

Le minéral apatite : un nouveau proxy pour la datation des minéralisations?

Marc Poujol

Christophe Ballouard, Inoussa Kéré, Anthony Pochon,

Yannick Branquet (ISTO, Orléans-Géosciences Rennes)

Romain Tartèse (MNHN, Paris)

Jean-Marc Baele (Univ. Mons, Belgique)

UNIVERSITÉ DE
RENNES 1

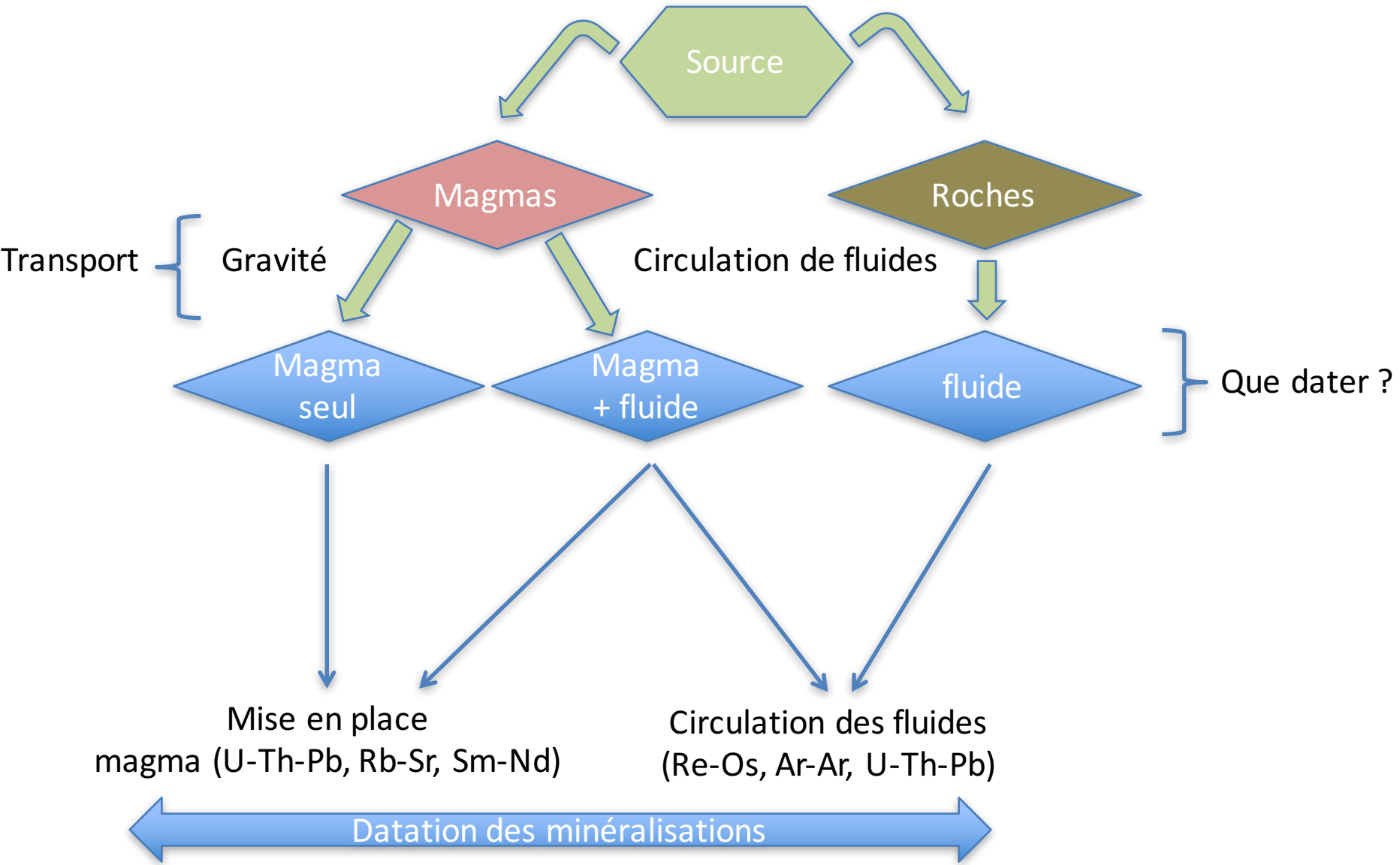
GÉOSCIENCES
Rennes



INSU- CESSUR
Institut national des sciences de l'Univers

Ecole Thématique du CNRS
Ressources Minérales :
du terrain à l'expérimentation
Toulouse : 7 au 9 Juin 2016

Processus minéralisateurs



Problèmes :

Dans tous les cas

→ Phase(s) de remobilisation (fluides)

→ Phase(s) d'altération(s)

} Que date t'on?

1^{ère} question à se poser : Que veut on dater? Minéralisation primaire ou la remobilisation



Nécessite parfaite connaissance de l'objet minéralisé de la séquence paragénétique de la minéralisation et des caractéristiques du ou des fluide(s) impliqué(s)

2^{ème} question : Quel(s) minéral(aux) datables est(sont) présent(s) et par quelle(s) méthode(s)

Choix de l'échantillon est CRUCIAL



Etude de séquence paragénétique de la minéralisation



Identification des minéraux en présence



Caractérisation du ou des fluide(s)



Stratégie de datation

Minéralisation

Minéraux datables

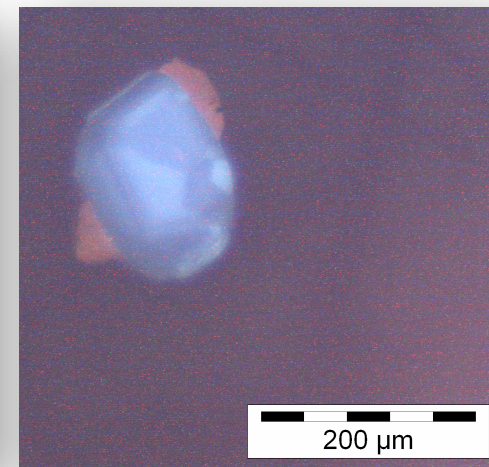
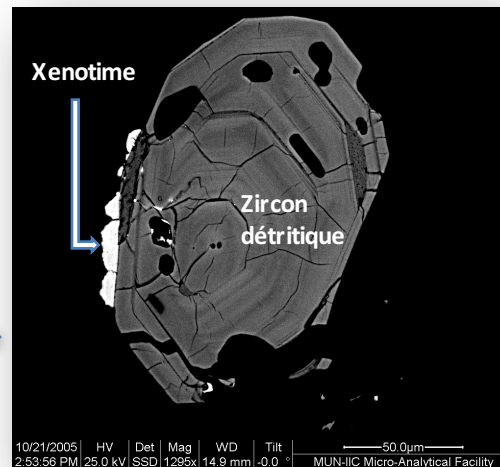
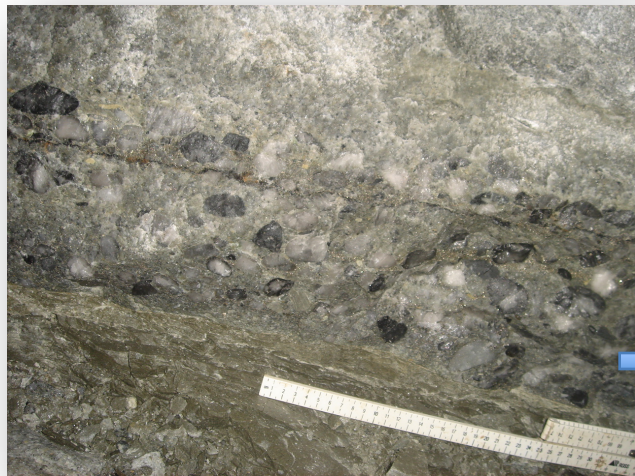
Pas de minéraux datables

Mise en œuvre de la méthode

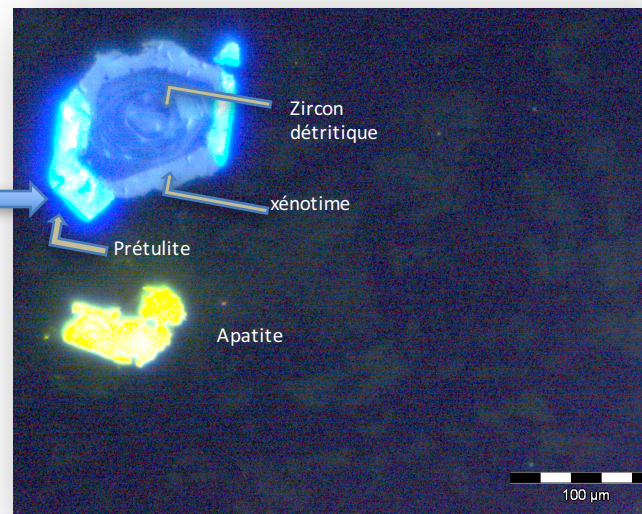
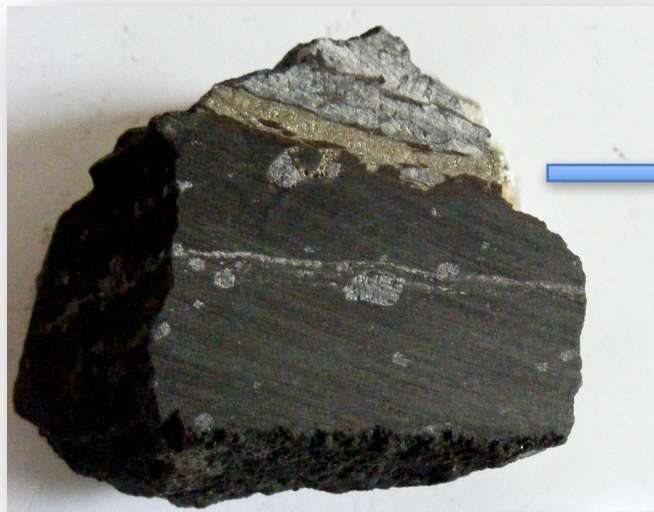
Chercher dans l'encaissant



Présence de minéraux datables dans la minéralisation ss



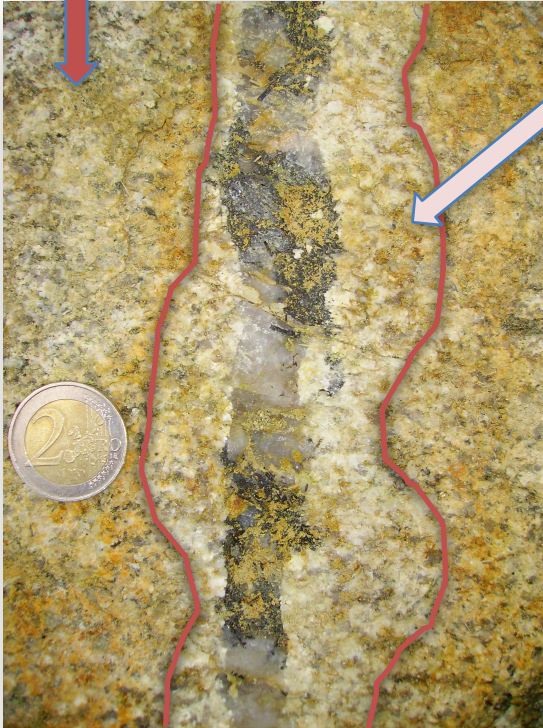
Ex : Conglomérats à Au+U du bassin du Witwatersrand (Afr du Sud)



Ex : Sulfures massifs St Aubin des Châteaux (Massif Armoricain)

Granite sain

Pas de minéraux datables dans la minéralisation ss



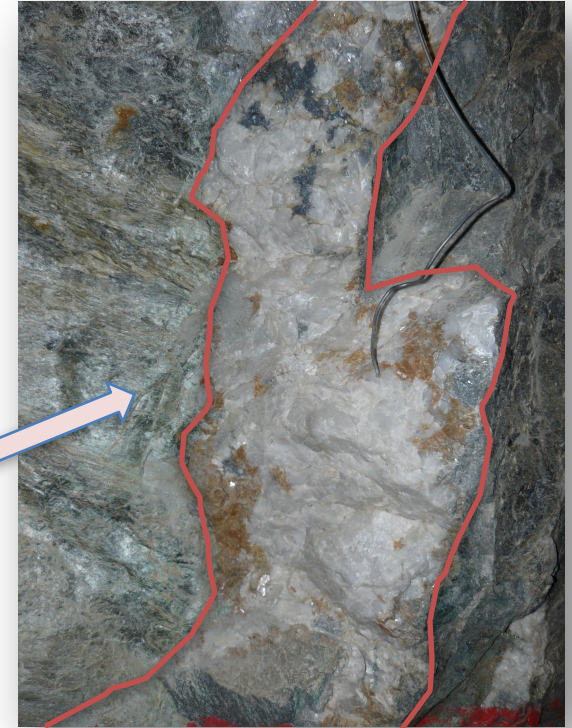
Tartèse et al., 2012, *Journal of Geodynamics*

Ex : Veine de quartz à cassiterite (Massif Armoricain)

Granite altéré (disparition biotite apparition placage de monazites)

Fuschitisation de l'encaissant au contact de la veine

Minéraux datables marqueurs de l'altération (donc du passage des fluides)

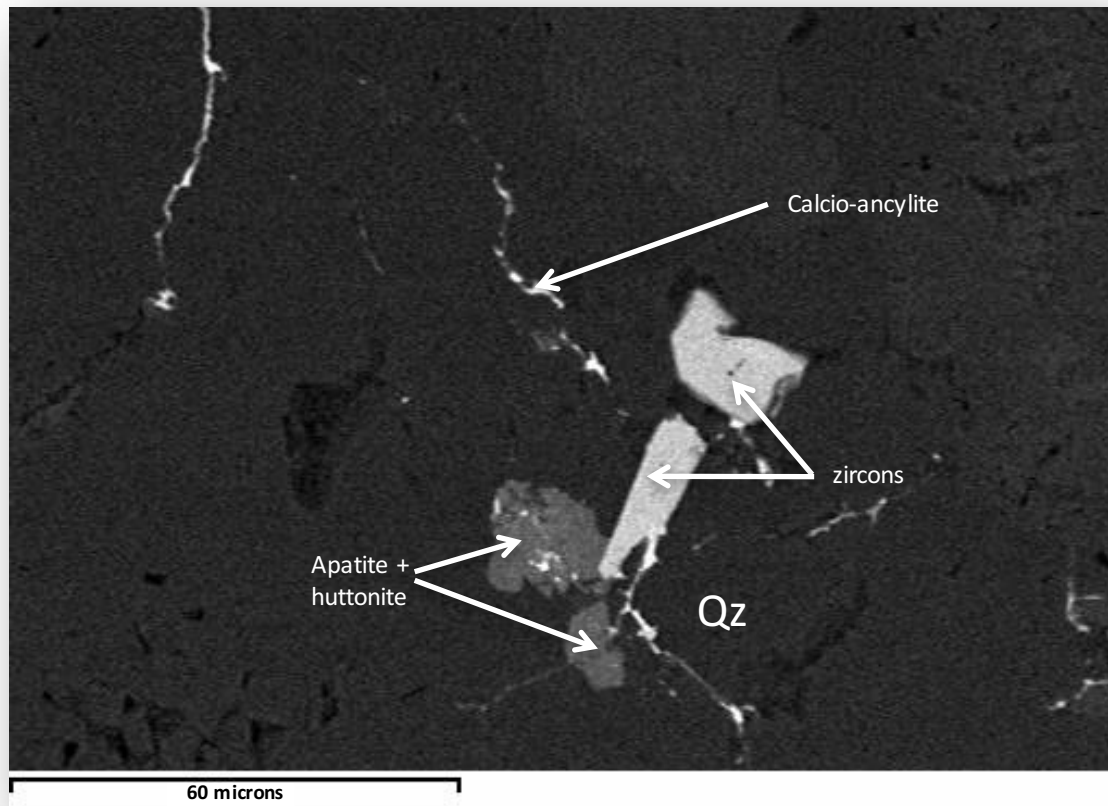


Jaguin et al., 2013, *Lithos*

Ex : Veine de quartz/carbonate à stibine (Murchison GB, Afr du Sud)

