrothermale qui se traduit par la présence de greisens et d'albitites

Albitization:

$KAlSi_3O_8 + \mathbf{Na^+} = NaAlSi_3O_8 + \mathbf{K^+}$

FsK *Fluide sodique* *Albite* *Fluide riche en K*

Greisenization:

$3NaAlSi_3O_8 + \mathbf{2H^+} + \mathbf{K^+} = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + \mathbf{3Na^+}$

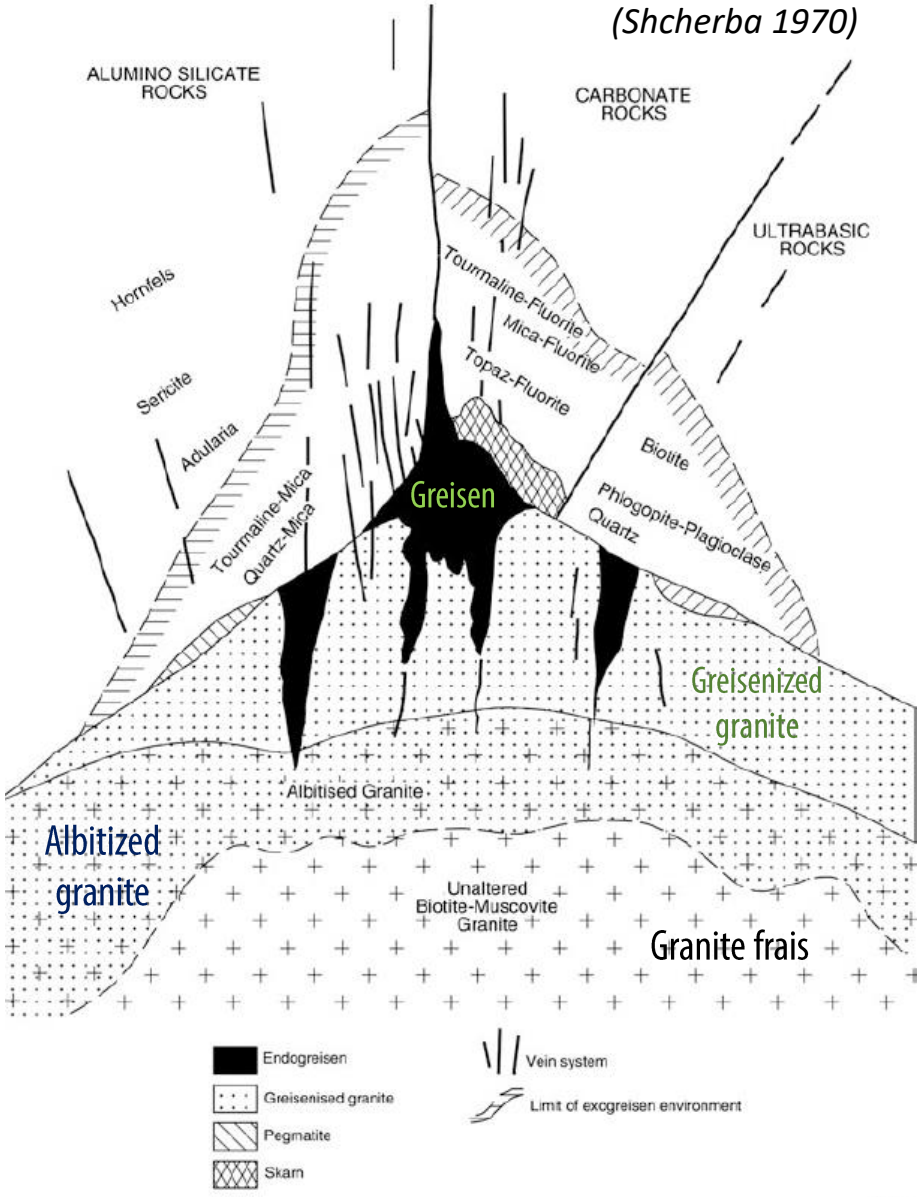
Albite *Fluide acide riche en K* *Muscovite* *Quartz* *Fluide sodique*

$3KAlSi_3O_8 + 2H^+ = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$

FsK *Fluide acide* *Muscovite* *Quartz*

Ces greisens sont communément associés à des minéralisations en Sn-(W)

(Shcherba 1970)

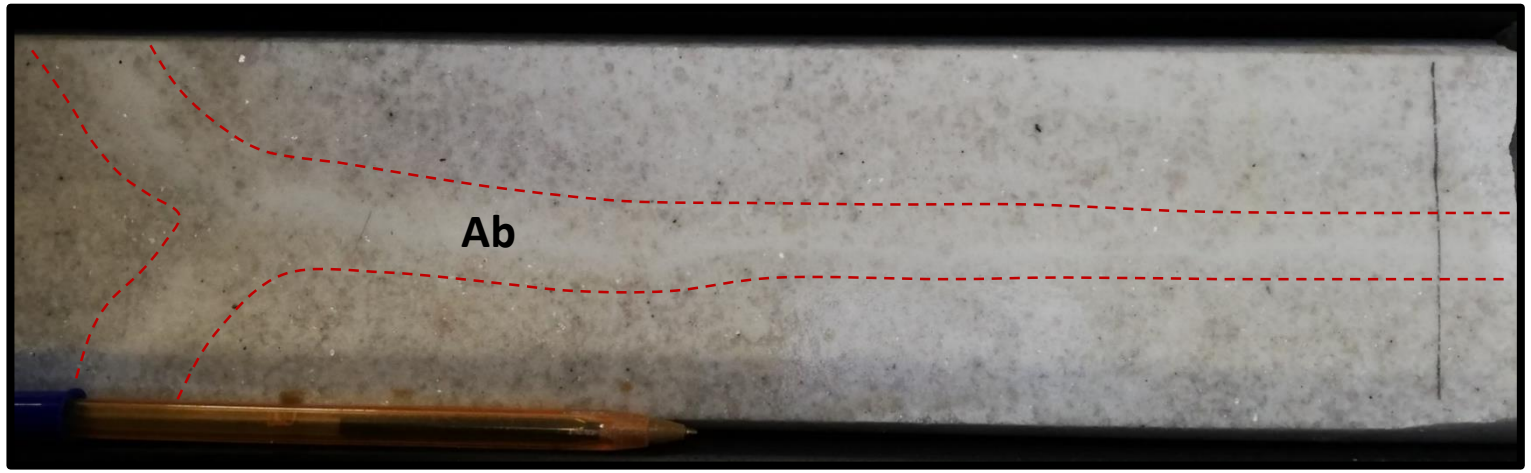


Albitisation

$KAlSi_3O_8 + Na^+ = NaAlSi_3 + K^+$

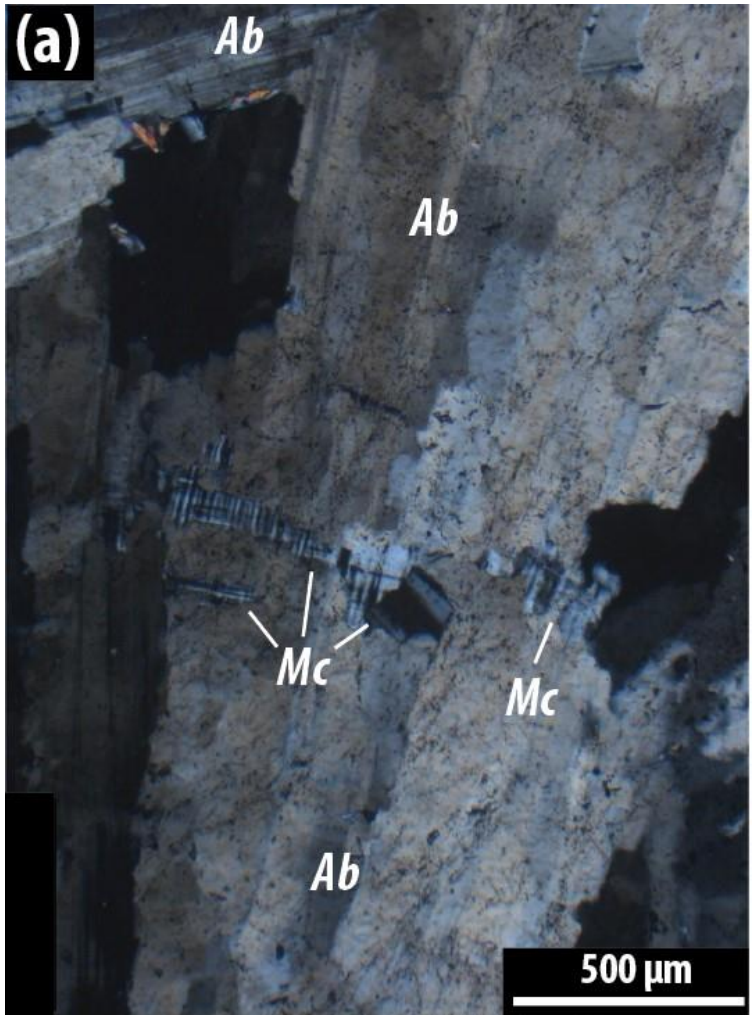
K-feldspar *Fluide* *Albite* *Fluide*

Photo GPF O. Rocher



Veine albitique dans Beauvoir (B1)

Ballouard et al. 2020



Relique de feldspath-K/microcline (Mc) dans l'albite (Ab)

Pegmatite du Namaqualand

Greisenisation

$$3NaAlSi_3O_8 + 2H^+ + K^+ = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 3Na^+$$

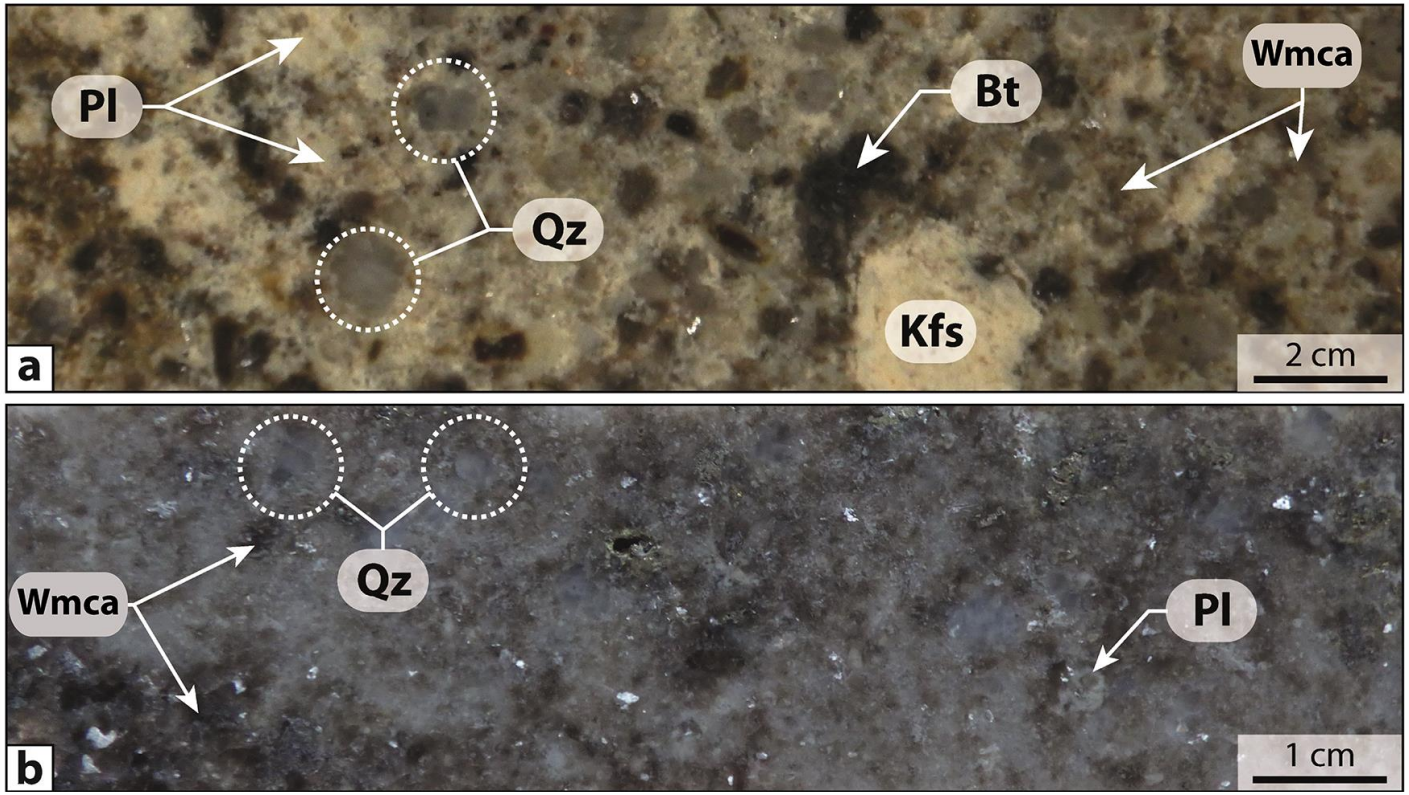
Albite *Fluide acide riche en K* *Muscovite* *Quartz*

$$3KAlSi_3O_8 + 2H^+ = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$$

Orthose *Fluide acide* *Muscovite* *Quartz*

« Fresh » Panasqueira granite

Launay et al. 2021



« Greisenized » Panasqueira granite

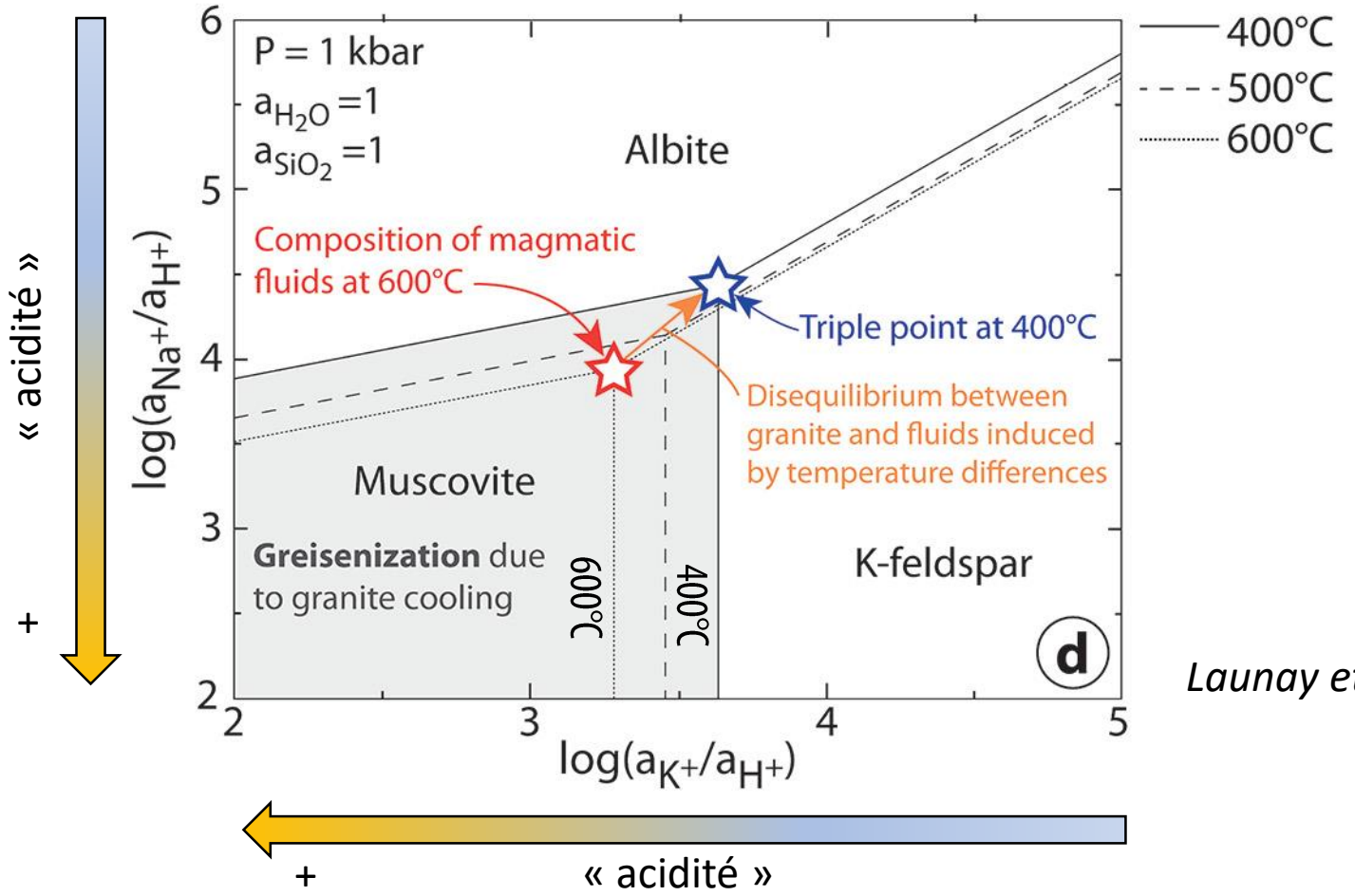
Greisenisation

$$3NaAlSi_3O_8 + 2H^+ + K^+ = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 3Na^+$$

Albite *Fluide acide riche en K* *Muscovite* *Quartz*

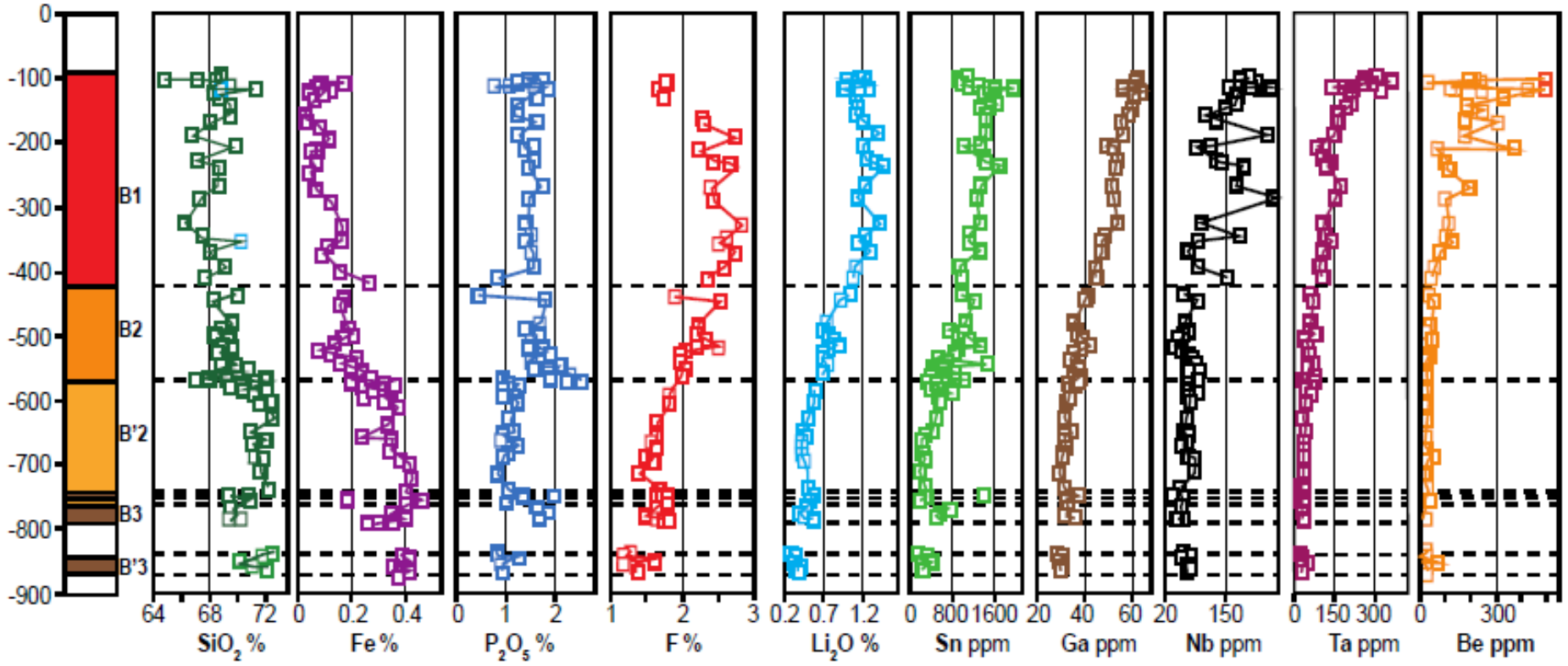
$$3KAlSi_3O_8 + 2H^+ = KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + 6SiO_2 + 2K^+$$

Orthose *Fluide acide* *Muscovite* *Quartz*



Launay et al. 2018

Zonation géochimique verticale du granite de Beauvoir



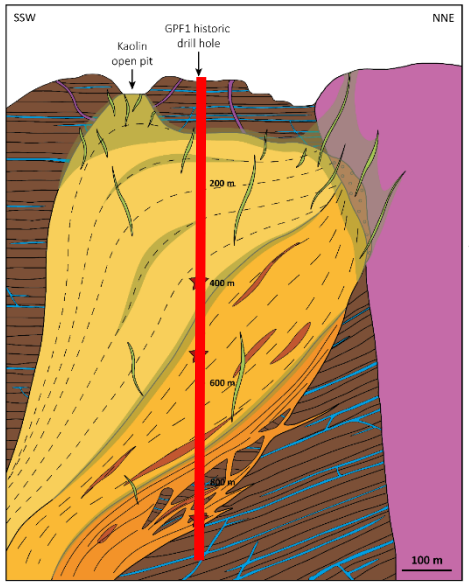
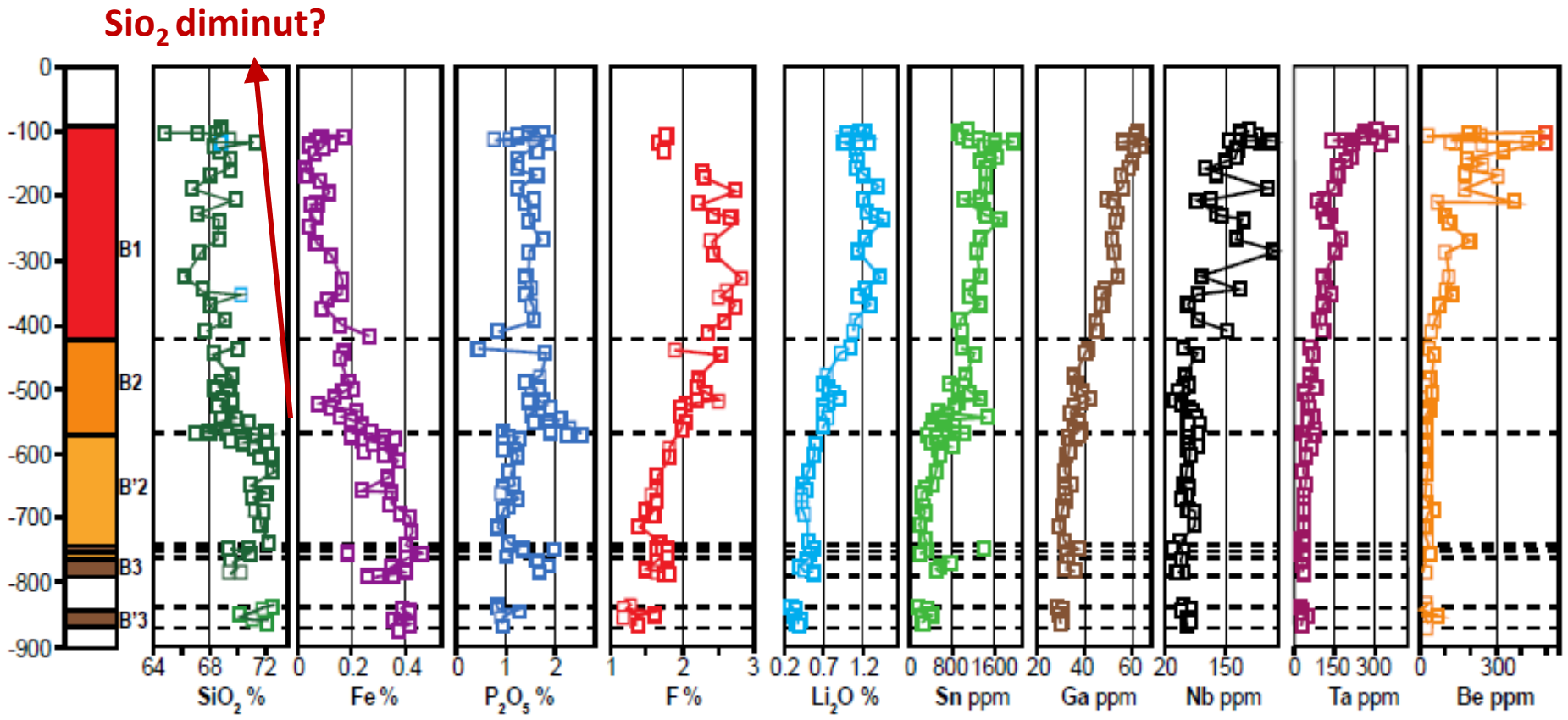


Figure 95: Geochemical logs along the GPF1 drill-hole (redrawn from Raimbault et al. 1995). Note the discontinuity for major elements at the B'2-B2 boundary . At the B1-B2 boundary, P and F depletion are due to subsolidus fluid circulation at the faulted boundary. Note that Sn is contained in the Li-mica and the Nb-Ta-oxides as well as in the cassiterite.

Cuney et Marignac 2016

Zonation géochimique verticale du granite de Beauvoir



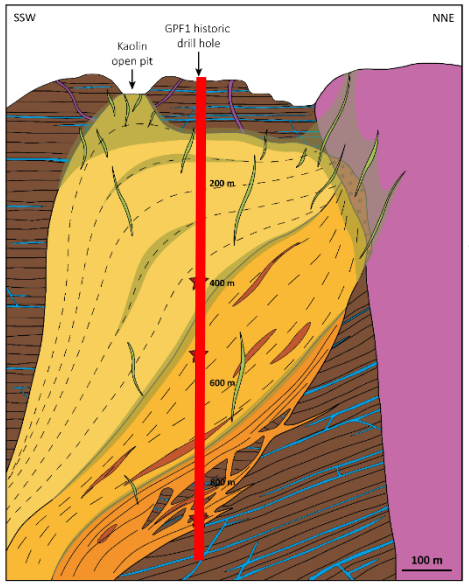
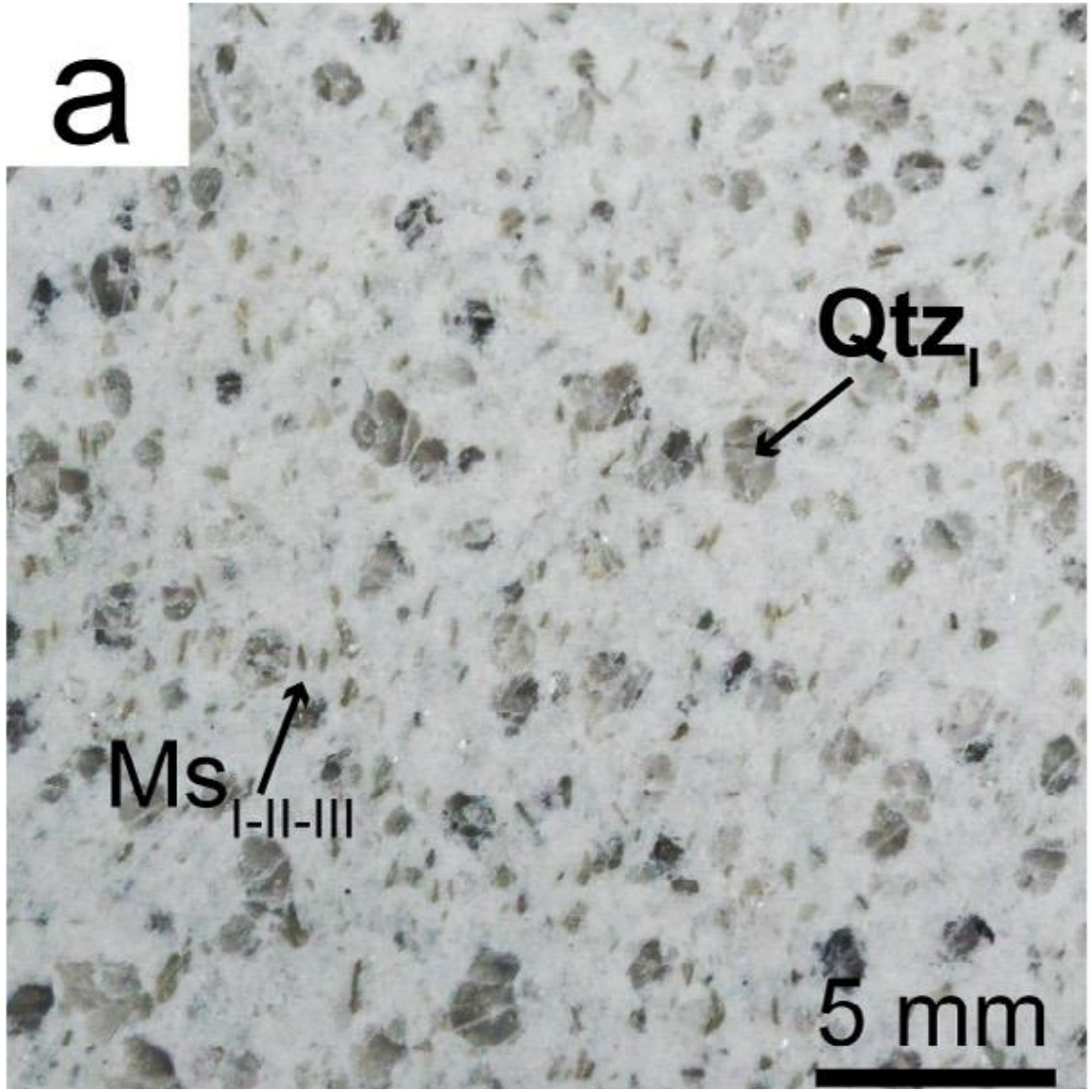


Figure 95: Geochemical logs along the GPF1 drill-hole (redrawn from Raimbault et al. 1995). Note the discontinuity for major elements at the B'2-B2 boundary . At the B1-B2 boundary, P and F depletion are due to subsolidus fluid circulation at the faulted boundary. Note that Sn is contained in the Li-mica and the Nb-Ta-oxides as well as in the cassiterite.

