

L'isotopie du plomb, un outil pour décrypter les gîtes minéraux de l'Hexagone

Lead isotopes, a tool for deciphering the mineral deposits of France

Éric MARCOUX¹

Géologie de la France n° 1, 2026, p. 1-91, 65 fig., 20 tab., 5 ann. (11 fig., 7 tab.).

Mots-clés : Isotopes du plomb, France, Paragenèse, Gîtes minéraux, Métallogénie.

Keywords: Lead isotopes, France, Paragenesis, Ore deposits, Metallogeny.

Résumé

Ce travail est une synthèse interprétée de l'ensemble des analyses isotopiques de plomb commun réalisées en France sur les minéralisations et les principales roches. En tout, 954 analyses sont fournies (environ 800 sur plus de 380 gisements et indices et 150 sur les roches). Globalement, les compositions isotopiques sont dispersées, s'étalant de 17,34 à 20,10 (rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), de 15,45 à 15,75 (rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et de 37,21 à 39,04 (rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$). Un tri par types de minéralisations (amas sulfurés polymétalliques paléozoïques ; filons aurifères, minéralisations périgranitiques à étain-tungstène, filons antimonifères et plombo-zincifères hercyniens et tardi-hercyniens, plomb-zinc stratiforme dans le Mésozoïque...) montre d'assez larges recouvrements pour ces différents types. Un tri par épisodes métallogéniques montre sans surprise des valeurs d'autant plus radiogéniques que l'épisode est récent, les fluides hydrothermaux sollicitant des sources de plus en plus enrichies en isotopes radiogéniques. La distribution des compositions dans une région reflète donc grossièrement la chronologie des événements minéralisateurs.

Plusieurs districts polymétalliques du Massif central et du Massif armoricain ont fait l'objet d'études couplées isotopie – paragenèse qui permettent de dégager des conclusions de portée générale. Les signatures isotopiques montrent qu'il existe deux sources potentielles du plomb (et des métaux associés) des minéralisations : lithologique et gîtologique. La source lithologique est constituée par les roches locales lessivées par les fluides hydrothermaux : c'est la plus répandue et la plus sollicitée. Mais ce n'est pas nécessairement la roche encaissante qui est la source principale, et les minéralisations périgranitiques à étain-tungstène-molybdène ne portent pas toujours le plomb magmatique du magma générateur. La source gîtologique est constituée par des minéralisations précoces, remobilisées et redistribuées à la faveur d'épisodes hydrothermaux ultérieurs : elle est très localisée mais très concentrée. Ce phénomène d'héritage (ou de recyclage) métallique se manifeste à l'échelle de la structure minéralisée et à l'échelle régionale. Il se traduit sur les plans minéralogiques et isotopiques et s'exprime particulièrement bien lorsque des minéralisations antimonio-plombifères anciennes sont re-

prises par des fluides plombifères plus récents. À l'échelle d'une structure minéralisée, la signature isotopique peut être constante si l'hydrothermalisme générateur est unique et ponctuel, ou variable avec des *trends* ou des *clusters* lorsque la structure résulte de plusieurs épisodes minéralisés qui se sont superposés. La signature isotopique peut parfois permettre de préciser le modèle de genèse : c'est le cas pour le gisement de zinc de Saint-Salvy (où l'héritage du plomb-zinc cambrien est exclu), le gisement d'or de Salsigne (un épisode tardi-hercynien unique), ou le gisement de zinc des Malines (où le plomb cambrien est écarté), par exemple.

L'Hexagone a vu trois arrivées de plomb à la faveur des magmatismes et hydrothermalismes qui se sont succédés sur le territoire lors des grands événements géologiques de son histoire : cadomien (en nord-Armorique pour l'essentiel), pré-hercynien (en Montagne noire) et hercynien, ubiquiste. Une quatrième arrivée crétacée est assez probable mais se limite aux Pyrénées. Les arrivées plus récentes ont *pro parte* remobilisé le(s) plomb(s) plus ancien(s) entraînant un mélange global des signatures et donc un effet cumulatif. Le plomb est très majoritairement d'origine crustale, la participation notable du manteau étant limitée à des amas sulfurés hercyniens de Brévenne (Chessy, Sain-Bel) et édiacariens d'Armorique (Kerham, Hôtel-Piquet, La Haie-Claire, La Comterie...).

La géochimie, isotopique du plomb peut être utilisée en exploration minière pour rapporter les indices en cours de reconnaissance à des gîtes, économiques ou non, et donc pour les hiérarchiser. On peut considérer que la méthode est opérationnelle pour les amas sulfurés volcanogéniques du territoire national. Nous donnons aussi quelques exemples d'utilisation de la géochimie isotopique du plomb en archéologie minière : cette méthode peut alors permettre d'identifier la mine source du plomb et/ou de l'argent qui ont servi à confectionner objets, armes ou monnaies.

¹ Expert en ressources minérales, Professeur émérite de l'Université d'Orléans - Correspondance : eric.marcoux55@gmail.com

Note soumise le 6 août 2025, acceptée pour publication le 10 novembre 2025, publiée le 16 février 2026.

Abstract

This work is an interpreted synthesis of all the isotopic analyzes of common lead carried out in France on the ore deposits and the main rocks. In total, 954 analyzes are provided (around 800 on more than 380 deposits and showings and 150 on rocks).

Overall, the isotopic compositions are dispersed, ranging from 17.34 to 20.10 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio), 15.45 to 15.75 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio), and 37.21 to 39.04 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratio). A sorting by type of deposit (Paleozoic stratiform polymetallic sulphide; gold-bearing veins, tin-tungsten perigranitic mineralizations, Hercynian and late-Hercynian antimoniferous and lead-zinciferous veins, stratiform lead-zinc in the Mesozoic, etc.) shows quite broad overlaps for these different types. Sorting by mineralized episodes unsurprisingly shows values that are all the more radiogenic the more recent the episode is, the hydrothermal fluids feeding from sources increasingly enriched in radiogenic isotopes. The distribution of compositions in a region therefore roughly reflects the chronology of mineralizing events.

Several polymetallic districts of the Massif Central and the Armorican Massif have been the subject of coupled isotopic – paragenetic studies which make it possible to draw general conclusions. The isotopic signatures show that there are two potential sources of lead (and associated metals) from the mineralization: lithological and gitological. The lithological source is made up of local rocks leached by hydrothermal fluids: it is the most widespread and the most used. But it is not necessarily the surrounding rock which is the main source, and perigranitic tin-tungsten-molybdenum deposits do not always carry the magmatic lead of the generating magma. The gitological source is made up of early mineralization, remobilized and redistributed thanks to subsequent hydrothermal episodes: it is very localized but very concentrated. This phenomenon of metallic inheritance (or recycling) manifests itself at the scale of the mineralized structure and at the regional scale.

It is reflected on the mineralogical and isotopic levels and is expressed particularly well when ancient antimony-lead mineralizations are taken up by more recent lead-bearing fluids. On the scale of a mineralized structure, the isotopic signature can be constant if the generating hydrothermalism is unique and punctual, or variable with trends or clusters when the structure results from several mineralized episodes which have overlapped. The isotopic signature can sometimes make it possible to specify the genesis model: this is the case for the zinc deposit of Saint-Salvy (where the legacy of Cambrian lead-zinc is excluded), the gold deposit of Salsigne (a unique late-Hercynian episode), or the zinc deposit in Les Malines (where Cambrian lead is excluded), for example.

France has seen three arrivals of lead thanks to the magmatism and hydrothermalism which followed one another on the territory during the major geological events of its history: Cadomian (mainly in North Armorica), pre-Hercynian (in the Black Mountains) and Hercynian, ubiquitous. A fourth Cretaceous arrival is quite probable but limited to the Pyrenees. The more recent arrivals have in part remobilized the older lead(s), leading to an overall mixture of signatures and therefore a cumulative effect. The lead is mainly of crustal origin, the notable participation of the mantle being limited to Hercynian sulphide clusters of Brévenne (Chessy, Sain-Bel)

and Ediacaran of Armorique (Kerham, Hôtel-Piquet, La Haie-Claire, La Comterie ...). Lead isotopic geochemistry can be used in mining exploration to relate the indices currently being recognized to deposits, whether economical or not, and therefore to prioritize them. We can consider that the method is operational for the volcanogenic sulphide ore deposits of the national territory. We also give some examples of the use of lead isotopes in mining archaeology: this method can then make it possible to identify the source mine of lead and/or silver which were used to make objects, weapons or coins.

Préambule : pourquoi ce travail ?

Ce travail est une synthèse des analyses isotopiques de plomb commun obtenues en métropole sur les minéralisations et les roches. Au total, il regroupe 954 analyses isotopiques : 806 (dont 33 duplicatas) mesurées sur sulfures (et quelques oxydes de fer) de 386 gisements, gîtes et indices, et 148 roches totales et feldspaths. Les analyses ont été réalisées au laboratoire de géochimie isotopique du BRGM à Orléans sur un spectromètre de masse Finnigan MAT 261 à thermo-ionisation (cf. Annexe 5). L'essentiel est extrait de ma thèse de doctorat d'état soutenue en juin 1986 et publiée en 1987 (mémoire BRGM n° 117), enrichie des résultats acquis postérieurement au BRGM (1986-1998) puis à l'université d'Orléans (1998-2022), et de ceux publiés par les laboratoires de Montpellier, Paris VI et Rennes. Toutes ces données sont fournies dans les deux tableaux de l'annexe 1.

Accessoirement, sept analyses isotopiques ont été réalisées sur des gîtes aurifères du Paléoprotérozoïque inférieur de Guyane dans le cadre d'une étude globale centrée sur le Birrimien d'Afrique de l'Ouest-Guyane (Marcoux et Milési, 1993 ; annexe 2), et une dizaine d'autres sur des monnaies anciennes afin de montrer la pertinence de ces analyses en archéologie minière (annexe 3). Les résultats obtenus sur les amas sulfurés de Sud-Ibérie et leurs gossans (Marcoux, 1998) sont aussi donnés pour comparaison avec les amas sulfurés de l'Hexagone et validation de cette méthode en exploration minière.

Échantillons analysés et méthodologie de prélèvement

Les sulfures analysés proviennent d'échantillons récoltés sur le terrain et en sondages, et surtout de la très importante collection de sections polies de l'ancien département de minéralogie du BRGM, riche à cette époque de plus de 50 000 sections polies répertoriées. Il s'agit pour l'essentiel de galènes (PbS), fréquemment de sulfoantimoniures de plomb notés « sulfosels de Pb/Sb » dans ce travail (semseyite, boulangérite, zinkénite, fülöppite, bournonite...), rarement d'autres sulfosels plombifères (géocronite, andorite, diaphorite, gustavite...), d'un séléniure de plomb (clausthalite PbSe) ou de sulfures à plomb en traces (pyrite, sphalérite, berthièrite, stibine...), (Fig. 1.1 ; Tab. 1.1). Dans ce dernier cas, des dosages de Pb et U ont généralement été réalisés afin de calculer les rapports μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) et W ($^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$) et de corriger les rapports mesurés pour la désintégration *in situ*, des corrections qui nécessitent de connaître l'âge du minéral.

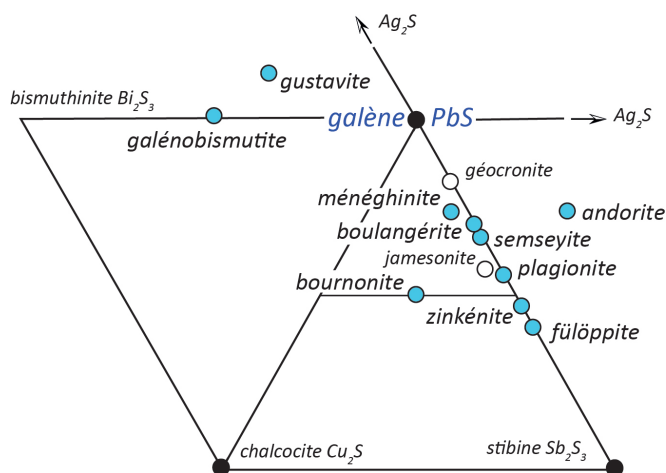


Figure 1.1 – Minéraux plombifères analysés replacés dans un diagramme multipôle Pb-Sb-Cu-Bi-Ag. Les cercles vides sont des projections de minéraux extérieurs au diagramme (la jamesonite contient du fer et la géocronite de l'arsenic).

Figure 1.1 – Analyzed lead minerals placed in a Pb-Sb-Cu-Bi-Ag multipole diagram. The empty circles are projections of minerals outside the diagram (jamesonite contains iron and geocronite contains arsenic).

La galène et les autres sulfures plombifères ont fait l'objet de micro prélèvements sur section polie sous microscope métallographique, 1 mg de matière étant suffisant pour l'analyse. La majorité des prélèvements a été réalisée mécaniquement à l'aide d'une aiguille d'acier. Plus rarement par dissolution lorsque la petitesse des plages l'exigeait, en déposant sur la section polie une microgoutte d'HBr supra pur, reprélevée après dissolution 30 secondes plus tard à l'aide d'une micropipette. HBr dissout sélectivement certains sulfures, notamment la galène, laissant d'autres intacts comme la pyrite et l'arsénopyrite. Pour les sulfures à plomb en traces (berthiérine, stibine, pyrite...), les échantillons ont été broyés, les sulfures séparés manuellement dans la majorité des cas et 100 mg environ ont été analysés.

Les compositions isotopiques de 54 feldspaths potassiques ont aussi été mesurées (37 de granites du Massif central et du Massif armoricain et 17 du socle métamorphique – 15 du Massif central et 2 du Massif armoricain), ainsi que celles de 36 roches totales, essentiellement des granites du Massif central et du Massif armoricain. Nous avons aussi pris en compte les analyses des feldspaths et roches totales réalisées par d'autres auteurs dans l'Hexagone : des granites hercyniens par Michard-Vitrac *et al.* (1981), soit 29 feldspaths et 2 roches totales de l'Hexagone, des roches sédimentaires du district de Salsigne (Le Guen *et al.*, 1991) et de Saint-Salvy (Brévert *et al.*, 1982) soit 16 roches totales, ainsi qu'un feldspath et 10 roches totales du Massif armoricain analysés par Vidal et Postaire (1985). Cela représente au total 84 analyses de feldspaths et 64 de roches totales.

Organisation

Après un bref rappel de ce qu'est le plomb commun et de son apport en métallogénie (chapitre 1), les résultats sont donnés en suivant une focalisation progressive : d'abord à l'échelle géodynamique des grands massifs géologiques (chapitre 2), ensuite par types de minéralisations (chapitre 3), et enfin à l'échelle du district avec l'examen de districts à minéralisations diverses (chapitre 4), seule échelle qui permette d'aborder la question des sources des métaux.

minéral	abréviation	composition	Pb (% pds)
galène	Gn	PbS	85
clausthalite	Clt	PbSe	72
géocronite	Gc	Pb ₅ (Sb,As) ₂ S ₈	70
ménéghinite	Meg	CuPb ₁₃ Sb ₇ S ₁₄	61
boulangérite	Boul	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	55
semseyite	Sem	Pb ₉ Sb ₈ S ₂₁	53
bournonite	Bour	CuPbSbS ₃	42
jamesonite	Jam	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	40
plagionite	Plg	Pb ₅ Sb ₈ S ₁₇	40
aïkinitite	Aik	PbCuBiS ₃	36
zinkénite	Znk	Pb ₆ Sb ₁₄ S ₂₇	32
galénobismuthite	Gb	PbBi ₂ S ₄	27
füllöppite	Fül	Pb ₃ Sb ₈ S ₁₅	30
andorite	And	PbAgSb ₃ S ₆	24
gustavite	Gv	Bi ₁₁ Pb ₅ Ag ₃ S ₂₄	23

Tableau 1.1 – Minéraux plombifères analysés au cours de ce travail et leurs teneurs en plomb. En gras les minéraux les plus fréquemment analysés.

Table 1.1 – Lead minerals analyzed in this work and their lead contents. In bold the most frequently analyzed minerals.

Ces examens multi-échelles débouchent sur une synthèse globale des apports de la géochimie isotopique du plomb au décryptage de la genèse des minéralisations (chapitre 5). Il se conclut par cinq annexes : la première rassemble les résultats isotopiques obtenus sous forme de deux tableaux ; la seconde montre que la géochimie isotopique du plomb peut être un outil en exploration minière ; la troisième aborde l'isotopie du plomb en Guyane française ; la quatrième montre l'utilisation des isotopes de plomb en archéologie minière, et la cinquième expose la procédure analytique et les méthodes de calculs employées.

La manipulation de près de 1 000 analyses isotopiques (avec 3 rapports pour chacune) peut s'avérer très lourde. Les données utilisées pour construire les figures générales des minéralisations (chapitres 2 et 3) sont indiquées sur le grand tableau d'annexe 1.1, et pour les roches sur le tableau d'annexe 1.2. Par contre, les données utilisées pour construire les figures des chapitres 4, 5 et 6 font appel à un nombre limité d'analyses : elles ont alors été extraites des tableaux 1.1 et 1.2 et rassemblées dans des tableaux indépendants pour une lecture plus facile.

Trois tableaux sont par ailleurs annexés à cet article et accessibles en tant que fichiers téléchargeables en format excel :

- un rassemble l'ensemble des données isotopiques obtenues sur les sites étudiés (annexe 1.1) ;
- un deuxième rassemble les données isotopiques obtenues sur les roches analysées (annexe 1.2) ;
- un troisième (annexe 1.3) donne pour chaque gîte analysé l'ensemble des informations pertinentes réunies dans la BSS : nom de l'indice ou du gîte, coordonnées, substance etc. L'indice BSS reproduit dans les tableaux 1.1 et 1.3 permet de faire le lien entre eux.

Des dossiers régionaux sont également disponibles en annexe donnant pour chaque gîte l'environnement géologique immédiat, directement reproduit de la carte géologique au 1/50 000, chaque vignette géologique étant nommée par l'indice BSS ou, en l'absence de celui-ci, par le nom du gîte.

SOMMAIRE

1. Introduction	5
1.1 - Plomb commun : définition et évolution	5
1.2 - Plomb commun : une approche de la source et de l'âge des minéralisations	7
1.3 - Histoire géologique et métallogénique de la métropole : état actuel des connaissances	8
2. Signatures isotopiques du plomb : un panorama global.....	9
2.1 – Signatures isotopiques des minéralisations	9
2.2 - Compositions isotopiques de quelques roches métropolitaines	15
3. Signatures isotopiques et genèses des minéralisations	15
3.1 - Types de minéralisations de l'Hexagone.....	15
3.2 - Minéralisations stratiformes : de l'Édiacarien au Crétacé	15
3.3 - Minéralisations non stratiformes	20
4. Histoires de districts minéralisés.....	26
4.1 - Auvergne méridionale : le Haut-Allier.....	26
4.2 - Auvergne septentrionale : Combrailles et Pontgibaud	30
4.3 - Cœur du Massif central : Artense et Corrèze.....	32
4.4 - Limousin-Marche.....	37
4.5 - Montagne Noire et Tarn.....	40
4.6 - Bordure cévenole et Les Malines.....	42
4.7 - Massif central oriental : Lyonnais, Forez et Morvan.....	44
4.8 - Centre-Bretagne.....	46
4.9 - Cornouaille : histoire de superpositions	48
4.10 - Basse-Loire : carrefour géologique et métallogénique.....	50
4.11 - Nord-Armorique : plomb néoprotérozoïque.....	51
4.12 - Vosges	52
4.13 - Pyrénées	53
4.14 - Alpes -Maures - Corse	53
5. Essai de synthèse : sources, recyclages et histoire métallogénique.....	53
5.1 - Dualité des sources du plomb : roches et minéralisations	53
5.2 - Homogénéité et variation isotopique dans un gîte monophasé : quelles causes ?	59
6. Conclusion : acquis de l'isotopie du plomb pour la métallogénie de l'Hexagone.....	61
6.1 - Arrivées de plomb et époques métallogéniques	61
6.2 - Éléments de géodynamique : sources crustale et mantellique	63
Remerciements	64
Annexe 1 - Données isotopiques	65
Annexe 2 - Apport à l'exploration minière : la fingerprint method.....	78
Annexe 3 - Isotopes du plomb en Guyane.....	83
Annexe 4 - Archéologie minière et isotopie du plomb.....	84
Annexe 5 - Procédure analytique et calculs.....	86
Bibliographie.....	88

1. Introduction

1.1 - Plomb commun : définition et évolution

Le plomb naturel se compose de 4 isotopes stables : ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb . Le ^{204}Pb est le moins abondant avec environ 1,4 % du plomb total et il est entièrement primordial, c'est-à-dire qu'il était présent en totalité dès la formation de la Terre il y a 4,56 Ga (Fig. 1.2). Les trois autres isotopes sont en partie primordiaux et en partie radiogéniques, c'est-à-dire formés par désintégration radioactive de l'uranium et du thorium depuis 4,56 Ga : ^{238}U se transmute en ^{206}Pb , ^{235}U en ^{207}Pb et ^{232}Th en ^{208}Pb . Avec le temps, la composition isotopique du plomb terrestre a donc évolué en permanence par enrichissement en ces trois isotopes radiogéniques. En géologie, les diagrammes Pb/Pb usuels sont construits avec les trois rapports isotopiques $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ est le plus employé car le plus discriminant pour analyser les variations isotopiques. Il a été privilégié dans ce travail.

Le « plomb commun » désigne le plomb de tout système naturel, roche ou minéral, à rapports U/Pb et Th/Pb nuls ou très faibles : c'est le plomb de la galène et de la grande majorité des sulfures et des feldspaths potassiques. Le plomb commun n'a donc pas vocation à être utilisé en géochronologie, une méthode justement basée sur des minéraux à rapports U/Pb et Th/Pb élevés.

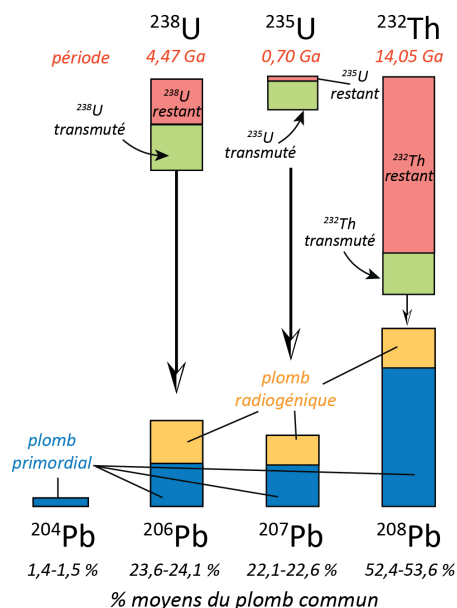


Figure 1.2 – Pourcentages moyens des différents isotopes du plomb commun dans la nature, le terme « restant » s'entend comme restant aujourd'hui dans la nature (d'après Holden et Lide, 2004, complété).

Figure 1.2 – Average percentages of the different isotopes of common lead in nature, the term "remaining" is understood as remaining in nature today (after Holden and Lide, 2004, completed).

La première courbe d'évolution du plomb terrestre a été tracée en 1947 par Holmes et Houtermans : son allure de courbe asymptote fortement aplatie dans le diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ résulte du fait que la période de désintégration de ^{235}U est plus courte que celle de ^{238}U , entraînant une décroissance rapide de ^{235}U à l'échelle des temps géologiques et une production radiogénique de ^{207}Pb plus faible que celle de ^{206}Pb dans les temps récents. Rappelons qu'en 1953, c'est en mesurant les compositions isotopiques du plomb de la météorite de Canyon Diablo (Arizona) que le

physicien américain Clair Patterson établit l'âge de la Terre à $4,550 \pm 0,077$ milliards d'années, âge rapidement admis par la communauté scientifique internationale et qui s'est révélé remarquablement juste.

Les articles fondateurs de la compréhension du plomb commun moderne sont publiés entre 1974 et 1981 (Fig. 1.3 ; Tab. 1.2). On y trouve notamment LA référence : l'article de J.-S. Stacey et J.-D. Kramers (1975) avec sa courbe d'évolution isotopique du plomb terrestre depuis l'origine de la Terre il y a 4,567 Ga jusqu'à l'Actuel, calculée à partir des compositions isotopiques de 23 roches et de 13 gisements d'âges connus. L'article (cité 11 264 fois en juin 2025 selon Google Scholar !) propose un modèle à deux stades avec des valeurs moyennes depuis 3 700 Ma (âge calculé de la différenciation majeure de la planète) de 9,74 pour le rapport μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) et de 36,84 pour W ($^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$) soit $\text{Th}/\text{U} = 3,78$. Le modèle a été ponctuellement affiné (Zartman et Haines, 1988 ; Kramers et Tolstikhin, 1997 ; et surtout Doucet *et al.*, 2023) et parfois recalculé à l'échelle d'une région (Sinclair *et al.*, 1993, pour les Cévennes), mais il reste unanimement accepté aujourd'hui avec sa courbe de référence. Presque simultanément, Cumming et Richards (1975) publient un autre modèle d'évolution du plomb terrestre, d'approche plus mathématique, donnant des résultats extrêmement proches. Doe et Zartman (1979) puis Zartman et Doe (1981) apportent avec leur « Plumbotectonics » une dimension géodynamique globale au modèle en distinguant les évolutions isotopiques de grands milieux terrestres (manteau, croûte inférieure, croûte supérieure), brassés et mélangés à très grande échelle lors des orogènes, pour aboutir à une courbe représentative d'un plomb lithosphérique « moyen » : la courbe « orogène », très proche à confondre avec la courbe de Stacey et Kramers confirmant ainsi sa justesse (Fig. 1.4). Très schématiquement, pour un rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ donné, le plomb mantellique se caractérise par des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ bas, à l'inverse de la croûte supérieure où ils sont élevés, alors qu'un plomb de croûte inférieure affiche des rapports $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ particulièrement élevés.

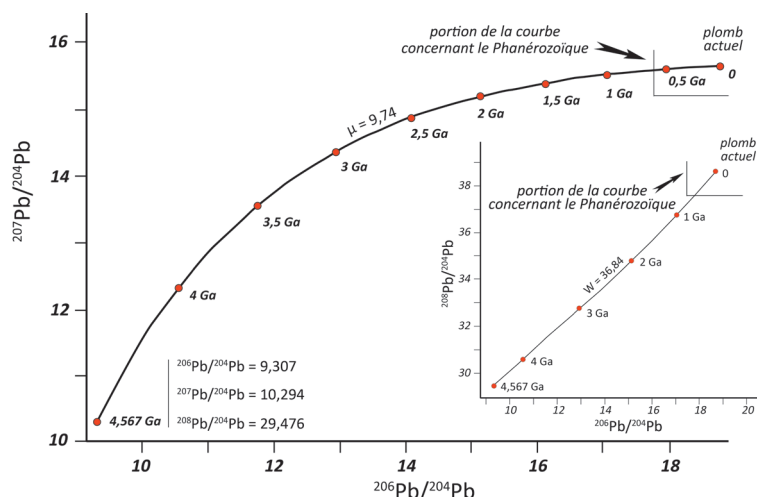


Figure 1.3 – Allure des courbes d'évolution isotopique du plomb terrestre de Stacey-Kramers (1975) dans les diagrammes classiques $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Cette courbe est une moyenne mathématique. La composition du plomb « actuel » pose notamment un difficile problème : où la mesurer ? La composition à $t = 0$ Ma est ainsi la moyenne de 160 analyses réalisées pour l'essentiel sur des échantillons océaniques actuels : nodules de manganèse, sédiments (43) et basaltes (dont 100 d'arcs insulaires).

Figure 1.3 – Appearance of the isotopic evolution curves of terrestrial lead from Stacey-Kramers (1975) in the classic diagrams $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. This curve is a mathematical average. The composition of "current" lead posed a difficult problem: where to measure it? The composition at $t = 0$ Ma is thus the average of 160 analyses carried out mainly on current oceanic samples: manganese nodules, sediments (43) and basalts (including 100 from island arcs).

Stacey-Kramers (1975)				Cumming-Richards (1975)			
t (Ma)	courbe à 2 stades			"linear" Model III			
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	
0	18,703	15,629	38,631	18,825	15,671	38,893	
50	18,627	15,625	38,539				
100	18,551	15,622	38,448				
150	18,474	15,618	38,356				
200	18,396	15,613	38,264				
250	18,318	15,609	38,172				
300	18,239	15,605	38,080				
350	18,160	15,600	37,987				
400	18,080	15,595	37,894				
450	17,999	15,589	37,801				
500	17,918	15,584	37,708	17,968	15,622	37,870	
550	17,836	15,578	37,614				
600	17,753	15,572	37,521				
650	17,670	15,565	37,427				
700	17,586	15,559	37,332				
750	17,502	15,552	37,238				
800	17,416	15,544	37,143				
850	17,331	15,536	37,048				
900	17,244	15,528	36,953				
950	17,157	15,519	36,858				
1 000	17,069	15,510	36,762	17,067	15,544	36,840	
1 050	16,980	15,501	36,666				
1 100	16,891	15,491	36,570				
1 150	16,801	15,480	36,474				
1 200	16,710	15,469	36,377				
1 250	16,619	15,458	36,280				
1 300	16,527	15,445	36,183				
1 350	16,434	15,433	36,086				
1 400	16,341	15,419	35,988				
1 450	16,247	15,405	35,891				
1 500	16,152	15,390	35,793	16,118	15,420	35,805	
1 550	16,056	15,374	35,694				
1 600	15,959	15,358	35,596				
1 650	15,862	15,341	35,497				
1 700	15,764	15,323	35,398				
1 750	15,665	15,304	35,299				
1 800	15,566	15,284	35,199				
1 850	15,466	15,263	35,099				
1 900	15,365	15,241	35,000				

Stacey-Kramers (1975)				Cumming-Richards (1975)			
t (Ma)	courbe à 2 stades			"linear" Model III			
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	
1 950	15,263	15,217	34,899				
2 000	15,160	15,193	34,799	15,119	15,222	34,764	
2 050	15,057	15,168	34,698				
2 100	14,953	15,141	34,597				
2 150	14,848	15,112	34,496				
2 200	14,742	15,083	34,394				
2 300	14,527	15,019	34,191				
2 350	14,419	14,985	34,088				
2 400	14,310	14,949	33,986				
2 450	14,200	14,911	33,883				
2 500	14,089	14,871	33,780	14,070	14,906	33,719	
2 550	13,977	14,829	33,677				
2 600	13,865	14,785	33,573				
2 650	13,751	14,739	33,470				
2 700	13,637	14,690	33,366				
2 750	13,521	14,640	33,261				
2 800	13,405	14,586	33,157				
2 850	13,288	14,530	33,052				
2 900	13,170	14,471	32,947				
2 950	13,051	14,409	32,842				
3 000	12,931	14,344	32,736	12,968	14,405	32,669	
3 050	12,810	14,275	32,630				
3 100	12,689	14,203	32,524				
3 150	12,566	14,128	32,418				
3 200	12,442	14,048	32,311				
3 250	12,318	13,965	32,204				
3 300	12,192	13,878	32,097				
3 350	12,066	13,786	31,989				
3 400	11,938	13,689	31,882				
3 450	11,810	13,588	31,774				
3 500	11,680	13,481	31,666	11,812	13,609	31,614	
3 550	11,550	13,369	31,557				
3 600	11,418	13,251	31,448				
3 650	11,286	13,128	31,339				
3 700	11,152	12,998	31,230				
4 000	10,544	12,313	30,637	10,600	12,344	30,556	
4 300	9,906	11,391	30,036				
4 570	9,307	10,294	29,476	9,307	10,294	29,476	

	Zartman et Doe (1981)											
t (Ma)	orogène			manteau			croûte supérieure			croûte inférieure		
	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
0	18,89	15,61	38,81	18,01	15,47	37,71	19,44	15,70	39,19	17,54	15,39	38,67
400	18,27	15,59	38,06	17,45	15,44	37,08	18,78	15,69	38,41	16,93	15,32	37,90
800	17,59	15,55	37,29	16,85	15,39	36,44	18,06	15,66	37,60	16,29	15,24	37,11
1 200	16,86	15,49	36,49	16,21	15,32	35,79	17,27	15,60	36,76	15,62	15,13	36,31
1 600	15,98	15,36	35,58	15,53	15,21	35,11	16,46	15,52	35,94	14,93	14,98	35,51
2 000	15,17	15,20	34,78	14,80	15,05	34,42	15,59	15,37	35,09	14,21	14,78	34,69
2 400	14,29	14,96	33,96	14,03	14,83	33,72	14,63	15,13	34,19	13,46	14,51	33,86
2 800	13,31	14,56	33,07	13,21	14,50	32,99	13,65	14,78	33,30	12,67	14,12	33,02
3 200	12,36	14,03	32,24	12,32	14,00	32,22	12,62	14,25	32,38	11,81	13,55	32,16
3 600	11,38	13,26	31,41	11,36	13,25	31,40	11,54	13,44	31,48	10,91	12,76	31,32
4 000	10,32	12,12	30,56	10,32	12,12	30,56	10,32	12,12	30,56	10,32	12,12	30,56
4 570	9,31	10,29	29,48	9,31	10,29	29,48	9,31	10,29	29,48	9,31	10,29	29,48

Zartman et Haines (1988) - Compositions actuelles											
manteau (μ : 10,01)			orogène								
			distal (μ : 10,56)			proximal (μ : 10,28)			mantle wedge (μ : 9,88)		
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
18,47	15,48	37,73	18,62	15,52	37,96	19,06	15,67	38,94	18,40	15,46	38,04
croûte supérieure (μ : 11,08)			croûte inférieure (μ : 6,49)			lithosphère sous-crustale (μ : 9,13)					
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb			
19,33	15,73	39,07	17,62	15,35	38,75	18,32	15,44	38,10			

Tableau 1.2 – Valeurs isotopiques des courbes de référence du plomb terrestre de Stacey-Kramers (1975), Cumming-Richards (1975) et Zartman-Doe (1981).

Table 1.2 – Isotopic values of the terrestrial lead reference curves of Stacey-Kramers (1975), Cumming-Richards (1975) and Zartman-Doe (1981).

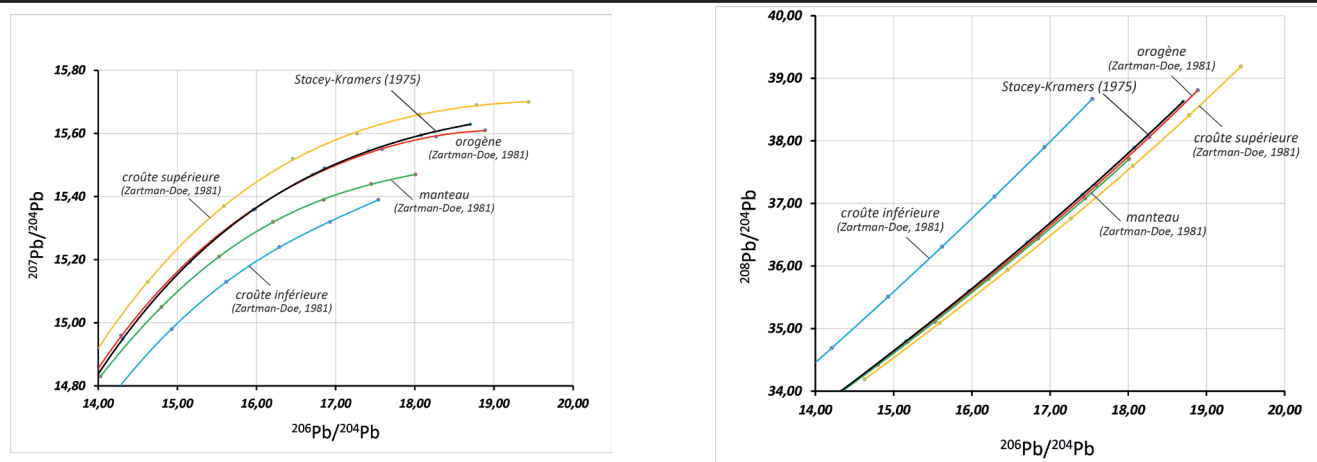


Figure 1.4 a et b – Allure des courbes d'évolution isotopique du plomb dans les grands environnements terrestres (Doe et Zartman, 1979 ; Zartman et Doe, 1981). Les valeurs du rapport μ de la courbe du manteau sont respectivement de 8,92 (1979), 8,90 (1981, version I), 8,35 (1981, version II) pour un $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ actuel de 18,01 et des Th/U de 3,57 (1979) et 3,58 (1981) ; celles de la courbe orogène de 10,87 (1979), 10,88 (1981, version I) et 11,32 (1981, version II) pour un $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ actuel de 18,89 et des Th/U de 3,64 (1979) et 3,62 (1981).

Figure 1.4 a et b – Appearance of lead isotopic evolution curves in the large terrestrial environments (Doe and Zartman, 1979; Zartman and Doe, 1981). The values of the μ ratio of the mantle curve are respectively 8.92 (1979), 8.90 (1981, version I), 8.35 (1981, version II) for a current $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of 18.01 and Th/U of 3.57 (1979) and 3.58 (1981); those of the orogenic curve of 10.87 (1979), 10.88 (1981, version I) and 11.32 (1981, version II) for a current $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ of 18.89 and Th/U of 3.64 (1979) and 3.62 (1981).

1.2 - Plomb commun : une approche de la source et de l'âge des minéralisations

La composition isotopique du plomb d'un minéral est le résultat de deux paramètres : *l'environnement* dans lequel le plomb a évolué (où la richesse en uranium et thorium est primordiale), donc la source, et le *moment* où le plomb quitte cet environnement pour cristalliser sous forme d'un minéral, figeant sa composition isotopique, moment qui correspond à l'âge du minéral. En théorie, la composition isotopique du plomb nous donne donc accès à ces deux paramètres.

Cependant, la courbe de Stacey-Kramers ne dessine qu'une moyenne mathématique de l'évolution du plomb terrestre avec notamment un plomb « actuel » un peu arbitraire, et les graduations en âge n'ont donc qu'une valeur indicative d'autant plus imprécise qu'on se rapproche du Présent à cause de la forte incertitude pesant sur le plomb « actuel » (cf. Fig. 1.3). Les plombs « J » (mesurés à Joplin, dans les gisements MVT du Missouri) se caractérise par des âges « futurs » en regard des courbes d'évolution d'alors, à cause d'un enrichissement exceptionnel en isotopes radiogéniques (Cannon et Pierce, 1969). Ce terme de « plomb J » est maintenant obsolète. C'est pourquoi les âges calculés à partir des courbes d'évolution sont appelés « âges modèles » ou « âges conventionnels » et non pas « âges vrais ». Ils sont fréquemment proches (voire confondus avec) de l'âge « vrai » dans le Protérozoïque, mais ne peuvent être considérés que comme des approximations chronologiques dans le Phanérozoïque, surtout dans le Mésozoïque-Cénozoïque où ils ne sont guère fiables. Les âges modèles fournis dans cet article ont été calculés avec la méthode *Isoplot* de Ludwig (2003) à fin de comparaison avec les âges stratigraphiques.