Les problèmes potentiels :

La taille des minéraux:



Les problèmes potentiels :

La complexité des minéraux:

Chemical Geology 261 (2009) 286–302

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo

Fluid-induced disturbance of the monazite Th–Pb chronometer: In situ dating and element mapping in pegmatites from the Rhodope (Greece, Bulgaria)

V. Bosse ^{a,*}, P. Boulvais ^b, P. Gautier ^b, M. Tiepolo ^c, G. Ruffet ^b, J.L. Devidal ^a, Z. Cherneva ^d, I. Gerdjikov ^d, J.L. Paquette ^a

Les problèmes potentiels :

La complexité des minéraux:

Chemical Geology 261 (2009) 286–302

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo



Earth and Planetary Science Letters 145 (1996) 79–96

EPSL

Fluid-induced disturbance of the monazite Th–Pb chronometer: In situ dating and element mapping in pegmatites from the Rhodope (Greece, Bulgaria)

V. Bosse ^{a,*}, P. Boulvais ^b, P. Gautier ^b, M. Tiepolo ^c, G. Ruffet ^b, J.L. Devidal ^a, Z. Cherneva ^d, I. Gerdjikov ^d, J.L. Paquette ^a

Contrasted monazite hydrothermal alteration mechanisms and their geochemical implications

Franck Poitrasson ^{a,b,*}, Simon Chenery ^a, David J. Bland ^c

Les problèmes potentiels :

La complexité des minéraux:

Chemical Geology 261 (2009) 286–302

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo



Earth and Planetary Science Letters 145 (1996) 79–96

EPSL

Fluid-induced disturbance of the monazite Th–Pb chronometer: In situ dating and element mapping in pegmatites from the Rhodope (Greece, Bulgaria)

V. Bosse ^{a,*}, P. Boulvais ^b, P. Gautier ^b, M. Tiepolo ^c, G. Ruffet ^b, J.L. Devidal ^a, Z. Cherneva ^d, I. Gerdjikov ^d, J.L. Paquette ^a

Contrasted monazite hydrothermal alteration mechanisms and their geochemical implications

Franck Poitrasson ^{a,b,*}, Simon Chenery ^a, David J. Bland ^c

Chemical Geology 259 (2009) 131–142

Contents lists available at ScienceDirect

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo



Distinguishing magmatic zircon from hydrothermal zircon: A case study from the Gidginbung high-sulphidation Au–Ag–(Cu) deposit, SE Australia

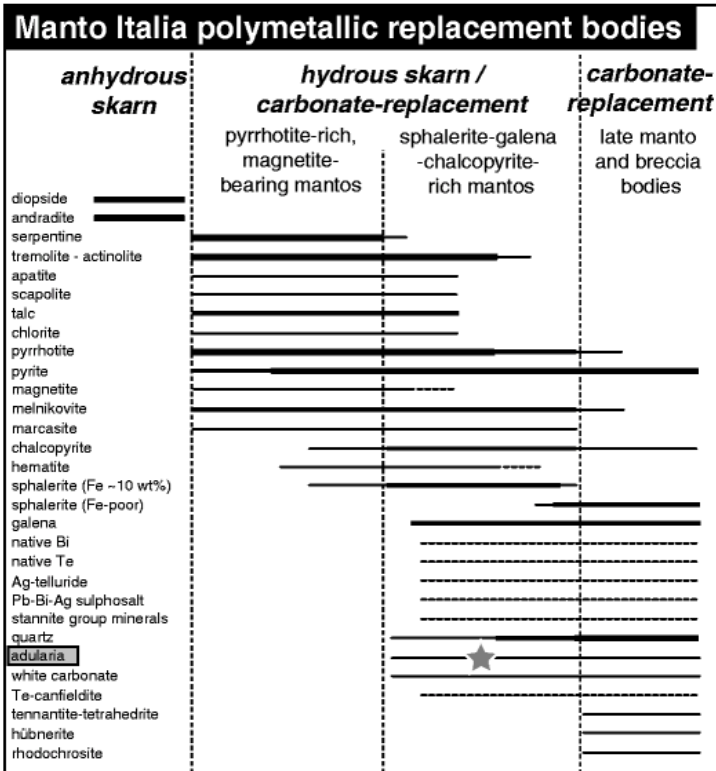
Bin Fu ^{a,*}, Terrence P. Mernagh ^b, Noriko T. Kita ^a, Anthony I.S. Kemp ^c, John W. Valley ^a

Et l'Apatite dans tout ça :

L'apatite ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$) est un minéral accessoire ubiquiste rencontré dans de nombreux types de roches et d'environnements.

1. Ce minéral incorpore très souvent de l'uranium lors de sa cristallisation. Cela en fait donc un excellent candidat pour la datation U-Pb. De plus, ce même minéral peut faire l'objet d'une datation par l'étude des traces de fission (et/ou (U-Th)/He). Par conséquent on peut à la fois dater l'âge de cristallisation de l'apatite mais aussi l'âge de l'exhumation des roches hôtes.
2. L'apatite constitue un excellent piège pour le P, F, Cl, OH, et les REE
3. Ce minéral peut facilement réagir en présence de saumures, ou des fluides aqueux
4. Cristallisation de l'apatite peut-être (sub-)contemporaine de la mise en place des minéralisations
5. Température de fermeture (375-550°C environ)

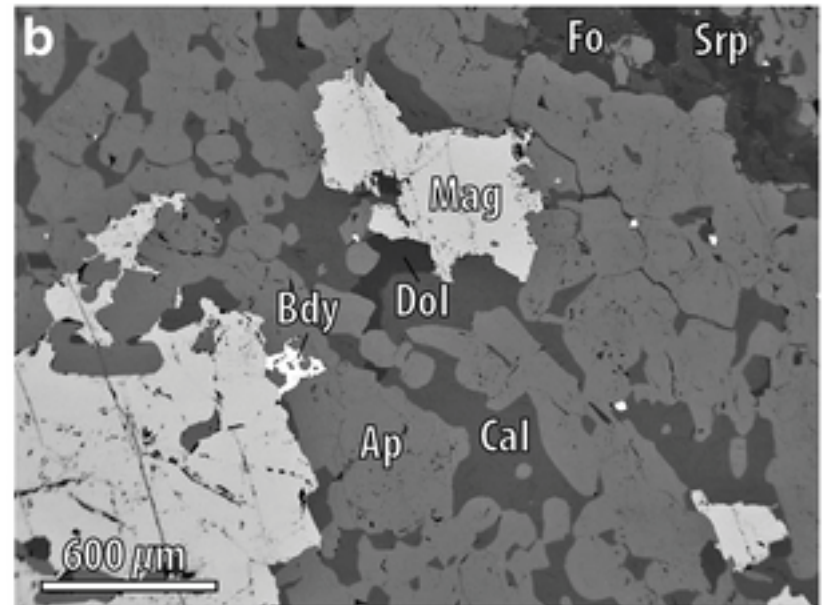
Et l'Apatite dans tout ça :



porphyry (Cu-Mo) & base metal (Zn-Pb-Ag-Cu)

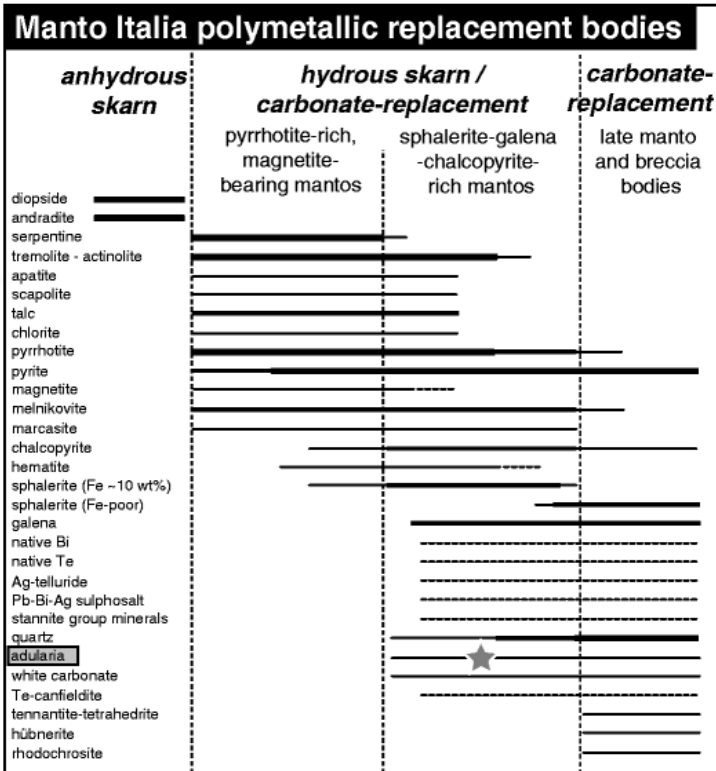
		Diagenesis	Pre-ore stage metamorphic?	Stage 1 Massive sulphidation	Stage 2 Polymetallic stage	Stage 3 Gold-Sulphosalts stage	Stage 4 Late carbonate stage
Mineral			Si-Al-Fe	As	Cu-Zn	Pb-Sb-Au	FeS-carbonates
Sulphides and sulfosalts	Arsenopyrite			██████████			
	Pyrite			██████████	██████████		
	Marcasite			██████████	██████████		
	Pyrrhotite			██████████	██████████		
	Chalcocopyrite				██████████	██████████	
	Sphalerite				██████████	██████████	
	Galena					██████████	
	Boulangierite					██████████	
	Bourmonite					██████████	
	Tetrahedrite					██████████	
Phosphates ^c	Fluorapatite	██████████		██████████			
	Lulzaitite			██████████			
	Goyazite			██████████			
	Pretulite			██████████			
	Xenotime-(Y) ^d		-----	-----			
	Monazite-(Ce) ^d *		-----	-----			

Palaeozoic oolitic ironstone of the French Armorican Massif



Kovdor phosphorite-carbonatite complex (Russia)

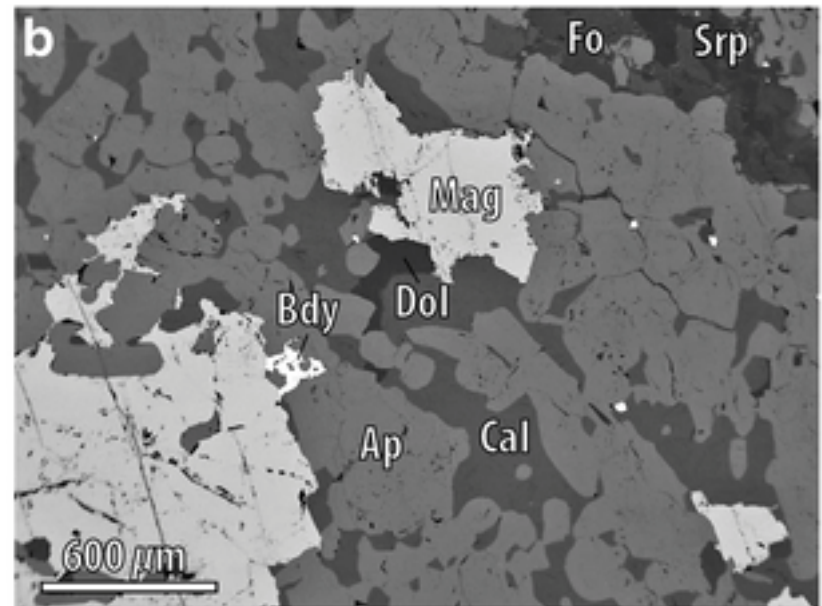
Et l'Apatite dans tout ça :



porphyry (Cu-Mo) & base metal (Zn-Pb-Ag-Cu)

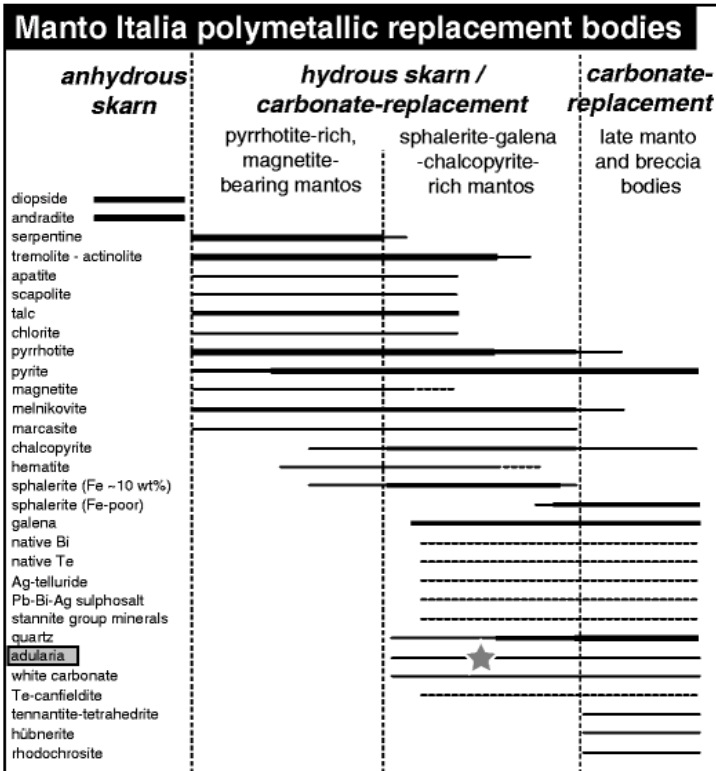
		Diagenesis	Pre-ore stage metamorphic?	Stage 1 Massive sulphidation	Stage 2 Polymetallic stage	Stage 3 Gold-Sulphosalts stage	Stage 4 Late carbonate stage
Mineral			Si-Al-Fe	As	Cu-Zn	Pb-Sb-Au	FeS-carbonates
Sulphides and sulfosalts	Arsenopyrite			██████████			
	Pyrite			██████████	██████████		
	Marcasite			██████████	██████████		
	Pyrrhotite			██████████	██████████		
	Chalcopyrite			██████████	██████████		
	Sphalerite				██████████	██████████	
	Galena				██████████	██████████	
	Boulangerite					██████████	
	Bourmonite					██████████	
	Tetrahedrite					██████████	
Phosphates ^c	Fluorapatite	██████████					
	Lulzaitite			██████████			
	Goyazite			██████████			
	Pretulite			██████████			
	Xenotime-(Y) ^d			██████████			
Monazite-(Ce) ^d *			██████████				

Palaeozoic oolitic ironstone of the French Armorican Massif



Kovdor phosphorite-carbonatite complex (Russia)