Cuney et Marignac 2016



Les phénocristaux de quartz sont communs dans les granites à métaux rares.
Ceci traduit une cristallisation précoce du quartz en « désaccord » avec la série classique de cristallisation de Bowen

Granite à métaux rares d'Argemela (Portugal)

Michaud et al. 2019

L'effet de la fluorine sur les relations de phases dans les systèmes haplogranitiques:

Diminue la T de l'eutectique et augmente le champ de stabilité du quartz au dépend des feldspaths

Johannes and Holtz 1996 after Manning 1981

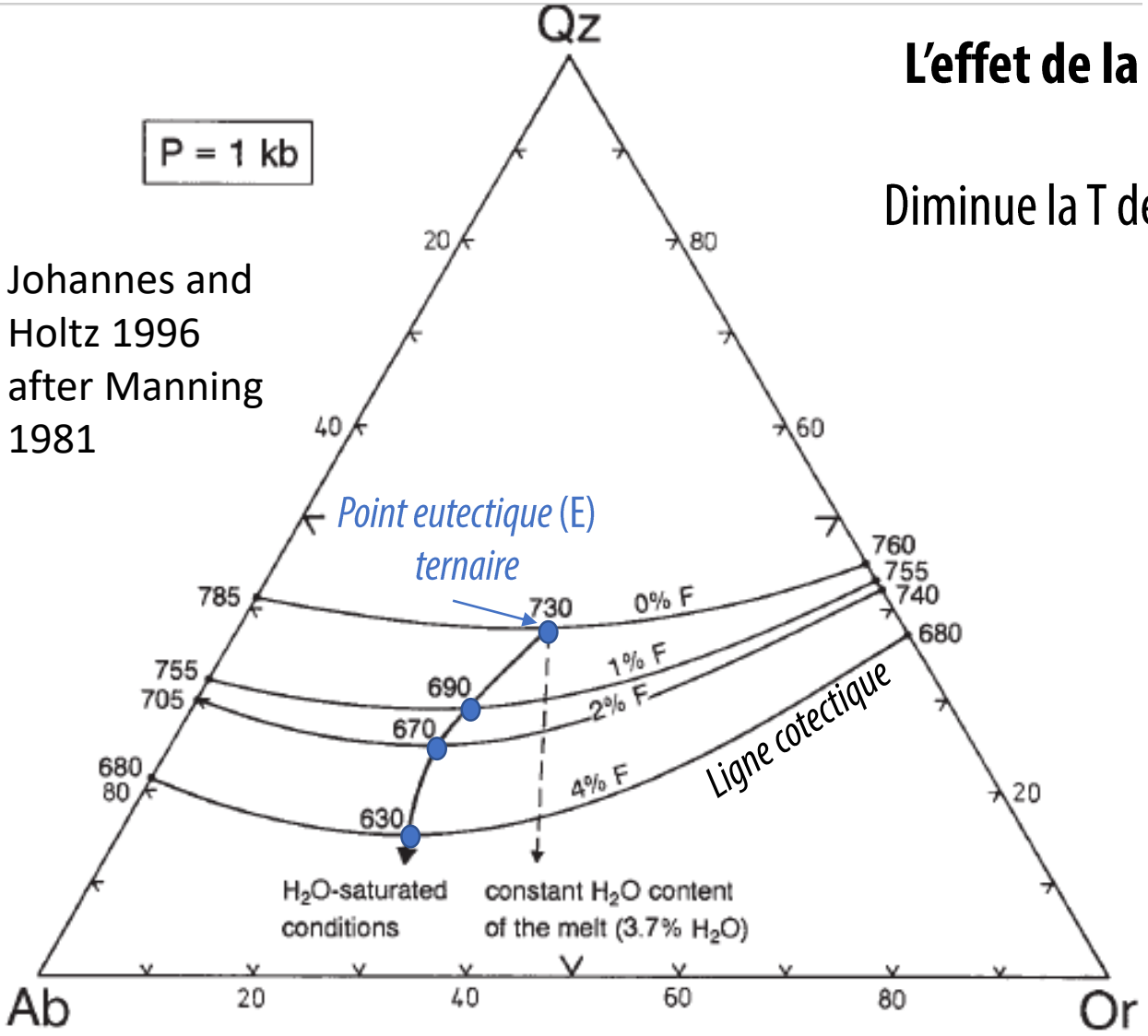


Fig. 4.13. Projections of the cotectic curves and minima of the system Qz-Ab-Or for 0, 1, 2, and 4 wt% F, at 1 kbar and H_2O-saturated conditions. The temperatures of the minima and Qz-Ab and Qz-Or eutectics are given. *Dots* position of minima; *arrow in full line* evolution of the minimum composition with increasing F content at H_2O-saturated conditions (increasing H_2O content of the melt); *dashed arrow* estimated evolution of the minimum composition at constant H_2O content of the melt (3.7 wt% H_2O) (Data source Manning 1981)

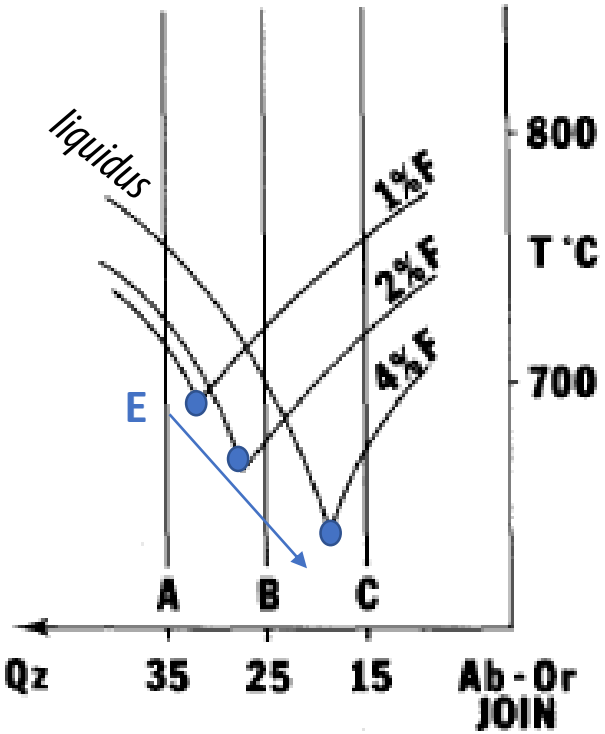
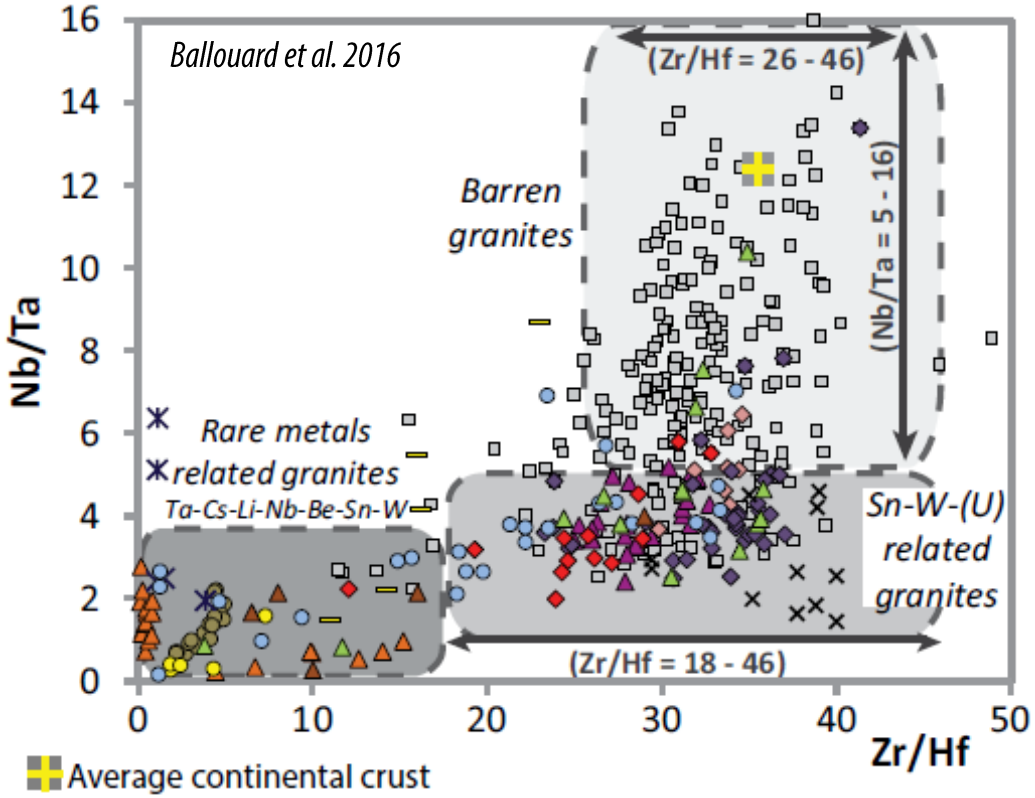


Fig. 5. Diagrammatic cross section of the system Qz–Ab–Or with 1, 2 and 4% F and excess water at 1 kb, showing the effect of increasing fluorine content on the crystallisation of compositions A, B and C (see text for details)



- Average continental crust
- Barren granites
- Lizio granite - Armorican Massif : **Sn**
- Questembert and Guérande granites - Armorican Massif : **U - (Sn)**
- Beariz, Jalama and Carbalinno granites - Iberian Massif : **Sn - W - (Nb - Ta)**
- Cornubian batholith : **Sn - W - (Cu)**
- Li - mica granites and greisens from the Erzgebirge : **Sn - W**
- Leucogranites and greisens from the Davis Lake pluton - SMB : **Sn**
- Tanjungpandan pluton - Belitung - Indonesia: **Sn-W**
- Leucogranites from the Kukul'bei Complex - Transbaikalia: **W - Sn**
- Dulong granites - Yunnan Province - South China: **Sn**
- Ongonites from Ongon Kairkhan, Central Mongolia : **W**
- Li - F granites from the Kukul'bei Complex - Transbaikalia : **Ta**
- Beauvoir granite - Massif Central: **Ta - Be - Sn - Li**
- Ponte Segade granite - Iberian Massif : **Sn – Ta – Nb – Li – Be – Cs**

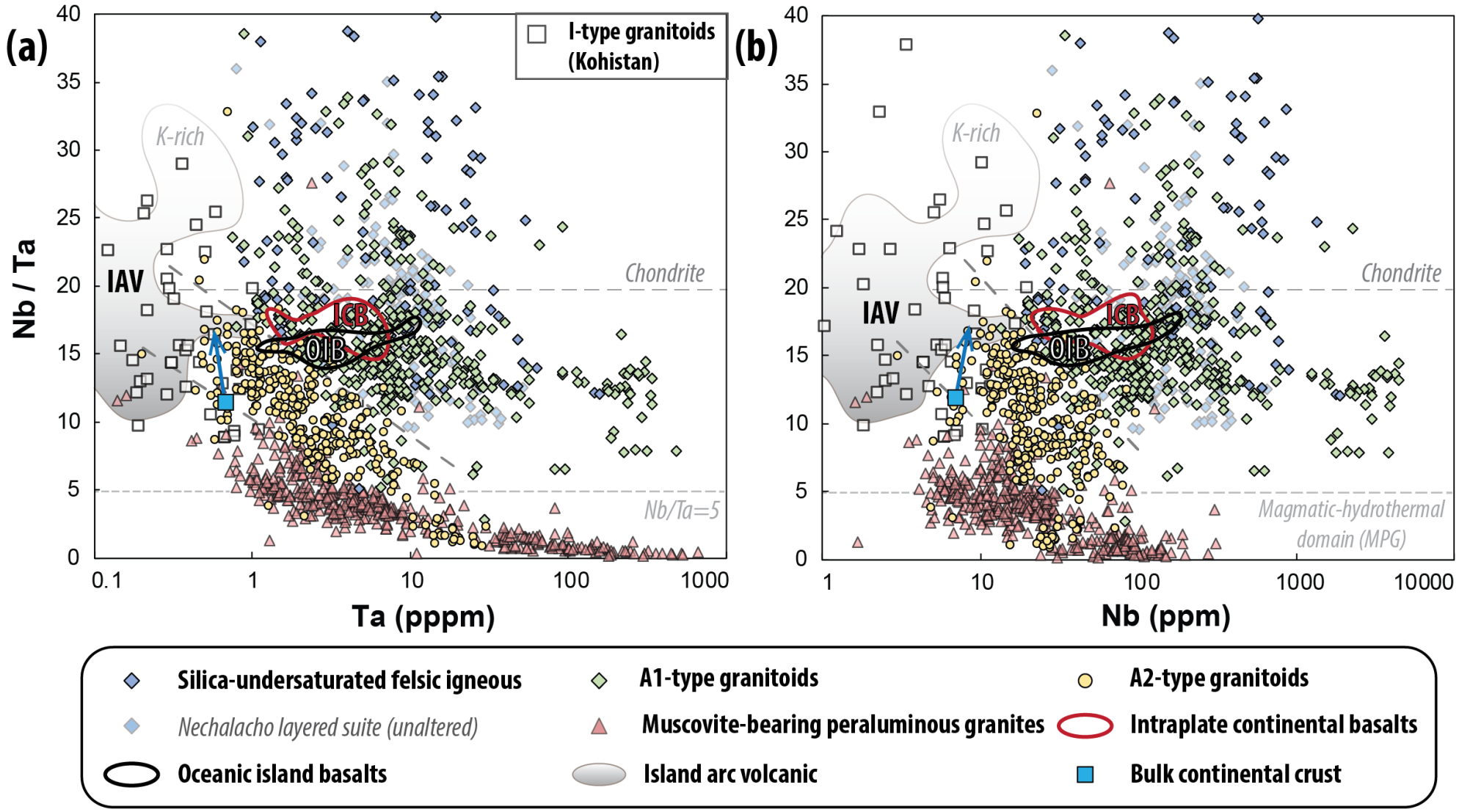
Systèmes peralumineux

Caractéristique géochimique des granites à métaux rares

Le fractionnement extrême des « jumeaux géochimiques » Zr-Hf et Nb-Ta

Caractéristique géochimique des granites à métaux rares

Ballouard et al. (2020)



*Oblique dashed lines delimit the common fields of silica-undersaturated + A1-type igneous rocks and A2-type igneous rocks ((**a**) Ta = 0.3, 20; Nb/Ta = 21.5, 6.5; (**b**) Nb= 8, 100; Nb/Ta = 22, 8) as well as A2-type igneous rocks and MPG ((**a**) Ta= 0.2, 9; y = 15.5, 3; (**b**) Nb= 3, 40; Nb/Ta= 16, 3)*

Les granites à métaux rares: caractéristiques géochimiques

Greisens et albitites: diagrammes de discriminations géochimiques

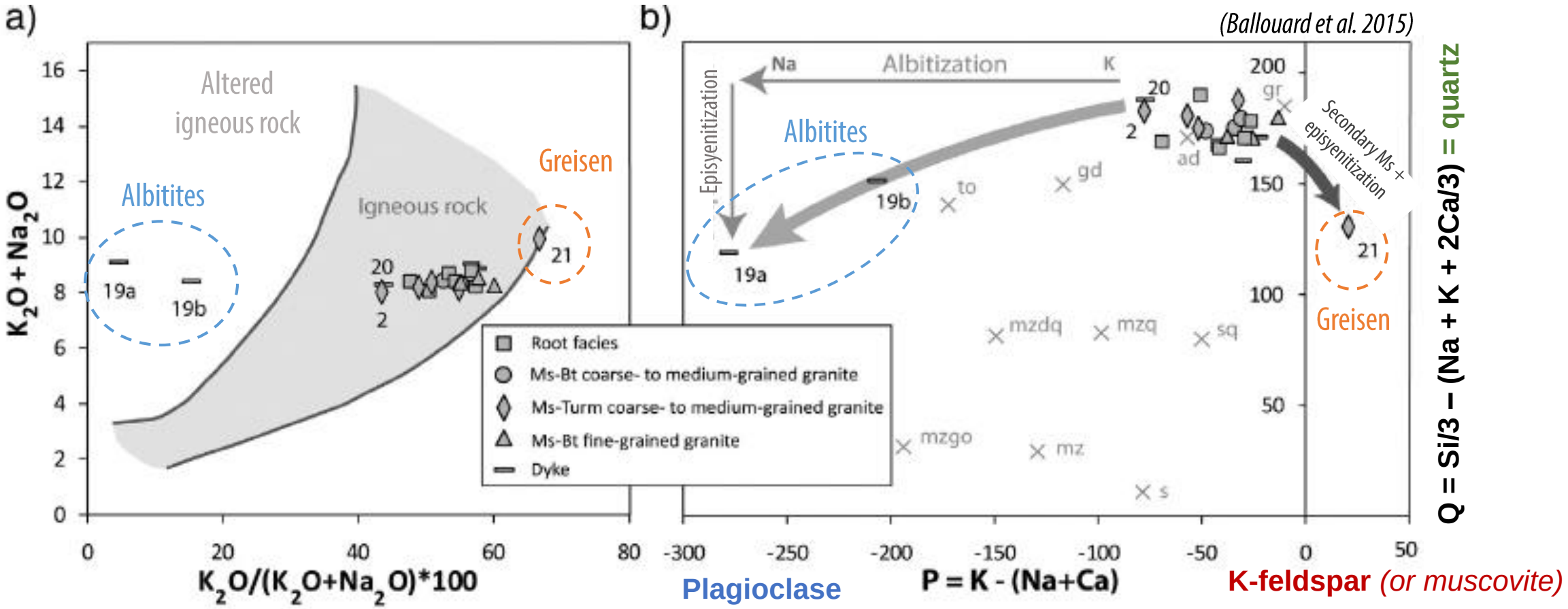


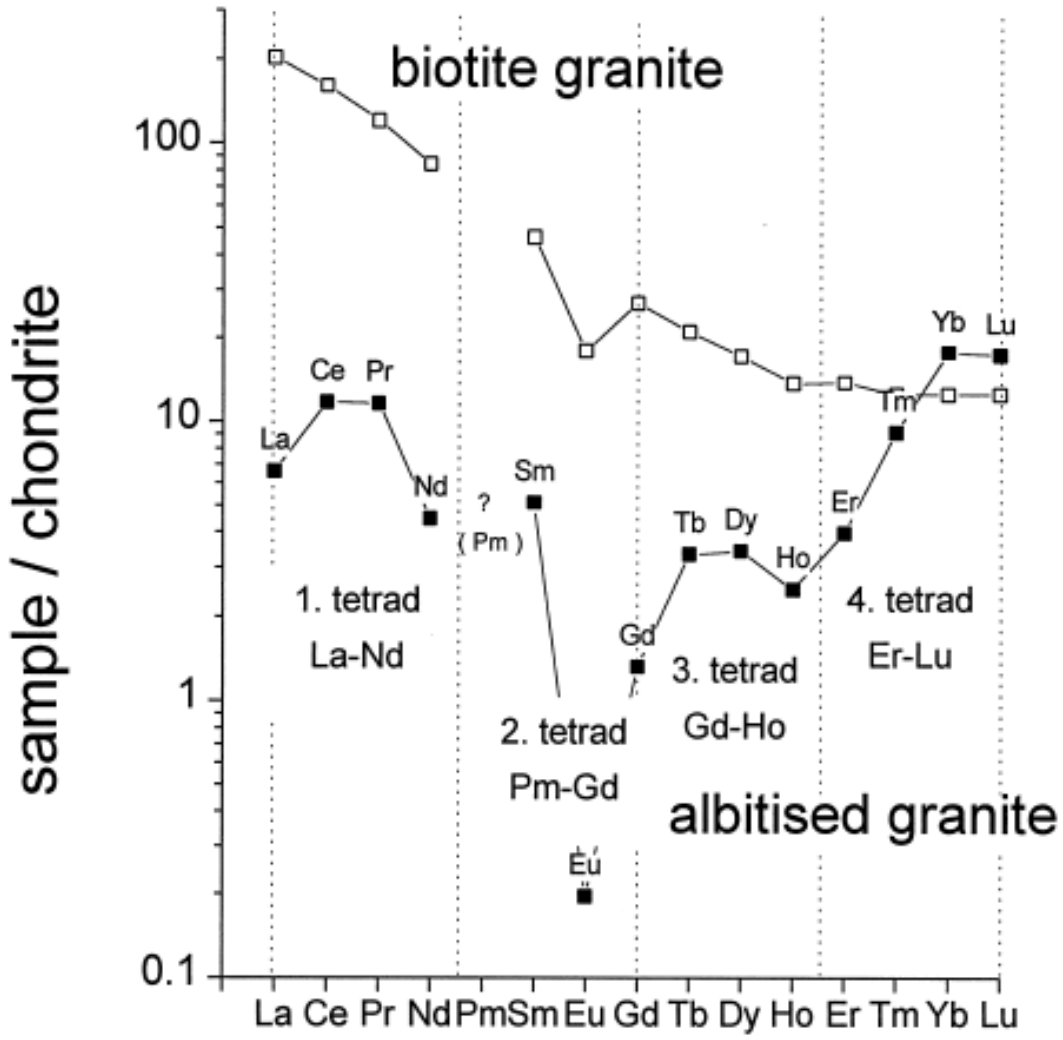
Diagramme de Hughes (1973)- %pds

Diagramme chimique-mineralogique de Debon and Le Fort (1988) en millication (Q et P en proportion molaire de cation multipliée par 1000)

gr = granite, ad= adamellite, gd= granodiorite, to= tonalite, sq = quartz syenite, mzq = quartz monzonite, mzdq = quartz monzodiorite, s = syenite, mz = monzonite, and mzgo= monzogabbro

Les granites à métaux rares: caractéristiques géochimiques

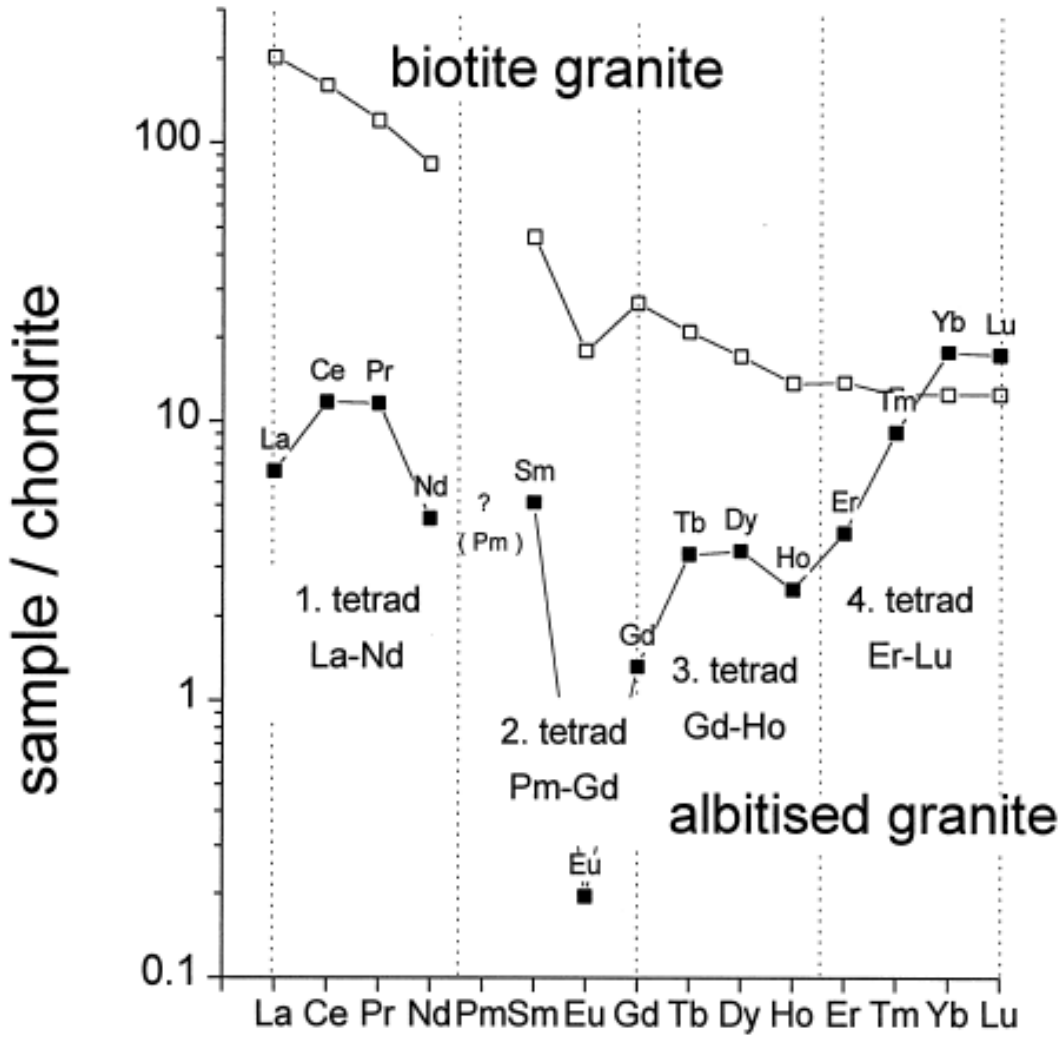
Les effets Tetrads



Irber (1999)

Les granites à métaux rares: caractéristiques géochimiques

Les effets Tetrads



Irber (1999)

Les spectres REE de nombreux granites à métaux rares sont caractérisés par un fractionnement particulier en quatre compartiments qu'on appelle Tetrad.

On explique cela par un comportement non-CHARAC (« Charge and Radius Control ») des REE à la transition magmatique-hydrothermale: complexation préférentielle de certains REE dans des fluides (ou liquides) riches en F.

Effet Tetrad significatif si $TE_{1-3} > 1.1$ (Irber 1999)

$$TE_{1-3} = (t1 \times t3)^{0.5}$$

$$t1 = (Ce/Ce_t \times Pr/Pr_t)^{0.5};\ t3 = (Tb/Tb_t \times Dy/Dy_t)^{0.5};$$

$$Ce/Ce_t = Ce_{cn}/(La_{cn}^{2/3} \times Nd_{cn}^{1/3});\ Pr/Pr_t = Pr_{cn}/(La_{cn}^{1/3} \times Nd_{cn}^{2/3});$$

$$Tb/Tb_t = Tb_{cn}/(Gd_{cn}^{2/3} \times Ho_{cn}^{1/3});\ Dy/Dy_t = Dy_{cn}/(Gd_{cn}^{1/3} \times Ho_{cn}^{2/3});$$

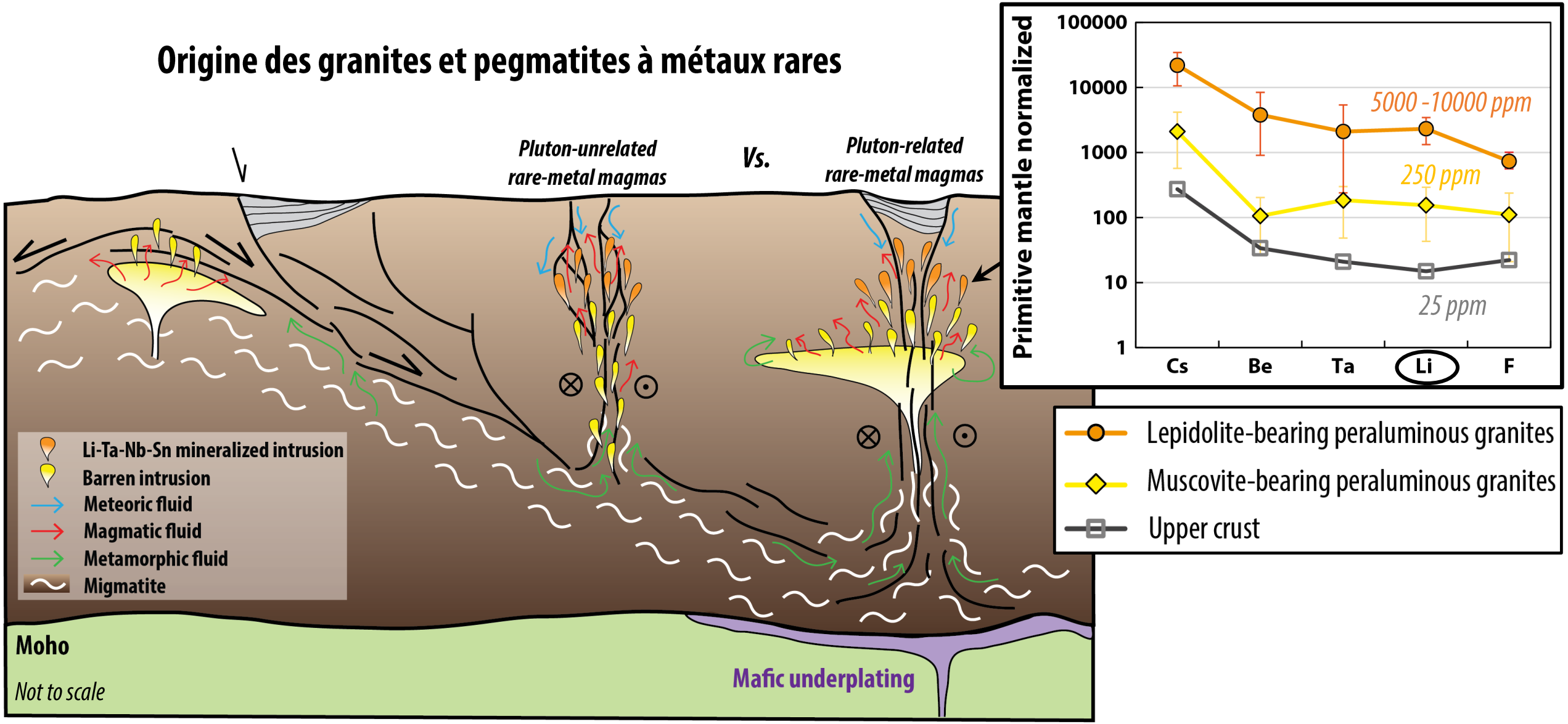
Ln_{cn}: chondrite-normalized lanthanide concentration.

Granites et syénites à métaux rares: caractéristiques et processus minéralisateurs

Systèmes peralumineux (A/CNK >> 1.1)

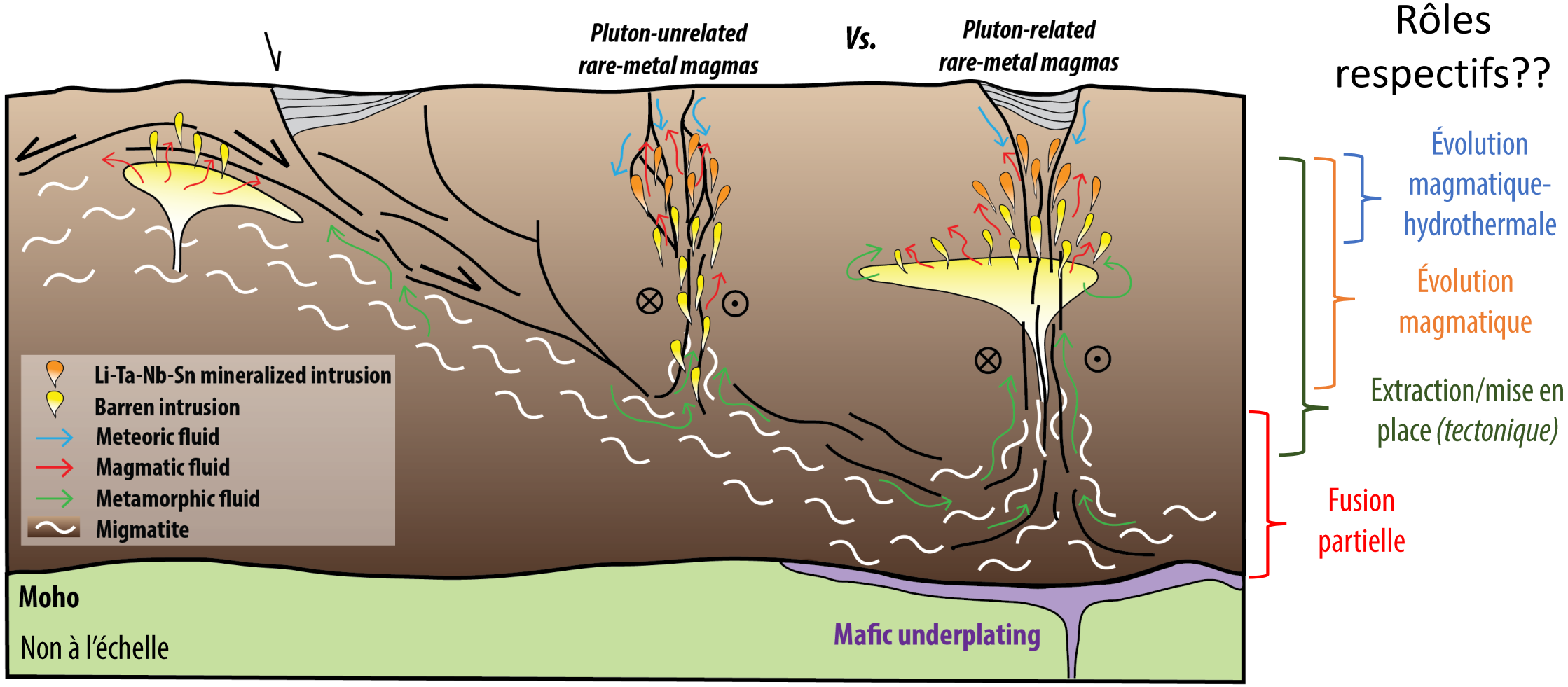
Exemples de modèles pétrogénétiques et processus

Origine des granites et pegmatites à métaux rares



Comment génère t'on des magmas si riches en métaux?