La composition isotopique est par contre un excellent traceur de l'environnement-source, et même souvent de la (ou des) roche-source du plomb et des métaux associés. La source des métaux des gisements est en effet une des questions-clés de la métallogénie. Pour y répondre dans le cas du plomb il suffit, théoriquement, de comparer les signatures isotopiques de la minéralisation avec celles des roches-sources possibles, une similitude désignant la roche-source.

Mais c'est évidemment une forte simplification des para-

mètres en jeu. D'abord, parce que l'investigation des roches sources se limite bien sûr à celles accessibles. Ensuite parce que les roches (et les minéraux non plombifères) sont généralement des milieux légèrement uranifères et thorifères qui vont s'enrichir en isotopes radiogéniques postérieurement à leur cristallisation et voir leur composition isotopique évoluer avec le temps. Pour aborder le problème de la source, il faut comparer la composition des roches-sources possibles au moment de formation de la minéralisation étudiée. Cela nécessite des corrections. Pour les réaliser il faut connaître plusieurs paramètres : les rapports μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) et W ($^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$), ainsi que les âges de la minéralisation et des roches. On peut regretter que trop peu de gîtes du territoire national soient datés à ce jour. Heureusement, les belles avancées en radiochronologie de la méthode U/Pb par LA ICPMS et SIMS abaissent les seuils d'analyse multipliant les minéraux datables (zircon, monazite, apatite, rutile, cassitérite, calcite, scheelite, bientôt grenat et d'autres) et comblant peu à peu ce gouffre.

De plus, on admet un lessivage global de la roche-source par les fluides alors que ce lessivage peut être sélectif et ne concerner que certains minéraux (feldspaths, biotites, amphiboles, olivines...) qui délivrent chacun un plomb radiogénique de composition différente (Chiaradia et Fontboté, 2003), le plus important « stock » de plomb de la croûte étant contenu dans les feldspaths potassiques. Et on a coutume de considérer la source du plomb comme étant aussi celle des métaux associés, une approximation qui reste cohérente avec le fait que tous les métaux étant véhiculés par les mêmes fluides hydrothermaux avec des gammes étroites de composition et de température, il est hautement improbable que chaque métal ait été collecté dans une roche spécifique.

Malgré ces fortes simplifications, cette méthode permet néanmoins d'obtenir des résultats d'autant plus probants que l'environnement géologique est homogène. Dans les contextes géologiques très diversifiés lithologiquement, le plomb de la minéralisation est fréquemment la résultante de multiples contributions bien délicates voire impossibles à pondérer. Nous allons donner plus loin quelques exemples de cette approche de la source du plomb.

1.3 - Histoire géologique et métallogénique de la métropole : état actuel des connaissances

L'histoire géologique du territoire national débute au Paléoproterozoïque (vers 2 Ga) conservé dans de très rares reliques d'orthogneiss datés vers 2,06 Ga dans le Cotentin et le Trégor (Graviou *et al.*, 1988). Ces orthogneiss sont attribués au cycle icartien, un cycle dont on ne connaît presque rien si ce n'est qu'il est synchrone des événements paléoproterozoïques du Birrimien d'Afrique de l'Ouest (Milési *et al.*, 1989).

Les phénomènes magmatiques qui se déroulent dans le nord-armoricain au Cryogénien (ex-Pentévrien *pro parte*), vers 750-650 Ma, puis à l'Édiacarien (635 à 539 Ma) appartiennent au cycle cadomien (Chantraine *et al.*, 2001). Cette époque voit le dépôt de séries sédimentaires variées : pélites siliceuses (phtanites), volcanosédimentaires, grauwackes et grésopélites (flyschs et molasses) conséquents dans le Massif armoricain où on les désignait *pro parte* par le terme obsolète de « Briovérien ». Dans le Massif central il n'y a pas de chaîne cadomienne mais, en revanche, on y connaît des formations sédimentaires, volcaniques et plutoniques d'âge néoproterozoïque (Tonien, Cryogénien, Édiacarien). Les premières minéralisations apparaissent sous forme de couches de sulfures massifs de type VMS (*Volcanogenic Massive Sulfides*) et SEDEX (*SEDimentary EXhalative*) déposés sur la croûte océanique par les fluides hydrothermaux associés au volcanisme sous-marin édiacarien : Rouez (Sarthe), l'Hôtel Piquet (Manche), Saint-Georges-sur-Loire (Maine et Loire).

Le Paléozoïque (-539 à -252 Ma) est la grande époque de construction de la géologie ouest-européenne. Durant près de 300 millions d'années, notre futur territoire métropolitain fut le théâtre d'épisodes de sédimentation, magmatisme et métamorphisme, avec un paroxysme entre -360 et -290 Ma lors de l'orogène varisque (ou hercynien), (Faure *et al.*, 2005). Cet orogène résulte de la collision de deux plaques lithosphériques : la Laurasia au nord, et le Gondwana au sud, incluant ses fragments détachés à l'Ordovicien inférieur : les microplaques Avalonia, Saxo-Thuringienne (MGCR) et Armorica. Il occasionne de titanesques déformations avec des empilements de nappes métamorphiques, débouchant sur un épaississement de la croûte et sa fusion à l'origine du magmatisme généralisé du Carbonifère, surtout entre -325 et -300 Ma. À cette époque, l'orogène a édifié une vaste chaîne de montagnes dont l'altitude reste sujette à bien des discussions allant, en Europe, de la Bretagne à la Silésie.

De nombreuses minéralisations se forment au Paléozoïque (cf. Fig. 2.1). Les premières sont les sulfures stratiformes à plomb-zinc des plates-formes carbonatées du Cambrien de la Montagne Noire. Puis le volcanisme sous-marin, au Dévonien cette fois va générer des amas sulfurés polymétalliques : Bodennec et Porte-aux-Moines dans le Dévonien inférieur du Massif armoricain, Chessy, Sain-Bel et Chizeuil dans le Dévonien supérieur de l'Est du Massif central. Le plutonisme carbonifère va lui être à l'origine de minéralisations (filons pégrinitiques, pipes, skarns et même porphyres...) à étain, tungstène, cuivre et parfois molybdène (Beauvain) entre 340 et 300 Ma environ. La fin de la phase compressive hercynienne, avec le début du désépaississement crustal accompagné de la délamination de tout ou partie du manteau lithosphérique, va provoquer des circulations majeures de fluides riches en or et antimoine vers 295-305 Ma *pro parte* contrôlées par des

failles ductiles-cassantes normales ou inverses : c'est l'épisode « or 300 » à l'origine des grandes minéralisations aurifères de métropole : Salsigne, Laurières et Le Bourneix en Limousin, Le Châtelet dans la Marche... mais aussi de filons à antimoine : La Lucette (Mayenne), et aussi Ouche, La Bessade, Pressac, Le Fraisse, Marmeissat, Le Céroux, La Chassagne ... dans le district de Brioude-Massiac en Auvergne.

Au Permien (299-252 Ma), l'arrêt de la convergence hercynienne fait progressivement place à une distension généralisée accompagnée de remontées asthénosphériques et d'une importante érosion, transformant le paysage montagneux hercynien en un socle aplani et fissuré, accidenté de reliefs épars. Les failles sont parcourues de fluides hydrothermaux de moyenne température qui génèrent de grands filons d'uranium avec des épyénites (Margnac en Limousin, L'Écarpière en Vendée) pour lesquels on peut proposer un âge moyen U-Pb vers 285 ± 10 Ma (Leroy et Holliger, 1984 ; Cathelineau *et al.*, 1990). Ils sont suivis par des filons plombo-zincifères qui clôturent cet épisode métallogénique : Saint-Salvy, Pontgibaud, Peyrebrune (Massif central), Pontpéan et Huelgoat-Poullaouen (Massif armoricain), Sainte-Marie-aux-Mines (Vosges) etc. Ces filons ne sont pas datés mais on peut admettre une mise en place entre 280 et 250 Ma (soit 265 ± 15 Ma) sur la base de critères convergents d'ordre structural, car c'est l'âge des grands décrochements normaux N 150-160 °E armoricains qui portent les filons majeurs, et aussi géothermique car le flux de chaleur doit être suffisamment élevé pour animer les circuits hydrothermaux mais décroît rapidement lors de la délamination. Cependant, tous ces filons ne sont pas obligatoirement synchrones. De forts arguments structuraux suggèrent que le filon de Saint-Salvy (Tarn), par exemple, serait synchrone de la fin de mise en place du granite du Sidobre soit vers 305-300 Ma (Cassard *et al.*, 1994).

Au Mésozoïque et au Cénozoïque, une série de transgressions marines envahissent les régions basses et isolent définitivement des blocs émergés de roches anciennes, qui constituent aujourd'hui les Massif Armoricain, Massif central, Vosges, Esterel et Corse. Des unités pluri-kilométriques de croûte continentale à héritage hercynien, déformées puis exhumées, sont aussi entraînées dans les surrections des Alpes et Pyrénées, constituant les « massifs cristallins externes » des Alpes et les l'essentiel de la zone axiale des Pyrénées.

L'ouverture de l'Atlantique nord au Lias inférieur (vers 190-200 Ma) s'accompagne d'une intense fracturation des deux côtés du rift majeur, en Europe occidentale et au Maroc, et dans les Appalaches, où circulent des fluides de basse température qui déposent fluorine, barytine et sulfures : c'est l'épisode dit « liasique » qui va former les grands « filons froids » comme Langeac, Les Farges, Le Rossignol à Chaillac, Maine, Voltennes, Le Beix... Cet âge liasique est confirmé par de nombreuses datations K/Ar : 200 à 221 Ma (moyenne de 205 Ma) sur six adulaires du Morvan et de Chavaniac (Joseph *et al.*, 1973) ; 182 à 206 Ma (moyenne de 194 ± 7 Ma) sur sept adulaires du Massif central (Marche, Beaujolais, Corrèze et Langeac ; Baubron *et al.*, 1980) ; 209 ± 8 Ma moyenne sur deux illites et cinq adulaires de Langeac (Marcoux *et al.*, 1990) ; 214 ± 6 Ma sur l'adulaire du Beix (Bril *et al.*, 1991) et les galets de barytine dans les grès hettangiens de Chaillac (Sizaret *et al.*, 2004). La moyenne des âges mesurés sur les

filons à fluorine-barytine du Massif central est de $202,5 \pm 9,8$ Ma ($204,4 \pm 9,8$ Ma pour le grand district de Langeac-Chavaniac). Nous retiendrons 202 ± 10 Ma pour cet épisode hydrothermal majeur dit « liasique » mais qui, avec la fourchette d'incertitude, s'étend du Trias supérieur (Rhétien-Norien) au Lias inférieur (Sinémurien-Hettangien). Cet âge se retrouve dans le grand filon de fluorine d'El Hammam au Maroc daté sur adulaire à 205 ± 1 Ma (Cheilletz *et al.*, 2010).

Des âges plus jeunes ont cependant été mesurés dans ces filons : 130 ± 15 Ma à Antully par Sm/Nd sur la fluorine (Gigoux *et al.*, 2015), 56 et 59 Ma, et 170 et 175 Ma sur des adulaires de Lantignié et Voltennes respectivement (Baubron *et al.*, 1980 ; à comparer aux 214 Ma de Joseph *et al.*, 1973), et surtout 120 à 101 Ma sur les racines quartzieuses du Communal (Langeac) et de la Ribeyrette (Marcoux *et al.*, 1990). Ces âges plaident pour des *resets* ou des épisodes hydrothermaux plus isolés et plus récents, comme ceux proposés par Cathelineau *et al.* (2012) au Jurassique supérieur (~ 146-156 Ma) dans un large Poitou, ou au Crétacé inférieur (111 ± 13 Ma) dans le Tarn (Munoz *et al.*, 2005), qui restent cependant à consolider. Des datations Ar/Ar sur les adulaires de ces filons, par exemple, seraient bienvenues pour tenter de clore ces débats d'âges. Enfin, l'âge des filons de fluorine bleue et sidérite du Tarn (Montroc, Le Burc, Le Moulinal) reste cependant un débat ouvert : Permien pour certains auteurs sur des arguments structuraux (Jébrak, 1984), Crétacé inférieur pour d'autres (Munoz *et al.*, 2005 ; Sm-Nd sur fluorine).

À la même époque sur les marges des massifs anciens se déposent des minéralisations à plomb-zinc au sein de séries gréseuses, dolomitiques ou carbonatées triasiques et jurassiques : ce sont les *Mississippi Valley type* de la bordure cévenole notamment avec les grandes mines des Malines, de Largentière, de la Croix de Pallières, Le Bleymard etc. Cet hydrothermalisme pourrait être lié au rifting de l'océan liguro-piémontais daté du Callovo-oxfordien (166-157 Ma) dans un contexte de failles normales qui peuvent éventuellement rejouer en failles inverses, à l'éocène (déformation pyrénéenne), c'est le cas au Bleymard. Cet épisode pourrait s'étendre à l'Est du Massif central jusqu'au Morvan à la Montagne noire et expliquer les âges post-liasiques mesurés dans certains filons. Enfin, au Crétacé (Aptien-Albien), le rifting pyrénéen va perturber cette organisation acquise aux temps hercyniens en générant de nouvelles circulations hydrothermales à l'origine de concentrations minérales comme le talc de Luzenac (-97 à -112 Ma ; Schäerer *et al.*, 2002), et des réouvertures/remobilisations de nombreuses autres minéralisations.

Ce très rapide panorama ne mentionne que les époques métallogéniques majeures, bien documentées et replacées dans une histoire géologique robuste. On connaît cependant d'autres âges mesurés en dehors de ces époques mais qui sont soit trop ponctuels, soit trop fragiles et discutés : ils demandent donc confirmation et seront mentionnés pour information.

2. Signatures isotopiques du plomb : un panorama global

2.1 – Signatures isotopiques des minéralisations

Les compositions isotopiques des minéralisations analysées de l'Hexagone (Fig. 2.1 ; Tab. d'annexe 1a) dessinent une gamme assez fortement étalée qui reflète la longue histoire géologique du territoire. Les trois rapports isotopiques employés en géologie varient de 17,338 à 20,105 pour $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 15,449 à 15,756 pour $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et de 37,209 à 39,417 pour $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Les diagrammes montrent cependant la grande rareté des rapports supérieurs à 19,0 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et 39,0 ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) ou inférieurs à 15,50 ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), (Fig. 2.2).

Un examen global des compositions isotopiques par massifs anciens englobant leurs marges mésozoïques et cénozoïques, montre de prime abord un très large recouvrement des valeurs au sein duquel on peut cependant observer plusieurs tendances.

Le Massif armoricain (188 analyses) porte l'essentiel des valeurs peu radiogéniques dont la plus basse (amas sulfuré de l'Hôtel Piquet) et toutes celles à rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ inférieur à 17,65, reflet de son histoire très ancienne avec l'orogène icartien (très discret en surface) vers 2 Ga et surtout un orogène cadomien bien exprimé. Le Massif central est le plus représenté (501 analyses) et possède les valeurs les plus élevées mesurées sur la clausenthalite du filon uranifère de Chaméane (Puy-de-Dôme). Les Pyrénées (45 analyses) se marquent par de nombreuses mesures avec des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ élevés. Les Vosges (22 analyses), les Alpes (30 analyses) et les massifs des Maures et de l'Esterel (5 analyses) sont moins minéralisés et ont donc fait l'objet de moins d'analyses.

Lorsque l'on considère la distribution par grand domaine géodynamique (Faure *et al.*, 2005 ; Fig. 2.3), on retrouve logiquement les mêmes tendances, la microplaque Armorica composant l'essentiel du Massif armoricain, et le Gondwana le reste du territoire national. La distinction des deux sous-domaines Moldanubien et Avant-pays méridional (intégrant probablement le « socle alpin » des massifs cristallins externes) n'apporte pas d'élément nouveau. Le domaine Saxo-thuringien n'est représenté que par le seul filon à galène de Pont-Éon dans le bloc allochtone du Léon (Finistère), les Vosges septentrionales saxo-thuringiennes ne portant pas d'indice analysé (Fig. 2.4).

Un examen par types de minéralisations (Fig. 2.5) montre de larges recouvrements assez logiques avec cependant des tendances affirmées : les sulfures stratiformes protérozoïques-paléozoïques dominent parmi les valeurs peu radiogéniques, les sulfures stratiformes mésozoïques et différents filons concentrent les valeurs les plus radiogéniques, tandis que les filons aurifères et les minéralisations magmatiques à étain-tungstène se cantonnent au cœur du nuage global. L'analyse fine de ces distributions fait l'objet des chapitres suivants.

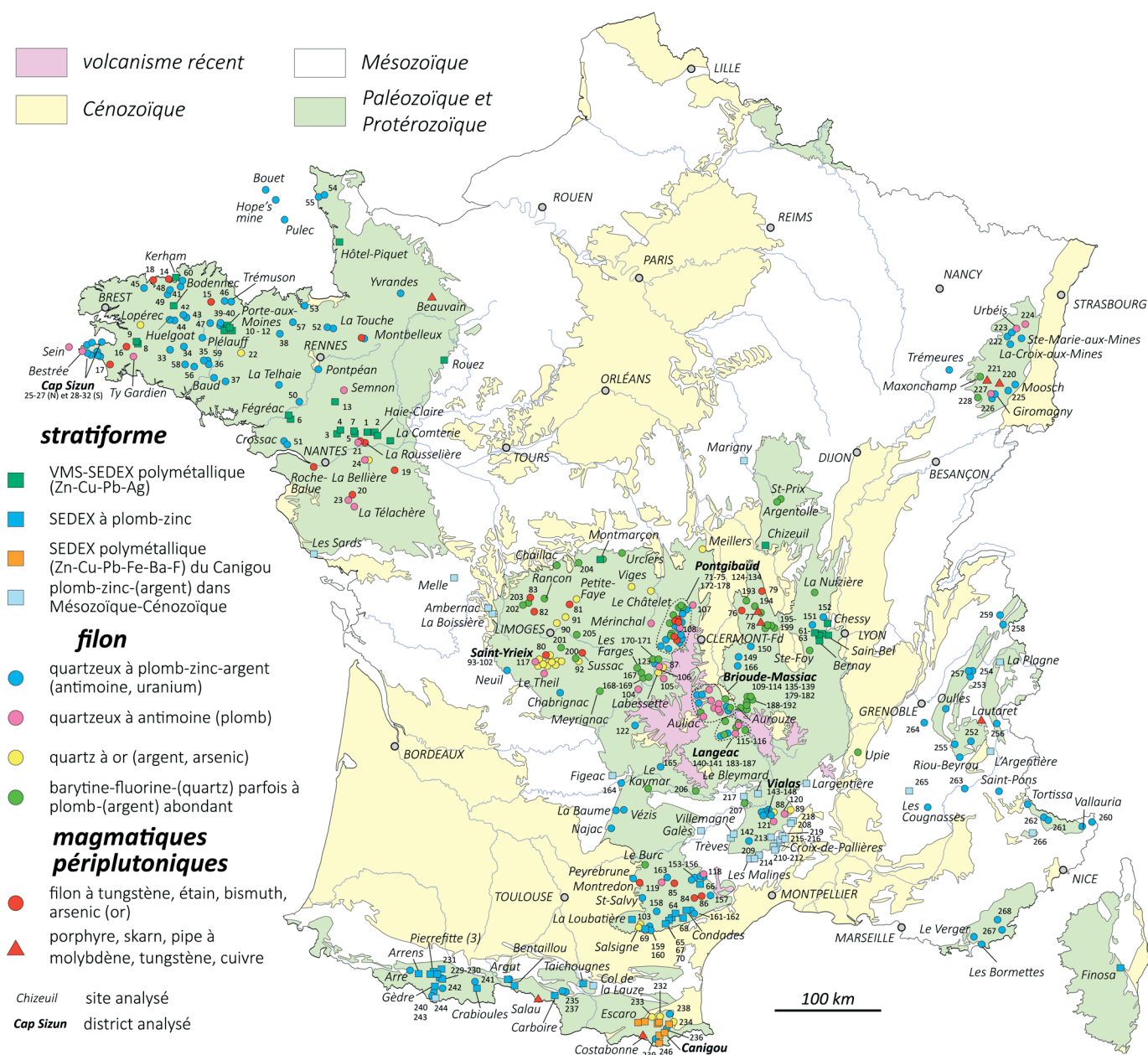


Figure 2.1 – Situation des gîtes et gisements analysés, classés par types de gisements. Les numéros renvoient au tableau d'annexe 1.1.

Figure 2.1 – Situation of the occurrences and ore deposits analyzed, classified by type of ore deposit. Numbers refer to appendix table 1.1.

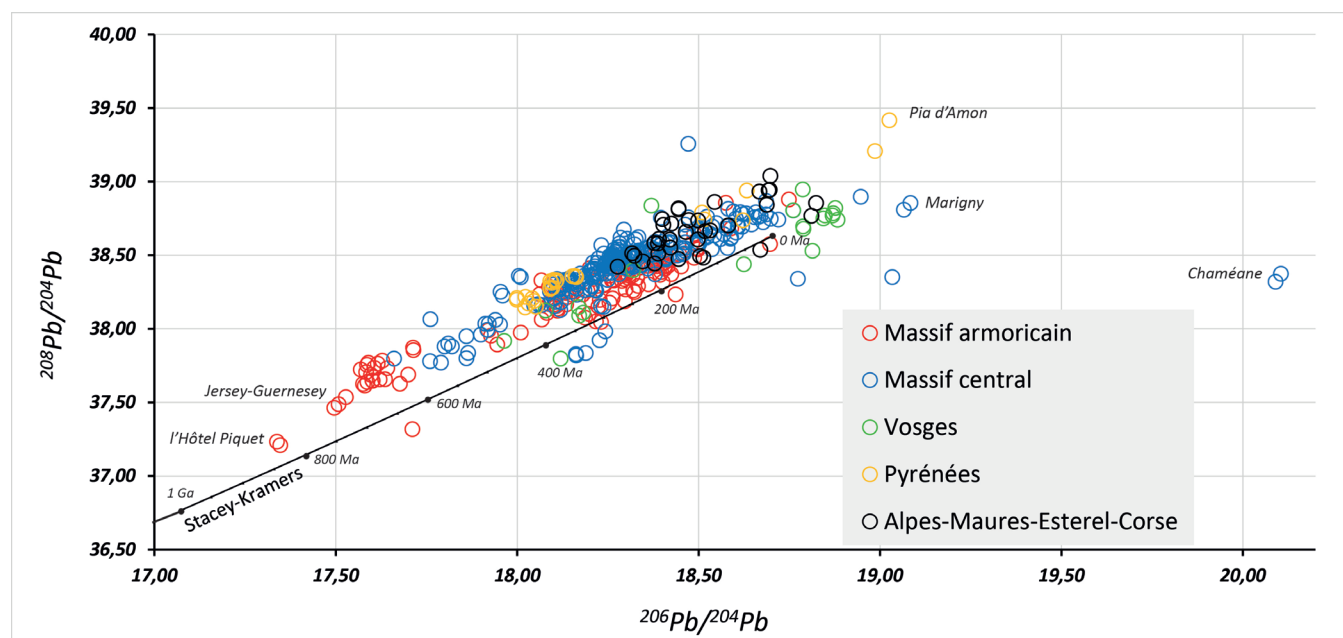
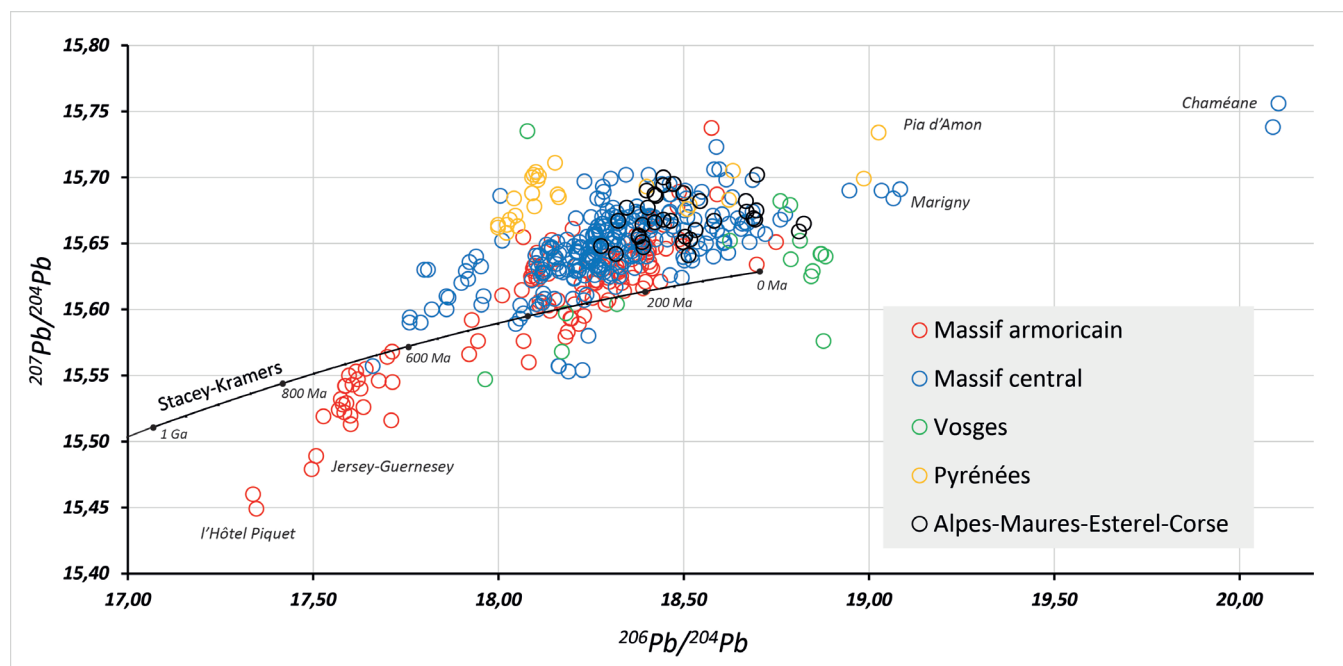


Figure 2.2 – Diagrammes $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations classées par massifs géologiques. Les sites à plusieurs analyses identiques ou très proches sont représentés par leurs moyennes. Les analyses sont données dans le tableau d'annexe 1.1.

Figure 2.2 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams of deposits classified by geological massifs. Sites with several identical or very similar analyzes are represented by their averages. The analyzes are given in appendix table 1.1.

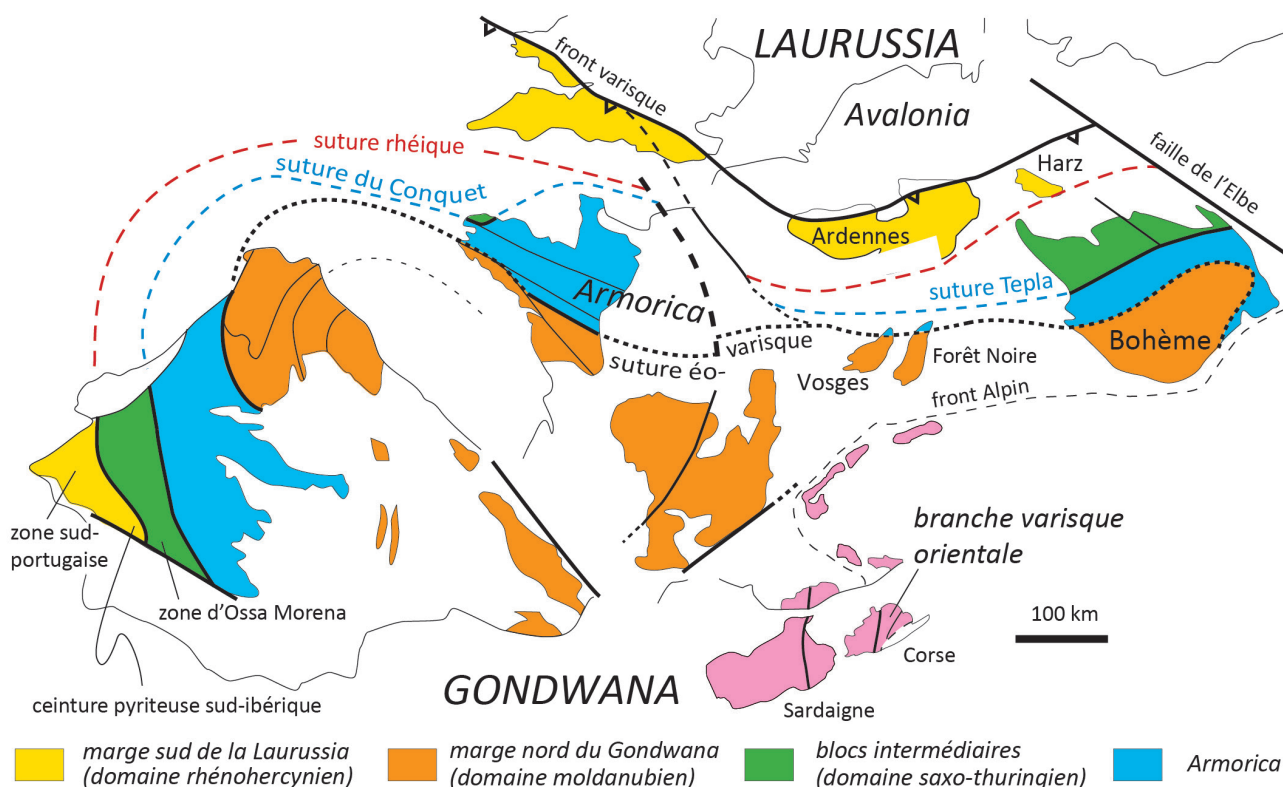


Figure 2.3 – Carte géodynamique simplifiée de la chaîne hercynienne ouest-européenne (d'après Faure et al., 2005).

Figure 2.3 – Simplified geodynamic map of the West European Hercynian chain (after Faure et al., 2005).

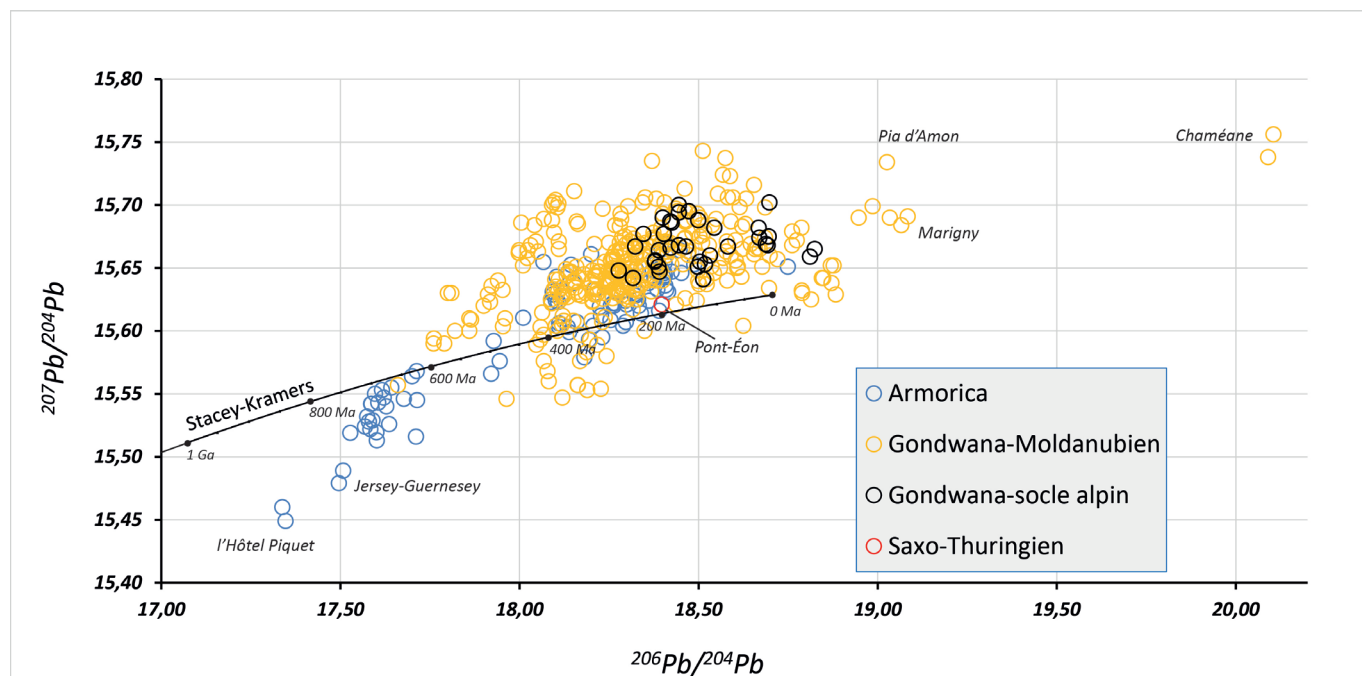


Figure 2.4 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des gîtes classés par domaines géodynamiques tels que délimités sur la figure 2.3. Les sites à plusieurs analyses identiques ou très proches sont représentés par leurs moyennes. Le domaine saxo-thuringien n'est représenté que par une seule analyse, le filon plombifère de Pont-Éon dans le Léon.

Figure 2.4 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of deposits classified by geodynamic domains as delineated in Figure 2.3. Sites with several identical or very similar analyzes are represented by their averages. The Saxo-Thuringian domain is only represented by a single analysis, the lead vein of Pont-Éon in Léon.

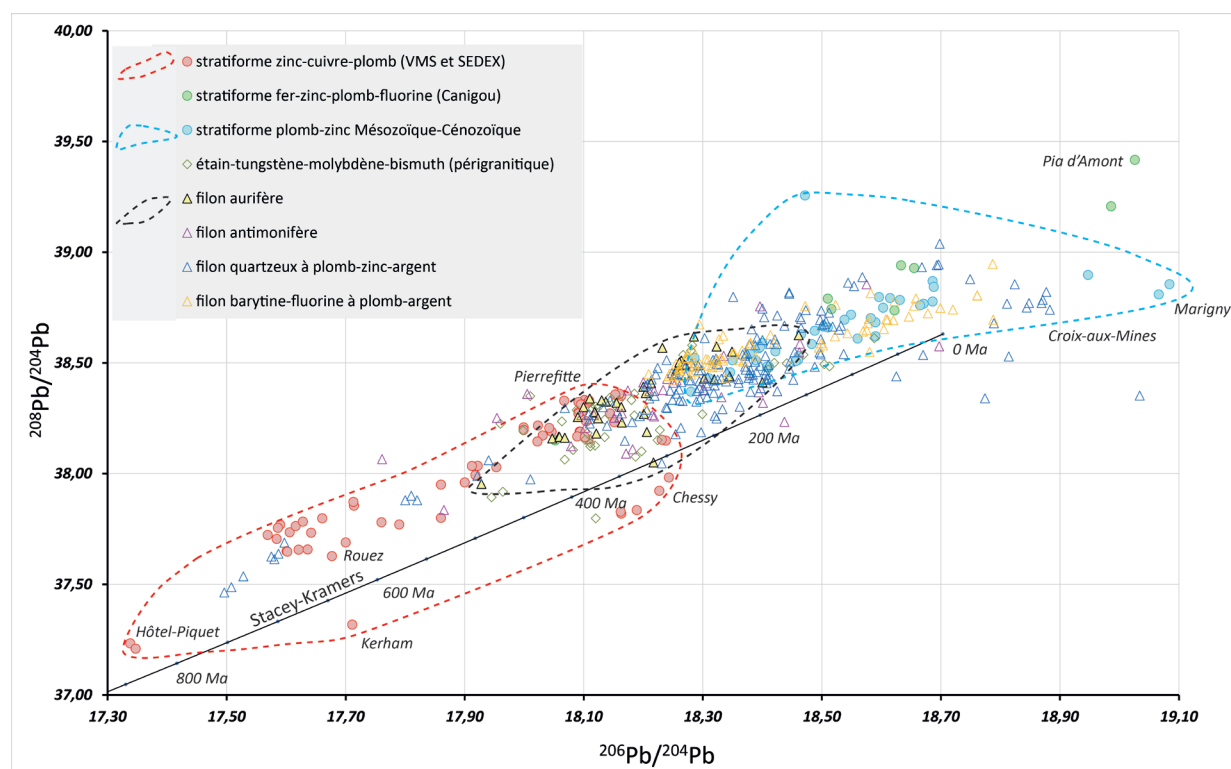
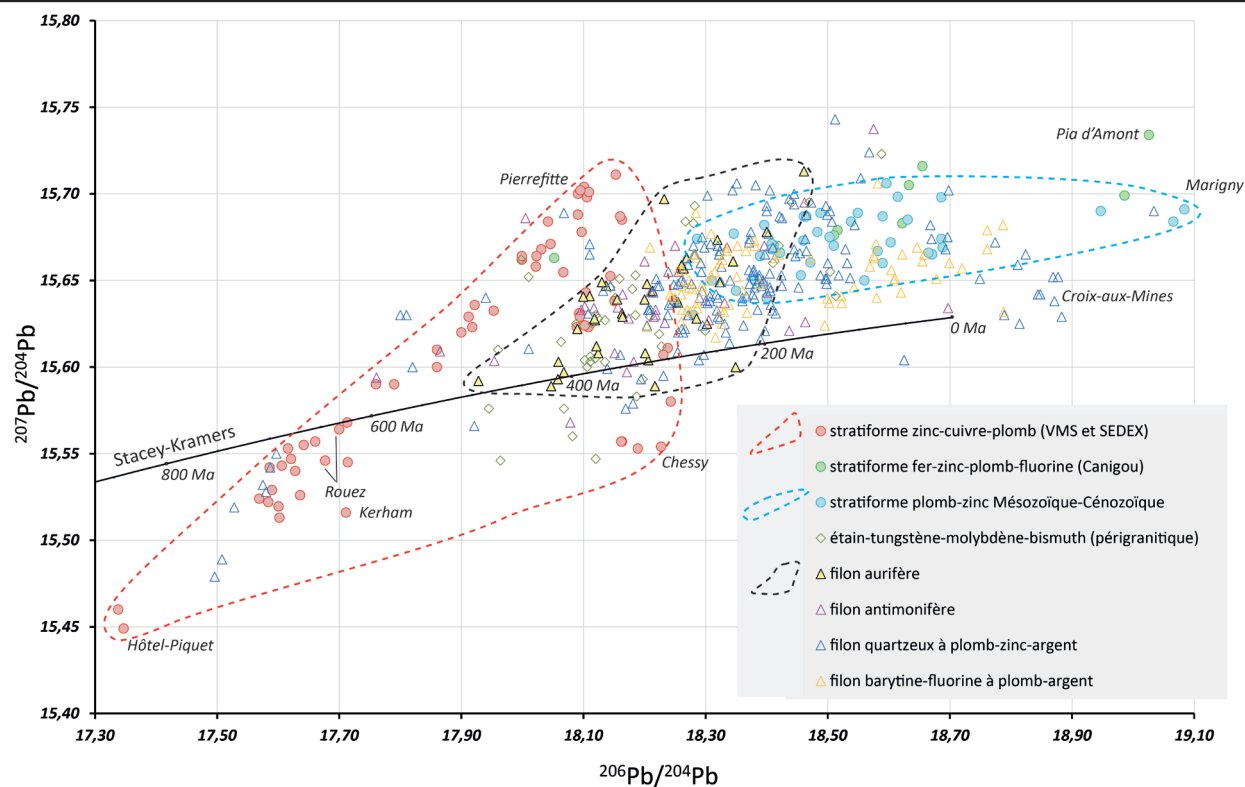


Figure 2.5 – Diagrammes $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les signatures des différents types de minéralisations. Les sites à plusieurs analyses identiques ou très proches sont représentés par leurs moyennes. Les analyses sont dans le tableau d'annexe 1.1, seules deux analyses à plomb très radiogénique du filon uranifère de Chaméane ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 20$) n'ont pas été reportées.