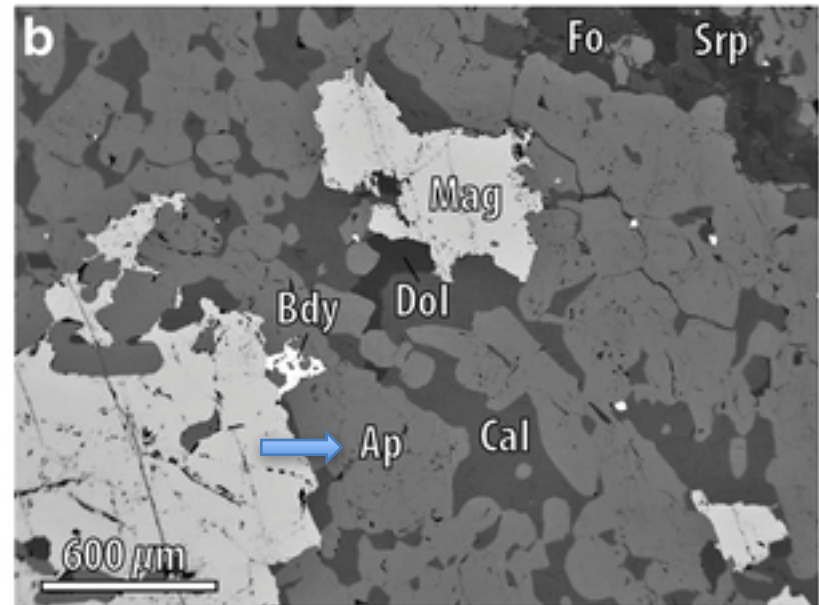
Et l'Apatite dans tout ça :



porphyry (Cu-Mo) & base metal (Zn-Pb-Ag-Cu)

		Diagenesis	Pre-ore stage metamorphic?	Stage 1 Massive sulphidation	Stage 2 Polymetallic stage	Stage 3 Gold-Sulphosalts stage	Stage 4 Late carbonate stage
Mineral			Si-Al-Fe	As	Cu-Zn	Pb-Sb-Au	FeS-carbonates
Sulphides and sulfosalts	Arsenopyrite			██████████			
	Pyrite			██████████	██████████		
	Marcasite			██████████	██████████		
	Pyrrhotite			██████████	██████████		
	Chalcopyrite			██████████	██████████		
	Sphalerite				██████████	██████████	
	Galena					██████████	
	Boulangierite					██████████	
	Bourmonite					██████████	
	Tetrahedrite					██████████	
Phosphates ^c	Fluorapatite	██████████					
	Lulzaitite			██████████			
	Goyazite			██████████			
	Pretulite			██████████			
	Xenotime-(Y) ^d			██████████			
	Monazite-(Ce) ^d *			██████████			

Palaeozoic oolitic ironstone of the French Armorican Massif



Kovdor phosphorite-carbonatite complex (Russia)

Choix de l'échantillon est CRUCIAL



Etude de séquence paragénétique de la minéralisation



Identification des minéraux en présence



Caractérisation du ou des fluide(s)



Stratégie de datation



Choix de l'échantillon est CRUCIAL



Etude de séquence paragénétique de la minéralisation



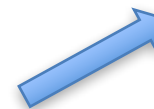
Identification des minéraux en présence



Caractérisation du ou des fluide(s)



Stratégie de datation



U-Pb

Traces de fission

Choix de l'échantillon est CRUCIAL



Etude de séquence paragénétique de la minéralisation



Identification des minéraux en présence

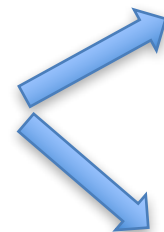


Caractérisation du ou des fluide(s)

Isotopes
Oxygène
Eléments
traces



Stratégie de datation



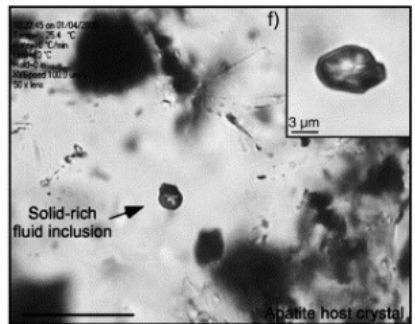
U-Pb
Traces de
fission

Problématique générale	Quelle(s) approche(s)	Méthodologies	Exemples	Conclusions
------------------------	-----------------------	---------------	----------	-------------

Choix de l'échantillon est CRUCIAL



Etude de séquence paragénétique de la minéralisation



Costanzo et al., 2006, Lithos



Identification des minéraux en présence



Caractérisation du ou des fluide(s)

Isotopes
Oxygène
Eléments
traces



Stratégie de datation



U-Pb
Traces de fission

Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

L'apatite incorpore de l'uranium (substitution au Ca) mais ce minéral incorpore aussi du plomb initial



Pour la datation LA-ICP-MS, le standard doit être exempt de tout plomb non-radiogénique !

Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

L'apatite incorpore de l'uranium (substitution au Ca) mais ce minéral incorpore aussi du plomb initial



Pour la datation LA-ICP-MS, le standard doit être exempt de tout plomb non-radiogénique !



End of story ?

Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

L'apatite incorpore de l'uranium (substitution au Ca) mais ce minéral incorpore aussi du plomb initial



Pour la datation LA-ICP-MS, le standard doit être exempt de tout plomb non-radiogénique !



End of story ?



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Chemical Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/chemgeo



