

Juin 2019

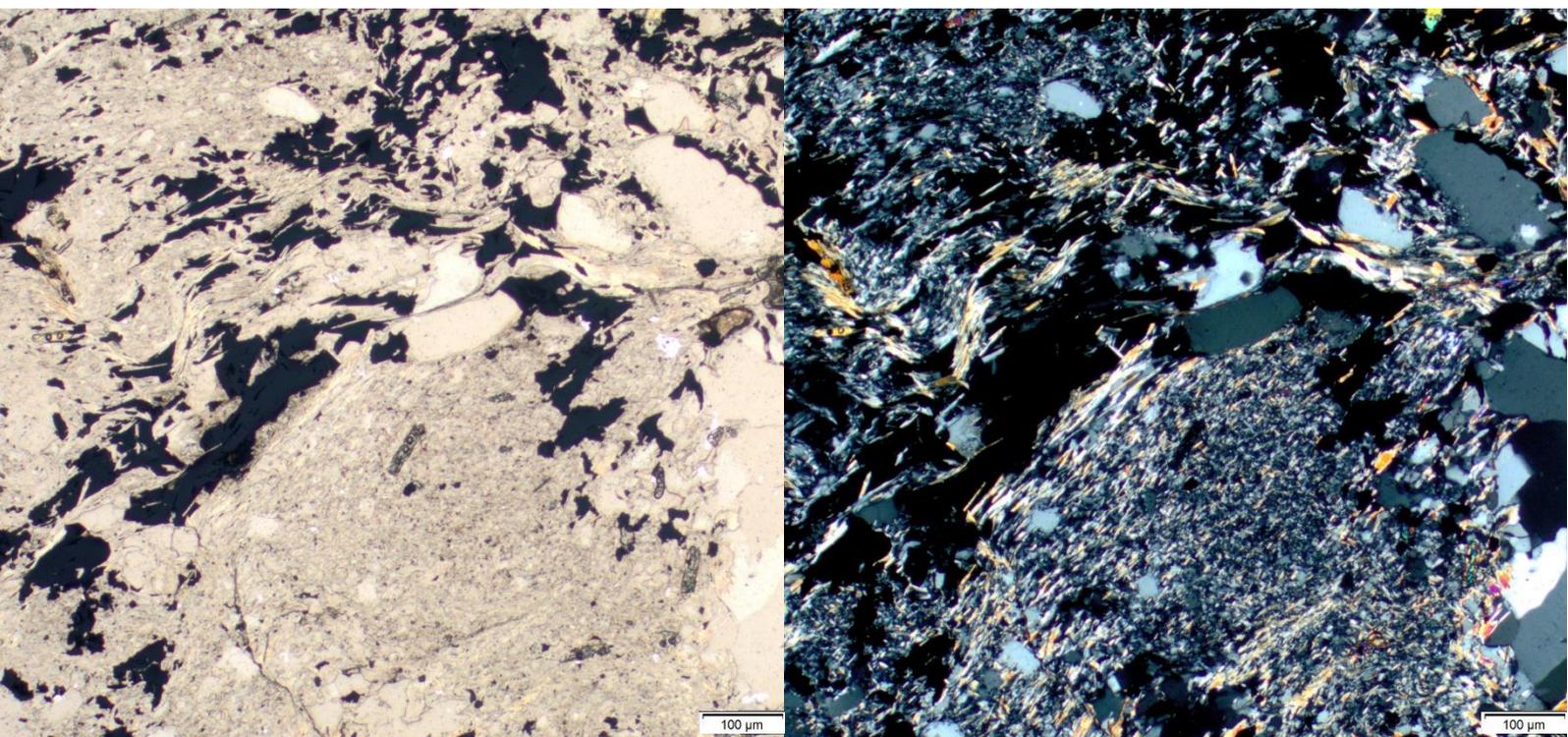
BERTAUTS Maxime

Master 2 - Géoressource



Les minéralisations Pb-Ag dans les Alpes du Nord (France)

Mémoire de recherche



Tuteurs : Emilie Janots¹, Magali Rossi², Laurent Truche¹

Encadrant RGF-BRGM : Isabelle Duhamel-Achin³

Membres du jury : Yann Rolland^{1,2} (rapporteur), Laurent Truche¹ (responsable Master géoressources).

¹ Institut des Sciences de la Terre (ISTerre-UMR CNRS/UJF 5275) Maison des Géosciences 1381, Rue de la Piscine, 38610 Gières.

² Laboratoire EDYTEM, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS-UMR5204, Campus Scientifique, 73376 Le Bourget du Lac, France.

³ Référentiel Géologique de la France, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Direction des Géoressources, 3 avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 02



Master Sciences de la Terre et de l'Environnement

Attestation de non plagiat

Je soussigné(e) (Prénom NOM)

Maxime BERTAUTS.....

Auteur du mémoire (Titre)

Les minéralisations Pb-Ag dans les Alpes du Nord (France).....

Déclare sur l'honneur que ce mémoire est le fruit d'un travail personnel et que je n'ai ni contrefait, ni falsifié, ni copié tout ou partie de l'œuvre d'autrui afin de la faire passer pour la mienne.

Toutes les sources d'information utilisées et les citations d'auteur ont été mentionnées conformément aux usages en vigueur.

Je suis conscient(e) que le fait de ne pas citer une source ou de ne pas la citer clairement et complètement est constitutif de plagiat, et que le plagiat est considéré comme une faute grave au sein de l'Université, pouvant être sévèrement sanctionnée par la loi.

Fait à Saint-Martin-d'hères.....,

Le 27/05/2019.....

Signature de l'étudiant(e)

A photograph of a document showing the name 'Maxime BERTAUTS' printed in a bold, black, sans-serif font. Below the name is a handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'M' and 'B' followed by a long horizontal stroke.

Résumé

Les gisements Pb-Ag de Macôt-La Plagne et de Peisey-Nancroix (Savoie, Alpes du Nord) ont été échantillonnés en vue de leur datation. Les études pétrographiques aux microscopes optique et électronique, ont mis en évidence une paragenèse complexe et polyphasée avec une minéralisation portée par la galène (Pb-Ag), le cuivre gris (pôle tétraédrite), la sphalérite, la chalcopryrite, la cobaltite et la pyrite. Les échantillons contiennent des grains de monazite, dont la cristallisation peut être datée en utilisant le géochronomètre U-Th-Pb. Celui-ci est très robuste pour dater les circulations de fluides, mais son application aux gisements plombifères reste à explorer. Dans les échantillons de Peisey-Nancroix, la monazite est zonée avec un cœur de monazite(-Nd) et une bordure de monazite(-Ce). Leurs compositions sont anormalement enrichies en Eu et U. Leurs datations isotopiques *in-situ* au LA-ICP-MS ont permis de dater la minéralisation à 35 ± 1 Ma. Dans les échantillons de Macôt-La Plagne, l'identification au microscope électronique des grains de monazite est rendue compliquée par la présence de barytine dans la gangue. Les grains de monazite identifiés sont homogènes et leurs tailles sont proches de 10 μm augmentant l'imprécision de la datation *in-situ* au LA-ICP-MS avec une datation de la minéralisation de 35 ± 3 Ma. La datation *in-situ* à l'EPMA des différents pulses à partir des zonations des grains de monazite reste difficile notamment du fait d'importantes contaminations en Pb commun (qui ne peuvent être corrigées sans contrôle isotopique) et leur petite taille. Des âges autour de 35 Ma ont tout de même pu être calculés dans le cœur des grains de monazite de Peisey-Nancroix grâce aux concentrations importantes en U et Th. L'âge des minéralisations à 35 Ma correspondrait à l'orogénèse alpine et la mise en place du front Pennique par empilement et déformation des nappes sédimentaires des Alpes internes vers l'Ouest. Ce contexte géodynamique aurait eu pour conséquence d'engendrer une augmentation des conditions P-T (faciès schiste vert) de l'encaissant sédimentaire permo-triasique, et favoriserait une mobilisation importante des fluides au sein du paléo-bassin permo-triasique. Ces fluides, après lessivage de l'encaissant, et enrichissement en Pb ont déposé les minéralisations.

Abstract

Macôt-La Plagne and Peisey-Nancroix (Savoie, North Alps) Pb-Ag ore deposits have been sampled for dating. Petrographical studies with optical and electronic microscopes showed a complex polyphased ore deposit. Mineralization is carried out by galena (Pb-Ag), tetrahedrite, sphalerite, chalcopryrite, cobaltite and pyrite. Monazite crystals was observed in the samples, which can be dated using the U-Th-Pb geochronometer which is a robust method to date fluid circulation, but that need to be tested to date Pb deposits. In the Peisey-Nancroix samples, monazite is zoned with a core of monazite(-Nd) and an edge of monazite(-Ce). Their

compositions are abnormally enriched in Eu and U. LA-ICP-MS *in-situ* isotopic dating provided a mineralization age of 35 ± 1 Ma. In the Macôt-La Plagne samples, electronic microscope identification of monazite is complicated due to the presence of barite. Monazite grains are homogeneous, but their small size (close to $10 \mu\text{m}$), which decreased the LA-ICP-MS dating accuracy, provided a mineralization age of 35 ± 3 Ma. The *in-situ* dating of different fluids circulations from monazite zonation with EPMA method is complicated due to significant common Pb contamination (which could not be corrected without an isotopic control) and their small size. Ages around 35 Ma have been calculated for the core of the Peisey-Nancroix monazites thanks to their high U and Th contents. A mineralization age of 35 Ma is consistent with the alpine compression and the westward displacement of the Penninic front by stacking and deformation of the internal sedimentary pile. This tectonic context is assumed to have generated a P-T increase (greenschist facies) in the Permo-triassic sediment and that would have promoted an important fluid and metal mobilization in this paleo-basin driving up the deposition of the ore deposits.

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier chaleureusement Émilie Janots pour son aide capitale durant mon stage et sans qui tout ceci n'aurait pas été possible. Je voudrais aussi remercier Laurent Truche et Magali Rossi pour leurs conseils précieux, leurs relectures et leurs soutiens tout au long de mon stage. Un remerciement spécial à Isabelle Duhamel Achin et à toute sa famille pour leurs accueils chaleureux et des plus agréables durant ma semaine à Orléans. Et qui en plus de tout ça a pris un temps énorme pour que mon stage se déroule dans les meilleures conditions, je lui en suis très reconnaissant. Je voudrais aussi remercier Philippe Lach, Blandine Gourcerol et toute l'équipe du BRGM d'Orléans pour leurs accueils et le temps qu'ils m'ont accordé. Je remercie également Valérie Magnin et Nathaniel Findling pour tout le temps qu'ils m'ont consacré afin de réaliser mon stage en finissant à point d'heure même pendant les jours fériés !

Je souhaite aussi remercier mes collègues et amis d'ISTerre, Ahmed, Benjamin et Arnaud pour leurs bonnes humeurs communicatives pendant ces 6 mois de stages. Un grand merci à Élisabeth pour son soutien indéfectible dans la vie de tous les jours.

Sommaire

Résumé.....	3
Abstract.....	3
Remerciement.....	5
Introduction	7
I. Contexte géologique et minier de la zone d'étude	10
II. Méthodologie analytique.....	13
1. Microscopie optique.....	13
2. Microscope électronique à balayage (MEB), <i>en partenariat avec Nathaniel Findling (ISTerre)</i>	13
3. Analyses chimiques ponctuelles <i>in situ</i> des minéraux à la Microsonde électronique (EPMA), <i>en partenariat avec Valérie Magnin (ISTerre)</i>	14
4. Datation isotopique par Ablation Laser et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (LA-ICP-MS), en partenariat avec Philippe Lach (BRGM).....	14
III. Résultats.....	15
A. Description texturale et minéralogique.....	15
1. Étude pétrologique de l'échantillon de Pesey (PN16-RO5a).....	15
2. Prospection de monazite dans les échantillons de Macôt-La Plagne.....	19
B. Datation des monazites.....	21
1. Datation U-Th-Pb sur monazite au LA-ICP-MS.....	21
2. Datation U-Th-Pb sur monazite à la microsonde électronique.....	25
IV. Interprétation et discussion.....	27
1. Séquences paragéométriques	27
2. Évaluation de la datation U-Th-Pb sur monazite de gisements plombifères.....	29
3. Corrélations des résultats avec l'histoire géodynamique des Alpes.....	31
V. Conclusion et perspectives.....	32
VI. Bibliographie.....	34
Annexes.....	37

Introduction

Contexte historique de l'activité minière des Alpes françaises

Les Alpes françaises recèlent de nombreux indices et gisements historiques métallifères : fer, plomb, zinc, argent, uranium et or. L'inventaire minier métropolitain, réalisé par le BRGM entre 1975 et 1992, recense près de 250 gisements métalliques dans les Alpes, dont 145 sont situés dans les Alpes du Nord. Les gîtes nord alpins correspondent essentiellement à des concentrations en métaux de base, environ 44% de gîtes à Pb-Zn-Ag et 29% de gisements Fe-Cu (source : portail de données InfoTerre-SIG Mines France). D'après Béziat and Bornuat, 1995, les gisements de Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix (Savoie) sont les deux plus importants gisements des Alpes du Nord en termes d'importance économique. Notre étude se concentrera donc sur ces deux gisements.

Les travaux de recherche académique en métallogénie et gîtologie sur les minéralisations Pb-Zn-Ag des Alpes remontent majoritairement aux années 60 et 70 (Chabert, 1974; Ochoa Alencastre, 1979; Rogel, 1961) avec encore quelques rares études jusque dans les années 90 (Laroussi, 1990). Le désintérêt de ces minéralisations résulte plus particulièrement de la difficulté d'exploitation en altitude, de la baisse du prix des métaux et des faibles ressources de ces gisements comparativement aux gisements de classe mondiale à forts tonnages découverts à l'étranger, notamment les gisements de type Mississippi Valley (MVT) dans le Missouri aux États-Unis, les gisements de l'Altiplano au Mexique, ceux de Broken Hill et Mount Isa en Australie, ou la mine Sullivan de Kimberley au Canada.

Les concentrations Pb-Zn-Ag des Alpes françaises se présentent en couches, amas ou filons, encaissés dans des sédiments de couverture de la plateforme épihercynienne, réactivée et plissée lors de l'orogénèse alpine (Rapport BRGM RR-41430, 1977). Ces concentrations métalliques seraient en relation avec les paléoreliefs du socle hercynien (contrôle paléogéographique). Les sédiments encaissants sont des dépôts de faible profondeur d'eau ou des dépôts laguno-deltaïques et les minéralisations sont généralement associées au niveau de dépôts détritiques plus grossiers ou argilo-carbonatés, voire en remplissage de cavités karstiques.

Problématique et objectifs de l'étude

Les études scientifiques antérieures de ces minéralisations ont porté essentiellement sur des analyses de pétrologie descriptive, des études minéralogiques sommaires et une cartographie géologique et structurale. Les modèles métallogéniques et gîtologiques anciens suggèrent l'existence de minéralisations Pb-Ag formées soit lors de la collision alpine pour le gisement de Macôt-La Plagne (Raguin, 1938) soit lors de l'ouverture de l'océan Téthys pour les

gisements de Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix (Rogel, 1961). Dans sa thèse sur le gisement du Rocheray, Ochoa Alencastre en 1979 propose une mise en place de la minéralisation Varisque, reprise lors de l'ouverture de l'océan Téthys, puis lors de l'orogénèse alpine.

Dans le cadre du programme de recherche scientifique du Référentiel Géologique de la France (RGF, BRGM), et plus particulièrement du chantier Alpes qui vise à approfondir les connaissances géologiques fondamentales sur cette chaîne de montagnes, il apparaît important d'apporter une nouvelle expertise métallogénique et géochronologique à l'aide des techniques modernes analytiques afin de mieux contraindre le modèle de mise en place de ces minéralisations métalliques qui sont représentatives de la typologie de gîtes majoritaire dans cette région.

La datation de minéralisations hydrothermales est un défi technique et scientifique, car leur formation s'effectue en milieu ouvert et elles sont souvent polyphasées, avec des événements de dépôt successifs qui peuvent oblitérer les signatures minéralogiques, géochimiques et isotopiques des événements plus anciens. Les minéraux associés à ces minéralisations métalliques peuvent subir une remise à zéro partielle ou totale de leurs systèmes isotopiques et les paragenèses minérales successives sont souvent complexes à interpréter, car les phases se surimposent ou sont inter-croissantes les unes avec les autres. Cependant, différentes méthodes d'analyse ont été développées pour dater ce type de minéralisations comme la datation U-Th-Pb sur calcite dans les Alpes (Ring and Gerdes, 2016) ou sur les minéraux de terres rares (monazite, allanite, xénotime) ; (Suzuki *et al.*, 1991 ; Janots and Rubatto, 2014), mais aussi la datation Re-Os sur sulfures (pyrite et sphalérite) appliquée sur les gisements Pb-Zn-Ag (Morelli *et al.*, 2004).

Les méthodes de datations U-Th-Pb de monazite in-situ par ablation laser et spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (LA-ICP-MS) ont été testées sur des veines non-métalliques des Alpes et ont permis de mettre en évidence les différentes circulations de fluides associées aux événements géodynamiques. L'étude poussée de monazites en provenance de différentes veines alpines démontre l'efficacité de la datation sur monazite dans des veines ayant subi plusieurs épisodes de circulations de fluides ou de déformation (Grand'Homme *et al.*, 2016).

La monazite est un minéral accessoire ubiquiste dans les roches de type granitoïde et métasédimentaire. Ce minéral présente l'avantage de pouvoir enregistrer plusieurs épisodes de croissance que l'on peut contrôler texturalement et chimiquement (zonation) ou isotopiquement grâce aux trois séries de désintégration du système U-Th-Pb ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$). Enfin la datation de gisements Pb-Ag (Rossi *et al.*, 2016), ou de

systèmes porphyriques (Kempe *et al.*, 2008) à l'aide de monazite hydrothermale suggère que cette méthode est pleine de promesses pour obtenir l'âge des minéralisations. Une question importante concerne toutefois les potentielles perturbations du géochronomètre U-Th-Pb dans des gisements plombifères. Dans les veines alpines non métallifères, la puissance de la datation in-situ U-Th-Pb de monazite hydrothermale est que les cristaux millimétriques contiennent des teneurs élevées en Th (et U) et des concentrations négligeables de Pb commun. Ces conditions permettent de dater différents domaines d'un seul grain avec une résolution $< 0,2$ Ma et de pouvoir différencier des épisodes de cristallisation séparés par moins d'1 Ma (Janots *et al.*, 2012), même sans correction du Pb commun sur le système $^{208}\text{Pb} / ^{232}\text{Th}$ en considérant tout le Pb mesuré comme radiogénique (Grand'Homme *et al.*, 2016). Dans les gisements plombifères, les datations (U-Pb ou Th-Pb) pourraient être perturbées par l'intégration du Pb du fluide minéralisateur (Pb commun), dans la structure ou sous forme d'inclusion (e.g. galène) dans la monazite. Ainsi, dans un échantillon de Peisey-Nancroix, une étude préliminaire de datation sur des grains de monazite à la microsonde électronique indique une dispersion importante des âges de 40 à 911 Ma (Dembélé, 2018) pouvant être interprétée soit comme la présence de plusieurs phases de cristallisations, soit par de la contamination au Pb.

Notre étude vise à explorer le potentiel des datations U-Th-Pb sur monazite dans des échantillons des gisements de Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix. Nous avons repris l'échantillon (PN16-RO5a) de Dembélé (2018) pour déterminer pétrologiquement et géochronologiquement les épisodes de cristallisations de la monazite vis-à-vis des minéralisations. Dans les échantillons de Macôt-la Plagne (8 lames), nous avons fait la prospection des monazites en vue de leurs datations. Pour les deux gisements, les principaux objectifs ont consisté à :

- 1) réaliser une étude pétrographique et physico-chimique détaillée en microscopies optique et électronique de quelques échantillons minéralisés sélectionnés, afin de déterminer la paragenèse des assemblages minéralogiques et de situer les épisodes de dépôt et de remobilisation des minéralisations métalliques les uns par rapport aux autres (chronologie relative) ;
- 2) déterminer les âges sur monazite par des méthodes de pointe de datations in situ par analyses élémentaires à la microsonde électronique (EPMA) et isotopiques au LA-ICP-MS (chronologie absolue) ;
- 3) corrélérer ces résultats avec l'histoire géologique des Alpes (interprétation du modèle génétique en lien avec la géodynamique).

I. Contexte géologique et minier de la zone d'étude

Dans ce travail de recherche, deux gisements Pb-Zn-Ag ont été étudiés : les gisements de Peisey-Nancroix et Macôt-La Plagne (Tableau 1).

Contexte Géologique

La formation des Alpes résulte de la fermeture de l'océan Téthys (du Crétacé à l'Eocène) et de la collision des plaques Eurasie et Apulo-Afrique (de l'Eocène supérieur à l'Oligocène). D'Ouest en Est, les principales unités structurales sont (Fig. 1) : le domaine externe composé du socle pré-alpin (Massifs cristallins externes) et de sa couverture sédimentaire mésozoïque

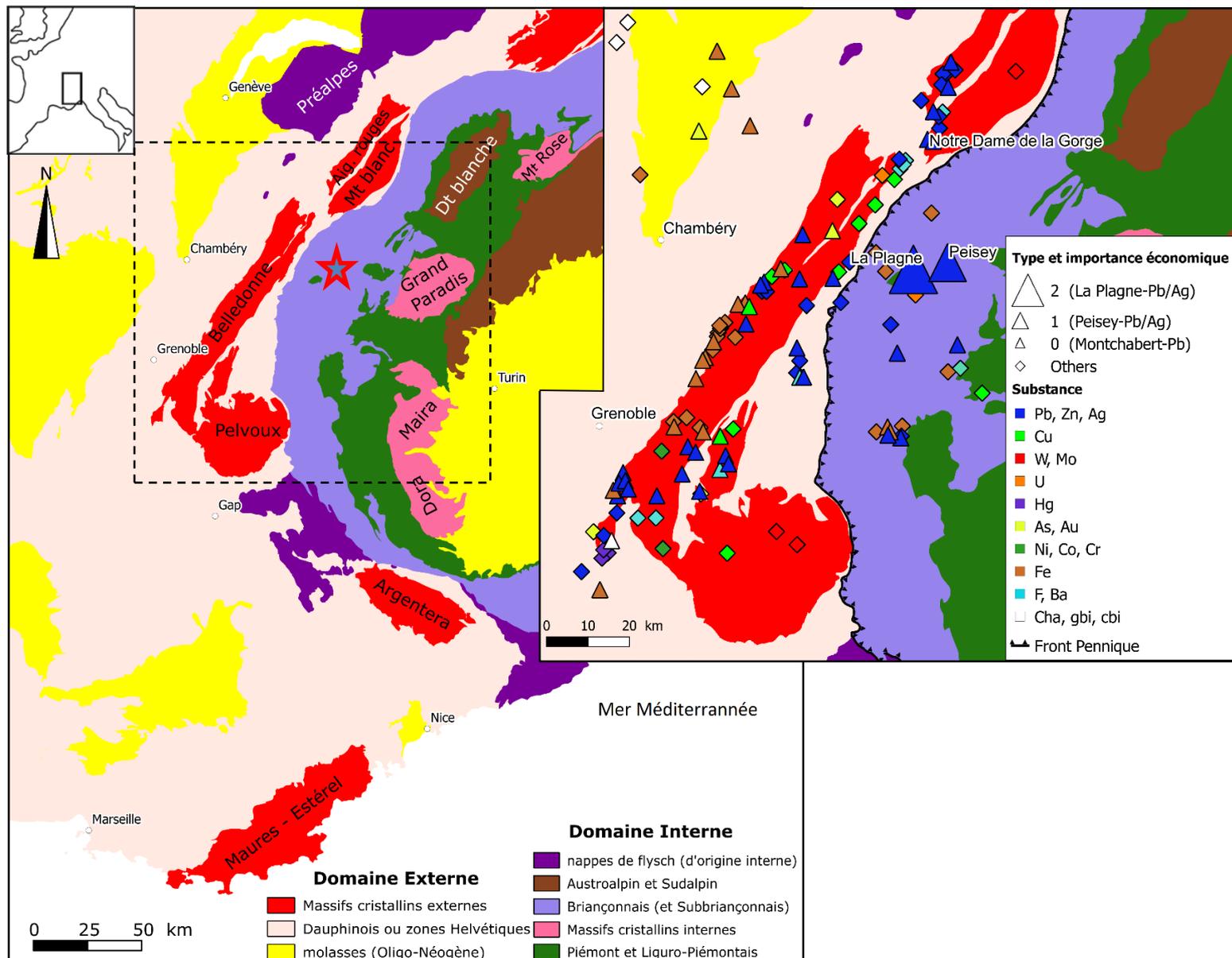


Figure 1: Carte des grands ensembles géologiques et domaines structuraux des Alpes occidentales (d'après Gasquet et Rossi, 2013). L'étoile rouge indique la localisation du district minier de La Plagne-Peisey et l'encadré en tirets noirs correspond à la délimitation de la carte de localisation des minéralisations présentée en médaillon à droite d'après l'inventaire minier du BRGM (sources : SIG Mines France et InfoTerre). Les deux sites étudiés - La Plagne et Peisey sont symbolisés par des triangles bleus (gisements Pb-Zn-Ag).