Figure 2.5 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams showing the signatures of the different types of deposits. Sites with several identical or very similar analyzes are represented by their averages. The analyzes are in appendix table 1.1, only two very radiogenic lead analyzes of the Chaméane uranium vein ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 20$) have not been reported.

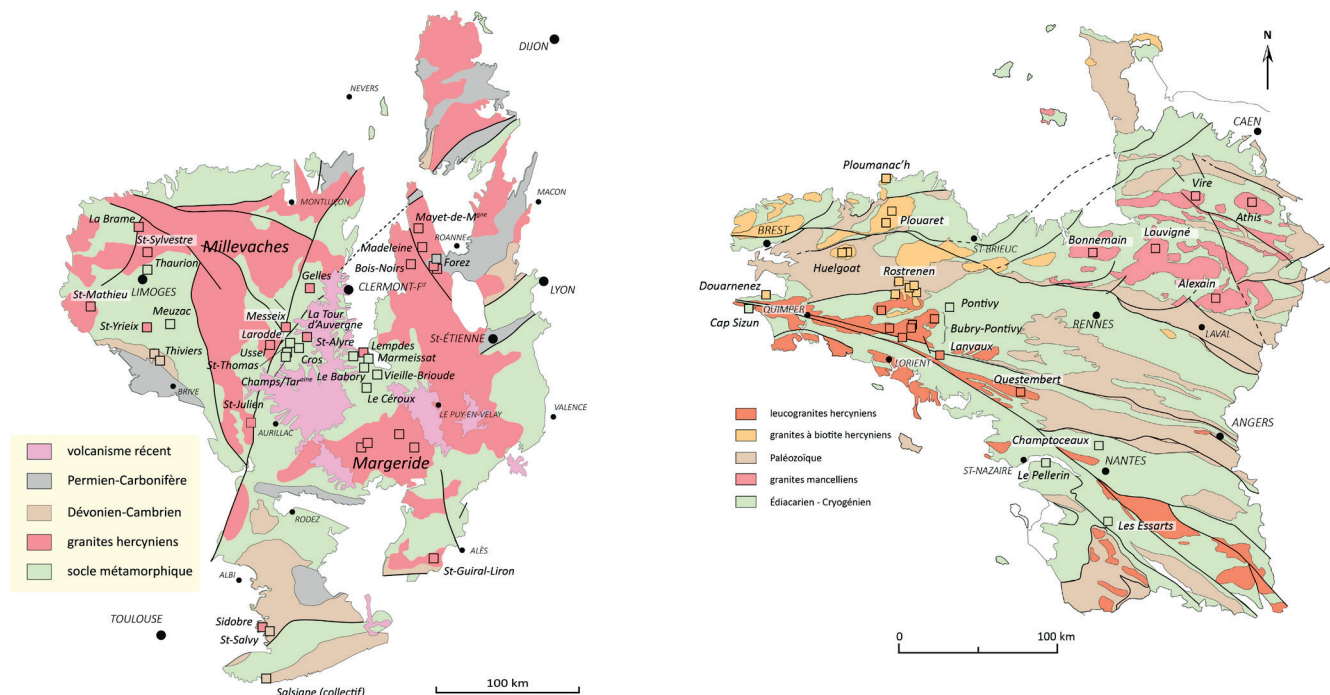


Figure 2.6 – Cartes de localisation des roches analysées du Massif central et du Massif armoricain. Gneiss plagioclasiq et gneiss micaschisteux du Massif central : localisations perdues (cf. tableau d'annexe 1.2).

Figure 2.6 – Location maps of the analyzed rocks of the Massif Central and the Armorican Massif. Plagioclasic gneiss and micaschist gneiss of the Massif Central: lost locations (see appendix table 1.2).

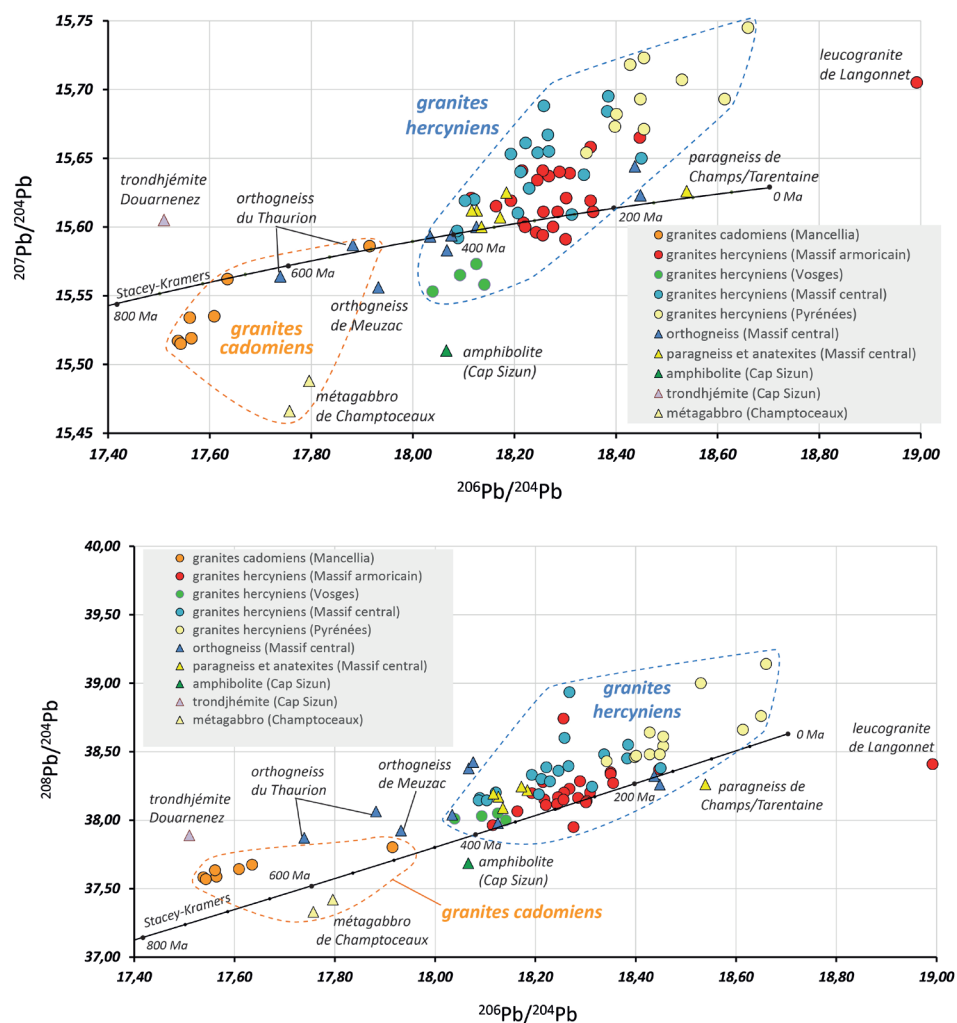


Figure 2.7 – Diagrammes $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des feldspaths potassiques des roches de métropole, correspondant aux compositions initiales de ces roches (d'après A. Michard-Vitrac, 1981 ; É. Marcoux, 1987 ; M. Le Guen et al., 1992). Les analyses sont dans le tableau d'annexe 1.2.

Figure 2.7 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams of potassium feldspar of metropolitan rocks, corresponding to the initial compositions of these rocks (after A. Michard-Vitrac, 1981 ; É. Marcoux, 1987 ; M. Le Guen et al., 1992). The analyzes are in appendix table 1.2.

2.2 - Compositions isotopiques de quelques roches métropolitaines

Les compositions isotopiques initiales des roches se mesurent sur les feldspaths potassiques à rapport μ et W nuls ou très faibles. Environ 60 feldspaths ont été analysés dans cette étude, principalement issus de roches magmatiques. Les résultats ont été complétés par ceux des travaux de Le Guen *et al.* (1991) en Montagne Noire, et de Michard-Vitrac *et al.* (1981) pour un ensemble de granites hercyniens de l'Hexagone (et des Hercynides occidentales) (Fig. 2.6 ; Tab. d'annexe 1b). Tous seront utilisés pour discuter les sources des minéralisations.

Les rapports mesurés couvrent une large gamme de valeurs qui reflète les âges des roches analysées, allant du Cambrien dans la Mancellia ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ groupés vers 17,54 à 17,63) au tardi-Hercynien (Fig. 2.7). Les granites hercyniens ont des compositions assez étalées sur lesquelles nous reviendrons, comme par exemple les leucogranites armoricains dont les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vont de 18,16 à 18,45 (exception faite du leucogranite de Langonnet dont la signature très radiogénique serait à confirmer). Toujours en Armorique, seule la trondhjémite ordovicienne (456 Ma) du Cap Sizun (ou de Douarnenez, Finistère) montre une valeur curieusement basse ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,51$). En considérant les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, on remarque surtout les valeurs élevées des granites pyrénéens (15,65 à 15,75), indice d'une croûte supérieure épaisse, et basses de granites vosgiens méridionaux (15,55 à 15,57), signe au contraire d'une forte participation de croûte inférieure.

Les âges des orthogneiss limousins de l'unité inférieure des gneiss s'organisent autour de deux pics : Cambrien inférieur (540 - 525 Ma) et Cambrien supérieur (501 - 498 Ma), (Melleton *et al.*, 2010 ; Faure *et al.*, 2024). Leurs compositions isotopiques s'accordent avec un âge cambrien pour l'orthogneiss de Thaurion ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 17,739 à 17,882 pour un âge de 457 ± 23 Ma ; Alexandre, 2007) et siluro-ordovicien pour celui de Meuzac ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 17,932 pour un âge admis vers 433 Ma). Les âges des orthogneiss d'Auvergne centrale sont débattus : Saint-Alyre est cambrien inférieur, daté par Rb/Sr à 535 ± 16 Ma (Mathonat, 1983) mais d'autres comme Le Céroux et Tauves ont des compositions qui s'accorderaient avec un âge ordovico-silurien ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18,034 et 18,125). Les paragneiss de l'unité supérieure des gneiss, d'âge aussi débattu, sont groupés vers 18,0-18,15 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), ce qui conforte un âge paléozoïque inférieur à moyen.

3. Signatures isotopiques et genèses des minéralisations

La géochimie isotopique du plomb est un très bon outil qui permet de décrypter, ou plus modestement d'approcher, certains problèmes métallogéniques majeurs comme la source des minéralisations, leur éventuelle parenté, l'ampleur des systèmes hydrothermaux concernés etc. bref leur genèse. Les informations chronologiques sont plus limitées.

3.1 - Types de minéralisations de l'Hexagone

La quasi-totalité des minéralisations de métropole se localisent dans les massifs anciens et sur leurs bordures sédimentaires, qu'ils s'agissent de mines exploitées, de gîtes, travaillés ou non, ou encore de simples indices. Ces minéralisations appartiennent à différents types géologiques.

Les minéralisations stratiformes :

- amas sulfurés polymétalliques (cuivre-zinc-plomb) du Protérozoïque et Paléozoïque de type VMS et SEDEX ;
- amas et couches particuliers (plomb-zinc-fer-fluorine-barytine) du Canigou dans le Paléozoïque des Pyrénées-Orientales ;
- dépôts sédimentaires plomb-zinc du Mésozoïque-Cénozoïque (type MVT et assimilés).

Des minéralisations filoniennes :

- filons quartzeux à plomb-zinc-cuivre-(argent) et aussi quelques filons à plomb-uranium et uranium ;
- filons quartzeux à antimoine (et sulfosels d'antimoine-plomb) ;
- filons aurifères, principalement de type *shear zone* ;
- filons à fluorine-barytine-(plomb) avec parfois des corps stratiformes associés.

Enfin des minéralisations magmatiques plus polymorphes intra- et périplutoniques à étain-tungstène-molybdène-(or) avec deux familles morphologiques :

- filons et stockwerks à tungstène, étain, bismuth, or... ;
- porphyre, skarn, *breccia pipe* (ou pipe) à molybdène, tungstène et/ou cuivre.

Toutes les compositions isotopiques données dans le texte et les figures de ce chapitre figurent dans le tableau d'annexe 1a, classées par massif puis par type de minéralisation.

3.2 - Minéralisations stratiformes : de l'Édiacarien au Crétacé

3.2.1 – Gîtes stratiformes à cuivre-zinc-plomb du Protérozoïque et du Paléozoïque

Ces minéralisations stratiformes forment des lits, des lentilles, parfois des amas (d'où leur appellation courante un peu ambiguë « d'amas sulfurés »), interstratifiés dans des formations volcanosédimentaires. On distingue celles de type VMS (*Volcanogenic Massive Sulphides*), spatialement associées à leur volcanisme-source, et celles de type SEDEX (*Sedimentary Exhalative*) associées à des sédiments souvent pélitiques et grauwaqueux, et spatialement dissociées du volcanisme-source. En France, on les rencontre dans le Massif armoricain, le Massif central et les Pyrénées, de l'Édiacarien jusqu'au Dévonien supérieur (Fig. 3.1).



Figure 3.1 – Carte générale de situation des minéralisations stratiformes analysées.

Figure 3.1 – General situation map of the stratiform mineralizations analyzed.

Édiacarien

On remarque que tous les sites à signatures basses ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 17,75$) sauf un (Montmarçon) sont situés dans le Massif armoricain, notamment dans le « bloc cadomien » âgé de 670 à 541 Ma, dans lequel les terrains protérozoïques cryogéniques (vers 720-635 Ma ; ex-Pentévrien et Briovérien inférieur) et surtout édiacariens (539-635 Ma, essentiellement l'ancien « Briovérien supérieur ») sont très présents : Trégor, Mancellic et Cotentin, Îles anglo-normandes. Il est hautement probable que ce plomb provienne du lessivage des roches protérozoïques locales (Fig. 3.2). Le gisement SEDEX de Rouez (Sarthe) avec ses 93 Mt (au minimum) de sulfures polymétalliques, est le plus bel exemple de sulfures stratiformes édiacariens. Sa composition ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,68$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,55$) atteste d'une genèse à l'Édiacarien au sein d'une croûte continentale. Kerham (Côtes d'Armor) et surtout l'Hôtel Piquet (Manche) sont un peu différents, avec des valeurs de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plus basses (respectivement 15,516

et 15,451) qui indiquent une nette contribution mantellique en accord, au moins à l'Hôtel Piquet, avec le contexte d'arc insulaire sur une croûte mince (Deschamps *et al.*, 1994). On rencontre aussi ce plomb édiacarien, avec une affinité mantellique plus marquée, dans les sulfures stratiformes de Saint-Georges-sur-Loire, plutôt de type VMS, qui affichent des compositions proches de celles de Rouez ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,57$ à $17,72$). Ils expriment un hydrothermalisme édiacarien dans un contexte géodynamique complexe où les amas sulfurés semblent appartenir à des olistolites transportés sans doute depuis les Mauges (Cartier et Faure, 2004). Dans le nord Massif central, le gîte stratiforme polymétallique de Montmarçon (Indre), étant donné sa signature isotopique identique à celle de Rouez, est un VMS très probablement édiacarien.

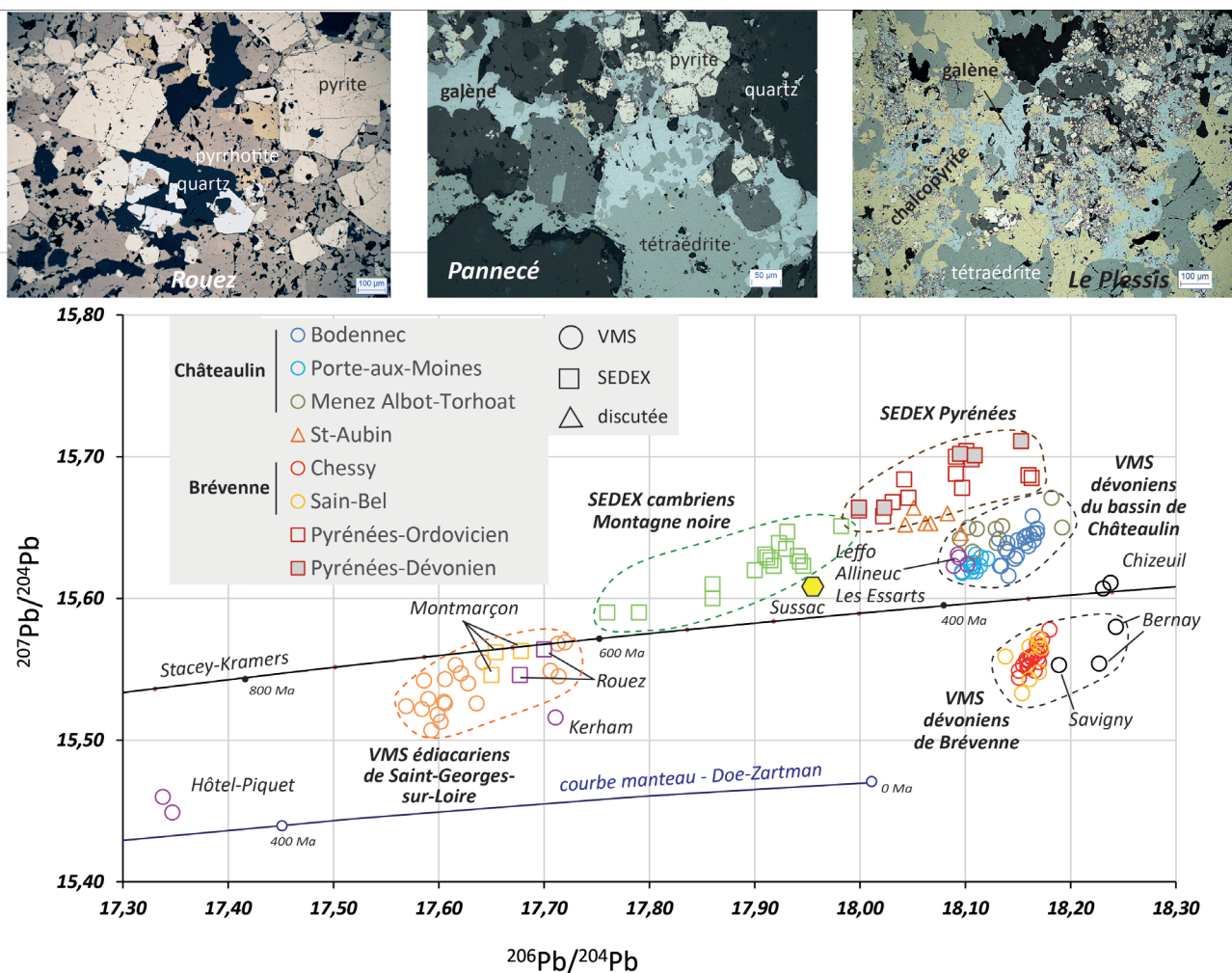


Figure 3.2 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des gîtes stratiformes VMS et SEDEX édiacariens et paléozoïques. Les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1. Photos au microscope en lumière réfléchie : minerais de trois amas sulfurés édiacariens armoricains avec position de la galène analysée : Rouez (galène rare absente de la photo), Pannecé et Le Plessis (Saint-Georges-sur-Loire) © É. Marcoux.

Figure 3.2 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of Ediacaran and Paleozoic VMS and SEDEX stratiform deposits. The selected data are shown in Appendix Table 1.1. Photos (reflected light microscope, plane polarized light): ores with location of analyzed galena from three Armorican sulphide deposits: Rouez (rare galena), Pannecé and Le Plessis (Saint-Georges-sur-Loire) © É. Marcoux.

Les âges modèles : 616 Ma (Rouez), 577 à 686 Ma (Saint-Georges-sur-Loire), 686 Ma (l'Hôtel Piquet), 591 Ma (Kerham), 632 Ma (Montmarçon) confirment une formation à l'Édiacarien et sont cohérents avec les données géochronologiques connues mais ne peuvent être pris comme les âges vrais. C'est néanmoins un indice fort de la prolongation du socle édiacarien dans cette zone du nord-Massif central. Ce plomb édiacarien va se retrouver mobilisé lors des orogénèses calédonienne et hercynienne ultérieures, illustrant le concept de permanence dont nous reparlerons.

Paléozoïque

Les lentilles de sulfures polymétalliques se rencontrent du Cambrien au Dévonien. Au Cambrien, il s'agit pour l'essentiel des SEDEX à plomb-zinc de la Montagne noire ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,760$ à $17,953$), principalement sur son versant sud (Fig. 3.2). Ces lentilles se sont formées au Cambrien inférieur dans un contexte de plate-forme continentale à sédimentation carbonatée, proche des gisements de type irlandais (Navan-Tara, Silvermines...). Le plus important gisement est La Loubatière (44 kt Pb et 77 kt Zn). Sussac (Haute-Vienne) est assez mal connu mais il s'agit probablement d'un amas sulfuré cupro-zincifère cambrien ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,96$) télescopé et « skarnifié » par un granite qui lui a adjoint une minéralisation stannifère.

Le gîte de Sussac dans le Limousin ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,96$), recoupé par sondages, est probablement un amas sulfuré volcanogénique à zinc-cuivre cambro-ordovicien auquel s'est surimposée une minéralisation périgranitique à étain-tungstène, il sera abordé dans cette partie.

Dans les Pyrénées, on connaît des lentilles sulfurées de type SEDEX à l'Ordovicien (Pierrefitte, Chèze, Argut...) et au Dévonien (Nerbiou, Arrens, Carboire...), dont la plupart furent exploitées pour le plomb et le zinc (plus de 100 kt plomb + zinc à Pierrefitte). Les compositions isotopiques des deux époques dessinent un champ commun unique qui s'étale pour $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,00 à 18,16 (Marcoux *et al.*, 1991). Ce résultat peut s'interpréter de deux manières : un épisode métallogénique dévonien unique qui minéralise indifféremment les formations ordoviciennes et dévoniennes, ou une forte remobilisation de sulfures ordoviciens lors d'un épisode hydrothermal dévonien.

Le Dévonien (419-359 Ma) montre aussi de nombreux amas de sulfures massifs dans le Massif armoricain, le Massif central et aussi les Pyrénées (abordés dans le paragraphe précédent). Dans le Massif armoricain, ils se distribuent dans trois secteurs volcanosédimentaires dévoniens de la bordure du bassin de Châteaulin : Porte-aux-Moines, les indices

voisins de Leffo, Alleneuc et les Essarts (Côtes d'Armor) et Bodennec sur la bordure nord, Menez-Albot - Torhoat (Finistère) sur la bordure sud. Les compositions isotopiques sont légèrement mais significativement différentes entre elles et cohérentes avec un âge dévonien inférieur, les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ assez élevés traçant une origine crustale sans participation mantellique décelable (Fig. 3.2). La différence de compositions résulte soit d'âges de mise en place légèrement différents, soit de sources différentes, soit des deux. Les compositions sont très homogènes à l'échelle des gîtes de Bodennec ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,151), et de Porte-aux-Moines ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,108). Les âges modèles calculés restent globalement dans le Dévonien mais varient selon que l'on utilise le modèle 1 ou 2 de la méthode *Isoplot* de Ludwig (2003), respectivement 392 et 432 Ma (Bodennec), 421 et 436 Ma (Porte-aux-Moines), montrant bien que le chronomètre plomb ne donne qu'une information peu précise dans ces gammes d'âges. Les sulfures polymétalliques dans l'Ordovicien inférieur de Saint-Aubin-des-Châteaux (Gloaguen *et al.*, 2007) ont une allure stratiforme et filonienne et une composition ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 18,043 à 18,096) qui n'apporte pas d'élément déterminant sur leur nature et leur âge.

Dans l'est du Massif central, les terrains volcanosédimentaires à ophiolites du Dévonien de la Brévenne (volcanites datées à 358 et 366 Ma), notamment les niveaux rhyolitiques, portent des amas sulfurés polymétalliques anciennement exploités (Chessy, Sain-Bel et ses 20 Mt de pyrite avec chalcoppyrite) et des indices de même type (Savigny, Bernay, Biesse...). Leur signature isotopique, très homogène, est marquée par

des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ particulièrement bas (respectivement 15,557 à 15,580 et 37,773 à 37,875) qui traduisent une forte composante mantellique, en accord avec le contexte de bassin d'arrière-arc à croûte océanique de la Brévenne à cette époque (Fig. 3.2 et 3.3). Les sondages à Chessy et Bernay ont aussi intercepté des disséminations à pyrite-chalcoppyrite à signature isotopique plus radiogénique mais leur appartenance à un épisode volcano-sédimentaire (et si oui, de quel âge ?) n'est pas établie (cf. Chapitre 6). Ils seront discutés dans le chapitre sur l'apport à l'exploration minière. Dans le Morvan, l'amas sulfuré de Chizeuil (Saône-et-Loire) associé à une dacite du Famennien (378 ± 2 Ma) possède une signature isotopique différente où la participation du manteau semble absente, ce qui est logique, l'arc du Morvan possédant un substratum de croûte continentale éo-varisque (Faure *et al.*, 2005).

Malgré un volcanisme connu durant tout le Paléozoïque, on ne connaît pas de gîtes stratiformes polymétalliques plus récents que le Dévonien, contrairement à la Sud-Ibérie où les amas sulfurés géants (Riotinto, Neves Corvo, Tharsis, La Zarza, Aznalcollar...) datent du Tournaisien (entre 345,7 et 351,5 Ma ; Valenzuela *et al.*, 2011) et surtout appartiennent au domaine saxo-thuringien : ils relèvent donc de la subduction de l'océan Tepla-Le Conquet. La signature isotopique des amas sud-ibériques, remarquablement homogène étant donné leur distribution (actuelle) sur plus de 250 km, est légèrement mais significativement différente de celles des amas dévoniens armoricains (Marcoux, 1998), (Fig. 3.3 ; Tab. 3.1).

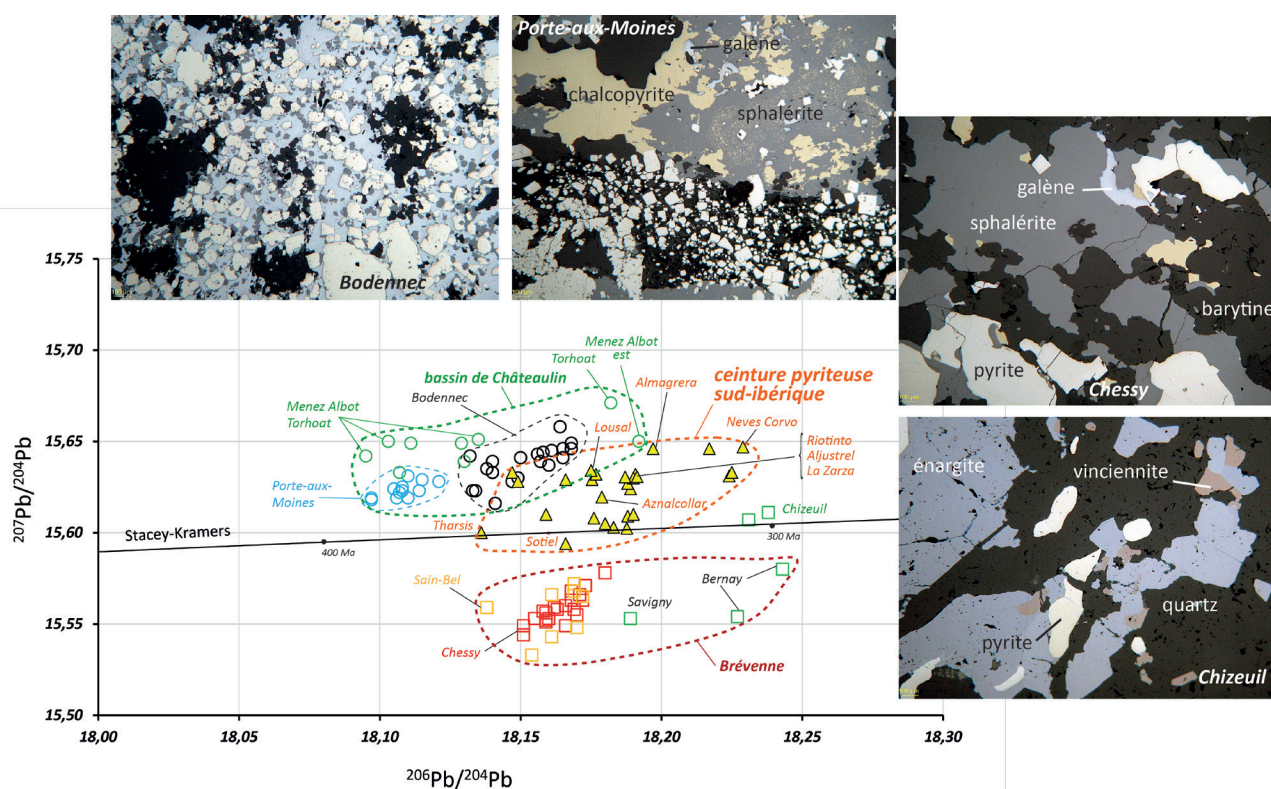


Figure 3.3 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des gîtes stratiformes VMS dévoniens ; comparaison avec les compositions de la ceinture pyriteuse sud-ibérique avec ses principaux gisements. Les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1 et le tableau 3.1 pour la ceinture pyriteuse sud-ibérique. Photos au microscope en lumière réfléchie : minerais d'amas sulfurés dévoniens : Bodennec avec galène analysée (blanche), pyrite (blanc-jaune) et sphalérite (gris clair) et Porte-aux-Moines à sphalérite-galène (Massif armoricain), Chessy et Chizeuil (Massif central) © É. Marcoux.

Figure 3.3 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of Devonian VMS stratiform deposits; comparison with the compositions of the South Iberian Pyrite Belt main deposits. Selected data are shown in Appendix Table 1.1 and Table 3.1 for the South Iberian Pyrite Belt. Photos (reflected light microscope, plane polarized light): ores from Devonian massive sulphides deposits: Bodennec with analyzed galena (white), pyrite (white-yellow) and sphalerite (light gray) and Porte-aux-Moines with sphalerite-galena (Armorican Massif), Chessy and Chizeuil (Massif central) © É. Marcoux.

gîte analysé	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
gisements septentrionaux			
Sao Domingos	18,175	15,629	38,215
El Carmen (haldes)	18,189	15,624	38,195
Santa Ana (haldes)	18,188	15,627	38,190
Sierrecilla (haldes)	18,224	15,631	38,219
La Joya	18,183	15,603	38,132
San Telmo	18,188	15,602	38,133
Lomero-Poyatos	18,217	15,646	38,272
La Zarza	18,191	15,632	38,210
Concepcion	18,176	15,608	38,176
San Platon	18,188	15,609	38,158
Rio Tinto	18,190	15,630	38,217
Chaparrita	18,166	15,594	38,107
Peña de Hierro	18,180	15,605	38,079
gisements médians			
Lagoa Salgada	18,191	15,631	38,211
Lousal	18,177	15,632	38,232
Aljustrel	18,187	15,630	38,218
Herrerias	18,225	15,633	38,223
Tharsis (filon Norte)	18,136	15,600	38,156
Almagrera	18,197	15,646	38,289
Torerera (haldes)	18,175	15,634	38,225
Sotiel	18,166	15,629	38,208
Sotiel-Migollas	18,147	15,633	38,236
Campanario (haldes)	18,149	15,628	38,220
Buitron	18,159	15,610	38,170
gisements méridionaux			
Montinho (haldes)	18,190	15,610	38,136
Aznalcollar	18,179	15,620	38,151
Neves Corvo	18,229	15,647	38,305
moyenne globale	18,184	15,623	38,196

Tableau 3.1 – Compositions isotopiques moyennes du plomb des principaux amas sulfurés de la ceinture pyrénienne sud-ibérique (voir Marcoux, 1998, pour les valeurs complètes et Pomies et al., 1998, pour des compléments sur celles de Riotinto).

Table 3.1 – Average isotopic compositions of lead of the main massive sulphide ore deposits of the South Iberian pyrite belt (see Marcoux, 1998, for the complete values and Pomies et al., 1998, for additional information on those of Riotinto).

Les compositions isotopiques du plomb des roches volcaniques du Massif armoricain et du Massif central n'ont pas été mesurées. Cependant, comme en Sud-Ibérie, le plomb et les autres métaux des amas sulfurés proviennent très probablement des dacites et rhyolites associées, soit directement par leur présence dans les fluides exsolvés par le magma, soit indirectement par un auto lessivage de fin de cristallisation de ces roches.

3.2.2 – Gîtes stratiformes polymétalliques du Canigou

Ces minéralisations hydrothermales stratiformes sont particulières, avec des sulfures de plomb-zinc, parfois de cuivre (Oms), de la fluorine (Escaro), de la barytine, et parfois de la sidérite si abondante qu'on les a alors exploitées pour le fer. Toutes sauf une (La Manère) possèdent des rapports élevés ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 18,510 à 19,026 ; cf. Fig. 2.5) qui montrent qu'elles relèveraient plutôt d'une métallogénèse hercynienne ou post-hercynienne, et indépendante des minéralisations exhalatives ordoviciennes ou dévoniennes des Pyrénées (Marcoux et al., 1991). Cela semble confirmé par les âges radiométriques de 190 Ma et 90 Ma (rajeunissement ?) obtenus à Escaro (Cartier et Huard, 1980). Ces minéralisations ont fait l'objet de très peu de travaux et sont peu ou pas considérées dans les grandes synthèses géologiques pyrénéennes (Laumonier, 2015).

3.2.3 – Gîtes stratiformes à plomb-zinc du Mésozoïque - Cénozoïque

Ces minéralisations stratiformes à galène-sphalérite forment des amas, lentilles et imprégnations sulfurées dans les séries sédimentaires qui amorcent la transgression mésozoïque sur les marges du Massif central, essentiellement des séries carbonatées de plate-forme et des niveaux gréseux qui s'étagent du Trias au Bathonien (Jurassique moyen), rarement au Crétacé (Pyrénées). On les rencontre pour l'essentiel sur les bordures du Massif central, notamment sur la bordure cévenole, entre Largentière (Ardèche) et Les Malines (Gard), les deux anciennes mines majeures du district, et plus sporadiquement sur le seuil du Poitou, autour du Morvan, des massifs externes des Alpes... Elles présentent de très fortes similitudes avec les gisements de type *Mississippi Valley* (cf. § 1.3).

Les compositions isotopiques montrent une importante dispersion avec des valeurs s'étalant de 18,286 à 19,084 (Marigny, Morvan) pour le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, les gîtes du district majeur qu'est la bordure cévenole s'étalant de 18,28 à 18,947 (Fig. 3.4). Toutes se situent bien au-dessus de la courbe de Stacey-Kramers ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 15,62 à 15,72) traçant un milieu de croûte continentale supérieure qui cor-

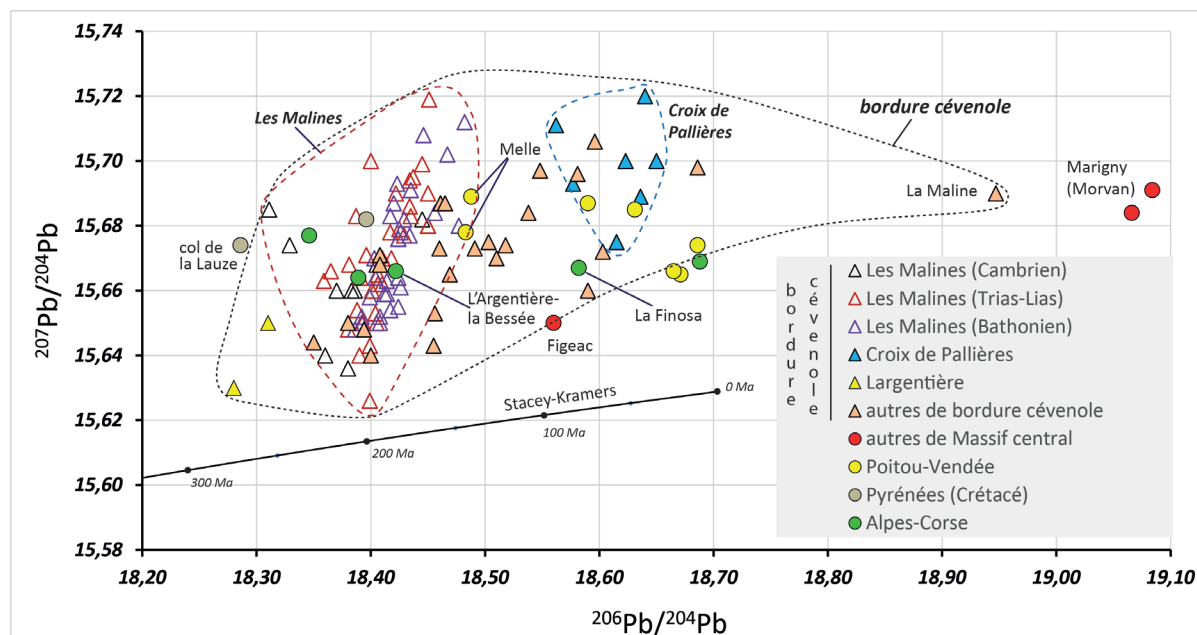


Figure 3.4 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations stratiformes mésozoïques et cénozoïques. Les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1.

Figure 3.4 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of Mesozoic and Cenozoic stratiform mineralizations. The selected data are shown in appendix Table 1.1.

respond bien au cadre de plates-formes carbonatées qui a vu naître ces minéralisations.

On n'observe aucun lien entre la composition isotopique et la situation géographique ou l'âge de la couche minéralisée. Ainsi aux Malines, bien que les galènes se répartissent dans trois niveaux : Cambrien (en remplissage karstique), Trias (230 Ma) et Bathonien (168 Ma), les compositions isotopiques ne dessinent qu'un seul champ isotopique étalé et non pas trois, soulignant à nouveau l'usage très prudent qu'il convient de faire des âges modèles. De plus, il est intéressant de noter que l'âge modèle le plus récent (et même futur !) calculable à Marigny concerne une galène dans le Trias du Morvan, alors que l'âge le plus « ancien » calculable (Col de la Lauze) se rapporte à une galène encaissée dans le Crétacé des Pyrénées, soit l'étagé-hôte le plus récent (Fig. 3.4).

3.3 - Minéralisations non stratiformes

Les filons et d'autres types de minéralisations non stratiformes (porphyre, skarns...) sont les plus fréquentes sur le territoire métropolitain, rien de surprenant à ce qu'ils aient été le plus analysés (Fig. 3.5). Deux cartes générales (Fig. 4.1 et 4.25) sont proposées plus loin afin de les situer, géographiquement et typologiquement, dans les deux grands massifs anciens de l'Hexagone.