U–Pb LA–ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb

D.M. Chew ^{a,*}, J.A. Petrus ^b, B.S. Kamber ^a

^a Department of Geology, Trinity College Dublin, Dublin 2, Ireland

^b Department of Earth Sciences, Laurentian University, Sudbury, Canada

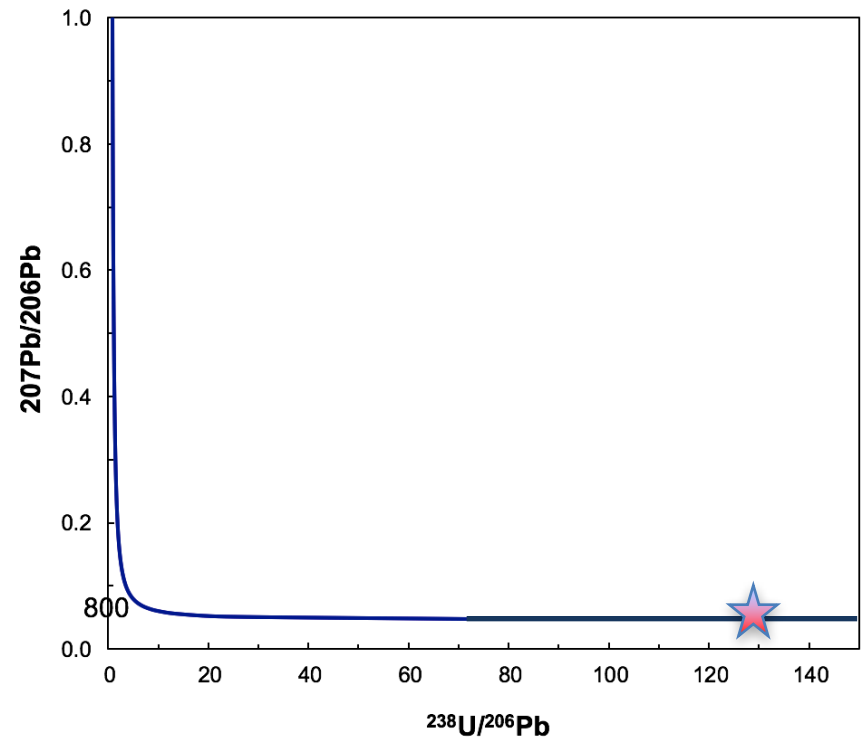


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS



Système rennais : Laser Excimer ESI NWR193UC
ICP-MS quadripole 7700x

La théorie

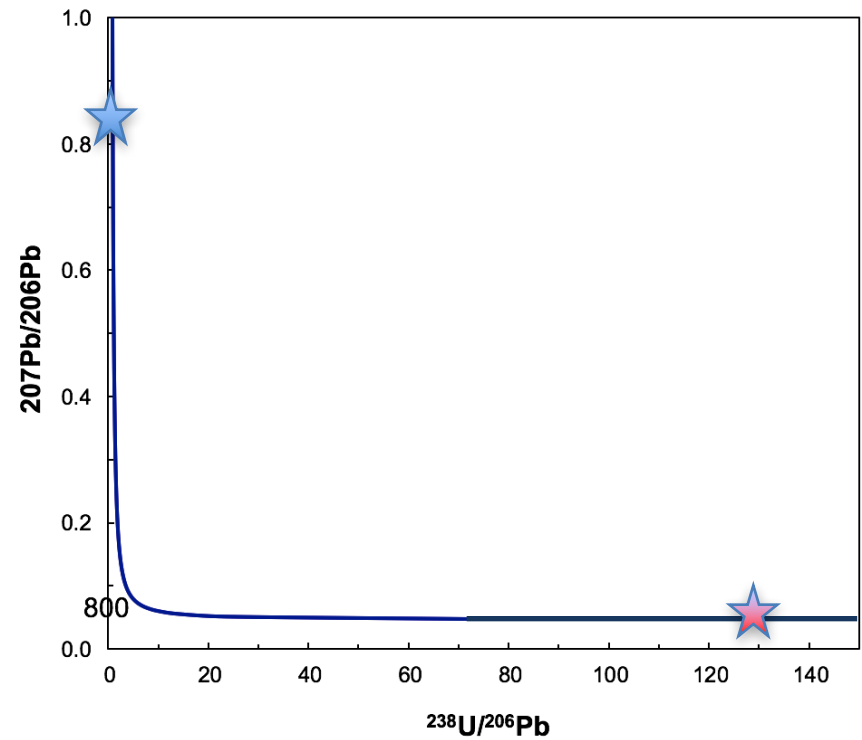


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS



Système rennais : Laser Excimer ESI NWR193UC
ICP-MS quadripole 7700x

La théorie

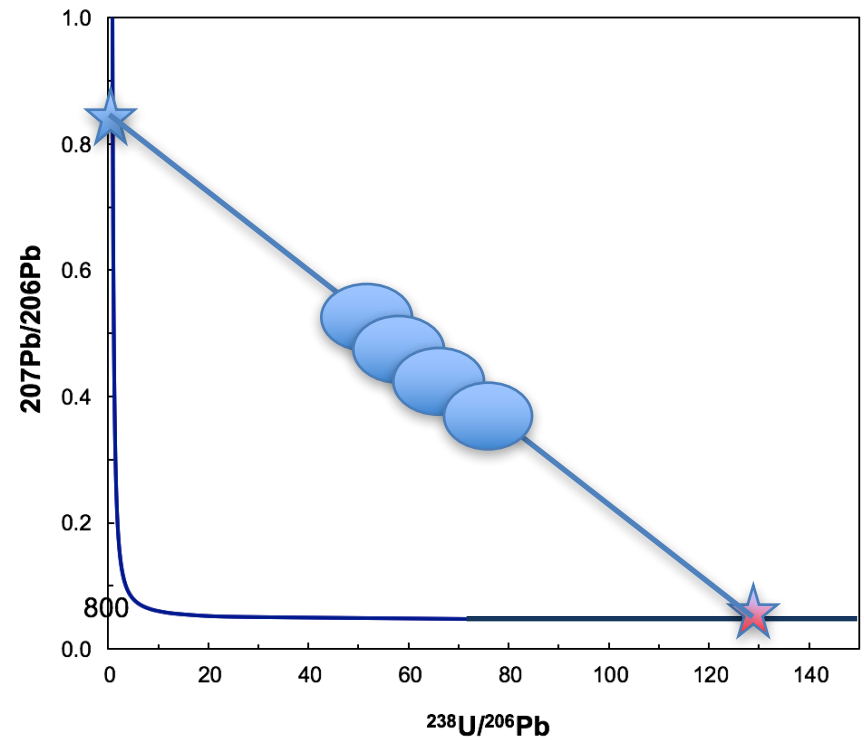


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS



Système rennais : Laser Excimer ESI NWR193UC
ICP-MS quadripole 7700x

La théorie

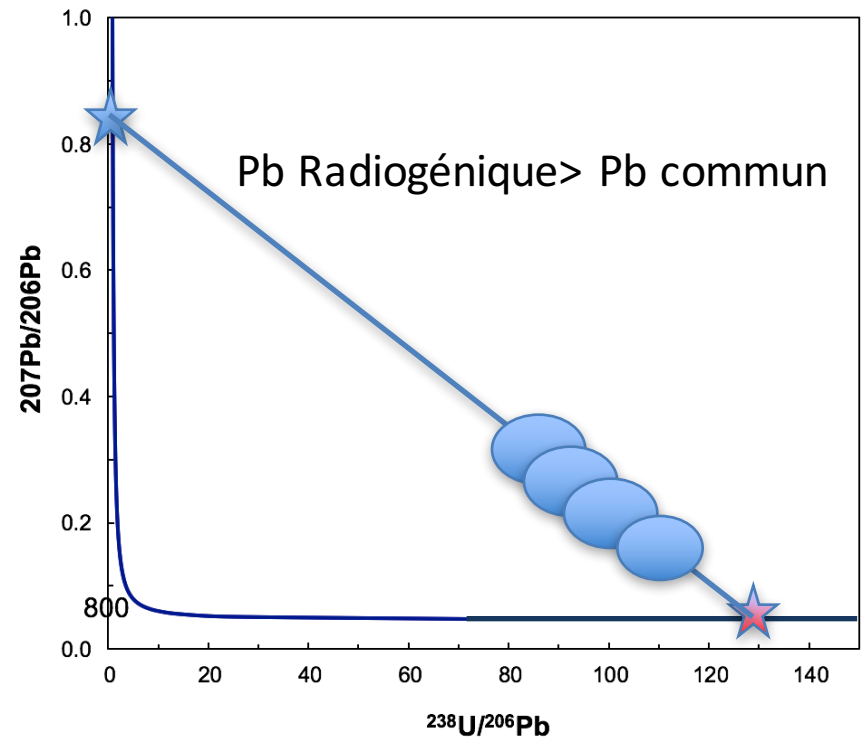


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS



Système rennais : Laser Excimer ESI NWR193UC
ICP-MS quadripole 7700x

La théorie

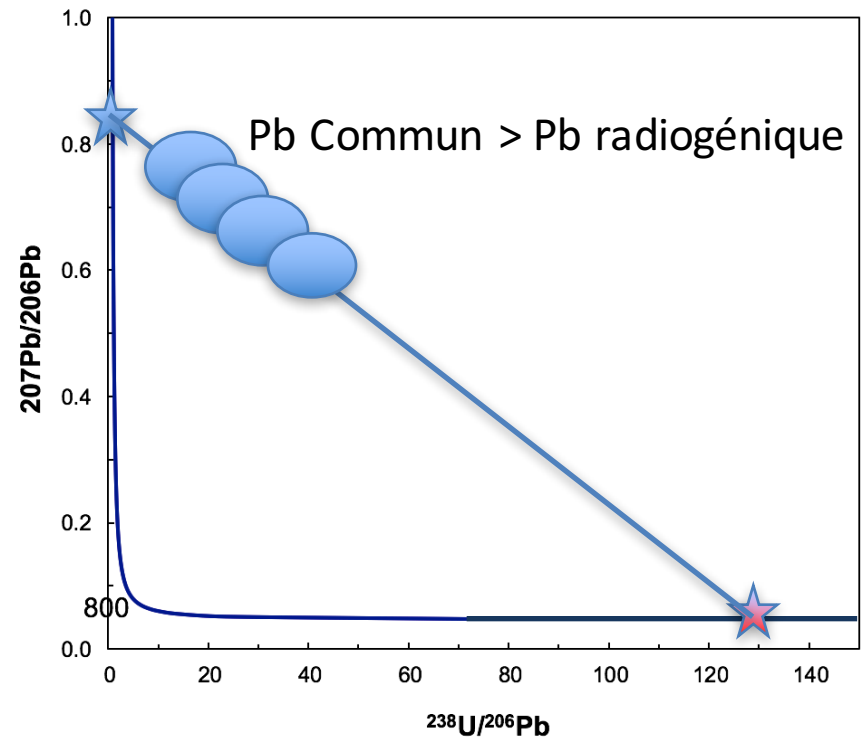


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS



Système rennais : Laser Excimer ESI NWR193UC
ICP-MS quadripole 7700x

La théorie

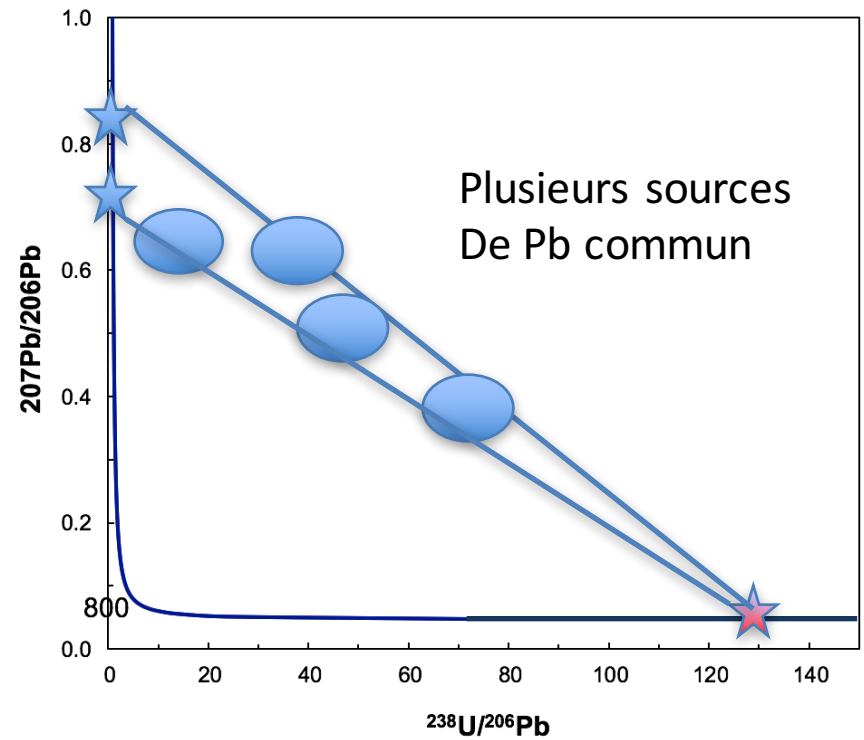


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

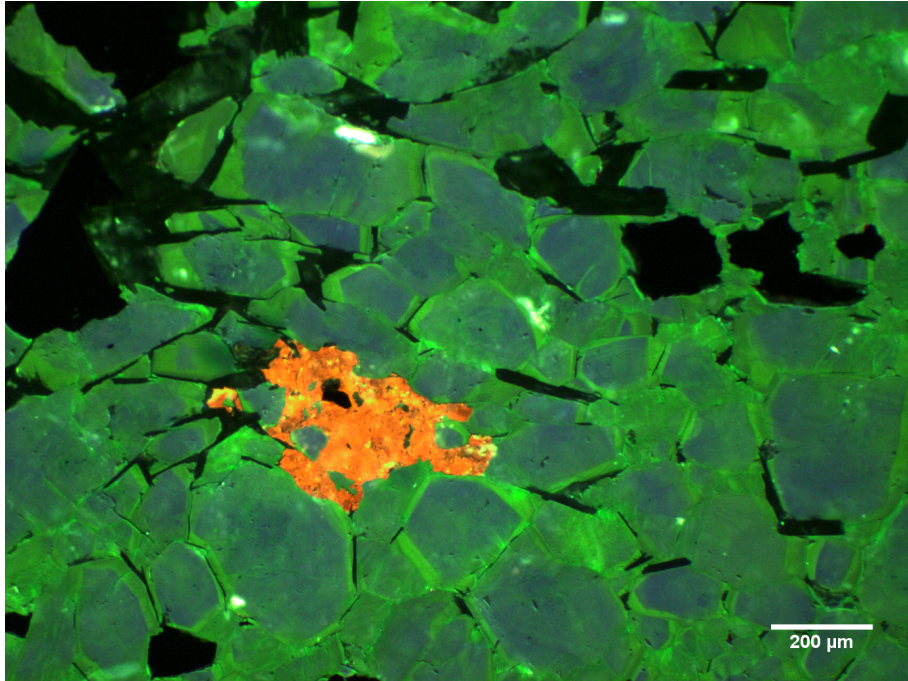


Système rennais : Laser Excimer ESI NWR193UC
ICP-MS quadripole 7700x

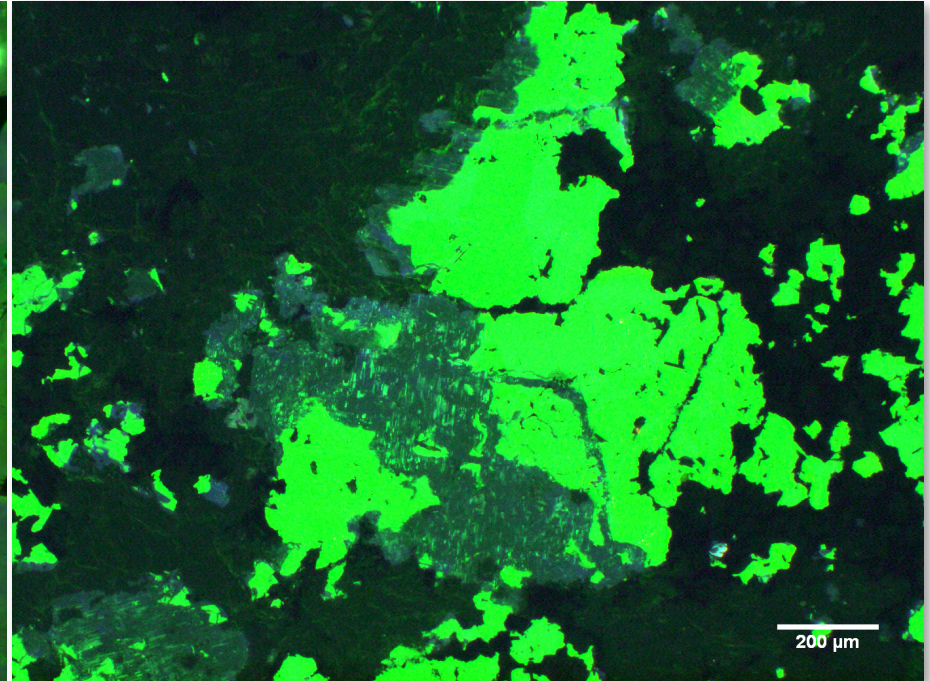
La théorie



Kiruna apatite iron oxide deposit



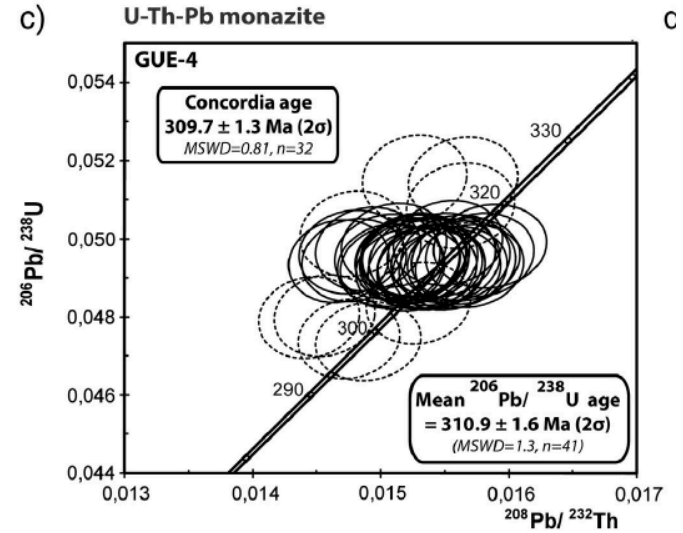
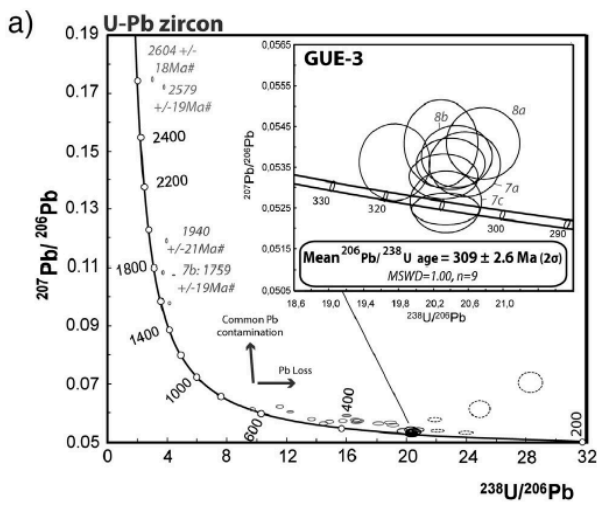
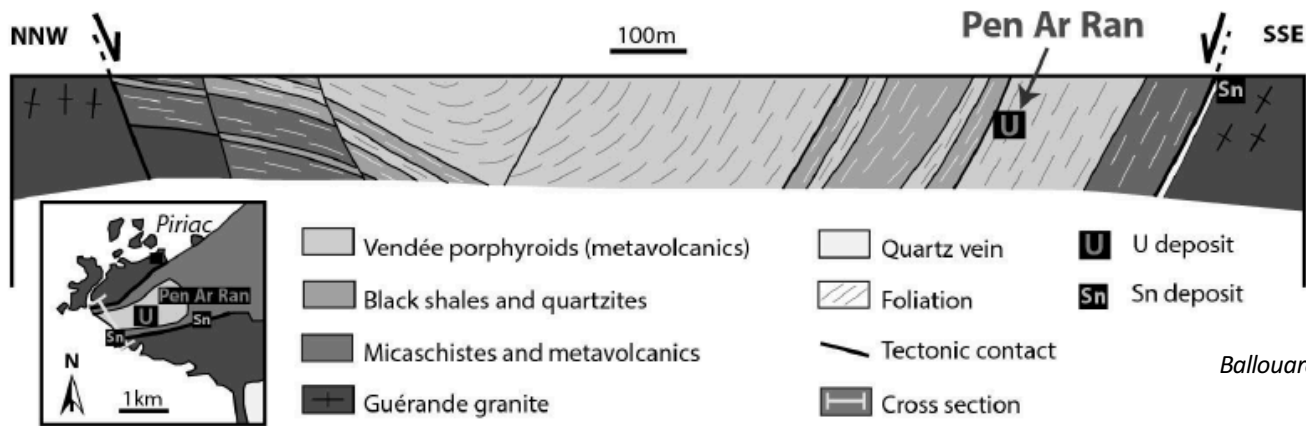
Sulfures massifs St Aubin des Châteaux



Imagerie cathodoluminescence

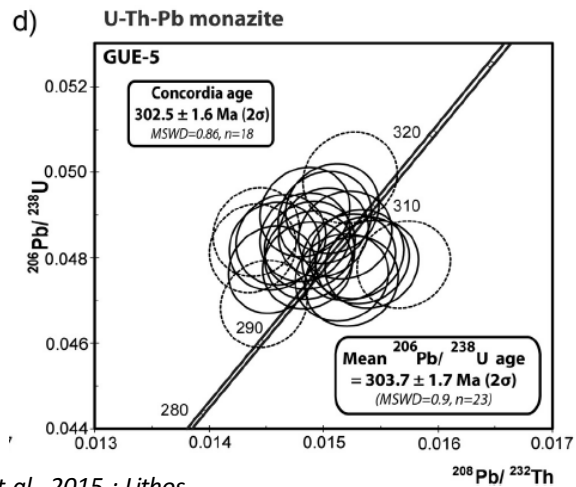
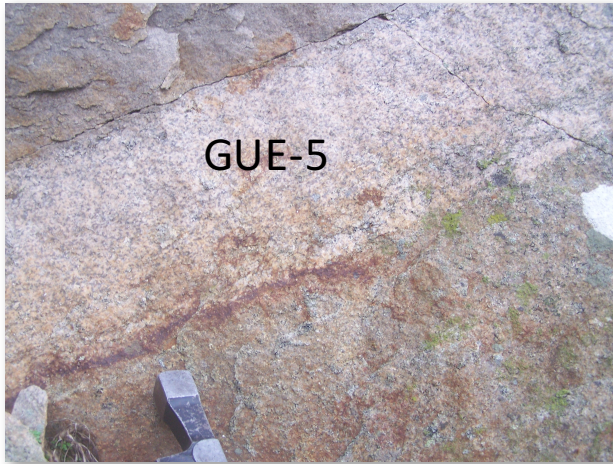
Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

Thèse C. Ballouard



Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

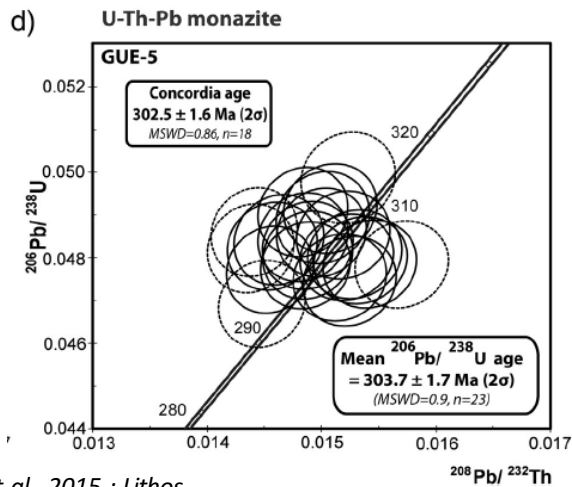
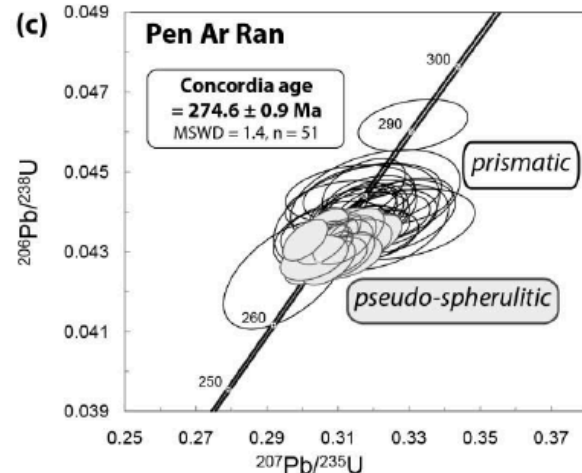
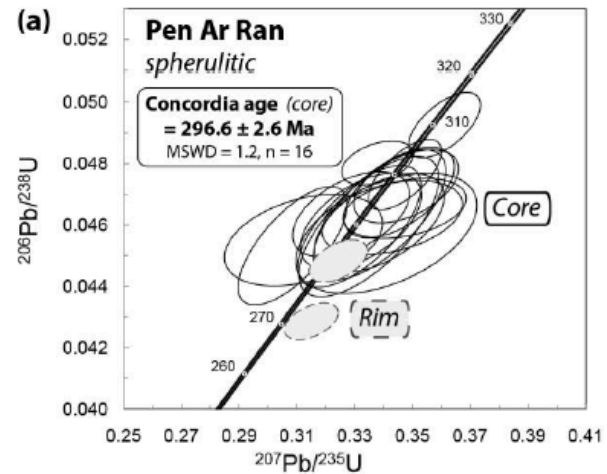
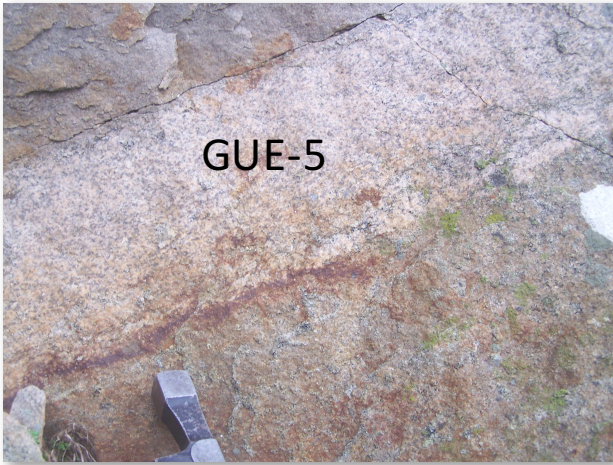
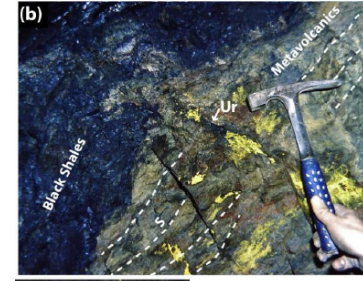
Thèse C. Ballouard



Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

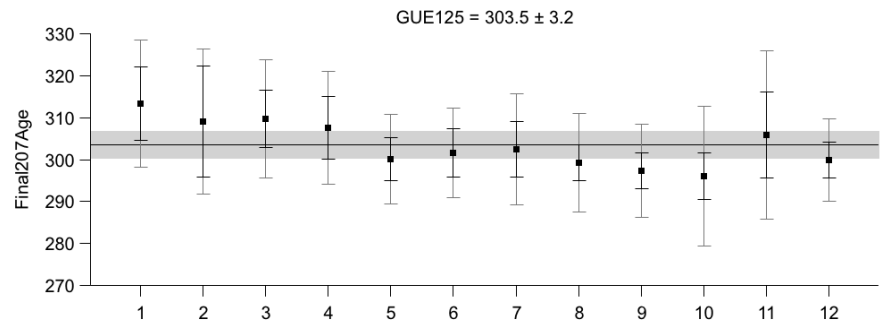
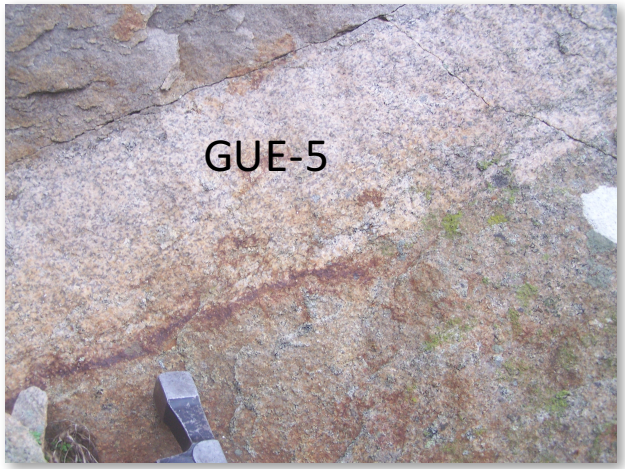
Thèse C. Ballouard

Ballouard et al., in press Ore Geology Review

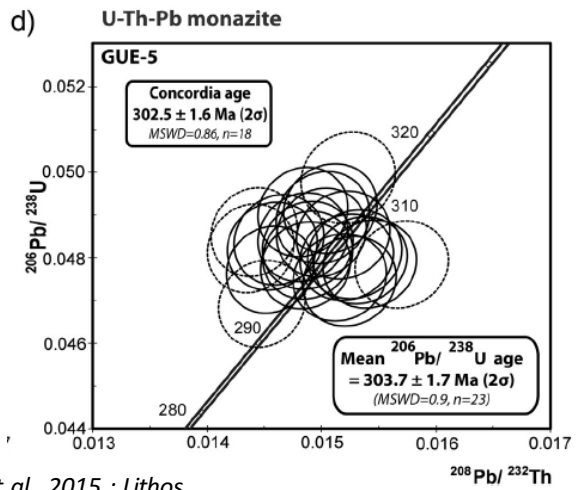


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

Thèse C. Ballouard

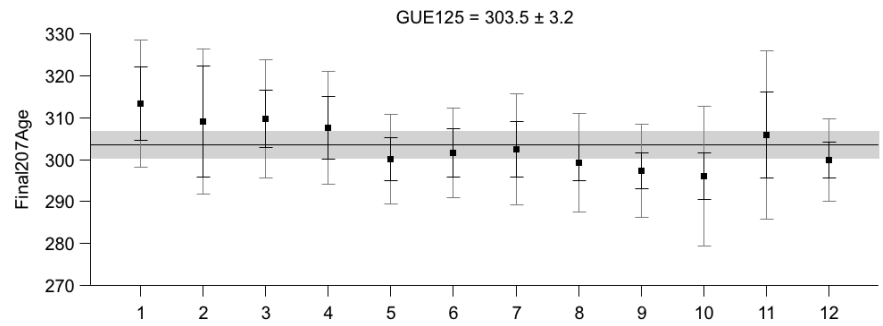
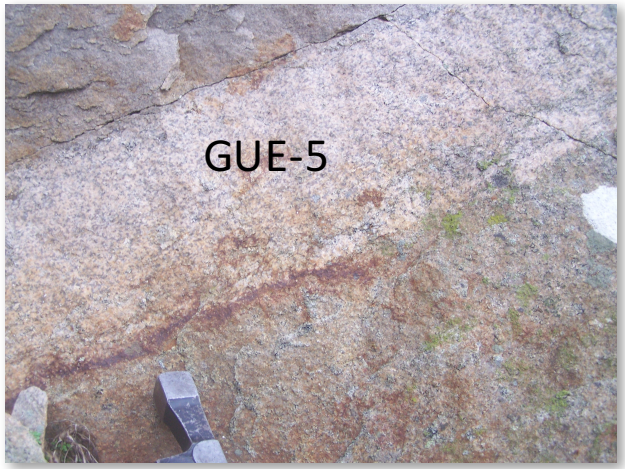


Datation U-Pb LA-ICP-MS sur apatite

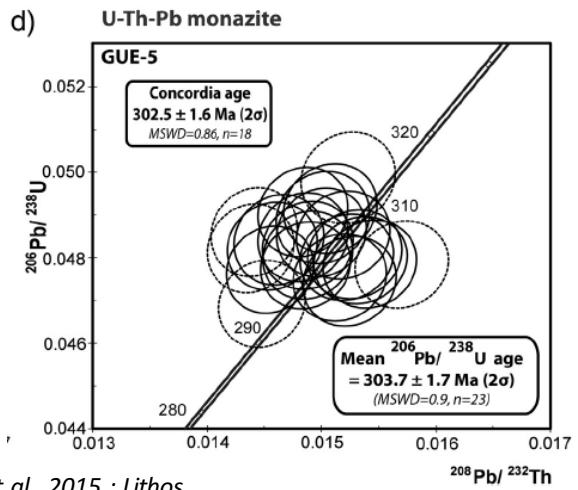


Faisabilité de la datation des apatites par LA-ICP-MS

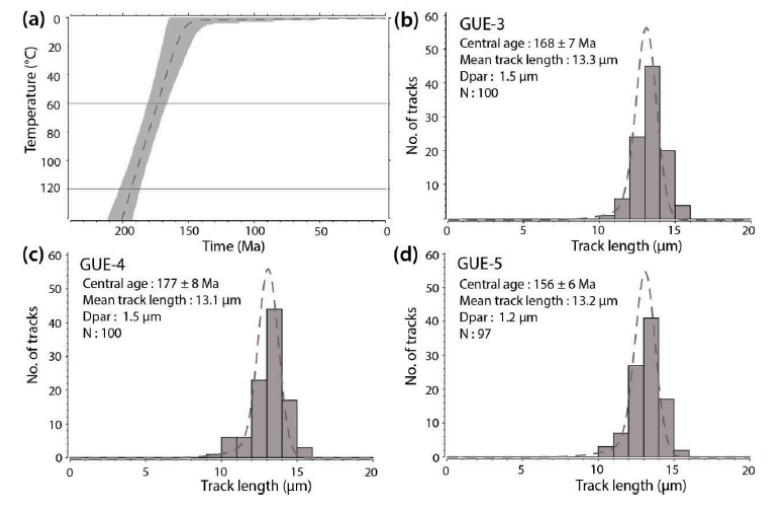
Thèse C. Ballouard



Datation U-Pb LA-ICP-MS sur apatite

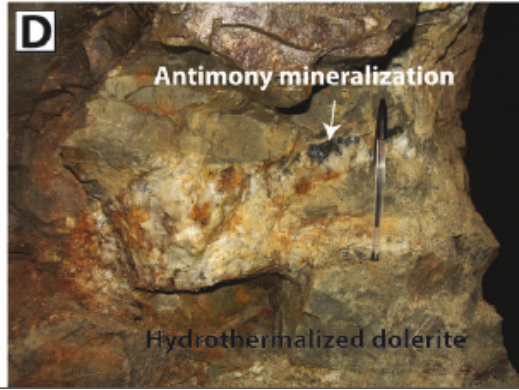


Ballouard et al., 2015 : Lithos



Ballouard et al., in press Ore Geology Review

Thèse A. Pochon



Terra Nova

doi: 10.1111/ter.12201

Antimony deposits in the Variscan Armorican belt, a link with mafic intrusives?

Anthony Pochon,¹ Denis Gapais,¹ Eric Gloaguen,^{2,3} Charles Gumiaux,^{2,3} Yannick Branquet,^{1,2,3} Florence Cagnard^{2,3} and Guillaume Martelet^{2,3}

¹Géosciences Rennes, UMR 6118, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, Rennes Cedex 35042, France; ²Institut des Sciences de la Terre d'Orléans, UMR 7327, Université d'Orléans, Campus Géosciences, 1A rue de la Férollerie, Orléans Cedex 2 45071, France; ³Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), UMR 7327, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, Orléans Cedex 02 45060, France

Figure 1

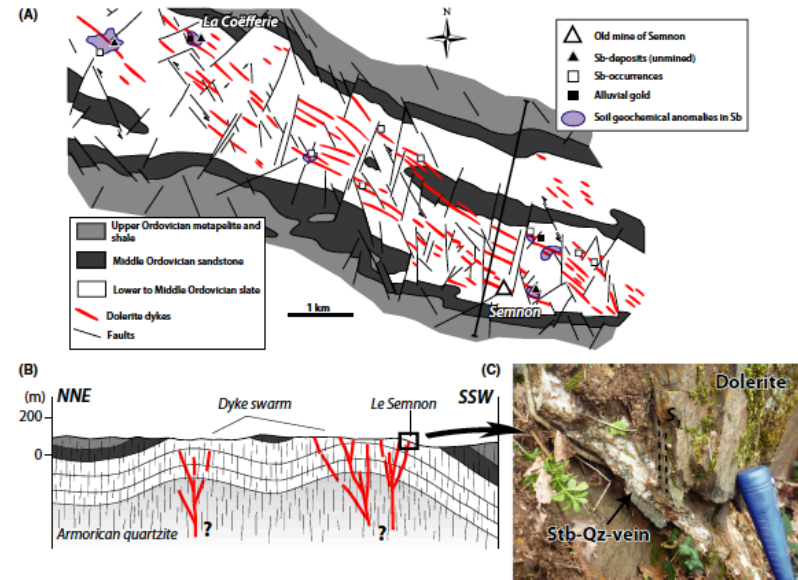
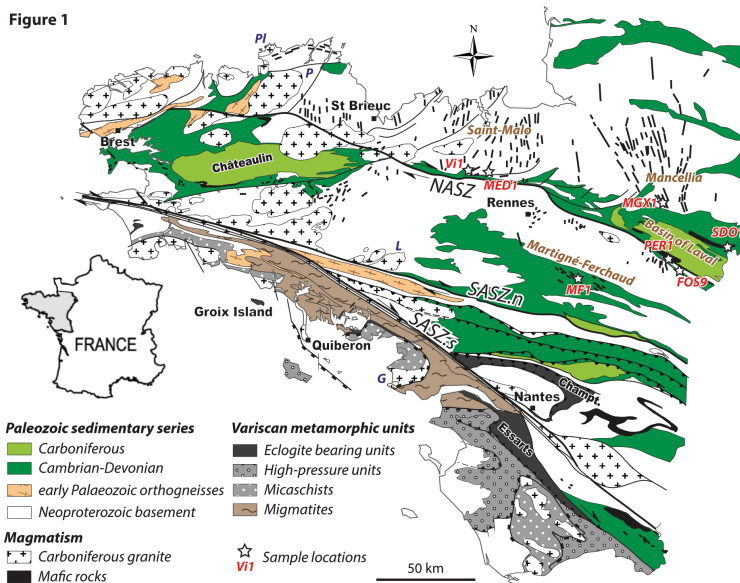
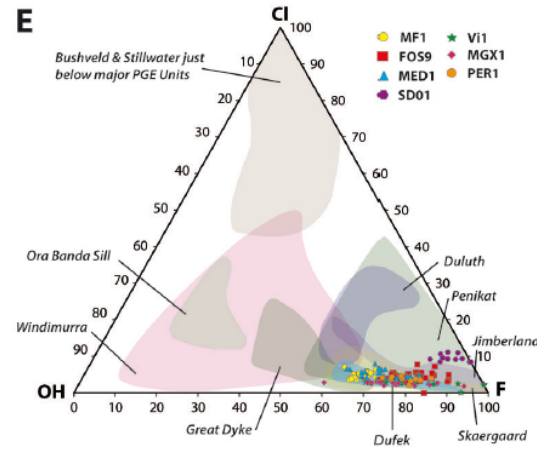


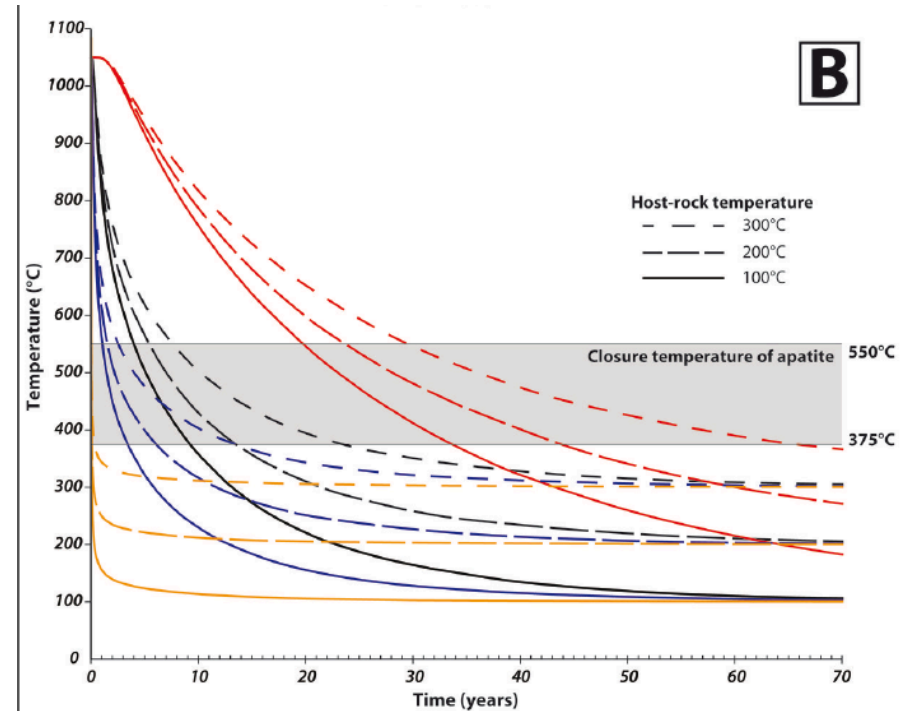
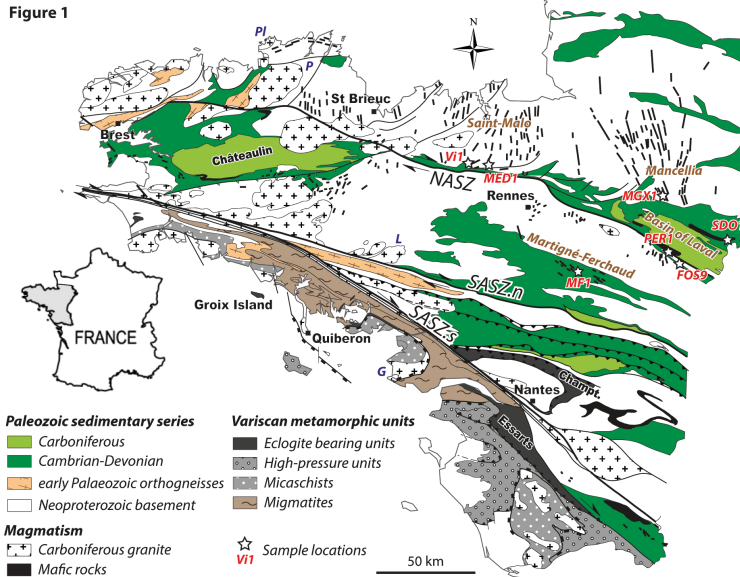
Fig. 2 (A) Detailed map of the Le Semnon district with the locations of old mines and Sb occurrences (modified after Chauris *et al.*, 1985). (B) Cross-section through the Le Semnon district. (C) An altered stibnite-bearing quartz vein crosscutting a dolerite dyke with a slight cleavage in the hangingwall.