Origine des granites et pegmatites à métaux rares

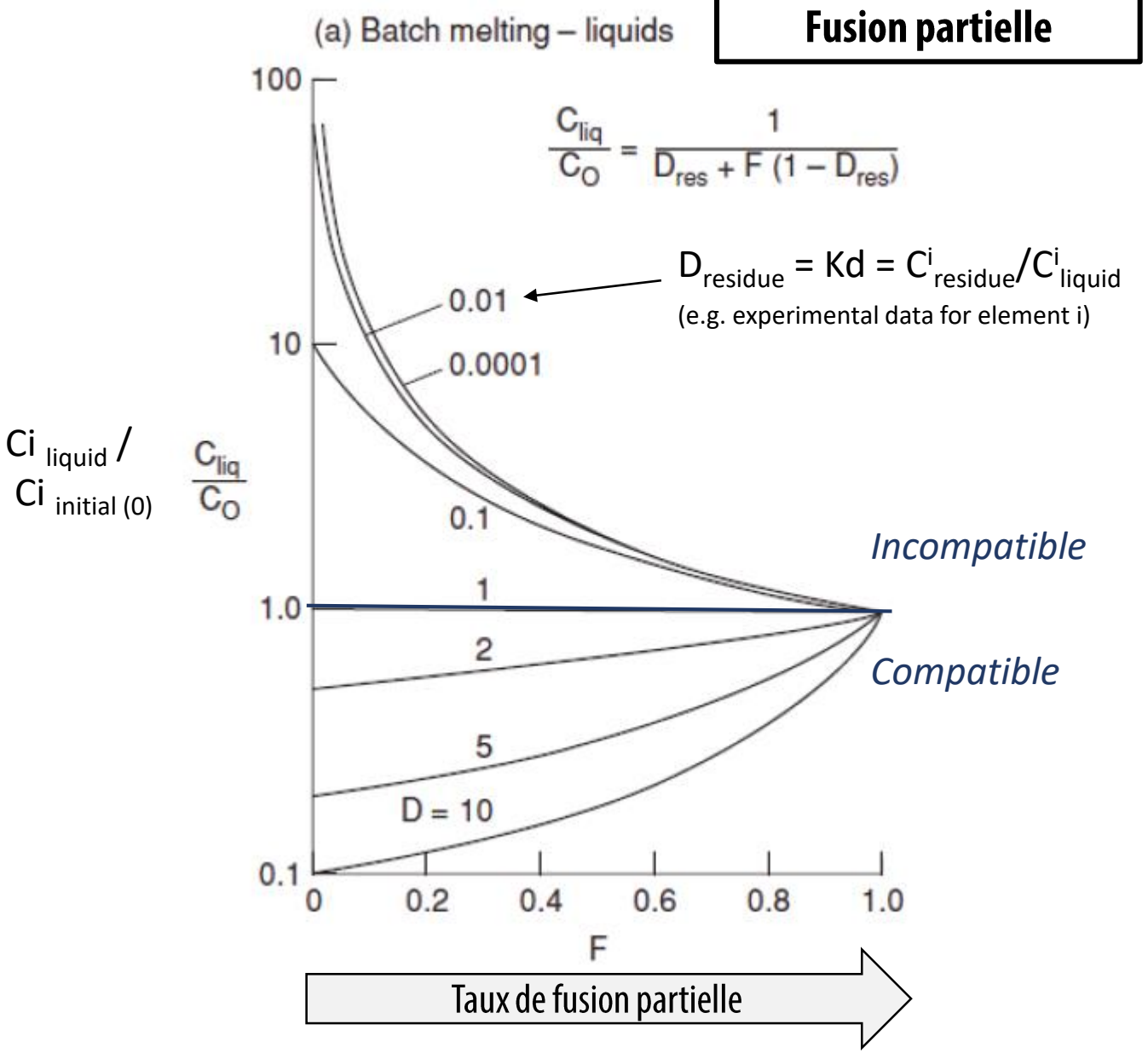


Comment génère t'on des magmas si riches en métaux?

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux

Robb, 2005

Fusion partielle



Processus magmatiques d'enrichissement en métaux

Robb, 2005

Fusion partielle

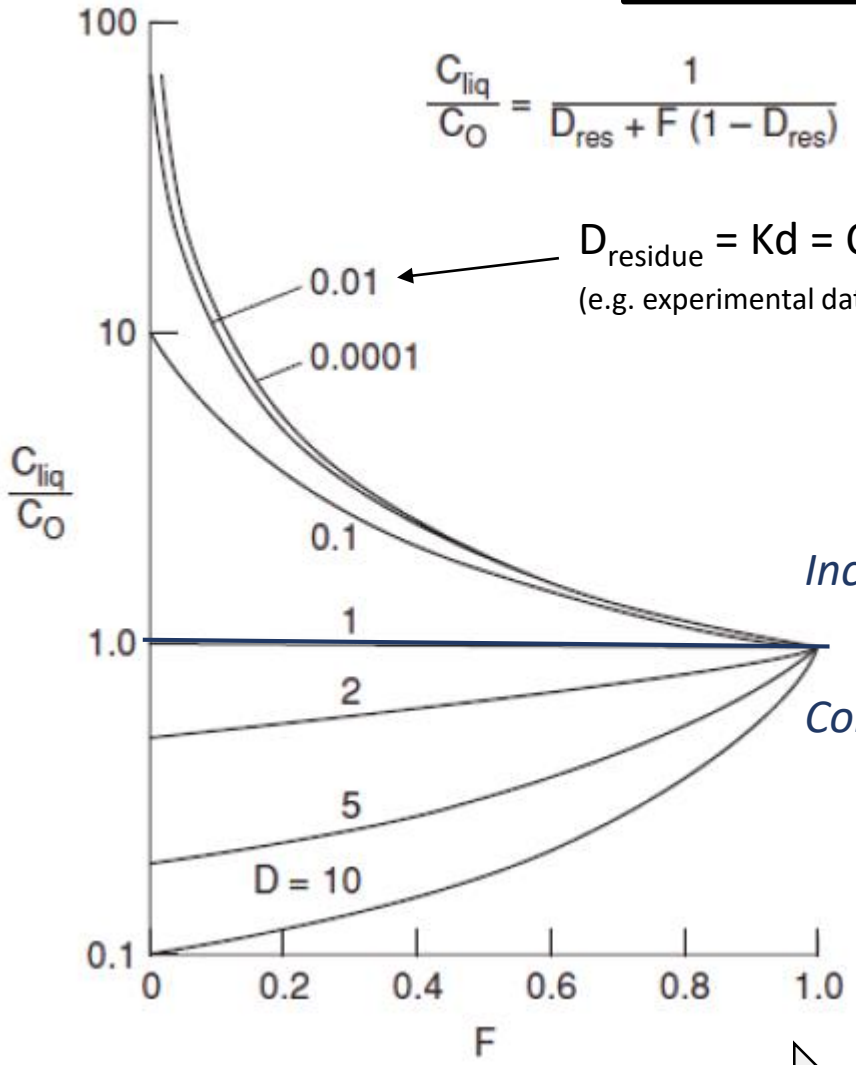
(a) Batch melting – liquids

$$\frac{C_{liq}}{C_O} = \frac{1}{D_{res} + F\,(1 - D_{res})}$$

$D_{residue} = Kd = C^i_{residue}/C^i_{liquid}$

(e.g. experimental data for element i)

$Ci_{liquid} / Ci_{initial\ (0)}$



Incompatible

Compatible

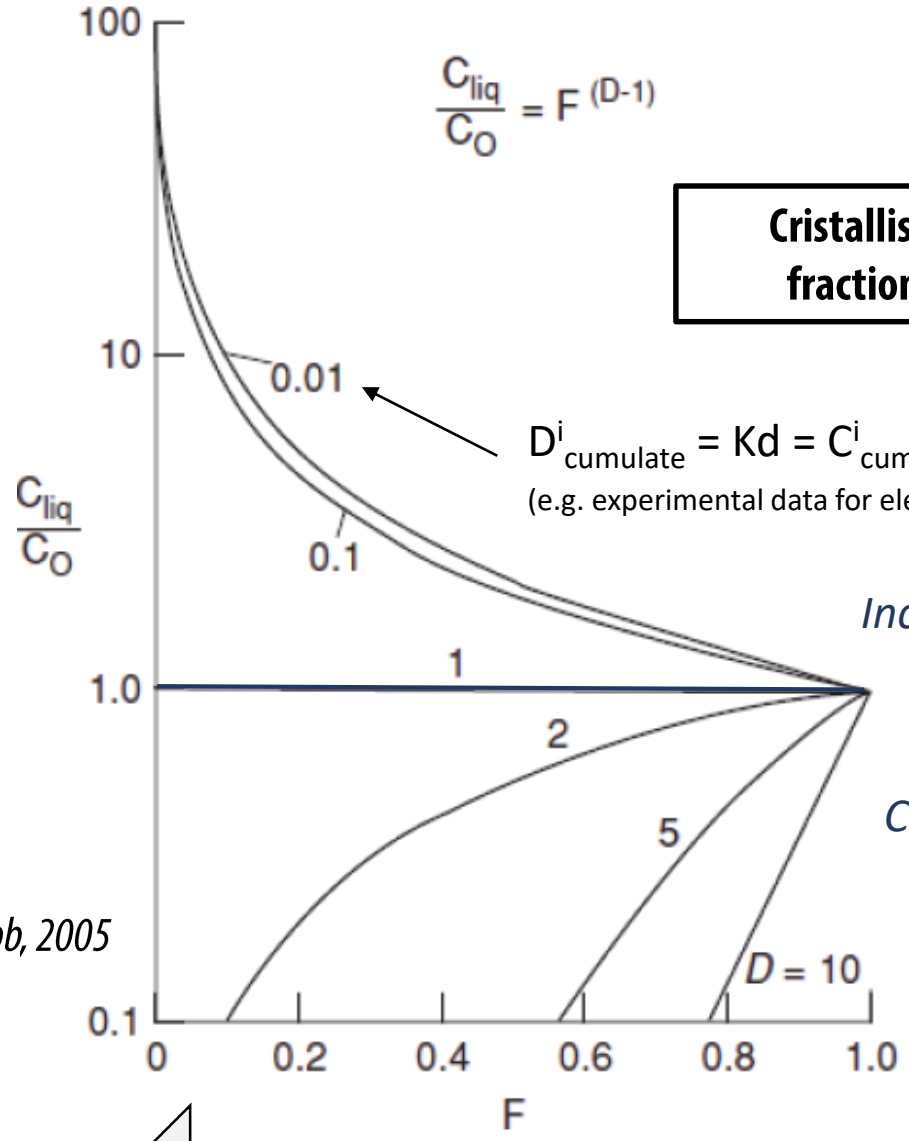
Taux de fusion partielle

Cristallisation fractionnée

$$\frac{C_{liq}}{C_O} = F^{(D-1)}$$

$D^i_{cumulate} = Kd = C^i_{cumulate}/C^i_{liquid}$

(e.g. experimental data for element i)



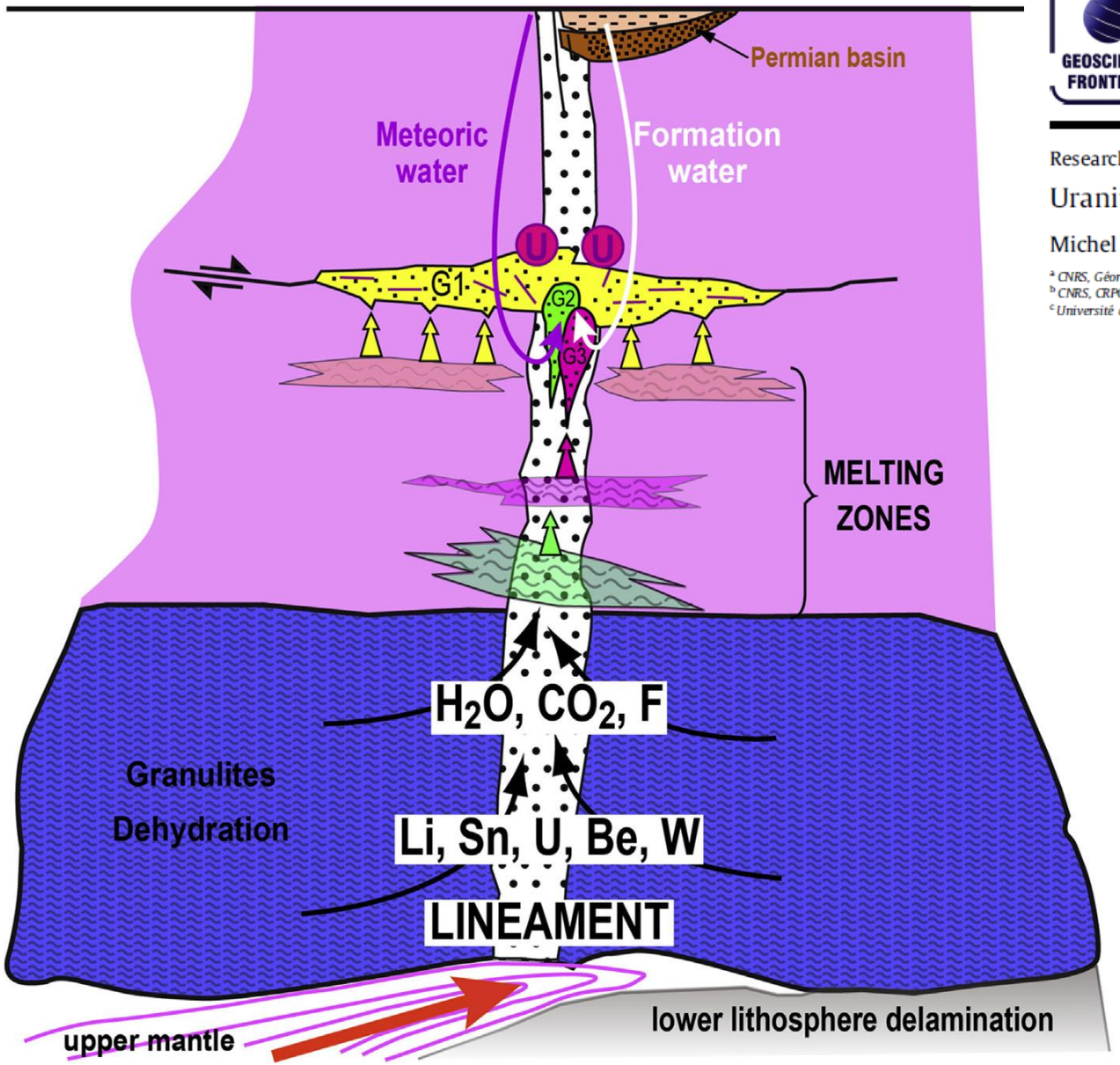
Incompatible

Compatible

Robb, 2005

Taux de cristallisation fractionnée

Origine des granites et pegmatites à métaux rares
(exemples de modèles pétrogénétiques)



Cuney and Barbey (2014)

Contents lists available at ScienceDirect
China University of Geosciences (Beijing)
Geoscience Frontiers
journal homepage: www.elsevier.com/locate/gsf

Research paper

Uranium, rare metals, and granulite-facies metamorphism

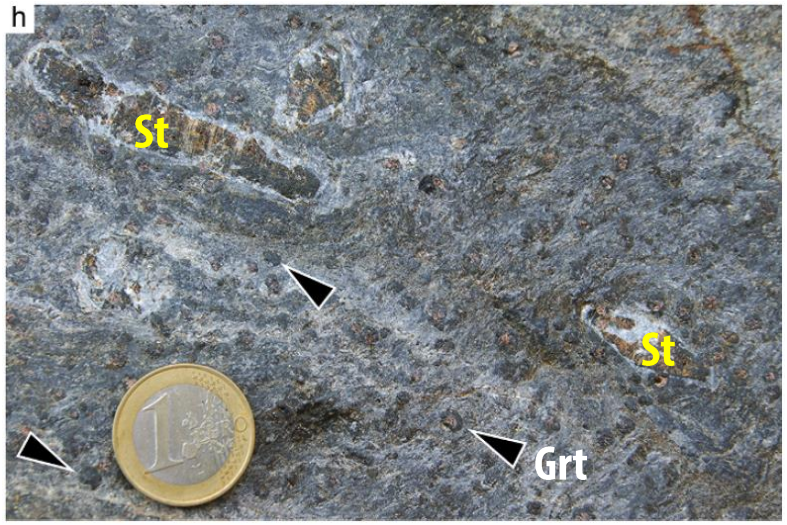
Michel Cuney [a,c,*], Pierre Barbey [b,c]

[a] CNRS, Géoressources, UMR 7359, BP 239, F-54506 Vandœuvre-lès-Nancy, France
[b] CNRS, CRPG, UMR 7358, BP 20, F-54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France
[c] Université de Lorraine, CS 25233, F-54042 Nancy, France

Fusion partielle en présence de fluides riches CO_2 , F et métaux

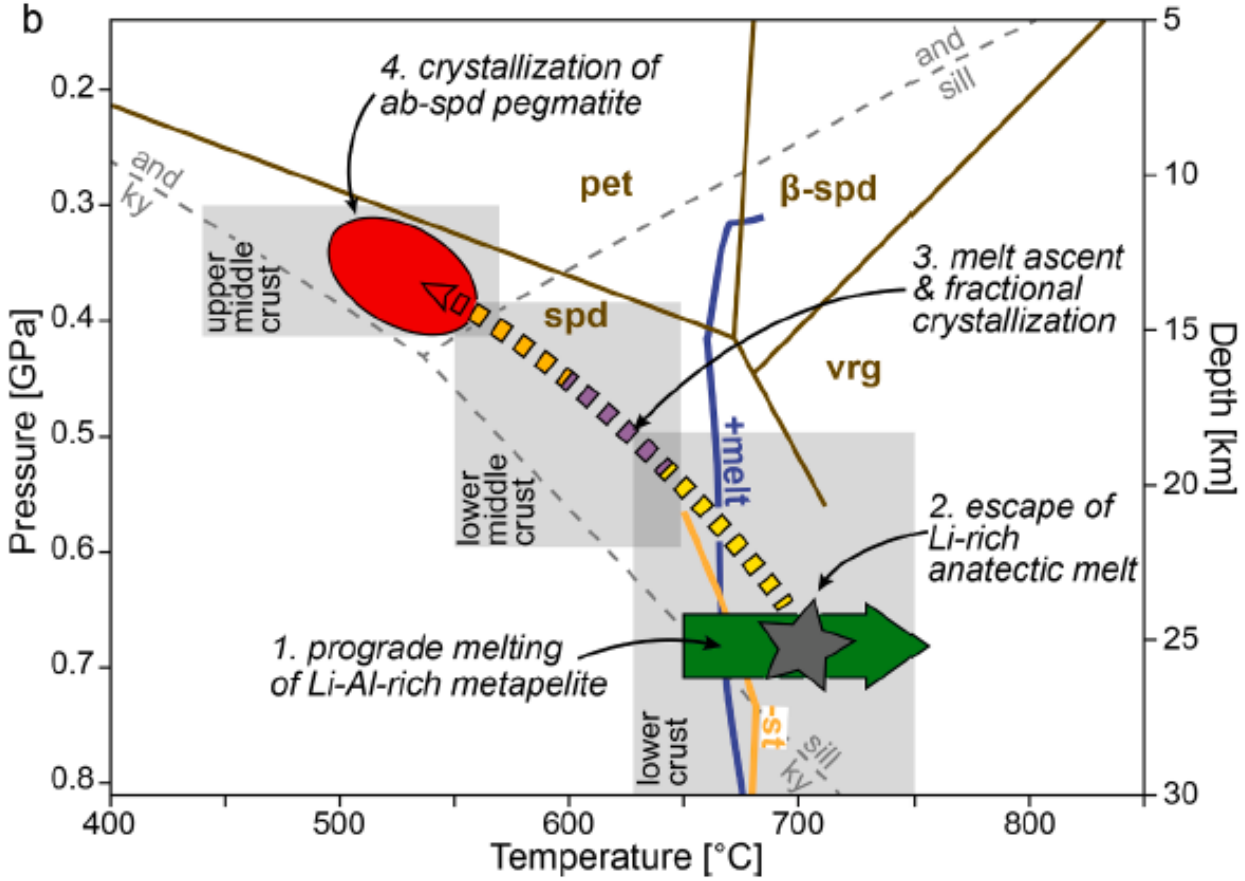
Déshydratation de la croute inférieure par des vagues de fluides riches CO_2 issus du manteau induit la déstabilisation des micas et la libération de fluides riches en métaux (Li, Sn, Be, …)

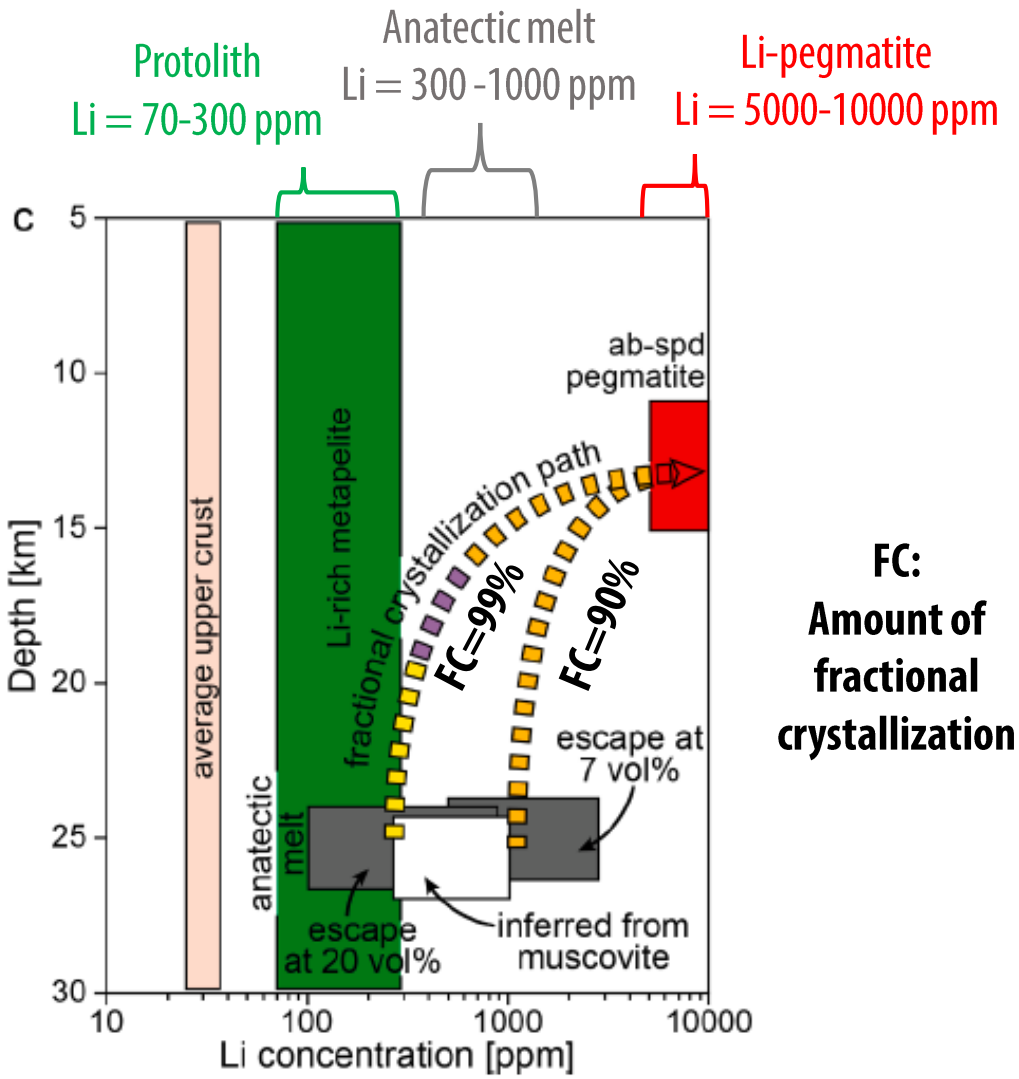
Desequilibrium partial melting of Li-rich staurolite-bearing metapelites



Staurolite-garnet micaschist
Eastern alps

Knoll et al. 2023





FC: Amount of fractional crystallization

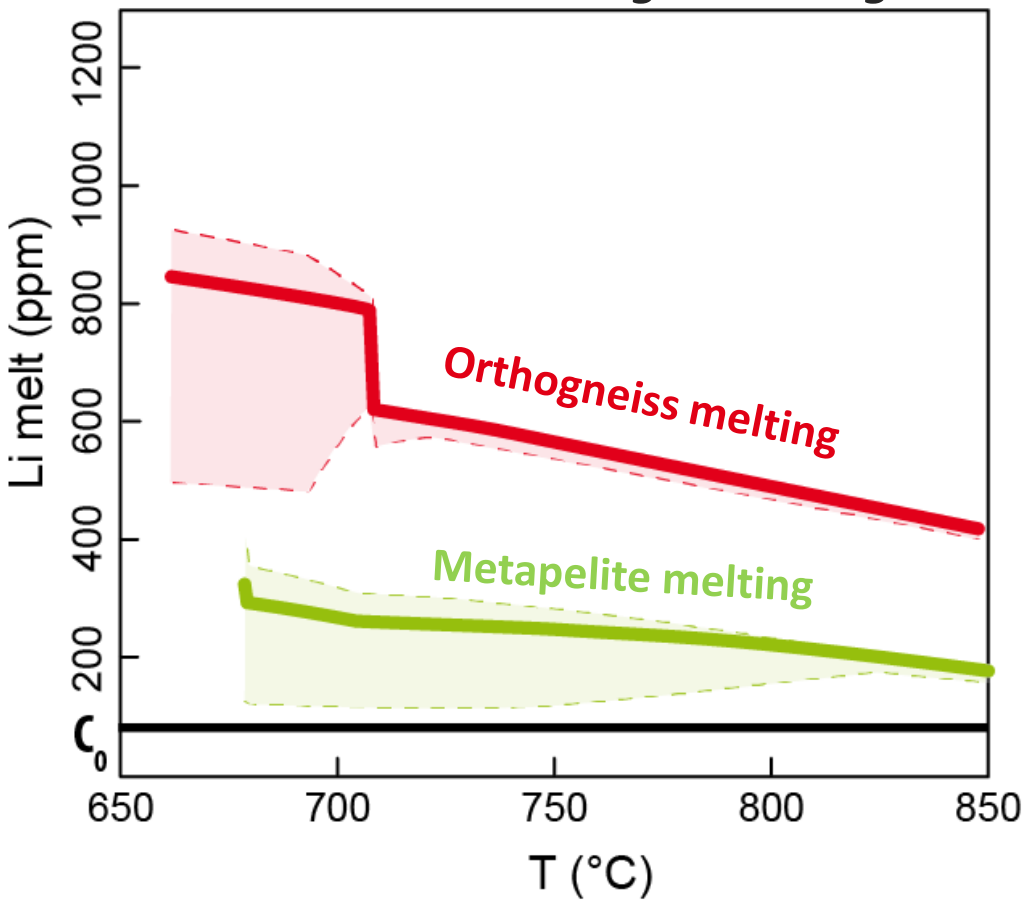
Partial melting of peraluminous orthogneisses (magmatic recyling)

Ballouard et al. 2023

Orthogneiss (Cadomian)
vs.
Metapelite (Brioverian)

Variscan migmatites (Velay domes, French Massif central)

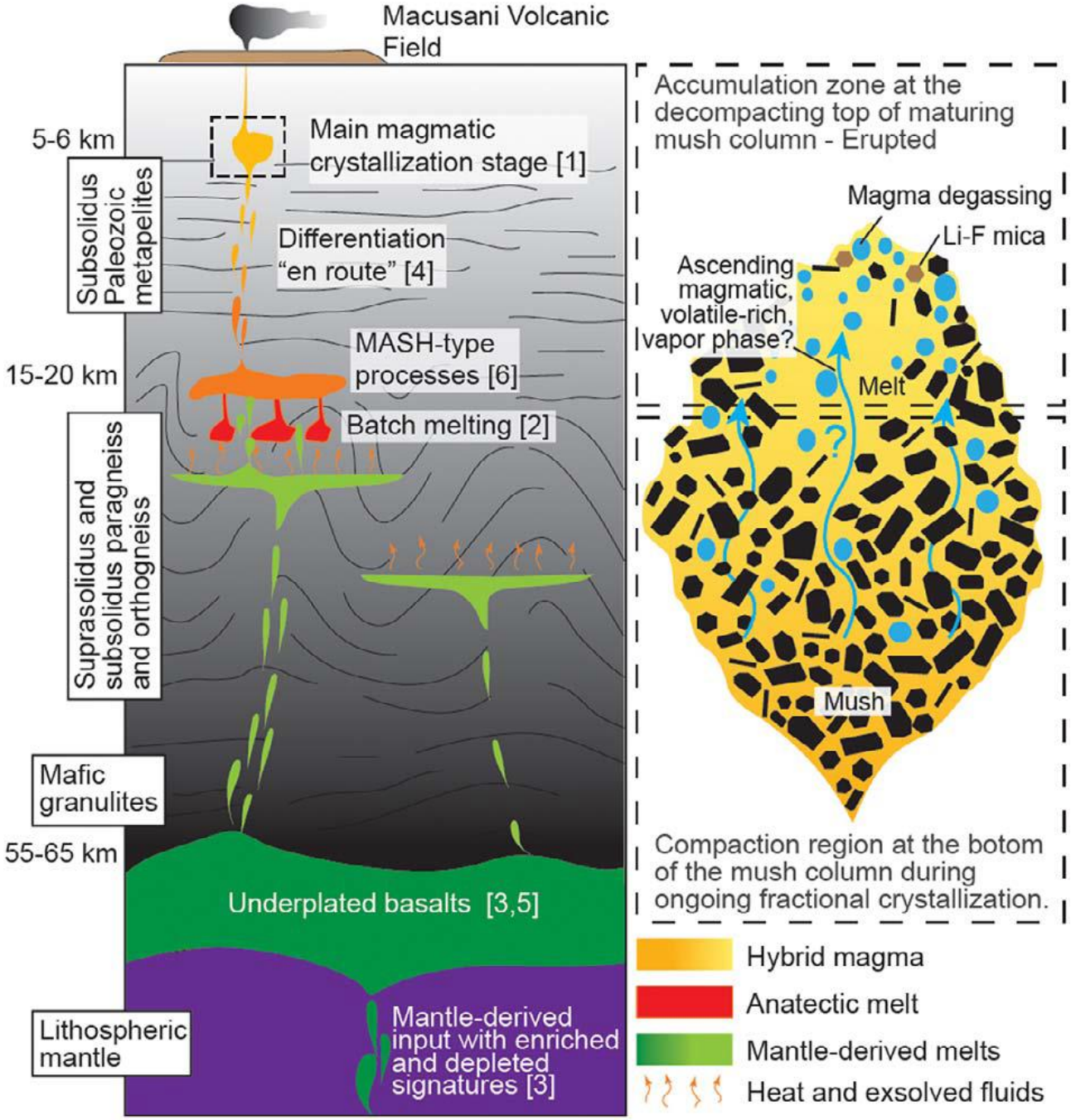
Partial melting modelling

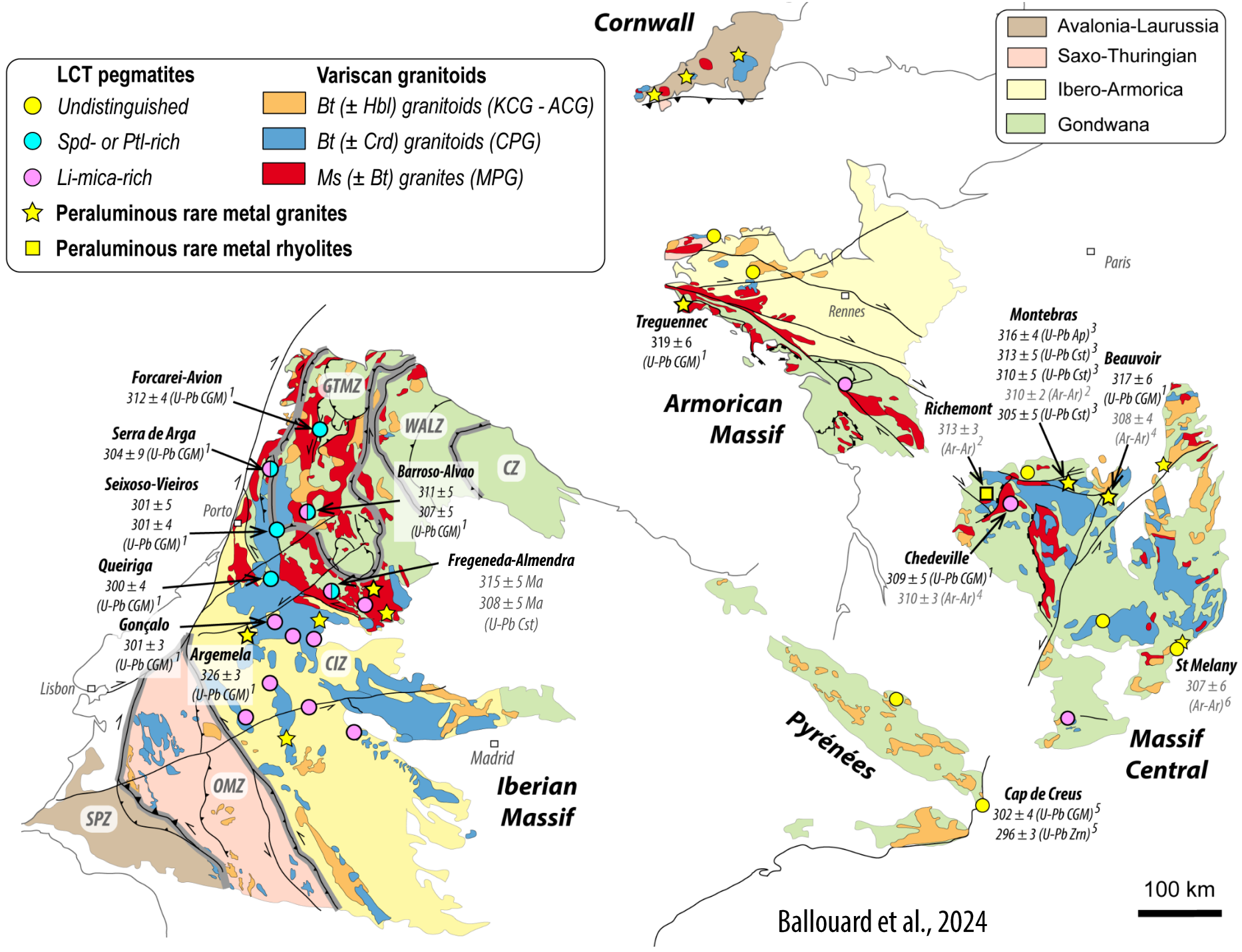


Recycling of Cadomian to Ordovician orthogneisses as a key feature of rare-metal-fertile Variscan granitic magmatism