3.3.1 - Minéralisations périgranitiques à étain-tungstène-molybdène-(or)

Ces minéralisations sont issues de l'expulsion des fluides magmatiques minéralisés en étain, tungstène, molybdène, parfois or... à la fin de la cristallisation du magma. Elles adoptent des morphologies variées et se distribuent sur les bordures internes (porphyre, stockwerk, greisens...) et externes (filons, stockwerk, *pipes*, skarns ...) du magma cristallisé, d'où le

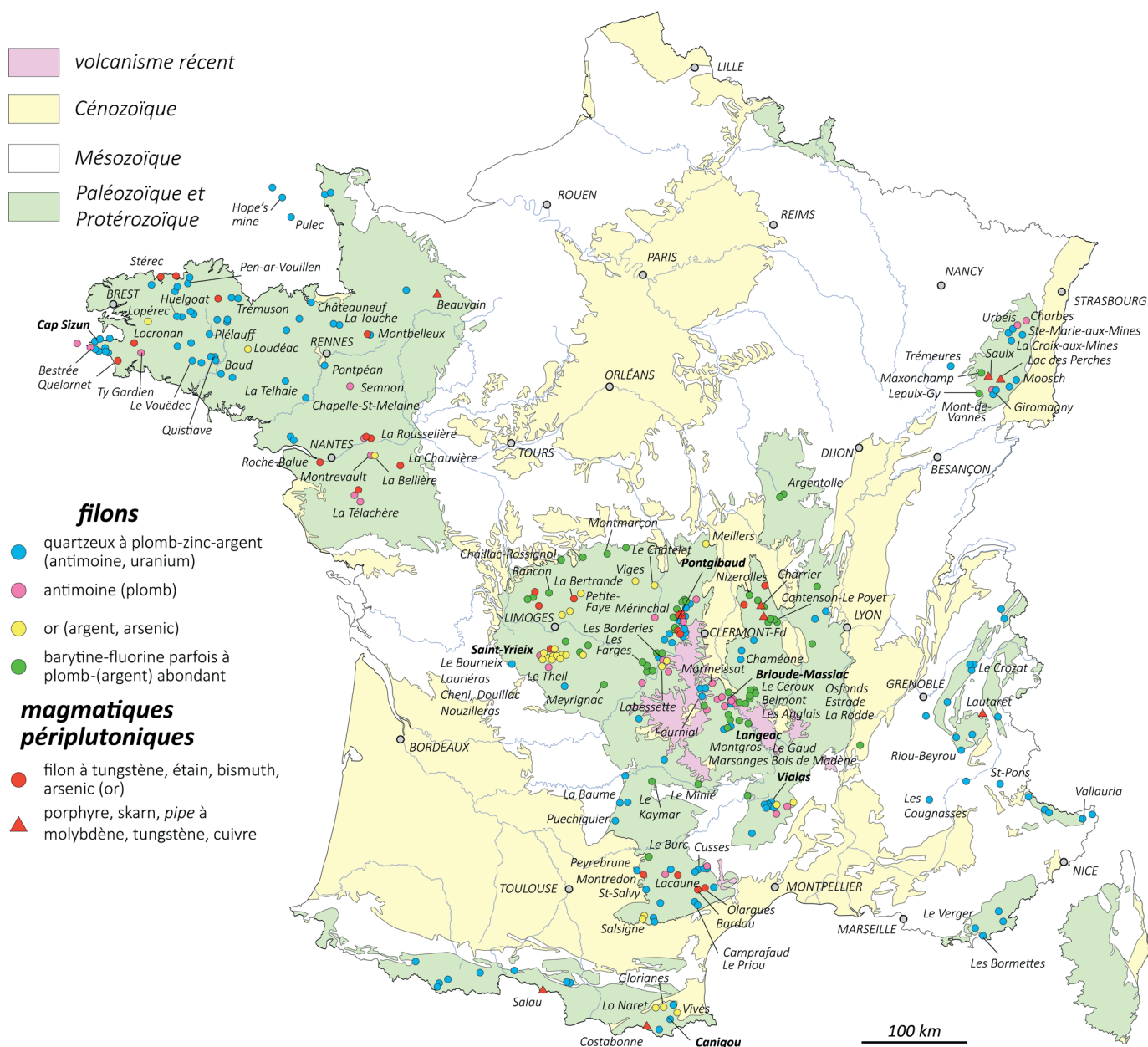


Figure 3.5 - Carte générale des filons et minéralisations périgranitiques (porphyres, skarns...) analysés.

Figure 3.5 - General map of perigranitic mineralizations (veins, porphyries, skarns, etc.) analyzed.

terme générique de « périgranitique » pour les désigner. Les sites analysés sont des filons, parfois des stockwerks de sommet de coupole (La Rousselière), plus rarement des porphyres (Beauvain), des skarns (Salau, Costabonne,) ou des skarnoïdes à cuivre-étain (Charrier, Lautaret). Vialas (Lozère) est un district plombo-zincifère avec deux filons très riches en étain (La Vigne et Soleyrol, probablement d'anciens filons stannifères périgranitiques repris par les fluides plombo-zincifères) qui ont été placés dans cette catégorie.

Nombre de ces sites (Salau, Montbelleux, Montredon, Charrier...) ont été exploités. Les minéraux dominants sont des oxydes (cassitérite, wolframite) et/ou des sulfures (pyrite et arsénopyrite, galène et sphalérite étant le plus souvent accessoires) et fréquemment l'or. Leur âge est essentiellement hercynien, à quelques exceptions près comme Montbelleux (Ille-et-Vilaine), un gisement de tungstène et étain d'âge cadomien (vers 525 Ma).

Les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ s'étendent de 17,94 à 18,59 avec un groupement entre 18,10 et 18,30, largement commun avec le champ dessiné par la composition moyenne initiale des granites hercyniens, datés à 320-300 Ma (Fig. 3.6). Les valeurs les moins radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 18,0$) correspondent à Montbelleux, à Salau (Pyrénées), un skarn repris par une *shear zone* aurifère, au filon du Lac des Perches et au skarn de Saulx ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,961$ et $18,120$) dans les Vosges. Beauvain, l'unique porphyre à molybdène connu du territoire, affiche une composition assez peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,111$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,606$),

tout comme La Rousselière dans le Maine-et-Loire ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,063$), un apex de coupole tardi-hercynienne polymétallique (Mo-Sn-W-Bi-Pb-Zn). Le skarn à bornite-cassitérite du Lautaret (Hautes-Alpes) montre à l'inverse une composition radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,51$). Les trois sites de la Montagne noire (Olargues, Bardou et Lacaune) ont des compositions isotopiques élevées, proches de 18,40. Rappelons que Sussac (Haute-Vienne) est un amas sulfuré probablement cambrien, « skarnifié » par un granite stannifère hercynien. Il a été examiné dans la partie précédente.

Les fortes variations de compositions isotopiques des gîtes compliquent l'approche de leurs sources. Beaucoup affichent une composition isotopique identique à celle des granites accompagnateurs suggérant qu'ils sont très probablement la source du plomb et des éléments associés, véhiculés par les fluides tardi-magmatiques jusqu'au sommet de pluton et à sa périphérie. C'est le cas par exemple de Montbelleux, à signature ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,945$) cohérente avec une source dans le leucogranite cambrien encaissant, du porphyre carbonifère de Beauvain ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,111$), qui n'a donc pas récupéré de plomb dans l'encaissant édiacarien et cambrien, de Charrier ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,106$) au contact du granite de la Madeleine ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,121$), des gîtes du district de Pontgibaud, Vialas, Locronan, Stérec... et très probablement de Roche-Balue ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,19$). La Rousselière ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,063$) est plus complexe avec un possible héritage édiacarien, mais en l'absence d'analyse du microgranite-père, il n'est pas possible de trancher.

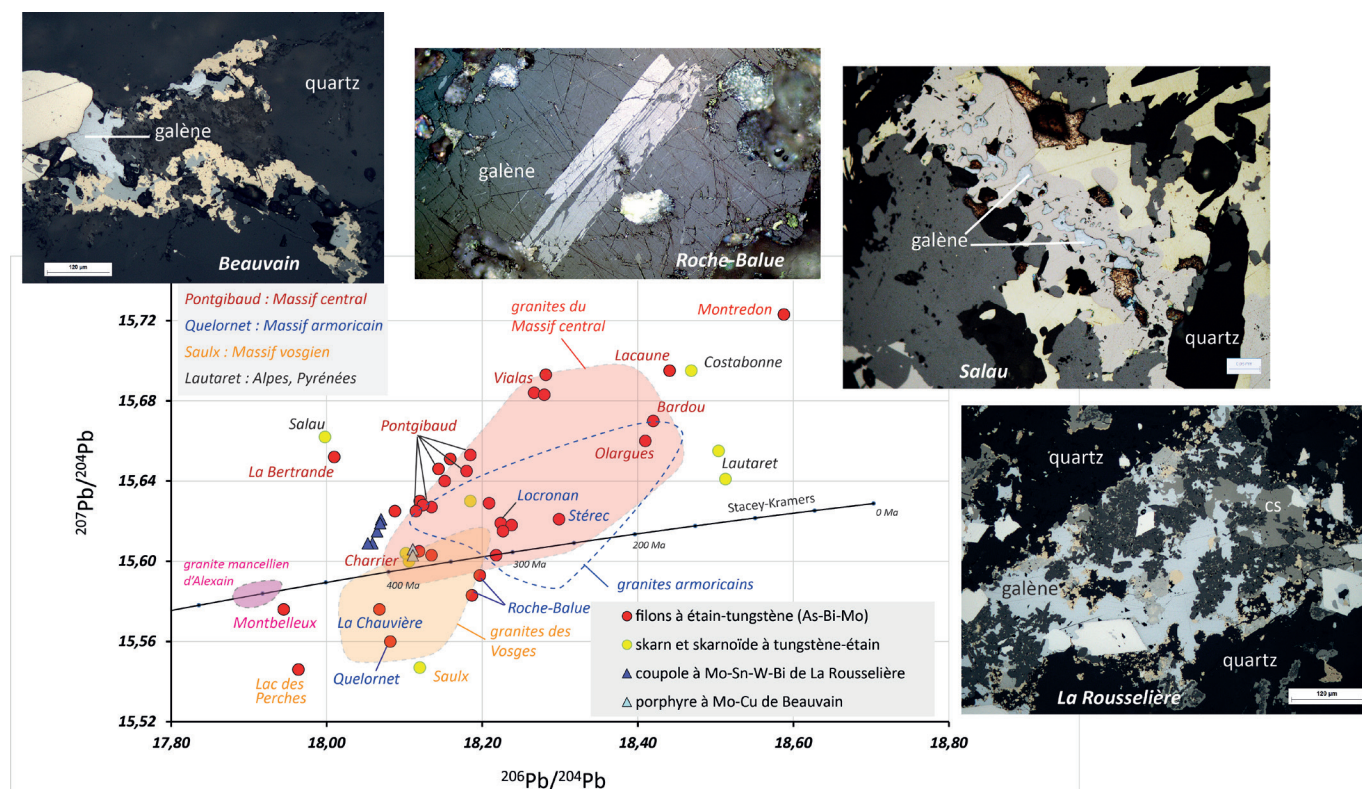


Figure 3.6 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations périgranitiques à étain, tungstène et/ou molybdène-or. Les champs de compositions initiales des granites armoricains, centraliens et vosgiens sont dessinés pour comparaison, leur mise en place étant sub-synchrone de minéralisations périgranitiques associées. Les données sélectionnées sont indiquées dans les tableaux d'annexe 1.1 pour les minéralisations et 1.2 pour les granites. Photos au microscope en lumière réfléchie (naturelle sauf Roche-Balue en polarisée) des minéraux de quatre gisements avec les galènes analysées. Beauvain : galène avec chalcopryrite (jaune), tétraédrite (gris-vert) et sphalérite (gris foncé) ; Roche-Balue : galène à cristaux automorphes de gustavite ; Salau : galène disséminée dans pyrrhotite (brunâtre) avec chalcopryrite (jaune) et bismuth (plages très rayées) ; La Rousselière : galène, stannite (gris verdâtre), arsénopyrite (blanc) et cassitérite (cs, gris sombre) © É. Marcoux.

Figure 3.6 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of perigranitic tin, tungsten and/or molybdenum-gold mineralization. The initial compositional fields of the armoricain, centralian and vosgian granites are drawn for comparison, their emplacement being sub-synchronous with associated perigranitic mineralization. The selected data are indicated in appendix tables 1.1 for ore deposits and 1.2 for granites. Photos (reflected light microscope, plane polarized light except Roche-Balue analyzed polarized light) of ores from four deposits with analyzed galenas. Beauvain: galena with chalcopryrite (yellow), tetrahedrite (gray-green) and sphalerite (dark gray); Roche-Balue: galena with automorphic gustavite crystals; Salau: disseminated galena in pyrrhotite (brownish) with chalcopryrite (yellow) and bismuth (very striped areas); La Rousselière: galena, stannite (greenish gray), arsenopyrite (white) and cassiterite (cs, dark gray) © É. Marcoux.

Dans d'autres cas, c'est l'inverse : les fluides tardi-magmatiques ont emprunté le plomb à l'encaissant et le plomb magmatique, s'il est présent, est trop dilué pour être décelable. C'est notamment le cas pour Salau ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,998$), à plomb trop peu radiogénique par rapport à l'intrusion-mère tardi-hercynienne, Quelornet et La Chauvière en Armorique, Montredon (Tarn), Costabonne (Pyrénées) ou encore la Bertrande (Limousin).

3.3.2 - *Shear zones* et autres filons aurifères

Sur le territoire, les gîtes aurifères sont surtout des *shear zones* aurifères, de puissants couloirs cisailants jalonnées de lentilles de quartz, et des filons périgranitiques. Salsigne, de loin la plus importante mine d'or métropolitaine avec 118 tonnes produites de 1904 à 2004 est un gisement polymorphe à contrôle structural complexe sur lequel nous reviendrons.

Les *shear zones* sont particulièrement développées dans le socle du Limousin où elles ont été largement exploitées dans les mines de Laurières, Le Bourneix, Cheni, Nouzilleras, Douillac etc. D'autres filons aurifères ont aussi été analysés : Pyrénées (Glorianes, Vivès, Lo Naret), Massif armoricain (Lopérec, Loudéac et l'ancienne mine de La Bellière d'âge viséen vers 335 Ma ; Cheval-Garabédian *et al.*, 2020), et Massif central (Labessette). Il s'agit toujours de minéralisations d'allure filonienne souvent assez polymétalliques à arséno-pyrite dominante, pyrite et sulfures variés (galène, sphalérite, bismuthinite...), or natif dans une gangue de quartz. L'or y est le métal économique, mais il est loin d'être le plus abondant avec des teneurs moyennes entre 1 et 10 g/t. Meillers a aussi été intégré, bien qu'il s'agisse d'un sinter siliceux permien aurifère (0,6 g/t ; Marcoux *et al.*, 2004) et non pas d'un filon. La plupart de ces minéralisations relèvent de l'épisode « or 300 » qui a notamment vu la mise en place des filons aurifères du Limousin vers 300-305 Ma (Bouchot *et al.*, 1997, 2000, 2005), mais aussi ceux de Labessette dans le Puy-de-Dôme (288 à 297 ± 9 Ma ; Bril *et al.*, 1991).

Les compositions isotopiques sont assez étalées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,928$ à 18,50) avec cependant un regroupement entre 18,10 et 18,35 (Fig. 3.7). La valeur la plus basse a été mesurée à Loudéac (Côtes d'Armor) sur un filon aurifère encaissé dans des schistes édiacariens. Les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ assez élevés (entre 15,60 et 15,72 pour l'essentiel) dénotent une évolution dans un environnement crustal, sans participation perceptible du manteau.

Les gîtes et gisements aurifères du Limousin (Laurières, Le Bourneix, Nouzilleras, Douillac...) montrent une signature assez homogène ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,05 à 18,16), les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ supérieurs à 18,21 se rapportant à trois filons aurifères particuliers à galène et barytine abondantes (La Fagassière, Champvert, Lécucas). Les compositions des gîtes de la Marche (Le Châtelet, Vige, Petite-Faye) sont similaires mais plus groupées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,059 à 18,201) et plus proches de la courbe de Stacey-Kramers. À Salsigne, les 22 échantillons analysés appartiennent aux 5 types de minerais arséniés aurifères. Ils dessinent un champ de composition assez étendu, où les trois galènes montrent des compositions variées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,131 à 18,351) indiquant que la dispersion des compositions est originelle et ne relève pas d'enrichissements radiogéniques. Ce gisement sera analysé en détail plus loin. Le petit district filonien de Pontvieux-Labessette (Puy-de-Dôme) possède une paragenèse formée en plusieurs étapes et affiche deux champs de compositions isotopiques qui correspondent aux deux étapes à minéraux plombifères ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,200 à 18,235 et de 18,253 à 18,285). Les gîtes des Pyrénées, bien que géographiquement proches les uns des autres, affichent des compositions très variables notamment dans les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, suggérant la participation de croûte supérieure ancienne. Les sources potentielles des principaux districts seront abordées dans le chapitre suivant.

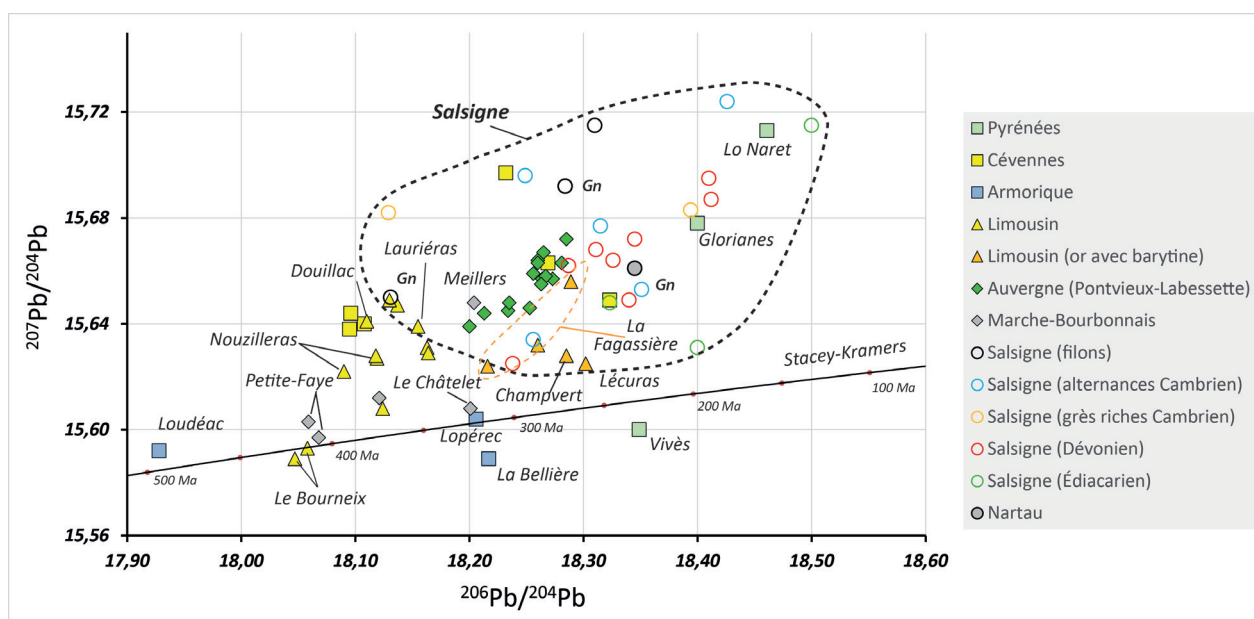


Figure 3.7 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations aurifères. Gn désigne les galènes de Salsigne ; les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1.

Figure 3.7 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of gold mineralization. Gn designates the galenas of Salsigne; the selected data are shown in Appendix Table 1.1.

3.3.3 - Filons antimonifères (avec or)

Ces filons à stibine et/ou berthiérinite ont souvent été exploités dans le Massif armoricain (La Lucette, Rochettréjoux, Ty Gardien...) et le Massif central (Brioude-Massiac, Mérinchal...) et ailleurs. L'âge de mise en place de ces filons antimonifères est discutée (Pochon *et al.*, 2016a et b ; Marcoux, 2017), Pochon *et al.* voyant un lien avec le magmatisme doléritique famennien. Le grand filon de La Lucette (40 kt d'antimoine et 8,7 t d'or produites) a été récemment daté par U/Pb sur apatite à 299 ± 11 Ma (Cheval-Garabédian *et al.*, 2023), un âge très cohérent avec la géologie puisque les filons armoricains (Ty Gardien, Kerjulien, Kerdevot, Batz-sur-Mer...) recoupent des granites tardi-hercyniens datés entre 325 et 304 Ma (Marcoux, 2017). On peut admettre que tous ces filons antimonifères sont tardi-hercyniens, mis en place vers 290-300 Ma, lors de la délamination post-orogénique hercynienne entre 310 et 295 Ma et relèveraient bien de l'épisode « or 300 » comme proposé par Bouchot *et al.* (1997, 2000, 2005).

Les minéraux analysés sont la berthiérinite (Le Semnon, Marmeissat, Le Céroux, les Borderies) et la stibine (Mérinchal), toutes deux légèrement plombifères, parfois de la (rare) galène précoce (La Télachère en Vendée), et plus fréquemment des sulfosels de Pb/Sb (zinkénite, semseyite, fülöppite, jamesonite...) synchrones de stibine-berthiérinite ou bien postérieurs, l'étude minéralogique permettant seule de trancher et de contraindre les interprétations.

On observe un regroupement des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 18,10 et 18,50 (Fig. 3.8), sans relation particulière entre la composition et l'ensemble géologique concerné. La valeur maximale (18,70) a été mesurée dans le filon de stibine de Montrevault (Maine-et-Loire). Le filon des Borderies est particulièrement original avec trois signatures isotopiques qui témoignent de trois épisodes minéralisés superposés sur lesquels nous reviendrons. La position globale des analyses

au-dessus de la courbe de Stacey-Kramers indique un milieu de formation dans une croûte continentale supérieure très évoluée, donc ancienne, La Télachère et Charbes se singularisant par des valeurs particulièrement élevées ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15,72$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38,78$). Les berthiérinites (teneur de 30 à 100 ppm Pb) montrent des compositions fortement étalées, les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ allant de 17,76 (Les Borderies) à 18,37 (Charbes).

Le plomb des filons à antimoine du grand district de Brioude-Massiac en Auvergne (Périchaud, 1971) dessine un champ assez réduit ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,097 à 18,181) où on remarque que les trois analyses les moins radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,097 à 18,117) correspondent à trois berthiérinites (filons d'Osfonds, Marmeissat et du Céroux). La jamesonite cogénétique de la stibine et de la sphalérite porte un plomb légèrement plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,158 à 18,181), notamment dans le filon du Céroux. Les filons à antimoine-plomb porteurs d'une paragenèse très originale (Les Anglais, La Rodde, Bois de Madène, Communal Rougier en Marsanges) où dominent des sulfosels de Pb/Sb, notamment la semseyite et la bournonite relèvent de l'épisode liasique et affichent un plomb plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,218 à 18,240, et 18,305), une composition qui, alliée à la paragenèse très originale, témoignent de phénomènes d'héritage sur lesquels nous reviendrons. Les filons des Vosges montrent de grandes variations, notamment sur les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Les sulfosels de Pb/Sb de Bestrée, Sein et Ty Gardien se sont formés tardivement aux dépens de la stibine, très certainement lors de l'épisode hydrothermal plombifère permien.

3.3.4 - Filons quartzeux à plomb-zinc-argent

Les filons plombo-zincifères (et argent) sont très nombreux sur le territoire national, encaissés dans tous types de roches, d'âge protérozoïque ou paléozoïque. Certains ont fait l'objet d'exploitations parfois maieures : Saint-Salvy

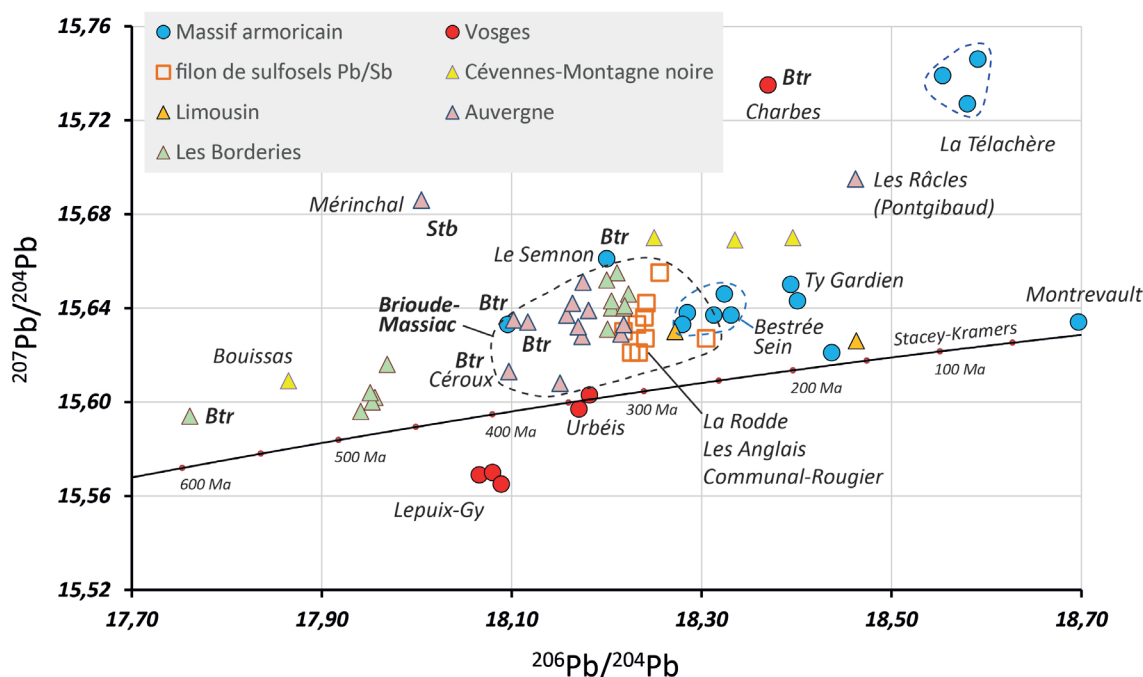


Figure 3.8 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations antimonifères (Stb = stibine, Btr = berthiérinite) ; les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1.

Figure 3.8 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of antimoniferous deposits (Stb = stibnite, Btr = berthierite) ; the selected data are shown in Appendix Table 1.1.

(330 kt de zinc produites), Pontgibaud, Peyrebrune dans le Massif central, Pontpéan (180 kt de plomb) et Huelgoat-Poullaouen dans le Massif armoricain, Sainte-Marie-aux-Mines et La Croix-aux-Mines dans les Vosges..., d'autres ne sont que de simples indices. Aucun de ces filons n'ayant été daté directement, leur(s) âge(s) reste(nt) largement débattus. Cependant, les critères géologiques et structuraux, ainsi que les âges robustes des filons uranifères (285 ± 10 Ma) qui les précèdent indiscutablement, suggèrent fortement que ces filons plombifères seraient permien, mis en place probablement vers 280-250 Ma. Quatre filons anciennement exploités pour le plomb (Montgros, Belmont, Le Gaud et Estrade dans le district de Brioude-Massiac) constituent la racine quartzreuse de filons à fluorine-barytine et relèvent donc de l'épisode hydrothermal liasique. Ils ont été ajoutés pour comparaison et seront repris dans le chapitre suivant.

Les compositions sont très étalées (Fig. 3.9) allant, pour le rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, de 17,496 au Pulec (Jersey) à 20,10 (filon uranifère à galène de Chaméane, Puy-de-Dôme), et ce pour tous les massifs anciens. On observe cependant un net regroupement des rapports isotopiques entre 18,20 et 18,55. Les filons majeurs se situent majoritairement dans ce champ principal : Saint-Salvy ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,43$ à $18,48$), Peyrebrune (18,34), Pontpéan (18,397 à $18,410$), Huelgoat-Poullaouen (18,261 à $18,325$), La Telhaie (18,409), Vaucron (18,465) etc. Les compositions du faisceau plombifère de Pontgibaud sont relativement groupées entre 18,232 à $18,310$, les sulfures géodiques tardifs formant le pôle radiogénique ($18,271$ à $18,310$; Marcoux et Picot, 1985).

Cependant, on observe aussi un champ plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ compris entre 18,625 et $18,883$) avec les filons vosgiens (Sainte-Marie-aux-Mines, La Croix-aux-Mines, Moosch...) et des filons alpins, avec parfois des corps stratiformes associés (Saint-Pons, Les Cougnasses, Tende...), et

un autre champ moins radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ compris entre 17,49 et $17,60$). Ce dernier est spécifique au domaine nord-armoricain et défini par les filons des îles anglo-normandes (Pulec, Bouet) et de la Mancellia (Bois-neuf, Yvrandes), tous situés dans un contexte de roches protérozoïques à plomb peu radiogénique. Notons que c'est dans le Massif armoricain que les compositions sont les plus étalées allant de 17,496 au Pulec (Jersey) à 18,749 dans le filon quartzo-barytique à galène de Pen-ar-Vouillen (Côtes d'Armor).

En-dehors de ces trois champs, on observe assez peu de compositions intermédiaires. Les gîtes ont des valeurs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ comprises entre 17,80 et 17,90 comme Cusses, Camprafaut et Le Priou (Massif central), qui peuvent s'interpréter comme des remobilisations de minéralisations stratiformes cambriennes, fréquentes à proximité, La Chapelle-Saint-Melaine (Ille-et-Vilaine ; 18,01), également interprétable comme la remobilisation de gîtes stratiformes édiacariens similaires à ceux proches de l'unité de Saint-Georges-sur-Loire, et Châteauneuf (17,92), situé dans un environnement protérozoïque qui explique cette composition basse. D'autres ont des valeurs comprises entre 18,10 et $18,20$ (La Touche, Fournial), examinées lors de l'étude des districts.

Ces résultats illustrent que la source du plomb est majoritairement à rechercher dans la lithologie locale à régionale, la gamme dominante de compositions ($18,20$ et $18,55$) s'accordant bien avec une source du plomb à rechercher au sein des granites hercyniens, un point détaillé dans l'étude individuelle des districts (cf. § Chapitre 4). Comme pour les gîtes antimonifères, la position des points au-dessus de la courbe de Stacey-Kramers indique un environnement de croûte continentale ce qui est classique pour ces minéralisations. Cela est surtout net pour les gîtes pyrénéens (Aulus, Argut...) à rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ toujours supérieurs à 15,66.

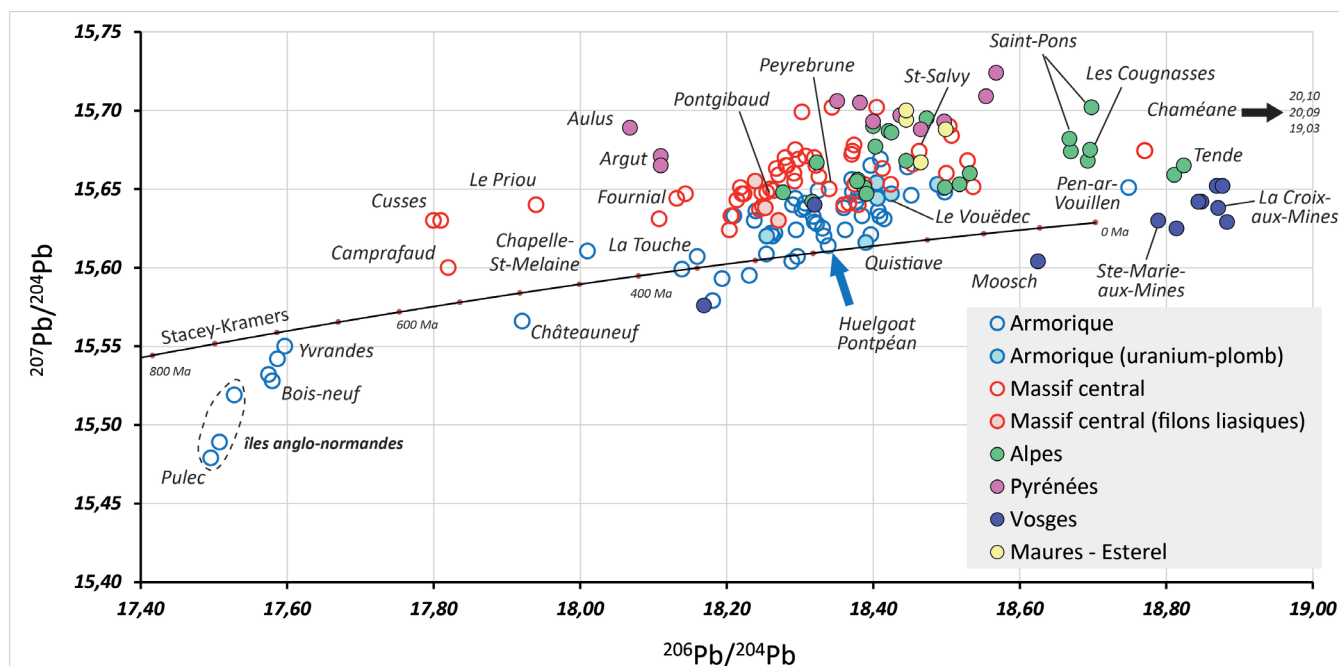


Figure 3.9 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations plombifères. Les filons de Fournial, Saint-Salvy, Roure en Pontgibaud (Massif central), Pors Tarz, La Telhaie, Trémuson et La Chapelle-Saint-Melaine (Massif armoricain) sont représentés par leurs valeurs moyennes ; les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1.

Figure 3.9 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of lead mineralization. The veins of Fournial, Saint-Salvy, Roure in Pontgibaud (Central Massif), Pors Tarz, La Telhaie, Trémuson and La Chapelle-Saint-Melaine (Armorican Massif) are represented by their average values; the selected data are shown in Appendix Table 1.1.

Filons urano-plombifères

Les filons urano-plombifères ont été exploités pour l'uranium mais sont aussi riches en galène (ou en clausthalite PbSe à Chaméane) dont le dépôt succède clairement celui de la pechblende (UO_2). En Bretagne, les galènes des filons urano-plombifères de Quistiave et du Vouëdec (Morbihan) ont des compositions identiques à celles des galènes des filons plombo-zincifères régionaux (Fig. 3.9), ce qui suggère fortement qu'elles relèvent de ce même épisode hydrothermal permien. Par contre, la clausthalite du filon de Chaméane (Puy-de-Dôme) possède une composition très radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,774 à 20,105, la plus élevée mesurée à ce jour en France sur un sulfure) indiquant qu'elle a intégré une proportion notable de plomb radiogénique, ce qui suggère un dépôt peut-être très tardif.

3.3.5 - Filons à barytine-fluorine (et sulfures)

Cette famille gîtologique regroupe des filons qui ont en commun une gangue à barytine et/ou fluorine dominantes, avec bien sûr du quartz qui devient dominant en profondeur, et fréquemment des sulfures parfois abondants, notamment de la galène (sauf au Burc qui a produit de la chalcopryrite). Ces filons se distribuent dans tous les massifs anciens à l'exception notable du Massif armoricain, presque totalement dépourvu de barytine et de fluorine. On distingue habituellement deux sous-familles d'importance inégale : les filons à fluorine bleue-sidélite, spécifiques du Tarn et qui seraient d'âge permien (vers 290 Ma), et les filons à fluorine rubanée et/ou barytine, avec parfois des sulfures abondants, de mise en place liasique (vers 190-200 Ma), beaucoup plus répandus. Nombre d'entre eux ont été exploités pour la barytine (Les Porres – non analysé –, Rancon, Meyrignac...), la fluorine (Montroc, Le Burc, Marsanges – Langeac, Nizerolles...), ou parfois la galène (Les Farges). Chaillac est un cas unique d'un

système hydrothermal complet (Sizaret *et al.*, 2004, 2009) avec de la barytine stratiforme dans les « grès de base » et le « ferrobarytique » (2,5 Mt de barytine produite) enracinée sur un filon de fluorine, Le Rossignol, qui en a produit 400 kt.

Les compositions isotopiques de ces filons dessinent un nuage compact entre 18,20 et 18,40 (rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) prolongé par une traîne jusqu'à des valeurs radiogéniques de 18,80 (Fig. 3.10) atteintes dans les filons du Forez (Contenson, Nizerolles, Le Poyet, Charrier) et des Vosges (Maxonchamp, Mont-de-Vannes). La même distribution s'observe pour les rapports $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (schéma non reproduit) qui dessinent un nuage compact entre 38,40 et 38,55 avec une traîne jusqu'à 38,95. Ces nuages compacts incluent les filons à fluorine bleue-sidélite du Burc et de Le Minié (les seuls analysés de cette famille). Aucune valeur inférieure à 18,20 (rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et à 38,40 (rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) n'a été mesurée, ce qui est cohérent avec les âges relativement récents des épisodes hydrothermaux concernés qui ont pu se nourrir auprès de roches ayant eu le temps de produire de fortes quantités d'isotopes radiogéniques. Les valeurs les moins radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vers 18,20-18,25) se rencontrent dans des sites variés (Le Deveix, Urciers, Belmont...) du Massif central, sans organisation géographique ou géologique évidente.

Aucune des trois grandes catégories de filons (barytine seule à dominante, fluorine seule à dominante, et riches en galène, avec ou sans production minière de plomb) ne dessine un champ spécifique. Notons que la composition du filon plombo-barytique des Farges (Corrèze) est très homogène avec une valeur moyenne de 18,276, et qu'à Chaillac, les galènes de la barytine stratiforme et du filon de fluorine possèdent les mêmes compositions isotopiques identiques à l'incertitude analytique près ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 18,37$).