Thèse A. Pochon



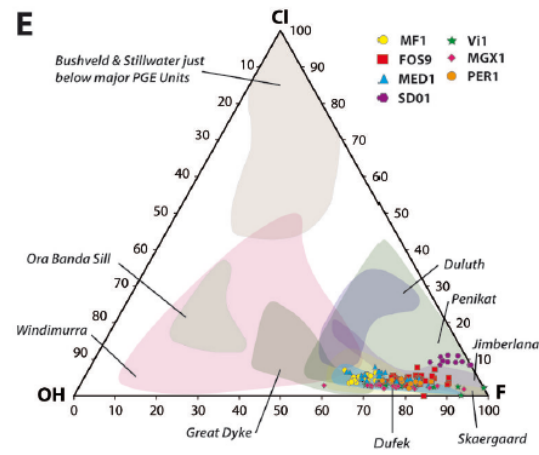
Pochon et al., in press American Mineralogist

Figure 1



Thèse A. Pochon

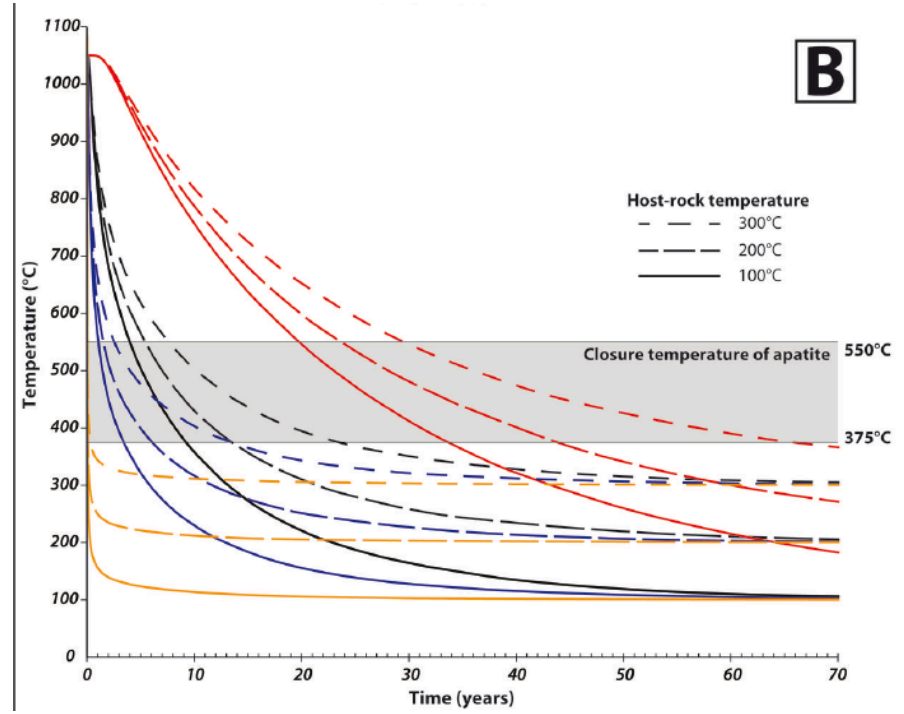
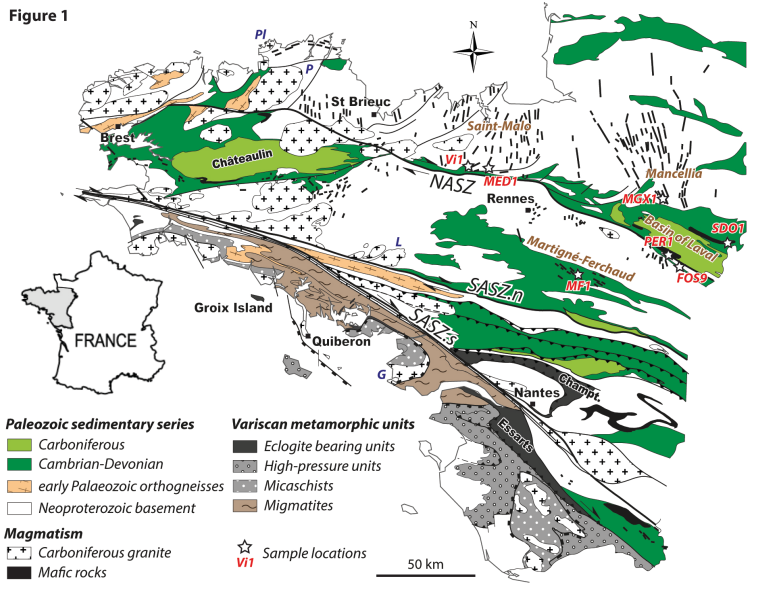
Dodson



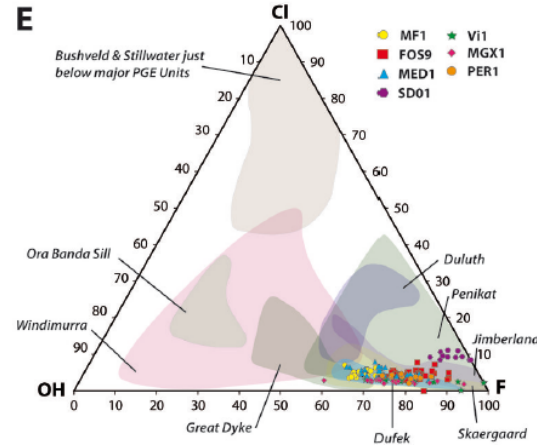
$$T_b = \frac{E}{R \ln \left(\frac{A R T_b^2}{E} \frac{D_0}{a^2} \frac{dT}{dt} \right)}$$

Pochon et al., in press American Mineralogist

Figure 1



Thèse A. Pochon



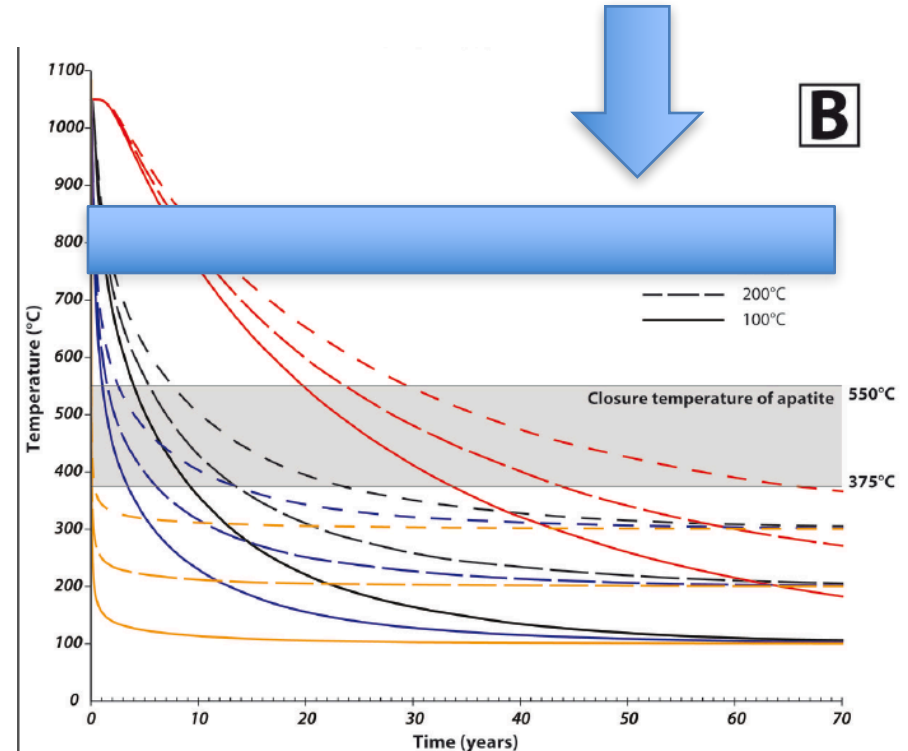
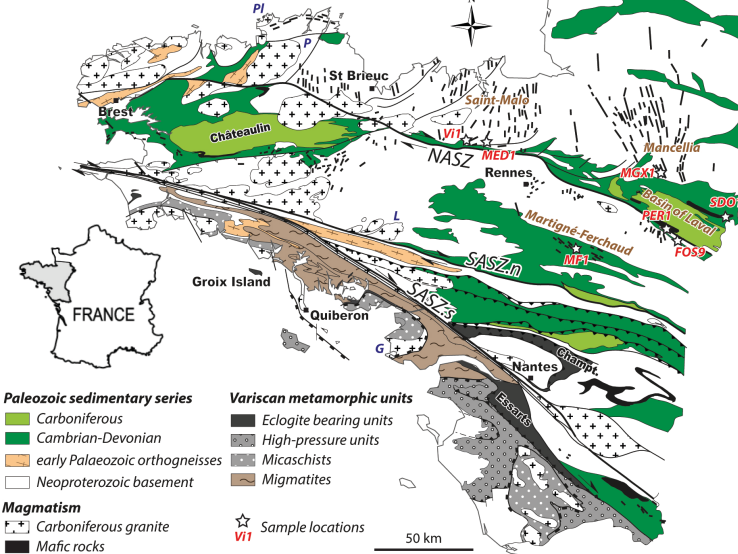
$$T_b = \frac{E}{R \ln \left(\frac{ART_b^2 \frac{D_0}{a^2}}{E \frac{dT}{dt}} \right)}$$

Dodson

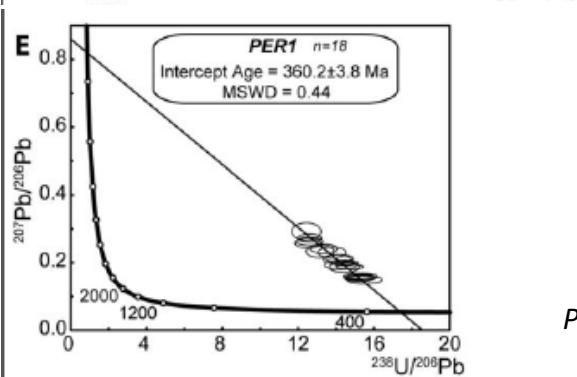
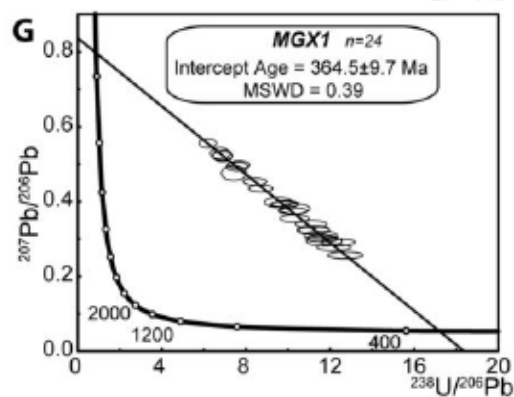
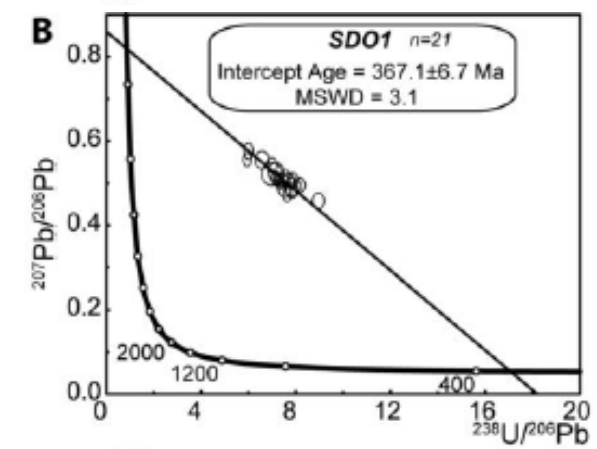
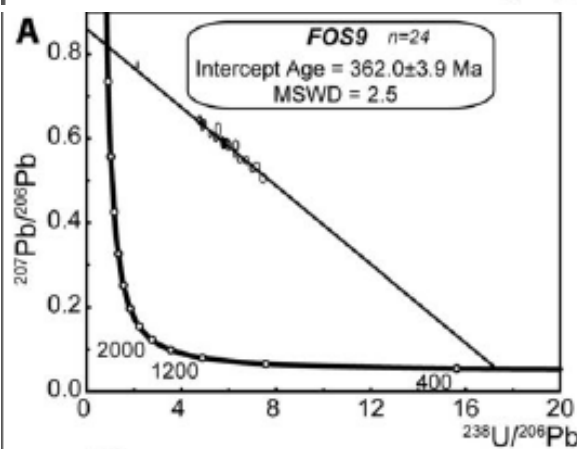
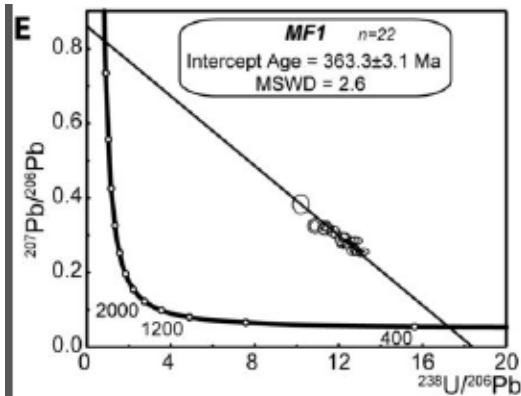
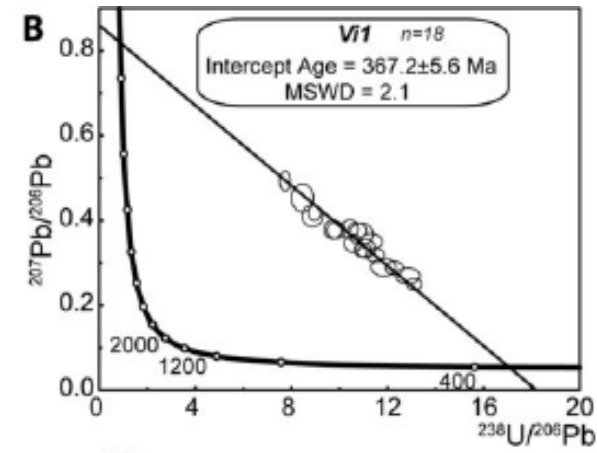
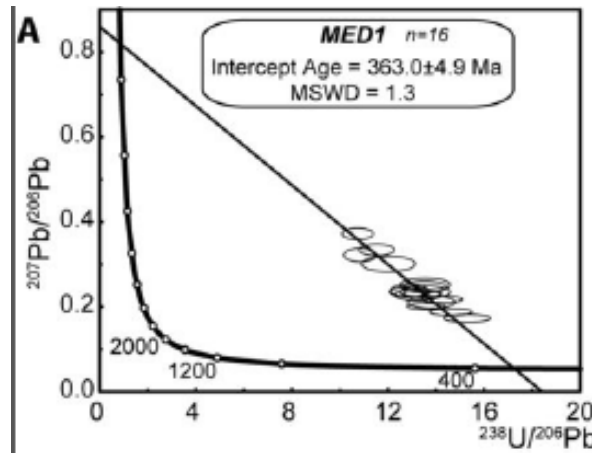
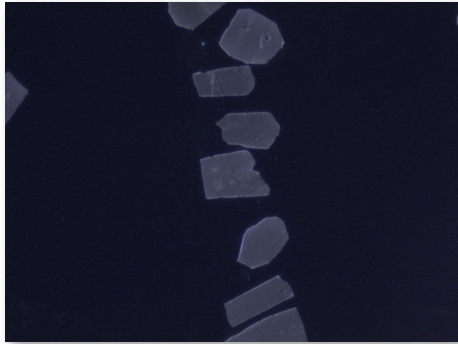
Champs des températures de fermeture des apatites dans ces dykes