à cénozoïque (Dauphinois, zones Hélvétiques et molasses), séparé de la zone interne par le front Pennique et composé des unités Penniques inférieures (zone Briançonnaise et sub-Briançonnaise (océan Valaisan)), des unités Penniques supérieures (Massifs cristallins internes, les nappes de Flyschs, les unités liguro-piémontaises (« schistes lustrés »), et les unités Austro-Alpines) (Schmid *et al.*, 2004). Les unités du domaine interne ont subi un raccourcissement important (majoritairement ONO/ESE) formant un prisme d'accrétion par empilement des nappes.

Les deux gisements sur lesquels a porté l'étude, Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix, se situent dans la zone Briançonnaise du domaine interne (Fig. 1), et plus précisément dans la zone Houillère. La nappe de la zone Houillère chevauche les sédiments de la zone Valaisane (unité en contact avec le front Pennique). La zone Houillère est composée d'une couverture sédimentaire Permo-Triasique et du socle Briançonnais pouvant atteindre près de 3000 mètres d'épaisseur cumulés localement (Rogel, 1961). Les assemblages minéralogiques de cette zone sont essentiellement composés de quartz, micas blancs, avec des variations de compositions de chloritoïdes, et des grenats. Plus spécifiquement, au niveau du district minier de Macôt-La Plagne – Peisey-Nancroix, le métamorphisme est de faciès schiste vert de haute pression : 0,6-1 GPa et 250-475°C (Bousquet *et al.*, 2008).

Contexte minier

Tableau 1 Données historiques sur les 2 gisements étudiés : Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix (sources : SIG Mines France BRGM et Rapport BRGM RR-41430).

Gisement	Macôt-La Plagne	Peisey-Nancroix
Coordonnées (Système : Lambert 2 étendu)	X : 939165 Y : 2066356	X : 947160 Y : 2068376
Altitude moyenne	1850 m	1320 m
Statut	Ancienne exploitation minière Fin d'exploitation en 1973 (SMMP* puis MetalEurop)	Ancienne exploitation artisanale, gisement abandonné
Production historique	125 600 t Pb métal (teneur 3.7 pc) 360 t Ag en co-produit	22 000 t Pb métal 53 t Ag en co-produit
Classification de la taille du gîte**	2	1
Gîtologie	Gîte sédimentaire de couverture, Gisements syn-orogéniques à tardi-orogéniques atypiques	Gîte sédimentaire de couverture stratoïde dans des grès et +/- dolomites : F, Ba, (Pb, Zn)
Typologie du minerai	Sulfures et Carbonates ; minerai massif à sub-massif	Sulfures massifs à sub-massifs
Morphologie	Amas stratoïde, lentilles, pods concordants à sub-concordants	Amas et lentilles stratiformes (syn-encaissant)
Encaissant	Quartzite, Cargneules, Schiste	Quartzite
Âge	Permo-Trias	Permo-Trias

*SMMP : Société Minière et Métallurgique de Peñarroya.

** Classement des gisements par taille économique (d'après Béziat P. *et al.*, 1995) : tonnage cumulé et ressources connues pour les gisements de Pb-Zn en classe 0 < 20 kt métal - classe 1 entre 20 et 100 kt métal - classe 2 entre 100 et 400 kt métal - classe 3 >400kt métal.

Peisey-Nancroix se trouve au contact des schistes du Permien et des sables et quartzites du Trias. La vallée de Peisey-Nancroix est recoupée perpendiculairement par un pli couché de grande amplitude, une structure synclinale considérée d'âge permo-triasique, qui se poursuit 6 km au sud-ouest jusqu'au gisement de Macôt-La Plagne (commune de Macôt). La minéralisation sur ces deux gisements se présente en veines à galène, parallèles à la stratification dans les schistes, et en bancs de large épaisseur atteignant parfois près de trente mètres de puissance localement. La galène argentifère est soit massive, soit disséminée à grains fins dans une gangue de quartz ou de barytine.

La première exploitation de la mine de Macôt-La Plagne remonte à l'antiquité romaine alors que celle de Peisey-Nancroix semble être plus récente (1644). Les 2 mines furent oubliées puis reprisent au début du XVIII^{ème} siècle pour Peisey-Nancroix et début XIX^{ème} pour Macôt-La Plagne (Gimard and Gimard, 1985). La mine de Peisey-Nancroix connaît un déclin définitif vers la fin du XIX^{ème} siècle alors que la mine de Macôt-La Plagne connaît son apogée au milieu du XX^{ème} siècle avant de fermer définitivement en 1973. Au cours du XX^{ème} siècle, la production totale de minerai pour Macôt-La Plagne s'élève à 125 600 tonnes de plomb et 360 tonnes d'argent pour une teneur moyenne de plomb d'environ 3,7% et de 0,015% d'argent (Rapport BRGM RR-41430-FR, 1977; Gimard and Gimard, 1986; Rogel, 1961). Quant à Peisey-Nancroix, la production a été de 22 000 tonnes de plomb et 53 tonnes d'argent (Tab. 1).

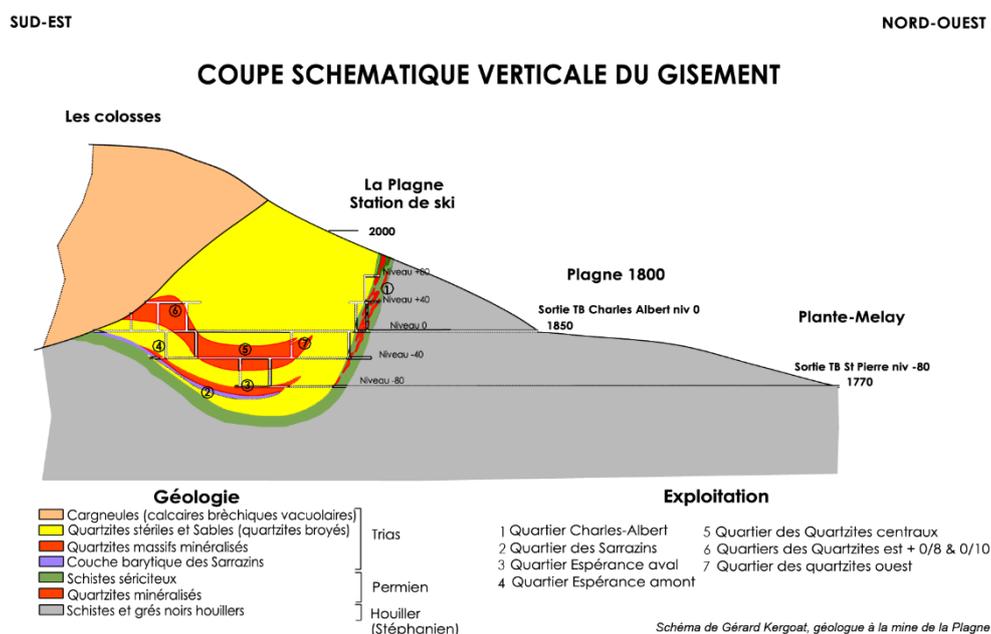


Figure 2: Coupe schématique SE-NO du gisement de Macôt-La Plagne (Schéma de Gérard Kergoat, géologue de la mine de la Macôt-Plagne).

Le gisement de Macôt-La Plagne se situe dans un synclinal dissymétrique d'axe NNE/SSO plissant les filons interstratifiés dans les niveaux de quartzites et schistes (plus ou moins mylonitisés) (Fig. 2). On distingue trois zones minéralisées principales : le filon *Charles Albert*

dans le Permien, le filon *Espérance* et *Sarrazins* dans la moitié inférieure du Trias et les *Amas* des quartzites dans la partie supérieure du Trias (Rapport BRGM RR-41430-FR, 1977). Les filons tels que ceux d'*Espérance* et des *Sarrazins* ont une puissance de l'ordre de 2 à 3 mètres d'épaisseur et sont situés plutôt dans les strates les plus âgées du synclinal dans les quartzites et sables triasiques. Le filon discontinu *Charles-Albert* se présente en plusieurs lentilles concordantes dans les schistes sériciteux Permien, à proximité du contact Permien-Trias (Rogel, 1961). Les 4 échantillons étudiés proviennent de la collection Ranguin 1935 de la lithothèque du BRGM : 3501-4 (filon 0/8 quartier des Quartzites Est), 3501-5 (quartier des Sarrazins), 3501-9 (filon 0/10 Sud quartier des Quartzites Est) et 3501-10 (Quartier des Sarrazins) (Annexe B2).

Le gisement de Peisey-Nancroix est encaissé dans les étages néo-Permien et les quartzites Triasiques représentant une épaisseur d'une trentaine de mètres chacun. Les quartzites de Peisey-Nancroix présentent le même faciès laminé et biseauté par la mise en place des nappes sus-jacentes que ceux de Macôt-La Plagne. Le gisement est stratiforme et les filons pouvaient atteindre de 6 à 8 mètres de puissance (Rogel, 1961 ; Tachat, 1861). Un seul échantillon (PN16-RO5a) a été étudié pour le gisement de Peisey-Nancroix, prélevé sur une halde de stériles, mais contenant des sulfures résiduels et des monazites (Dembélé, 2018).

II. Méthodologie analytique

1. Microscopie optique.

Les observations pétrographiques ont été réalisées sur lames minces polies à l'aide du microscope optique Olympus Cover – 018 BH2 du laboratoire ISTerre. Ces observations ont permis d'identifier les phases majeures de l'encaissant et les minéraux porteurs des minéralisations métalliques, d'étudier les microstructures et d'établir une première séquence paragenétique. Les phases accessoires (monazite) ont été repérées, notamment en vue de leurs datations isotopiques. Les images ont été capturées à l'aide d'une caméra Olympus DP25.

2. Microscope électronique à balayage (MEB), en partenariat avec Nathaniel Findling (ISTerre).

L'étude pétrographique fine a ensuite été réalisée au microscope électronique à balayage (MEB) modèle Tescan Vega 3 à filament de Tungstène du laboratoire ISTerre. Grâce à sa résolution spatiale inférieure au micromètre, le MEB permet de localiser les grains de monazite par imagerie en électrons rétrodiffusés (détecteur BSE de l'anglais « *Back-Scattered Electron* ») et d'affiner les épisodes de croissance (zonation intragranulaire, inclusions, altération) par cartographies élémentaires au spectromètre à dispersion d'énergie (EDS). Les

images capturées en mode électrons rétrodiffusés mettent en évidence les variations de masse atomique associées aux éléments chimiques présents dans le réseau cristallin ; les zones à forts contrastes de brillance reflètent par exemple la présence d'éléments « lourds » au numéro atomique moyen à élevé comme les terres rares. Les analyses semi-quantitatives (sans témoin) ont été réalisées avec un détecteur EDS SDD 30 mm² Rayspec. Pour la prospection des monazites : la tension d'accélération était de 16kV. Pour les cartographies élémentaires des grains de monazite : une tension de 10kV a été appliquée.

3. Analyses chimiques ponctuelles *in situ* des minéraux à la Microsonde électronique (EPMA), en partenariat avec Valérie Magnin (ISTerre).

Les mesures quantitatives (EPMA) ont été réalisées sur une microsonde électronique JEOL JXA-8230 au laboratoire ISTerre avec une taille de spot (1 μm) permettant l'analyse ponctuelle *in situ* dans les différents domaines intragranulaires des grains de monazite. Pour calculer des âges à partir des concentrations en ppm d'U, Th et Pb, on résout l'équation décrite par (Montel *et al.*, 1996). Le calcul et traitement des âges se fait à partir du logiciel NiLeDAM développé sous R (Seydoux-Guillaume *et al.*, 2012; Villa-Vialaneix *et al.*, 2013). Les protocoles de datation des monazites ont été développés par Valérie Magnin (ingénieure ISTerre) à partir du protocole modifié de Scherrer *et al.*, 2000. Une tension d'accélération de 15kV et une intensité de courant de 200nA ont été appliqués pour les analyses ponctuelles. Le temps de mesure pour chaque analyse ponctuelle est d'environ 8 minutes. Les cartographies élémentaires plus fines ont été conduites à l'aide des 5 spectromètres de masses en longueur d'onde dont la microsonde est équipée (WDS de l'anglais « Wavelength Dispersive Spectrometer ») avec une intensité de courant de 100nA.

4. Datation isotopique par Ablation Laser et Spectrométrie de Masse à Plasma à Couplage Inductif (LA-ICP-MS), en partenariat avec Philippe Lach (BRGM).

Les mesures isotopiques U-Th-Pb ont été réalisées au BRGM à Orléans sur un spectromètre de masse ICP-MS X séries II configurée en lentille Xs, et couplée à un système laser Cetac Excite 193nm à courte durée d'impulsion. L'échantillon est placé dans une cellule à deux volumes balayée par un flux d'hélium. Les conditions d'analyses sont résumées dans le Tableau 2. Les analyses ont été standardisées sur la monazite de Trebilcock (272 ± 2 Ma, Tomascak *et al.*, 1996) avec un contrôle qualité sur le standard de Madmon (523 ± 12 Ma, Schulz *et al.*, 2007). La réduction des données est réalisée sur le logiciel Glitter©. Les proportions de ²³⁵U sont recalculées à partir des proportions mesurées de ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²³⁸U et des équations de désintégration. Les calculs d'âges sont effectués à l'aide du logiciel ISOPLOT sur Excel (Ludwig, 2003) avec un taux de confiance de 95% en prenant en compte une marge d'erreur de 2σ . Les concentrations d'U, Th et Pb sont estimées par rapport aux

concentrations du standard Madmon. Une taille de spot de 15 μ m a été choisie afin de maximiser le signal au vu de la taille des monazites. Parfois la taille du faisceau du laser a dû être diminuée à 10 μ m.

Tableau 2: Résumé du protocole d'analyse de monazite au LA-ICP-MS.

Laser		ICP-MS		Paramètres d'acquisitions	
Type	CETAC Excite	Model	X serie II	Isotopes mesurés	²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
Longueur d'onde	193nm	Type	Quadripôle	Temps d'ablation par masse	30ms
Fréquence du laser	3Hz	ICP RF Power	1400W	Background	20s
Fluence	3J.cm ⁻²	Gaz de refroidissement (Ar)	15 l.min ⁻¹	Temps d'acquisition	40s (120 pulses)
Taille de spot	15 et 10 μ m	Gaz porteur (He)	0.15 à 0.3 l.min ⁻¹		
		Gaz auxiliaire (Ar)	1 l.min ⁻¹		

III. Résultats

A. Description texturale et minéralogique.

Toutes les formules structurales des minéraux et les scans des lames cités dans ce rapport se trouvent en annexes A et B.

1. Étude pétrologique de l'échantillon de Pesey (PN16-R05a)

L'échantillon est un quartzite à sulfures semi-massifs avec une zone plus filonienne et massive (scan de la lame Annexe B1). Quartz, mica blanc et dolomite forment la gangue de la minéralisation. Les grains de quartz et de mica blanc sont généralement millimétriques, xénomorphes, contenant de nombreuses micro-inclusions leurs donnant un aspect altéré. D'autres grains sont micrométriques et automorphes et peuvent contenir des inclusions de florencite (un aluminophosphate de terres rares, Fig.3A). La dolomite est zonée avec un cœur de dolomite et une bordure plus riche en fer de dolomite(-Fe) avec des inclusions de florencite. Cette matrice carbonatée est disposée en patchs et est parcourue par de fines veinules de sulfate de plomb. La minéralisation est dominée par la galène. D'autres phases sont présentes dans la minéralisation telles que le cuivre gris (pôle tétraédrite), la chalcopyrite, la pyrite, et un sulfure d'As(-Co-Fe-Ni) qui correspond à une solution solide entre gersdorffite (pôle Ni), cobaltite (pôle Co) et arsénopyrite (pôle Fe). Lorsque l'on observe la minéralisation, on aperçoit des zones sans inclusions et des zones riches en inclusions (poecilitique) de quartz, phengite et florencite. Les zones poecilitiques possèdent aussi localement des inclusions de monazite (Fig. 3A). Les grains de plus petite taille de la gangue (de l'ordre du μ m) peuvent être automorphes pour le mica blanc. De plus, ces micas blancs automorphes sont des phengites en comparaison de ceux de la gangue qui sont majoritairement des muscovites. Une micro-

fracture minéralisée est visible sur la figure 3B. Ces micro-fractures se retrouvent dans toute la lame, mais sont plus nombreuses et importantes dans la zone à matrice carbonatée (dolomite). De plus, ces micro-fractures recoupent toutes les phases décrites précédemment, dont la monazite. Elles sont presque toujours minéralisées par de l'anglésite (un sulfate de plomb).

Les minéraux accessoires sont l'apatite, le zircon, la florencite, la monazite, le xénotime et le rutile. Les monazites sont en baguettes subautomorphes avec une longueur et une largeur pouvant dépasser les 100µm et 20µm respectivement. Elles montrent un cœur homogène entouré d'une bordure avec une texture poecilitique englobant des micro-inclusions de quartz, phengite et florencite (Fig. 3A, B et Annexe B1). Dans l'échantillon (Fig 3A et B), la florencite se présente toujours sous la forme de nano-inclusions sphériques. Similairement à la monazite, le xénotime (Fig. 3C) possède un cœur sans inclusion, fracturé et entouré par une bordure plus claire en BSE, qui elle contient des inclusions de quartz, galène et phengite.

Enfin, un sulfate de plomb (anglésite) est présent en altération autour des galènes ou dans les micro-fractures. Et des oxydes de fer ont été identifiés.

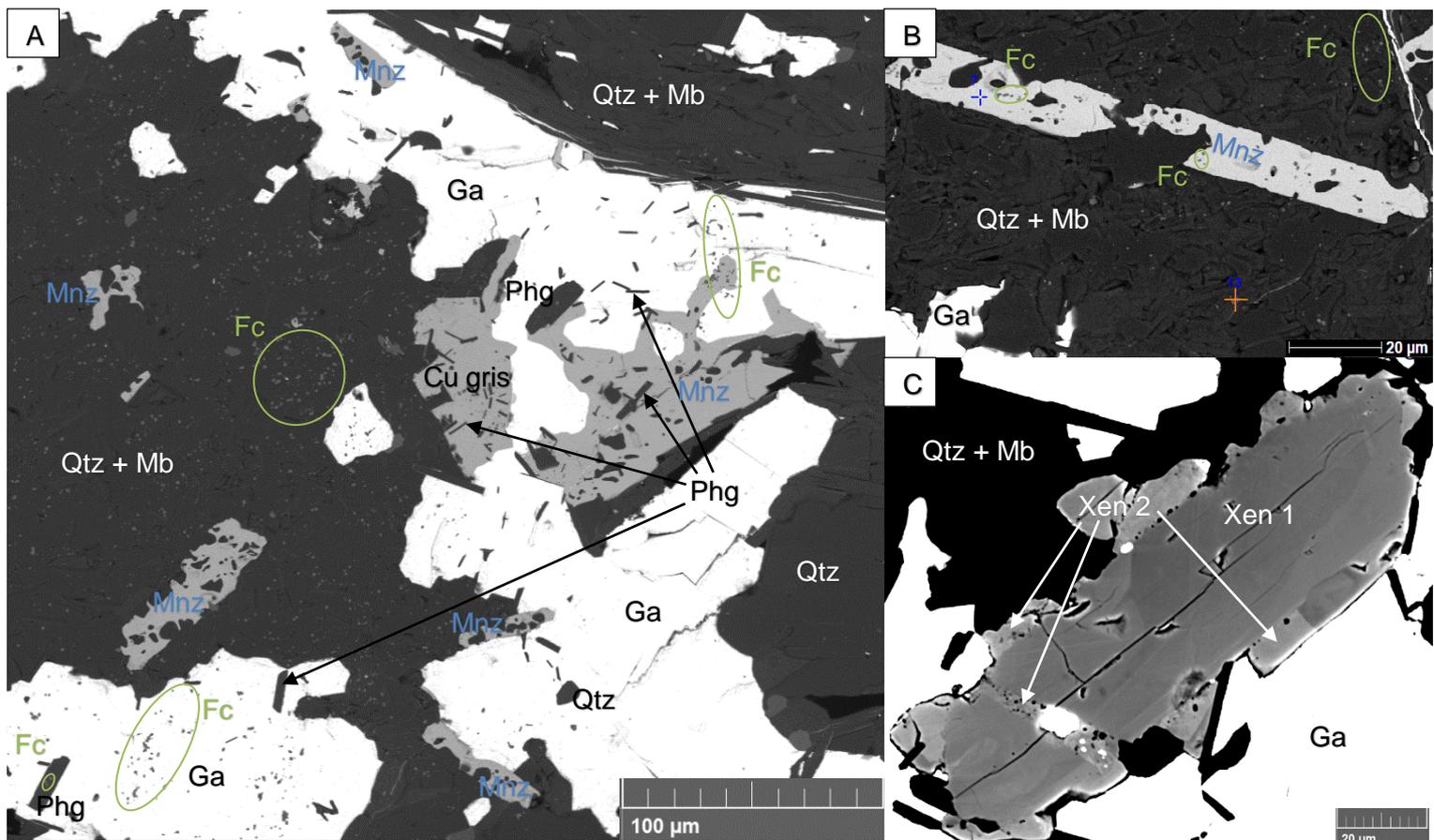


Figure 3: Image MEB au détecteur BSE de la lame PN16-RO5a de Peisey (Savoie) avec A) monazite, cuivre gris et galène en intercroissance, inclusion de florencite dans toutes les phases et matrice à quartz et micas blanc ; B) monazite à inclusion de florencite dans une matrice à quartz et micas blanc et C) xénotime avec présence d'un cœur foncé (Xen 1) et d'une bordure plus claire et avec plus d'inclusions (Xen 2). Cu gris : cuivre gris ; Fc : florencite ; Ga : galène ; Mb : micas blanc (muscovite et phengite) ; Mnz : monazite ; Phg : phengite ; Qtz : quartz ; Xen : xénotime.