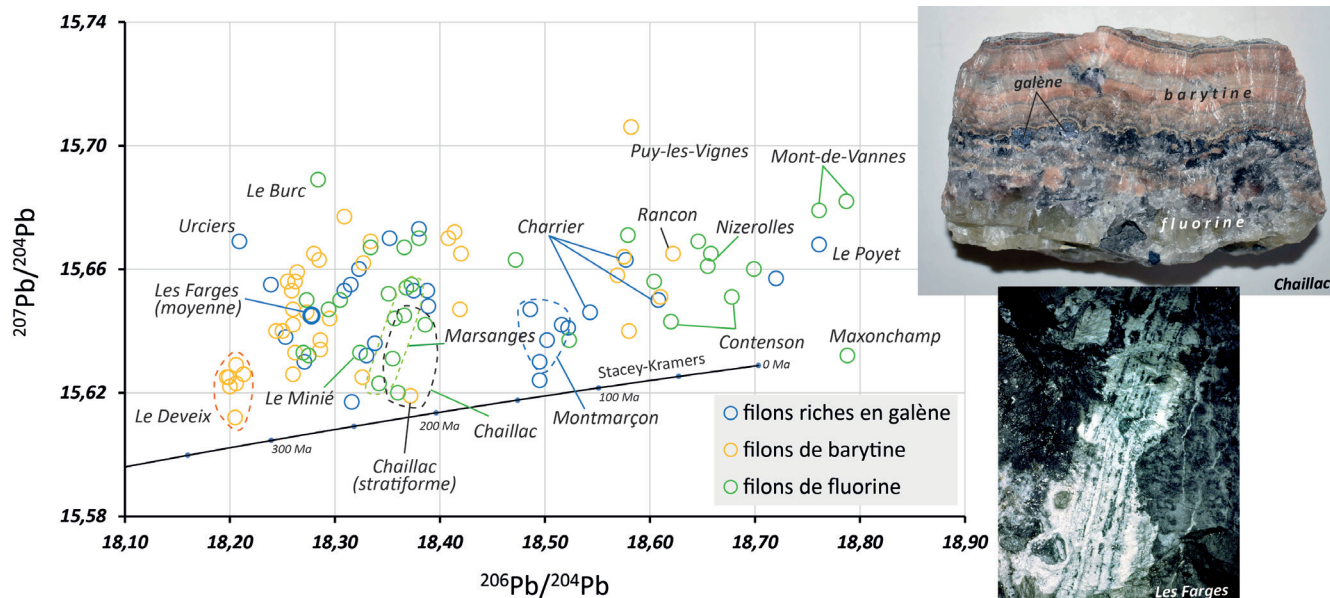


Figure 3.10 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations à fluorine, barytine et plomb. Le filon des Farges (17 analyses) est représenté par sa valeur moyenne. Sur le diagramme, Puy-les-Vignes, Montmarçon et Charrier sont des filons à barytine-galène tardifs proches des gisements plus connus respectivement de tungstène, zinc-cuivre-plomb et étain-cuivre ; les données sélectionnées sont indiquées dans le tableau d'annexe 1.1. Photos : minéral à barytine-fluorine ambrée et galène de Chaillac © É. Marcoux et allure du filon rubané à barytine-galène des Farges © M. Jébrak.

Figure 3.10 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of fluorite, barite and lead mineralization. The Farges vein (17 analyses) is represented by its average value. On the diagram, Puy-les-Vignes, Montmarçon and Charrier are late barite-galena veins close to the better-known tungsten, zinc-copper-lead and tin-copper ore deposits respectively; the selected data are shown in Appendix Table 1.1. Photos: amber barite-fluorite and galena ore from Chaillac © É. Marcoux and appearance of the banded barite-galena vein from Les Farges © M. Jébrak.

4. Histoires de districts minéralisés

Dans un cadre géologique aussi diversifié que celui de l'Hexagone, l'approche de la source des métaux, point majeur pour proposer un modèle de genèse des minéralisations, ne peut se concevoir qu'en respectant une unité de lieu, c'est-à-dire à l'échelle du district. Nous avons donc abordé cette double approche source-genèse sur un certain nombre de districts polymétalliques des massifs anciens, le caractère polymétallique permettant d'aborder également les éventuelles filiations entre minéralisations.

Nous regarderons successivement les districts du Massif central (Fig. 4.1), du Massif armoricain (cf. Fig. 4.25), puis des Vosges, des Pyrénées et des Alpes.

4.1 - Auvergne méridionale : le Haut-Allier

Ce district polymétallique (Fig. 4.2) a surtout été exploité pour l'antimoine, car il compte de nombreux filons à stibine-berthièrite ayant produit 39 000 t d'antimoine de 1726 à 1981, et pour la fluorine, avec les grands filons de Langeac notamment (970 kt jusqu'en 1978). Mais il comporte aussi de nombreux autres filons minéralisés en galène, barytine et sulfosels de plomb-antimoine, ainsi que des filons périgranitiques à étain et/ou tungstène (Vèze, Bosberty) parfois exploités (Bonnac, Scoufour). L'histoire métallogénique du district s'est écrite au cours d'au moins trois épisodes hydrothermaux successifs (Fig. 4.3) : étain-tungstène vers 321-316 Ma, antimonifère (et plombifère) vers 290-300 Ma, et barytine-fluorine à galène et sulfosels de Pb/Sb au Lias vers 200 ± 10 Ma. Comme nous allons le voir, l'existence d'un épisode précoce Sb-Au à berthièrite-or est également plausible.

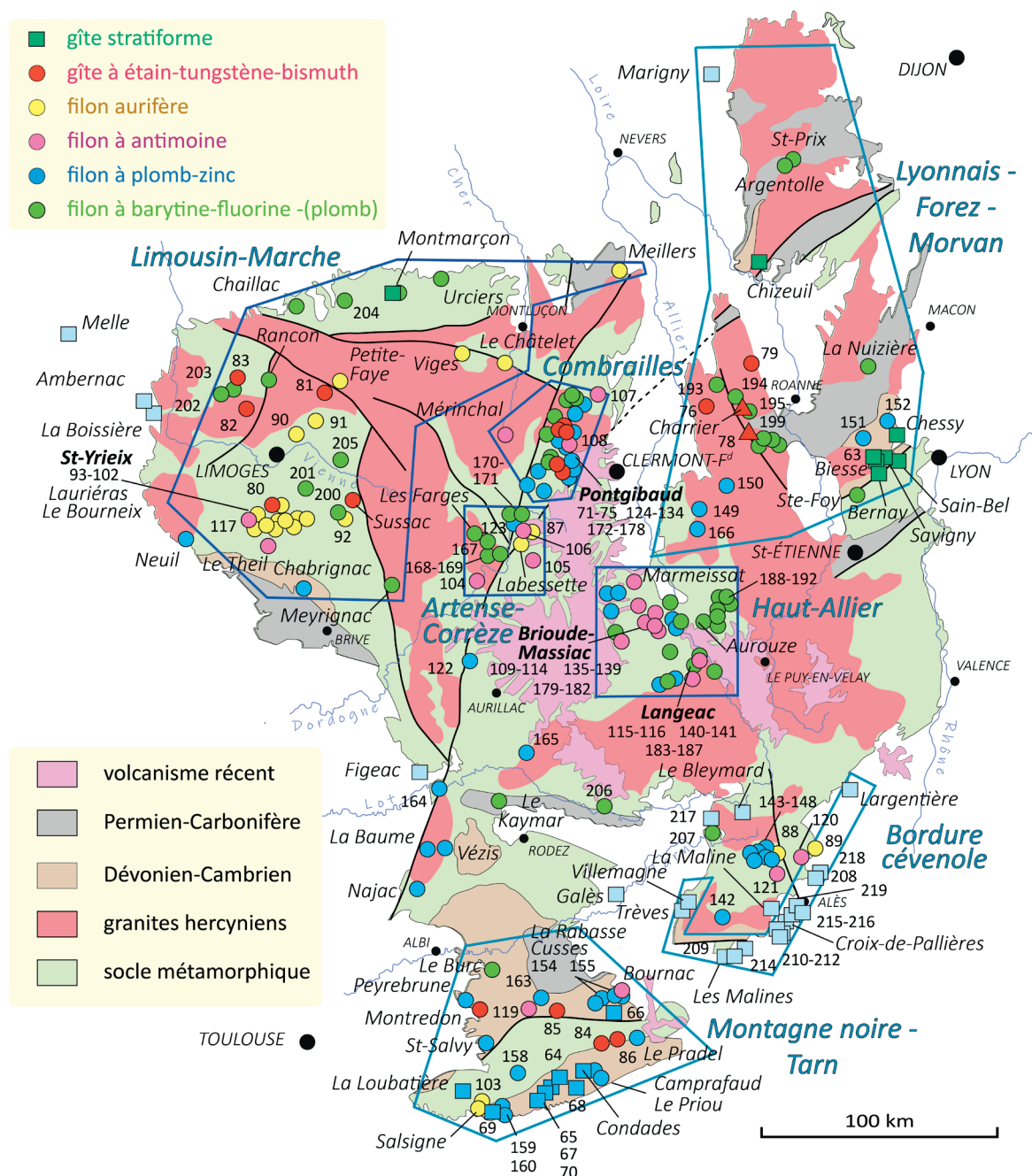


Figure 4.1 – Localisation des secteurs minéralisés étudiés avec les gîtes analysés dans le Massif central. Les chiffres renvoient au tableau d'annexe 1a.

Figure 4.1 – Location of the mineralized sectors studied with the deposits analyzed in the Massif Central. Figures refer to Appendix Table 1a.

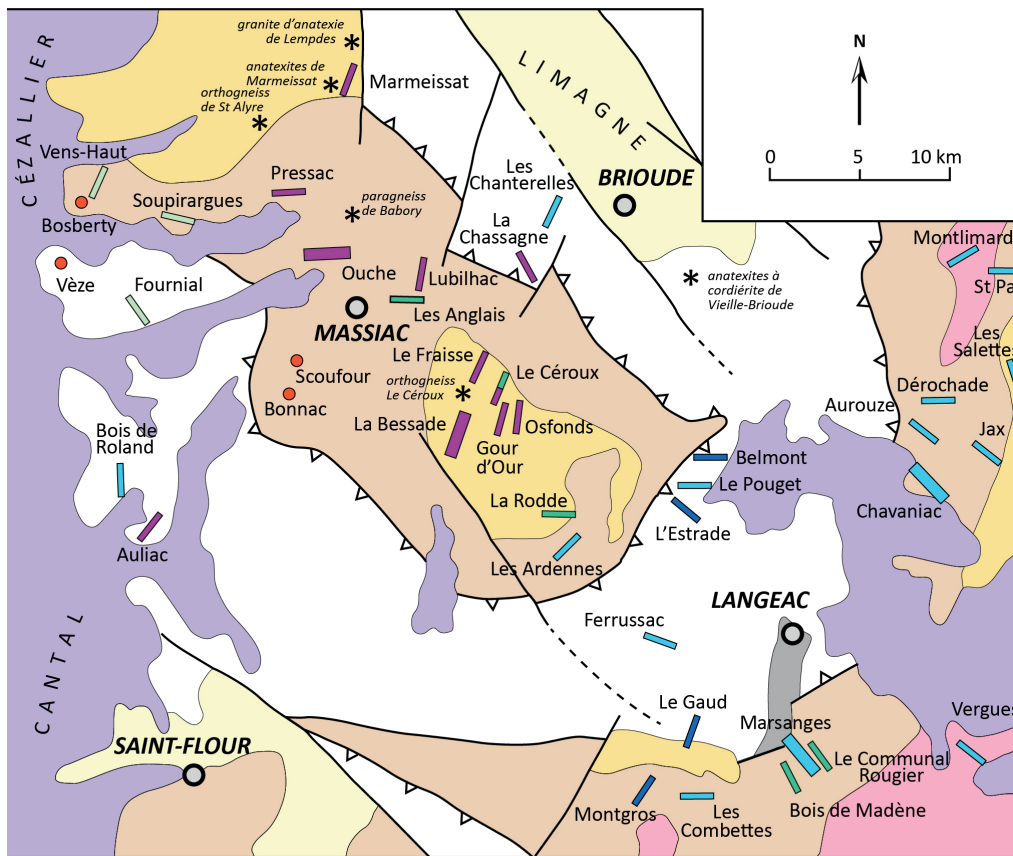


Figure 4.2 – Carte géologique simplifiée du district de Brioude-Massiac avec principaux filons minéralisés ; d'après les cartes géologiques de Massiac (n° 765), Brioude (n° 766), Craponne-sur-Arzon (n° 767), Saint-Flour (n° 789) et Langeac (n° 790).

Figure 4.2 – Simplified geological map of the Brioude-Massiac district with main mineralized veins; after the geological maps of Massiac (n° 765), Brioude (n° 766), Craponne-sur-Arzon (n° 767), Saint-Flour (n° 789) and Langeac (n° 790).

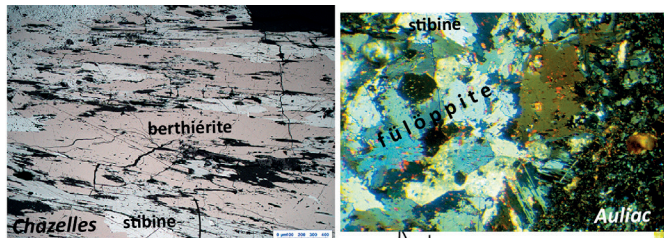
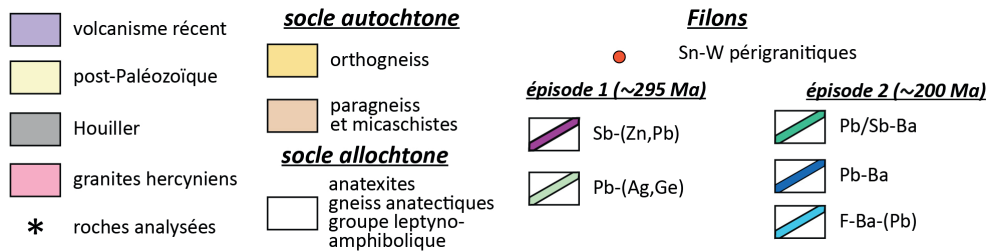
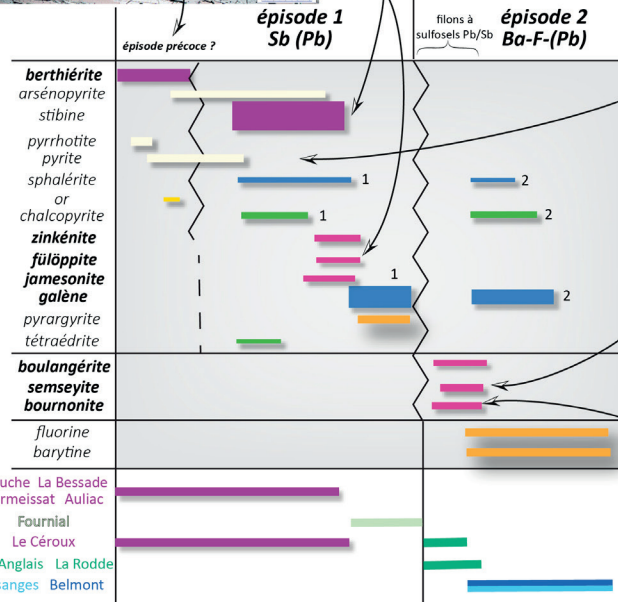


Figure 4.3 – Succession paragénétique du district du Haut-Allier. Les filons périgranitiques à étain-tungstène datés vers 321-316 Ma ne sont pas figurés. Photos au microscope en lumière réfléchie (polarisée) de minéraux analysés : berthierite (en voie de transformation en stibine) du possible épisode précoce ; épisode 1 à stibine, fulopite, jamesonite ; épisode 2 à sulfosels de Pb/Sb (semseyite et bournonite) © É. Marcoux.

Figure 4.3 – Paragenetic succession of the Haut-Allier district. The 321-316 Ma tin-tungsten perigranitic veins are not shown. Photos (reflected light microscope, analyzed polarized light except berthierite-stibine from Chazelles) of analyzed minerals: berthierite (in the process of being transformed into stibine) from the possible early episode; episode 1 with stibine, fulopite, jamesonite; episode 2 with Pb/Sb sulfosalts (semseyite and bournonite) © É. Marcoux.



L'épisode antimonifère (et plombifère), de haute à moyenne température, a vu essentiellement la mise en place des filons d'antimoine (Ouche, La Bessade, La Chassagne, Auliac, Le Céroux...) à stibine-berthièrite dominantes, sphalérite, sulfosels de Pb/Sb cogénétiques proches du pôle antimoine (jamesonite, fülöppite, zinkénite) et souvent or, d'âge probable vers 300 Ma (ce que nous rattachons à l'événement « Or 300 » évoqué plus haut – cf. supra). Des filons à plomb, zinc, argent et étain (Fournial, Vens-Haut et Soupirargues) sont aussi rattachés à cet épisode. La gangue de tous ces filons est à quartz, dolomite-ankérite, sans barytine ni fluorine.

Sur le plan isotopique, cet épisode précoce Sb-(Pb) porte un plomb peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,097 à 18,181) où les analyses les moins radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,097 à 18,117) se rapportent aux berthièrites de trois filons (Osfonds, Marmeissat et Le Céroux), la jamesonite cogénétique de la stibine étant légèrement plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,158 à 18,181), (Fig. 4.4), (Marcoux et Bril, 1986). Le filon plombo-zincifère fortement zoné de Fournial a fait l'objet de quatorze analyses dans ses secteurs stannifères et argentifères (échantillons prélevés sur les cinq niveaux lors des travaux de reconnaissance du BRGM en 1966-1967). Les compositions sont extrêmement homogènes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,129 à 18,157 pour une moyenne de 18,144, pratiquement dans la marge d'erreur analytique), soulignant une source unique et une seule étape minéralisée. Les deux filons voisins qui partagent cette paragenèse originale, Vens-Haut et Soupirargues, ont des signatures identiques à très proches.

Le socle métamorphique paléozoïque inférieur est certainement la source principale de ces métaux, mais les rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ élevés suggèrent la contribution d'une croûte supérieure ancienne non identifiée (édiacarien ?). Ce résultat s'accorde avec l'origine profonde des fluides minéralisés et l'amplitude des circuits hydrothermaux attachés aux minéralisations à antimoine (Bouchot *et al.*, 2000, 2005 ; Cheval-

Garabédian *et al.*, 2023). La signature moins radiogénique de la berthièrite (un résultat que l'on retrouve aux Borderies) suggère une appartenance à un épisode plus ancien.

L'épisode de basse température (< 150 °C) voit la mise en place vers 190-210 Ma (Lias inférieur) des filons de fluorine (Marsanges à Langeac, Aurouze...) et/ou de barytine avec sulfures (Combettes, Ferrussac, Montlimard...). Ces filons présentent une forte zonalité verticale à la fois de la gangue (racine quartzreuse, corps fluoré et sommet barytique) et des sulfures (galène largement dominante, sphalérite, chalcoppyrite, bournonite...) dont l'abondance augmente avec la profondeur. Certains d'entre eux, fortement érodés, présentaient donc, dans la tranche exploitée, une gangue quartzreuse et de la galène et ont surtout produit du plomb, comme Montgros avec 1,5 kt de plomb, Le Gaud, Belmont, et L'Estrade, mais ils appartiennent bien à l'épisode liasique. Le plomb de cet épisode est plus radiogénique que celui de l'épisode précoce : il dessine un champ assez étendu ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,242 à 18,472), intégrant les compositions de ces quatre filons plus « plombifères » (Fig. 4.4 ; Tab. 4.1). Cet hydrothermalisme plombo-barytique liasique remobilise pro parte les minéralisations de l'épisode 1.

L'héritage d'antimoine et de plomb « précoce » se traduit par la cristallisation d'abondants sulfosels de Pb/Sb proches du pôle plombifère (semseyite, boulangérite et bournonite, signe d'une saturation en plomb) dominants dans des filons à gangue quartzreuse (La Rodde, Bois de Madène), quartzo-barytique (Les Anglais) ou fluorée (Communal-Rougier) dits « hybrides » (Marcoux et Moëlo, 1991). Ces filons sont clairement tardifs (plusieurs recoupent les filons à stibine) confirmant leur appartenance à l'épisode liasique. À La Rodde et aux Anglais, la totalité de l'antimoine a été remobilisée et on n'observe plus de stibine. Plus globalement, l'héritage d'antimoine se traduit au plan régional par la présence de minéraux antimonifères accessoires (bournonite, tétraédrite...) dans la plupart des filons de barytine-fluorine. Rappelons que c'est

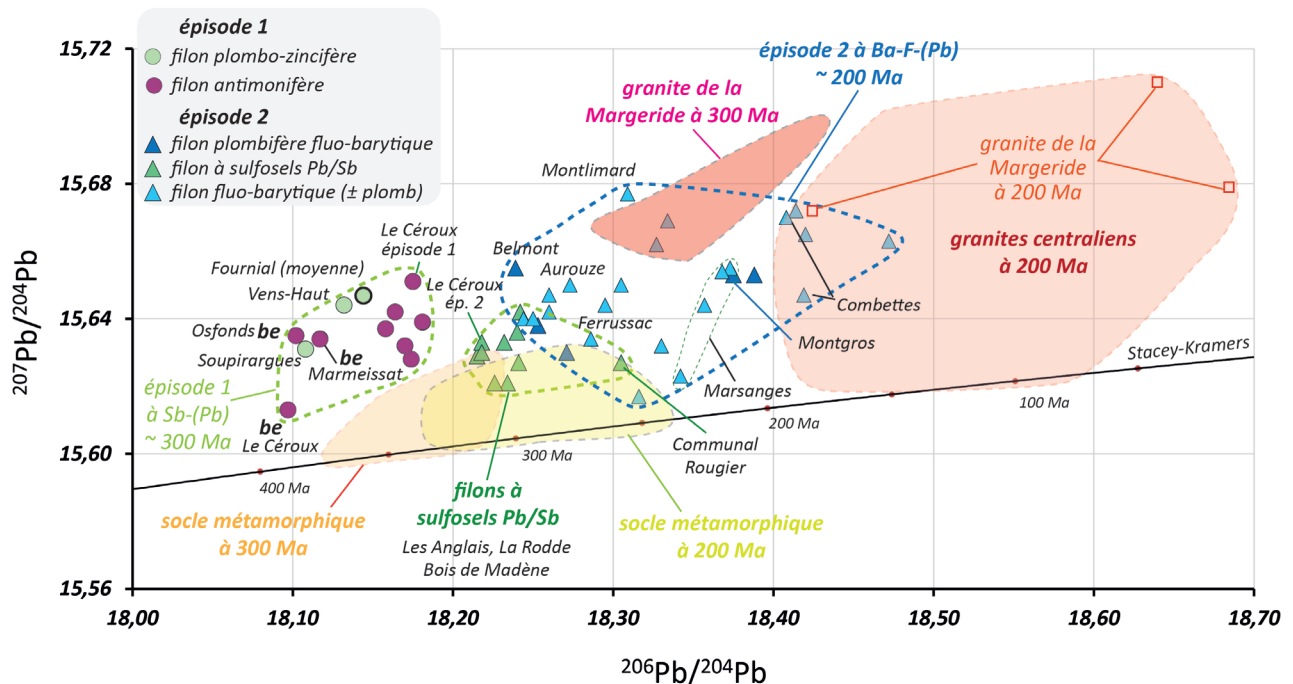


Figure 4.4 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations du Haut-Allier. Le filon de Fournial est représenté par sa valeur moyenne.

Figure 4.4 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of Haut-Allier mineralization. The Fournial vein is represented by its average value.

gîte analysé	minéral	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb
Épisode 1 - Permien				
<i>filon à plomb-zinc - (étain-argent)</i>				
Fournial	Gn	18,135	15,634	38,278
Fournial	Gn	18,139	15,645	38,320
idem	dup	18,129	15,632	38,287
Fournial	Gn	18,134	15,647	38,329
Fournial	Gn	18,146	15,645	38,320
Fournial	Gn	18,159	15,658	38,364
Fournial	Gn	18,136	15,641	38,312
Fournial	Gn	18,138	15,635	38,285
Fournial	Gn	18,145	15,649	38,339
Fournial	Gn	18,139	15,639	38,300
Fournial	Gn	18,156	15,661	38,376
idem	dup	18,157	15,664	38,385
Fournial	Gn	18,153	15,655	38,367
idem	dup	18,156	15,648	38,364
Fournial (moy. 14 an.)		18,144	15,647	38,330
Vens-hauts	Gn	18,132	15,644	38,300
Soupirargues	Gn	18,108	15,631	38,266
<i>filon à antimoine</i>				
Auliac	Fül	18,174	15,628	38,375
Le Céroux (stade 1)	Btr	18,097	15,613	38,203
Le Céroux (stade 1)	Jam	18,175	15,651	38,318
idem	dup	18,158	15,637	38,332
Le Céroux (stade 1)	Fül	18,170	15,632	38,259
Le Céroux (stade 1)	Znk	18,181	15,639	38,293
Le Céroux (stade 1) (moy. 5 an.)		18,156	15,634	38,281
Gour d'Our (Roche-Sauve)	Jam	18,164	15,642	38,272
Osfonds	Btr	18,102	15,635	38,207
Marmeissat	Btr	18,117	15,634	38,265
Épisode 2 - Lias				
<i>filon à sulfosels de plomb-antimoine</i>				
Le Céroux (stade 2)	Boul	18,215	15,629	38,264
idem	dup	18,218	15,633	38,258
Les Anglais	sems	18,240	15,636	38,428
Les Anglais	Bour	18,218	15,630	38,373
La Rodde (Saint Paul)	Bour	18,241	15,627	38,388
La Rodde (Saint Paul)	Bour	18,234	15,621	38,378
La Rodde (Saint Paul)	Sem	18,226	15,621	38,364
La Rodde (Saint Paul)	Gn	18,232	15,633	38,381
La Rodde (Saint Paul) (moy. 4 an.)		18,233	15,626	38,378
Bois de Madène	Sem-Znk	18,305	15,627	38,408
Marsanges (Communal Rougier)	sems	18,242	15,642	38,440
<i>filon à galène-barytine</i>				
Montgros	Gn	18,375	15,653	38,504
Le Gaud	Gn	18,388	15,653	38,505
L'estrade	Gn	18,253	15,638	38,447
L'estrade	Bour	18,271	15,630	38,444
Belmont l'Estain	Gn	18,239	15,655	38,512
<i>filon à fluorine - barytine</i>				
Bois de Roland	Gn	18,330	15,632	38,520
Bois de Roland	Sem	18,316	15,617	38,480
Les Chanterelles	Gn	18,260	15,647	38,440
Les Ardennes (Promeyrat)	Gn	18,260	15,642	38,477
Ferrussac	Gn	18,286	15,634	38,460
Ferrussac	Gn	18,295	15,644	38,495
Les Combettes	Gn	18,414	15,672	38,627
idem	dup	18,408	15,670	38,625
Les Combettes	Gn	18,419	15,647	38,625
Marsanges (filon du Communal)	Bour	18,373	15,655	38,541
Marsanges (filon F2)	Gn	18,357	15,644	38,515
Marsanges (filon du Communal)	Gn	18,368	15,654	38,554
Marsanges (filon du Rouladou)	Bour	18,342	15,623	38,439
Vergues (Prades)	Gn	18,472	15,663	38,757
Jax	Gn	18,305	15,650	38,517
Aurouze	Gn	18,273	15,650	38,523
La Dérochade	Gn	18,327	15,662	38,607
idem	dup	18,334	15,669	38,623
Montlimard	Gn	18,309	15,677	38,515
Le Pouget	Gn	18,244	15,640	38,451
Les Salettes (Allègre)	Gn	18,420	15,665	38,590
St-Pal-de-Senouire	Gn	18,250	15,640	38,421

l'étude au microscope métallographique qui permet de distinguer les sulfosels de Pb/Sb précoces pénécotemporains de stibine-berthiérte (épisode 1) des sulfosels de Pb/Sb tardifs (épisode 2) au sein d'un même filon.

Le plomb de ces sulfosels affiche une composition intermédiaire entre celles du plomb des deux épisodes, suggérant fortement leur mélange (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb : 18,218 à 18,240, 18,305 à Bois de Madène, plus éloigné du secteur riche en antimoine). Deux filons sont un peu originaux. Le Communal-Rougier appartient au champ filonien à fluorine-barytine de Marsanges (Langeac) mais s'en distingue par une grande richesse en semseyite-bournonite, deux sulfures associant le plomb et l'antimoine, ce qui suggère fortement une contribution des filons de stibine avec leur plomb ancien. Cette hypothèse est confirmée par sa signature moins radiogénique (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,242) que celle des filons à fluorine contigus

roche analysée	âge	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
socle métamorphique						
anatexite de l'Artense (ou de Cros en Bagnols) (430 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,290 18,219	15,630 15,622	38,392 38,296		
anatexites à cordiérite (Vieille-Brioude) (430 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,187 18,157	15,616 15,615	38,240 38,220		
orthogneiss du Céroux (430 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,282 18,215	15,609 15,606	38,072 38,031		
paragneiss (Le Babory) (430 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,262 18,223	15,612 15,610	38,322 38,289		
anatexites (Marmeissat) (430 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,276 18,203	15,630 15,626	38,345 38,245	4,5	19,1
orthogneiss St-Alyre (430 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,191 18,124	15,602 15,599	38,133 38,092		
granite anatectique (Vieille-Brioude) (322 ± 7 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,332 18,171	15,611 15,602	38,181 38,106		
granites hercyniens						
granite moyen de la Margeride (St-Chély d'Apcher) (320 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,639 18,428	15,710 15,698	38,610 38,560	13,1	10
granite clair de la Margeride (Lozère) (320 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,423 18,292	15,672 15,669	38,420 38,400	8,1	6,3
aplite de la Margeride (St-Chély d'Apcher) (~ 320 Ma)	200 Ma 300 Ma	18,683 18,338	15,679 15,659	38,396 38,394	21,4	0,3
granite du Sidobre (1)	200 Ma 300 Ma	18,596 18,403	15,696 15,685	38,670 38,470	12	40
granite du Sidobre (1)	200 Ma 300 Ma	18,663 18,470	15,662 15,651	38,600 38,400	12	40
leucogranite des Millevaches (Saint-Julien) (1)	200 Ma 300 Ma	18,528 18,362	15,649 15,639	38,561 38,491	10,3	14
leucogranite de St-Mathieu (1)	200 Ma 300 Ma	18,384 18,218	15,664 15,654	38,411 38,341	10,3	14
leucogranite de La Brame (1)	200 Ma 300 Ma	18,403 18,237	15,651 15,641	38,381 38,311	10,3	14
leucogranite St-Sylvestre (1)	200 Ma 300 Ma	18,449 18,283	15,699 15,689	38,681 38,611	10,3	14
leucogranite St-Sylvestre (1)	200 Ma 300 Ma	18,437 18,271	15,665 15,655	38,441 38,371	10,3	14
leucogranite de St-Yrieix	200 Ma 300 Ma	18,420 18,227	15,622 15,611	38,409 38,209	12	40
microgranite de Charrier	200 Ma 300 Ma	18,565 18,372	15,623 15,613	38,505 38,304	12	40
granite d'Ussel	200 Ma 300 Ma	18,185 18,119	15,598 15,594	38,245 38,187	4,1	11,5
granite de Gelles	200 Ma 300 Ma	18,288 18,233	15,665 15,662	38,394 38,387	12	40
granite de la Tour d'Auvergne	200 Ma 300 Ma	18,298 18,164	15,630 15,623	38,224 38,169	8,3	10,8
granite de la Madeleine	200 Ma 300 Ma	18,411 18,188	15,637 15,624	38,498 38,270	12	40
granite du Mayet-de-Montagne	200 Ma 300 Ma	18,542 18,302	15,646 15,632	38,608 38,358	12	40

Tableau 4.1 – Compositions isotopiques des minéralisations du Haut-Allier et des roches sources potentielles. L'âge du granite anatectique de Vieille-Brioude est d'après Bril *et al.* (1991); (1) données de Michard-Vitrac *et al.*, 1981; les valeurs de 12 (μ) et 40 (W) sont admises par analogie pétrographique, les autres valeurs de μ et W sont calculées (cf. tableau d'annexe 1.2), (dup = duplicata).

Table 4.1 – Isotopic compositions of Haut-Allier mineralization and possible source rocks. The age of the anatectic granite of Vieille-Brioude is after Bril *et al.* (1991); (1) data from Michard-Vitrac *et al.*, 1981; the values of 12 (μ) and 40 (W) are accepted by petrographic analogy, the other values of μ and W are calculated (see appendix table 1.2) (dup = duplicate).

de Marsanges bien moins riches en sulfures (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb ~18,36). Le filon du Céroux fait un peu figure de « résumé » du district avec de la berthiérte précoce peu radiogénique (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,097), jamesonite, zinkénite et fülöppite à plomb précoce (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,158 à 18,181) cogénétique de stibine-sphalérite, recoupées par une boulangérite tardive porteuse d'un plomb plus radiogénique (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,215) signe d'une contamination par l'épisode liasique.

Dans le district, la source du plomb liasique apparaît comme un mélange à trois composantes : plomb précoce de filons de l'épisode 1, du socle métamorphique, et des granites hercyniens type Margeride. Ce modèle à trois composantes s'accommode bien d'un système hydrothermal assez superficiel largement admis pour ces filons de basse température.

4.2 - Auvergne septentrionale : Combrailles et Pontgibaud

Le district des Combrailles, avec sa pépite de Pontgibaud, est très polymétallique (Bouladon *et al.*, 1964). Le cœur du faisceau se compose sur 10 km de filons quartzeux à plomb, zinc et argent (Fig. 4.5) : Roure, Rosier, Grange, Mioche 2, Brousse, Pranal, Barbecot... qui ont assuré l'essentiel de la production de 50 kt en plomb et 100 t d'argent environ, prolongés par des filons similaires au nord (Vitrac *pro parte*, Montmartin) et au sud (Banson, Tortebeisse). Mais le district comprend aussi des filons périgranitiques à arsénopyrite, stannite, cassitérite, parfois or (Mioche 1, Les Peyrouses 1. Bapeyras) et wolframite-scheelite (Villelongue, Tournebise, Pont de la Miouze...), d'importants filons liasiques à fluorine-barytine parfois riches en galène (Villevieille, Les Isserts, Châteauneuf, Vitrac *pro parte*...) pouvant recouper les filons à arsénopyrite (Mioche 3, Les Peyrouses 2), et enfin des filons à antimoine dans le faisceau lui-même (Le Colombier, Peschadoires) ou à l'extérieur (Les Râcles, Mérinchal).

Ces filons résultent d'au moins quatre épisodes hydrothermaux pas tous bien calés chronologiquement (Fig. 4.6) : périgranitique pour étain-tungstène-(or), permien probable

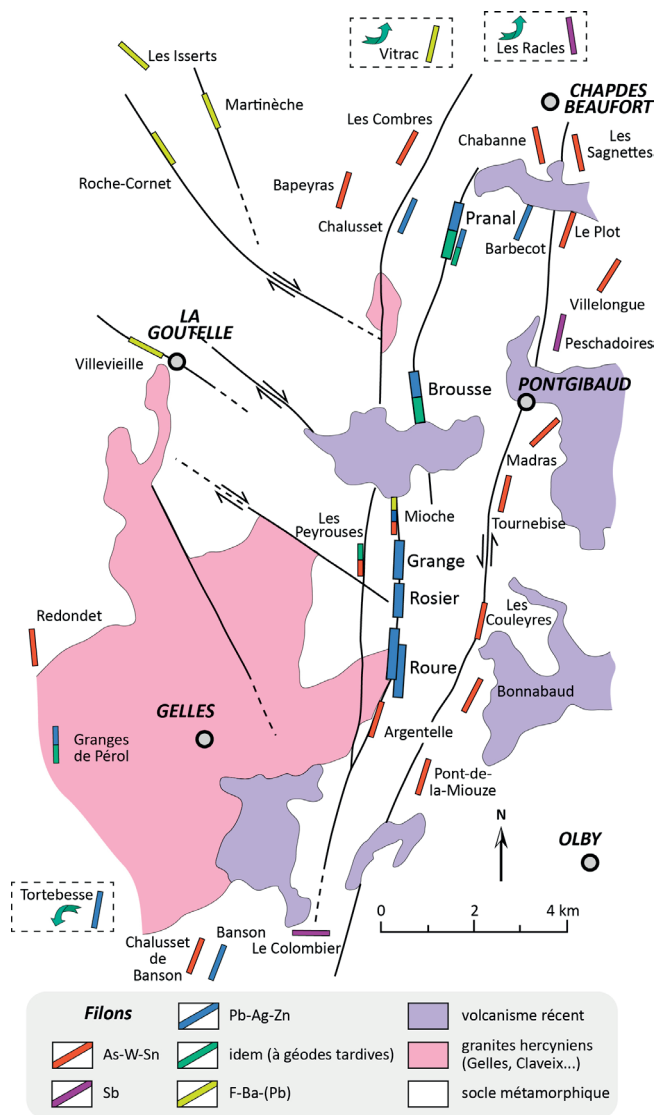


Figure 4.5 – Situation des principaux filons minéralisés du district de Pontgibaud. Géologie simplifiée d'après carte au 1/50 000 de Pontgibaud (n° 692), (cf. Fig. 4.1 pour localisation).

Figure 4.5 – Location of the main mineralized veins in the Pontgibaud district. Simplified geology according to Pontgibaud's 1/50,000 geological map (n° 692) (see Fig 4.1 for location).

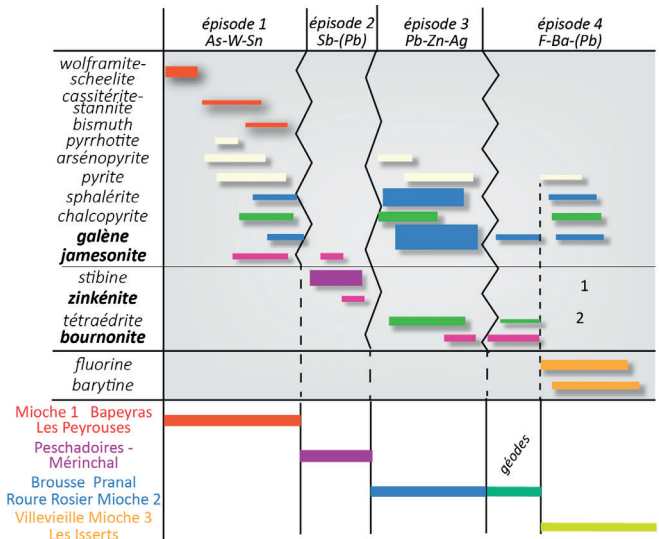
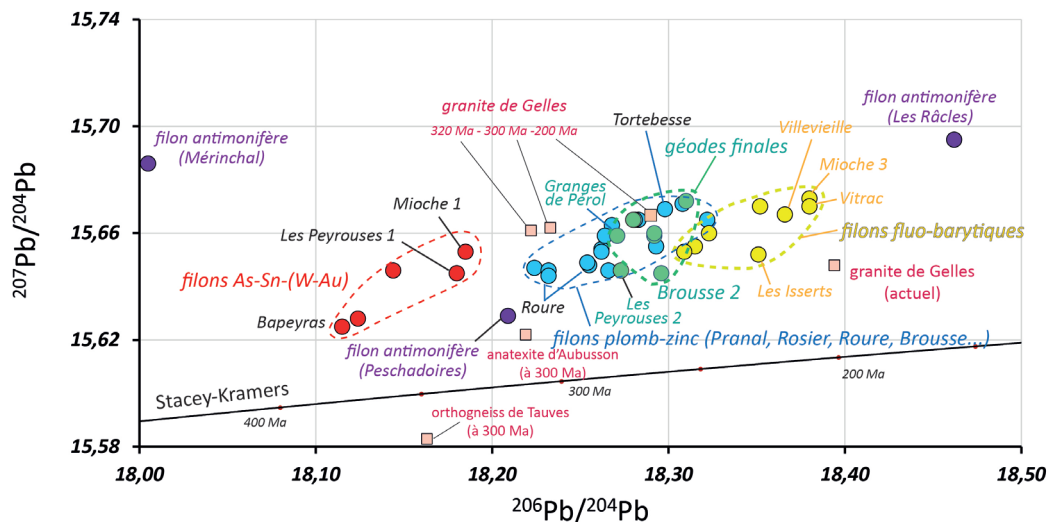


Figure 4.6 – Succession paragenétique du district de Pontgibaud. Mérinchal est dans les Combrailles voisines.