Contribution of metal and F-rich metasomatized mantle-derived potassic mafic melts during partial melting

RAMIREZ-BRIONES *et al.* *2025*



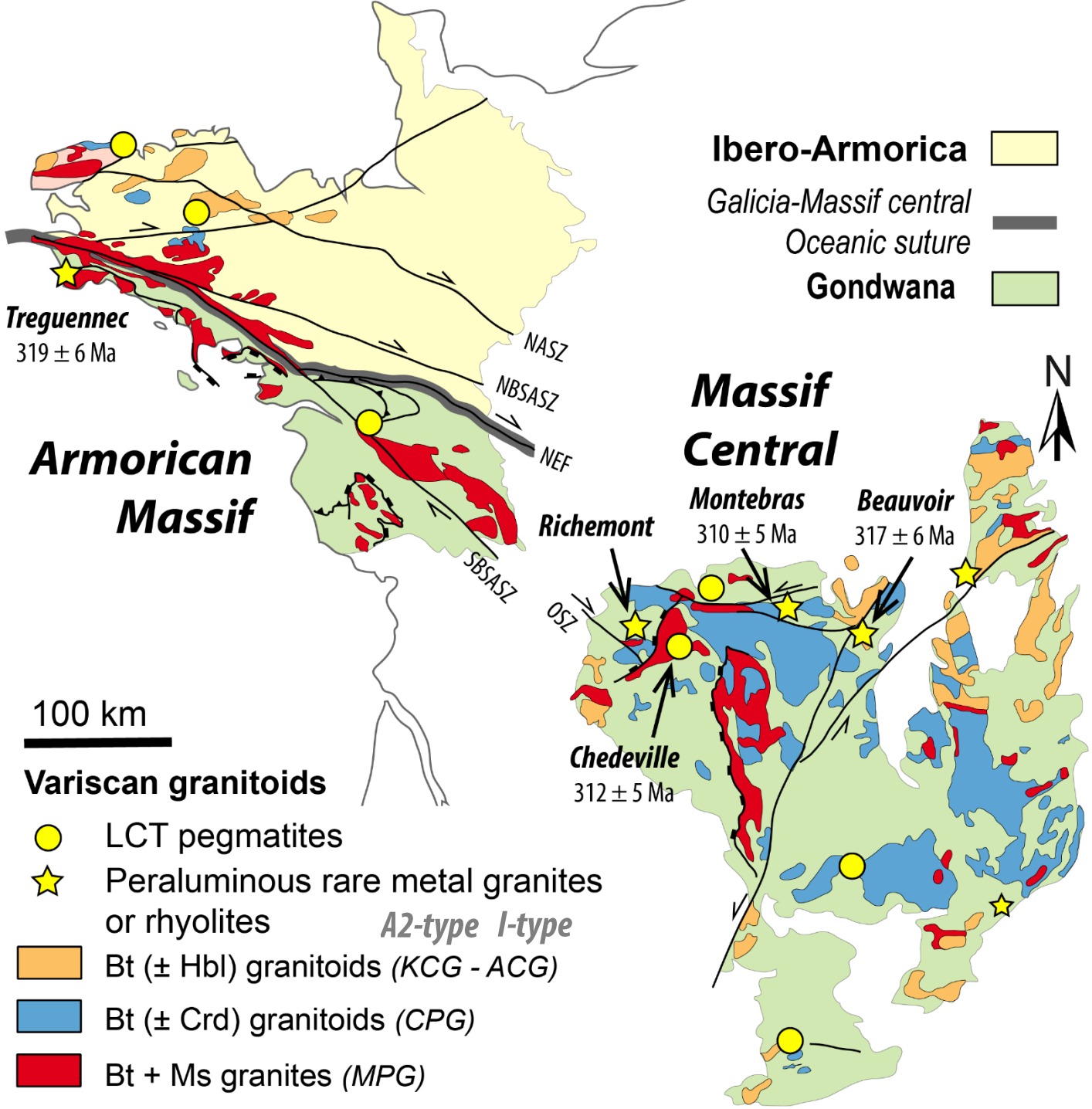


Ballouard et al., 2024

Le magmatisme hyper-peralumineux à métaux rares de la chaîne varisque ouest-européenne

- Minéralisation disséminée en Li-Ta-Nb-Sn-Be
- Granites *(e.g. Beauvoir, Montebras)* et rhyolites *(Richemont)*
- Pegmatites LCT (Li-Cs-Ta) à Lépidolite *(e.g. Chedeville)* ou spodumène-pétalite *(Ibérie principalement)*
- Mise en place entre 320 et 300 Ma

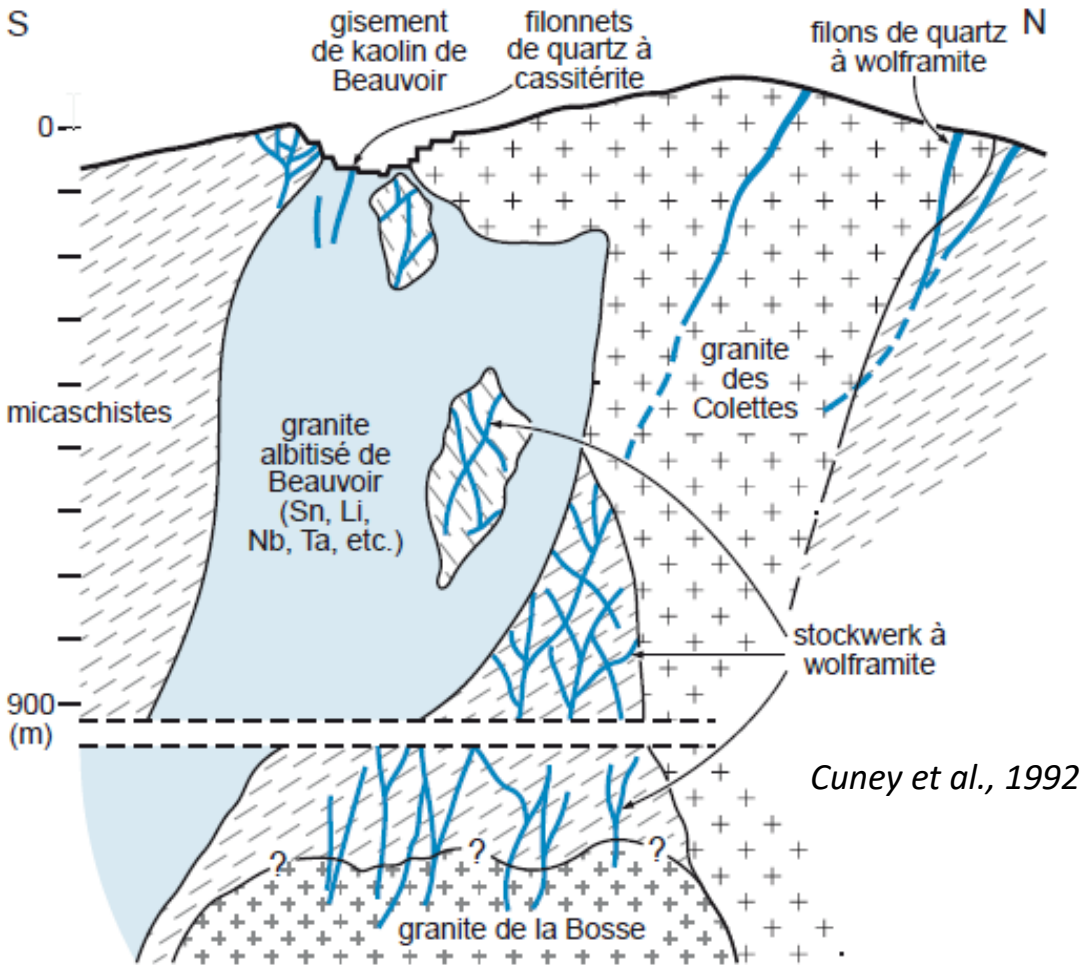
Le magmatisme à métaux rares de la chaine varisque française



Pegmatites peralumineuses à Li-Cs-Ta (LCT) (Mont d'Ambazac: Chedeville) et leucogranites (Beauvoir, Montebras) ou rhyolites (Richemont) peralumineux à métaux rares.

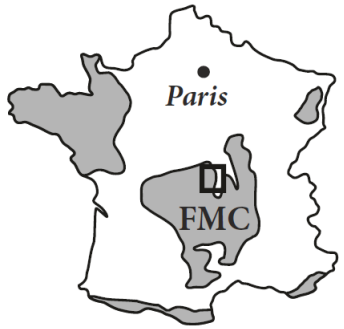
Mise en place en contexte tardi-orogénique entre 320 et 310 Ma

Le granite de Beauvoir (France)



Cuney et al., 1992

Peraluminous High P rare metal granite (MPG-related)

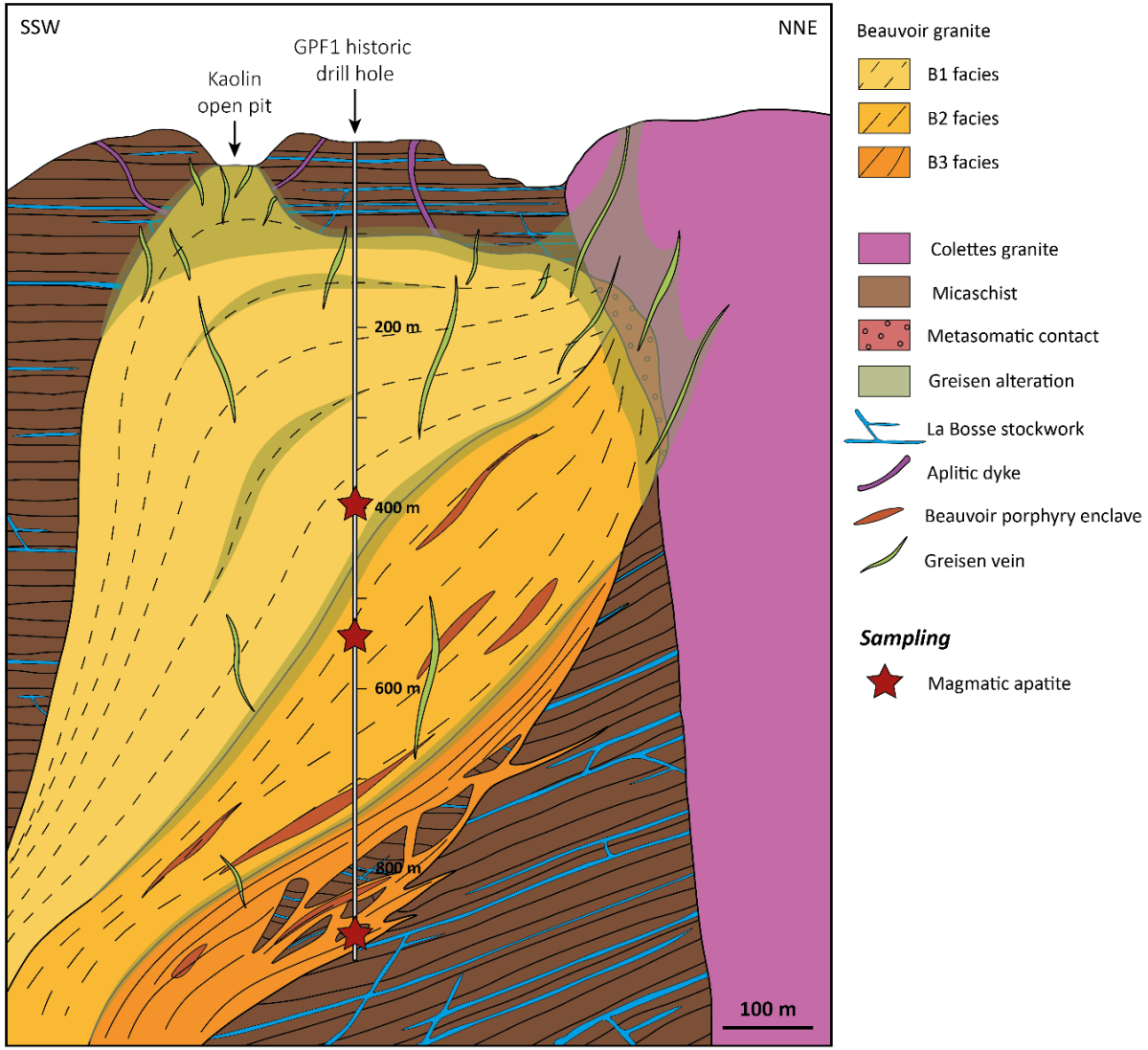


Le complexe granitique d'Échassières est composé de trois intrusions:

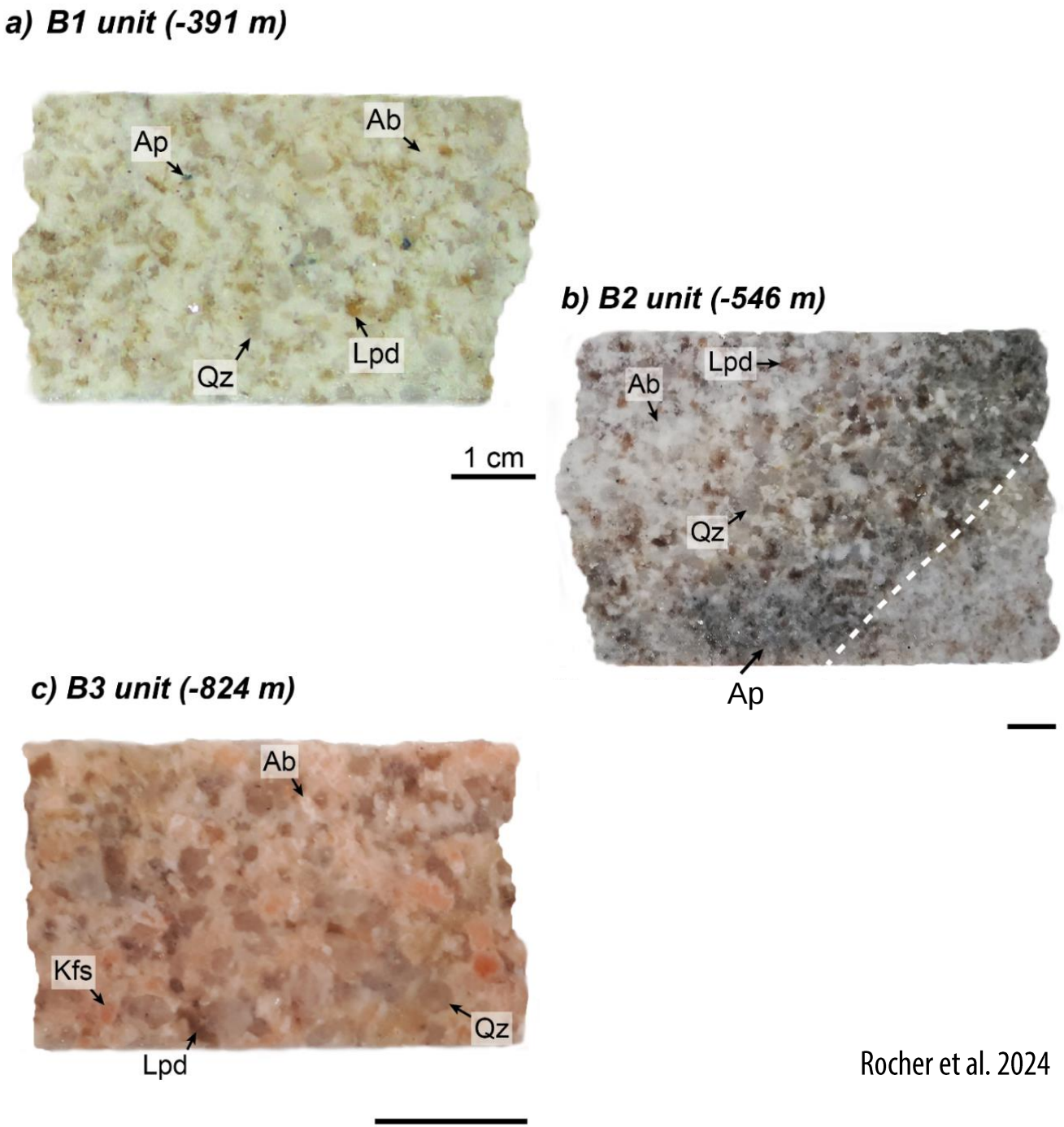
- Le granite de la Bosse, non affleurant, est le plus ancien; il est à l'origine du stockwerk à wolframite.
- Le granite porphyroïde des Colettes
- Le granite de Beauvoir qui montre une importante minéralisation disséminée à Li-Sn-Ta-F, matérialisée par la présence de lépidolite, topaze, cassitérite, et colombite-tantalite.

L'exploitation actuelle extrait du kaolin des granites des Colettes et de Beauvoir, des sables lithinifères, et récupère de la cassitérite et de la colombo-tantalite du granite de Beauvoir.

Granite de Beauvoir



Rocher et al. 2024
(d'après Cuney et al. 1992)

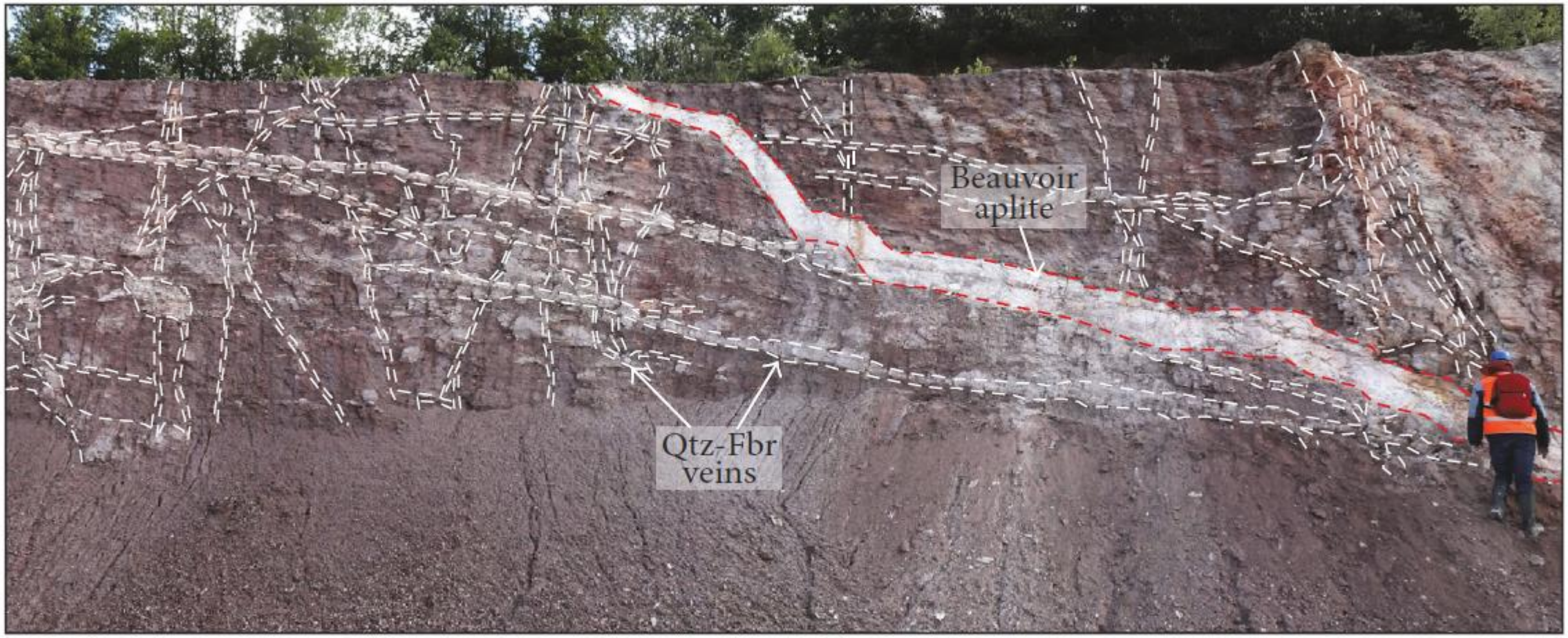


Rocher et al. 2024

Le granite de Beauvoir (France)

Harlaux et al., 2017

Le granite de Beauvoir (France)



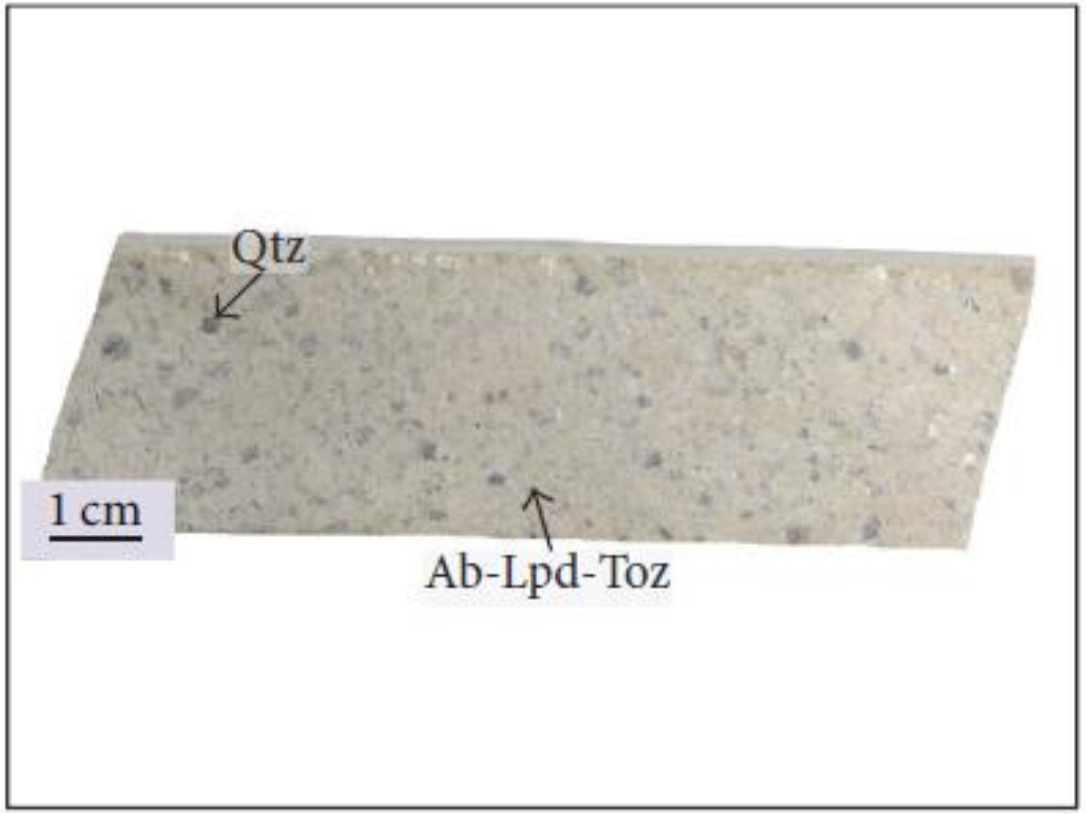
Harlaux et al., 2017

Stockwork de La Bosse

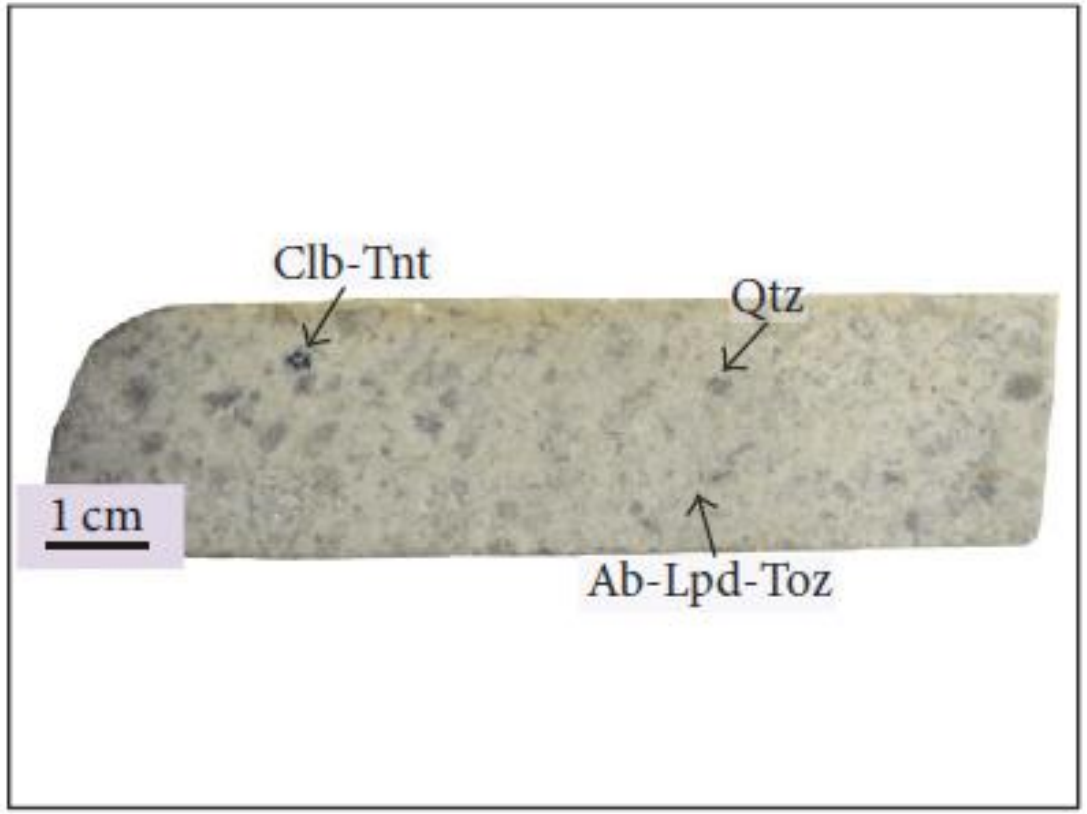
Fbr: ferberite –$FeWO_4$, Fe-rich wolframite

Le granite de Beauvoir (France)

Harlaux et al., 2017



(a) Beauvoir granite (*sample B1-125*)



(b) Beauvoir granite (*sample B1-379*)

Ab: albite; Clb-Tnt: columbite-tantalite; Lpd: lepidolite; Qtz: quartz; Toz: topaz

Le granite de Beauvoir

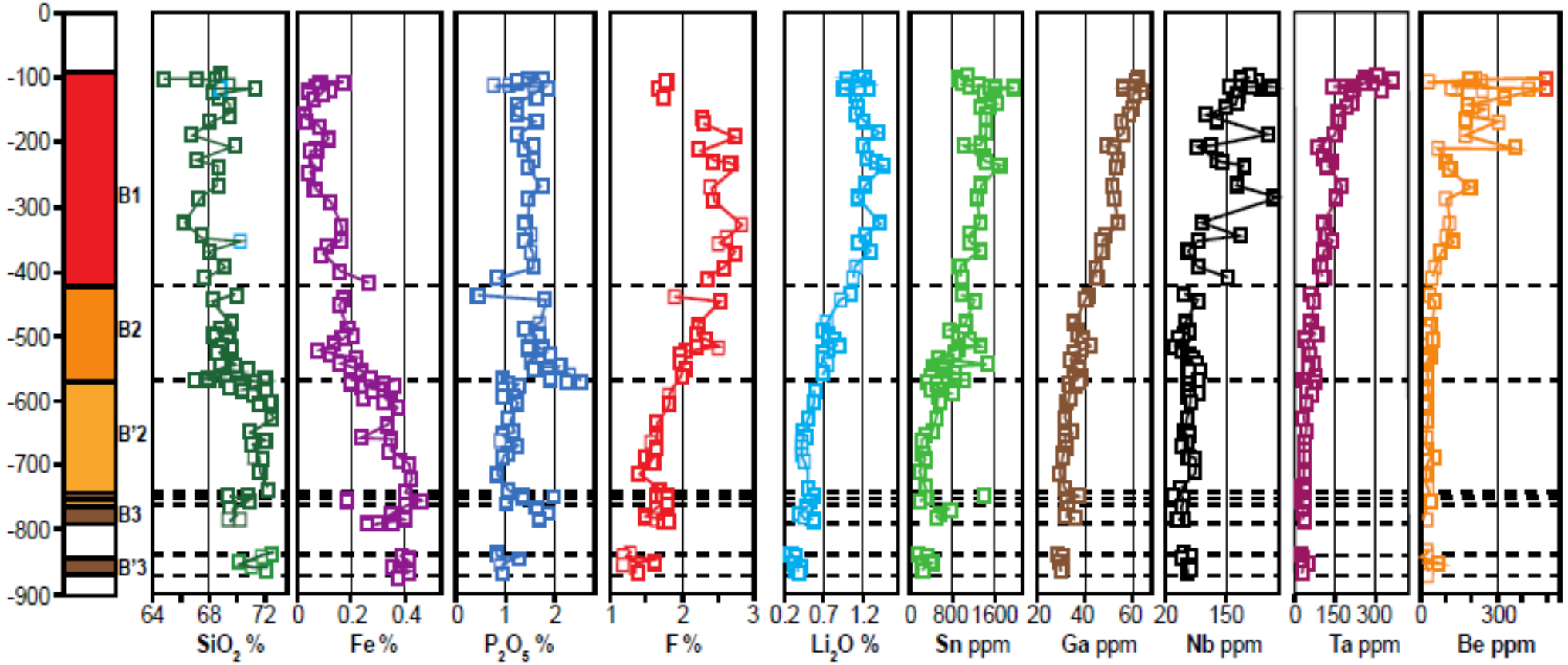


Figure 95: Geochemical logs along the GPF1 drill-hole (redrawn from Raimbault et al. 1995). Note the discontinuity for major elements at the B'2-B2 boundary . At the B1-B2 boundary, P and F depletion are due to subsolidus fluid circulation at the faulted boundary. Note that Sn is contained in the Li-mica and the Nb-Ta-oxides as well as in the cassiterite.