Des zonations entre le cœur (Mnz 1) et la bordure (Mnz 2) des monazites sont identifiables sur les cartographies élémentaires (Fig. 4). Le cœur correspond à une monazite-(Nd) où le Nd et les terres rares moyennes, dont l'Eu (Eu proche de 5wt.%) sont anormalement abondantes (Fig. 4e,g et Annexe C). Le cœur de cette monazite est également enrichi en Th, Ca, Si et légèrement en Y (Fig. 4b, f, h, i) et appauvri en terres rares légères (La et Ce, Fig. 4a et c) par rapport à la bordure qui a une composition plus classique de monazite(-Ce). L'enrichissement en Ca, Si, Th et l'appauvrissement en terres rares légères (La et Ce) par rapport à la bordure s'expliquent par une substitution couplée chevkinite (enrichissement en Ca et Th) et une substitution couplée vers le pôle Huttonite (enrichissement en Si et Th). Un fractionnement des terres rares est visible figure 4, avec un enrichissement en terres rares moyennes (Nd,

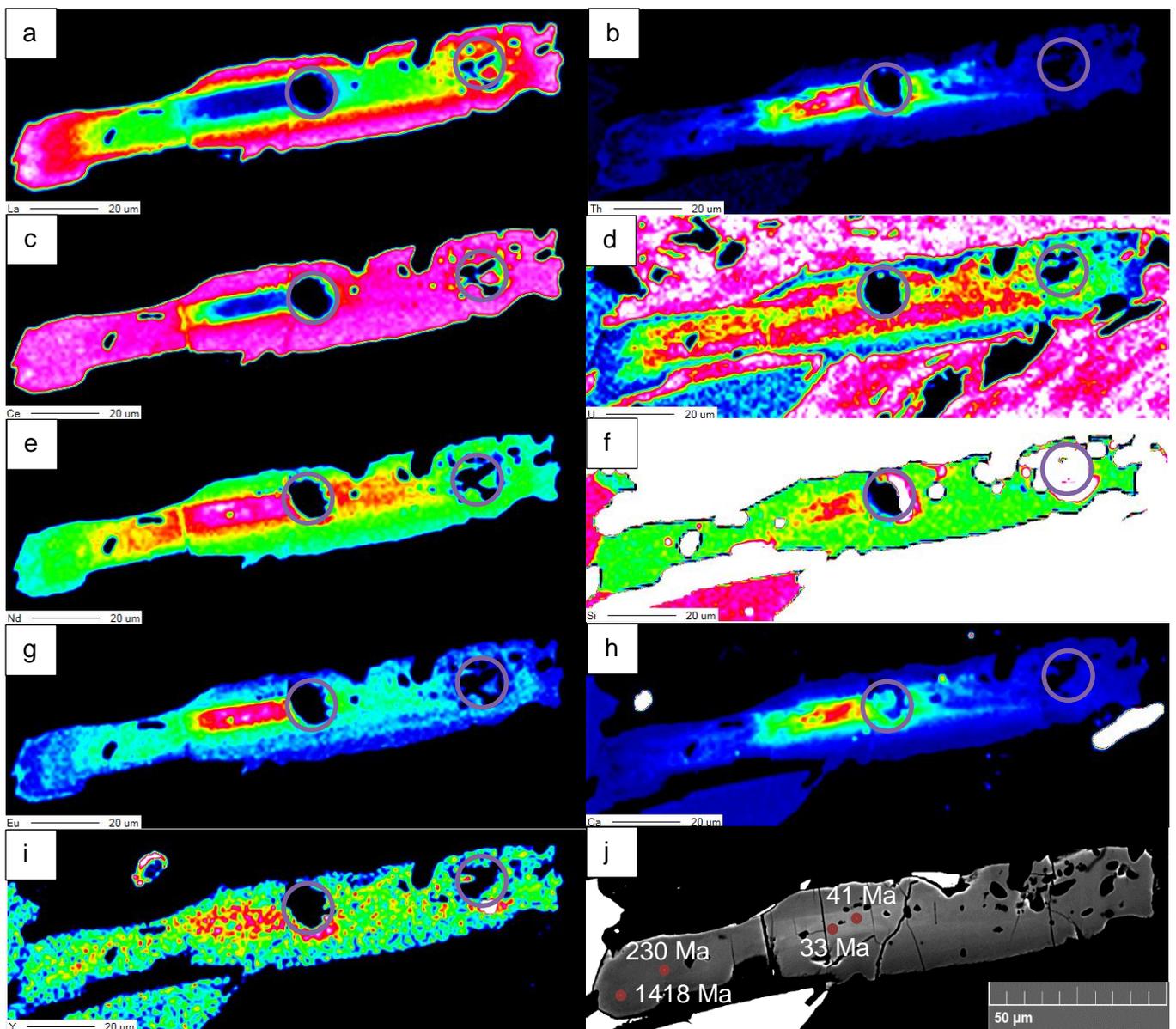


Figure 4: Cartographies élémentaires d'une monazite de la lame PN16-RO5a de Peisey à l'EPMA (détecteur WDS pour tous les éléments) sur les éléments: a) La; b) Th; c) Ce; d) U, e) Nd, f) Si, g) Eu, h) Ca ; i) Y. Et en j) l'image BSE avec les âges microsonde. Présence d'un cœur enrichi en Th, Ca, Eu, Nd et Si et appauvri en La et Ce par rapport à sa bordure. Les cercles violets représentent les cratères d'ablation laser. Les différences de couleurs représentent des variations de concentrations au sein d'un même élément.

Eu) et lourdes (Y) dans le cœur et un appauvrissement en terres rares légères (La et Ce) par rapport à la bordure.

Les analyses à la microsonde électronique permettent de distinguer trois populations différentes de monazite, telles que :

- population 1 (rose) $Nd > Ce$ (en wt%), $Th > 4$ wt% et $Ca > 2$ wt%.
- population 2 (vert) $Th > 4$ wt%, $1 \text{ wt}\% < Ca < 2 \text{ wt}\%$ et $La < 10 \text{ wt}\%$.
- population 3 (bleu) $Th < 3$ wt%, $Ca < 1$ wt% et $La > 10$ wt%.

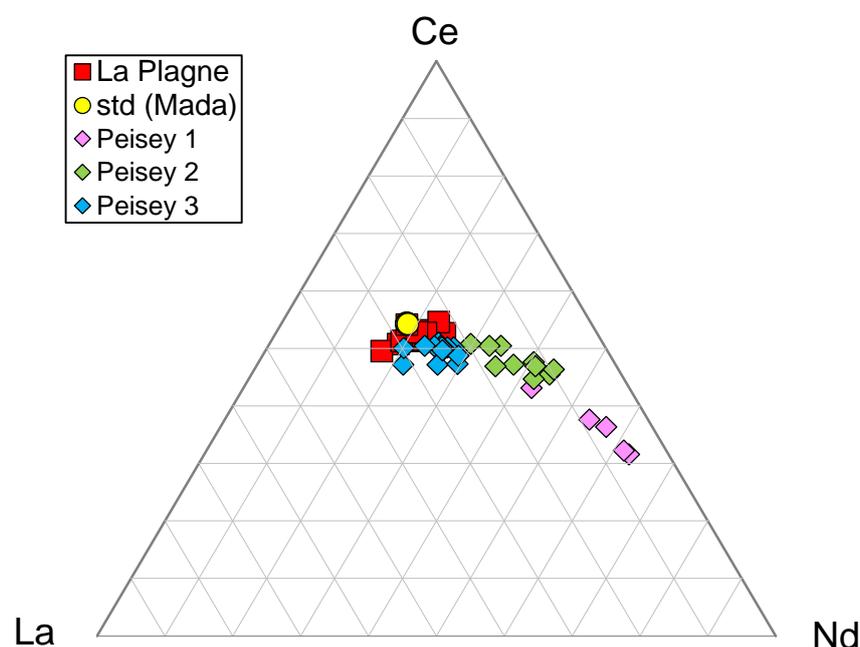


Figure 5: Diagramme ternaire des compositions en apfu (atome par formule unitaire) normalisé sur 100% des terres rares légères (La, Ce et Nd) des monazites de Macôt-La Plagne (3501-5B, carré rouge), Manangotry (standard, madagascar) (Mada, rond jaune) et Peisey-Nancroix (PN16-RO5a, losange bleu, vert et rose).

Sur le diagramme ternaire des terres rares légères et moyennes (La, Ce et Nd) en atome par formule unitaire (apfu) normalisé sur 100%, une courbe de mélange entre un pôle enrichi en Ce et La et un pôle enrichi en Nd est identifiable pour les mesures de monazite de Peisey-Nancroix (losange, Fig. 5). La population 1 (Peisey 1, losange rose) correspond à la phase de monazite(-Nd) et se caractérise par un appauvrissement en Ce pour un enrichissement en Nd. La population 2 (Peisey 2, losange vert) et 3 (Peisey 3, losange bleu) correspondent à la monazite(-Ce) et se caractérise par un appauvrissement en La au profit d'un enrichissement en Nd de la bordure vers le cœur. Sur la figure 4, la population 2 correspondrait à la transition de concentration visible sur La, Nd et Eu. Alors que la population 1 correspond à la monazite(-Nd).

2. Prospection de monazite dans les échantillons de Macôt-La Plagne.

Sur les 4 roches provenant de Macôt-La Plagne (3501-4, 3501-5, 3501-9 et 3501-10), 8 lames ont été réalisées et étudiées au cours de ce stage. La minéralogie de ces 8 échantillons est décrite tableau 3. Ces roches se différencient par leurs pourcentages de sulfures, mais possèdent sensiblement la même minéralogie et la même gangue à l'exception de la roche 3501-10 qui est une cargneule alors que les trois autres sont des quartzites (Tab. 3).

Tableau 3: Minéralogie et nombres de monazites identifiées pour chacune des 8 lames provenant des échantillons de Macôt-La Plagne.

Échantillon	3501-4A	3501-4B	3501-5A	3501-5B	3501-9A	3501-9B	3501-10A	3501-10B
Roche	Quartzite à sulfures disséminés		Quartzite à sulfures disséminés à filon de pyrite		Quartzite à sulfures massifs		Cargneule à sulfures semi-massifs	
Gangue	Quartz, phengite et barytine	Quartz, phengite et barytine	Quartz, phengite et barytine	Quartz, phengite et barytine	Quartz, gypse et barytine	Quartz, phengite, gypse et barytine	Quartz, phengite barytine et dolomite	Quartz, phengite barytine et dolomite
Minéralisation	Galène, pyrite et cuivre gris	Galène, pyrite et cuivre gris	Pyrite, galène, cuivre gris, sphalérite et calcite	Pyrite, galène, cuivre gris, et chlorite	Galène, cuivre gris, pyrite	Galène, cuivre gris, pyrite,	Galène, pyrite et cuivre gris	Galène, pyrite et cuivre gris
Minéraux accessoires		Monazite et rutile	Monazite et zircon	Monazite			Monazite	Monazite
Oxydes et sulfatesF				Oxyde de Fer (en baguette noire)	Anglésite	Anglésite et Oxyde de Fer (en baguette noire)	Anglésite et oxyde de Fer (± Mg et Mn)	Anglésite et oxyde de Fer (± Mg et Mn)
Nombre de monazites identifiées	0	3	6	53	0	0	17	5
Nombre de monazites > 10 µm		2	1	11			3	1

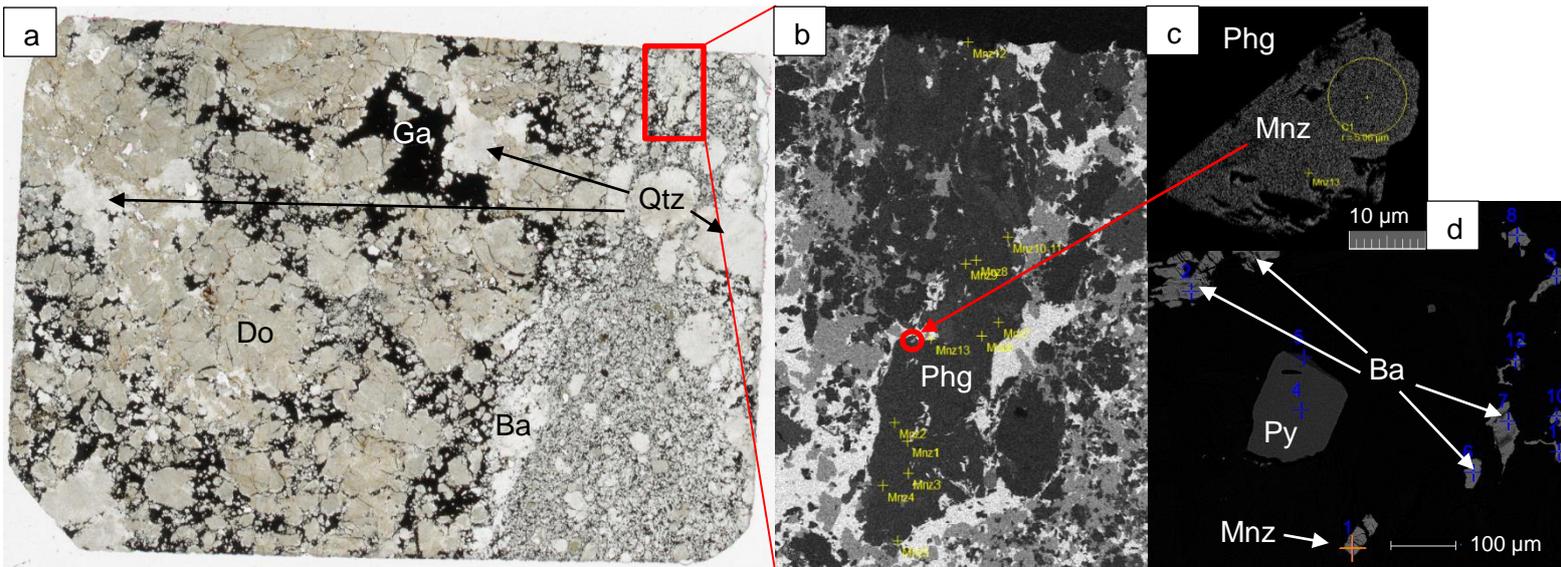


Figure 6: Échantillons de La Plagne (Savoie) A) scan de la lame 3501-10A (en lumière transmise), le rectangle rouge représentant la zone de l'image B; B) zoom sur la zone à phengite et riche en monazite de la lame 3501-10A au MEB (détecteur BSE), le cercle rouge représentant une monazite de la lame 3501-10A; C) monazite dans des phengites de la lame 3501-10A au MEB (détecteur BSE); d) zone de barytine avec une monazite au MEB (détecteur BSE). Ba : barytine ; Do : dolomite ; Ga : galène ; Mnz : monazite ; Phg : phengite ; Py : pyrite ; Qtz : quartz.

Sur les lames 3501-10A et B, deux zones sont différenciables par leurs structures et leurs associations minéralogiques. Sur la zone de droite, dans laquelle se situe le rectangle rouge de la figure 6a, la texture des minéraux peut être qualifiée de mylonitique alors que celle de la zone de gauche est grenue avec la présence de micro-veinules de galène recoupant la dolomite et le quartz. Dans la zone de droite, les quelques grains de quartz visibles à l'œil nu sont altérés et sub-arrondis. De plus, la matrice mylonitisée est majoritairement composée de barytine. Il y a aussi la présence de quelques sulfures disséminés (galène, pyrite et cuivre gris), mais aussi de la phengite dans laquelle on retrouve les monazites dans l'espace intergrain (Fig. 7b). A l'exception d'un grain (Fig. 7c), les monazites ont toutes une taille inférieure à 10 µm. Elles sont sub-automorphes à automorphes et toujours associées à des zones ou veines de phengite (Fig. 7b,c).

La localisation au MEB de monazite dans les échantillons de Macôt-La Plagne, a été compliquée par la présence de cuivre gris (Fig. 3a) et surtout de barytine qui montre un contraste identique à la monazite en mode BSE (Fig. 6d). La présence importante de ces deux phases (surtout la barytine dans les échantillons de Macôt-La Plagne) par rapport à la proportion de monazite et leurs tailles (micrométriques) a grandement ralenti et compliqué l'identification des dites monazites. Malgré cela, la présence de monazite a pu être remarquée dans 5 des 8 lames de l'étude des échantillons de Macôt-La Plagne (Tab. 3). Cependant, aucune monazite n'a été identifiée dans l'échantillon de sulfure massif (3501-9).

L'étude poussée de monazite à l'aide de cartographies élémentaires révèle qu'elles sont assez homogènes avec malgré tout une légère zonation visible. Il y a une zone enrichie en Th, Ca

et U et appauvrie en terres rares légères (La et Ce) par rapport au reste de la monazite (Annexe B2).

B. Datation des monazites.

1. Datation U-Th-Pb sur monazite au LA-ICP-MS.

Datation U-Th-Pb des monazites de Peisey-Nancroix au LA-ICP-MS

Afin de pouvoir réaliser une mesure au spectromètre de masse des isotopes d'U, Th et Pb sur monazite, seuls les grains ou domaines ayant un diamètre proche de 10 μ m ont été sélectionnés (taille du faisceau LA-ICP-MS).

Pour l'échantillon de Peisey-Nancroix (PN16-RO5a), 44 analyses ont été obtenues sur 26 grains de monazite. Dans un diagramme Tera-Wasserburg (T-W ; Fig. 9a), qui expriment les rapports $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ en fonction de $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$, les données U-Pb des grains de monazite s'alignent sur une droite dont l'intercepte inférieur avec la concordia indique un âge de $34,3 \pm 0,90$ Ma. L'intercepte supérieur avec la concordia donne une composition isotopique de Pb commun, et indique une contamination en plomb non-radiogénique. Cette contamination au plomb non-radiogénique a pour effet d'augmenter l'âge calculé sans correction.

Les points supprimés entre la figure 7a et la figure 7b sont ceux les plus déviants de la discordia (lignes passant par les mesures). Un premier contrôle textural permet d'observer que la position de ces mesures est soit en chevauchement de minéraux voisins, soit l'analyse a été réalisée sur une zone de fissure ou riche en inclusion (dont la florencite). L'âge ainsi obtenu

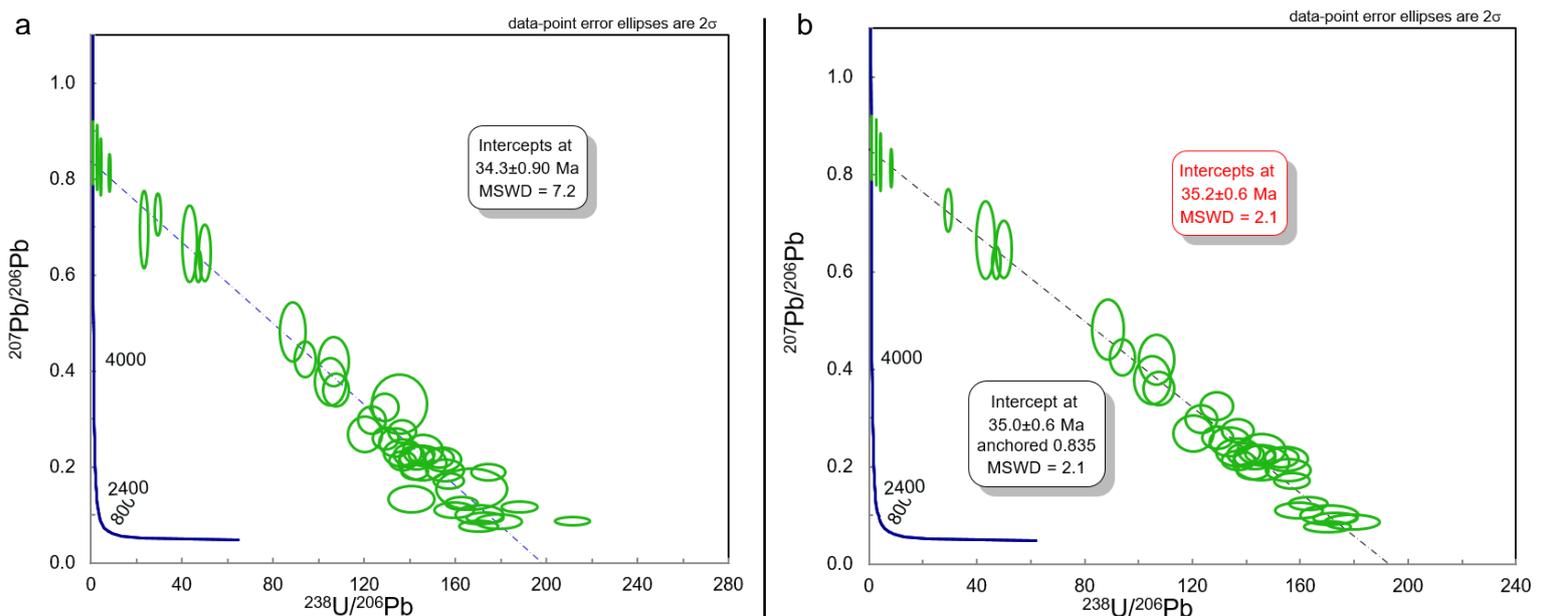


Figure 7: Diagramme Tera-Wasserburg représentant les analyses de monazite de l'échantillon de Peisey (PN16-RO5a), a) données et âges calculés à partir de 44 analyses ; b) données et âges calculés à partir des 37 analyses les mieux alignées (encart rouge). Une correction du plomb commun par ancrage au rapport initial du $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ à 0.835 donne un âge identique (encart noir)

sur les 37 valeurs brutes restantes varie peu en comparaison de celui obtenu sur la totalité des analyses (44) passant de $34,3 \pm 0,90$ (MSWD = 7.2) à $35,2 \pm 0,6$ Ma (MSWD = 2.1). A contrario, le coefficient de corrélation (MSWD) passe à 2,1 ce qui indique un bon alignement des ellipses sur la ligne discordia.

Pour corriger les données de la contamination en Pb commun, la méthode de correction grâce au ^{207}Pb appelé « T-W » (pour Tera-Wasserburg) a été appliquée telle que décrite dans Compston *et al.*, 1992 (Fig. 7a). En ancrant la ligne discordia en ordonnée au rapport initial en $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 0.835, un nouvel âge de $35,0 \pm 0.6$ Ma est obtenu (Fig. 7a, encart noir) que l'on peut considérer comme étant 35 ± 1 Ma au vu de l'étalement des ellipses et de leurs surfaces.