Figure 4.6 – Paragenetic succession of the Pontgibaud district. Mérinchal is in the neighboring Combrailles.

pour le plomb-zinc-argent et aussi l'antimoine, et enfin liasique pour les filons fluo-barytiques. Un âge K/Ar sur phengites de 295 ± 6 Ma a été proposé pour l'épisode précoce périgranitique (épisode 1) à étain-tungstène-(or), (Bril *et al.*, 1991) mais ces âges sont aujourd'hui considérés comme peu fiables. Un âge de 316-321 Ma mesuré sur les minéralisations périgranitiques tungstifères de Bonnac (Cantal) apparaît plus probable (Cheval-Garabédian *et al.*, 2021), les grands filons plombifères étant plutôt permien (étapes 2 et 3 sur figure 4.6).

Les minéralisations périgranitiques définissent un champ peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,115$ à $18,180$) tandis que les grands filons plombifères dessinent un second champ plus étalé ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,232$ à $18,322$), partiellement commun avec celui des filons fluo-barytiques (Marcoux et Picot, 1985) (Fig. 4.7 ; Tab. 4.2). Le faisceau plombifère principal (Roure, Rosier, Grange, Brousse...) montre une variabilité moindre ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,232$ à $18,283$) qui se retrouve à l'échelle du seul filon de Roure, suggérant plusieurs étapes hydrothermales dans l'épisode plombo-argentifère. Sans surprise, le champ des filons fluo-barytiques est plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,273$ à $18,380$), le filon à barytine-galène des Peyrouses 2 affichant la composition la moins radiogénique, à relier avec sa position au cœur du secteur plombifère ce qui a pu induire une « contamination » par son plomb moins radiogénique. Les galènes et bournonites (et tétraédrites) des géodes à barytine (Pranal, Brousse...) qui clôturent le dépôt minéralisé ont des compositions intermédiaires ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,271$ à $18,310$). Ce résultat suggère fortement que ces géodes (qui ont bâti la célébrité minéralogique de Pontgibaud) résultent d'un mélange avec le plomb tardif liasique et sont donc apparues lors de la distension du Lias inférieur par infiltration des fluides plombo-barytiques au sein de filons plombifères réouverts. À Brousse et Mioche, cette remobilisation des filons plombifères par les fluides à fluorine-barytine avait déjà été envisagée par les anciens auteurs (Bouladon *et al.*, 1964). Enfin, les filons antimonifères sont rares (trois), avec des signatures isotopiques très variables, en cohérence avec leurs situation et encaissant variés.

Figure 4.7 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations de Pontgibaud-Combrailles.Figure 4.7 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Pontgibaud-Combrailles deposits.

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Épisode 1 - Carbonifère supérieur (~316-321 Ma)				
filons à arsenic-étain-(tungstène-or)				
Les Peyrouses	Jam	18,180	15,645	38,332
Mioche 1	Jam	18,185	15,653	38,361
Les Sagnettes	Gn	18,124	15,628	38,299
Les Combres	Gn	18,144	15,646	38,343
Bapeyras	Gn	18,115	15,625	38,293
Épisode 2 - Permien				
filons à plomb-zinc-argent				
Tortebeisse	Gn	18,298	15,669	38,467
Tortebeisse	Gn	18,308	15,671	38,435
Banson	Gn	18,224	15,647	38,477
Grange	Gn	18,283	15,665	38,484
Rosier	Gn	18,255	15,648	38,450
Rosier	Gn	18,268	15,663	38,486
Roure	Gn	18,262	15,654	38,465
Roure	Gn	18,266	15,646	38,469
Roure	Gn	18,232	15,646	38,451
Roure	Gn	18,232	15,644	38,432
Roure (moy. 4 an.)		18,248	15,648	38,454
Brousse	Gn	18,262	15,653	38,453
Brousse	Gn	18,254	15,649	38,455
Brousse	Gn	18,264	15,659	38,472
Barbecot	Gn	18,293	15,655	38,466
Vitrac	Gn	18,281	15,665	38,500
Montmartin	Gn	18,322	15,665	38,519
Épisode 3 - Lias				
filons à plomb-zinc-argent (géodes finales)				
Pranal	Gn	18,292	15,659	38,488
Pranal	Bour	18,292	15,660	38,489
Granges de Pérol	Gn	18,271	15,659	38,486
Brousse	Gn	18,296	15,645	38,462
Brousse	Gn	18,310	15,672	38,511
filons à fluorine-barytine-(galène-bournonite)				
Villevieille	Gn	18,366	15,667	38,556
Les Isserts	Gn	18,351	15,652	38,543
Mioche 2	Gn	18,352	15,670	38,545
Mioche 2	Gn	18,380	15,673	38,591
Vitrac	Gn	18,380	15,670	38,583
Châteauneuf	Gn	18,315	15,655	38,491
Châteauneuf	Gn	18,323	15,660	38,509
Les Peyrouses (géode)	Bour	18,280	15,665	38,446
Les Peyrouses (géode)	Gn	18,273	15,646	38,448
Les Villards	Gn	18,309	15,653	38,487
filons antimonifères				
Les Râcles	Znk	18,462	15,695	38,548
Mérinchal	Stb	18,005	15,686	38,360
Peschadoires	Jam	18,209	15,629	38,351

roche analysée	âge	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
granite de Gelles ($\mu = 3,38$; $W = 1,38$)	320 Ma (FK)	18,222	15,661	38,386
	300 Ma	18,233	15,662	38,387
	200 Ma	18,288	15,665	38,394
	0 Ma (RT)	18,394	15,648	38,408
orthogneiss de Tauves (Larodde) éch.1 ($\mu = 4,5$; $W = 24,1$)	430 Ma (FK)	18,067	15,583	38,379
	300 Ma	18,163	15,583	38,536
	200 Ma	18,235	15,583	38,656
	0 Ma (RT)	18,377	15,582	38,896
orthogneiss de Tauves (Larodde) éch.2 ($\mu = 4,5$; $W = 24,1$)	430 Ma (FK)	18,076	15,594	38,424
	300 Ma	18,172	15,600	38,582
	200 Ma	18,245	15,604	38,703
	0 Ma (RT)	18,429	15,642	38,583
anatexite de l'Artense (ou de Cros en Bagnols) ($\mu = 4,4$; $W = 19,2$)	430 Ma (FK)	18,126	15,612	38,171
	300 Ma	18,219	15,622	38,296
	200 Ma	18,290	15,630	38,392
	0 Ma (RT)	18,429	15,642	38,583

Tableau 4.2 – Compositions isotopiques des minéralisations du secteur Pontgibaud - Combrailles et des roches sources potentielles.

Table 4.2 – Isotopic compositions of mineralization in the Pontgibaud - Combrailles sector and of potential source rocks.

Trop peu de roches ont été analysées pour aborder la source de manière convaincante, mais le granite de Gelles apparaît comme un candidat très plausible pour les grands filons plombifères (sa composition évoluant peu dans le temps) même si une participation mineure du socle métamorphique ne peut être exclue (Fig. 4.7). On verra (cf. § 4.6) qu'une source granitique est très plausible aussi pour le grand filon (contemporain ?) à zinc-plomb de Saint-Salvy (Tarn). Pour aborder les sources des filons fluo-barytiques et antimonières des données complémentaires sur la composition isotopique des roches seraient nécessaires. Leurs signatures, très proches de celle des filons plombifères, plaident cependant en faveur d'une source au moins *pro parte* granitique.

4.3 - Cœur du Massif central : Artense et Corrèze

L'Artense est une région du centre-ouest du Massif central, un secteur hercynien limité à l'est par le volcanisme et à l'ouest par la Dordogne qui emprunte largement le Sillon houiller. Elle recèle des minéralisations antimonifères (Chomadoux, La Couveyre), polymétalliques à antimoine dominant (Les Borderies), polymétalliques à antimoine apparemment mineur (Champagnac, Farreyrolles) et aurifères (Labessette) (Fig. 4.8). Pour une discussion plus globale nous lui avons adjoint la Corrèze granitique située de l'autre côté du Sillon houiller, riche en filons à barytine et galène, notamment celui des Farges.

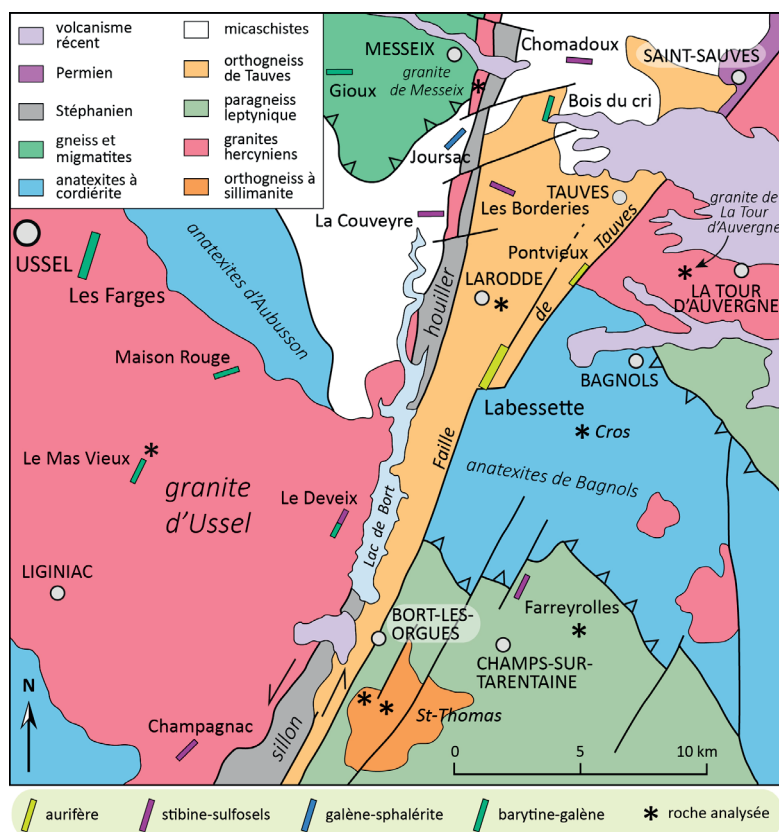


Figure 4.8 – Carte géologique simplifiée du district Artense-Corrèze avec les principaux filons minéralisés ; d'après cartes géologiques 1/50 000 d'Ussel (715), Bourg-Lastic (716), Bort-les-Orgues (739) et La Tour d'Auvergne (740), (cf. Fig. 4.1 pour localisation).

Figure 4.8 – Simplified geological map of the Artense-Corrèze district with the main mineralized veins; based on 1/50,000 geological maps of Ussel (715), Bourg-Lastic (716), Bort-les-Orgues (739) and La Tour d'Auvergne (740), (see Fig 4.1 for location).

4.3.1 - Filons à barytine-galène : Les Farges et Le Deveix

Le grand filon plombo-barytique exploité des Farges a fait l'objet de 17 analyses de galène prises dans les trois formations minéralisées qui le composent (Fig. 4.9) : 1) la dominante rubanée avec barytine, quartz, galène ; 2) à quartz et galène massive en profondeur ; et 3) filonnets de barytine, fluorine, et galène rare. Les compositions sont très homogènes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,261$ à $18,297$ pour une valeur moyenne et écart-type de $18,276 \pm 0,014$), aucune différence n'apparaissant entre les trois formations (Marcoux et Jébrak, 1987). Ce résultat plaide fortement pour une source unique du plomb (et du baryum) à relier avec la durée très brève de l'épisode hydrothermal plombo-barytique (probablement moins de 1 Ma) qui inhibe toute diversification de la source du plomb. Les analyses des roches régionales montrent que les anatexites à cordiérite d'Aubusson-Cros du socle métamorphique, mais pas les orthogneiss, constituent la source principale (voire exclusive ?) du plomb. Le granite viséen d'Ussel (345 Ma), bien qu'encaissant le filon, n'a joué qu'un rôle de source très mineur voire nul, synonyme d'un faible volume percolé et d'une probable morphologie de laccolite. Cette conclusion peut s'étendre aux filons plombo-barytiques proches (Mas-Vieux, Maison-Rouge), situés dans le même contexte géologique.

À peu de distance, le filon de barytine polymétallique (Pb-Sb-Cu-As) du Deveix (Sarroux-Saint-Julien) est également encaissé dans le granite d'Ussel. Une première étape quartzeuse dépose arsénopyrite, pyrite, galène et d'abondants sulfosels de Pb/Sb-(Ag), (semseyite, bournonite, géocronite, diaphorite...) à compositions isotopiques très homogènes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,197$ à $18,213$) proches de celles du granite qui apparaît donc comme une source plausible. Une seconde étape dépose la barytine lamellaire et de la galène à composition identique à celle des Farges ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,262$) : cette étape relève très probablement du même épisode plombo-barytique liasique et de la même source que le filon des Farges (Fig. 4.9 ; Tab. 4.3).

4.3.2 - Labessette : réseau filonien aurifère polyphasé

Le district de Labessette (ou de Pontvieux-Labessette, Puy-de-Dôme) compte dix-sept filons polymétalliques aurifères tardi-hercyniens groupés sur deux sites distants de 6 km : Pontvieux et Labessette. Tous sont encaissés dans l'orthogneiss ordovicien (430 Ma) de Taupes et d'âge tardi-hercynien (288 à 297 ± 9 Ma, âges K/Ar sur muscovite et feldspath ; Bril *et al.*, 1991), relevant de l'épisode « or 300 ». Les filons sont fortement bréchiques et montrent une paragenèse riche (Fig. 4.10) comprenant notamment arsénopyrite, or et jamesonite précoce (étape 1), suivis de galène et de sulfosels de Pb/Sb (semseyite, boulangerite, bournonite...), (étapes 2 à 4 ; Marcoux *et al.*, 1985), mais sans barytine ni fluorine.

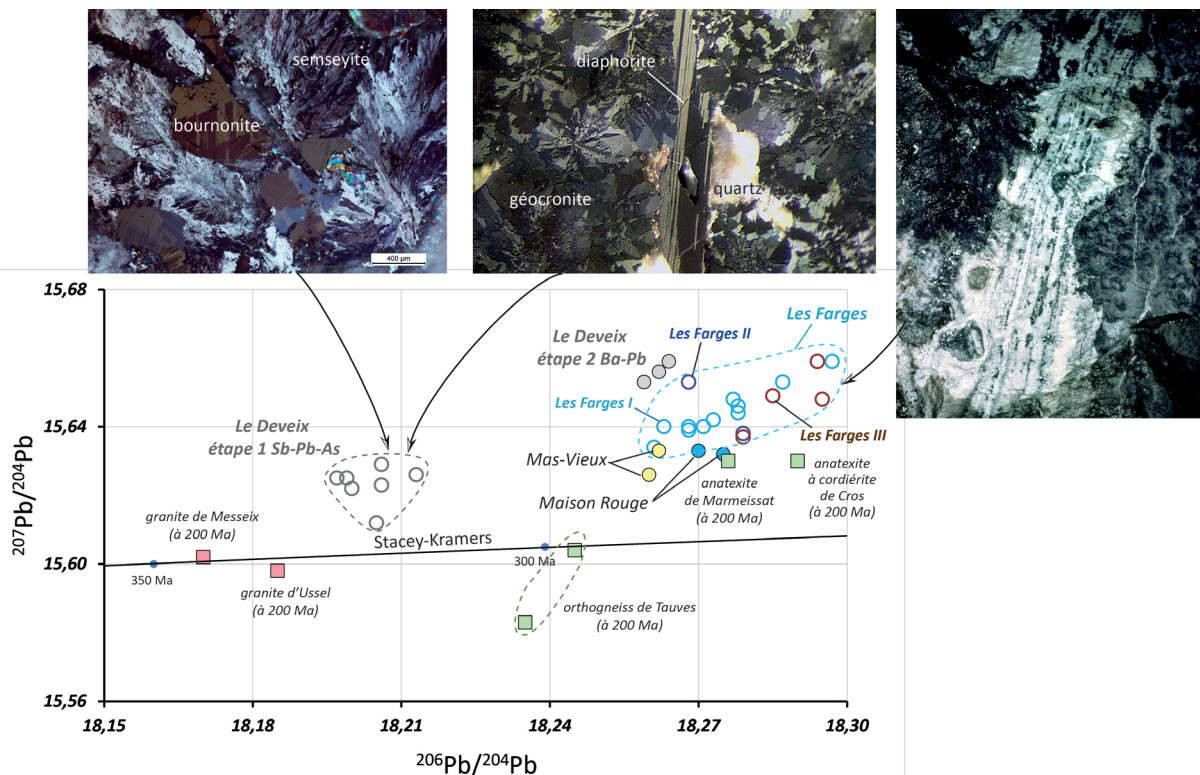


Figure 4.9 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des filons à barytine-galène de Corrèze et des principales roches-sources possibles, montrant que la source principale est à chercher dans le socle métamorphique, notamment les anatexites. Photos au microscope en lumière réfléchie polarisée des minéraux analysés de l'étape 1 du Deveix (géocronite, semseyite, bourbonite et diaphorite) et photo du filon des Farges © É. Marcoux ; filon rubané à barytine-galène des Farges, de l'épisode liasique © M. Jébrak.

Figure 4.9 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the barite-galena veins of Corrèze and the main possible source rocks, showing that the main source is to be found in the metamorphic basement, in particular the anatexites. Photos (reflected light microscope, analyzed polarized light) of the analyzed minerals from stage 1 of Deveix (geocronite, semseyite, bourbonite and diaphorite), and photo of Les Farges vein © É. Marcoux; banded barite-galena vein from Farges, from the Liassic episode © M. Jébrak.

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
filon à barytine - galène				
Les Farges (formation I)	Gn	18,261	15,634	38,443
	Gn	18,268	15,640	38,461
	Gn	18,278	15,646	38,502
	Gn	18,263	15,640	38,454
	Gn	18,277	15,648	38,517
	Gn	18,287	15,653	38,495
	Gn	18,271	15,640	38,473
	Gn	18,268	15,639	38,448
	Gn	18,278	15,644	38,481
	Gn	18,273	15,642	38,486
Les Farges (formation II)	Gn	18,268	15,653	38,525
	Gn	18,279	15,638	38,446
Les Farges (formation III)	Gn	18,294	15,659	38,514
	Gn	18,285	15,649	38,465
	Gn	18,295	15,648	38,469
	Gn	18,279	15,637	38,458
moy. 17 an.		18,278	15,645	38,481
Maison-Rouge	Gn	18,270	15,633	38,521
	Gn	18,275	15,632	38,539
Mas-Vieux	Gn	18,262	15,633	38,486
	Gn	18,260	15,626	38,465
Le Deveix (stade 1)	Bour	18,213	15,626	38,448
	Gc	18,199	15,625	37,423
	Gc	18,197	15,625	38,428
	Sem	18,206	15,623	38,446
	dup	18,206	15,629	38,454
	Sem	18,200	15,622	38,438
	Gn	18,205	15,612	38,410
moy. 7 an.		18,204	15,623	38,292
Le Deveix (stade 2)	Gn	18,264	15,659	38,475
	dup	18,259	15,653	38,457
	dup	18,262	15,656	38,462
	dup	18,262	15,656	38,465

roche analysée	âge	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
socle métamorphique						
anatexite de l'Artense (ou de Cros en Bagnols)	430 Ma (FK)	18,126	15,612	38,171	4,4	19,2
	300 Ma	18,219	15,622	38,296		
	200 Ma	18,290	15,630	38,392		
	0 Ma (RT)	18,429	15,642	38,583		
orthogneiss de Tauves (Larodde) éch.1	430 Ma (FK)	18,067	15,583	38,379	4,5	24,1
	300 Ma	18,163	15,583	38,536		
	200 Ma	18,235	15,583	38,656		
	0 Ma (RT)	18,377	15,582	38,896		
orthogneiss de Tauves (Larodde) éch.2	430 Ma (FK)	18,076	15,594	38,424	4,4	19,2
	300 Ma	18,172	15,600	38,582		
	200 Ma	18,245	15,604	38,703		
anatexites (Marmeissat)	430 Ma (FK)	18,184	15,625	38,219	4,4	19,2
	300 Ma	18,203	15,626	38,245		
	200 Ma	18,276	15,630	38,345		
granites hercyniens						
granite de Gelles	300 Ma	18,233	15,662	38,387	12	40
	200 Ma	18,288	15,665	38,394		
granite de la Tour d'Auvergne	345 Ma (FK)	18,103	15,619	38,145	8,3	10,8
	300 Ma	18,164	15,623	38,169		
	200 Ma	18,298	15,630	38,224		
	0 Ma (RT)	18,561	15,631	38,409		
granite d'Ussel	345 Ma (FK)	18,089	15,592	38,161	4,1	11,5
	300 Ma	18,119	15,594	38,187		
	200 Ma	18,185	15,598	38,245		
	0 Ma (RT)	18,314	15,608	38,359		
granite de Messeix	345 Ma (FK)	18,087	15,597	38,145	4,1	11,5
	200 Ma	18,170	15,602	38,218		

Tableau 4.3 - Compositions isotopiques du plomb des filons barytiques à galène du secteur des Farges et des roches sources potentielles à différents âges. Les rapports μ et W de l'anatexite de Marmeissat et du granite de Messeix ont été admis comme identiques à ceux des anatexites de Bagnols-Cros et du granite d'Ussel respectivement (dup = duplicata).

Table 4.3 – Lead isotopic compositions of barite-galena veins in the Farges sector and potential source rocks at different ages. The μ and W ratios of Marmeissat anatexite and Messeix granite were accepted as identical to those of Bagnols-Cros anatexites and Ussel granite respectively (dup = duplicate).

Les signatures isotopiques montrent que la jamesonite précoce des deux sites correspond à une première arrivée de plomb ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,200 à 18,235), la galène et les sulfosels tardifs à une seconde arrivée ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,253 à 18,285), sans doute très proche chronologiquement (Fig. 4.11 ; Tab 4.4). L'examen microscopique montre que la galène a été remplacée par la boulangérite, puis la bourbonite

et la semseyite, son plomb ayant été réemployé *in situ* pour leurs formations. Le filon de Farreyrolles est proche géographiquement, minéralogiquement (arsénopyrite, galène, semseyite) et isotopiquement ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 18,151 sur semseyite).

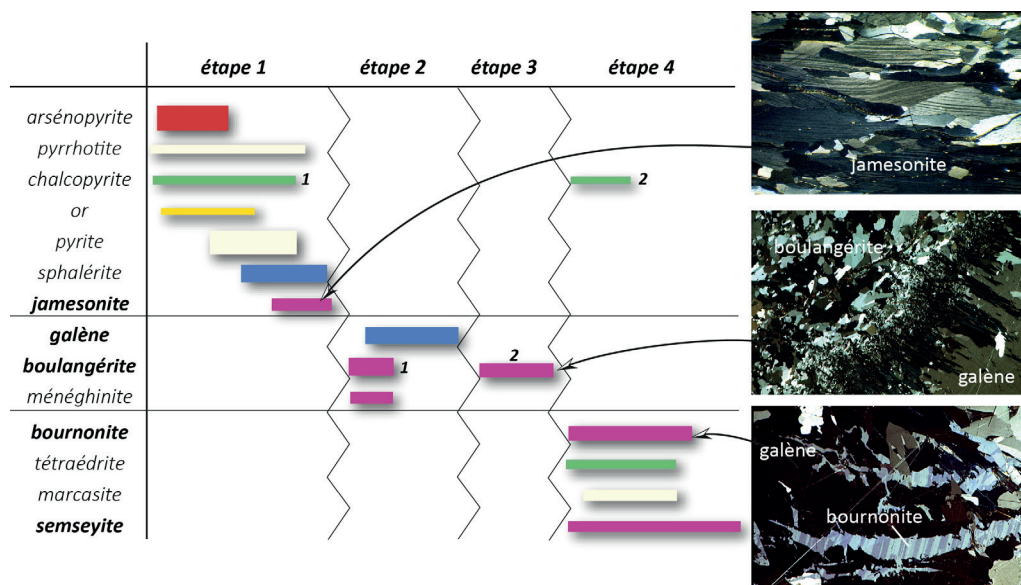


Figure 4.10 – Succession paragenétique simplifiée du district filonien de Labessette-Pontvieux. Photos des minéraux analysés au microscope en lumière réfléchie polarisée : jamesonite maclée (étape 1), galène (étape 2), envahie par la boulangerite (étape 3) puis recoupée par la bournonite (étape 4) © É. Marcoux.

Figure 4.10 – Simplified paragenetic succession of the Labessette-Pontvieux lode district. Photos (reflected light microscope, analyzed polarized light) of analyzed minerals: twinned jamesonite (stage 1), galena (stage 2), invaded by boulangerite (stage 3) then crosscut by bournonite (stage 4) © É. Marcoux.

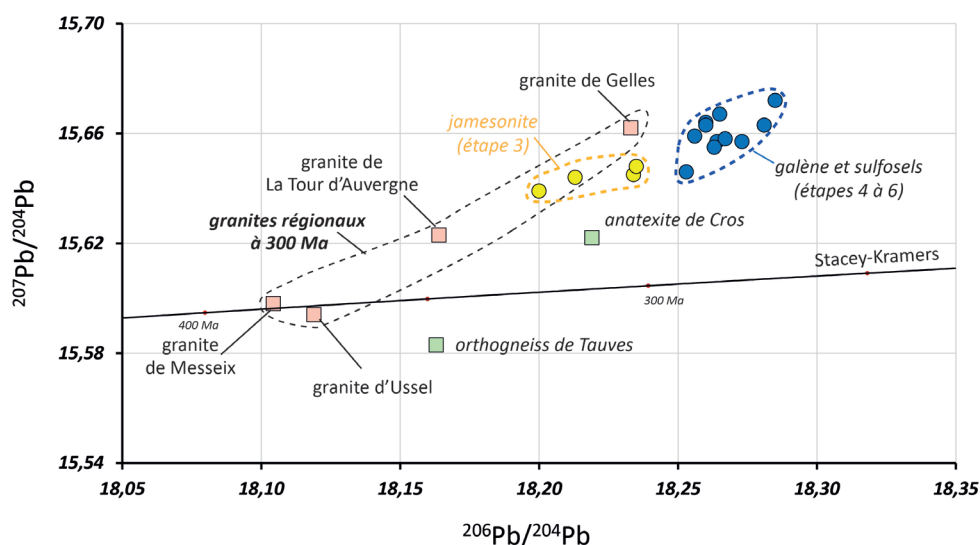


Figure 4.11 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des filons aurifères de Labessette et des roches sources potentielles.

Figure 4.11 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of Labessette gold-bearing veins and of potential source rocks.

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
étape 1				
Pontvieux	Jam	18,234	15,645	38,460
Pontvieux	Jam	18,235	15,648	38,442
Labessette (Communal)	Jam	18,200	15,639	38,392
idem	dup	18,213	15,644	38,408
étapes 2 à 4				
Pontvieux	Gn	18,285	15,672	38,551
idem	dup	18,281	15,663	38,521
Pontvieux	Bour	18,273	15,657	38,467
Labessette (Aubier)	Gn	18,264	15,657	38,510
Labessette (La Viallole)	Gn	18,267	15,658	38,506
Labessette (La Viallole)	Gn	18,260	15,664	38,513
Labessette (La Viallole)	Boul	18,265	15,667	38,563
Labessette (La Viallole)	Boul	18,260	15,663	38,525
idem	dup	18,256	15,659	38,494
Labessette (La Viallole)	Bour	18,253	15,646	38,451
Labessette (La Viallole)	Sem	18,263	15,655	38,467
La Viallole - moy. 7 an.		18,261	15,659	38,503

Tableau 4.4 – Compositions isotopiques des minéralisations de Pontvieux - Labessette ; les analyses des roches prises en compte figurent sur le tableau 4.3 (Farges-Deveix), (dup = duplicata).

Table 4.4 – Isotopic compositions of the Pontvieux - Labessette mineralization; the analyzes of the rocks considered appear in table 4.3 (Farges-Deveix), (dup = duplicate).

Les rapports isotopiques du socle métamorphique et des granites locaux (Tournaisien et Serpukhovien) ont été calculés à 300 Ma, âge vraisemblable de la minéralisation (cf. supra), et sont variables. Pour le plomb précoce (étape 1), la source peut être recherchée dans les roches locales (granites et anatexites de Cros-Bagnols), débordant largement du seul orthogneiss encaissant de Tauves. Pour le plomb plus tardif (étapes 2 à 4), la contribution d'une source plus radiogénique est nécessaire et les granites namuriens (représentés ici par le granite de Gelles) semblent de bons candidats (Fig. 4.11).

4.3.3 - Les Borderies : un polyphasage complexe

Le filon à antimoine dominant des Borderies (Puy-de-Dôme) est de taille très modeste mais révèle une genèse polyphasée avec quatre étapes bien individualisées (Fig. 4.12) portant trois signatures isotopiques distinctes (Marcoux *et al.*, 1988). L'étape 1 se compose de berthiériste massive peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,76$). L'étape 2, polymétallique (As, Sb, Pb, Ag, Cu, Zn), est l'étape majeure à arsénopyrite, stibine, tétraédrite et sulfosels variés (jamesonite, andorite, zinkénite), et affiche une composition isotopique très homogène peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,941$ à $17,969$), (Fig. 4.13 ; Tab. 4.5). La source du plomb de ces deux étapes serait à rechercher dans un socle cambrien (orthogneiss de type Limousin ?) inconnu à l'affleurement dans le district mais connu dans le groupe leptyno-amphibolique régional (Faure *et al.*, 2005).

L'étape 3 voit la cristallisation massive d'une seconde génération de sulfosels de Pb/Sb (zinkénite, semseyite) à composition plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,201$ à $18,223$). Cette composition est compatible avec une source dans le socle local : anatexite et granites (type Gelles et La Tour d'Auvergne). Elle est aussi assez proche de celle des filons plombo-barytiques liasiques locaux ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18,25$), mais l'absence de fluorine et de barytine permet d'écarter leur participation. Ces fluides opèrent un mélange de leur plomb propre avec le plomb « ancien » peu radiogénique et l'antimoine du filon, partiellement remobilisés : c'est donc un héritage métallique. L'étape 4 porte aussi d'abondants sulfosels de Pb/Sb (plagionite, jamesonite) et possède une signature isotopique identique à celle de l'étape 3 dont elle semble être une simple remobilisation *in situ*, un réajustement final. Ce petit filon des Borderies est donc le théâtre de phénomènes d'héritage en cascade exprimés sur les plans minéralogiques et isotopiques.

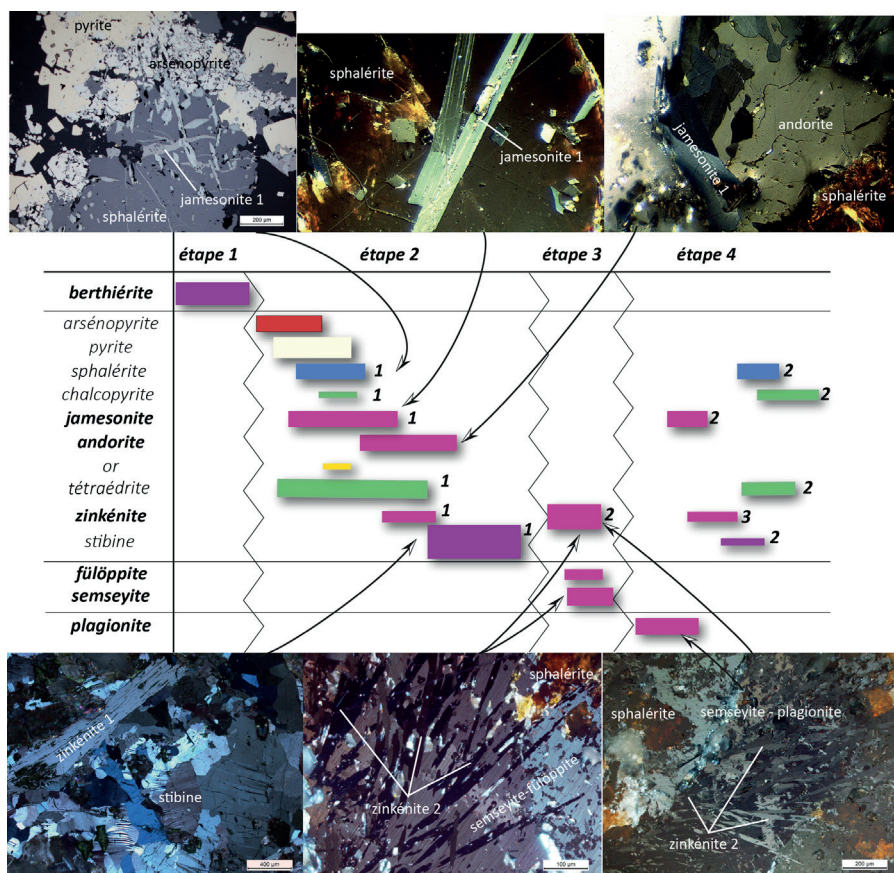


Figure 4.12 – Succession paragenétique simplifiée du filon des Borderies (d'après Marcoux *et al.*, 1988). Photos au microscope en lumière réfléchie polarisée (sauf celle en haut à gauche) des minéraux analysés des Borderies : pyrite-arsénopyrite-sphalérite-jamesonite-andorite (étape 2) ; zinkénite 1 en grands cristaux puis stibine (fin étape 2) ; sulfosels de Pb-Sb : zinkénite 2 aciculaire dans plages de fülöppite-semseyite (étape 3) ; idem avec plagionite interstitielle (étape 4) © É. Marcoux.

Figure 4.12 – Simplified paragenetic succession of the Borderies vein (after Marcoux *et al.*, 1988). Photos (reflected light microscope, analyzed polarized light, except the one at the top left) of the Borderies analyzed ore minerals: pyrite-arsenopyrite-sphalerite-jamesonite-andorite (stage 2); zinkénite 1 in large crystals then stibnite (end of stage 2); Pb-Sb sulfosels: acicular zinkénite 2 in fülöppite-semseyite zones (stage 3); same with interstitial plagionite (stage 4) © É. Marcoux.

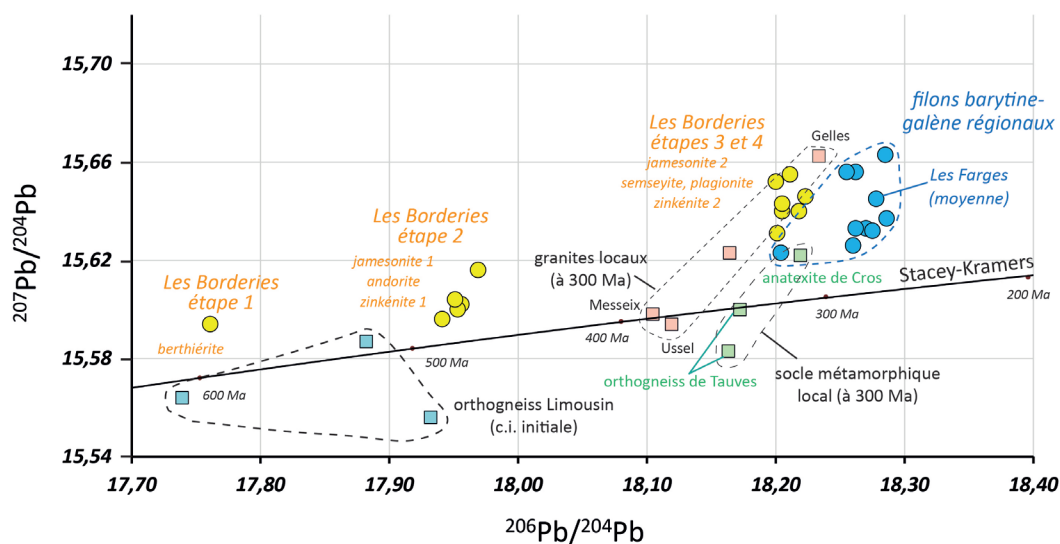


Figure 4.13 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ du filon des Borderies avec champs des principales roches sources potentielles et des filons à barytine-galène régionaux.

Figure 4.13 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Borderies vein with fields of the main potential source rocks and of regional barite-galena veins.

<i>gîte analysé</i>	<i>minéral</i>	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
filon à stibine-berthiérîte				
Les Borderies (étape 1)	Btr	17,761	15,594	38,065
Les Borderies (étape 2)	Jam 1	17,941	15,596	38,235
Les Borderies (étape 2)	Jam 1	17,956	15,602	38,244
Les Borderies (étape 2)	Jam 1	17,953	15,600	38,231
Les Borderies (étape 2)	And	17,951	15,604	38,254
Les Borderies (étape 2)	Znk 1	17,969	15,616	38,294
moy. 5 an.		17,954	15,6036	38,2516
Les Borderies (étape 3)	Znk 2	18,205	15,640	38,354
Les Borderies (étape 3)	Znk 2	18,201	15,631	38,342
Les Borderies (étape 3)	Znk 2	18,205	15,643	38,363
Les Borderies (étape 3)	Sem	18,223	15,646	38,370
Les Borderies (étape 3)	Sem	18,211	15,655	38,427
Les Borderies (étape 4)	Plg	18,200	15,652	38,394
Les Borderies (étape 4)	Plg	18,218	15,640	38,381
Les Borderies (étape 4)	Jam 2	18,219	15,641	38,345
moy. 8 an.		18,210	15,644	38,372
filon à barytine - (fluorine) - galène				
Les Farges (moyenne)	Gn	18,278	15,645	38,481
Maison-Rouge	Gn	18,27	15,633	38,521
Maison-Rouge	Gn	18,275	15,632	38,539
Mas-Vieux	Gn	18,262	15,633	38,486
Mas-Vieux	Gn	18,26	15,626	38,465
Le Deveix (moyenne étape 1)		18,204	15,623	38,292
Le Deveix (moyenne étape 2)	Gn	18,262	15,656	38,465
Bois du cri	Gn	18,286	15,637	38,501
Gioux	Gn	18,255	15,656	38,495
Gioux	Gn	18,285	15,663	38,484
roche	âge	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
orthogneiss de Meuzac	433 Ma (FK)	17,932	15,556	37,924
orthogneiss du Thaurion	433 Ma (FK)	17,882	15,587	38,063
		17,739	15,564	37,871

Tableau 4.5 – Compositions isotopiques des minéralisations des Borderies ; les analyses des granites et des roches locales prises en compte figurent sur le tableau 4.3 (Farges- Le Deveix), (les anatexites de Marneissat ne sont pas pertinentes sur ce schéma) ; la composition des feldspaths est celle des orthogneiss limousins lors de leur mise en place à 433 Ma (voir tableaux annexe 1.1 et 1.2 pour détails).