Cuney et Marignac 2016

Le granite de Beauvoir

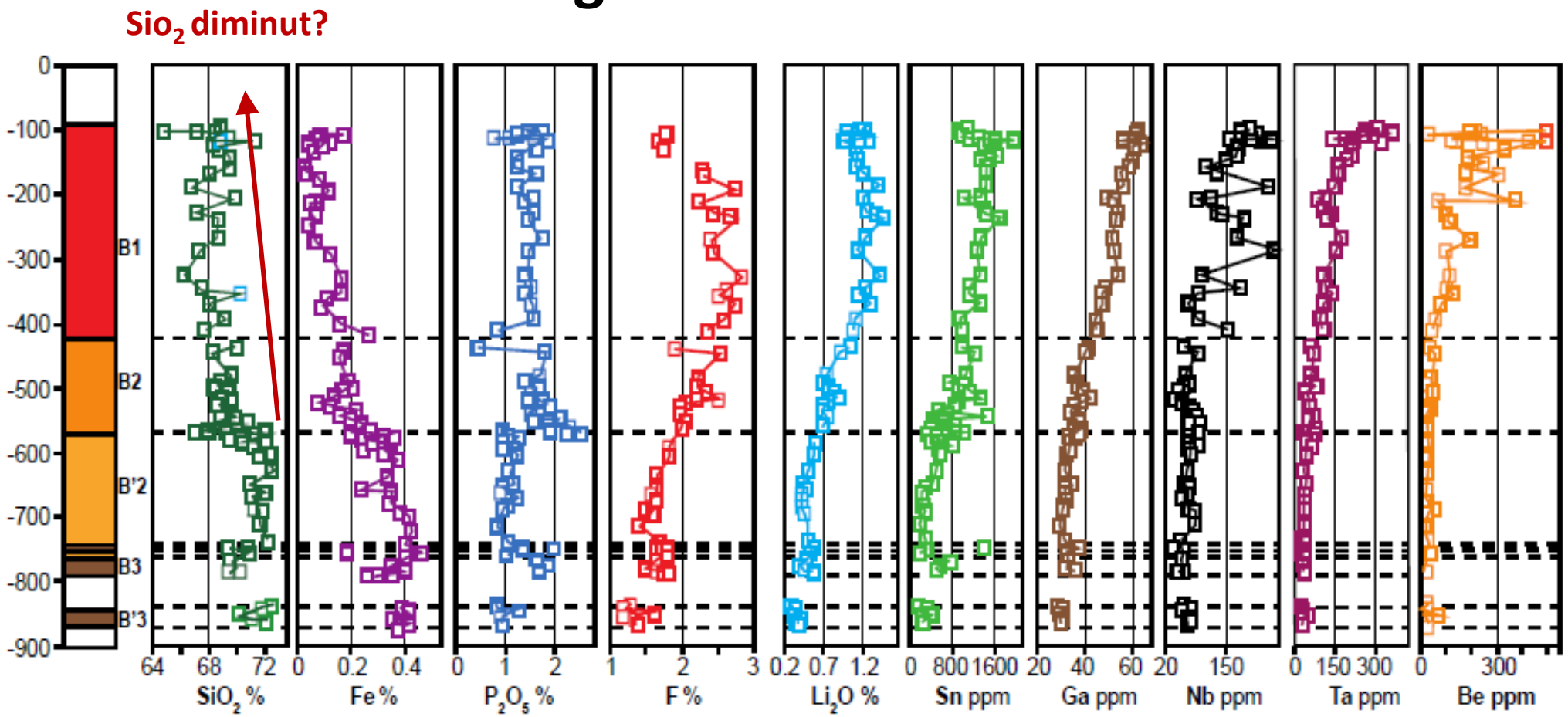
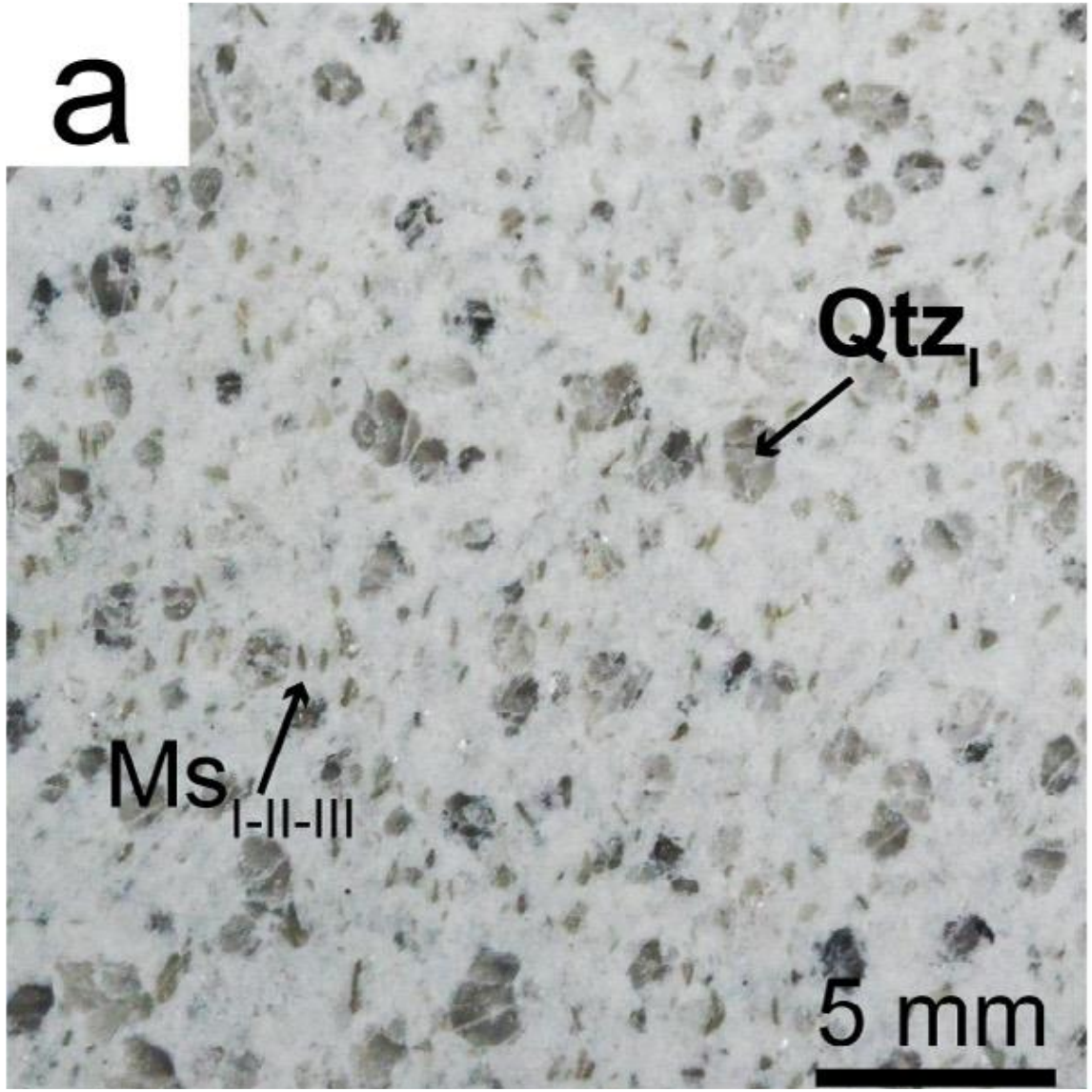


Figure 95: Geochemical logs along the GPF1 drill-hole (redrawn from Raimbault et al. 1995). Note the discontinuity for major elements at the B'2-B2 boundary . At the B1-B2 boundary, P and F depletion are due to subsolidus fluid circulation at the faulted boundary. Note that Sn is contained in the Li-mica and the Nb-Ta-oxides as well as in the cassiterite.



Les phénocristaux de quartz sont communs dans les granites à métaux rares.
Ceci traduit une cristallisation précoce du quartz en « désaccord » avec la série classique de cristallisation de Bowen

Granite à métaux rares d'Argemela (Portugal)

Michaud et al. 2019

L'effet de la fluorine sur les relations de phases dans les systèmes haplogranitiques:

Diminue la T de l'eutectique et augmente le champ de stabilité du quartz au dépend des feldspaths

Johannes and Holtz 1996 after Manning 1981

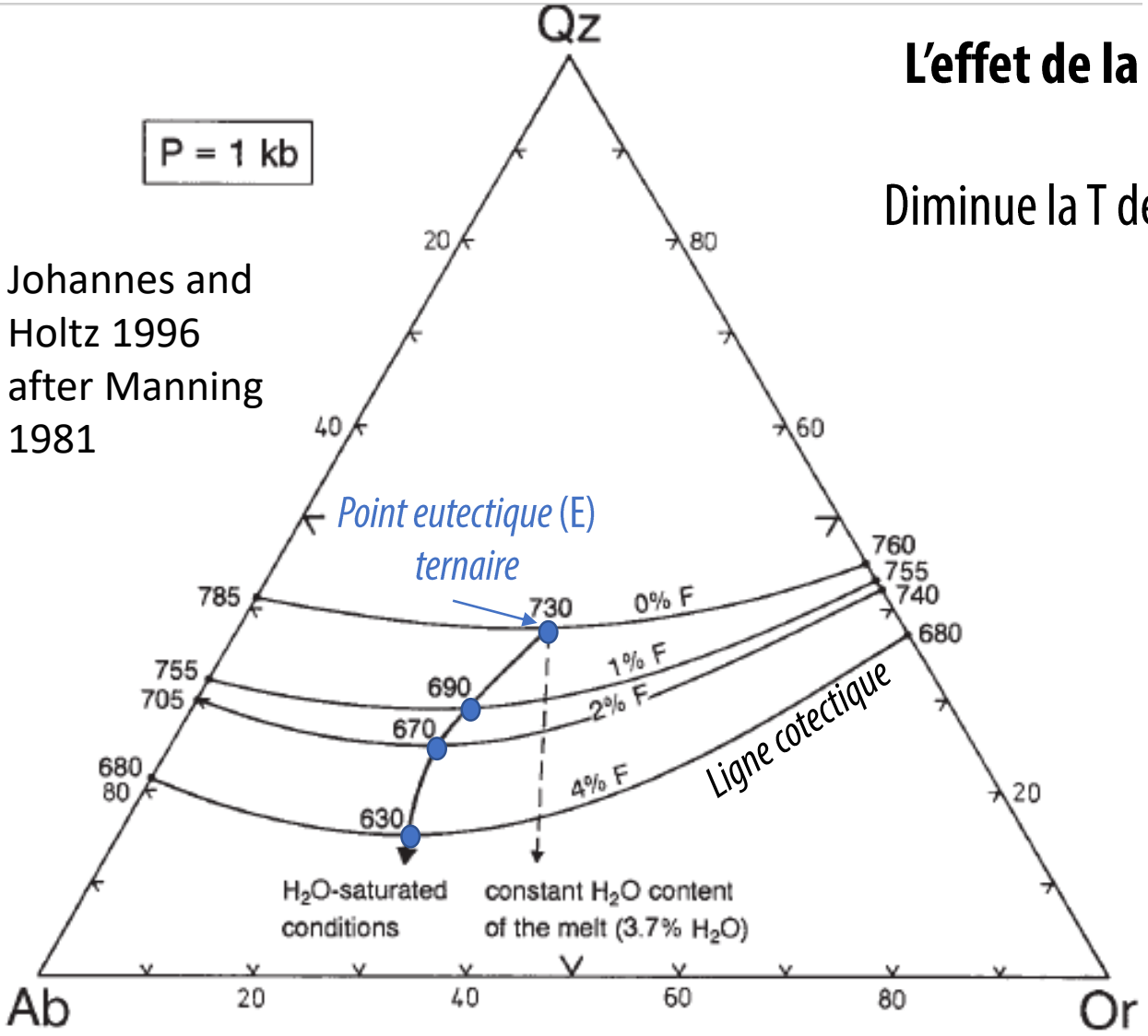


Fig. 4.13. Projections of the cotectic curves and minima of the system Qz-Ab-Or for 0, 1, 2, and 4 wt% F, at 1 kbar and H_2O-saturated conditions. The temperatures of the minima and Qz-Ab and Qz-Or eutectics are given. *Dots* position of minima; *arrow in full line* evolution of the minimum composition with increasing F content at H_2O-saturated conditions (increasing H_2O content of the melt); *dashed arrow* estimated evolution of the minimum composition at constant H_2O content of the melt (3.7 wt% H_2O) (Data source Manning 1981)

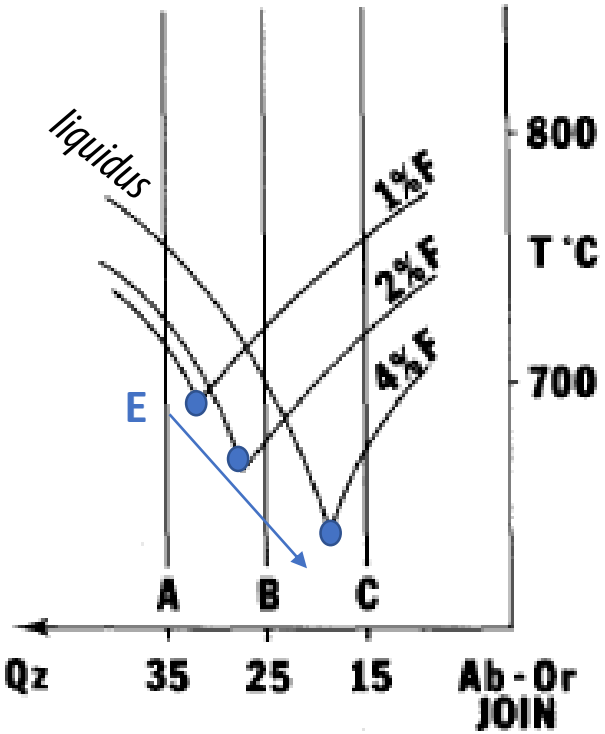
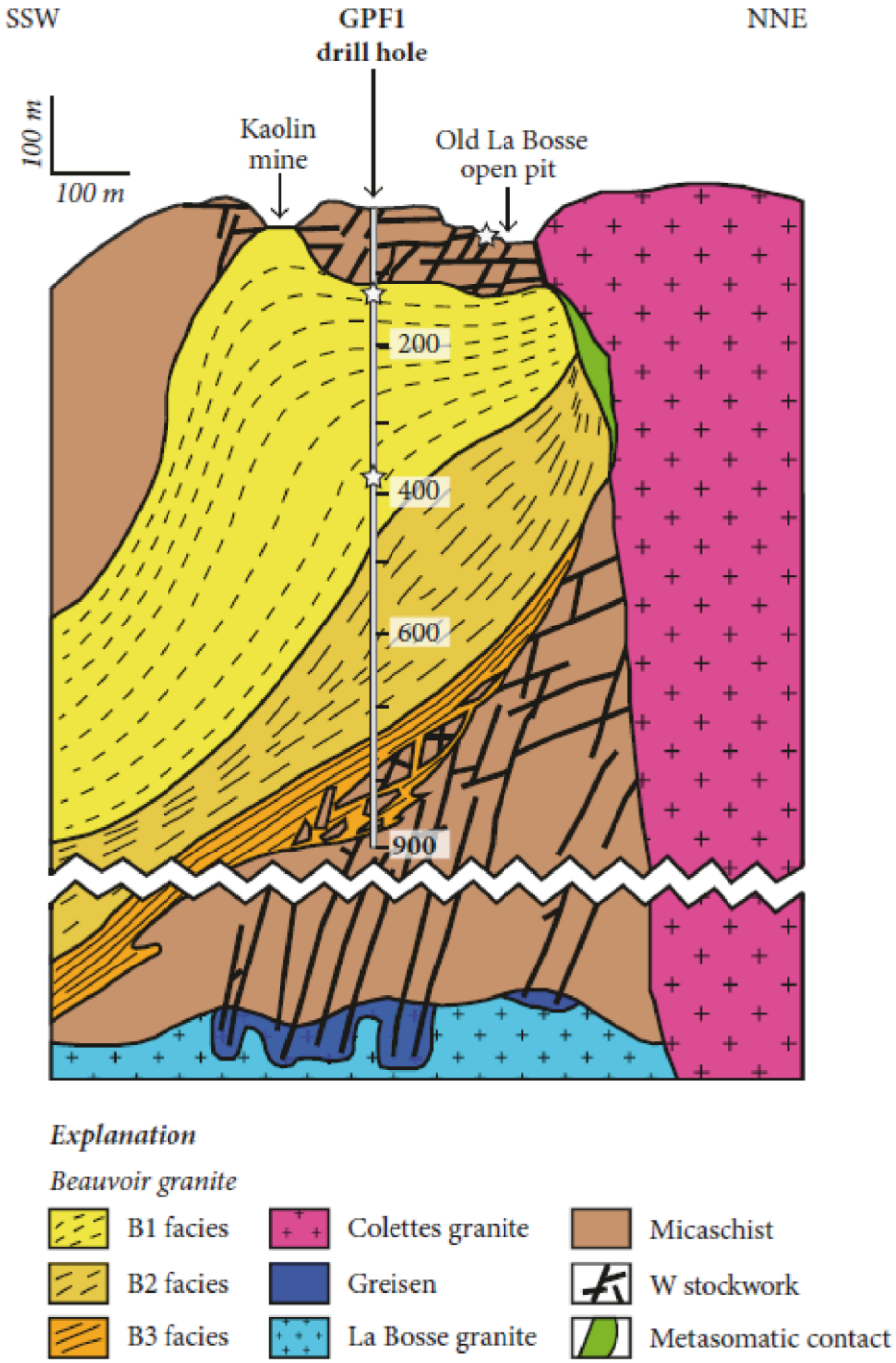
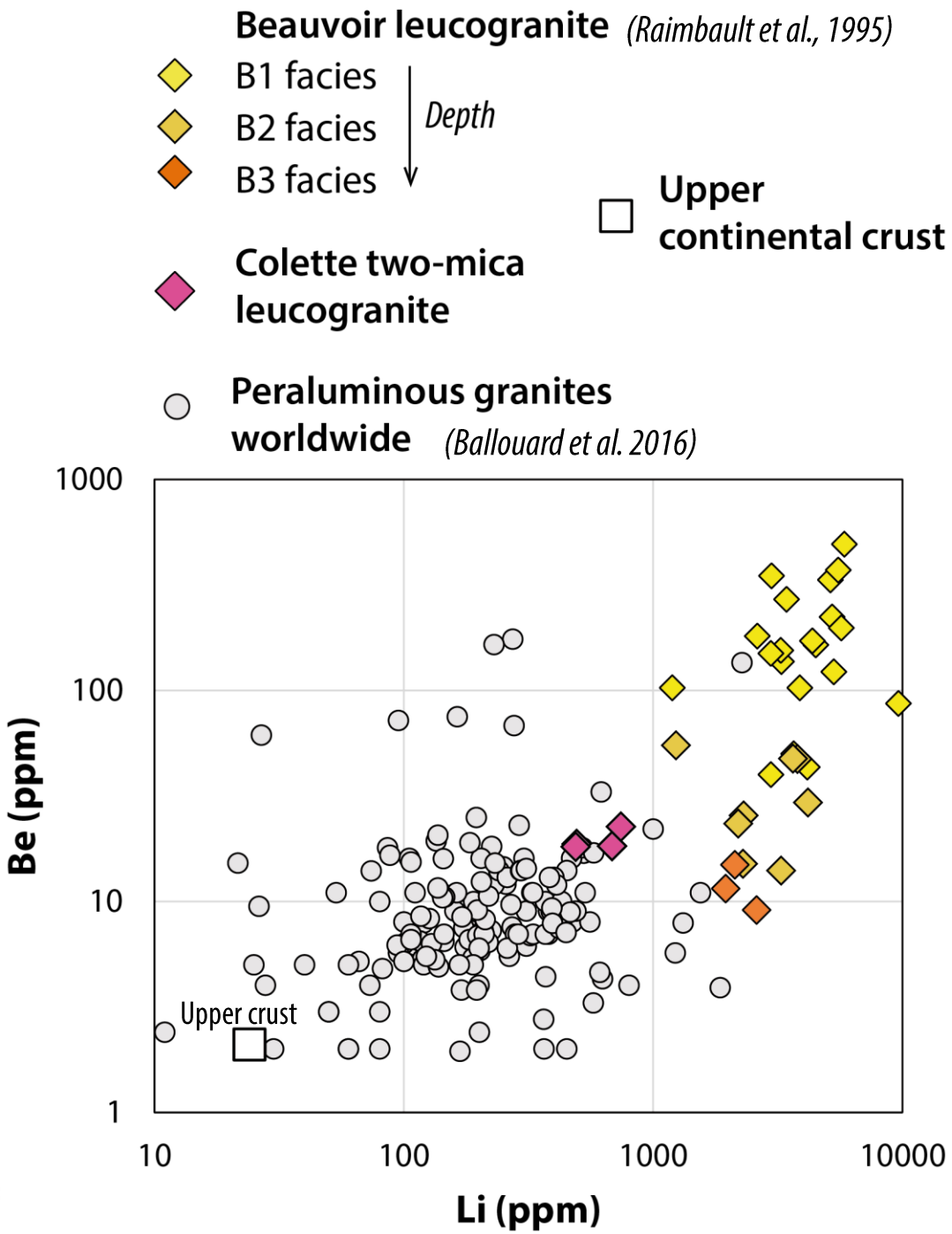


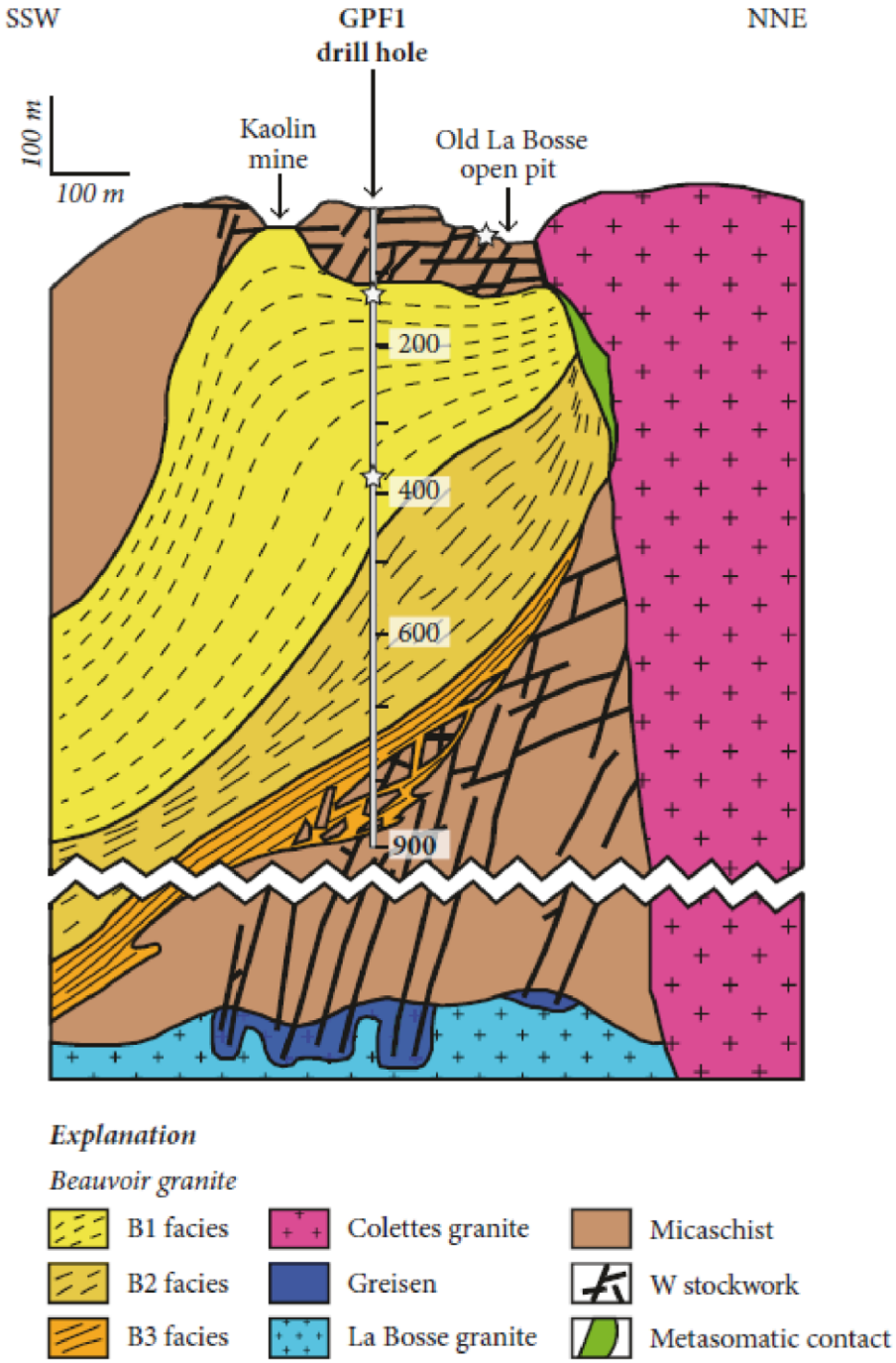
Fig. 5. Diagrammatic cross section of the system Qz–Ab–Or with 1, 2 and 4% F and excess water at 1 kb, showing the effect of increasing fluorine content on the crystallisation of compositions A, B and C (see text for details)

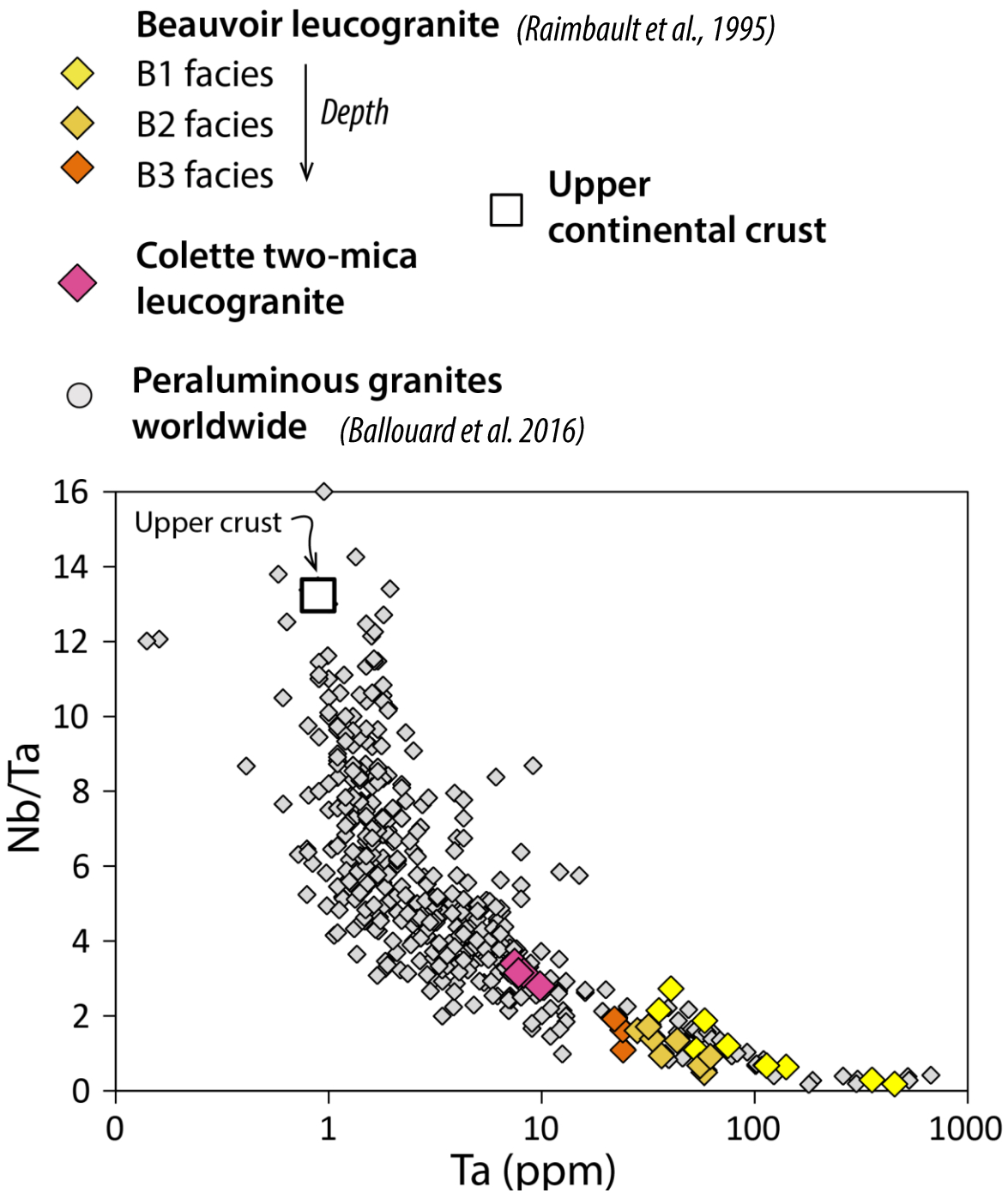


Harlaux et al. 2017
(d'après Cuney et al.
1992)



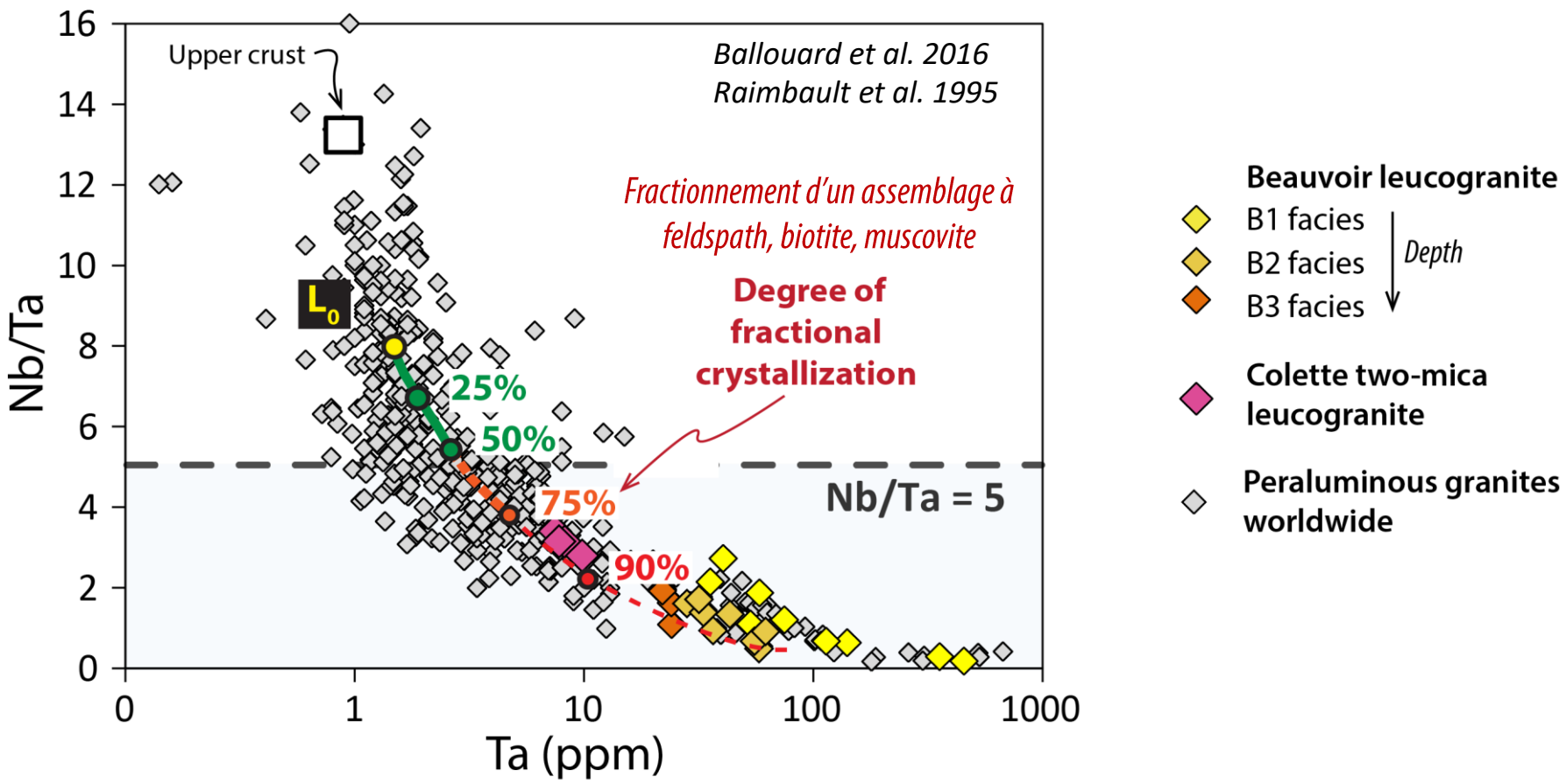
Harlaux et al. 2017 (d'après Cuney et al. 1992)





Le granite de Beauvoir

Evolution magmatique par cristallisation fractionnée compatible entre leucogranites de Beauvoir et des Colettes?