Grâce à l'alignement des données, il est possible de calculer le pourcentage de plomb commun ($^{206}\text{Pb}_c$, Annexe D) par rapport au plomb total (mesuré) et de le déduire pour obtenir la fraction radiogénique ($^{206}\text{Pb}_r$). Le rapport $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corrigé du plomb commun permet de recalculer un âge pour chaque mesure (Fig. 8).

Il est alors possible à l'aide de ces âges corrigés d'obtenir un âge moyen de $35,4 \pm 0,8$ Ma (2σ) que ce soit sur les 44 analyses (Fig. 8a) ou sur les 39 analyses les plus cohérentes (Fig. 8b). Les 5 analyses retirées dans la figure 8b correspondent à celles ayant le pourcentage de ^{206}Pb commun le plus élevé. La correction appliquée est moins efficace pour ces mesures ayant un pourcentage de Pb commun très élevé, qui divergent et donnent des âges plus vieux que l'âge moyen de 35,4 Ma (Fig. 8a).

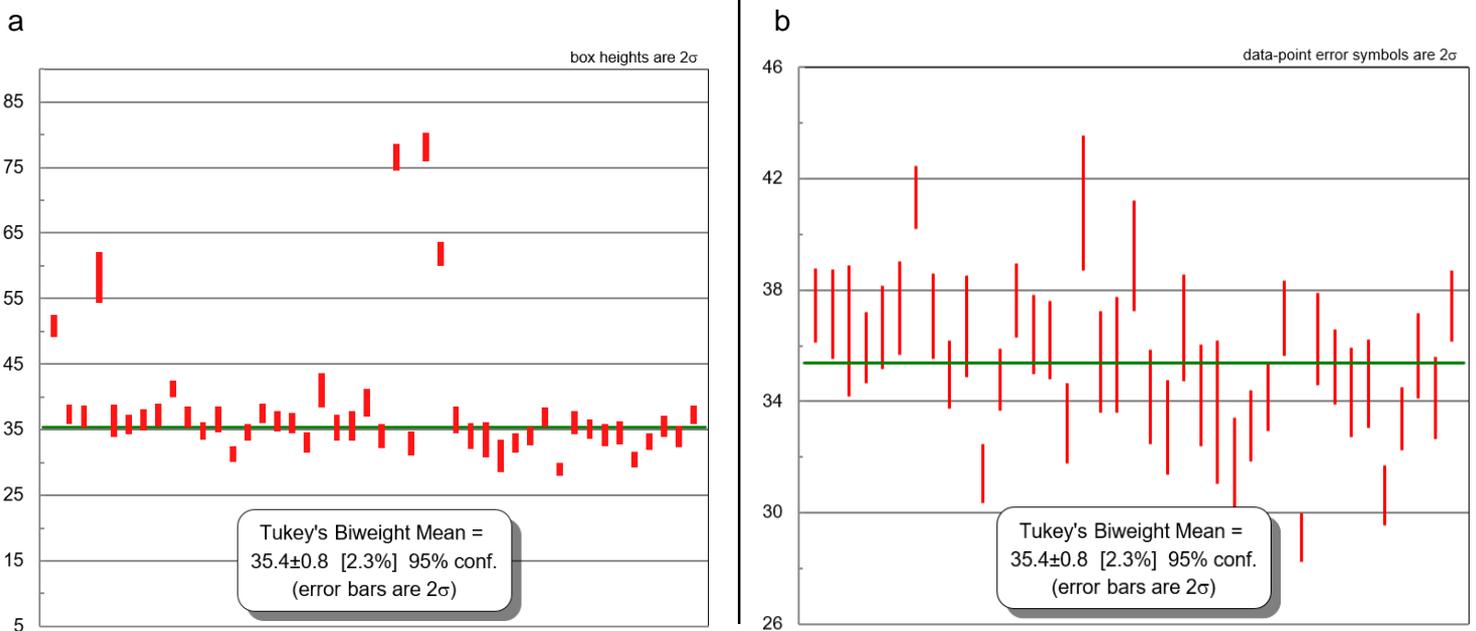


Figure 8: Age moyen obtenu pour les âges $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corrigés du plomb commun des monazites de l'échantillon de Peisey-Nancroix (PN16-RO5a) a) sur la totalité des âges obtenus (44) ; b) sur les 39 âges les plus cohérents.

Il est aussi possible d'obtenir un âge dit « plateau » en classant les âges du plus élevé au plus faible (Fig. 9). L'âge plateau ainsi obtenu est également de $35,4 \pm 0,8$ Ma (avec un indice de confiance de 97,3 %). On retiendra donc un âge de 35 ± 1 Ma pour Peisey-Nancroix.

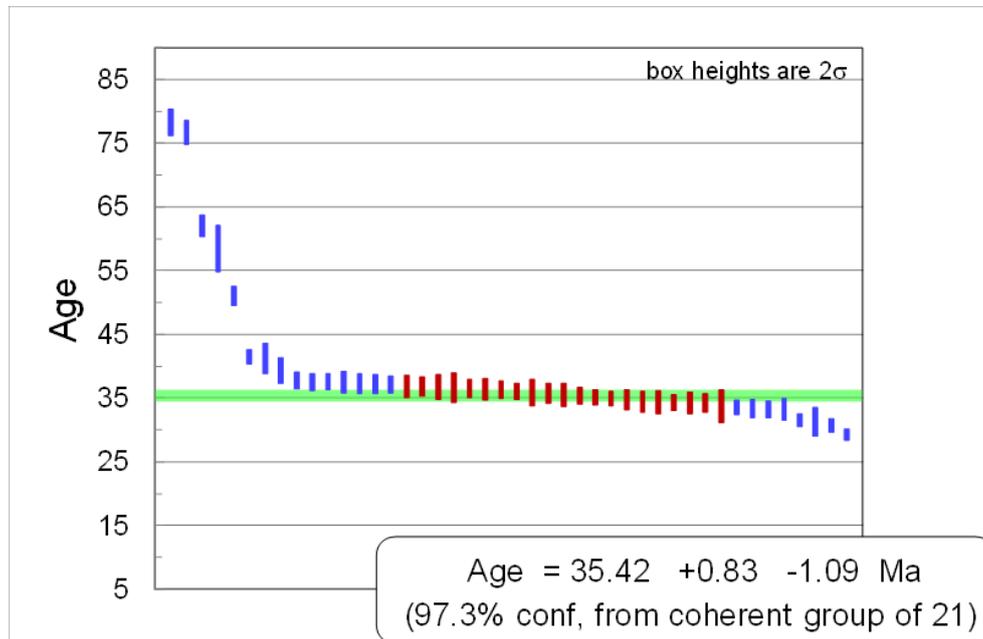


Figure 9: Age plateau moyen réalisé sur l'ensemble des âges $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corrigés du plomb commun des monazites de Peisey-Nancroix (PN16-RO5a). L'âge de $35,4 \pm 1$ Ma provient d'un groupe de 21 valeurs formant le plateau.

Datation U-Th-Pb des monazites de Macôt-La Plagne au LA-ICP-MS

Pour les échantillons de Macôt-La Plagne, seules 16 analyses sur 15 grains de monazite ont pu être obtenues sur 3 lames (3501-4B, 3501-5B et 3501-10A), ce à cause de la taille insuffisante des autres monazites dans ces lames.

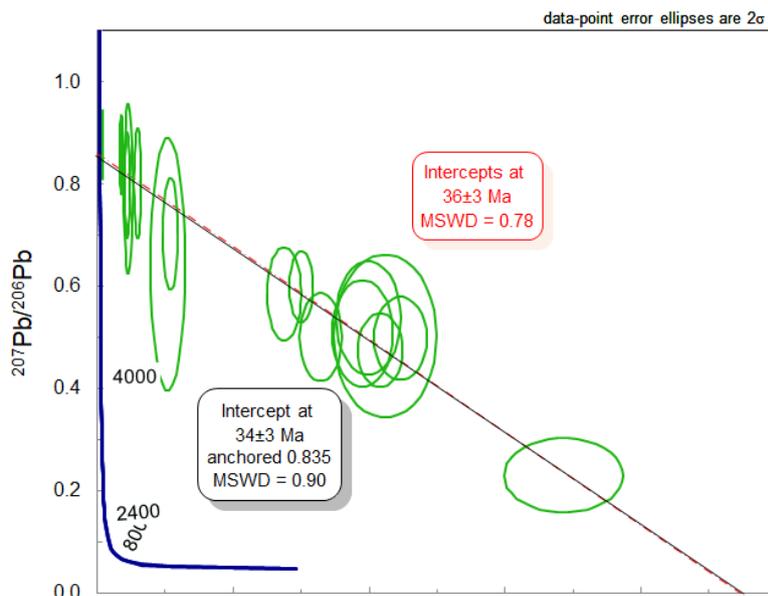


Figure 10 : Diagramme Tera-Wasserburg représentant les 16 analyses des monazites des échantillons de Macôt-La Plagne (3501-4B, 3501-5B et 3501-10A). Une correction du plomb commun par ancrage au rapport initial 0.835 est représentée par la droite noire, la droite en pointillé rouge représente l'âge sans correction.

Malgré les différences texturales, de provenance de différents échantillons, et leurs fortes contaminations (Annexe D), les analyses s'alignent bien dans le diagramme Tera-Wasserburg. Les 16 analyses des grains de monazite de Macôt-La Plagne montrent un alignement avec un intercepte inférieur de la concordia à 36 ± 3 Ma (MSWD = 0,78, Fig. 10).

En procédant de la même manière que pour les analyses de Peisey-Nancroix, un ancrage de la droite passant par les points est fait sur l'axe des ordonnées au rapport initial de $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de 0,835. En appliquant la correction Tera-Wasserburg, un âge de 34 ± 3 Ma est alors obtenu (Fig. 11, droite noire). Au vu de l'erreur analytique importante, un âge de 35 ± 3 Ma est retenu pour les échantillons de Macôt-La Plagne.

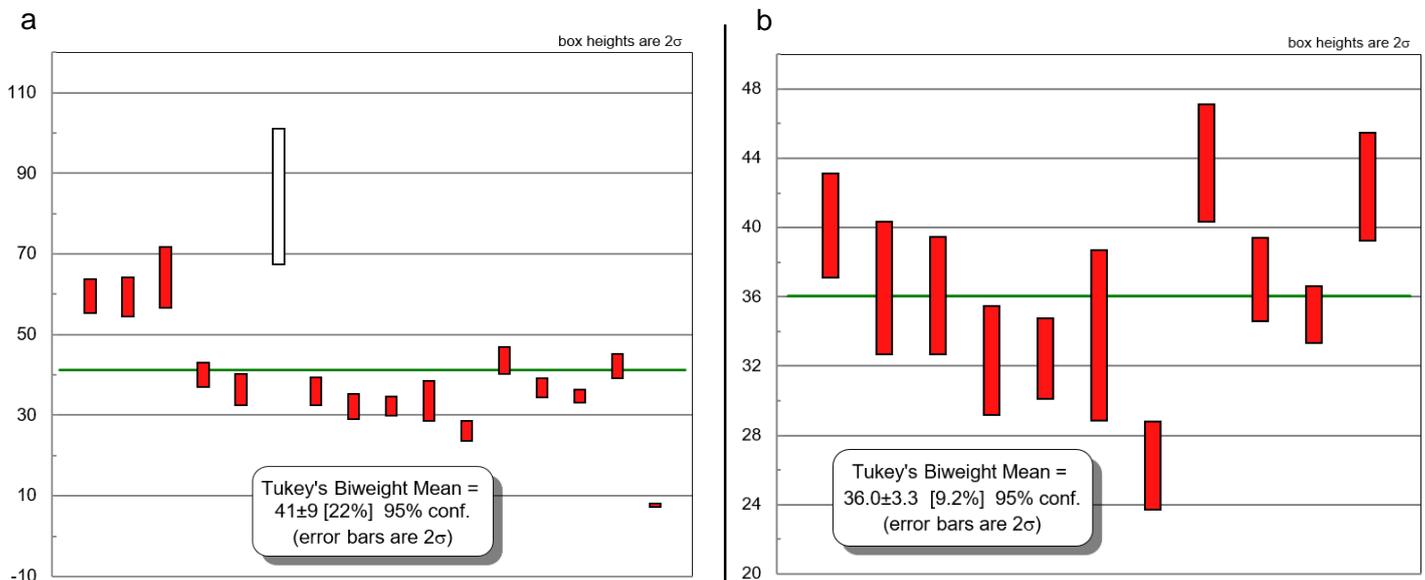


Figure 11: Age moyen obtenu pour les âges $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corrigés du plomb commun des monazites des échantillons de Macôt-La Plagne (3501-4B, 3501-5B et 3501-10A) a) sur la totalité des âges obtenus (16) ; b) sur les 11 âges les plus cohérents. En blanc, une mesure ayant une contamination au plomb commun de 100% (Annexe D).

En corrigeant le ratio de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ du plomb commun grâce au diagramme T-W, il est alors possible d'obtenir les âges (de chaque mesure) corrigés du plomb commun. L'âge moyen obtenu en prenant en compte toutes les données corrigées est de 41 ± 9 Ma à 2σ et un âge moyen de $36 \pm 3,3$ Ma est calculé lorsque l'on enlève les 5 données les plus contaminées en plomb commun pour lesquelles la correction ne fonctionne pas parfaitement (Fig. 11).

Enfin, il est aussi possible d'obtenir un âge « plateau » avec les données de Macôt-La Plagne. L'âge plateau alors obtenu sur un groupe de 7 mesures est de 35 ± 3 Ma avec un indice de confiance de 98,4% (Fig. 12). C'est donc cet âge qui sera retenu pour les échantillons de Macôt-La Plagne.

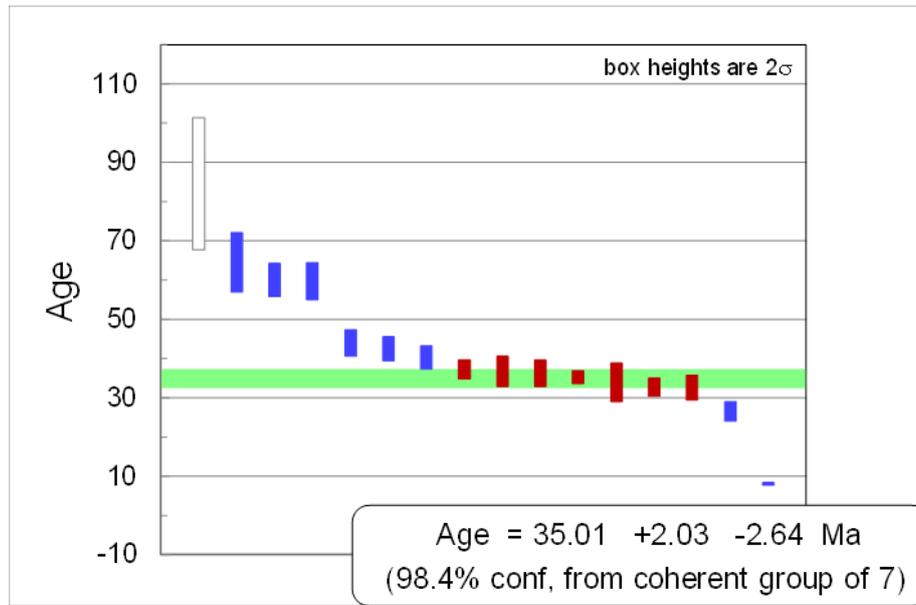


Figure 12: Age plateau moyen calculé sur l'ensemble des âges $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corrigé du plomb commun des monazites de Macôt-La Plagne (3501-4B, 3501-5B et 3501-10A). L'âge de $35 \pm 3\text{Ma}$ provient d'un groupe de 7 valeurs formant le plateau. En blanc, une mesure ayant une contamination au plomb commun de 100% (Annexe D).

2. Datation U-Th-Pb sur monazite à la microsonde électronique.

À la microsonde électronique, 35 analyses ont été effectuées sur 16 grains de monazite de l'échantillon de Peisey-Nancroix (PN16-RO5a) et 12 analyses ont été effectuées sur 11 grains de monazite d'un échantillon de Macôt-La Plagne (3501-5B). Dans l'échantillon de Peisey-Nancroix, 7 analyses ont des teneurs en Pb en dessous des limites de détection (compris entre 100 et 108 ppm en fonction des analyses), alors que 8 mesures sont en dessous des limites de détection du plomb pour les monazites de Macôt-La Plagne. Toutes les analyses montrant des contaminations par les silicates ($\text{SiO}_2 > 1 \text{ wt.}\%$) n'ont pas été prises en compte. Dans les échantillons de Peisey-Nancroix, seules 27 analyses donnent des âges qui se dispersent entre 30 à 1418 Ma (Annexe C). Lors de cette étude, le choix a été fait de mesurer toutes les zonations visibles (cœur, bordure intermédiaire (population 2) et bordure extrême (population 3)) observées au MEB à l'aide du détecteur BSE ou de cartographie élémentaire réalisées au détecteur EDS.

On remarque que les analyses faites dans le cœur de la monazite (zone plus blanche au centre de la monazite) donnent des âges plus jeunes, ici de 30 Ma et 40Ma, contrairement à la bordure avec deux âges entre 230 Ma et 1418 Ma (Fig. 4i). L'âge le plus élevé se situe en bordure de monazite en contact avec de la galène (Fig. 4i). Cette mesure permet de mettre en lumière l'importance de la contamination du plomb sur les âges obtenus à la microsonde électronique.

Grâce à cela, on obtient un graphique où chaque âge calculé est représenté par une gaussienne en fonction de l'incertitude sur l'âge calculé, mais aussi les moyennes des âges de chaque population (Fig 13).

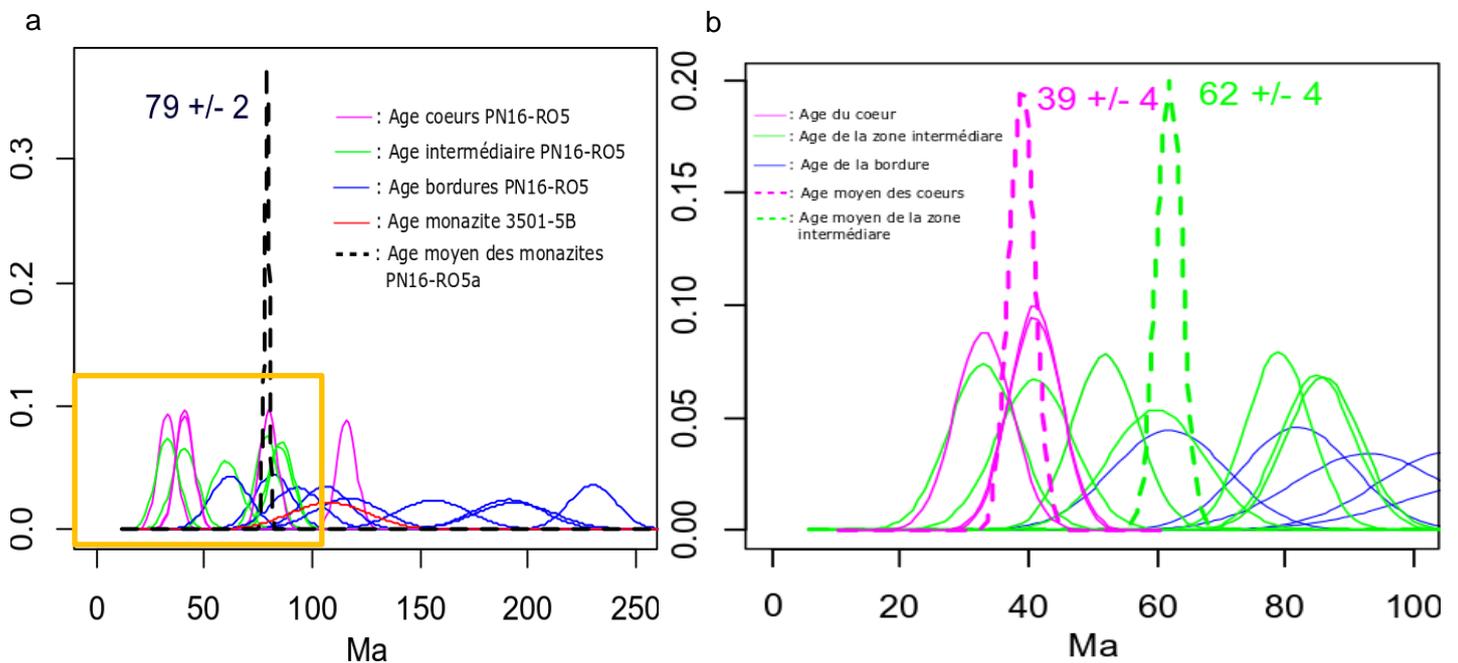


Figure 13: Âges des monazites datées à l'EPMA, en rose sont présentés les âges mesurés au cœur des monazites, en vert dans la bordure intermédiaire et en bleu dans l'extrême bordure : a) la courbe en rouge pour l'échantillon 3501-5B de Macôt-La Plagne et en pointillés noirs pour Peisey-Nancroix (PN16-RO5a) représentent l'âge moyen calculé à partir de l'ensemble des mesures réalisées. Le carré orange représente la zone du graphique détaillée en b). b) La courbe en pointillés roses correspond à la moyenne des âges mesurés dans le cœur et celle en pointillés verts la moyenne des âges mesurés dans la bordure à proximité du cœur des monazites.

L'âge moyen des grains de monazite de Peisey-Nancroix calculé d'après les données obtenues à l'EPMA est de 79 ± 2 Ma (2σ , $n=27$) (courbe en pointillés noirs figure 13a). En ne prenant en compte que les analyses provenant de monazite(-Nd) et en retirant les 2 valeurs de cœur plus âgées, car elles possèdent des concentrations en Pb plus élevées que leurs homologues (400 à 600 ppm contre 200 à 300ppm), l'âge ainsi obtenu est de 39 ± 4 Ma (2σ , $n=3$) (Fig. 13b). L'âge moyen provenant de la bordure interne (monazite(-Ce)) est de 62 ± 4 Ma (2σ , $n=7$) (Fig. 13b) et celui provenant de la bordure externe est de 187 ± 8 Ma (2σ , $n=14$). Du cœur vers la bordure de la monazite, les âges vieillissent. De plus, la majorité des âges se concentrent entre 30 et 125 Ma.

Enfin le seul âge exploitable de Macôt-La Plagne (3501-5B) ressemble de par son écart-type et son âge aux âges des bordures des monazites de Peisey-Nancroix. L'âge est de 108 Ma.