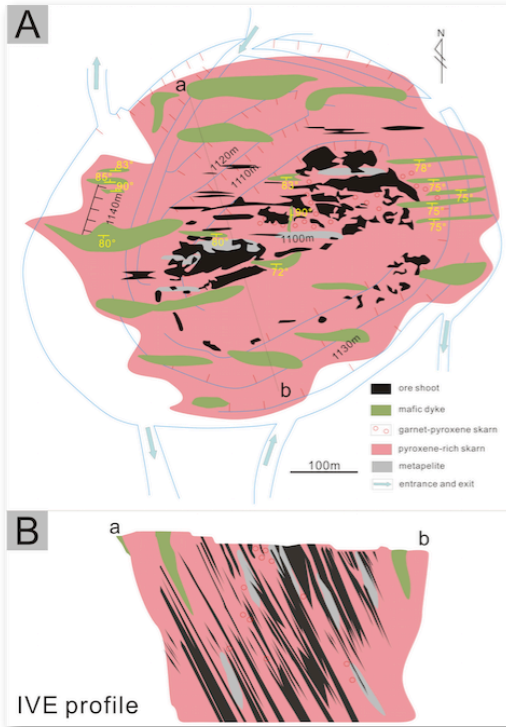
Pochon et al., in press American Mineralogist

Figure 1

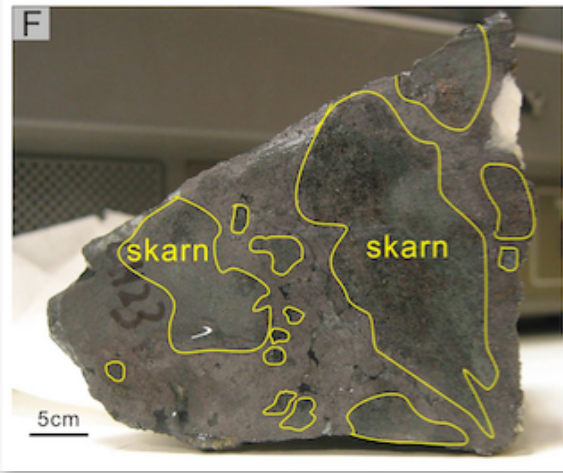


Thèse A. Pochon



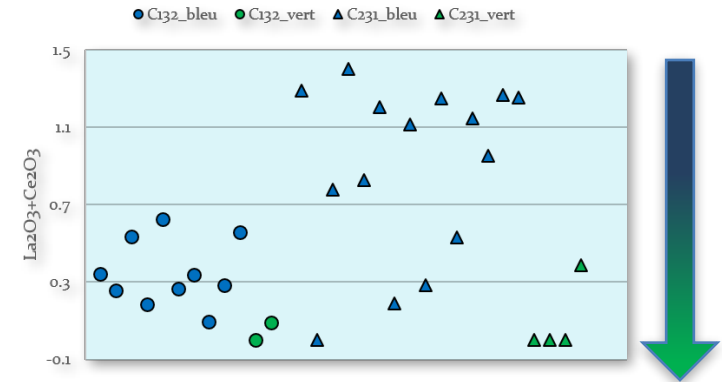
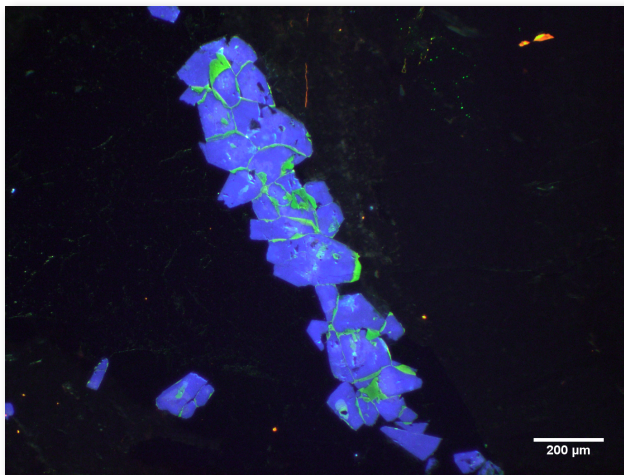
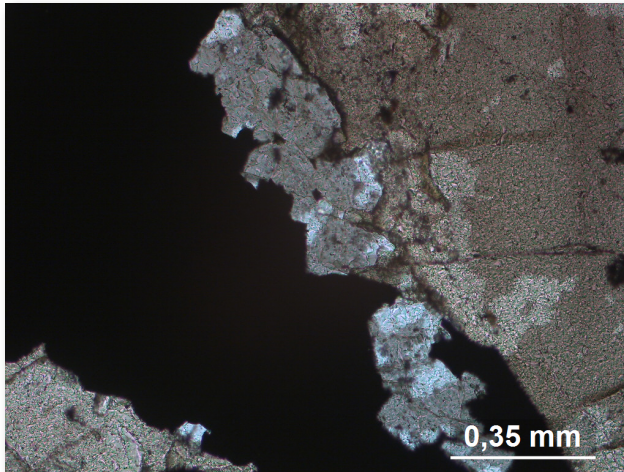


Cihai skarn-related magnetite deposit, Eastern Tianshan, NW China
Master 2 Inoussa Kéré



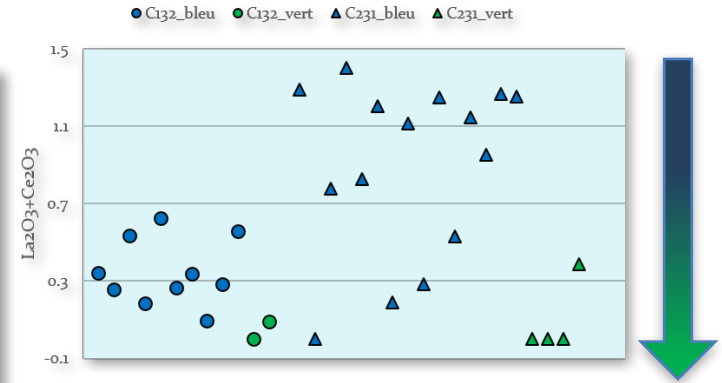
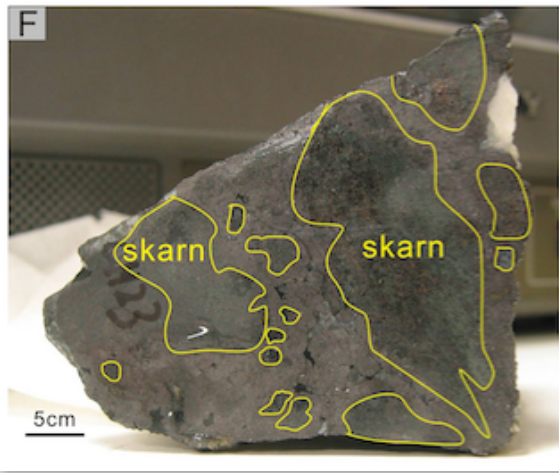
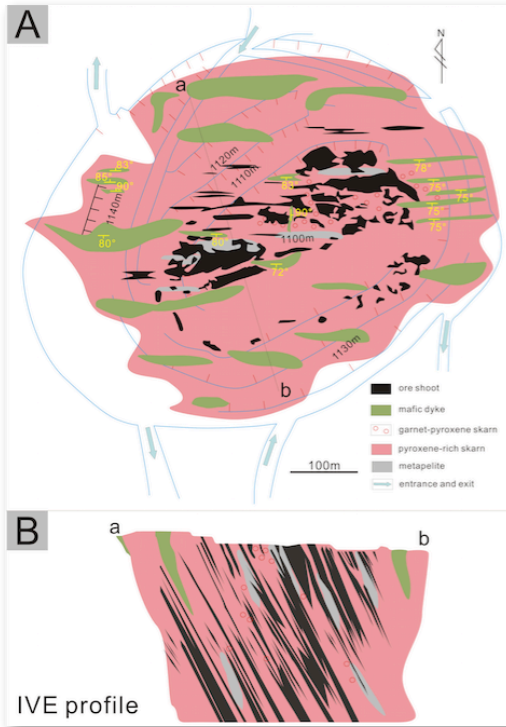
Cihai skarn-related magnetite deposit, Eastern Tianshan, NW China

Master 2 Inoussa Kéré

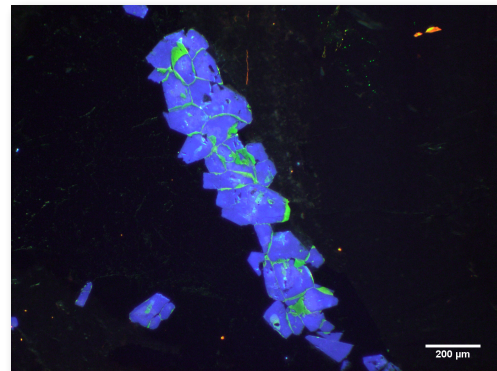
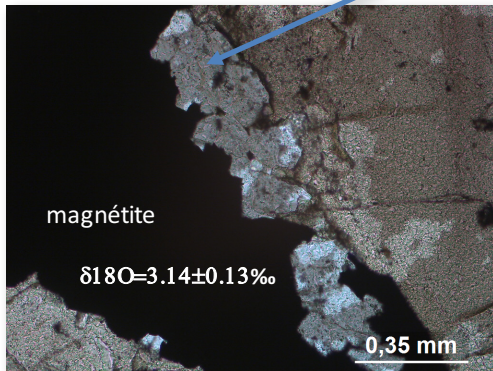


REE intégré dans les premiers germes d'apatites et les dernières cristallisent à partir d'un fluide appauvri en REE.

Cihai skarn-related magnetite deposit, Eastern Tianshan, NW China Master 2 Inoussa Kéré

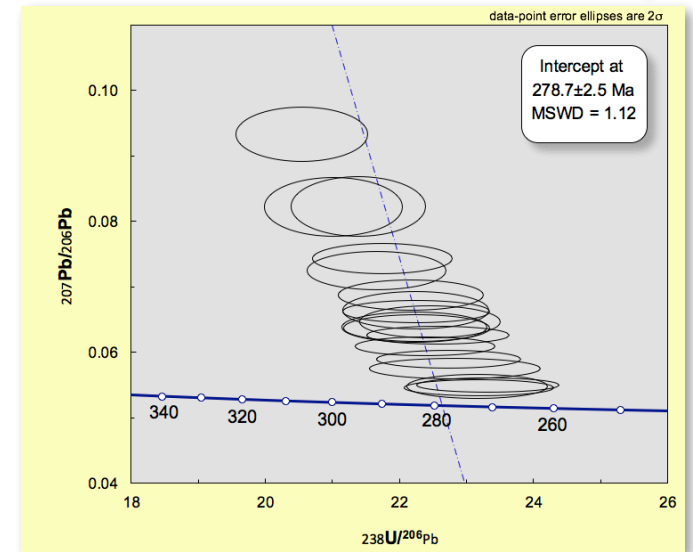
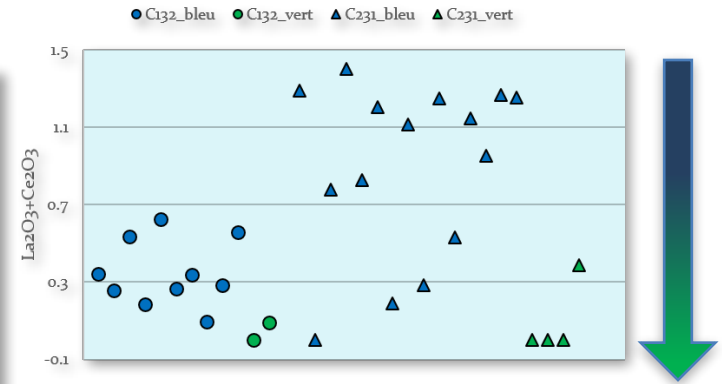
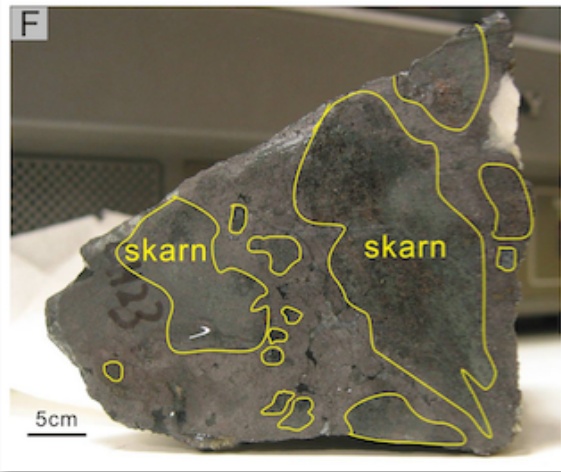
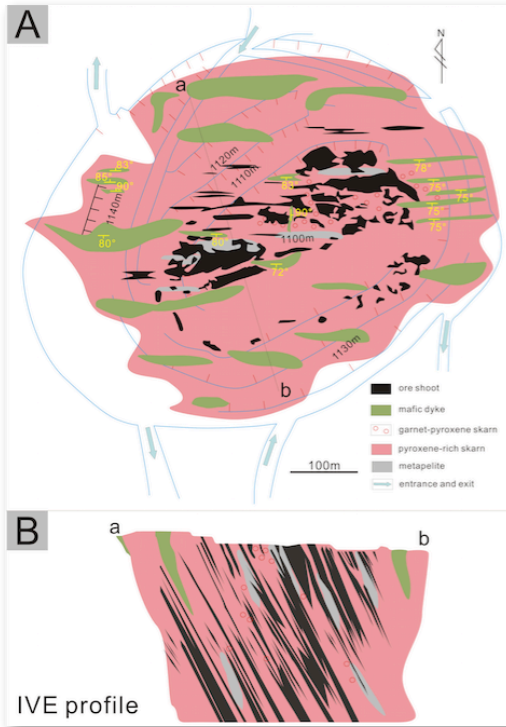


Apatites ($\delta^{18}\text{O} = 5.29 \pm 0.3\text{‰}$)