Granites et syénites à métaux rares: caractéristiques et processus minéralisateurs

Systèmes felsiques peralcalins (à métalumineux)

Systèmes felsiques peralcalins (à métalumineux)

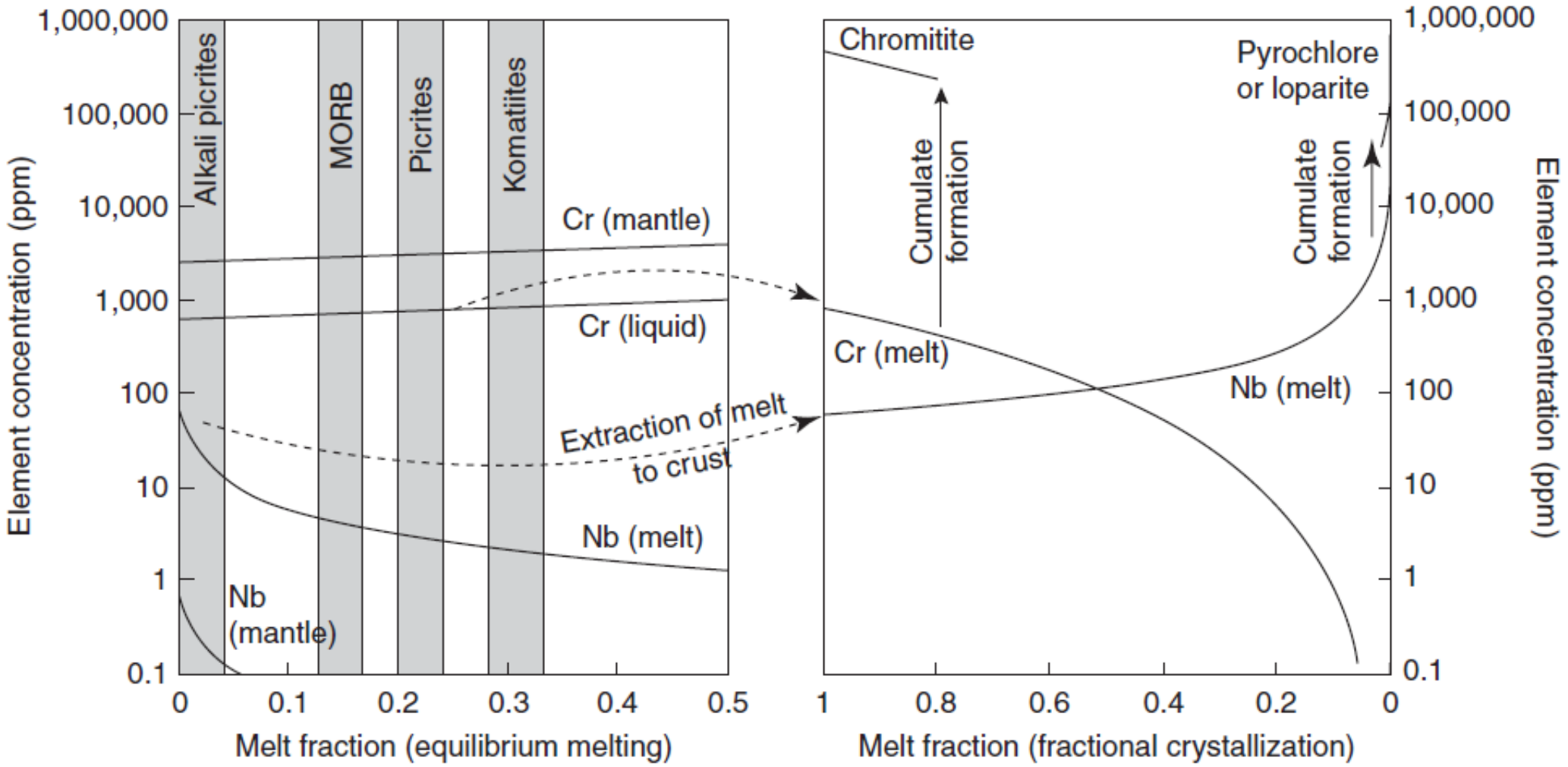


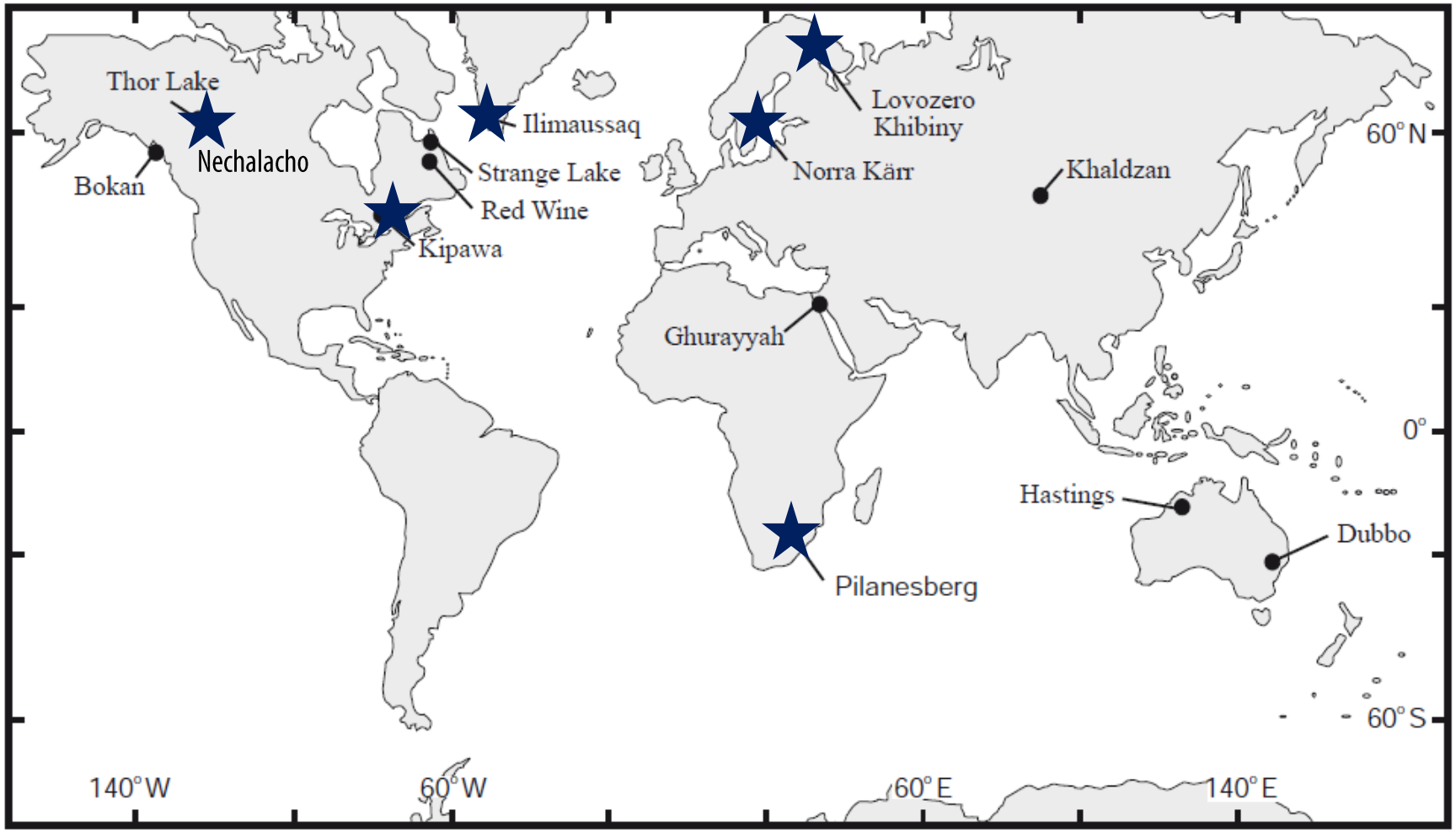
Figure 3 Concentrations of Cr and Nb during melting of the mantle and crystallization of basaltic magmas. Solid curves show compositions of melts. The ranges of the degree of melting required to generate principal magma types are shaded. Dotted curves represent melt extraction events from the mantle (left panel) to the crust (right panel).

Syénite néphélinique (sous saturée en silice)

Intrusion alaline stratifiée

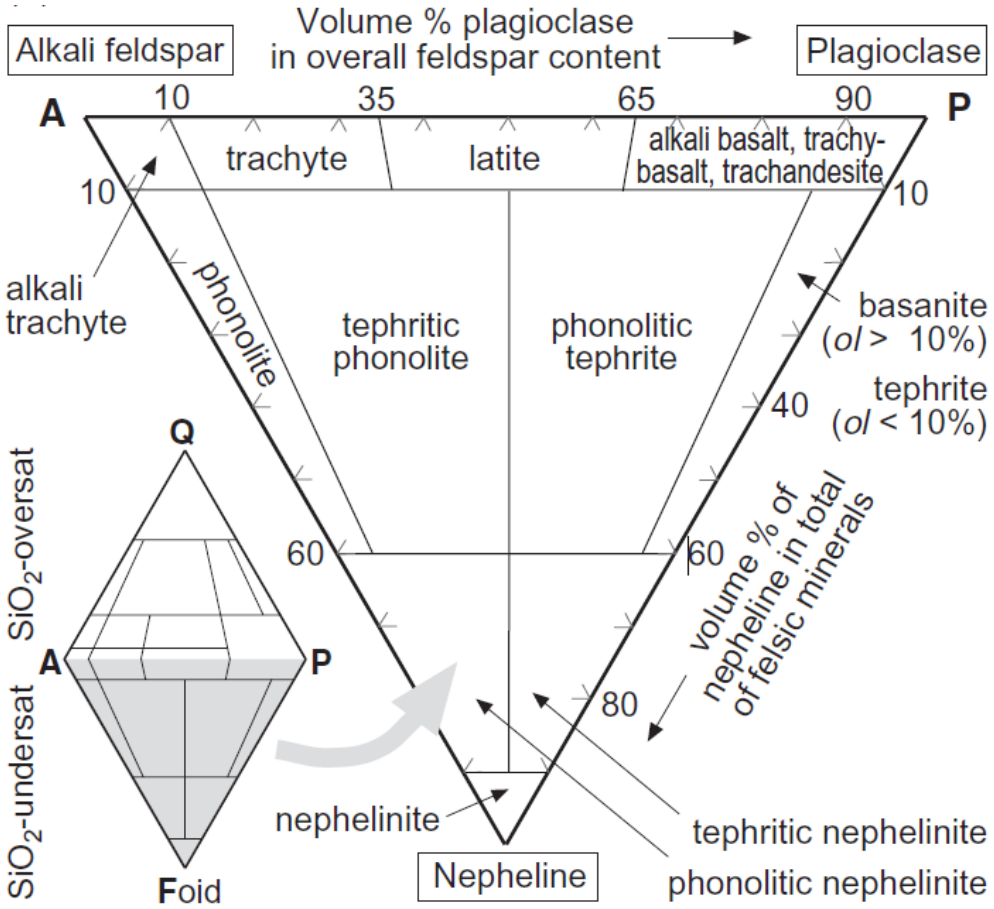
REE-Nb, Texture de cumulats

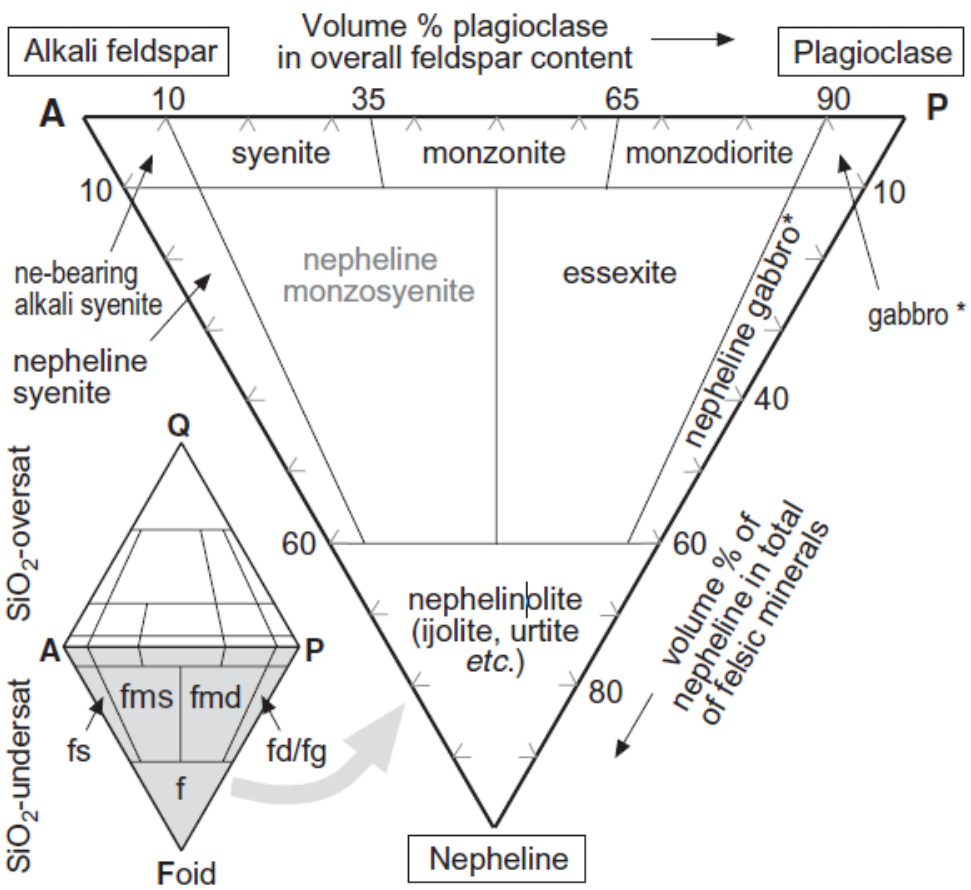
Modifié d'après Dostal, 2016



Magmatisme peralcalin sous-saturé

IUGS classification (Le Maitre, 2002)



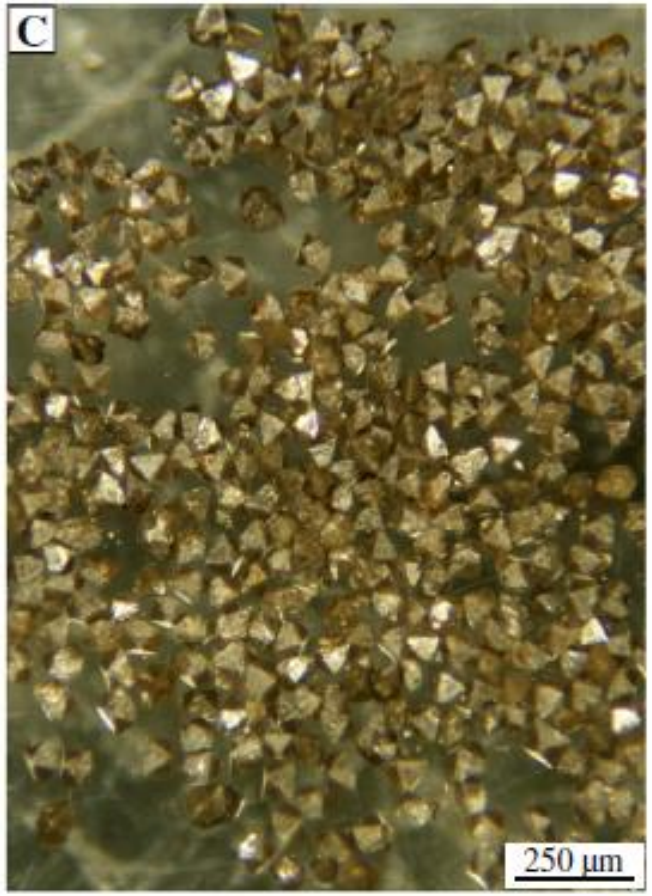


⇨ **Extrusive rocks**

⇨ **Plutonic rocks**

La transition "miaskitic-agpaitic"

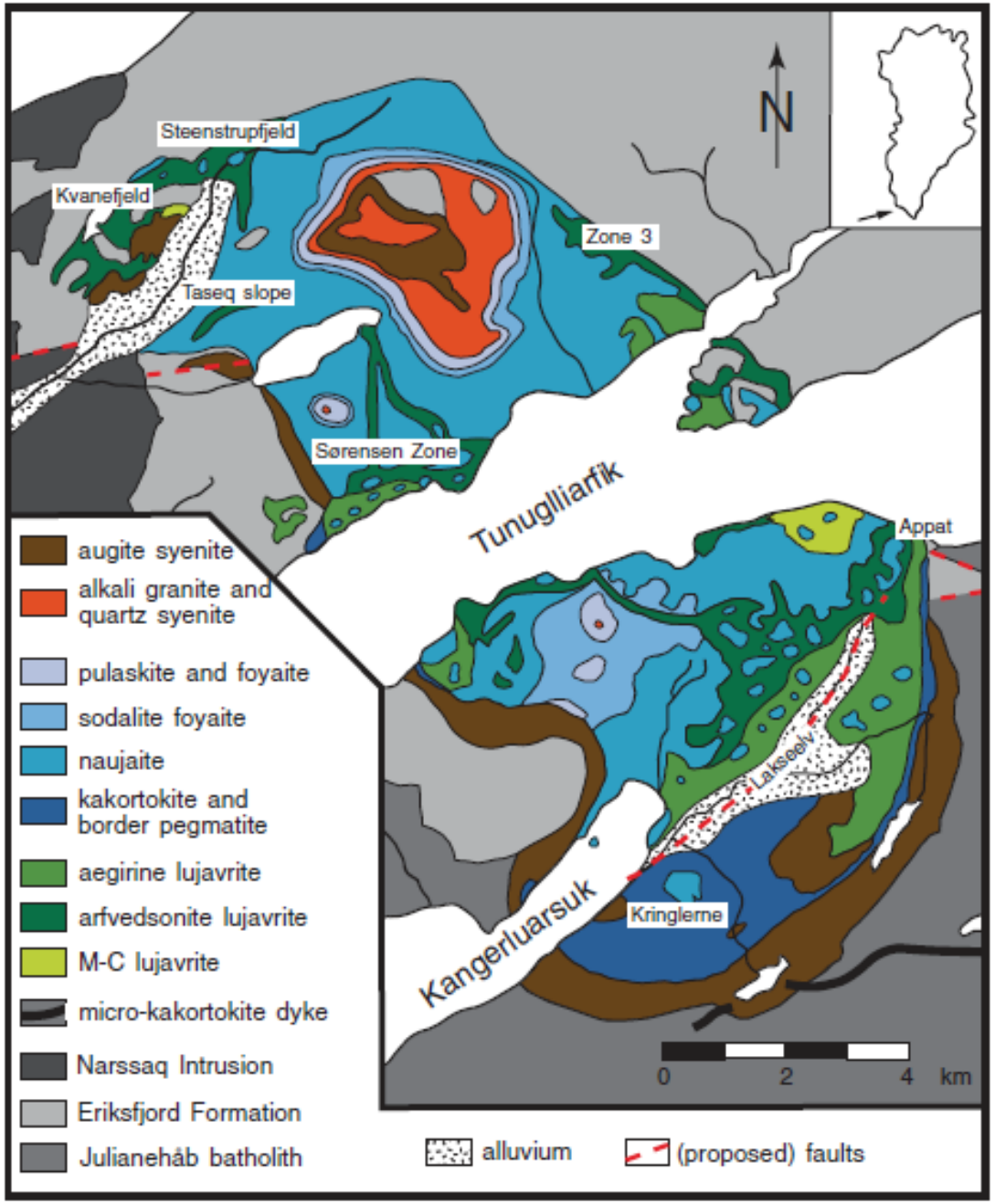
Dans les roches felsiques peralkalines dites « miaskitiques », le Zr est contenu dans des phases minéralogiques simples comme le zircon ($ZrSiO_4$) alors que dans les roches « agpaitiques », le Zr est hébergé dans des phases complexes comme l'eudialyte : $Na_{15}Ca_6Fe_3Zr_3Si(Si_{25}O_{73})(O,OH,H_2O)_3(Cl,OH)_2$. Cette transition "miaskitic-agpaitic" est liée en grande partie à une augmentation de la peralcalinité du magma; i.e. rapport (Na+K)/Al. Les gisements significatifs sont typiquement associés a des roches agpaitiques



Zircon: intrusion litée de Nechalacho, Canada. (Möller and Williams-Jones, 2016)

Eudialyte (Salvi, 2013)

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux: roches sous-saturée en silice



Ilímaussaq complex, South Greenland (Marks and Markle, 2015)

Intrusion litée

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux: roches sous-saturée en silice

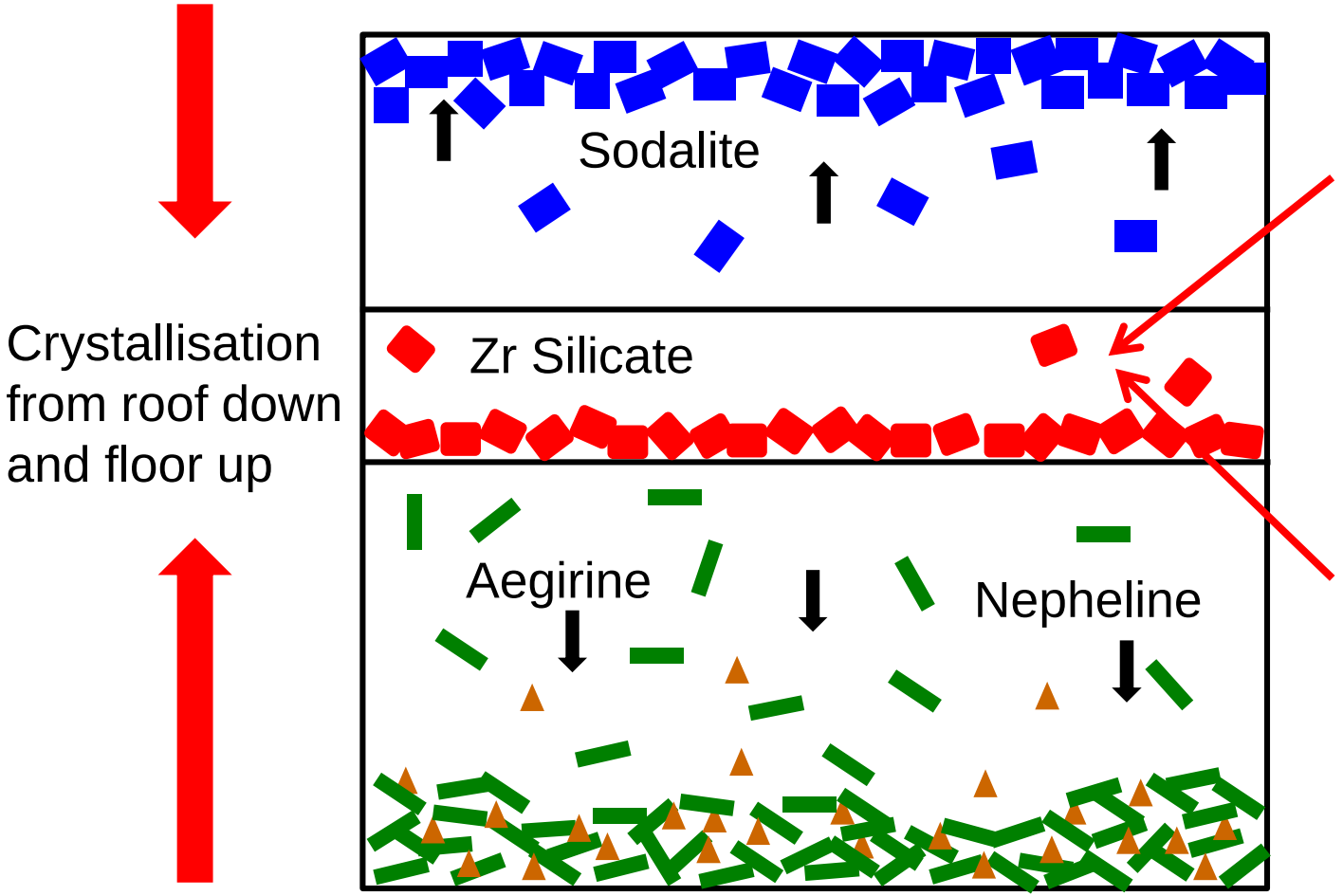
Intrusion litée de Nechalacho – 2.2 Ga (Möller and Williams-Jones, 2016)

Flow-banded syenite (NLS-8) with nepheline phenocrysts in an albite–aegirine matrix and minor interstitial eudialyte

Eudialyte cumulate

Gravitational settling textures

Magmatic concentration of the REE in Thor Lake/Nechalacho Layered Complexes



Residual, volatile (F, Cl)- and HFSE-rich magma saturates with REE-bearing zirconosilicates (zircon, eudialyte)

The REE "stew in these juices" and are mobilised

« Cumulats »

Granite à métaux rares peralcalins

REE, disseminé

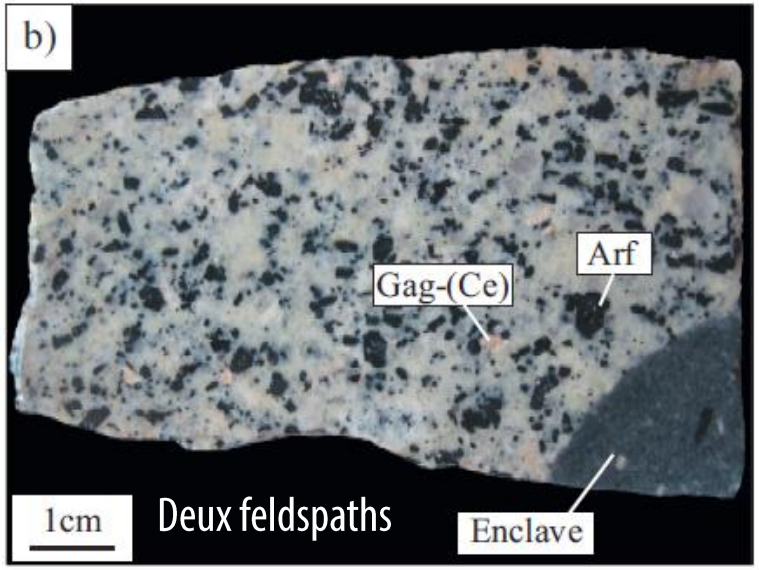
Pegmatites NYF / Dyke felsique
Intrusions granitiques

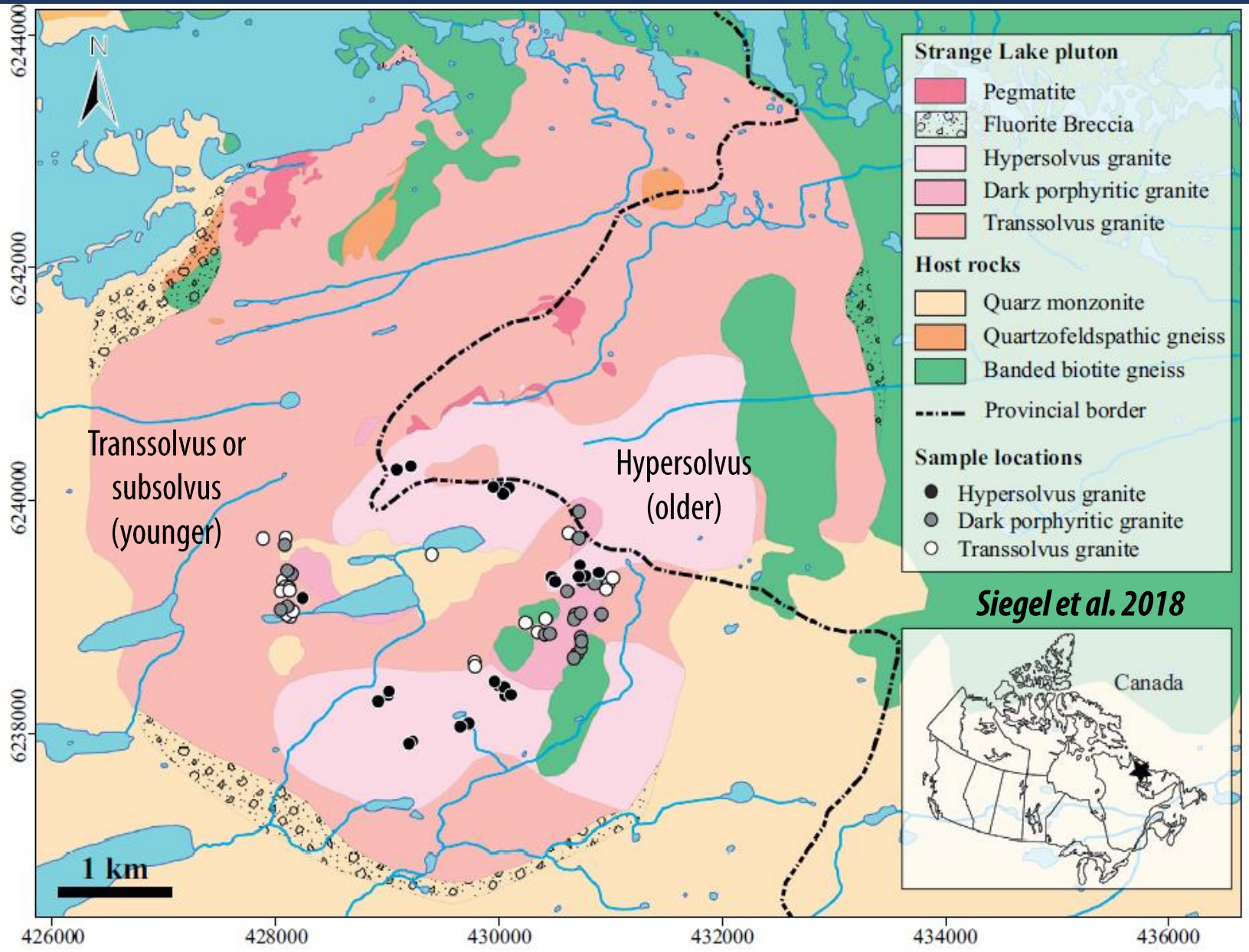
Modifié d'après Dostal, 2016

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux: exemple du complexe peralcalin de Strange Lake (A1-type, 1.2 Ga)

Hypersolvus granite

Transolvus granite (microcline +albite) with quenched enclave of Hypersolvus granite