IV. Interprétation et discussion.

1. Séquences paragenétiques

Peisey

La minéralisation se localise dans une gangue composée de quartz, mica blanc et dolomite de manière disséminée ou en veinule. Les grains de gangue montrent toutefois des zonations (dolomite riche en Fe en bordure) et des inclusions secondaires (florencite, phengite) suggérant plusieurs épisodes de cristallisation lors de la minéralisation portée par la galène, le cuivre gris, un sulfure d'As et la pyrite. De manière similaire, les sulfures associés à la minéralisation (galène, cuivre gris) et les minéraux accessoires (monazite et xénotime) montrent des différences texturales suggérant deux épisodes distincts de circulation hydrothermale. Les inclusions sont de bons marqueurs pétrographiques pour distinguer ces deux épisodes. Alors que les cœurs des minéraux sont généralement sans inclusion, les bordures sont poecilites. Plus particulièrement, la florencite, qui est un aluminophosphate de terres rares peu fréquent dans les échantillons métamorphiques (e.g. (Janots *et al.*, 2006)) et la phengite se retrouvent respectivement en nano-inclusions sphériques dans les bordures de tous les minéraux de Peisey (quartz, galène, cuivre gris, monazite, apatite). Les zonations chimiques soutiennent l'hypothèse de deux épisodes de minéralisations. Les cartographies élémentaires (Fig. 4) et analyses ponctuelles (Fig. 5) à l'EPMA dans les monazites montrent un cœur de monazite(-Nd) (Mnz 1) et une bordure de monazite(-Ce) (Mnz 2). Les cartographies élémentaires du xénotime (Annexe B1) montrent un fractionnement des terres rares et des zonations chimiques toutes aussi complexes. La présence de monazite (Mnz 2) en inclusion dans la galène et en inter-croissance (Fig. 3a), nous permet d'affirmer que la cristallisation de la monazite est contemporaine de la minéralisation.

Dorénavant on qualifiera la phase 1 celle qui engendra les premières cristallisations à texture sans inclusion (et les cœurs) et la phase 2 celle qui engendra les secondes cristallisations à texture riche en inclusion (et les bordures).

On peut ajouter qu'il y a une troisième phase de circulation de fluides, qui se manifeste par des altérations des sulfures à leurs bordures et dans des micro-fractures tardives. Cette dernière phase semble être associée à de la déformation postérieure à la minéralisation et des conditions oxydantes pour la minéralisation entraînant l'altération des sulfures en sulfates. Pour résumer, les critères généraux pour construire la paragenèse de l'échantillon (Fig. 14) sont :

- Phase 1 : minéraux à texture sans inclusion et/ou le cœur du minéral ;

- Phase 2 : minéraux à texture riche en inclusion et/ou bordure du minéral ; de plus, la florencite en inclusion est un marqueur pétrographique de la phase 2 ;
- Phase 3 : veinules minéralisées tardives (recoupant la minéralisation principale semi-massive), et marquées par la présence d'oxydes et de sulfates de fer et de plomb tardifs ;

		Paragenèse			
	Minéraux/Phases	anté-minéralisation	Minéralisation 1	Minéralisation 2	Minéralisation 3
Gangue	Quartz	—————	-----	—————	
	Mica blanc	—————	-----	————— Do (-Fe)	
	Dolomite	—————	-----	—————	
Minéralisation	Galène		————— Ga 1	————— Ga 2	
	Chalcopyrite		—————		
	Pyrite		—————		
	Cuivre gris		————— Cu gris 1	————— Cu gris 2	
	Sulfure d'As(-Fe-Co-Ni)		—————		
	Accessoires	Monazite		————— Mnz 1	————— Mnz 2
Xénotime			————— Xen 1	————— Xen 2	
Zircon			—————		
Apatite			—————	—————	
Rutile			—————		
Florencite				—————	
Sulfate	Anglésite				—————
Oxyde	Oxyde de Fer				—————

Figure 14: Paragenèse de la lame PN16-RO5a de Peisey avec la présence de trois phases de minéralisations hydrothermales.

Macôt-La Plagne

La minéralisation se localise dans une gangue de quartz, phengite, barytine et dolomite (3501-10) de manière disséminée, massive ou en filon. La minéralisation est portée par la galène, le cuivre gris, la pyrite et la sphalérite. Dans l'échantillon 3501-10 (Fig. 6a), la zone mylonitisée à barytine et sulfures disséminés recoupe une zone équigranulaire submillimétrique où la minéralisation de galène en filon domine. Ces figures, et la présence d'autres sulfures en inclusion dans les pyrites ou autour témoignent d'une histoire complexe comme ceux de Peisey. L'homogénéité, la taille et la texture (sub-automorphe à automorphe sans inclusion) des grains de monazite de Macôt-La Plagne ne permettent pas de conclure à une origine de formation polyphasée contrairement aux monazites de Peisey-Nancroix. De plus, l'absence

de phase porteuse de terres rares autres que la monazite (e.g xénotime, florencite) et l'absence d'enrichissement en terres rares moyennes (Nd, Eu) dans les grains de monazites de Macôt-la Plagne indiquent une différence de composition des fluides minéralisateurs entre les deux gisements.

2. Évaluation de la datation U-Th-Pb sur monazite de gisements plombifères

La première étape du travail géochronologique fut la mise en place d'un protocole d'identification de monazite au MEB (et à la XRF, « *Fluorescence des rayons X* »). Une des difficultés de cette étape est que les grains sont de tailles micrométriques et sont difficilement repérables au microscope optique. Des tests d'automatisation de recherche de monazite dans une lame au MEB n'ont pu aboutir : soit à cause des contraintes de durée (une cartographie élémentaire au MEB nécessiterait environ 67 h pour une lame de 12 cm²), soit à cause de l'abondance de phases avec les mêmes niveaux de gris en BSE que la monazite (Fig. 3a et Fig. 6d), comme c'est le cas pour la barytine et le cuivre gris. Dans l'échantillon de Peisey, cette étape fut beaucoup plus facile du fait de l'absence de barytine et la plutôt faible présence du cuivre gris en comparaison des échantillons de Macôt-La Plagne. De plus les grains de monazite peuvent atteindre la centaine de microns dans leurs longueurs. Dans les échantillons de Macôt-Plagne, les monazites sont généralement inférieures à 10 microns et assez rares (de 3 à 53 grains par lame). Il a donc fallu faire des analyses ponctuelles sur toute la lame pour détecter quelques grains de monazite vis-à-vis de la barytine qui peut représenter jusqu'à 50% de la surface de certains échantillons. Malgré ces difficultés, la monazite a été identifiée dans 5 des 8 lames soit dans 3 des 4 roches de l'étude (Tab. 3). La localisation est donc fastidieuse, mais la présence de monazite est ubiquiste sauf dans l'échantillon de sulfure massif (3501-9). Enfin, la présence des monazites est systématiquement associée à la phengite. Il est possible d'accélérer le processus d'identification en sélectionnant auparavant au microscope optique les zones minéralisées à phengite.

La deuxième étape fut d'identifier et de localiser de façon précise les monazites ayant un diamètre supérieur à 10 µm afin de pouvoir réaliser des datations in-situ au LA-ICP-MS. Le nombre de monazites répondant à ce critère est beaucoup plus important dans Peisey (26 monazites sur un seul échantillon) que dans les échantillons de Macôt-La Plagne (15 monazites sur 3 échantillons).

La datation des monazites a été obtenue à partir d'analyses élémentaires (EPMA) et isotopiques (LA-ICP-MS). La datation U-Th-Pb sur la monazite au LA-ICP-MS a bien fonctionné compte tenu de la petite taille des grains, et la forte présence de plomb commun. Pour Peisey ou Macôt-La Plagne, la datation U-Pb sur monazite donne des âges U-Pb à 35 ± 1 Ma et 35 ± 3 Ma respectivement avec une incertitude de 2σ quelque soit les différentes

méthodes de régression (intercepte Tera-Wasserburg, âge $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ corrigé du Pb commun, âge plateau). Les datations Th-Pb étaient trop affectées par la présence de Pb commun pour pouvoir être utilisées sans correction comme c'est souvent le cas (e.g. Grand'Homme *et al.*, 2016).

L'origine du plomb commun enregistré dans les analyses de monazite peut être imputée à différentes sources. La première est la présence de phases riches en Pb autour de la monazite (comme la galène). De plus, au LA-ICP-MS, il a été remarqué que la matrice de phengite dans laquelle sont majoritairement inclus les grains de monazite est très enrichie en Pb. La deuxième origine possible est la présence de micro- ou nano-inclusions de galène dans la monazite. La troisième source possible est structurelle avec la possibilité de l'incorporation d'un atome de Pb au lieu d'un atome de Ca dans la structure de la monazite. Enfin, la datation des différents domaines intragranulaires (populations) n'a pas pu être réalisée au LA-ICP-MS car le cœur de monazite de Peisey est toujours inférieur à 10 μm comme il est possible de le voir sur la figure 4 ; le cratère d'ablation laser réalisé dans le cœur de la plus grosse monazite automorphe échantillonnée rogne aussi en partie sur la bordure de celle-ci. Il n'a donc pas été possible de discriminer deux âges distincts pour ces zones dans la monazite de Peisey-Nancroix à l'aide du LA-ICP-MS. L'impossibilité de discriminer deux âges et le bon alignement des ellipses sur le diagramme Tera-Wasserburg (MSWD = 2.1 pour Peisey-Nancroix, Fig. 7b et 0.78 pour Macôt-La Plagne, Fig. 10) indiqueraient que les deux pulses à l'origine des minéralisations (distinguable chimiquement et texturalement) sont assez proches avec sûrement un intervalle de temps inférieur au million d'années.

Un des avantages de la microsonde électronique est d'avoir une résolution spatiale de l'ordre d'1 μm , ce qui permet d'obtenir des âges des différents domaines ou sur les grains les plus petits. Toutefois, l'estimation des âges se fait en considérant que tout le Pb est d'origine radiogénique et celui-ci doit avoir atteint des concentrations supérieures à celle de la limite de détection de l'EMPA (autour de 100-110 ppm) qui correspondent en général à des âges autour de 100 Ma pour des monazites de composition classique (Fig. 13, Montel *et al.*).

Grâce à l'EMPA, il a été possible de dater le cœur, la bordure intermédiaire et l'extrême bordure dans un grain de monazite de Peisey. Pour Peisey, les âges se dispersent entre 30 et 1418 Ma, avec une moyenne autour de 79 Ma. Plus les analyses s'éloignent du cœur, et plus les âges augmentent. Ce vieillissement artificiel des âges en bordure est attribué à une augmentation de la contamination en Pb non radiogénique. Pour le cœur ou la bordure intermédiaire, il a été possible d'obtenir des âges autour des 35 Ma, qui sont donc identiques à ceux obtenus au LA-ICP-MS. En comparaison de monazites de composition classique, il est possible d'obtenir des âges aussi jeunes à l'EMPA pour les monazites de Peisey du fait

qu'elles possèdent des concentrations en U et en Th très élevées. Ceci est très différent des analyses de monazites hydrothermales des veines alpines non métallifères (étoiles grises, Fig. 15). Cette importante concentration en U (et Th) permet de diminuer l'impact du plomb commun sur le plomb total et d'obtenir des âges corrects dans les domaines les plus riches en Th et U (cœur de Mnz1). Malgré cela, la datation des différentes populations à l'EPMA semble encore difficile au vu de l'incorporation de Pb commun qui ne peut pas être évalué sans contrôle isotopique.

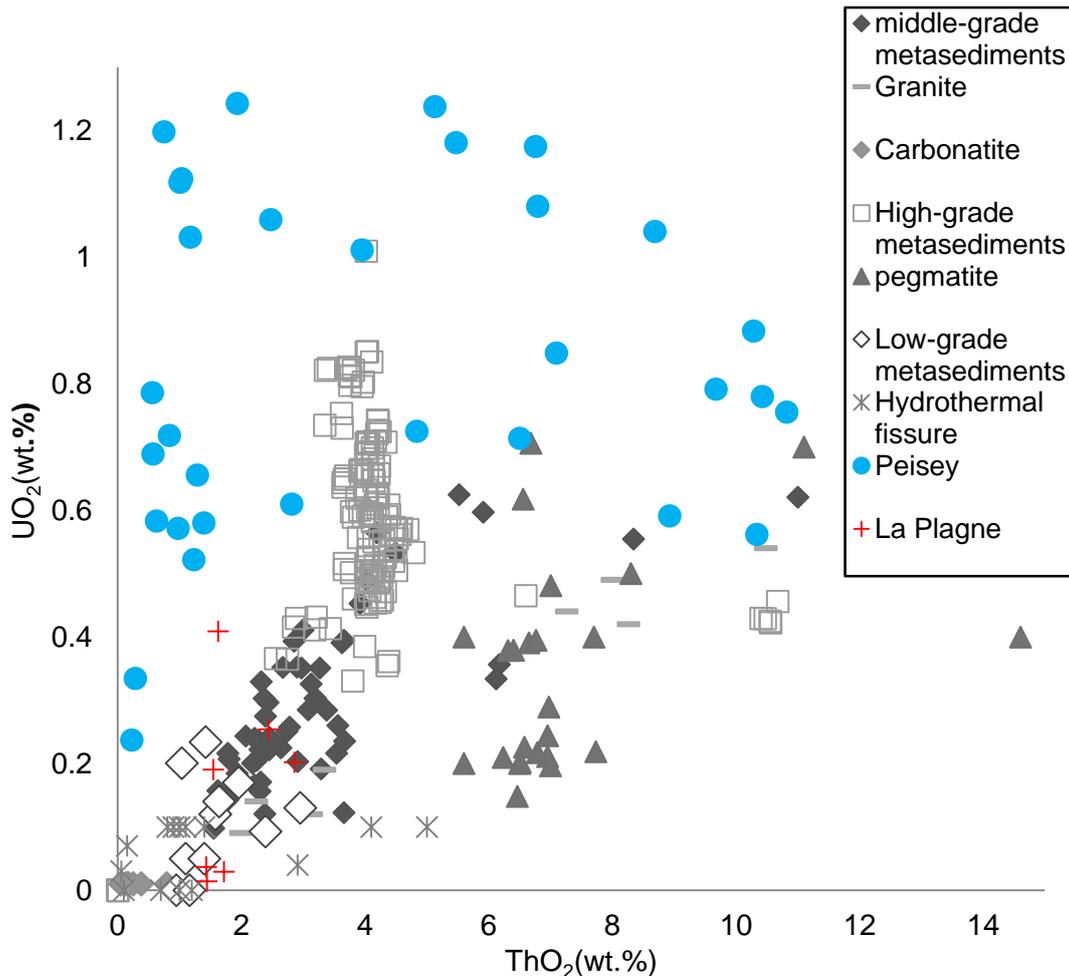


Figure 15: Données des concentrations en U et Th des monazites étudiées (Peisey rond bleu et Macôt-La Plagne croix rouge) comparées avec des données de monazites provenant de la littérature (Janots et al., 2012).

3. Corrélations des résultats avec l'histoire géodynamique des Alpes.

L'âge de cristallisation de la monazite de 35 Ma correspond donc à l'âge moyen de la mise en place de la minéralisation dans les gisements de Peisey et de Macôt-La Plagne. En situant ces deux gisements dans la zone Houillère (domaine Briançonnais), il est possible d'associer la mise en place de la minéralisation avec l'orogénèse alpine. Elle se caractérise dans cette région par la formation d'un prisme de collision entraînant des déformations importantes dues à la mise en place de nappes empilées par chevauchement et plissement. La minéralisation

est donc contemporaine du début de la propagation de la déformation vers l'Ouest et de la mise en place du front Pennique en chevauchement de la plaque européenne (*Bousquet et al.*, 2008; *Simon-Labric et al.*, 2009). La présence de chlorite et de phengite semble attester d'un métamorphisme type schiste vert de haute pression qui témoignerait d'un enfouissement d'environ 10 à 15 Km (*Simon-Labric et al.*, 2009). Cette intense phase de déformation enregistrée est idéale pour faciliter la circulation de fluides par l'intermédiaire des nombreuses failles chevauchantes créées suite à la collision alpine qui jouent le rôle de conduits drainant. Aucun indice ne nous indique s'il s'agit d'une remobilisation d'un enrichissement antérieur à la formation des Alpes.

La datation du gisement d'or de la Gardette (42 ± 5 Ma, *Cathelineau et al.*, 1989) sur brannérite et l'étude de la mine Pb-Ag du Pontet (*Feybesse et al.*, 2004) associée au même district que la Gardette (en bordure de massif cristallin externe) et pour laquelle la formation de la minéralisation est bornée entre 36 et 39 Ma pourrait correspondre au même événement minéralisateur régional que nos échantillons concernant la mise en place des minéralisations. Il est donc possible qu'une partie importante des gisements des Alpes du Nord soit d'origine alpine. A partir des données traitées pendant cette étude, il n'est pas encore possible de déterminer la source de ces sulfures ni s'ils sont issus d'une remobilisation alpine.

V. Conclusion et perspectives

Au vu de la quasi-ubiquité de la monazite dans les échantillons de Peisey-Nancroix et Macôt-La Plagne ainsi que de la cohérence des âges obtenus (selon les différentes méthodes de régression et indépendamment de l'échantillon), la méthode de datation isotopique U-Pb sur monazite semble adaptée pour dater les gisements alpins plombifères. Une des limites de cette méthode est que tous les échantillons montrent des grains de taille proche de la résolution spatiale des techniques isotopiques. Ainsi, il est difficile de discriminer les âges de différents domaines de compositions différentes, surtout si celles-ci sont rapprochées en âge. Une autre difficulté réside dans une contribution significative du Pb commun sur les analyses qui ne permet d'obtenir des âges que pour les systèmes isotopiques U-Pb. Ainsi, la datation EPMA des gisements alpins semble compromise par la présence de Pb commun, sauf pour discriminer des événements alpins et Varisque. Ainsi, il est possible que certains gisements ne puissent être datés par U-Th-Pb sur monazite. Par exemple, des essais préliminaires sur le gisement de Notre-Dame de la Gorge (Contamine-Montjoie, Fig. 1) a permis de détecter seulement 5 grains de monazites avec une taille inférieure à $10 \mu\text{m}$, qui donne un âge à l'EPMA de 180 ± 39 Ma qui semble suggérer un âge alpin (plusieurs analyses ont des teneurs en Pb inférieures aux limites de détection), impacté par du Pb commun (2σ , $n=2$) (Annexe C). Une piste complémentaire serait de compléter les datations de monazite avec celles de xénotimes

qui ont été également identifiés dans l'échantillon de Peisey. Une hypothèse pour l'origine des fluides ayant formés ces gisements est un écoulement gravitaire entraîné par le charriage et le plissement des nappes et/ou par une mobilisation des fluides par compression des dites formations fin-Éocène.

Par la suite, de nouveaux échantillonnages et travaux géochronologiques sont déjà anticipés sur d'autres minéralisations Pb-Ag des Alpes du Nord comme le Rocheray, la Richesse, Notre-Dame de la Gorge (Annexe C), le Pontet afin de corréler les âges obtenus sur les minéralisations de Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix avec éventuellement d'autres minéralisations métalliques réparties sur le territoire des Alpes du Nord.

L'objectif est ici de contraindre les circulations fluides, les déformations et la tectonique à l'échelle des Alpes du Nord afin d'enrichir la base de données du projet RGF Alpes avec une dimension spatio-temporelle de ces circulations fluides et minéralisations.

Dans cette perspective, des cartographies isotopiques de sulfures au LA-ICP-MS ont été obtenues au BRGM dans le cadre de ce projet de M2. Le traitement du signal est en cours d'acquisition. Ces analyses permettront d'obtenir des informations sur les éléments traces présents dans les sulfures et donc de mettre en évidence le caractère monophasé ou polyphasé, et de mieux caractériser la distribution des métaux majeurs et des métaux stratégiques en trace (Co, Ni, Cd, Ge, Ag, REE, Hg).

Enfin, une étude sur les isotopes stables (e.g O et S) est envisagée pour contraindre la source des métaux et mettre en lumière une éventuelle remobilisation d'une source préalablement enrichie.

VI. Bibliographie

Béziat, P. and Bornuat, M.: Carte minière de la France métropolitaine à 1/1 000 000. Notice Explicative., 1995.

Bousquet, R., Oberhänsli, R., Goffé, B., Wiederkehr, M., Koller, F., Schmid, S. M., Schuster, R., Engi, M., Berger, A. and Martinotti, G.: Metamorphism of metasediments at the scale of an orogen: a key to the Tertiary geodynamic evolution of the Alps*, Geological Society, London, Special Publications, 298(1), 393–411, doi:10.1144/SP298.18, 2008.

BRGM: Rapport RR-41430, Ressources minières française., 1977.

BRGM: SIG Mines France, sigmines [online] Available from: <http://sigminesfrance.brgm.fr/> (Accessed 28 May 2019a), n.d.

BRGM: Téléchargement des cartes géologiques | InfoTerre, InfoTerre [online] Available from: <http://infoterre.brgm.fr/page/telechargement-cartes-geologiques> (Accessed 31 May 2019b), n.d.

Cathelineau, M., Boiron, M. C., Holliger, P. and Poty, B.: Métallogenésis of the French part of the Variscan orogen. Part II: Time-space relationships between U, Au and Sn-W ore deposition and geodynamic events - mineralogical and U-Pb data, Tectonophysics, (177), 59–79, 1989.

Chabert, L.: La mine de plomb argentifère de La Plagne, Revue de géographie alpine, 62(1), 113–123, doi:10.3406/rga.1974.1362, 1974.

Compston, W., Williams, I. S., Kirschvink, J. L., Zichao, Z. and Guogan, M. A.: Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale, Journal of the Geological Society, 149(2), 171–184, doi:10.1144/gsjgs.149.2.0171, 1992.

Dembélé, A.: Etude des Minéralisations Pb-Zn-Ag du district minier de La-Plagne et Peisey-Nancroix (Savoie), rapport de stage de Master 1, Grenoble., 2018.

Feybesse, J.-L., Bailly-Maître, M.-C. and Feraud, J.: La mine médiévale d'argent du Pontet, une fente alpine contemporaine de la surrection des massifs cristallins ?, Geoscience, (336), 1255–1264, 2004.

Gimard, J. and Gimard, G.: Mine de plomb argentifère (Savoie), Monde et Minéralogie, (70), 3, 1985.

Gimard, J. and Gimard, G.: Mine de plomb argentifère (savoie), Monde et Minéralogie, (71), 2, 1986.

Grand'Homme, A., Janots, E., Bosse, V., Seydoux-Guillaume, A. M. and De Ascensão Guedes, R.: Interpretation of U-Th-Pb in-situ ages of hydrothermal monazite-(Ce) and xenotime-(Y): evidence from a large-scale regional study in clefts from the western alps, Mineralogy and Petrology, 110(6), 787–807, doi:10.1007/s00710-016-0451-5, 2016.

Janots, E. and Rubatto, D.: U–Th–Pb dating of collision in the external Alpine domains (Urseren zone, Switzerland) using low temperature allanite and monazite, Lithos, 184–187, 155–166, doi:10.1016/j.lithos.2013.10.036, 2014.

Janots, E., Negro, F., Brunet, F., Goffé, B., Engi, M. and Bouybaouene, M. L.: Evolution of the REE mineralogy in HP–LT metapelites of the Sebtime complex, Rif, Morocco: monazite stability and geochronology, *lithos*, 87(3–4), 214–234, 2006.

Janots, E., Berger, A., Gnos, E., Whitehouse, M., Lewin, E. and Pettke, T.: Constraints on fluid evolution during metamorphism from U–Th–Pb systematics in Alpine hydrothermal monazite, *Chemical Geology*, 326–327, 61–71, doi:10.1016/j.chemgeo.2012.07.014, 2012.