Table 4.5 – Isotopic compositions of Borderies mineralization; the analyses of granites and local rocks considered appear in table 4.3 (Farges-Le Deveix), (the anatexites of Marneissat are not relevant in this diagram); the composition of the feldspaths is that of the Limousin orthogneisses during their emplacement at 433 Ma (see appendix tables 1.1 and 1.2 for details).

en Ile-et-Vilaine (Pochon *et al.*, 2016b), qui serait peut-être extensible aux filons « berthiérîte-(or) » du Massif central ;

2) un second épisode à stibine dominante est illustré aux Borderies (étape 2) et dans les filons de stibine proches (Chomadoux, La Couveyre). Bien que daté par muscovite à 313 ± 5 Ma (K/Ar), cet épisode serait plutôt synchrone des minéralisations à antimoine (et plomb) proches de Brioude-Massiac, et donc âgée d'environ 295-300 Ma ;

3) un troisième épisode apporte du plomb-zinc (assez discret car la galène n'est jamais massive), mais sans barytine ni fluorine : on peut y voir l'écho des filons plombifères de Pontgibaud, 30 km plus au nord sur le même accident majeur de Tauves et ses satellites. Il génère les filons de Labessette et les étapes 3-4 des Borderies, permettant par recyclage de l'antimoine la cristallisation des sulfosels abondants dans ces filons et aussi dans ceux de Farreyrolles (semseyite abondante) et Champagnac à galène-sphalérite-jamesonite.

4.3.4 - Essai de synthèse du district Artense - Corrèze

Ce district très polymétallique rassemble des minéralisations pouvant relever de quatre épisodes hydrothermaux, une pluralité appuyée par des compositions isotopiques très étalées (Fig. 4.14 et 4.15).

1) un premier épisode hydrothermal, dont la précocité est soutenue par le caractère peu radiogénique des Borderies ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,76$ à $17,969$), notamment de la berthiérîte ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,76$), et on peut penser à l'âge dévonien (360 Ma) proposé pour le filon à berthiérîte du Semnon

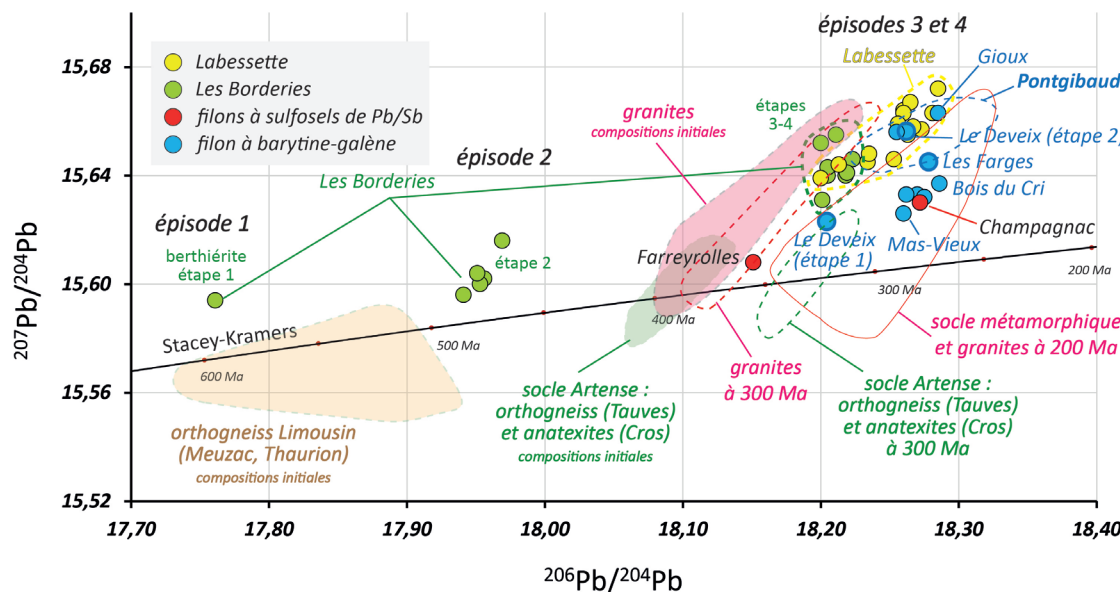


Figure 4.14 – Diagramme $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ global des minéralisations et des principales roches-sources possibles d'Artense-Corrèze. Le filon des Farges et les deux étapes de dépôt du Deveix sont représentés par leurs moyennes (bordures épaisses). Les orthogneiss du Limousin et le champ des filons plombifères de Pontgibaud sont représentés ; les données prises en compte figurent dans tableaux 4.2 à 4.5.

Figure 4.14 – Overall $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of mineralization and the main possible source rocks of Artense-Corrèze. The Farges vein and the two Deveix deposition stages are represented by their averages (thick borders). The Limousin orthogneisses and the Pontgibaud lead vein field are represented; the data taken into account appear in tables 4.2 to 4.5.

Enfin, l'épisode hydrothermal liasique à plomb, barytine et fluorine, est responsable de la création du filon des Farges dans son intégralité, des filons Ba-Pb proches (Mas-Vieux, Maison-Rouge, Gioux), ainsi que de l'histoire finale du Deveix où l'abondance des sulfosels de Pb/Sb trahit un recyclage d'antimoine ancien (Fig. 4.15). L'accident majeur qu'est le Sillon houiller ne semble pas avoir perturbé les circuits hydrothermaux actifs au Lias inférieur : les mêmes signatures isotopiques se retrouvant à l'ouest (Les Farges, Maison Rouge...) et à l'est (Bois du Cri et plus au nord à Pontgibaud).

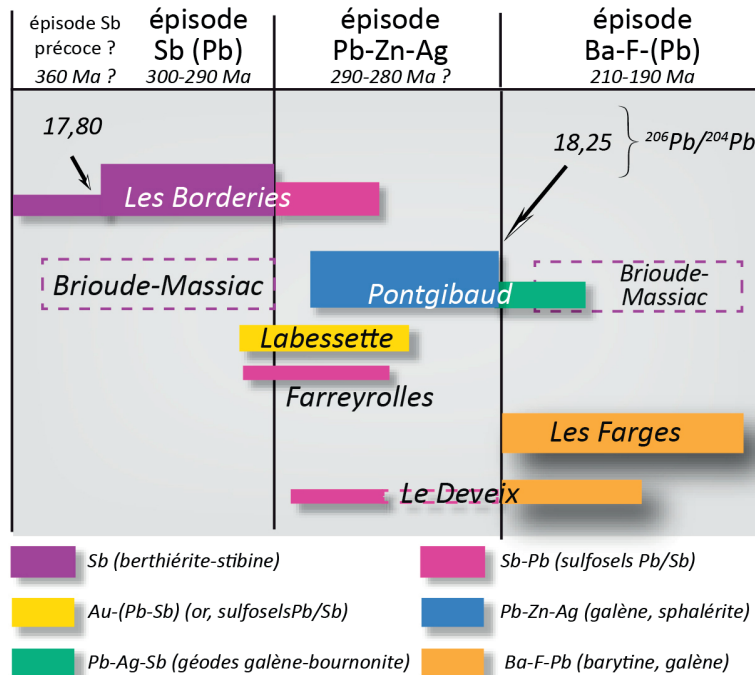


Figure 4.15 – Proposition de synthèse de l'histoire métallogénique globale d'Artense-Corrèze déduite des études paragenétiques et des données isotopiques du plomb.

Figure 4.15 – Proposed synthesis of the overall metallogenic history of Artense-Corrèze deduced from paragenetic studies and lead isotopic data.

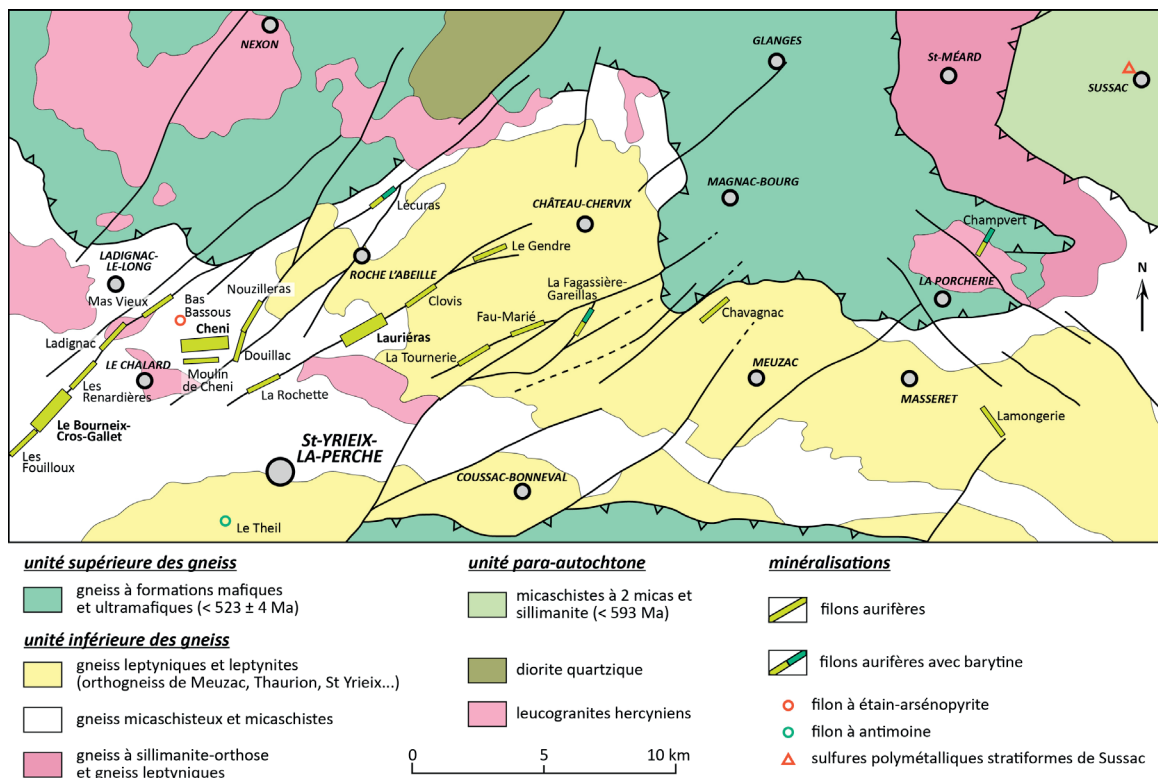


Figure 4.16 – Carte de situation des principaux filons du district de Saint-Yrieix avec une géologie simplifiée d'après cartes 1/50 000 de Nexon (712), Châteauneuf-la-Forêt (713), Saint-Yrieix (736) et Uzerche (737).

Figure 4.16 – Location map of the main veins in the Saint-Yrieix district with simplified geology based on 1/50,000 geological maps of Nexon (712), Châteauneuf-la-Forêt (713), Saint-Yrieix (736) and Uzerche (737).

4.4.1 - Minéralisations aurifères

Dans le grand district aurifère de Saint-Yrieix, les galènes de la plupart des filons aurifères (Laurières, Le Bourneix, Cheni, Nouzilleras...) sont à gangue quartzreuse avec arsénopyrite (et assez fréquemment stibine), et donnent des rapports homogènes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,05 \text{ à } 18,16$; Marcoux, 1987 ; Touray *et al.*, 1989). Trois filons aurifères de ce district (Champvert, La Fagassière, Lécucas) affichent cependant des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ supérieurs à 18,21 mais ils possèdent une paragenèse inhabituelle à galène abondante et barytine (Fig. 4.17 ; Tab. 4.6). Leurs compositions isotopiques sont intermédiaires entre celles des filons aurifères et des filons plombo-barytiques liasiques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,216 \text{ à } 18,285$) suggérant

fortement un mélange entre les deux générations de plomb (Fig. 4.18 ; Tab. 4.6). Ces trois filons aurifères ont donc été repris et « contaminés » par les fluides plombo-barytiques liasiques, les sulfures analysés relevant de cet épisode hydrothermal. A l'appui de cette hypothèse, on remarque que l'unité spatiale est respectée : ces filons aurifères « contaminés » se cantonnent dans l'est du district aurifère, où commencent à apparaître les filons plombo-barytiques liasiques, fréquents plus à l'est (Champarnaud, Bretelle de Champvert...). À La Fagassière, l'épisode liasique a recyclé plomb « ancien » et antimoine dans boulangérite et bournonite à rapports isotopiques légèrement plus bas ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,216$), tandis que la galène massive s'est surtout nourrie du plomb liasique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,260 \text{ et } 18,289$).

Les compositions des gîtes aurifères de Viges et la Petite-Faye (Marche) sont similaires à celles des gîtes du Limousin ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,059 à 18,121), seuls Le Châtelet et Meillers sont plus radiogéniques (18,201 et 18,204) mais situés dans un cadre géologique différent.

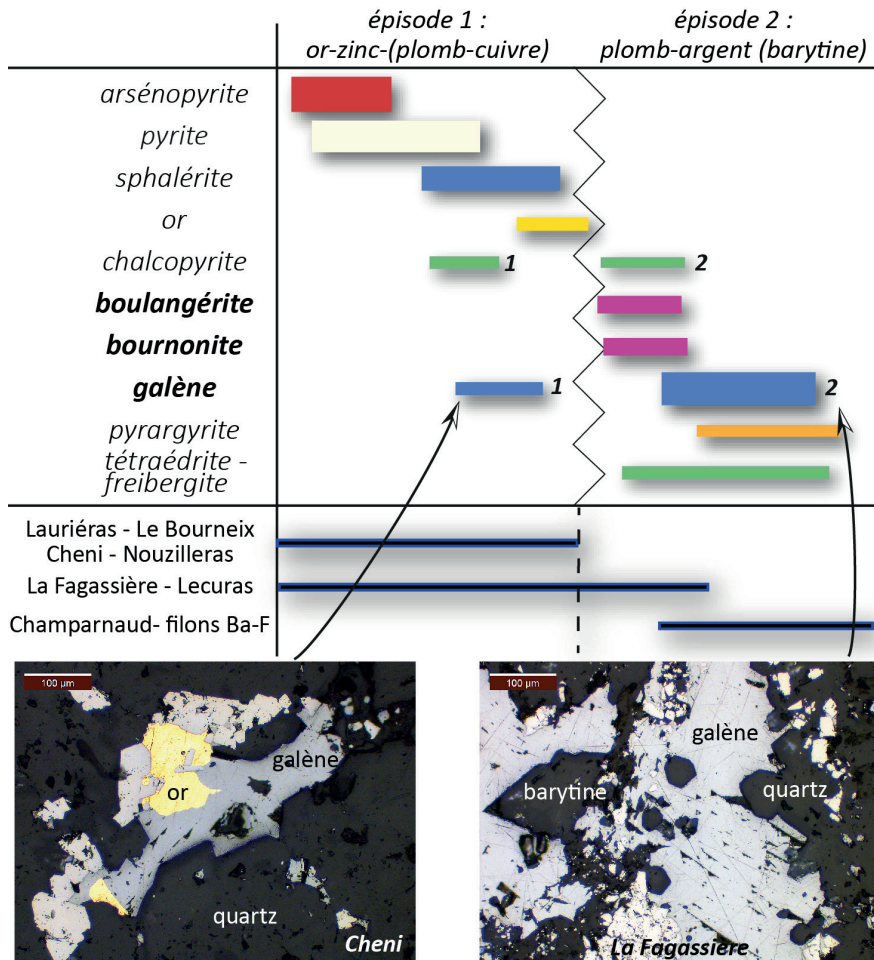


Figure 4.17 – Succession paragenétique simplifiée des filons du Limousin avec La Fagassière, qui cumule les deux épisodes majeurs. Photos au microscope en lumière réfléchie des minéraux des filons aurifères du Limousin : galène 1 précoce sub-synchrone de l'or et de l'arsénopyrite (blanc), (Cheni) et galène 2 tardive, abondante, du grand épisode liasique à barytine-galène (La Fagassière) © É. Marcoux.

Figure 4.17 – Simplified paragenetic succession of the Limousin veins with La Fagassière vein, which combines the two major episodes. Photos (reflected light microscope, plane polarized light) of the minerals of the gold veins of Limousin: early sub-synchronous galena 1 of gold and arsenopyrite (white), (Cheni) and late, abundant galena 2 of the great Liassic barite-galena episode (La Fagassière) © É. Marcoux.

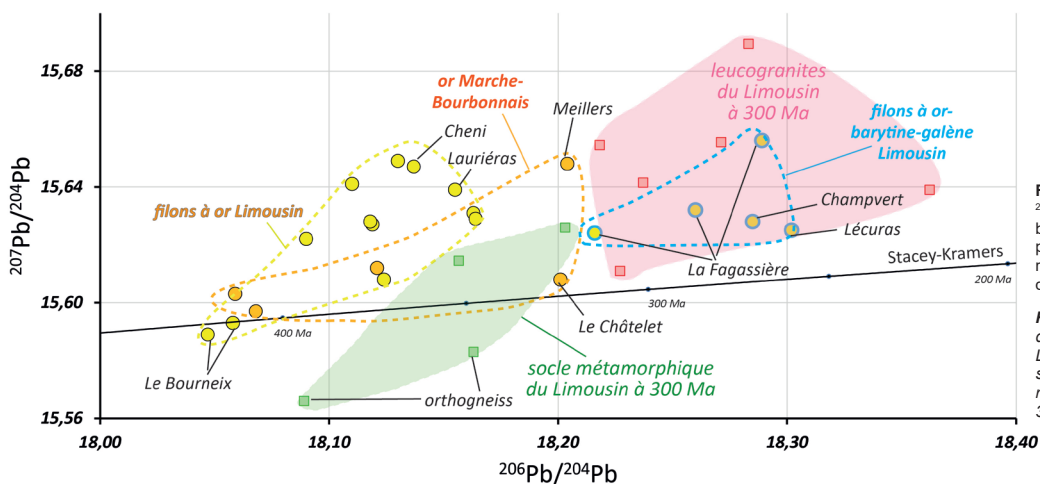


Figure 4.18 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des filons aurifères et aurifères à barytine du Limousin-Marche et des principales roches-sources possibles (les carrés rouges et verts représentent les compositions des roches à 300 Ma).

Figure 4.18 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the gold and gold-barite veins of Limousin-Marche and of the main possible source rocks (the red and green squares represent the compositions of the rocks at 300 Ma).

gîte	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
filons à arsenic-étain-(tungstène-or)				
Bas-Bessous	Gn	18,120	15,630	38,303
La Bertrand	Gn	18,010	15,652	38,350
Moulin-Rousset	Gn	18,152	15,640	38,309
Moulin-Barret	Gn	18,159	15,651	38,331
sulfures stratiformes polymétalliques				
Sussac	Gn	17,960	15,610	38,225
filons aurifères du Limousin				
Beaune	Gn	18,163	15,631	38,301
Maranas	Gn	18,164	15,629	38,231
Ladignac (Camp de César)	Gn	18,119	15,627	38,276
Le Bourneix (Cros Gallet)	Gn	18,058	15,593	38,167
	Gn	18,047	15,589	38,159
Cheni	Gn	18,137	15,647	38,325
Nouzilleras	Gn	18,118	15,628	38,278
	Gn	18,090	15,622	38,255
Douillac	Gn	18,110	15,641	38,339
Laurières	Gn	18,155	15,639	38,320
Gendre	Gn	18,124	15,608	38,250
La Tournerie	Gn	18,130	15,649	38,331
filons et gîtes aurifères Marche - Bourbonnais				
Petite-Faye	Gn	18,059	15,603	38,166
idem	dup	18,068	15,597	38,162
Le Châtelet	Gn	18,201	15,608	38,269
Vige	Jam	18,121	15,612	38,181
Meilliers (corrigé à 300 Ma)	Py	18,204	15,648	38,364
filons aurifères à barytine-galène				
La Fagassière	Gn	18,260	15,632	38,475
La Fagassière	Boul-Bour	18,216	15,624	38,398
La Fagassière	Gn	18,289	15,656	38,522
La Fagassière (moy 3 an.)		18,255	15,637	38,465
Champvert	Gn	18,285	15,628	38,619
Lécucas	Gn	18,302	15,625	38,429
filons à barytine-galène				
Champarnaud	Gn	18,389	15,648	38,529
Bretelle de Champvert	Gn	18,326	15,625	38,482
Rancon	Gn	18,622	15,665	38,779
Meyrignac de Bar	Gn	18,569	15,658	38,642
	Gn	18,575	15,664	38,649
Montmarçon 2 (moyenne)	Gn	18,499	15,640	38,589
Chaillac (moyenne)	Gn	18,368	15,631	38,506
Puy-les-Vignes 2	Gn	18,582	15,706	38,815
Le Pérault	Gn	18,523	15,637	38,762
Urciers	Gn	18,209	15,669	38,449
Jouhé	Gn	18,699	15,660	38,748
L'Age	Gn	18,579	15,671	38,698
Les Farges (moyenne)	Gn	18,278	15,645	38,481
Maison-Rouge	Gn	18,275	15,632	38,539
Mas-Vieux	Gn	18,262	15,633	38,486
	Gn	18,260	15,626	38,465
Le Deveix (étape 2) (moyenne)	Gn	18,262	15,656	38,465
Gioux	Gn	18,285	15,663	38,484

roche analysée	âge	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	W
granites hercyniens						
granite moyen de la Margeride (St-Chely d'Apcher) (320 Ma)	FK (~320 Ma) 300 Ma	18,385 18,428	15,695 15,698	38,550 38,560	13,1	10
granite clair de la Margeride (Lozère) (320 Ma)	FK (~320 Ma) 300 Ma	18,639 18,266	15,710 15,667	38,610 38,394	8,1	6,3
aplite de la Margeride (St-Chely d'Apcher)	FK (~320 Ma) 300 Ma	18,268 18,338	15,655 15,659	38,934 38,394	21,4	0,3
leucogranite St-Sylvestre (1)	FK (~315 Ma) 300 Ma	18,246 18,271	15,654 15,655	38,360 38,371	10,3	14
leucogranite St-Sylvestre (1)	FK (~315 Ma) 300 Ma	18,258 18,283	15,688 15,689	38,600 38,611	10,3	14
leucogranite de Millevaches - Saint-Julien-aux-Bois (1)	FK (~315 Ma) 300 Ma	18,337 18,362	15,638 15,639	38,48 38,491	10,3	14
leucogranite de La Brame (1)	FK (~315 Ma) 300 Ma	18,212 18,237	15,640 15,641	38,300 38,311	10,3	14
leucogranite de St-Mathieu (1)	FK (~315 Ma) 300 Ma	18,193 18,218	15,653 15,654	38,330 38,341	10,3	14
leucogranite de St-Yrieix	FK (~310 Ma) 300 Ma	18,207 18,227	15,61 15,622	38,189 38,209	12	40
socle métamorphique						
orthogneiss de Tauves (Larodde) éch.1	430 Ma (FK) 300 Ma 200 Ma 0 Ma (RT)	18,067 18,163 18,235 18,377	15,583 15,583 15,583 15,582	38,379 38,536 38,656 38,896	4,5	24,1
anatexites (Marmeissat)	430 Ma (FK) 300 Ma 200 Ma	18,184 18,203 18,276	15,625 15,626 15,630	38,219 38,245 38,345	4,4	19,1
anatexites à cordiérite (Vieille-Brioude) (430 Ma)	300 Ma 200 Ma	18,157 18,187	15,615 15,616	38,220 38,240	1,9	4,1
orthogneiss Meuzac (433 Ma)	300 Ma 200 Ma	18,089 18,205	15,566 15,572	38,098 38,228	7,2	26

Tableau 4.6 – Compositions isotopiques des minéralisations et des roches du Limousin ; (1) Michard-Vitrac *et al.* (1981) ; μ et W de l'anatexite de Marmeissat admis égaux à ceux de Cros (tab. 4.3) ; détails dans tableaux annexe 1.1 et 1.2 (dup = duplicata).

Table 4.6 – Isotopic compositions of mineralization and rocks of Limousin ; (1) Michard-Vitrac *et al.* (1981) ; μ and W of anatexite from Marmeissat admitted identical to those of Cros ; see appendix tables 1.1 and 1.2 for details (dup = duplicate).

4.4.2 - Gîtes à étain et filons fluo-barytiques à galène

Les gîtes à étain dessinent un champ en partie commun avec celui des filons aurifères, seule La Bertrand s'en distingue par des valeurs moins radiogéniques (Fig. 4.19). La galène montre une signature ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,96$) compatible avec un âge cambrien, mais un mélange avec un plomb granitique ne peut être exclu. Le Limousin compte par ailleurs

surtout des filons à barytine avec galène (Meyrignac, Rancon, Jouhé...), les filons à fluorine étant plus rares (Le Rossignol à Chaillac). Nous l'avons un peu étendu jusqu'au Sillon houiller afin d'intégrer le filon des Farges. Les compositions isotopiques sont étalées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,20$ à $18,70$), (Fig. 4.19), ce qui est la règle pour ces filons liasiques comme nous l'avons vu précédemment, la lithologie locale dictant la signature isotopique.

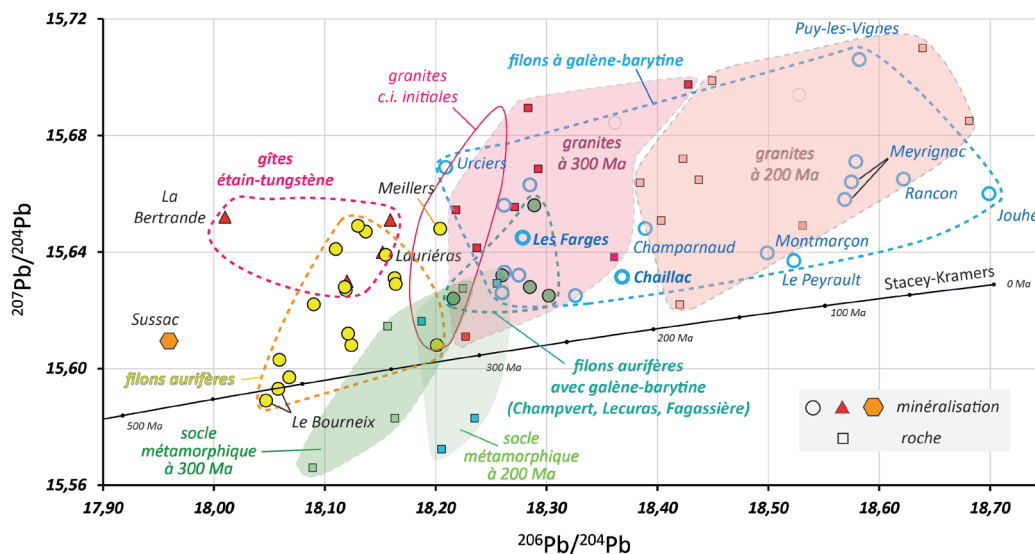


Figure 4.19 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ global des gîtes de Limousin-Marche (incluant les filons F-Ba des Farges) et des roches-sources potentielles. Chaillac (5 analyses) et Les Farges (17 analyses) sont représentés par leurs moyennes (cercles à bords épais). Le gîte stratiforme de Montmarçon est en-dehors du champ. « Puy-les-Vignes » et « Montmarçon » sont les filons barytiques proches et non le gisement à wolframite et le gîte stratiforme édiacarien.

Figure 4.19 – Overall $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Limousin-Marche deposits (including the Farges F-Ba veins) and of potential source rocks. Chaillac (5 analyses) and Les Farges (17 analyses) are represented by their averages (thick-edged circles). The Montmarçon stratiform is outside the field. "Puy-les-Vignes" and "Montmarçon" are the nearby barite veins and not the major wolframite ore deposit and Ediacaran stratiform mineralization.

4.4.3 - Approche de la source du plomb

Le Limousin comprend deux grands ensembles lithologiques très riches en feldspath potassique donc en plomb : les orthogneiss ordoviciens de l'unité inférieure des gneiss (dont ceux de Meuzac et Thaurion, datés à 433 Ma et 457 ± 23 Ma respectivement, et de Saint-Yrieix) et les leucogranites hercyniens, ce qui permet d'approcher la source des minéralisations aurifères et stannifères.

Vers 300 Ma, le champ de composition des orthogneiss a évolué jusqu'à tangenter celui des minéralisations (Fig. 4.19), tandis que les leucogranites ont peu évolué depuis leur cristallisation vers 310-315 Ma mais dans un milieu plus crustal à $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ plus élevé. Le plomb des minéralisations pourrait résulter d'un mélange entre ces deux plombs : « orthogneissiques » et « leucogranitique » réalisé par la percolation des fluides hydrothermaux dans la croûte avec cependant une participation additionnelle de croûte ancienne. Les gîtes à étain-tungstène portent donc un plomb essentiellement non magmatique, mais d'origine indéterminée, tandis que les filons liasiques peuvent avoir leur origine dans un lessivage des granites hercyniens (Rancon, Jouhé, Meyrignac, Puy-les-Vignes, Montmarçon, Le Peyrault...), du socle métamorphique (Les Farges – voir plus haut –, Urciers...) ou d'un mélange des deux (Chaillac, Champarnaud...), (Fig. 4.19).

4.5 - Montagne Noire et Tarn

Cette région du sud-ouest du Massif central présente une géologie variée avec de nombreux terrains paléozoïques cambriens à (rares) permien. Les minéralisations y offrent une large palette et les métaux y furent exploités dans de grandes mines : or à Salsigne, zinc-argent-germanium à Saint-Salvy, plomb-zinc à Peyrebrune, fluorine à Montroc et Le Burc, tungstène à Montredon etc., ainsi que dans de petites mines : plomb à Condades, La Loubatière... et antimoine à Bournac. L'originalité principale réside sans doute dans les gîtes stratiformes plombo-zincifères cambriens de type SEDEX (les seuls de cet âge du territoire avec Sussac, un SEDEX ou un VMS à Zn-Cu-Sn) qui s'égrènent sur les deux versants de la Montagne noire.

De par cette diversité, les compositions isotopiques sont largement étalées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,760$ à $18,588$), les amas stratiformes cambriens (traités précédemment) dessinant le champ le moins radiogénique, en cohérence avec leur âge ancien, et la structure filonienne de Saint-Salvy traçant le champ le plus radiogénique (avec Montredon), (Fig. 4.20 ; Tab. 4.7). Entre ces deux champs, on remarque que le gisement de Salsigne (représenté par les trois galènes analysées) montre des signatures variables. Ces données seront discutées plus loin en considérant toutes les analyses réalisées. Bournac, filon à antimoine dominant, et le grand filon à fluorine du Burc n'ont rien de particulier, contrairement à Montredon, à rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ élevés sans qu'on puisse proposer une interprétation solide en l'état actuel des données. Tous se situent au-dessus de la courbe de Stacey-Kramers indiquant un environnement de croûte supérieure.

Les « filons » plombo-zincifères regroupent de vrais filons mais aussi des corps plus diffus plombo-zincifères avec cuivre et antimoine (La Rabasse) ou barytine (Le Pradel) dans des dolomies du Cambrien inférieur. Si trois de ces filons sont indéniablement issus d'une remobilisation des SEDEX stratiformes cambriens (Cusses, Camprafaud et Le Priou), ce n'est pas le cas des autres, notamment de La Rabasse et du Pradel, dont l'origine est à rechercher dans un lessivage des roches régionales.

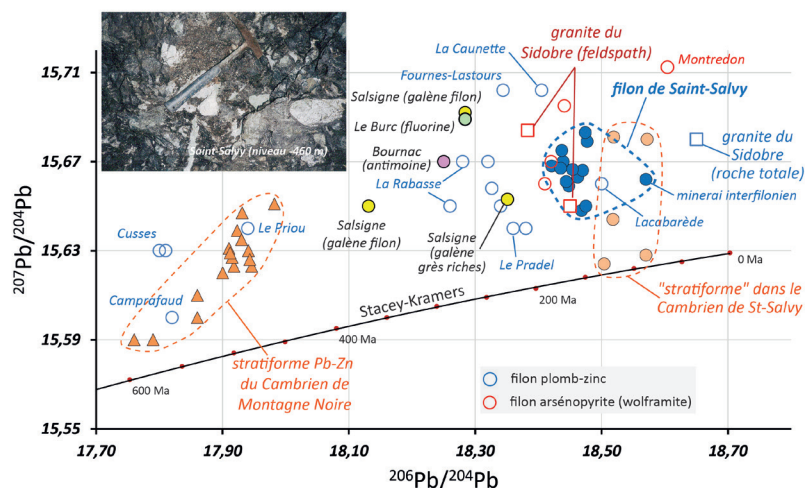


Figure 4.20 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des principaux gîtes de Montagne Noire-Tarn avec la composition du granite du Sidobre. Salsigne n'est représentée que par trois galènes (cf. fig. 4.21). Allure du minerai breccia à ciment de sphalérite (brun) à Saint-Salvy (front du niveau – 460 m) © É. Marcoux.

Figure 4.20 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the main Montagne Noire-Tarn deposits with the composition of the Sidobre granite. Salsigne is only represented by three galenas (see fig. 4.21). Appearance of the sphalerite cement breccia ore (brown) at Saint-Salvy (front at level – 460 m) © É. Marcoux.

4.5.1 - Filon zincifère de Saint-Salvy : un héritage cambrien ?

Le grand filon Zn-Pb-Ag-Ge de Saint-Salvy (301 kt de zinc produites) fut longtemps considéré comme résultant de la remobilisation des minéralisations stratiformes plombo-zincifères du Cambrien (Fogliérini *et al.*, 1980a), à l'instar de trois filons (Cusses, Camprafaud et Le Priou) décrits plus haut. Mais les résultats isotopiques obtenus sur Saint-Salvy excluent cette hypothèse de remobilisation (Marcoux *et al.*, 1993).

Les compositions des filons majeurs exploités dans la mine principale et au Rouquis, ainsi que des filons annexes (Brugayroux, Les Huttes...) sont en effet très groupées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,43$ à $18,48$, seul le minerai interfilonien étant plus radiogénique à $18,57$) et bien plus radiogéniques que celles des gîtes stratiformes cambriens ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,76$ à $17,94$), (Fig. 4.20). Aucun trend de mélange n'apparaît entre les deux populations. Les sphalérites stratiformes prélevées dans le Cambrien de la descenderie de la mine (par F. Tollon, université de Toulouse) délivrent une signature proche de celle du minerai interfilonien ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,50$ à $18,57$), mais absolument pas cambrienne, indiquant que la sphalérite s'est déposée lors de la mise en place du filon par diffusion dans l'encaissant cambrien. Une possible contamination minime par le plomb des schistes noirs, habituellement très radiogénique, pourrait expliquer la légère dérive de la sphalérite stratiforme et de l'interfilonien.

Le filon n'est pas daté par radiochronologie mais bien contraint par l'étude structurale qui le situe en fin de mise en place du granite adjacent du Sidobre (297 ± 4 Ma), soit sur la limite

<i>gîte analysé</i>	<i>minéral/ teneur</i>	<i>²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb</i>	<i>²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb</i>	<i>²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb</i>	<i>autres minéralisations</i>				
<i>faiseau filonien de Saint-Salvy</i>					<i>gîte</i>	<i>type</i>	<i>²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb</i>	<i>²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb</i>	<i>²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb</i>
mine principale	sp(gn)	18,439	15,670	38,552	Le Burc	filon fluo-barytique	18,284	15,689	38,557
	sp(gn) (164 ppm Pb)	18,477	15,679	38,583	Bournac	filon antimonifère	18,250	15,670	38,410
	sp(gn) (125 ppm Pb)	18,462	15,663	38,533	La Rabasse (1)	amas plombo-zincifères	18,280	15,670	38,420
	sp(gn) (138 ppm Pb)	18,468	15,648	38,486			18,260	15,650	38,380
mine principale 64 W	sp(gn) (125 ppm Pb)	18,474	15,683	38,580	Le Pradel (1)	Argennewes (Tauriac-de-Camarès) (1)	18,360	15,640	38,410
mine principale 72 W	sp(gn) (109 ppm Pb)	18,470	15,666	38,581	Folat (1)		18,380	15,640	38,370
Rouquis 28 W	Gn	18,448	15,659	38,542	Cusses (1)	Cusses (1)	18,320	15,670	38,420
Rouquis 78 W	sp(gn) (93 ppm Pb)	18,421	15,668	38,577	Cusses (1)		17,800	15,630	37,880
Rouquis sondage R 83	sp(gn) (92 ppm Pb)	18,435	15,667	38,565	Lacabarède (Sarrautric) (1)	Fournes-Lastours (Les Barreins)	17,810	15,630	37,900
Rouquis 78 W	Gn	18,444	15,661	38,522	Cusses (1)		18,500	15,660	38,670
<i>moyenne</i>		18,454	15,666	38,552	La Caunette	filons plombo-zincifères	18,344	15,702	38,433
filon annexe de Brugayroux	sp(gn) (45 ppm Pb)	18,475	15,650	38,637	Le Priou (près Camprafaud) (1)	La Caunette	18,405	15,702	38,532
filon annexe les Huttes	Gn	18,437	15,675	38,422	Camprafaud (1)	Picamoure (Bouissas)	17,940	15,640	38,060
mine principale 72 W interfilonien	sp(gn)	18,570	15,662	38,619	Peyrebrune	Montredon	17,820	15,600	37,880
"stratiforme" dans Cambrien (mine principale)	sp(gn) (164 ppm)	18,570	15,628	38,378	Bardou (1)	filon W-Sn-As	18,588	15,723	38,612
	sp(gn) (125 ppm)	18,504	15,624	38,538	Olargues (1)	filon As-Zn-Pb-(Cu)	18,420	15,670	38,500
	sp(gn) (1535 ppm)	18,519	15,681	38,625	Lacaune (Lassagnes, Bouissas)	filon As-Zn-Pb-(Cu)	18,410	15,660	38,470
	sp(gn) (37 ppm)	18,518	15,644	38,527		filon As-Pb-Sb-(Cu-Ag)	18,441	15,695	38,498
		18,572	15,680	38,632	Salsigne (galène de filon)	filon aurifère	18,131	15,650	38,574
					Salsigne (galène dans grès riches)		18,284	15,692	38,388
<i>stratiformes plombo-zincifères dans Cambrien</i>							18,351	15,653	38,291
Brusques (1)	Gn	17,760	15,590	37,780	<i>roches (3)</i>				
La Loubatière (1)	Gn	17,860	15,600	37,800	granite du Sidobre	FK	18,383	15,684	38,450
Ferrals-les-Montagnes (1)	Gn	17,900	15,620	37,960		FK	18,450	15,650	38,380
Conadès (1)	Gn	17,790	15,590	37,770		RT	18,650	15,680	38,430
Marcoray (1)	Gn	17,860	15,610	37,950					
Argentières (1)	Gn	17,912	15,629	38,034					
Villeneuve-Minervois (2)	Gn	17,918	15,623	37,993					
Bibaud (2)	Gn	17,931	15,647	38,052					
Bibaud-Tête Rousse (2)	Gn	17,923	15,639	38,045					
Bibaud-Tête Rousse (2)	Gn	17,910	15,631	38,057					
Bibaud Est (2)	Gn	17,930	15,635	38,017					
Bibaud Est (2)	Gn	17,915	15,627	38,002					
Salsigne Est (2)	Gn	17,946	15,623	38,025					
Salsigne (2)	Gn	17,941	15,630	37,991					
Salsigne (2)	Gn	17,943	15,626	38,026					
Salsigne (open pit) (2)	Gn	17,982	15,651	38,072					

Permien-Carbonifère (~ 300 Ma ; Cassard *et al.*, 1994). Cet âge plaide fortement pour une source magmatique du plomb (et des autres métaux), la composition isotopique initiale du granite du Sidobre étant identique à celle du filon (Fig. 4.20).