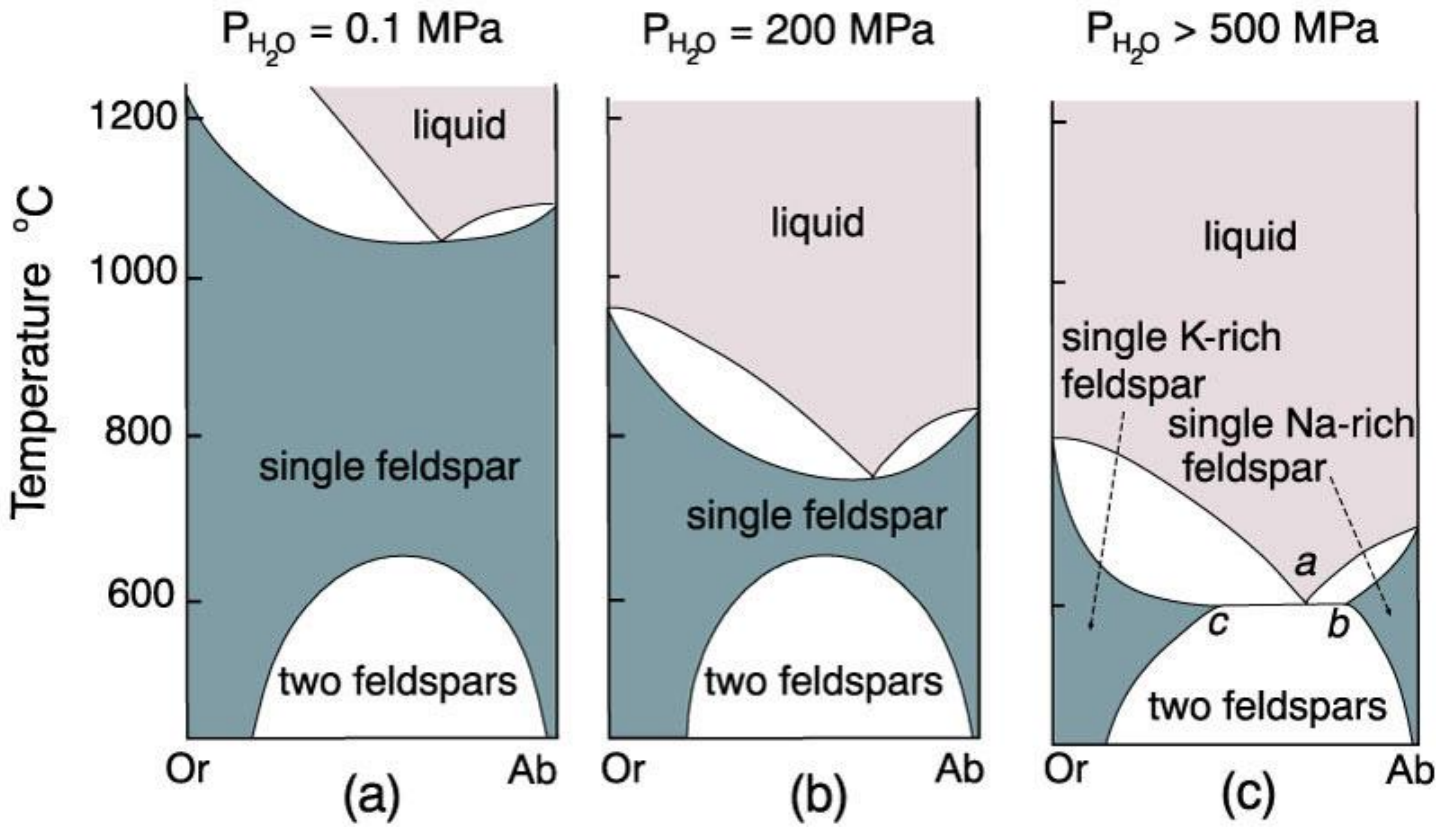


Siegel et al. 2018

Afs: arfvedsonite, Gag-(Ce): gagarinite-(Ce), Afs: alkaline feldspar, Qtz: quartz

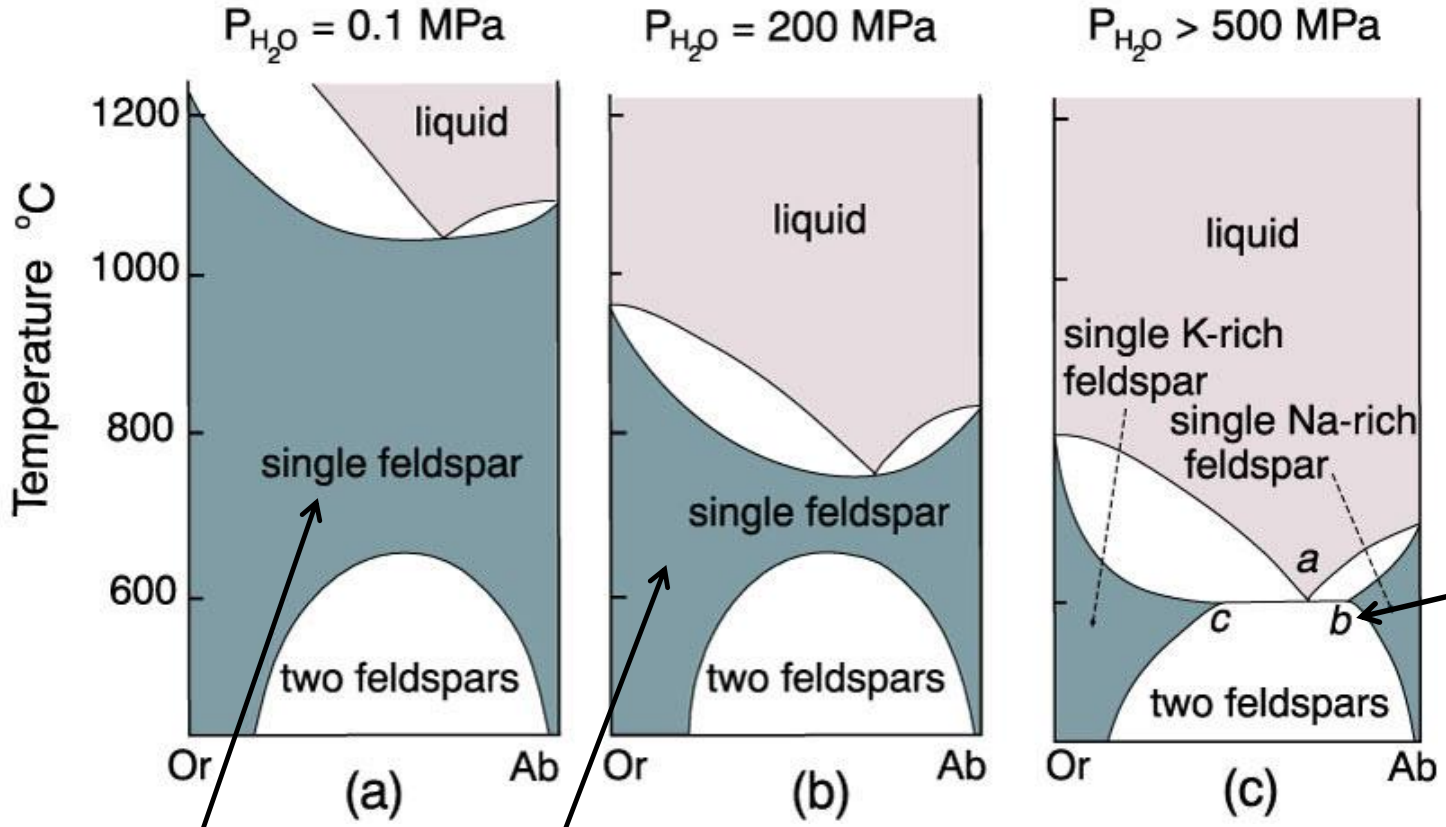
Hypersolvus vs subsolvus granites

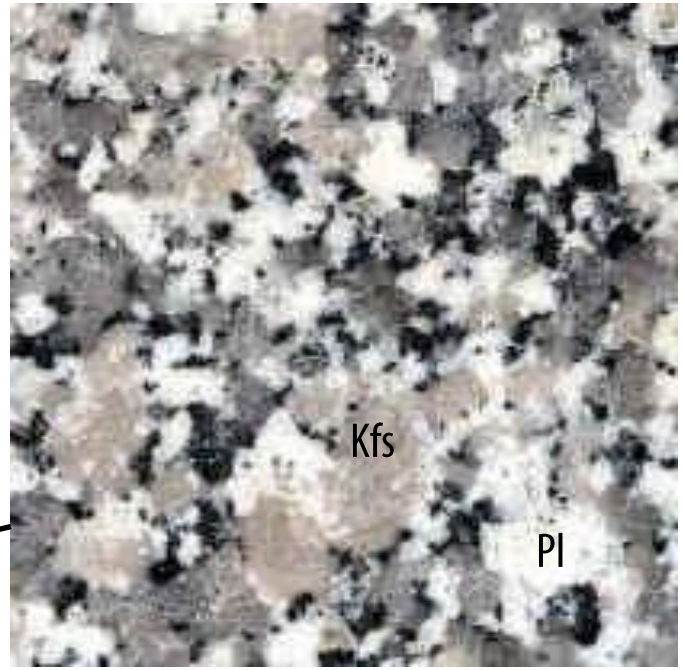
Image source: John Winter, 2001



Hypersolvus vs subsolvus granites

Image source: John Winter, 2001

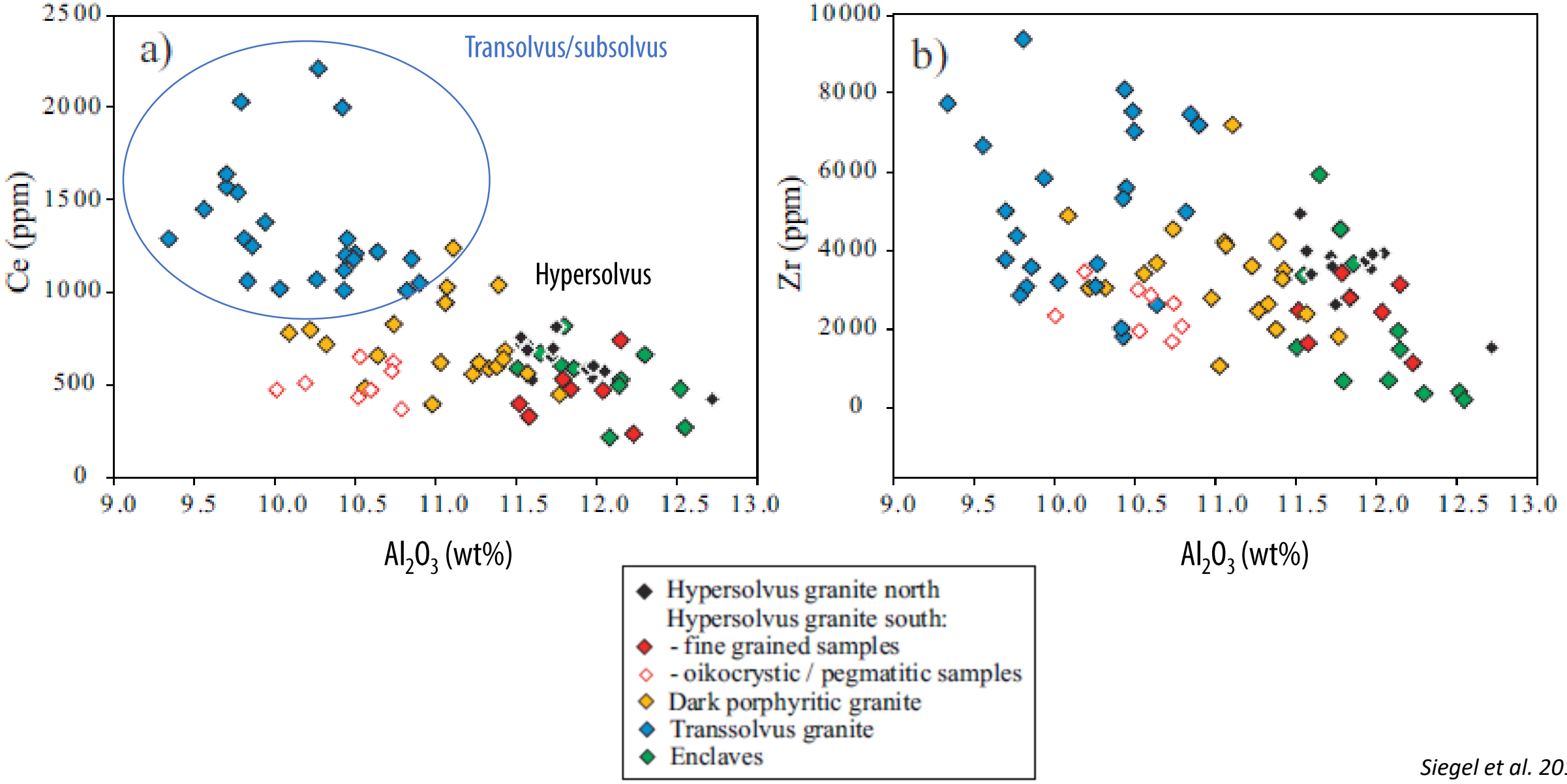




At relatively high P_{H20} *(high water content)*, two distinct feldspars will crystallize (c) [<u>subsolvus</u>]

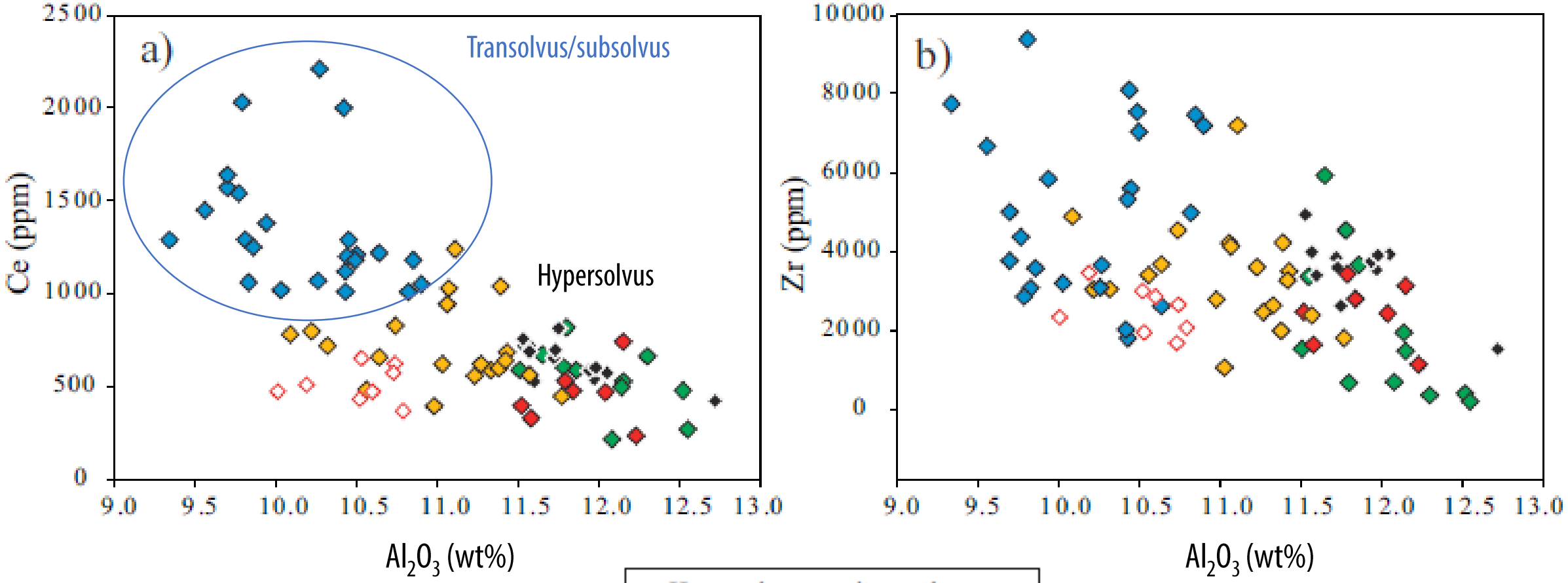
At relatively low P_{H20} *(low water content)*, a single feldspar will crystallize and then undergo further exsolution (perthites) (a, b) [<u>hypersolvus</u>]

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux: exemple du complexe peralcalin de Strange Lake (A1-type)



Siegel et al. 2018

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux: exemple du complexe peralcalin de Strange Lake (A1-type)

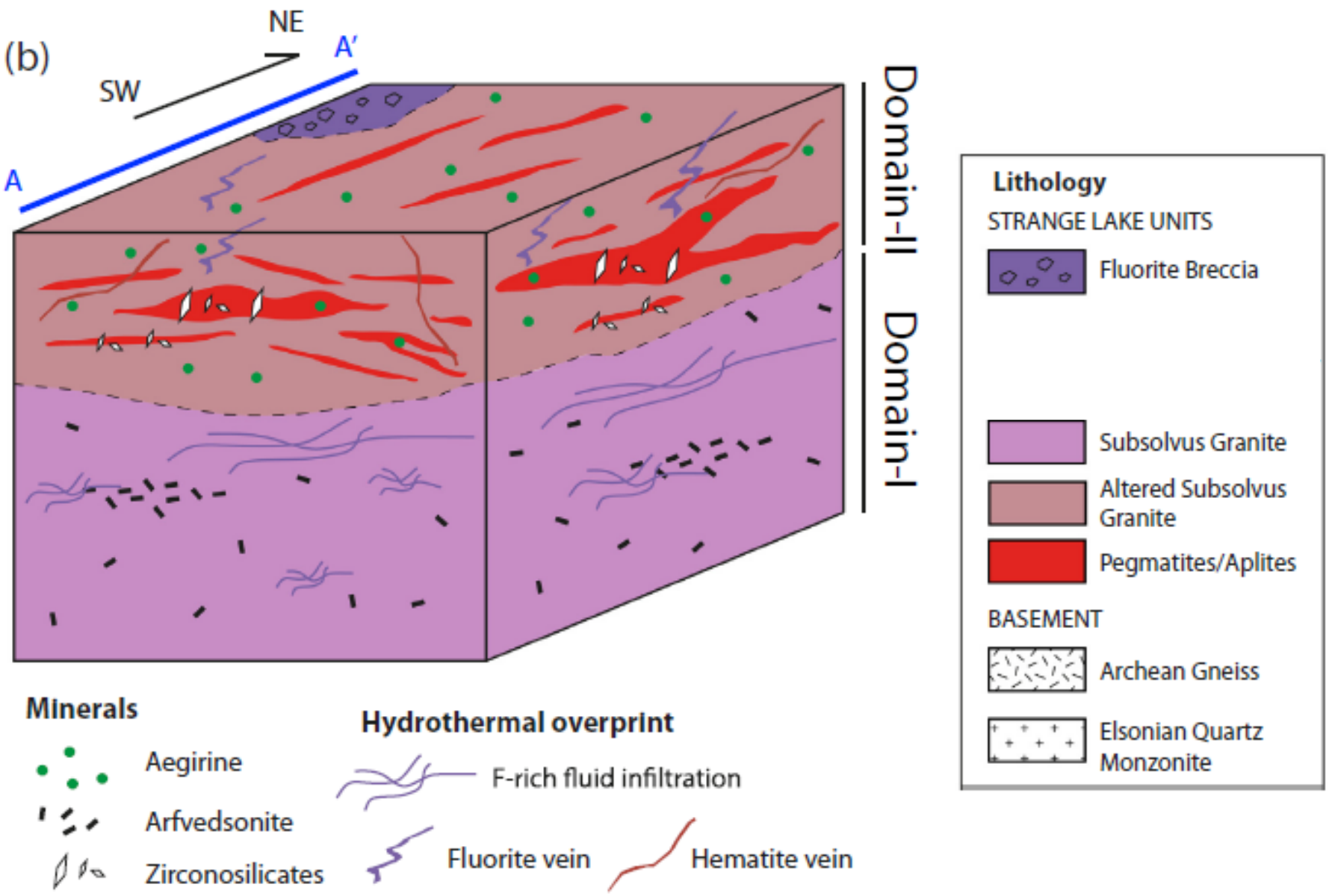


Hypersolvus granite north
Hypersolvus granite south:
- fine grained samples
- oikocrystic / pegmatitic samples
Dark porphyritic granite
Transsolvus granite
Enclaves

Enrichissement en REE et HFSE entre granite hypersolvus et subsolvus en partie contrôlée par la cristallisation fractionnée de feldspath

Siegel et al. 2018

Processus magmatiques d'enrichissement en métaux: exemple du complexe peralcalin de Strange Lake (A1-type)



Minéralisation en REE et HFSE hébergée dans des pegmatites (NYF) mise en place dans les facies altérés hydrothermalement du granite subsolvus .

Rôle des processus hydrothermaux?

Gysi and Williams-Jones, 2013

The Strange Lake Pegmatite Ores

Pegmatite border

Gittinsite ($CaZrSi_2O_7$)

Titanite ($CaTiSiO_5$)

Pegmatite core

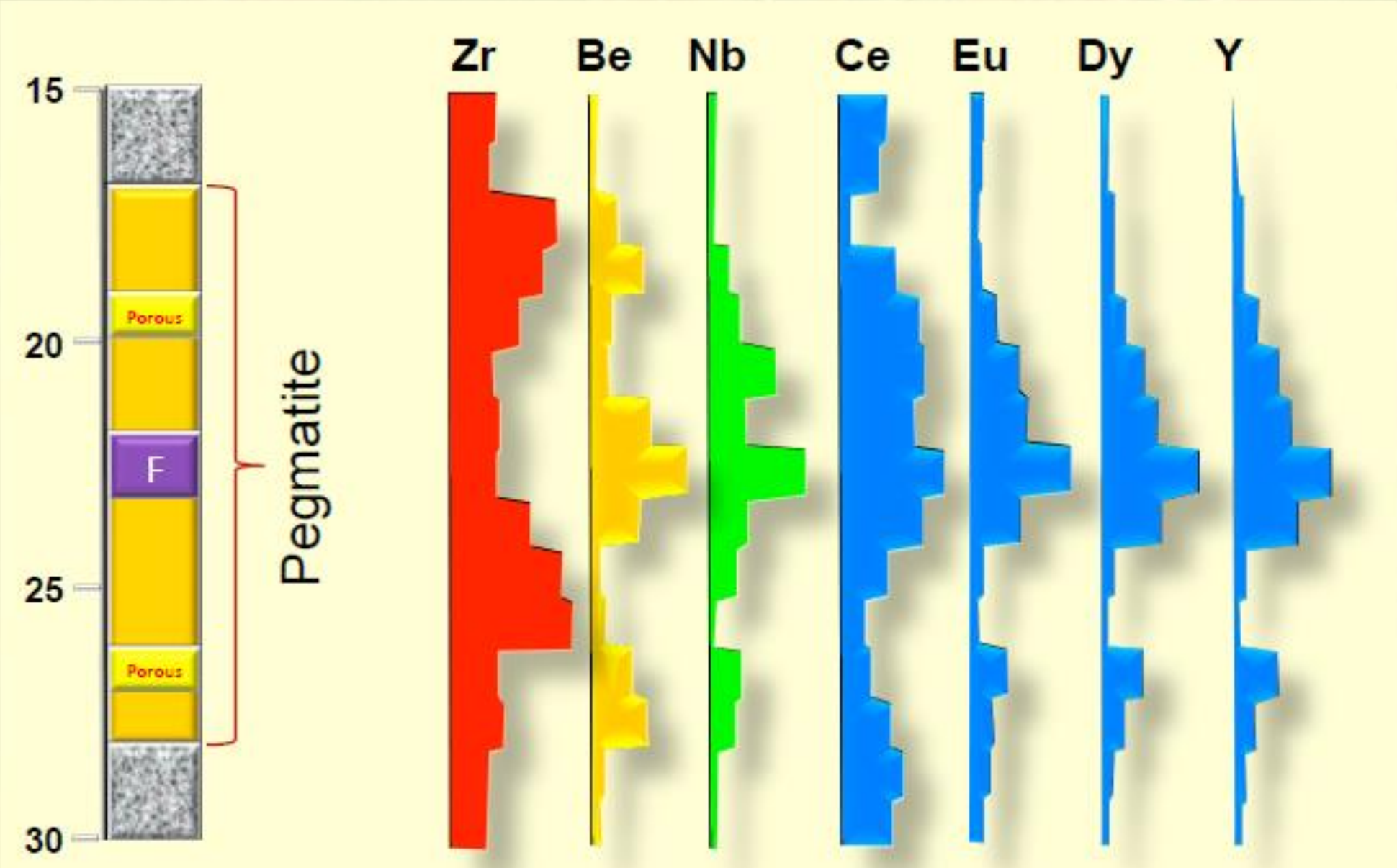
REE Minerals

Fluorite

William-Jones, DIVEX, 2015

Distribution of REE and Zr in Pegmatite

William-Jones, DIVEX, 2015

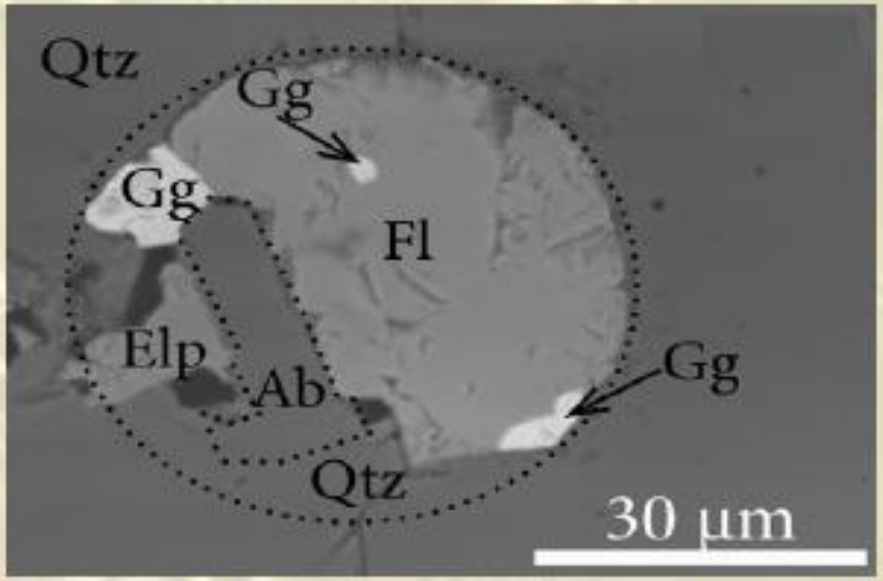


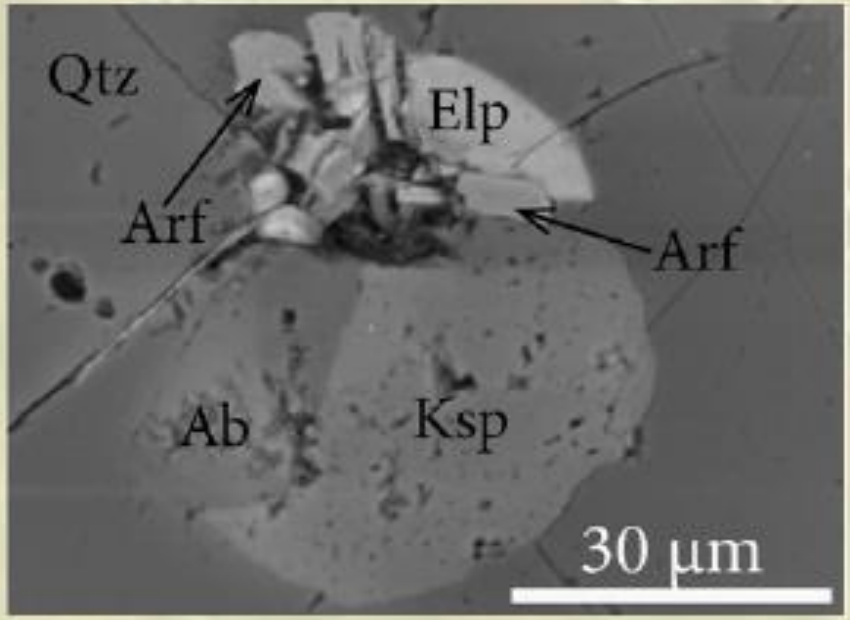
Melt inclusions in strange-lake peralkaline granites: evidence for melt-melt immiscibility

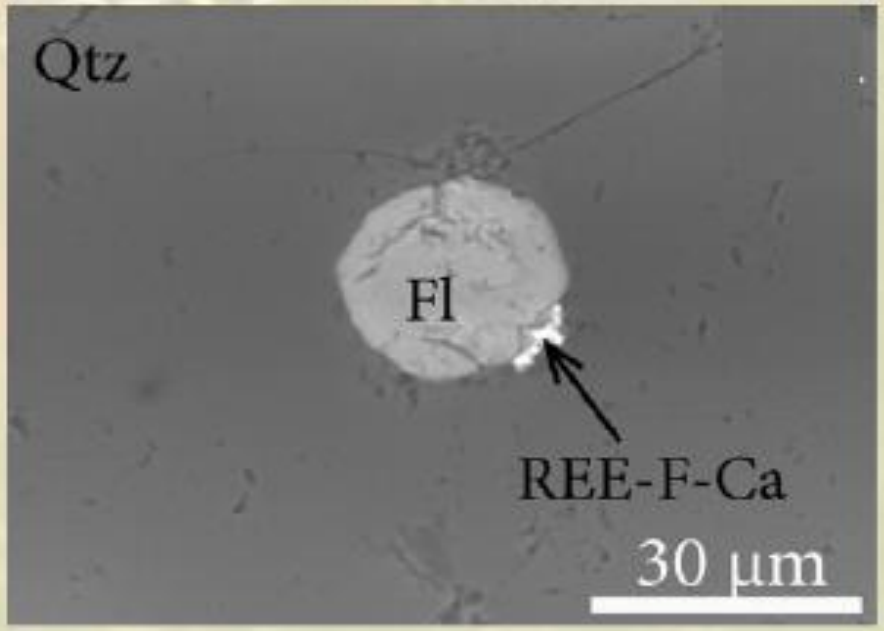
Melt Inclusions are evident by their spherical shape. They vary from being silicate-only, to fluorite-bearing to fluorite-only.