Kempe, U., Lehmann, B., Wolf, D., Rodionov, N., Bombach, K., Schwengfelder, U. and Dietrich, A.: U–Pb SHRIMP geochronology of Th-poor, hydrothermal monazite: An example from the Llallagua tin-porphyry deposit, Bolivia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(17), 4352–4366, doi:10.1016/j.gca.2008.05.059, 2008.

Laroussi, A.: Etude minéralogique et paragenétique de la minéralisation complexe a Co-Ni-Ag-As des chalanches (Isère) comparaison avec le district de cobalt (Ontario)., Université d'Orléans, 7 November., 1990.

Ludwig, K. R.: Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel., Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4, 2003.

Montel, J.-M., Foret, S., Veschambre, M., Nicollet, C. and Provost, A.: Electron microprobe dating of monazite, *Chemical Geology*, 131(1–4), 37–53, doi:10.1016/0009-2541(96)00024-1, 1996.

Morelli, R. M., Creaser, R. A., Selby, D., Kelley, K. D. and Leach, D. L.: Re-Os Sulfide Geochronology of the Red Dog Sediment-Hosted Zn-Pb-Ag Deposit, Brooks Range, Alaska, , 8, 2004.

Ochoa Alencastre, A.: Etude gîtologique des minéralisations fluorées du massif de Rocheray, Savoie - Alpes françaises externes., *Minéralogie*, Claude Bernard-Lyon 1, Lyon, October., 1979.

Raguin, M. E.: La mine de plomb argentifère de la Plagne (Savoie), , *Extrait des Annales des Mines*, 7, 1938.

Ring, U. and Gerdes, A.: Kinematics of the Alpenrhein-Bodensee graben system in the Central Alps: Oligocene/Miocene transtension due to formation of the Western Alps arc: ALPENRHEIN-BODENSEE GRABEN SYSTEM, *Tectonics*, 35(6), 1367–1391, doi:10.1002/2015TC004085, 2016.

Rogel, P.: Le gisement de plomb de La Plagne (Savoie) étude géologique et métallogénique, *Faculté des sciences de l'université de Paris*, Paris, December., 1961.

Rossi, M., Tarrieu, L., Cheilletz, A., Gasquet, D., Deloule, E., Paquette, J.-L., Bounajma, H., Mantoy, T., Ouazzani, L. and Ouchtouban, L.: The Polymetallic (W–Au and Pb–Zn–Ag) Tighza District (Central Morocco): Ages of Magmatic and Hydrothermal Events, in *Mineral Deposits of North Africa*, edited by M. Bouabdellah and J. F. Slack, pp. 107–131, Springer International Publishing, Cham., 2016.

Scherrer, N. C., Engi, M., Gnos, E., Jakob, V. and Liechti, A.: Monazite analysis; from sample preparation to microprobe age dating and REE quantification., *Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 80(1), 93–105, 2000.

Schmid, S. M., Fügenschuh, B., Kissling, E. and Schuster, R.: Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen, *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 97(1), 93–117, doi:10.1007/s00015-004-1113-x, 2004.

Schulz, B., Brätz, H., Bombach, K. and Krenn, E.: In situ Th-Pb dating of monazite by 266 nm laser ablation and ICP-MS with a single collector, and its control by EMP analysis, *Z. geol. Wiss.*, 17, 2007.

Seydoux-Guillaume, A. M., Montel, J. M., Bingen, B., Bosse, V., de Parseval, P., Paquette, J.-L., Janots, E. and Wirth, R.: Low-temperature alteration of monazite: fluid mediated coupled dissolution-precipitation, irradiation damage and disturbance of the U-Pb and Th-Pb chronometers., *Chemical Geology*, 330, 140–158, 2012.

Simon-Labric, T., Rolland, Y., Dumont, T., Heymes, T., Authemayou, C., Corsini, M. and Fornari, M.: 40 Ar/ 39 Ar dating of Penninic Front tectonic displacement (W Alps) during the Lower Oligocene (31-34 Ma), *Terra Nova*, 21(2), 127–136, doi:10.1111/j.1365-3121.2009.00865.x, 2009.

Suzuki, K., Adachi, M. and Tanaka, T.: Middle precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study, *Sedimentary Geology*, 75(1–2), 141–147, doi:10.1016/0037-0738(91)90055-I, 1991.

Tachat, T.: Mine de plomb argentifère, BRGM., 1861.

Tomascak, P. B., Krogstad, E. J. and Walker, R. J.: U-Pb Monazite Geochronology of Granitic Rocks from Maine: Implications for Late Paleozoic Tectonics in the Northern Appalachians, *The Journal of Geology*, 104(2), 185–195, doi:10.1086/629813, 1996.

Villa-Vialaneix, N., Montel, J. M. and Seydoux-Guillaume, A. M.: NiLeDAM., 2013.

Annexes.

Annexe A : Formule théorique des minéraux cités dans ce rapport.

Nom	formule
allanite	$\text{Ca(REE)Fe}^{+2}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O(OH)}$.
anglésite	PbSO_4
apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH, Cl, F})$
barytine	BaSO_4
chevkinite	$(\text{REE})_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})_2(\text{Ti, Fe}^{3+})_3\text{Si}_4\text{O}_{22}$
chlorite	$(\text{Fe, Mg, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
cuivre gris (pôle freibergite)	$(\text{Ag, Cu, Fe})_{12}(\text{Sb, As})_4\text{S}_{13}$
cuivre gris (pôle tennantite)	$\text{Cu}_6[\text{Cu}_4(\text{Fe, Zn})_2]\text{As}_4\text{S}_{13}$
cuivre gris (pôle tétraédrite)	$(\text{Cu, Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$
dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
florencite	$(\text{REE})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$
galène	PbS
gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
huttonite	ThSiO_4
monazite	$(\text{REE})\text{PO}_4$
phengite	$\text{K}(\text{AlMg})_2(\text{OH})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}$
pyrite	FeS
quartz	SiO_2
rutile	TiO_2
sphalérite	ZnS
Sulfure d'As (pôle arsénopyrite)	FeAsS
Sulfure d'As (pôle cobaltite)	CoAsS
Sulfure d'As (pôle gersdorffite)	NiAsS
xénotime	YPO_4
zircon	ZrSiO_4

Annexe B : Pétrologie.

1. Lame PN16-RO5a (Peisey).



Figure 16: Scan de la lame PN16-RO5a (Peisey-Nancroix) en lumière transmise.

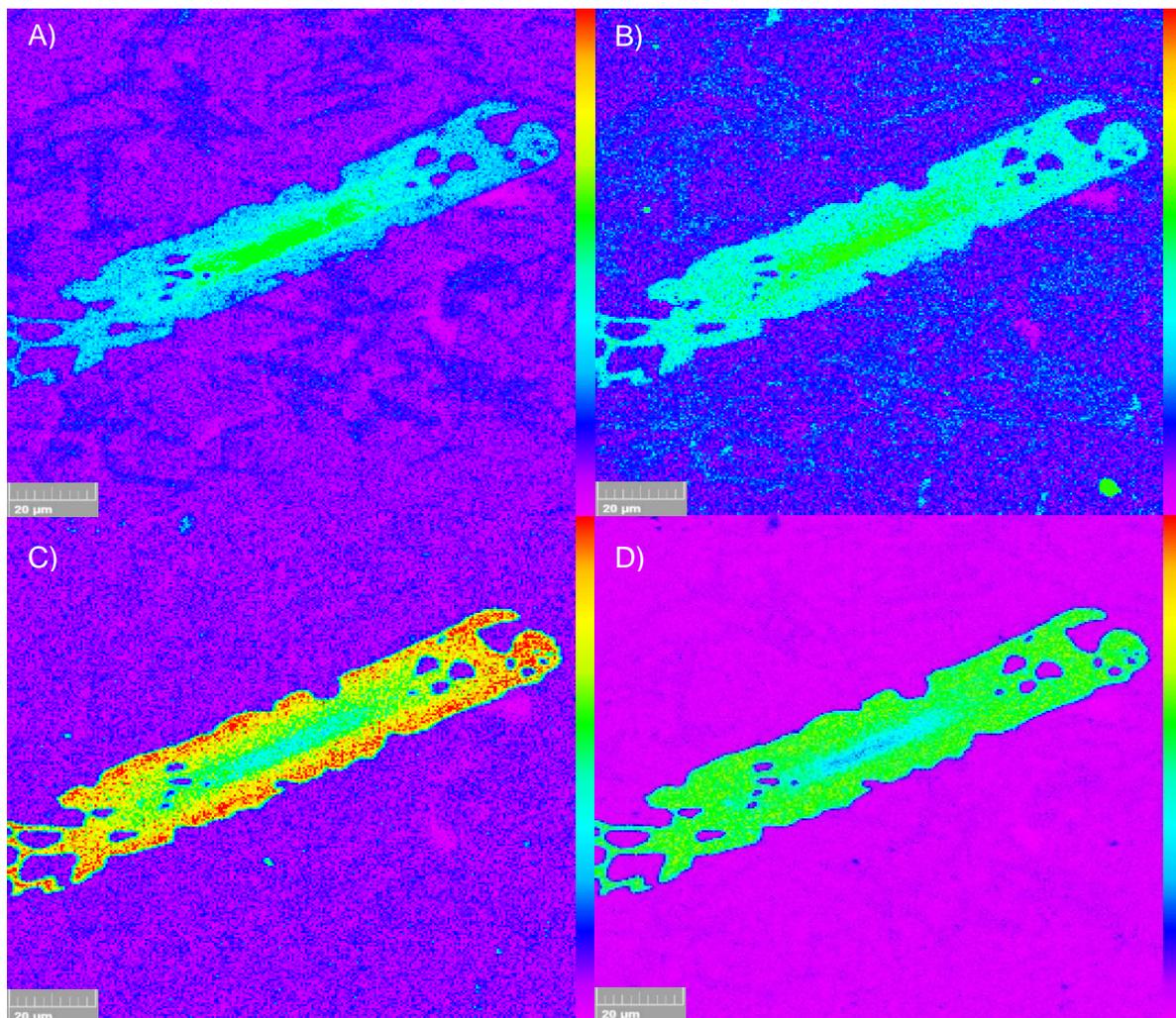


Figure 17: Cartographies élémentaires d'une monazite de la lame PN16-Ro5a (Peisey-Nancroix) au MEB (détecteur EDS) sur les éléments : A) Th ; B) Ca ; C) La ; D) Ce. Présence d'une zonation avec un cœur enrichi en Th et Ca et appauvrie en terres rares (La, Ce) contrairement à la bordure poecilitique.

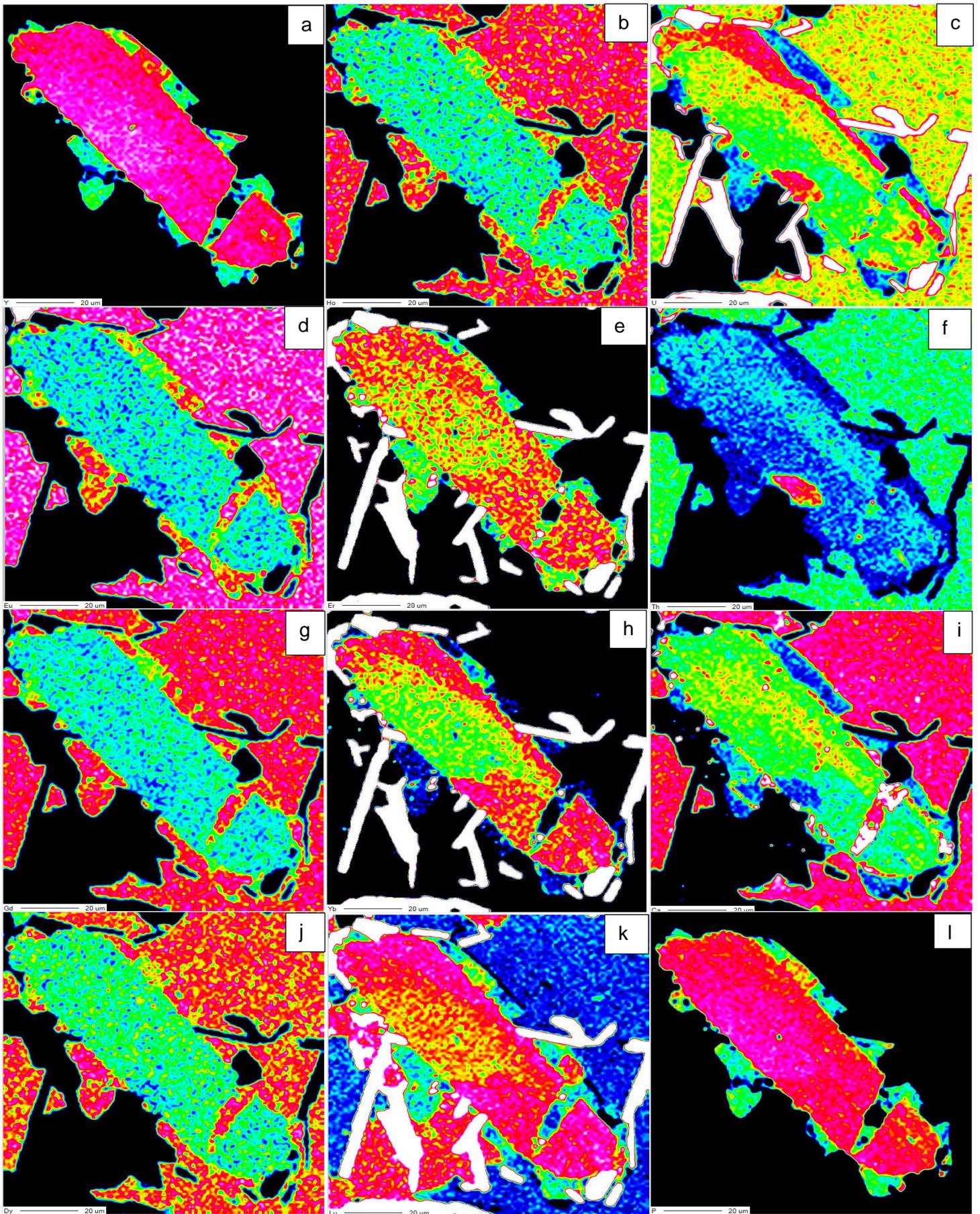


Figure 18: Cartographies élémentaires d'un xénotime de la lame PN16-RO5a de Peisey à l'EPMA (détecteur EDS pour le P et les terres rares) sur les éléments: a) Y; b) Ho; c) U; d) Eu, e) Er, f) Th, g) Gd, h) Yb ; i) Ca ; j) Dy ; k) Lu ; l) P.

2. Macôt-La Plagne (3501-4A, 3501-4B, 3501-5A, 3501-5B, 3501-9A, 3501-9B et 3501-10B).

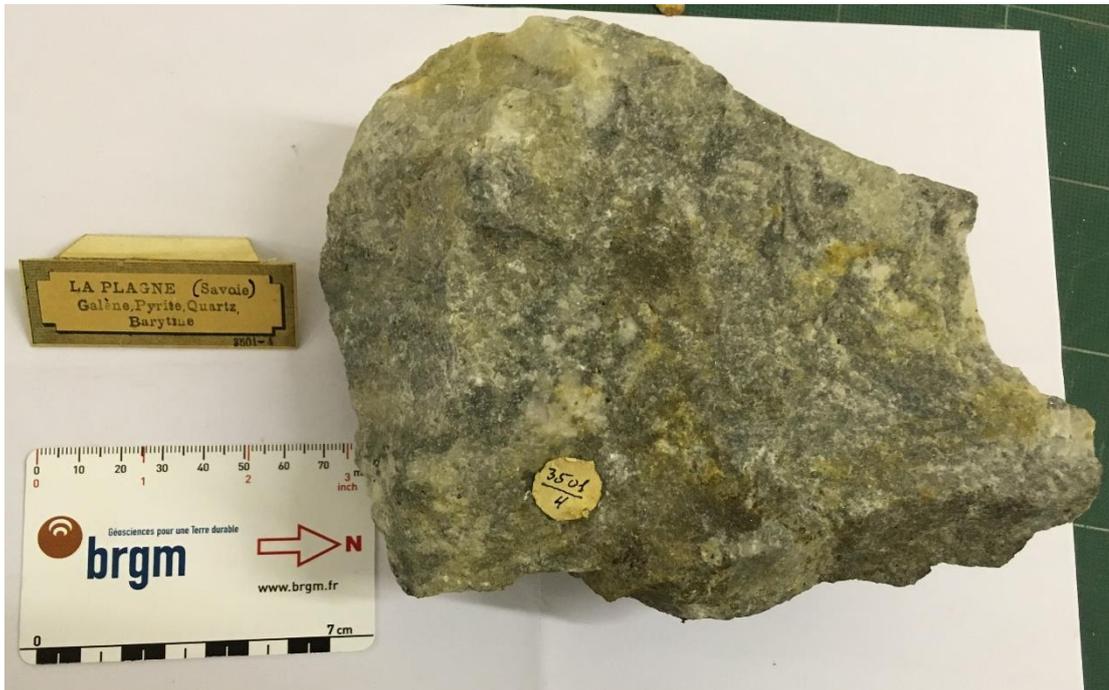


Figure 19: Echantillon de roche 3501-4 provenant du filon 0/8 quartier des Quartzites Est (lithothèque du BRGM).



Figure 20: Scan de la lame 3501-4A (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.



Figure 21: Scan de la lame 3501-4B (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.



Figure 22: Echantillon de roche 3501-5 provenant du quartier des Sarrazins (lithothèque du BRGM).

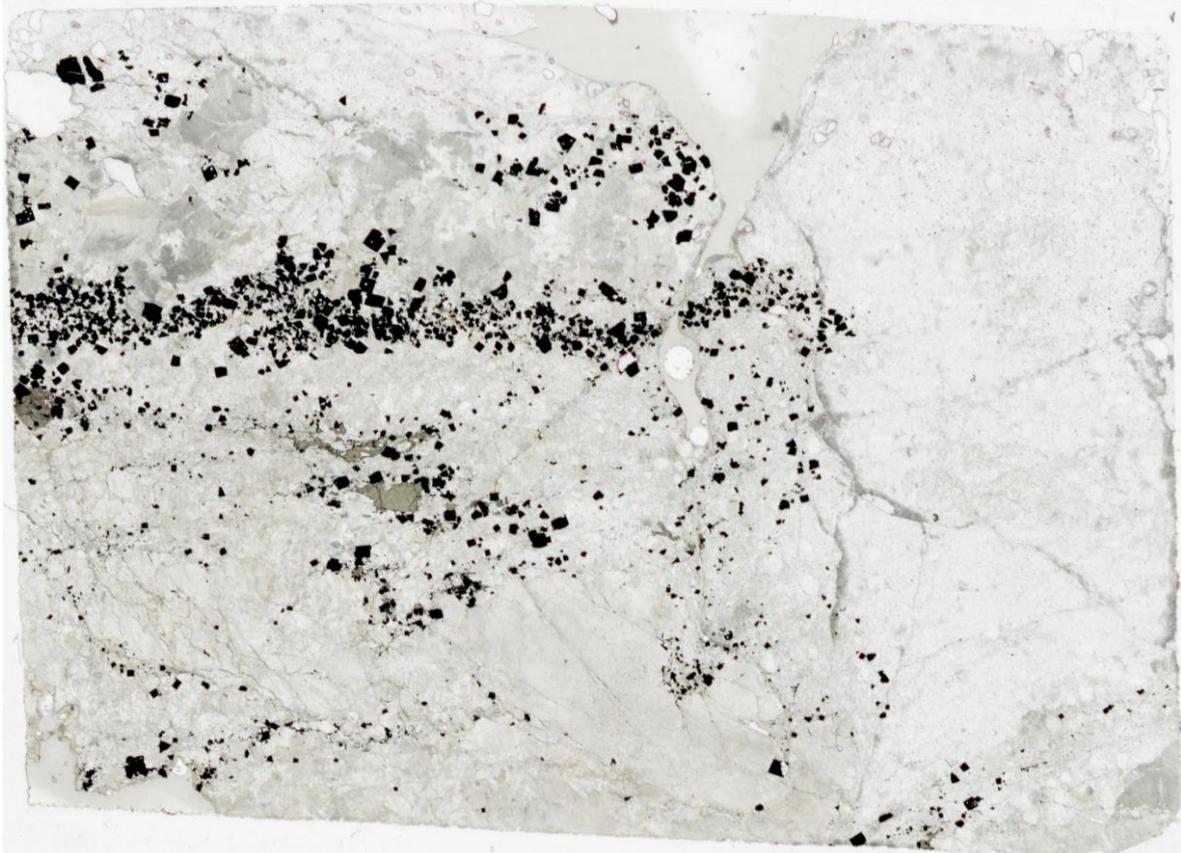


Figure 23: Scan de la lame 3501-5A (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.

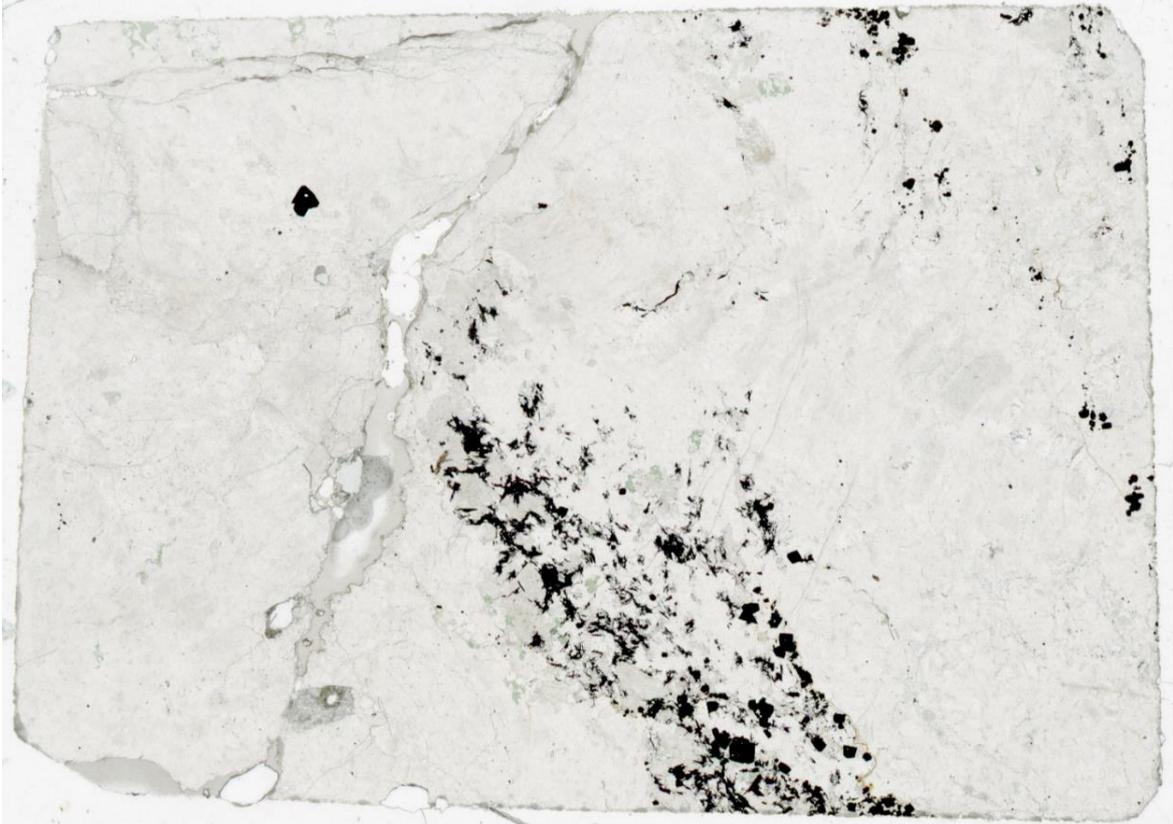


Figure 24: Scan de la lame 3501-5B (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.