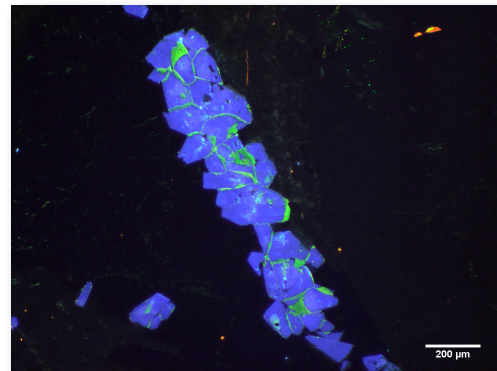
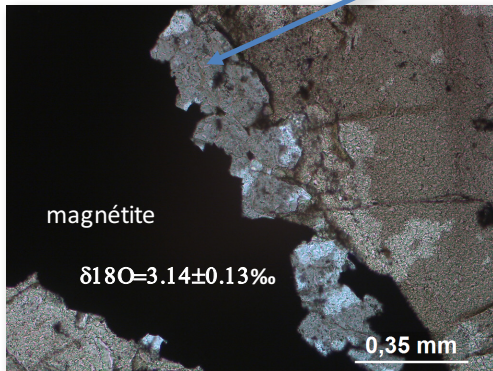


→ Température = 900°C

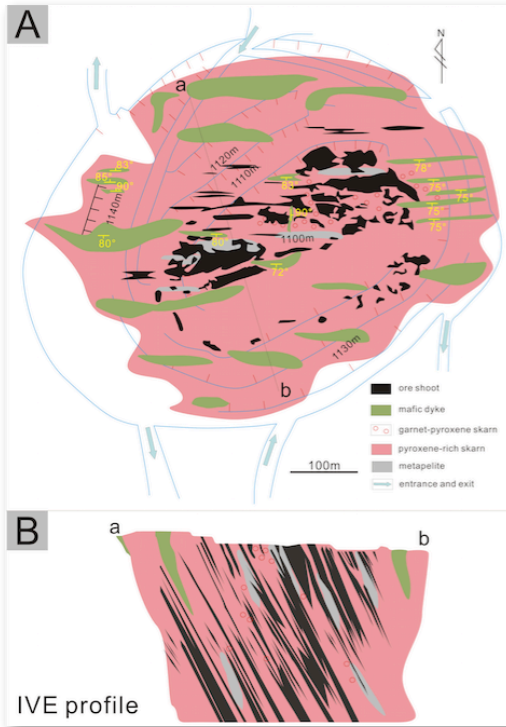
Cihai skarn-related magnetite deposit, Eastern Tianshan, NW China Master 2 Inoussa Kéré



Apatites ($\delta^{18}\text{O} = 5.29 \pm 0.3\text{‰}$)

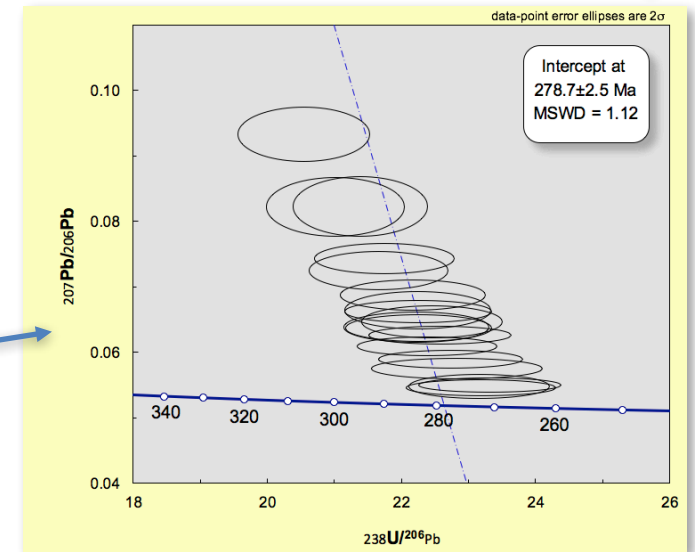
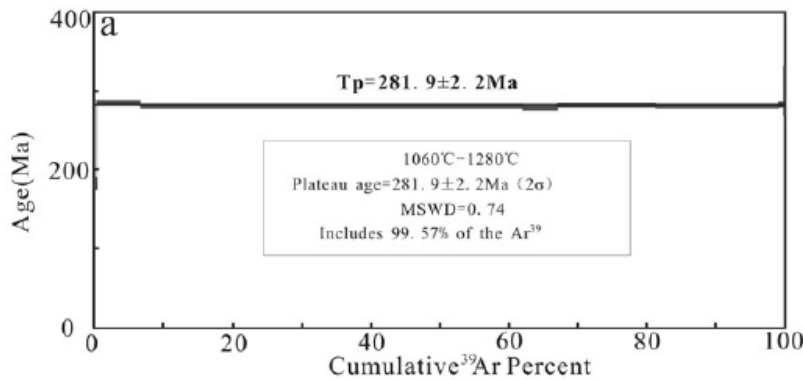
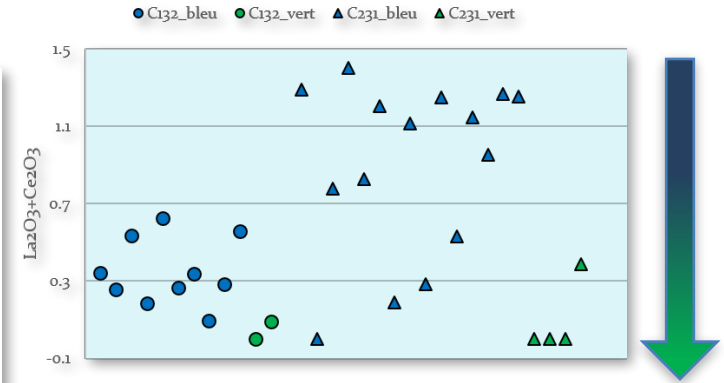
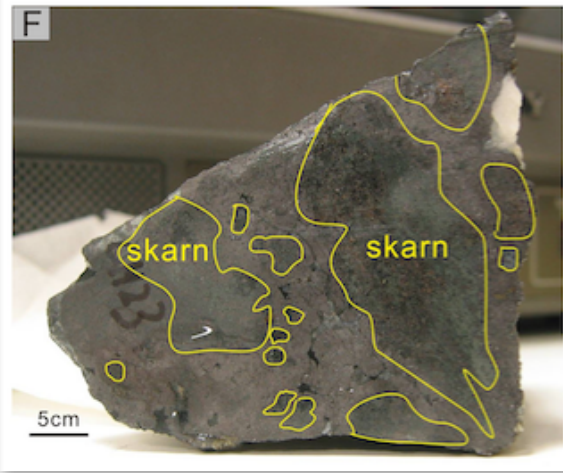


→ Température = 900°C

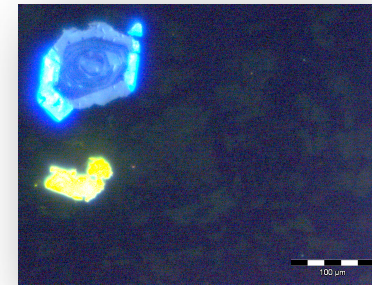
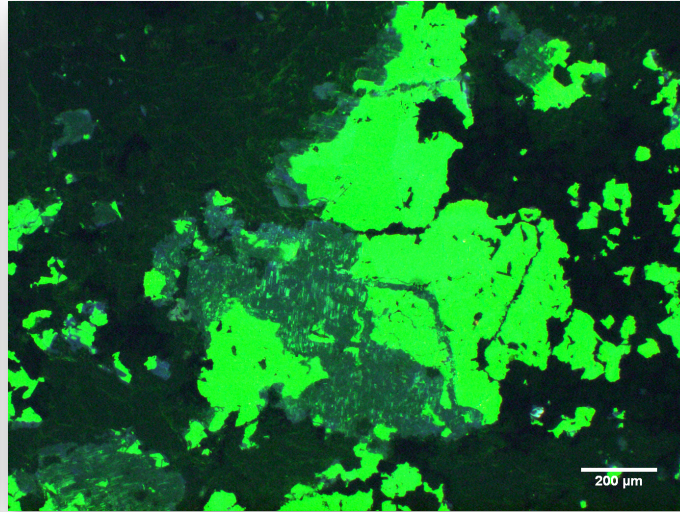


Cihai skarn-related magnetite deposit, Eastern Tianshan, NW China

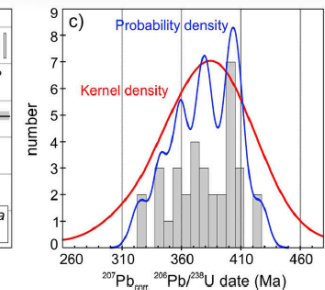
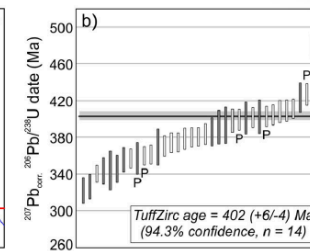
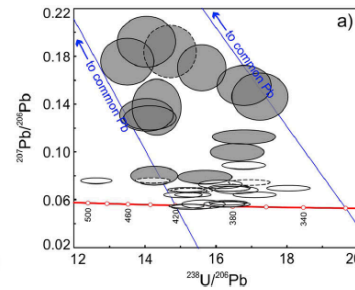
Master 2 Inoussa Kéré



Grès Armoricaïn : Sulfures massifs St Aubin des Châteaux (M2 Inoussa Kéré)



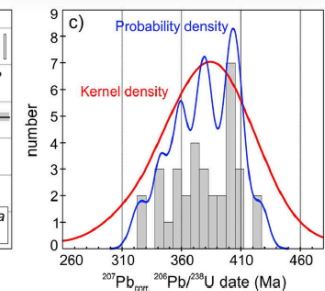
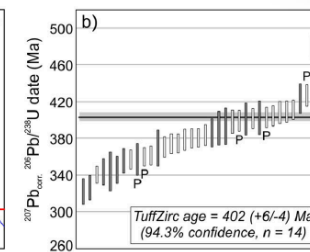
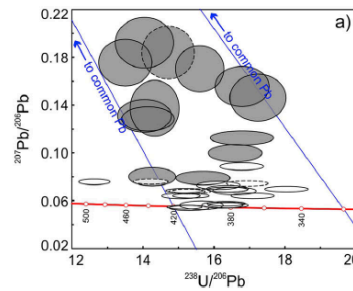
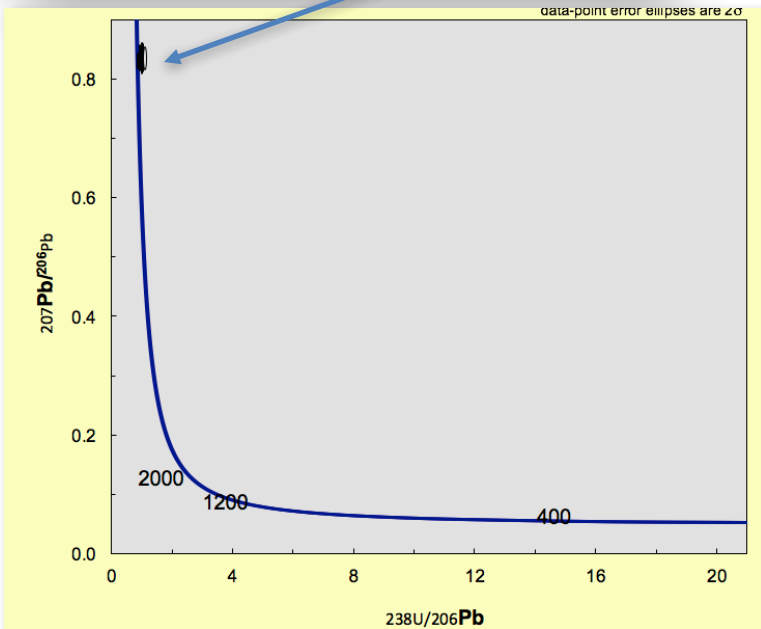
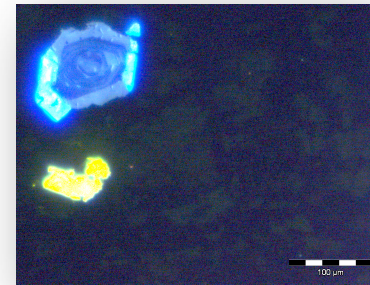
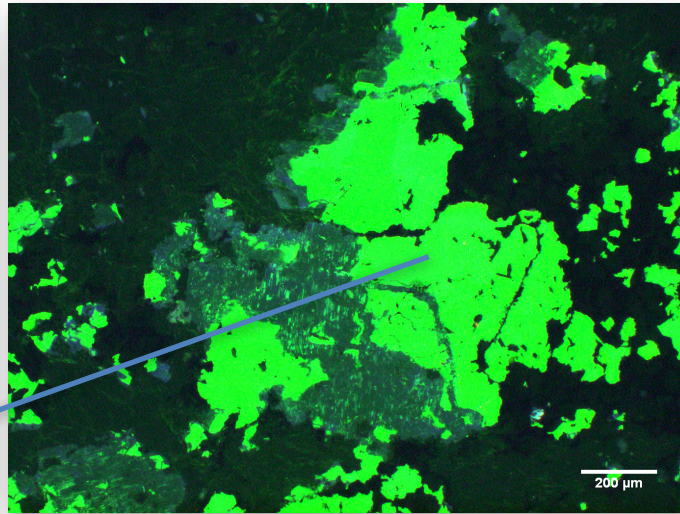
	Diagenesis	Pre-ore stage metamorphic?	Stage 1 Massive sulphidation	Stage 2 Polymetallic stage	Stage 3 Gold-Sulfosalts stage	Stage 4 Late carbonate stage
Mineral		Si-Al-Fe	As	Cu-Zn	Pb-Sb-Au	FeS-carbonates
Sulphides and sulfosalts	Arsenopyrite		█			
	Pyrite		█	█		
	Marcasite		█			
	Pyrrhotite			█		
	Chalcopyrite			█	█	
	Sphalerite				█	
	Galena				█	█
	Boulangerite					█
	Bournonite					█
Tetrahedrite					█	
Phosphates ^c	Lulzacite			█		
	Goyazite				█	
	Pretulite			█		
	Xenotime-(Y) ^d					█
	Monazite-(Ce) ^d					█



Tartèse et al., 2015 : *Min. Petrol.*

Gloaguen et al., 2007, *Miner Deposita*

Grès Armoricaïn : Sulfures massifs St Aubin des Châteaux (M2 Inoussa Kéré)



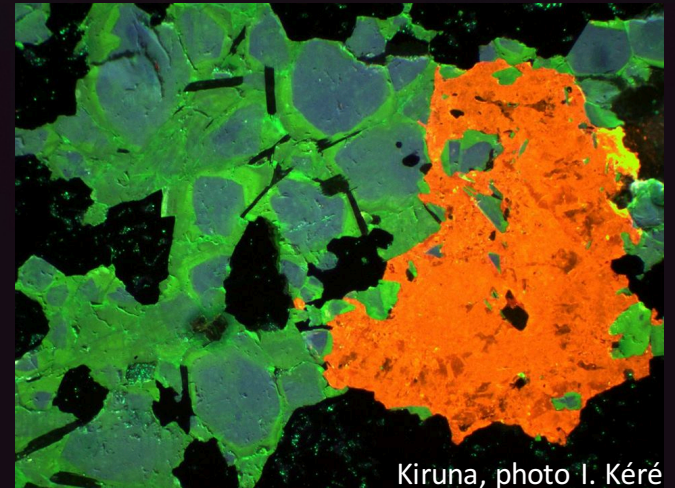
Tartèse et al., 2015 : *Min. Petrol.*

Apatite permet de :

1. Connaître l'âge de mise en place (et/ou altération)
2. Connaître l'âge d'exhumation
3. Voir l'évolution de la composition chimique des fluides
4. Etudier ces fluides (inclusions)
5. Connaître la température des fluides
6. Ne marche pas toujours → Pourquoi?



*Apatite. What else?**



Kiruna, photo I. Kéré

Merci