Gagarinite-(Y) $NaCaY(F,Cl)_6$

Elpidite $NaCaY(F,Cl)_6$





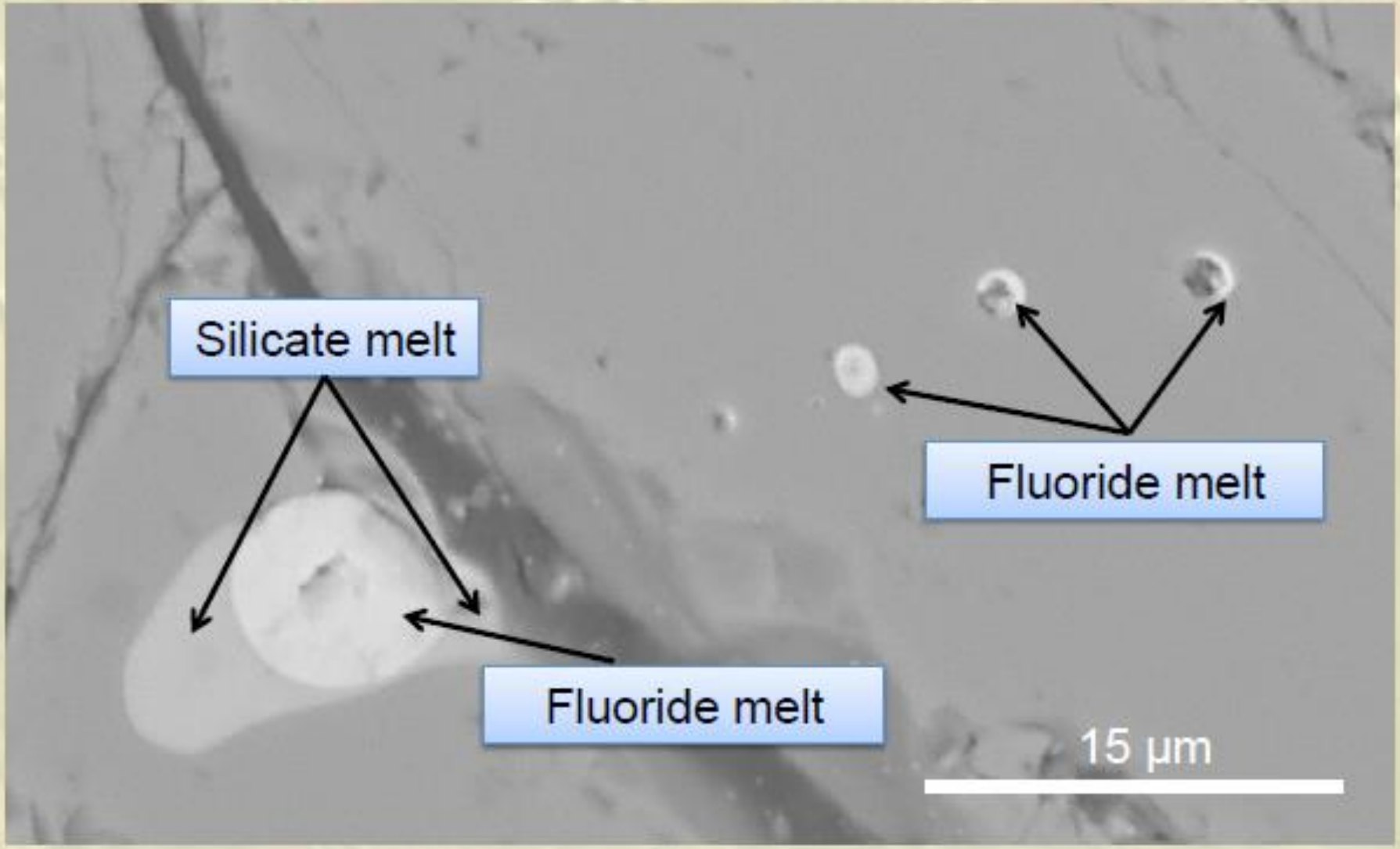


Vasyukova and Williams-Jones, 2014

William-Jones, DIVEX, 2015

Melt Inclusions after Heating (to 900 °C) and Quenching

William-Jones, DIVEX, 2015



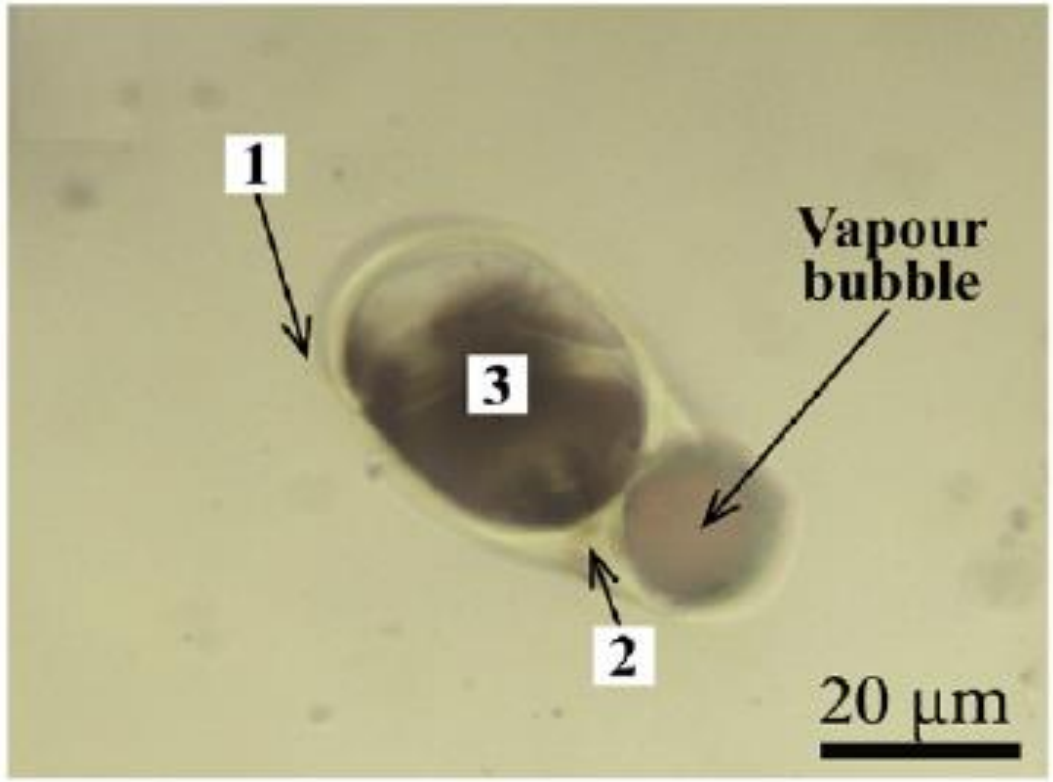
Vasyukova and Williams-Jones, 2014

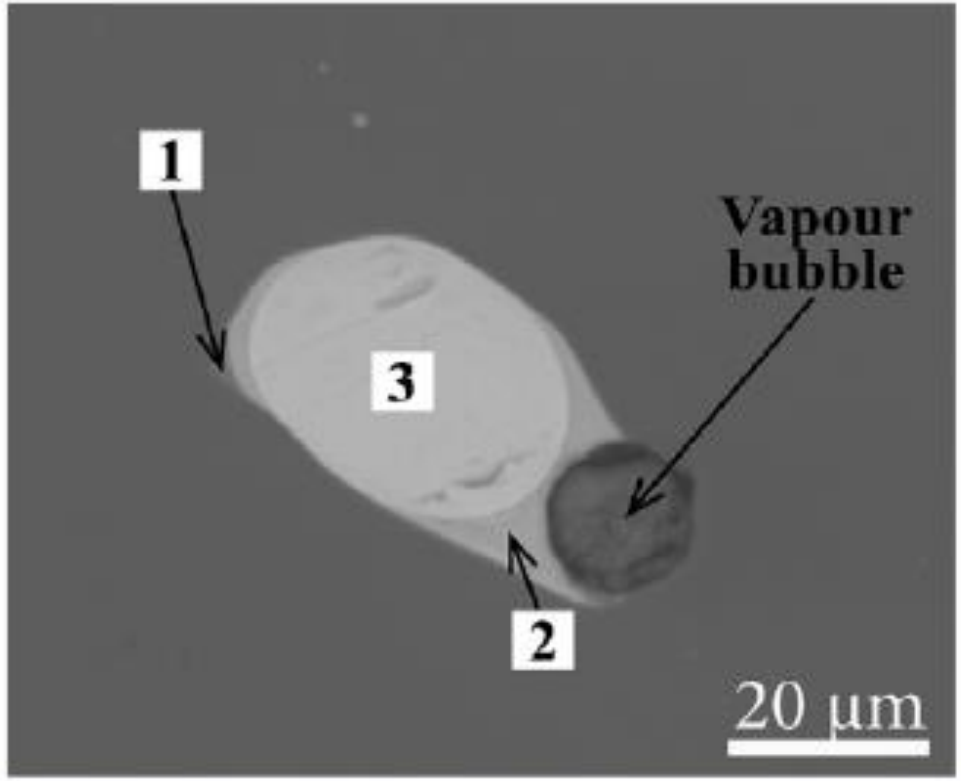
Fluoride-bearing Melt Inclusions after Heating and Quenching

William-Jones, DIVEX, 2015

Transmitted Light

SEM Image





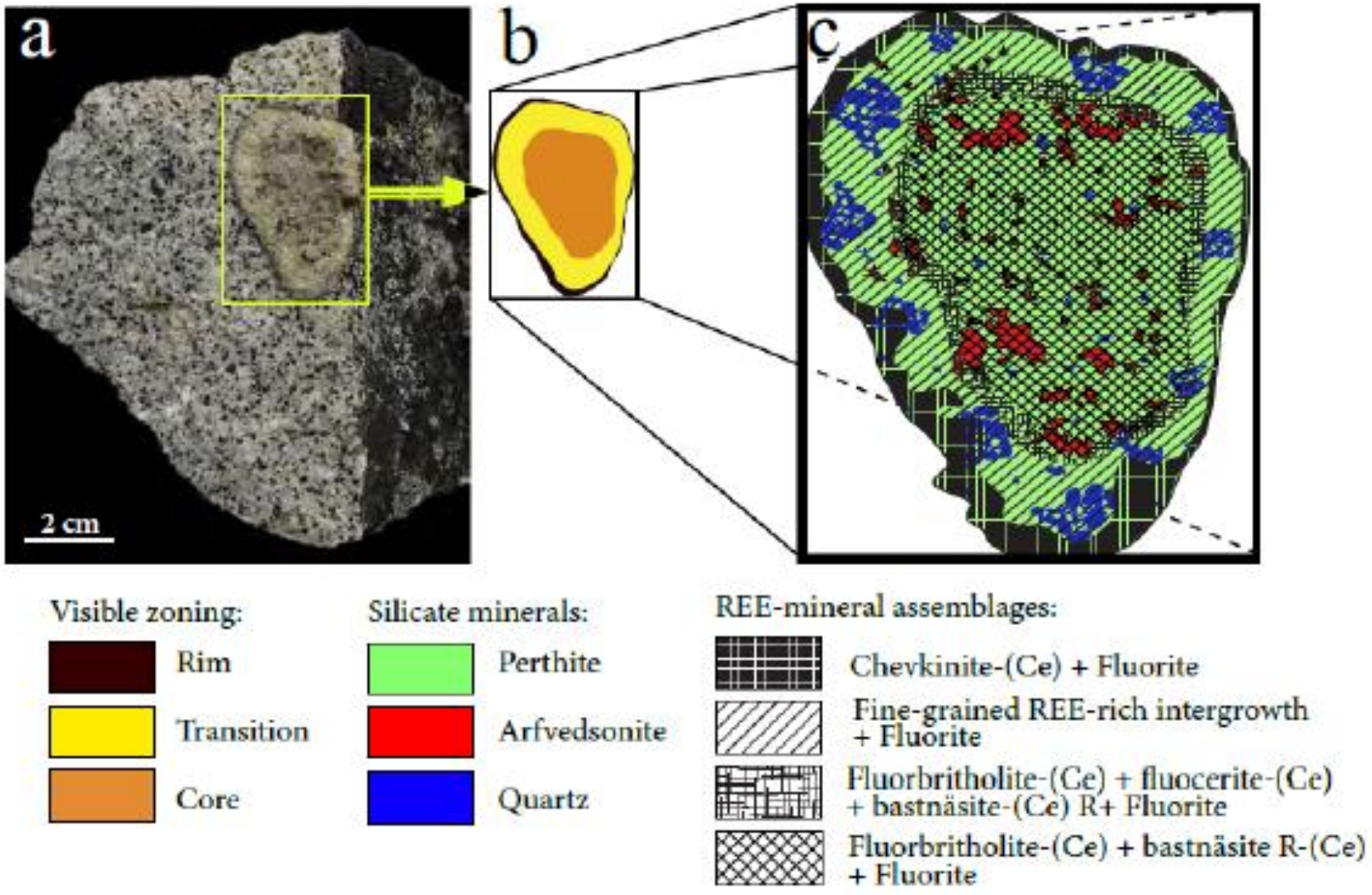
1 –Silicate melt ~3 wt.% Zr

2 –Ca-fluoride melt; ~10 wt.% REE

3 –REE-fluoride melt; ~47 wt.% REE

Vasyukova and Williams-Jones, 2014

Melt inclusions in strange-lake peralkaline granites (25 wt% REE)



Vasyukova and Williams-Jones, 2016

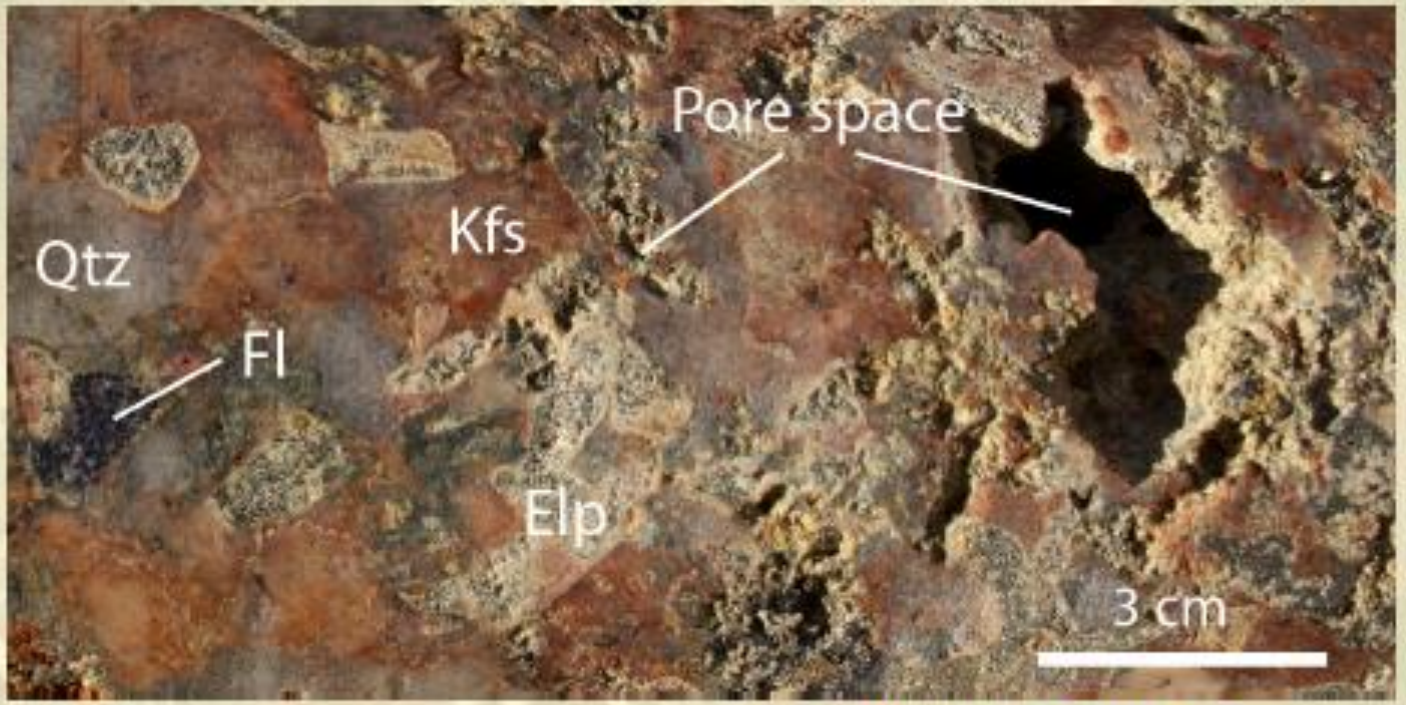
William-Jones, DIVEX, 2015

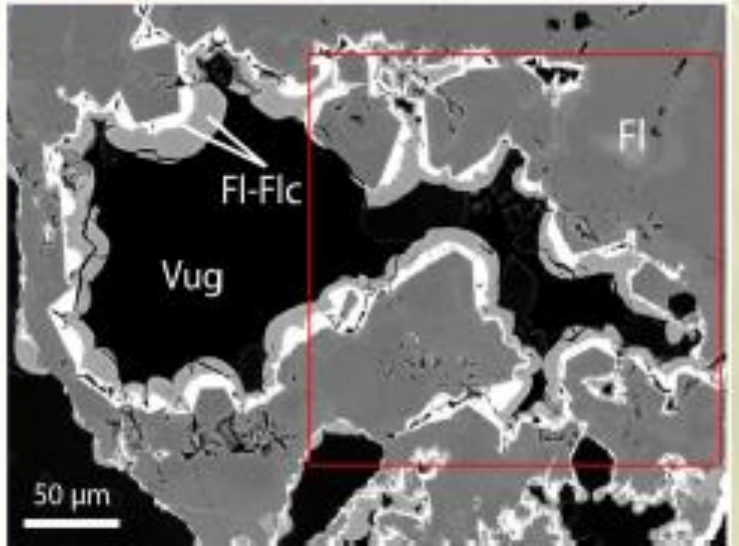
Acidic Alteration and REE Mobilisation

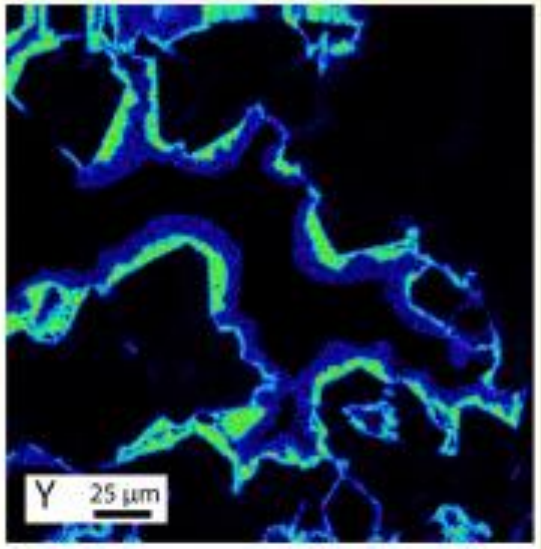
Autometasomatism lead to acidic alteration by HCl-HF-bearing fluids that destroyed the primary mineralogy, creating porosity

REE mobilised, replacing earlier minerals and filling vugs

Flc - fluocerite ($REEF_3$)



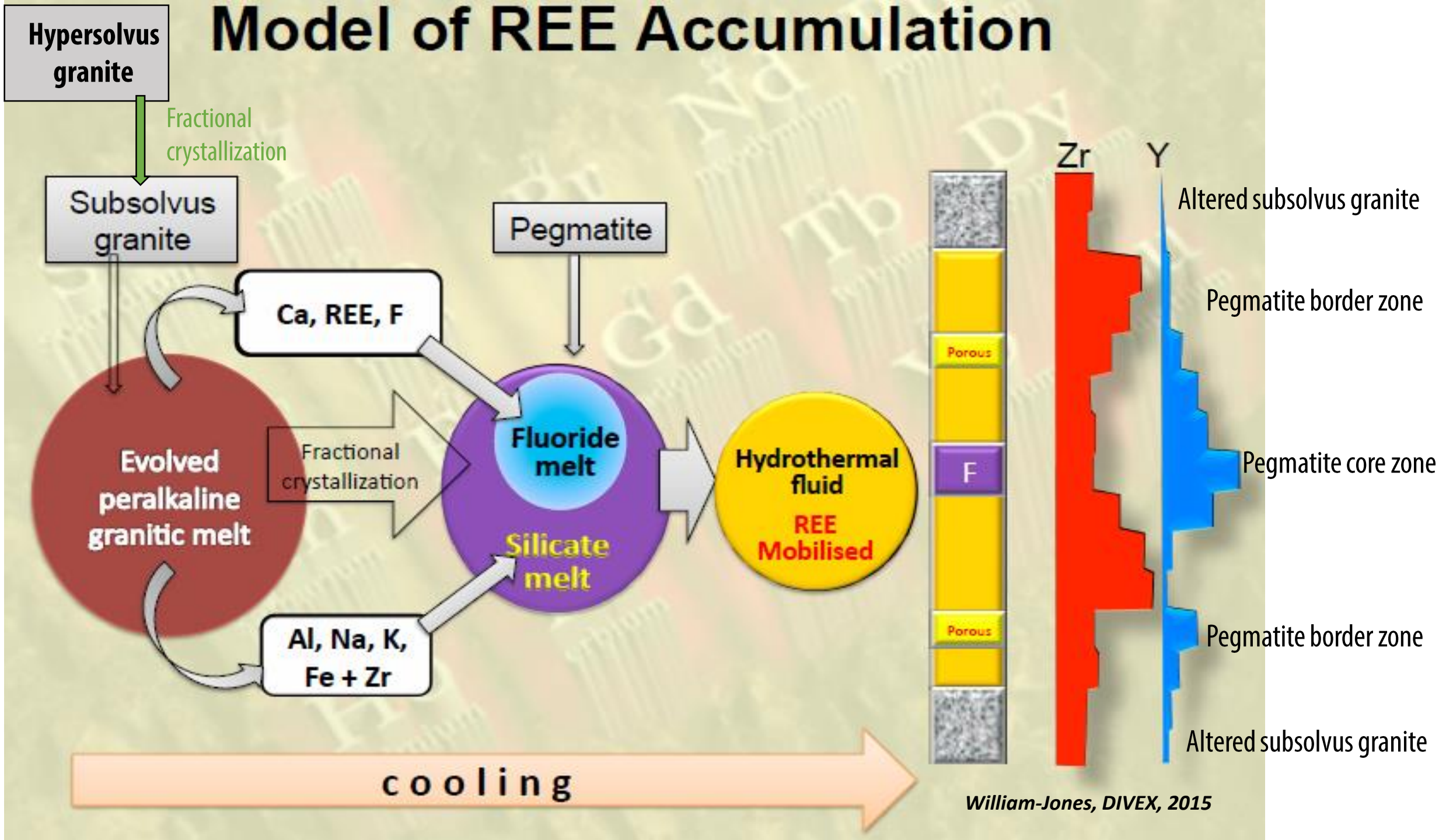




Gysi and Williams-Jones, 2013

William-Jones, DIVEX, 2015

Model of REE Accumulation



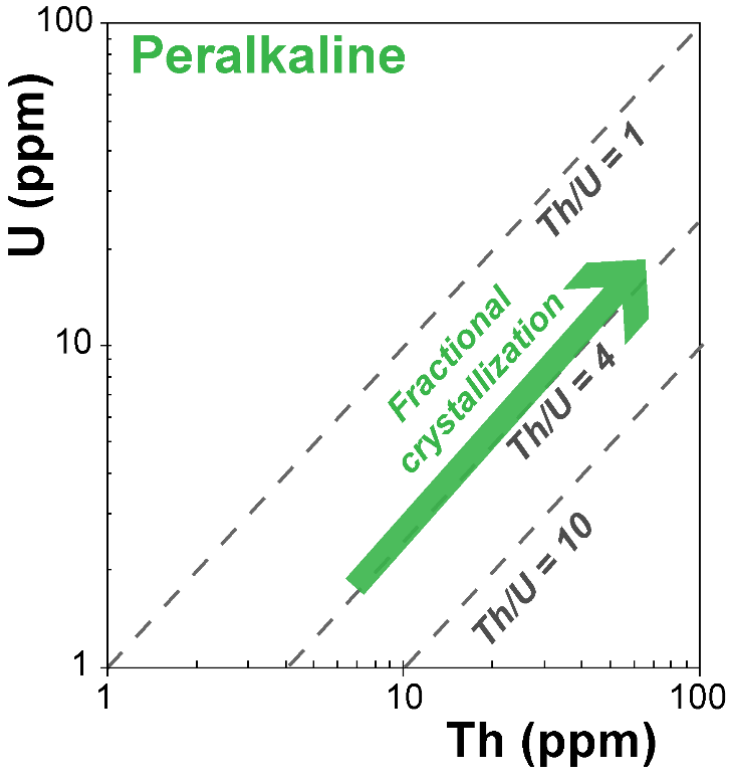
William-Jones, DIVEX, 2015

The Fluorite Breccia

William-Jones, DIVEX, 2015

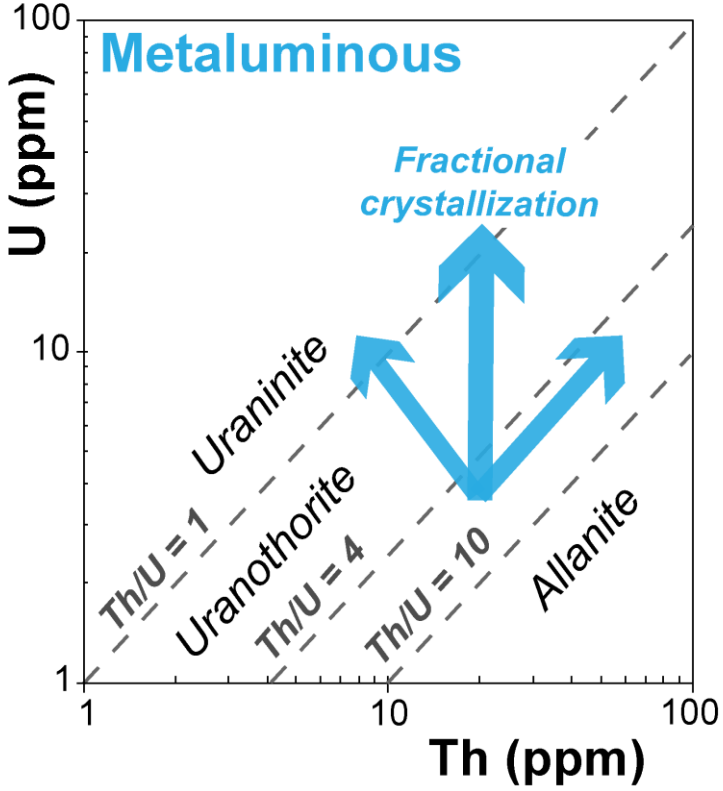
Le cas de l'uranium et du thorium

A1-type granites and Foid syenites



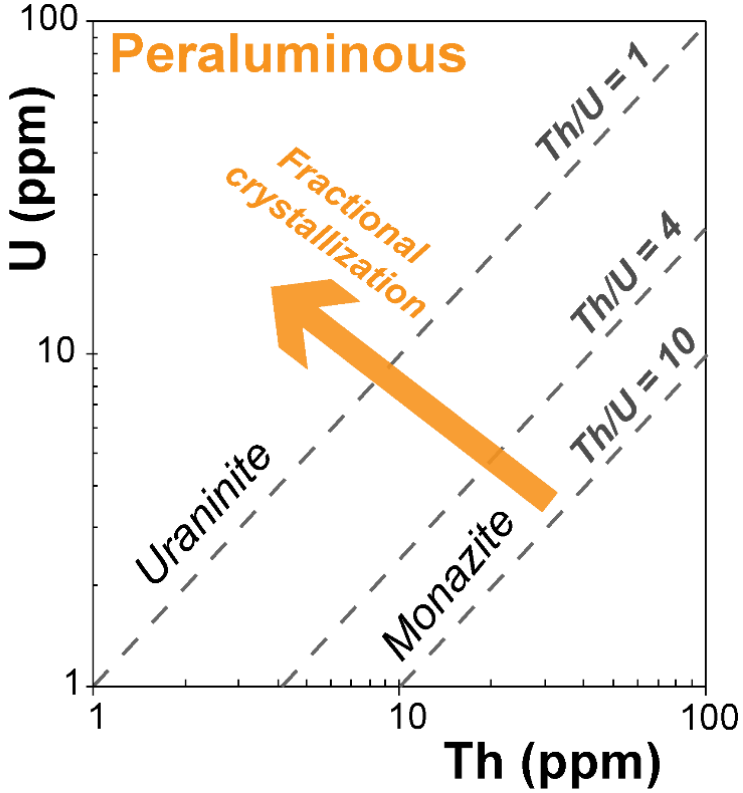
High solubility of Th and U
(high U and Th content and Th/U ~4)

A2-type granites



Moderate solubility of U and Th
(variable Th/U ~ 1-4 and Th-U contents)

Muscovite-bearing peraluminous granites (MPG)



High solubility of U but low solubility of Th
(low Th contents, moderate U contents and very variable Th/U ~ 0.1 – 10 due to monazite fractional crystallization)

After Cuney (2014)

Aparté sur les granitoïdes peralumineux

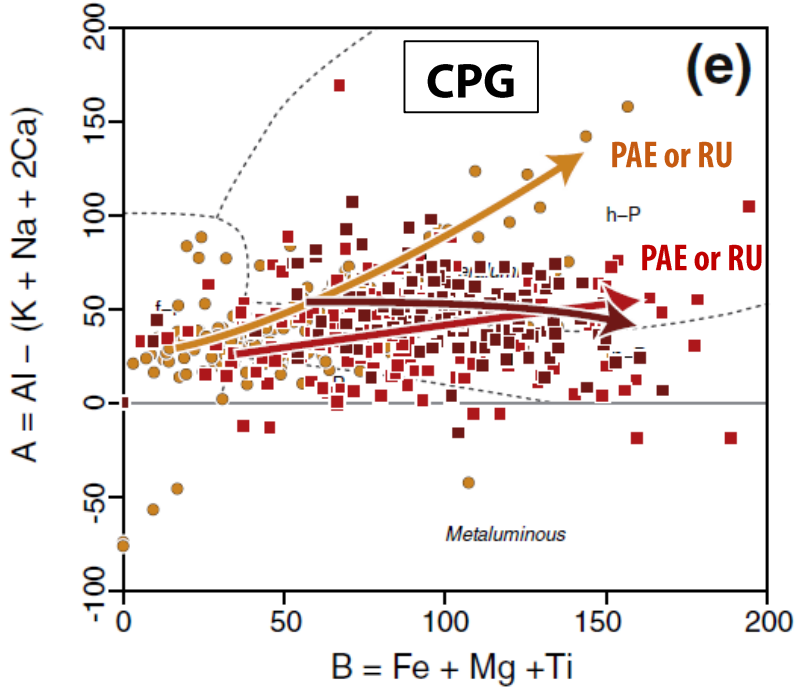
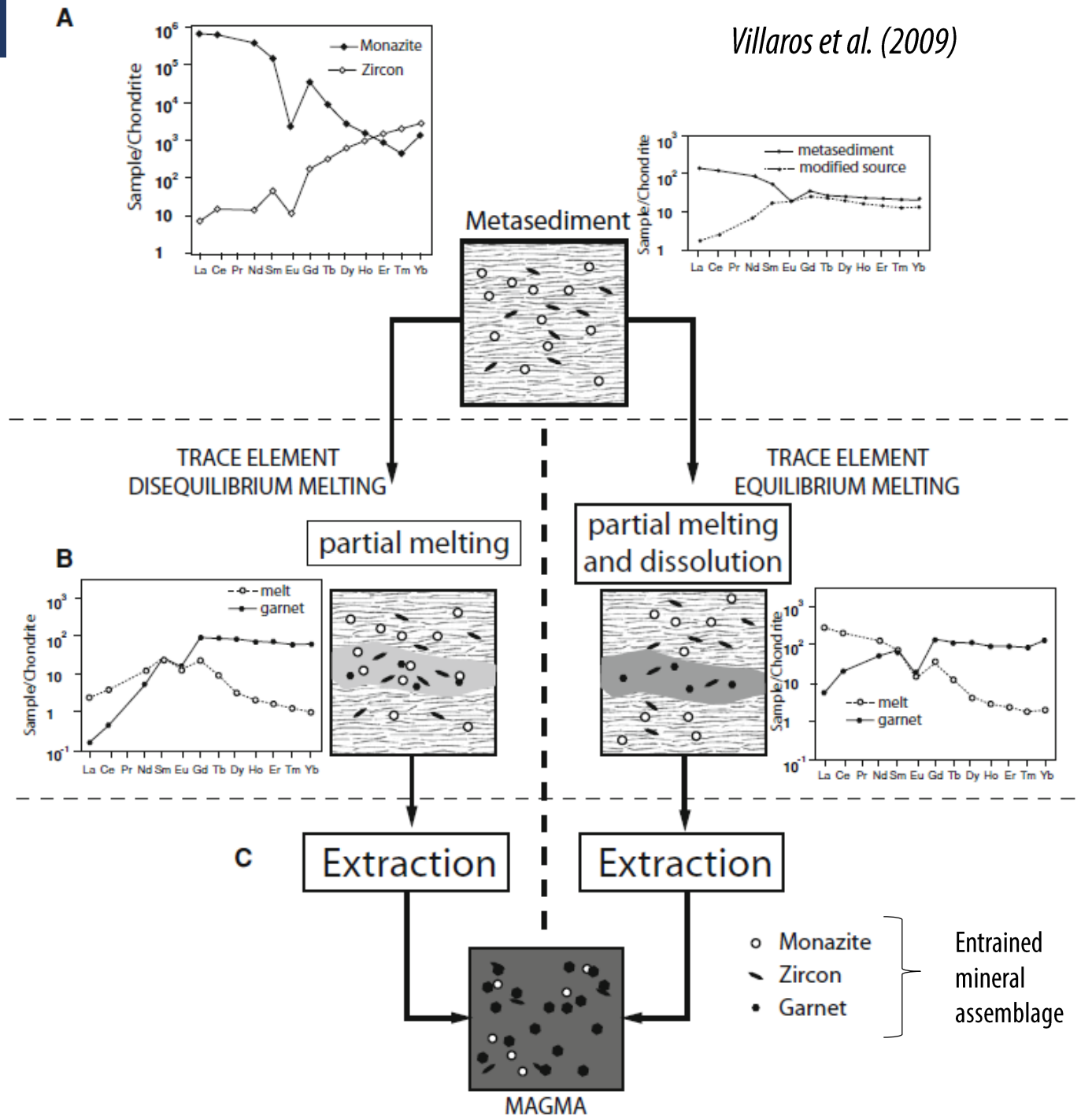
Entrainement d'assemblage péritectique (PAE) et de minéraux accessoires depuis la source:

Exemple de réactions de fusion incongruente par déshydratation de la biotite de métapelite

1/ Bt + Qtz + Pl + Sil = Grt ± Crd + melt + Ilm ± Kfs

2/ Bt + Qtz + Pl = Grt ± Crd + Opx + melt + Ilm ± Kfs

Les phases péritectiques formés lors des réactions de FP ainsi que les minéraux accessoires peu solubles (zircon, monazite) vont être entrainés par le magma depuis la source migmatitique



Villaros et al. (2009)