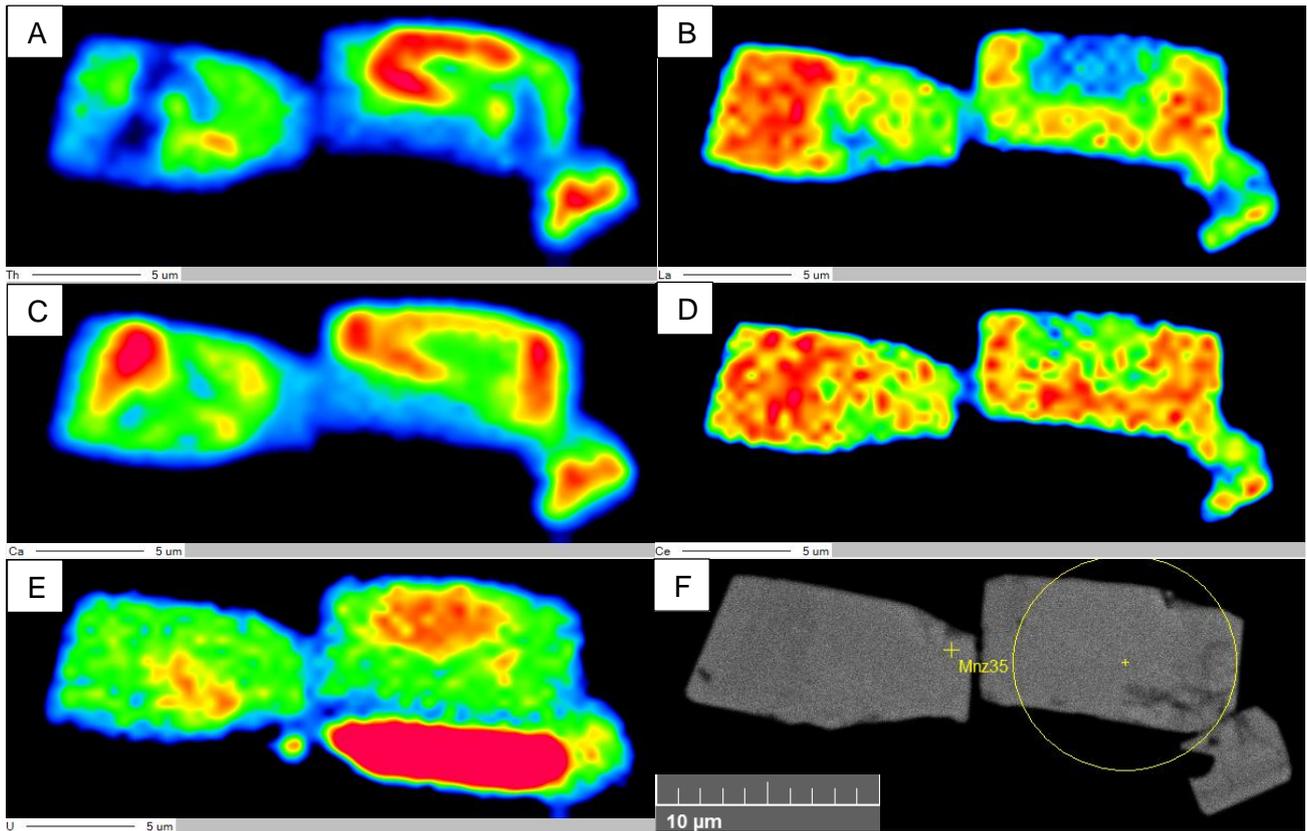


Figure 25: Cartographie élémentaire d'une monazite de la lame 3501-5B de Macôt-La Plagne (Savoie) à la microsonde électronique avec des zonations visibles dans les éléments A) Th; B) La; C) Ca ; D) Ce ; E) U avec les terres rares (La et Ce) en EDS. Et F) l'image au MEB au détecteur BSE.



Figure 26: Echantillon de roche 3501-9 provenant du filon 0/10 Sud quartier des Quartzites Est (lithothèque du BRGM).

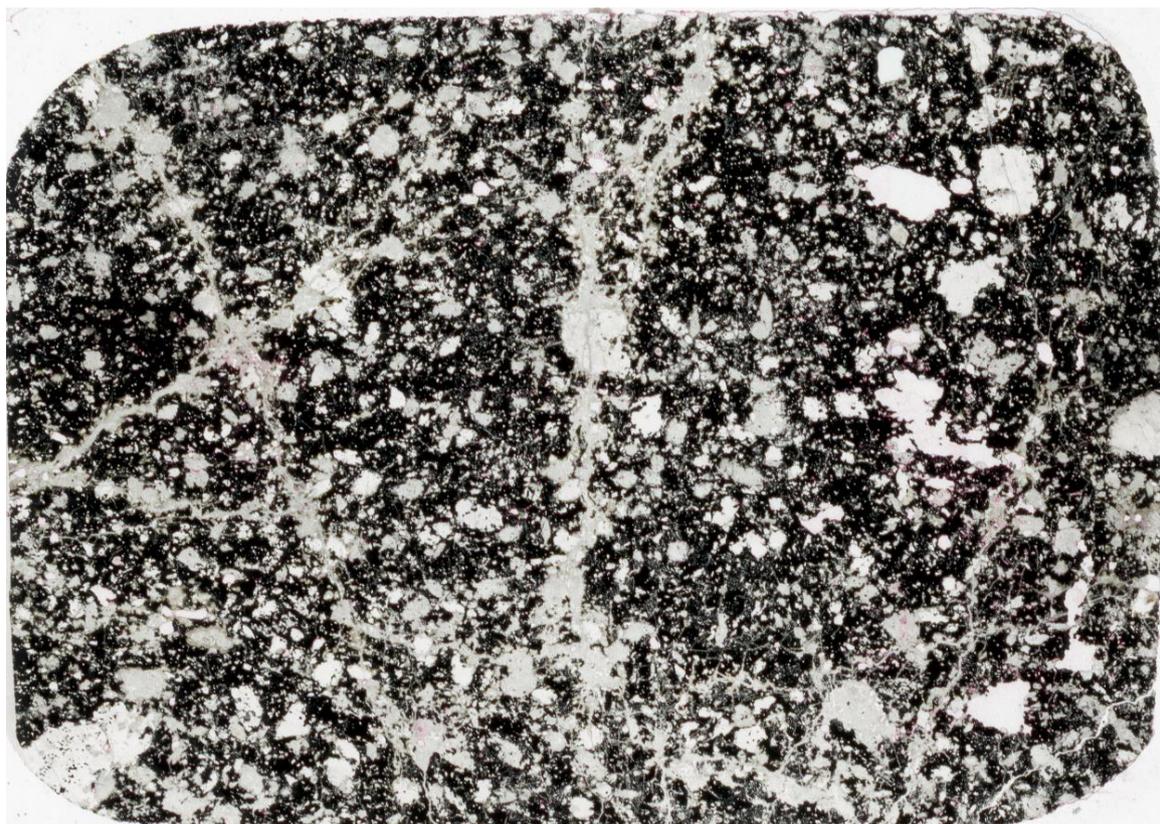


Figure 27: Scan de la lame 3501-9A (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.



Figure 28: Scan de la lame 3501-9B (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.

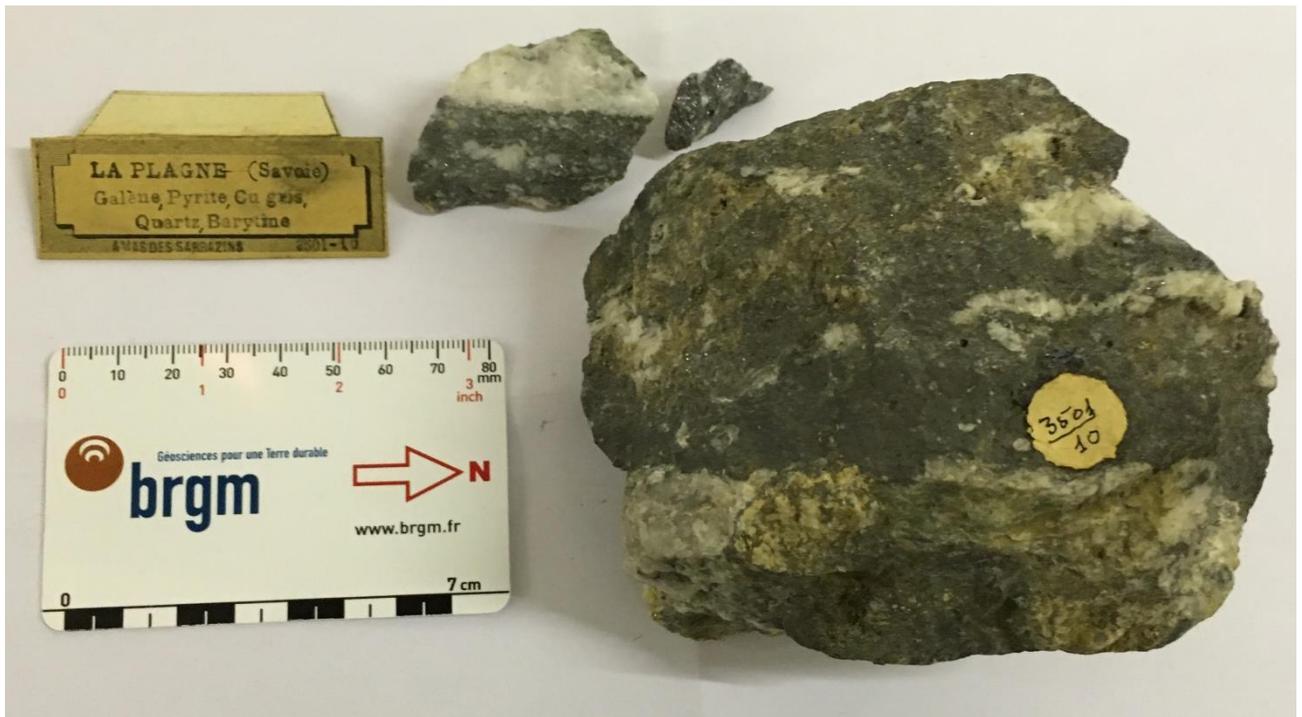


Figure 29: Echantillon de roche 3501-10 provenant du quartier des Sarrazins (lithothèque du BRGM).

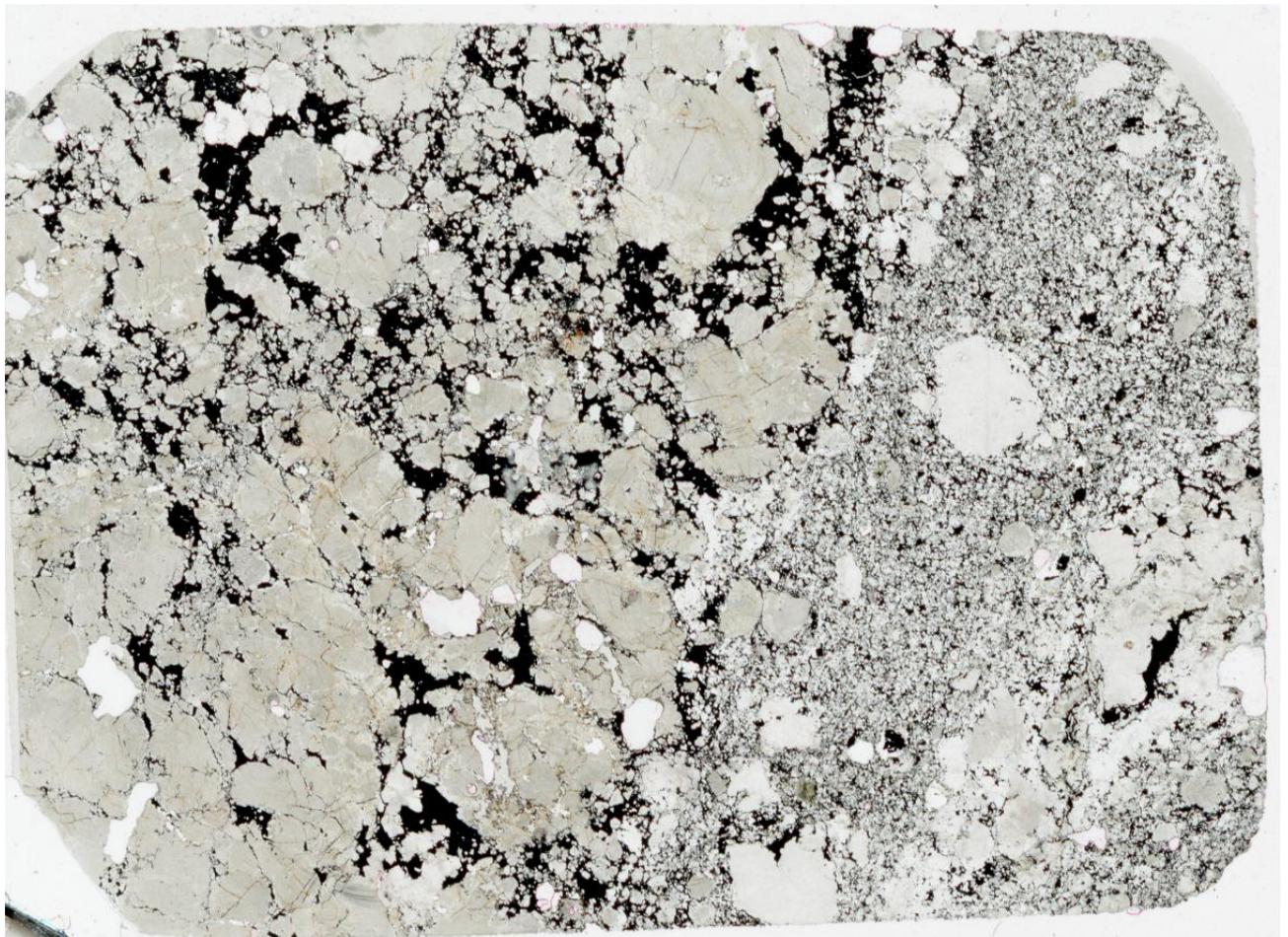


Figure 30: Scan de la lame 3501-9B (Macôt-La Plagne) en lumière transmise.

Annexe C : Résultats EPMA (Peisey et Macôt-La Plagne) en wt.%

No.	CaO	Y2O3	ThO2	SiO2	UO2	P2O5	PbO	La2O3	Nd2O3	Ce2O3	Pr2O3	Sm2O3	Gd2O3	Total	Comment	age	sd	Th/U	La/Nd
6	1.5516	0.6809	6.7569	0.1524	1.1749205	29.9093	0.3384	5.6038	19.8139	22.6989	3.8592	3.8412	2.0944	98.4758	PN16-RO5a_mnz6_pt1	52	5.1157634	5.7509423	0.2828217
7	0.1269	0.5411	0.2273	0.0268	0.2377043	29.8818	0.3246	19.7662	14.0842	30.0445	3.4334	2.0026	0.483	101.1801	PN16-RO5a_mnz11_pt4	1418	42.551029	0.95623	1.4034308
8	2.1909	0.8912	9.6724	0.1807	0.791888	29.3529	0.3209	2.0935	23.2515	11.4512	2.7187	7.8594	3.7935	94.5687	PN16-RO5a_mnz11_pt2	33	4.2708477	12.214353	0.0900372
9	0.6677	0.5636	2.4745	0.089	1.0596515	29.6907	0.0228	11.5085	16.982	28.653	3.7314	2.6558	1.2149	99.3136	PN16-RO5a_mnz11bis_pt1	82	8.8886196	2.3352018	0.6776881
10	0.2461	0.5209	0.5661	0.0381	0.6894278	29.7423	0.0662	14.7451	15.5066	30.0862	3.6357	2.3525	0.9329	99.1281	PN16-RO5a_mnz10_pt1	bdl		0.8211157	0.9508919
11	0.1348	0.5314	0.2798	0.0363	0.3345896	30.0653	0.0168	19.4232	13.9295	29.7199	3.4173	1.9277	0.5332	100.3498	PN16-RO5a_mnz10_pt2	459	36.733396	0.8362484	1.3943932
12	2.3957	0.8706	10.8196	0.2239	0.7555252	29.5522	0.0201	2.25	22.9121	11.7011	2.7698	7.4999	3.6883	95.4588	PN16-RO5a_mnz11_pt1	41	4.1190044	14.320635	0.0982014
13	0.3746	0.6531	1.0055	0.036	1.1186566	29.6816	bdl	12.4396	16.6031	29.8995	3.7815	2.6472	1.2369	99.4773	PN16-RO5a_mnz11_pt3	230	11.038217	0.898846	0.7492336
14	0.3196	0.5734	0.8336	0.4876	0.7186146	29.7422	0.0268	14.1579	15.0248	29.1056	3.546	2.3474	1.1034	97.9869	PN16-RO5a_mnz15_pt2	bdl		1.1600099	0.9423021
15	2.0491	0.7887	8.6841	0.1873	1.0408956	29.9252	0.0224	3.532	22.7014	15.4959	3.3308	6.119	3.0087	96.8855	PN16-RO5a_mnz23_pt1	116	4.5151069	8.3429115	0.1555851
16	0.3461	0.5203	0.7448	0.0618	1.1980161	30.1165	0.0448	13.0626	16.6292	29.608	3.9507	2.6165	1.2053	100.1046	PN16-RO5a_mnz23_pt2	384	11.19651	0.6216945	0.7855219
17	1.1679	0.7706	5.1252	0.1829	1.2379109	29.7625	bdl	7.3786	19.1854	23.3734	3.623	4.279	2.1908	98.2772	PN16-RO5a_mnz24_pt1	85	5.9727778	4.140201	0.3845945
18	0.3918	0.5141	1.0325	0.0913	1.1242433	30.2728	0.0584	13.6639	16.1233	29.9913	3.7055	2.3817	1.0877	100.4385	PN16-RO5a_mnz24_pt2	106	11.368519	0.9183956	0.847463
19	1.5978	0.7445	6.7935	0.1083	1.0807314	29.4799	0.0756	4.849	20.7841	20.9728	3.8754	4.3313	2.3643	97.0572	PN16-RO5a_mnz8_pt1	79	5.2528346	6.286021	0.2333033
20	0.2684	0.4715	0.5562	0.0653	0.786106	29.6073	0.0324	14.545	15.8243	29.9442	3.7419	2.3291	0.9869	99.1586	PN16-RO5a_mnz8_pt2	156	16.874429	0.7075382	0.919156
21	1.5765	0.716	7.0931	0.1397	0.8487645	28.9462	0.0207	4.2469	20.3945	20.8871	3.7961	4.172	2.2478	95.0854	PN16-RO5a_mnz15_pt1	33	5.4426373	8.3569705	0.2082375
22	0.9624	0.6321	3.9512	0.0965	1.0118855	30.4468	0.0337	8.1248	18.8966	27.1274	4.064	3.1688	1.6481	100.1643	PN16-RO5a_mnz17_pt1	60	7.2074446	3.9047895	0.4299609
23	0.3645	0.5384	1.2857	0.0675	0.656043	30.3475	0.0202	13.8887	15.7675	29.6567	3.7576	2.541	1.1161	100.0074	PN16-RO5a_mnz17_pt2	191	16.413923	1.9597802	0.8808435
24	2.357	0.8563	10.2845	0.2216	0.8833525	30.0454	0.0136	2.5946	22.3351	13.9308	3.0686	6.0964	3.1675	95.8548	PN16-RO5a_mnz18_pt1	80	4.1323789	11.642578	0.1161669
25	0.2999	0.4136	0.9767	0.0585	0.5718841	30.2176	0.018	14.1897	15.6556	30.0694	3.7586	2.3786	1.0351	99.6432	PN16-RO5a_mnz18_pt2	469	17.643053	1.7078636	0.9063658
26	0.2792	0.5746	0.6234	0.0438	0.5836751	30.0868	0.0273	15.1057	15.2885	29.7523	3.6839	2.2093	0.8031	99.0616	PN16-RO5a_mnz18_pt3	575	19.902263	1.0680599	0.9880433
27	0.4052	0.5707	1.1728	0.0796	1.0319349	29.7755	0.0437	13.5479	15.0901	28.8921	3.5647	2.2568	0.9122	97.3432	PN16-RO5a_mnz26_pt1	93	11.706164	1.1365058	0.8978005
28	0.5766	0.5396	1.9333	0.0816	1.2432269	29.7409	0.0567	12.0667	15.8514	28.8099	3.606	2.3601	0.9958	97.8618	PN16-RO5a_mnz27_pt1	62	9.1748225	1.5550661	0.7612388
29	1.2644	0.7628	5.468	0.1347	1.1811028	29.2409	0.0625	6.223	20.2746	21.0125	3.5844	4.3732	2.2479	95.8300	PN16-RO5a_mnz25_pt1	86	5.6078051	4.6295716	0.3069358
30	0.3106	0.4994	1.2303	0.0664	0.5222806	29.7497	0.0175	16.2358	14.6648	29.136	3.552	2.1013	0.7787	98.8648	PN16-RO5a_mnz25_pt2	194	18.479455	2.3556302	1.1071273
31	0.7489	0.4948	2.8085	0.1	0.6102129	29.6352	0.0153	12.6473	15.8651	28.9532	3.6395	2.5655	1.2669	99.3504	PN16-RO5a_mnz28_pt1	bdl		4.6024924	0.7971775
32	1.4286	0.6362	6.5015	0.4445	0.7139382	29.3953	0.0332	8.5008	16.9111	25.5356	3.6838	2.9254	1.536	98.2459	PN16-RO5a_mnz29_pt1	41	6.1233628	9.1065311	0.5026758
33	1.0949	0.5461	4.8356	0.3537	0.7249988	29.577	0.0237	10.3695	16.2857	27.149	3.5804	2.836	1.4175	98.7941	PN16-RO5a_mnz29_pt2	bdl		6.6698045	0.6367242
34	0.5044	0.4761	1.7214	1.2776	0.5417009	29.3447	bdl	14.4763	15.3595	29.4913	3.6498	2.4286	1.4259	100.6973	PN16-RO5a_mnz29_pt3	bdl		3.1777682	0.9424981
35	0.6674	0.5092	2.5718	1.5537	0.7317828	29.4879	0.0151	12.011	15.3576	28.3518	3.6811	2.5198	1.2219	98.6801	PN16-RO5a_mnz29_pt4	100	10.292584	3.5144309	0.7820883
36	2.4696	0.7271	10.4254	0.3978	0.7802393	28.8344	bdl	5.2414	18.6918	20.753	3.4351	3.9152	2.2153	97.8863	PN16-RO5a_mnz29_pt5	bdl		13.361797	0.2804117
37	0.4328	0.5783	1.3881	0.1828	0.580434	30.6848	bdl	12.1079	16.4042	29.8692	3.8822	2.6937	1.3247	100.1291	PN16-RO5a_mnz29_pt6	117	16.303269	2.3914863	0.7380976
41	1.9227	0.7145	8.9239	0.4044	0.5914012	30.0079	0.3193	8.052	16.4481	21.3227	3.13	4.1785	2.3629	98.3783	PN16-RO5a_mnz30_pt1	bdl		15.089418	0.4895398
42	2.4769	0.7599	11.339	3.4045	0.6698219	28.3003	0.3219	5.0291	16.6106	15.3245	2.7306	5.1084	2.7704	94.8459	PN16-RO5a_mnz30_pt2	66	3.9379287	16.928381	0.3027645
43	2.2692	0.7591	10.3353	0.5	0.5621511	29.3671	0.3316	5.7533	17.5556	17.371	2.8455	5.2981	2.9815	95.9295	PN16-RO5a_mnz30_pt3	41	4.2599779	18.385269	0.3277188
44	0.7228	0.2689	1.7198	0.5815	0.0292136	29.6247	bdl	18.4776	11.9715	31.2491	3.1384	1.7634	0.9111	100.4580	3501-5B_mnz53_pt1	bdl		58.869882	1.5434657
45	0.5341	0.563	1.44	0.2932	0.014224	29.3981	0.0372	15.8126	13.2743	30.5918	3.4138	2.3437	1.3494	99.0654	3501-5B_mnz53bis_pt1	bdl		101.23735	1.1912191
46	0.9756	0.4558	3.1546	1.1787	0.1996787	29.2342	0.0208	12.765	14.6571	30.2434	3.5714	1.99	0.781	99.2273	3501-5B_mnz17bis_pt1	bdl		15.798383	0.870909
47	0.6103	0.4613	1.7217	8.3516	0.1782986	28.3411	bdl	14.139	11.8786	28.4994	3.1753	1.9459	0.8406	100.1431	3501-5B_mnz54_pt1	305	22.20359	9.6562749	1.1902918
48	0.8123	0.5048	1.6259	0.2346	0.4090554	30.1592	bdl	15.0271	13.191	31.7673	3.4871	1.9409	0.7283	99.8876	3501-5B_mnz47_pt1	108	17.580832	3.9747673	1.1391934
49	0.8718	0.3148	2.513	1.5363	0.1948473	28.3418	bdl	15.1426	13.3941	29.8801	3.4545	1.7874	0.7294	98.1606	3501-5B_mnz28bisH_pt1	127	16.482023	12.897279	1.1305426
50	0.4388	0.3626	0.6809	1.5317	0.0886209	29.7299	0.0295	20.7945	11.0664	31.2176	3.1837	1.1844	0.3383	100.6469	3501-5B_mnz28bisD_pt1	333	52.161202	7.68329	1.8790664
51	0.2729	0.3651	0.8126	7.1826	0.0118805	28.9574	0.0133	16.1564	12.6223	30.4511	3.1958	1.9832	1.0206	103.0452	3501-5B_mnz28bisG_pt1	bdl		68.398025	1.2799886
52	0.7178	0.3802	2.4356	0.4615	0.2540588	29.6472	0.0167	13.2164	14.054	32.5029	3.6304	1.8538	0.4115	99.5821	3501-5B_mnz50_pt1	bdl		9.5867586	0.9404013
53	0.6217	0.345	1.4318	0.3315	0.0366888	29.5433	0.0136	18.1612	12.2546	31.8856	3.2931	1.657	0.8204	100.3955	3501-5B_mnz46_pt1	bdl		39.025555	1.4819904
54	0.8495	0.3623	2.8552	0.2574	0.2023439	29.6478	bdl	14.6822	13.3044	30.9614	3.393	2.0174	0.8098	99.3427	3501-5B_mnz35_pt1	bdl		14.110629	1.1035597
55	0.6018	0.4032	1.547	0.2299	0.1904787	29.8206	bdl	15.8495	12.7969	31.8773	3.3969	1.7134	0.5557	98.9827	3501-5B_mnz35_pt2	bdl		8.121643	1.2385421

No.	CaO	Y2O3	ThO2	SiO2	UO2	P2O5	PbO	Dy2O3	Gd2O3	Sm2O3	Pr2O3	Nd2O3	Ce2O3	La2O3	Eu2O3	Total	Comment
1	3.6059	0.7724	16.9908	2.1666	0.7534	27.3861	0	0.7167	5.0715	8.6266	2.8051	18.5116	10.9241	2.738	6.8917	107.9605	PN16-RO5a_mnz30_pt4
2	2.9783	0.8916	19.59	0.7648	0.6956	28.6229	0.0276	0.6486	4.3478	7.2351	2.8598	18.7705	8.6303	2.1571	6.0457	104.2656	PN16-RO5a_mnz30_pt5
3	1.6557	0.8043	7.1098	0.1623	1.329	28.6828	0.0161	0.5329	3.5157	6.0613	3.9353	23.488	16.9283	3.7958	5.3879	103.4052	PN16-RO5a_mnz11_pt5

Tableau 4: Analyse EPMA de grains de monazite de Pesey avec l'Eu à environ 5 wt.%

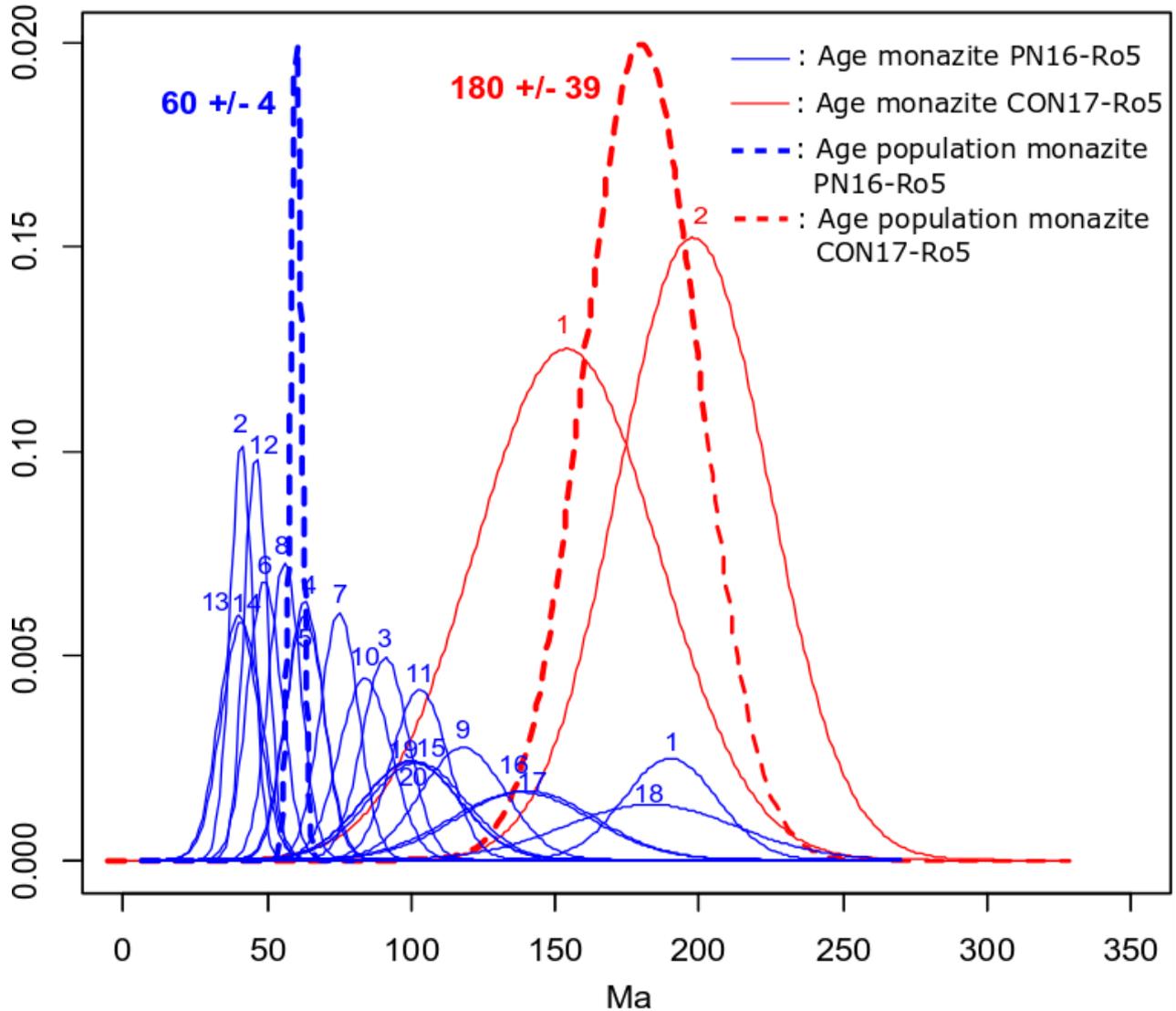


Figure 31: Courbes gaussiennes représentant l'âge des monazites analysées à l'EPMA., en trait plein bleu les grains de monazite de PN16-Ro5a (Pesey-Nancroix) (Dembélé, 2018), et en trait plein rouge celles de CON17-Ro5 (Contamines-Montjoie). Ainsi que celle de la moyenne des âges de chaque population, en pointillé bleu PN16-Ro5a (Pesey-Nancroix), et en rouge CON17-Ro5 (Contamines-Montjoie).

Annexe D : Données LA-ICP-MS de Macôt-La Plagne et Peisey-Nancroix

	rapport brute mesuré								Radiogenic				Age (Ma)				Age (Ma)	
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		f_{206}	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		Th/U*	Pb(ppm)*	Th(ppm)*	U(ppm)*	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
	±	±	±	±	%	±	±	±	±	±	±	±	±					
5b-13-1	0.79896	0.04262	12.46337	0.55114	0.11320	0.00397	0.00847	0.00019	92	0.00932	0.00033	59.8	2.1	53	147	11785	223	170.4
5b-16-1	0.70336	0.04516	4.50277	0.23628	0.04645	0.00187	0.00987	0.00025	80	0.00928	0.00037	59.5	2.4	19	92	6481	349	198.4
5b-16-2	0.79102	0.06809	11.88342	0.81603	0.10901	0.00638	0.01014	0.00036	91	0.01004	0.00059	64.4	3.8	42	128	8482	205	203.8
5b-17-1	0.58628	0.03719	1.46923	0.07797	0.01818	0.00068	0.00342	0.00008	66	0.00625	0.00023	40.1	1.5	26	56	12405	488	69.0
5b-24-1	0.23121	0.02988	0.23215	0.02757	0.00729	0.00038	0.00287	0.00008	22	0.00568	0.00030	36.5	1.9	16	45	13915	871	57.9
5b-28-1	0.64362	0.10121	4.27771	0.53665	0.04823	0.00481	0.01374	0.00085	73	0.01317	0.00131	84.4	8.4	13	64	3258	243	275.7
5b-30-1	0.50875	0.04267	0.89827	0.06348	0.01281	0.00060	0.00399	0.00011	56	0.00562	0.00026	36.1	1.7	17	35	6949	423	80.4
5b-37-1	0.53913	0.04574	0.93146	0.06616	0.01254	0.00061	0.00466	0.00015	60	0.00503	0.00024	32.4	1.6	10	34	5224	518	93.9
5b-42-1	0.49910	0.03313	0.77110	0.04411	0.01121	0.00040	0.00244	0.00005	55	0.00505	0.00018	32.5	1.2	27	91	30760	1166	49.2
5b-53-1	0.50329	0.06524	0.81862	0.08875	0.01180	0.00086	0.00389	0.00016	55	0.00526	0.00038	33.8	2.5	14	30	6007	426	78.4
5b-53-bis	0.48153	0.04336	0.57481	0.04409	0.00866	0.00042	0.00248	0.00006	53	0.00409	0.00020	26.3	1.3	26	64	22687	871	50.0
4b-1-1	0.50148	0.03547	1.05095	0.06385	0.01521	0.00059	0.00540	0.00014	55	0.00681	0.00026	43.7	1.7	10	59	7744	762	108.8
4b-1-2	0.47532	0.02943	0.78661	0.04276	0.01201	0.00039	0.00464	0.00010	52	0.00576	0.00019	37.0	1.2	9	81	12078	1386	93.5
4b-2-1	0.60003	0.02837	1.37826	0.05899	0.01667	0.00039	0.00744	0.00013	67	0.00545	0.00013	35.0	0.8	7	294	25413	3689	149.7
10A-13-2	0.80209	0.04399	9.28959	0.41246	0.08402	0.00309	0.02929	0.00077	92	0.00660	0.00024	42.4	1.6	2	145	3152	344	583.2
10A-12-1	0.85887	0.03212	16.60377	0.53467	0.14025	0.00349	0.05752	0.00102	99	0.00123	0.00003	7.9	0.2	9	537	6134	709	1129.8
10A-12-2	0.87817	0.02775	73.87871	2.21198	0.61032	0.01387	0.18701	0.00292	100	-	-	-	-	11	828	2878	252	3463.4

Tableau 5: Tableau des données obtenues au LA-ICP-MS sur les échantillons de La Plagne (3501-4B, 3501-5B et 3501-10A) avec l'incertitude donnée à 1σ . Avec f_{206} (en %) le pourcentage de plomb commun calculé obtenue des mesures brutes. L'âge $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ n'est pas corrigé.

	rapport brute mesuré				Radiogenic				Age (Ma)				Age (Ma)					
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th		f ₂₀₆	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		Th/U*	Pb(ppm)*	Th(ppm)*	U(ppm)*	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th
	±	±	±	±	±	±	±	±	%	±	±	±	±					
PN16-1	0.81328	0.01617	13.72165	0.26260	0.12243	0.00185	0.35525	0.00475	94	0.00793	0.00012	50.9	0.8	1	1107	1978	1900	6141.1
PN16-1-2	0.72645	0.01807	3.40193	0.07588	0.03398	0.00060	0.10009	0.00151	83	0.00582	0.00010	37.4	0.7	1	375	2307	2505	1927.1
PN16-2	0.36037	0.01398	0.46169	0.01603	0.00930	0.00020	0.01091	0.00023	38	0.00578	0.00012	37.1	0.8	1	118	5807	4119	219.2
PN16-3-1	0.69454	0.03302	4.13191	0.15986	0.04317	0.00137	0.02980	0.00069	79	0.00909	0.00029	58.3	1.9	5	72	1611	351	593.2
PN16-4	0.66543	0.03268	2.11574	0.08454	0.02307	0.00074	0.02305	0.00057	75	0.00568	0.00018	36.5	1.2	3	189	5130	1868	460.4
PN16-6-1	0.12482	0.00557	0.10565	0.00452	0.00614	0.00011	0.00397	0.00008	9	0.00559	0.00010	35.9	0.6	1	77	8134	5760	80.0
PN16-22-1	0.07663	0.00481	0.06213	0.00379	0.00588	0.00012	0.00320	0.00009	3	0.00570	0.00012	36.6	0.7	1	77	7822	7010	64.5
PN16-22-2	0.11128	0.00663	0.09611	0.00549	0.00627	0.00014	0.00370	0.00009	7	0.00581	0.00013	37.4	0.8	2	32	3826	2295	74.6
PN16-11-1	0.61890	0.01326	1.80700	0.03791	0.02119	0.00029	0.00914	0.00011	70	0.00643	0.00009	41.3	0.6	7	820	56841	8518	183.8
PN16-11-2	0.42490	0.01525	0.62289	0.02001	0.01064	0.00022	0.02484	0.00048	46	0.00576	0.00012	37.1	0.8	1	85	1764	2453	495.7
PN16-10-1	0.17085	0.00643	0.14993	0.00537	0.00637	0.00011	0.00567	0.00011	15	0.00544	0.00009	35.0	0.6	1	114	7465	8171	114.2
PN16-10-2	0.22926	0.01188	0.23044	0.01099	0.00730	0.00018	0.00787	0.00020	22	0.00571	0.00014	36.7	0.9	1	51	2957	2690	158.4
PN16-12-1	0.11721	0.00466	0.08577	0.00329	0.00531	0.00009	0.00216	0.00003	8	0.00488	0.00008	31.4	0.5	4	207	56471	13233	43.6
PN16-12-2	0.22657	0.00741	0.21501	0.00667	0.00689	0.00011	0.00253	0.00003	21	0.00541	0.00009	34.8	0.6	8	130	35450	4749	51.0
PN16-12-3	0.21315	0.00793	0.21434	0.00750	0.00730	0.00013	0.00504	0.00009	20	0.00585	0.00010	37.6	0.7	2	79	7678	3931	101.6
PN16-12-4	0.29749	0.01153	0.33264	0.01185	0.00811	0.00016	0.01011	0.00020	30	0.00566	0.00011	36.4	0.7	1	53	2554	2259	203.2
PN16-14-1	0.22559	0.00952	0.22259	0.00875	0.00716	0.00014	0.00609	0.00012	21	0.00563	0.00011	36.2	0.7	2	112	8636	5807	122.7
PN16-14-2	0.21578	0.00989	0.19233	0.00820	0.00647	0.00014	0.00533	0.00011	20	0.00517	0.00011	33.2	0.7	2	81	7147	4646	107.4
PN16-8-1	0.32483	0.01185	0.34716	0.01151	0.00775	0.00015	0.01118	0.00022	34	0.00515	0.00010	33.1	0.6	1	275	12445	11273	224.6
PN16-8-2	0.27425	0.00947	0.27633	0.00884	0.00731	0.00013	0.00616	0.00011	27	0.00531	0.00009	34.2	0.6	2	131	10753	5939	124.1
PN16-8-3	0.25985	0.00925	0.27701	0.00916	0.00773	0.00014	0.00468	0.00008	26	0.00576	0.00010	37.0	0.7	3	102	11619	4194	94.3
PN16-13	0.08675	0.00346	0.05651	0.00220	0.00473	0.00007	0.00230	0.00004	4	0.00453	0.00007	29.1	0.4	2	205	41601	17847	46.4
PN16-13-2	0.25144	0.01187	0.25895	0.01121	0.00747	0.00017	0.00680	0.00017	25	0.00564	0.00013	36.2	0.8	1	62	4186	2998	136.9
PN16-19-1	0.09380	0.00482	0.07466	0.00371	0.00578	0.00011	0.00273	0.00005	5	0.00548	0.00010	35.2	0.7	2	74	12572	5254	55.1
PN16-19-2	0.08703	0.00632	0.06694	0.00469	0.00558	0.00013	0.00228	0.00006	4	0.00534	0.00012	34.3	0.8	3	79	16510	5683	46.0
PN16-5-1	0.64673	0.02384	1.78312	0.05650	0.02000	0.00046	0.01502	0.00027	73	0.00539	0.00012	34.6	0.8	4	192	8082	1993	301.2
PN16-9-1	0.18944	0.00696	0.14966	0.00522	0.00573	0.00010	0.00595	0.00011	17	0.00476	0.00008	30.6	0.5	1	188	13142	13109	119.8
PN16-9-2	0.21855	0.00800	0.19654	0.00680	0.00653	0.00011	0.00484	0.00009	20	0.00519	0.00009	33.4	0.6	2	125	12253	6950	97.5
PN16-20-1	0.22038	0.00997	0.21240	0.00895	0.00699	0.00015	0.00817	0.00019	21	0.00554	0.00012	35.6	0.8	1	86	4361	4839	164.4
PN16-20-2	0.19384	0.00928	0.17178	0.00771	0.00643	0.00014	0.00609	0.00014	17	0.00531	0.00012	34.1	0.7	1	74	5121	4601	122.7
PN16-21-1	0.19189	0.00697	0.18589	0.00646	0.00703	0.00012	0.00668	0.00012	17	0.00582	0.00010	37.4	0.6	1	103	6113	6052	134.5
PN16-6-2	0.13325	0.01150	0.13063	0.01067	0.00711	0.00021	0.00443	0.00018	10	0.00640	0.00019	41.1	1.2	1	53	4418	3400	89.3
PN16-15-1	0.10057	0.00814	0.08118	0.00630	0.00586	0.00015	0.00208	0.00004	6	0.00551	0.00014	35.4	0.9	7	223	72348	10844	42.0
PN16-15-2	0.20802	0.01481	0.19698	0.01297	0.00687	0.00020	0.00489	0.00016	19	0.00555	0.00016	35.7	1.0	2	70	6664	3786	98.5
PN16-17-1	0.26779	0.01515	0.30665	0.01587	0.00831	0.00021	0.00578	0.00015	27	0.00611	0.00015	39.2	1.0	2	156	13551	6328	116.4
PN16-17-2	0.23561	0.01319	0.22291	0.01154	0.00686	0.00017	0.00401	0.00009	23	0.00531	0.00013	34.1	0.8	3	131	16742	6488	80.8
PN16-18-1	0.82500	0.02436	27.00338	0.78772	0.23741	0.00300	0.14288	0.00140	95	0.01196	0.00015	76.6	1.0	5	19150	82293	15605	2698.0
PN16-23-1	0.41953	0.02118	0.54271	0.02457	0.00938	0.00024	0.00778	0.00017	45	0.00514	0.00013	33.1	0.8	3	200	14563	5796	156.6
PN16-23-2	0.85572	0.02708	114.02023	3.56718	0.96647	0.01289	5.59988	0.06193	99	0.01220	0.00016	78.2	1.0	1	19235	2184	3640	38122.3
PN16-24-1	0.84450	0.02786	42.55994	1.38082	0.36554	0.00501	1.08647	0.01154	97	0.00965	0.00013	61.9	0.8	1	7698	4371	4017	14858.1
PN16-7-1	0.37805	0.02048	0.49549	0.02434	0.00951	0.00025	0.01062	0.00024	40	0.00570	0.00015	36.6	1.0	2	219	10996	6847	213.4
PN16-25-1	0.48181	0.02535	0.74955	0.03540	0.01128	0.00030	0.01199	0.00026	53	0.00532	0.00014	34.2	0.9	2	224	10757	5072	240.8
PN16-16-1	0.15417	0.01727	0.12709	0.01345	0.00598	0.00023	0.00306	0.00012	13	0.00523	0.00020	33.6	1.3	3	48	8557	2842	61.7
PN16-21-2	0.33200	0.02526	0.33761	0.02304	0.00738	0.00027	0.00851	0.00032	34	0.00484	0.00018	31.1	1.1	1	98	5284	4599	171.2

Tableau 6 : Tableau des données obtenues au LA-ICP-MS sur l'échantillon de Peisey-Nancroix (PN16-RO5a) avec l'incertitude donnée à 1σ. Avec f₂₀₆ (en %) le pourcentage de plomb commun calculé obtenue des mesures brutes. L'âge ²⁰⁸Pb/²³²Th n'est pas corrigé.