4.5.2 - Gisement aurifère de Salsigne : leader de « l'or 300 » en France

Salsigne possède une morphologie complexe qui associe des corps sulfurés aurifères d'apparence stratiforme peu pentés au sommet du Protérozoïque (schistes X), dans le Cambrien et dans le Dévonien, et des structures filoniennes aurifères tardives. Tous ces faciès, plissés, empilés et accolés, relèvent d'un processus minéralisateur unique impliquant des fluides métamorphiques et se sont mis en place quasi simultanément après le Carbonifère moyen, soit dans des ouvertures en transtension, soit en imprégnations, dans un système décrochevauchant en duplex (Lescuyer *et al.*, 1993).

Tableau 4.8 – Compositions isotopiques mesurées et corrigées à 500 Ma et 300 Ma des minerais et des roches de Salsigne ; comparaison avec celles des granites hercyniens centraliens ; nc = non calculé car Th non mesuré ; d'après Le Guen *et al.*, 1992, sauf (1) d'après Marcoux, 1987) et (2) d'après Michard-Vitrac *et al.*, 1981 ; M (minerai) et R (roche) renvoient à Le Guen *et al.*, 1992.

Table 4.8 – Isotopic compositions measured and corrected at 500 Ma and 300 Ma of ores and rocks from Salsigne; comparison with those of the central Hercynian granites; nc = not calculated because Th not measured; after Le Guen *et al.*, 1992, except (1) after Marcoux, 1987) and (2) after Michard-Vitrac *et al.*, 1981; M (ore) and R (rock) refer to Le Guen *et al.*, 1992.

figure 4.21	type de minerai	calcul des c.i.	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	minéral analysé (teneur en Pb)	μ	encaissant
filon	filon Fontaine de santé (1)		18,131	15,650	38,574	galène	0	grès Cambrien inférieur
	filon Ramélès		18,284	15,692	38,388	galène et gustavite	0	
couches (Dévonien)	minerai 2X fin - niveau 10 (éch. M 1)		18,310	15,715	38,426	sulfures (2 500 ppm)	0	couches dans Dévonien au contact des schistes X (Édiacarien)
	minerai 2X fin - niveau 13 (éch. M 2)		18,311	15,668	38,354	sulfures (431 ppm)	négligeable	
	minerai 2X grossier - niveau 14 (éch. M 4)		18,340	15,649	38,343	sulfures (250 ppm)	négligeable	
	minerai 2X grossier - niveau 15 (éch. M 5)		18,287	15,662	38,338	sulfures (78 ppm)	négligeable	
	minerai 2X grossier - niveau 10 (éch. M 6)		18,326	15,664	38,338	sulfures (149 ppm)	négligeable	
	minerai 2X grossier - niveau 10 (éch. M 7)		18,238	15,625	38,215	sulfures (122 ppm)	négligeable	
couches (Édiacarien)	minerai 2X grossier (éch. M 3)	0 Ma	18,345	15,672	38,366	sulfures (125 ppm)	négligeable	couches au sommet des schistes X (Édiacarien)
		300 Ma	18,552	15,718	38,546			
		500 Ma	18,500	15,715	nc	sulfures (75 ppm)	1,1	
		500 Ma	18,465	15,713	nc			
	minerai 2X grossier - niveau 14 (éch. M 9)	0 Ma	18,387	15,652	38,324			
		300 Ma	18,323	15,648	nc	sulfures (82 ppm)	1,3	
couches (Dévonien)		500 Ma	18,278	15,646	nc			couches dans calcschistes du Dévonien inférieur
	minerai 2X grossier (éch. M 10)	0 Ma	18,977	15,662	38,733			
		300 Ma	18,400	15,631	nc	pyrite (16 ppm)	12,7	
		500 Ma	17,980	15,604	nc			
	minerai 3a (éch. M 17)	0 Ma	18,563	15,703	38,518			
		300 Ma	18,410	15,695	nc	pyrite (30 ppm)	3,2	
grès riches (Cambrien)		500 Ma	18,303	15,688	nc			base du Cambrien inférieur
	grès riches, toit filon 6 (éch. M 11)	0 Ma	18,423	15,688	38,540			
		300 Ma	18,412	15,687	nc	sulfures (278 ppm)	0,2	
		500 Ma	18,403	15,686	nc			
	grès riches, toit filon 6 (éch. M 12)	0 Ma	18,609	15,707	38,428			
		300 Ma	18,129	15,682	nc	sulfures (19 ppm)	10,2	
alternances (Cambrien)		500 Ma	17,790	15,660	nc			alternances grésocarbonatées du Cambrien inférieur
	grès riches	0 Ma	18,427	15,685	38,472			
	"couches sulfurées" (éch. M 13)	0 Ma	18,394	15,683	nc	sulfures (344 ppm)	0,7	
		300 Ma	18,372	15,682	nc			
	"couches sulfurées" (éch. M 14)	0 Ma	18,351	15,653	38,291	galène	0	
		300 Ma	18,280	15,635	38,185			
alternances (Cambrien)	"couches sulfurées" (éch. M 15)	0 Ma	18,256	15,634	nc	pyrite (63 ppm)	0,5	sommet des grès du Cambrien
		300 Ma	18,239	15,632	nc			
	"couches sulfurées" (éch. M 16)	0 Ma	18,401	15,682	38,557			
		300 Ma	18,315	15,677	nc	pyrite (80 ppm)	1,8	
		500 Ma	18,255	15,674	nc			
	"couches sulfurées" (éch. M 16)	0 Ma	18,257	15,697	38,328	sulfures (580 ppm)	0,2 (négligeable)	
alternances (Cambrien)		300 Ma	18,716	15,739	38,723			
		500 Ma	18,426	15,724	nc	sulfures (3 ppm)	6,2	
		500 Ma	18,223	15,710	nc			

roches de Salsigne						
calcaire (alternances Cambrien) (R9)	0 Ma	17,941	15,604	37,929	roche totale	1,4
	500 Ma	17,831	15,598	nc	roche totale	
dolérite altérée dans dolomite (Cambrien inférieur) (R10)	0 Ma	17,991	15,617	38,158	roche totale	0,3
	500 Ma	17,968	15,615	nc	roche totale	
grès ferrugineux (Dévonien inférieur) (R11)	0 Ma	17,932	15,652	38,057	roche totale	0,9
	500 Ma	17,875	15,648	nc	roche totale	
grès ferrugineux (Dévonien inférieur) (R12)	0 Ma	17,945	15,654	38,091	roche totale	# 0
	500 Ma	17,945	15,654	38,091	roche totale	
schiste dolomitique (Dévonien inférieur) (R13)	0 Ma	18,139	15,713	38,355	roche totale	4,6
	400 Ma	17,849	15,697	nc	roche totale	
calcaire dolomitisé (Dévonien inférieur) (R14)	0 Ma	18,027	15,679	38,186	roche totale	1,1
	400 Ma	17,958	15,675	nc	roche totale	
granites hercyniens du Sud et de l'Ouest du Massif central						
granite du Sidobre (2)	~310 Ma	18,383	15,684	38,450	feldspath	# 0
granite du Sidobre (2)	~310 Ma	18,450	15,650	38,380	feldspath	# 0
leucogranite des Millevaches-St-Julien (2)	~315 Ma	18,337	15,683	38,480	feldspath	# 0
leucogranite St-Yrieix (1)	~310 Ma	18,207	15,610	38,189	feldspath	# 0
leucogranite St-Mathieu (2)	~315 Ma	18,193	15,653	38,330	feldspath	# 0
leucogranite La Brême (2)	~315 Ma	18,212	15,640	38,300	feldspath	# 0
leucogranite St-Sylvestre (2)	~315 Ma	18,258	15,688	38,600	feldspath	# 0
leucogranite St-Sylvestre (2)	~315 Ma	18,246	15,654	38,360	feldspath	# 0
Margeride faciès clair (1)	~310 Ma	18,266	15,667	38,394	feldspath	# 0
Margeride grain moyen (2)	~310 Ma	18,385	15,695	38,550	feldspath	# 0

Vingt-deux échantillons appartenant aux 5 types de minéral (filonien, couches sulfurées dans le Dévonien, alternances du Cambrien inférieur et schistes X édiacariens, et « grès riches » cambriens) ont été analysés (Le Guen *et al.*, 1992 ; Lescuyer *et al.*, 1993). La galène étant rare (4 échantillons), les analyses ont surtout porté sur des échantillons de pyrite-arsénopyrite à teneurs en plomb variables mais, à l'exception de 3 d'entre eux, les rapports μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) sont faibles à très faibles et ne nécessitent que des corrections très mineures d'enrichissement radiogénique *in situ*.

Le champ des compositions mesurées (non corrigées) dessiné par les 19 échantillons à μ nul ou très faible est assez étalé, et aucun type ne définit un cluster spécifique. Les galènes affichent des compositions dispersées parmi les moins radiogéniques, allant de 18,131 pour le filon Fontaine de Santé, à 18,351 dans les grès riches cambriens (rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), (Fig. 4.21 et Tab 4.8). Les champs dessinés avec les valeurs corrigées à -300 Ma (âge probable du gisement) et à -500 Ma (hypothèse d'un gisement syngénétique cambrien) sont très proches, un peu plus ramassés pour le champ des valeurs non corrigées. Une légère extension du champ corrigé à -300 Ma intégrerait d'ailleurs les trois échantillons à μ élevé, un argument qui appuie une genèse du gisement vers 300 Ma.

Ces résultats montrent que Salsigne porte exclusivement un plomb que l'on peut qualifier « d'hercynien », car identique à celui des granites tardi-hercyniens régionaux. La dispersion des compositions traduit pour l'essentiel une hétérogénéité initiale du plomb des fluides minéralisateurs qui ont collecté ce plomb (et or, bismuth...) dans la croûte fini-hercynienne, l'enrichissement radiogénique *in situ* étant très faible. Salsigne

ne porte donc pas de plomb cambrien (et encore moins édiacarien) dont la signature est significativement moins radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 17,76 à 17,98), même si ce plomb est présent à Salsigne dans de minces rubans à sphalérite-galène cambriens indépendants de la minéralisation aurifère, et ailleurs en Montagne noire.

4.6 - Bordure cévenole et Les Malines

Nous nous intéresserons ici plus précisément aux minéralisations stratiformes à plomb, zinc et argent portées par les séries sédimentaires mésozoïques qui ourlent les Cévennes (et englobant aussi le « filon » de Galès, près de Millau), (Fogliérini *et al.*, 1980b). Ces minéralisations ont été apparentées avec raison aux gisements de type *Mississippi Valley* (Leach *et al.*, 2001). La bordure cévenole a abrité les deux plus grandes mines françaises de zinc : Les Malines (857 kt de zinc et 143 kt de plomb), près de la discordance post-hercynienne, et de plomb-argent : Largentière (356 kt de plomb et 750 t d'argent), fermées, comme toutes les autres mines françaises, depuis plusieurs décennies.

Les compositions isotopiques sont très étalées, les rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ allant de 18,28 (Largentière) à 18,947 (La Maline), sans organisation géographique d'ensemble perceptible (Fig. 4.22 ; Tab. 4.9). Elles révèlent toutes un environnement de croûte continentale supérieure avec des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ dépassant fréquemment 15,70. Les âges modèles sont souvent aberrants (plus de 300 Ma) pour des sulfures déposés au Mésozoïque, d'autant que les compositions varient fortement à l'échelle d'un gisement (Les Malines, Croix de Pallières). Nous allons détailler ces variations pour Les Malines.

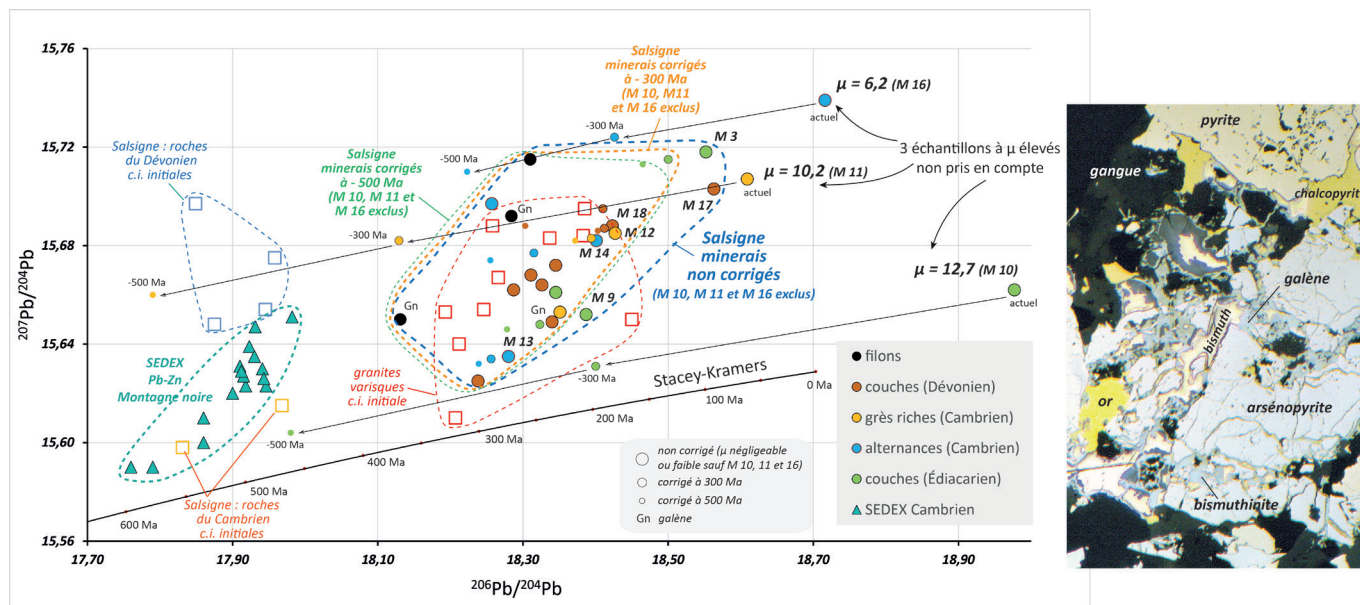
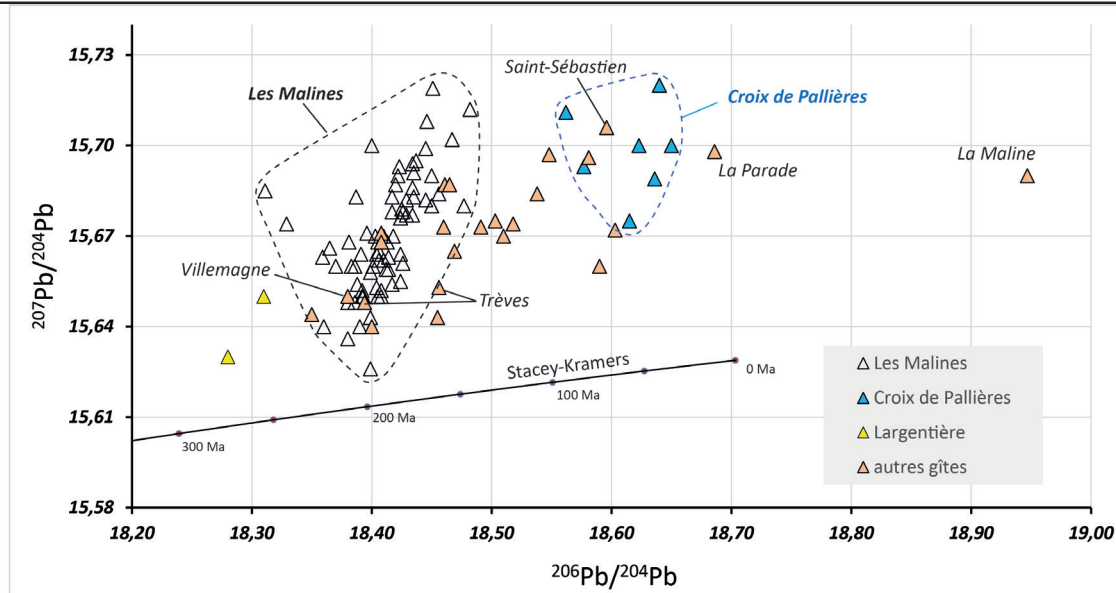


Figure 4.21 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ du gisement aurifère de Salsigne avec les compositions non corrigées (grands cercles) et corrigées à -300 Ma (cercles moyens) et -500 Ma (petits cercles) des minerais (cercles) et de roches régionales (carrés). Les valeurs non corrigées concernent des échantillons à μ négligeable. Les valeurs corrigées pour 3 échantillons à μ particulièrement élevés (M 10, M 11 et M 16) ont été individualisées : noter que les corrections à -300 Ma les placent très près du champ global du gisement (d'après Marcoux 1987 et Le Guen *et al.*, 1992). Photo au microscope en lumière réfléchie du minéral aurifère de Salsigne (grès riches) à arsénopyrite, pyrite, bismuth natif et bismuthinite, or et galène (rare) analysée © É. Marcoux.

Figure 4.21 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Salsigne gold deposit with the uncorrected (large circles) and corrected compositions at -300 Ma (medium circles) and -500 Ma (small circles) of the ores (circles) and regional rocks (squares). The uncorrected values concern samples with negligible μ . The corrected values for 3 samples with particularly high μ (M 10, M 11 and M 16) have been individualized: note that the corrections at -300 Ma place them very close to the overall field of the deposit (according to Marcoux 1987 and Le Guen *et al.*, 1992). Photo (reflected light microscope, plane polarized light) of the gold ore of Salsigne (rich sandstones) with arsenopyrite, pyrite, native bismuth and bismuthinite, gold and (rare) analyzed galena © É. Marcoux.

Figure 4.22 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de la bordure cévenole. Les Malines est détaillé sur la figure suivante.Figure 4.22 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Cévennes border. Les Malines is detailed in the following figure.

Les Malines	encaissant	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	gîte analysé	encaissant	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Les Malines (La Gardie) (1)	karst dans Cambrien	18,360	15,640	38,400	Largentièrre (1)	Trias (arkoses)	18,280	15,630	38,370
Les Malines (Sanguinière) (1)	karst dans Cambrien	18,370	15,660	38,450			18,310	15,650	38,430
Les Malines (Montdardier mo-13)	Cambrien (minéral 0) (Py)	18,311	15,685	38,282	Croix de Pallières (amas principal) (2)	Hettangien (dolomies et schistes noirs)	18,615	15,675	38,793
Les Malines (Mars 1)	Cambrien (minéral 0) (Sp)	18,329	15,674	38,422			18,650	15,700	38,831
Les Malines (Montdardier mon-1)	Cambrien (minéral 0) (Py)	18,383	15,660	38,449			18,623	15,700	38,799
Les Malines (Montdardier mon-2)	Cambrien (minéral 0) (Py)	18,386	15,660	38,433	Croix de Pallières (colonne du puits) (2)	Lotharingien	18,562	15,711	38,712
Les Malines (Montdardier mon-3)	Cambrien (minéral 0) (Sp)	18,380	15,636	38,504	Croix de Pallières (2)	galène concrétionnée dans l'Hettangien	18,636	15,689	38,793
Les Malines (Montdardier mon-4)	Cambrien (minéral 0) (Sp)	18,405	15,668	38,473	Croix de Pallières (2)	filonnet tardif dans l'Hettangien	18,640	15,720	38,865
Les Malines (Montdardier mon-5)	Cambrien (minéral 0) (Sp)	18,445	15,682	38,515	Croix de Pallières (amas du mur) (2)	Trias	18,577	15,693	38,754
					Croix de Pallières (moy. 7 an.)		18,615	15,698	38,792
Les Malines (Montdardier) (1)	base Trias (Py)	18,400	15,700	38,600	Durfort (Grande Vermissière) (2)	galène disséminée dans Lotharingien	18,461	15,687	38,531
	base Trias	18,410	15,670	38,480			18,460	15,673	38,513
	base Trias	18,450	15,680	38,510	Saint-Sébastien d'Aigrefeuille (2)	imprégnations dans arkoses (Trias basal)	18,596	15,706	38,797
	Trias (Sp)	18,388	15,654	38,436	La Parade (2)	imprégnations dans arkoses (Trias basal)	18,686	15,698	38,869
	Trias (Sp)	18,390	15,640	38,461	Pradinas (2)	Trias	18,503	15,675	38,664
	Trias	18,406	15,665	38,450	La Boissière (3)	nœuds dans dolomie grise du Bathonien	18,455	15,643	38,536
	Trias (Sp)	18,406	15,662	38,477	La Boissière (3)	nœuds dans dolomie grise du Bathonien	18,469	15,665	39,617
	Trias	18,399	15,643	38,429	La Boissière (3)	nœuds dans dolomie grise du Bathonien	18,491	15,673	39,616
	Trias	18,404	15,653	38,450	Mine Joseph (2)	galène massive (grès du Trias basal)	18,548	15,697	38,731
	Trias	18,445	15,699	38,576		galène massive (Hettangien)	18,518	15,674	38,660
	Trias	18,405	15,650	38,426		imprégnations (grès du Trias de base)	18,581	15,696	38,762
	Trias	18,410	15,662	38,488	Cadeyer (2)	galène massive (Hettangien)	18,538	15,684	38,695
	Trias	18,413	15,668	38,473		galène massive (Hettangien)	18,603	15,672	38,749
	Trias	18,451	15,719	38,636	Bois-Madame (2)	dolomies et schistes noirs (Kimmeridgien)	18,408	15,671	38,479
	Trias	18,401	15,660	38,421		dolomies (Kimmeridgien)	18,408	15,668	38,483
	Trias	18,417	15,678	38,502	Bessourides (2)	brèche minéralisée (Hettangien)	18,465	15,687	38,629
	Trias	18,425	15,679	38,505	Le Bleyrard (1)	dolomies (Hettangien)	18,590	15,660	38,620
	Trias	18,434	15,694	38,571	Les Combettes (Nozières) (1)	"filon" dans dolomies de l'Hettangien	18,510	15,670	38,660
	Trias	18,380	15,648	38,381	Galès (Millau) (1)	"filon" dans les calcaires du Carixien	18,400	15,640	38,590
	Trias	18,408	15,668	38,470	Villemagne (1)	"filon" dans les calcaires du Carixien	18,380	15,650	38,540
	Trias	18,396	15,671	38,494	Trèves (2)	dolomies et schistes noirs (Sinémurien)	18,456	15,653	38,507
	Trias	18,418	15,670	38,455			18,394	15,648	38,566
	Trias (Sp)	18,381	15,668	38,459	La Maline (2)	"filon" dans grès du Trias, contact granite	18,947	15,690	38,897
	Trias	18,393	15,650	38,414	Redoussas (Masdieu) (2)	dolomies (Lias)	18,350	15,644	38,511
	Trias (Sp)	18,359	15,663	38,442					
	Trias	18,434	15,686	38,586					
	Trias	18,399	15,626	38,382					
	Trias	18,429	15,677	38,494					
	Trias	18,387	15,683	38,535					
	Trias	18,365	15,666	38,503					
	Trias	18,437	15,695	38,542					
	Trias	18,391	15,664	38,429					
	brèche tectonique dans Lias	18,435	15,683	38,552					
	brèche tectonique dans Lias	18,422	15,690	38,573					
	brèche tectonique dans Lias	18,450	15,680	38,510					
	brèche tectonique dans Lias	18,450	15,690	38,520					
Les Malines (Avinières)	exokarst dans Bathonien	18,386	15,648	38,399					
	exokarst dans Bathonien	18,399	15,658	38,442					
	exokarst dans Bathonien	18,392	15,652	38,420					
	exokarst dans Bathonien	18,417	15,683	38,529					
	exokarst dans Bathonien	18,420	15,687	38,521					
Les Malines (Ferrières)	exokarst dans Bathonien	18,412	15,659	38,478					
	exokarst dans Bathonien	18,408	15,650	38,456					
Les Malines (Crenze)	exokarst dans Bathonien	18,424	15,676	38,469					
Les Malines (Cabrières)	endokarst dans Bathonien	18,423	15,693	38,537					
Les Malines (Gaston)	endokarst dans Bathonien	18,408	15,652	38,451					
	endokarst dans Bathonien	18,404	15,664	38,413					
Les Malines (Tunnel)	endokarst dans Bathonien	18,426	15,678	38,509					
	exokarst dans Bathonien	18,434	15,677	38,506					
	exokarst dans Bathonien	18,417	15,654	38,436					
	exokarst dans Bathonien	18,414	15,659	38,447					
Les Malines (Falaise)	dolomie (toit du Bathonien)	18,426	15,661	38,473					
	dolomie (toit du Bathonien)	18,429	15,682	38,407					
	dolomie (toit du Bathonien)	18,424	15,664	38,464					
	exokarst dans Bathonien	18,424	15,655	38,442					
	exokarst dans Bathonien	18,392	15,650	38,404					
	exokarst dans Bathonien	18,435	15,691	38,565					
Les Malines (Balmès haut)	exokarst dans Bathonien	18,446	15,708	38,605					
	exokarst dans Bathonien	18,414	15,663	38,442					
	exokarst dans Bathonien	18,403	15,670	38,464					
	exokarst dans Bathonien	18,424	15,676	38,515					
	endokarst dans Bathonien	18,482	15,712	38,631					
	endokarst dans Bathonien	18,456	15,684	38,523					
	endokarst dans Bathonien	18,477	15,680	38,591					
Les Malines (Fernand)	endokarst dans Bathonien	18,467	15,702	38,509					
Les Malines (moy. 74 an.)		18,411	15,670	38,481					

Tableau 4.9 – Compositions isotopiques des minéralisations stratiformes plombo-zincifères de la bordure cévenole ; analyses : galène sauf Py (pyrite) et Sp (sphalérite) ; données d'après Le Guen *et al.*, 1991, sauf (1) d'après Brévar *et al.*, 1982, (2) Marcoux, 1987, et (3) Le Guen et Lancelot, 1989.Table 4.9 – Isotopic compositions of stratiform lead-zinc mineralizations of the Cévennes border; analyses: galena except Py (pyrite) and Sp (sphalerite); data according to Le Guen *et al.*, 1991, except (1) according to Brévar *et al.*, 1982; (2) Marcoux, 1987, and (3) Le Guen and Lancelot, 1989.

L'étalement des compositions montre que la « source » du plomb de ces minéralisations de fond de bassin est « multi-lithologies ». Si toutes les roches des bassins sédimentaires concernés ont pu contribuer, on peut néanmoins penser que les sédiments du bassin, notamment les grès feldspathiques formés par accumulation des feldspaths du socle granitique cévenol, sont préférentiellement lessivés par les fluides hydrothermaux et ont eu un rôle prépondérant dans cette source.

Aux Malines, le plus grand gisement français de zinc, la minéralisation de type stratiforme se présente en couches, lentilles et amas à sphalérite dominante avec galène au sein de dolomites, grès, marnes et siltites. On distingue habituellement trois types de minerai : 1) dans les dolomies cambriennes du socle en remplissage karstique réalisé au Trias et en lentilles stratiformes : le « minerai 0 » ; 2) dans les marnes et siltites dolomitiques du Trias prolongées par une brèche tectonique du Lias ; et 3) dans les dolomies du Bathonien.

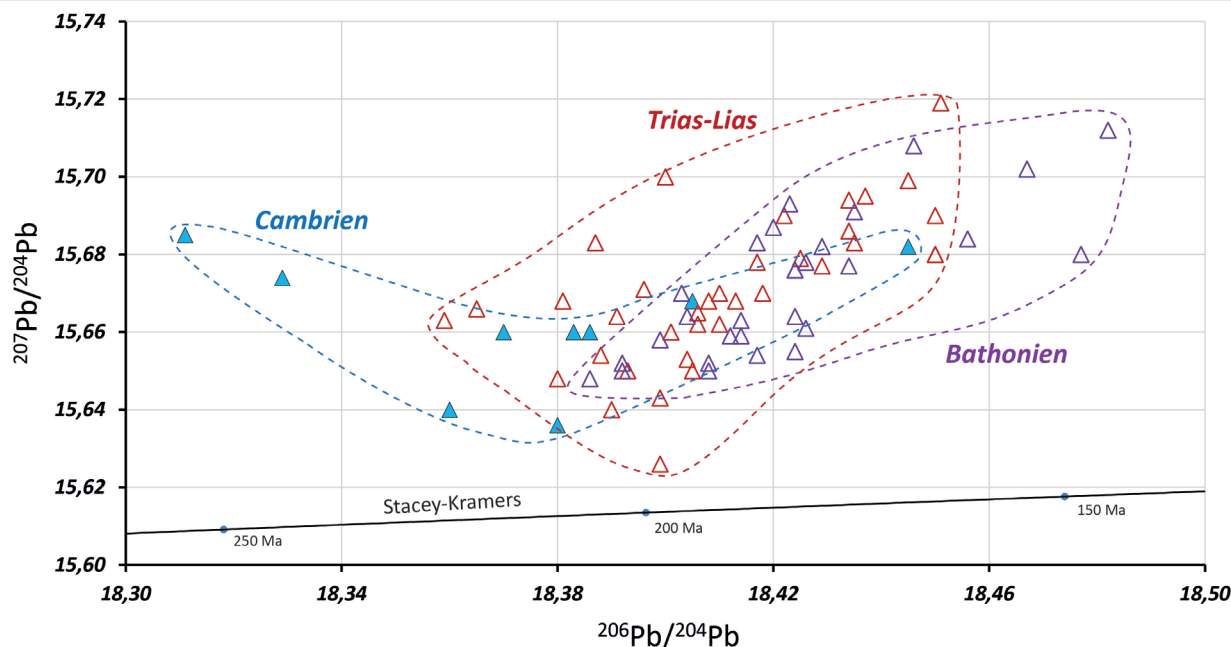


Figure 4.23 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ du gisement des Malines, les trois types de triangles représentent les trois types d'encaissant de la minéralisation.

Figure 4.23 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the Malines ore deposit. Three types of triangles represent the three types of hosting rocks.

Des analyses isotopiques sur ce gisement ont été réalisées par Le Guen *et al.* (1991). Les trois types de minéralisation dessinent trois champs largement communs que l'on peut réunir en un champ global assez étalé ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,31 à 18,48) à rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ assez élevés (15,64 à 15,72), (Fig. 4.23). Cet étalement à l'échelle d'une seule mine représente 50 % de l'étalement sur l'ensemble de la bordure cévenole ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,28 à 18,69 excepté une analyse) qui s'étend pourtant sur plus de 100 km (cf. Fig. 4.1), illustrant bien l'hétérogénéité isotopique des Malines et de manière générale des gisements de type MVT. Cette hétérogénéité découle directement du mode de genèse : de vastes circulations de fluides en fond de bassin sur une longue période qui précipitent sphalérite et galène dans de multiples sites et cuvettes, sans homogénéisation ni brassage d'ensemble. Dans ce contexte, les sources sont multiples et les roches locales jouent un rôle dominant. Le Guen *et al.* (1991) privilégient les feldspaths granitiques du socle et des niveaux détritiques gréseux (arkoses), comportant notamment des feldspaths granitiques détritiques.

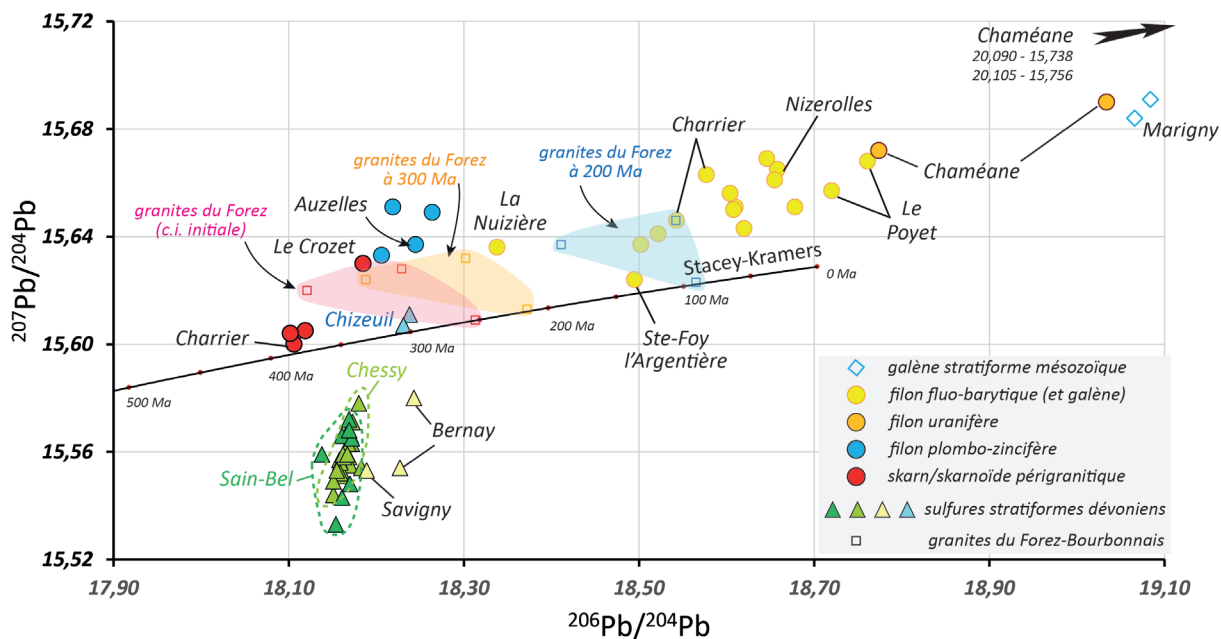
Les résultats excluent donc la présence de plomb cambrien : le « minéral 0 » s'est déposé par imprégnation des dolomies cambriennes au Trias ou au Bathonien. Mais ils ne permettent pas de savoir si le gisement s'est formé en deux épisodes hydrothermaux successifs : au Trias puis au Bathonien avec remobilisation possible du plomb triasique (hypothèse privilégiée par Le Guen et Lancelot, 1989), ou en un seul épisode bathonien (168-166 Ma), minéralisant les trois niveaux stratigraphiques. Un épisode unique au Bathonien serait assez cohérent sur le plan géodynamique car on pourrait y voir les prémices du rifting liguro-piémontais (Callovo-Oxfordien, 166-157 Ma). Le modèle d'évolution du plomb élaboré par Sinclair *et al.* (1993) sur la base des compositions isotopiques des Cévennes propose également un âge d'environ 150 Ma pour l'épisode plomb-zincifère majeur.

4.7 - Massif central oriental : Lyonnais, Forez et Morvan

Le Massif central oriental est un patchwork d'unités géologiques variées qui ne diffèrent guère des autres régions du Massif central avec les gneiss des unités inférieure et supérieure sur lesquels se superposent un arc magmatique et un bassin d'arrière-arc en Brévenne au Dévonien supérieur, qui se prolonge jusqu'aux Vosges. Il apparaît une subduction vers le sud de l'océan Tepla-Le Conquet, associée à des formations volcanosédimentaires dans le Nord du Morvan (arc de la Somme), avant que de vastes granitisations hercyniennes ne s'étendent largement sur le Morvan, le Velay et le Forez.

Les minéralisations s'étagent du Dévonien supérieur au Trias supérieur et offrent des types et des morphologies très variés. Les amas sulfurés polymétalliques de type VMS de Chessy - Sain-Bel (Brévenne) et de Chizeuil (Morvan), accompagnent le volcanisme du Dévonien supérieur (cf. § 3.2.1), tandis que des skarns et skarnoïdes sub-contemporains bordent les granites viséens, notamment dans le Forez : Charrier (le plus important daté à 341 Ma – Marcoux *et al.*, 2022), La Bombarde, Le Crozet. Les filons de plomb-zinc sont rares et dispersés : ils relèvent probablement du grand épisode hydrothermal permien. L'histoire métallogénique de la région se poursuit sur la bordure du Morvan avec le dépôt de galène stratiforme (Marigny) et se clôt avec la mise en place des filons fluo-barytiques (souvent à galène) dont certains ont été très bien datés du Lias inférieur, vers 190-210 Ma.

Les compositions isotopiques sont dispersées (Fig. 4.24 ; Tab. 4.10) à cause, entre autres, des valeurs fortement radio-géniques du filon de pechblende de Chaméane (Puy-de-Dôme), les plus élevés mesurés sur sulfures dans l'Hexagone pour $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (20,105) et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15,756) mais pas pour $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ qui est dans la norme avec 38,374. Nous avons déjà souligné la particularité des amas sulfurés de la Brévenne (Chessy, Sain-Bel, Savigny, Bernay) qui portent un plomb à franche participation mantellique, (cf. Fig. 3.2), en accord

Figure 4.24 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des principales minéralisations du Massif central oriental.Figure 4.24 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the main mineralizations of the eastern Massif Central.

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
sulfures polymétalliques stratiformes dans Dévonien				
Brévenne - Chessy				
Chessy (stockwerk épisode I)	Gn	18,159	15,551	37,814
	Py (53 ppm Pb)	18,169	15,558	37,858
	Py (58 ppm Pb)	18,170	15,555	37,817
Chessy (séquence I)	Gn	18,160	15,553	37,803
	Gn	18,172	15,563	37,825
	Gn-Cpy	18,158	15,557	37,820
Chessy (séquence II)	Gn	18,171	15,566	37,844
Chessy	Gn	18,168	15,563	37,832
	Gn	18,168	15,568	37,841
	Gn	18,159	15,556	37,815
	Gn	18,162	15,559	37,824
	Sp-Cpy-Gn	18,167	15,559	37,818
	Py-Cpy (18 ppm Pb)	18,183	15,554	37,798
Chessy (sondage Sd S123B, 38,3m)	Sp (50 ppm Pb)	18,163	15,558	37,833
Chessy (sondage S5, 125,7 m)	Gn	18,159	15,552	37,800
Chessy (mine jaune)	Gn	18,151	15,544	37,773
	Gn	18,151	15,549	37,784
Chessy (moy. 17 an.)		18,164	15,557	37,818
Chessy (disséminé toit amas)	Py (1411 ppm Pb)	18,155	15,553	37,872
Chessy (goétheite en sommet d'amas)	Gth	18,173	15,571	37,872
	Gth	18,180	15,578	37,875
Brévenne - Sain-Bel et autres				
Sain-Bel (collection)	Gn	18,161	15,566	37,843
	Gn	18,169	15,572	37,861
Sain-Bel (Saint-Antoine)	Py (40,1 ppm Pb)	18,161	15,543	37,800
	Py (19,3 ppm Pb)	18,172	15,565	37,866
Sain-Bel (Gervais) (sd SB 07, 191 m)	Gn	18,170	15,548	37,816
Sain-Bel (Gervais) (sd SB 07, 185,3 m)	Sp-Gn	18,154	15,533	37,775
Sain-Bel (haldes Vieilles Mines)	Gn	18,138	15,559	37,817
	Gn-Sp	18,169	15,568	37,849
Sain-Bel (moy. 8 an.)		18,162	15,557	37,828
Savigny (sondage Sd 9)	Py (146 ppm)	18,189	15,553	37,835
Bernay (village)	Py (26 ppm)	18,227	15,554	37,922
Bernay (sondage percutant S 13/8)	Py-Sp (55 ppm)	18,243	15,580	37,982
Morvan				
Chizeuil (haldes)	Gn	18,238	15,611	38,149
Chizeuil (haldes)	Gn	18,231	15,607	38,153

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
minéralisations périgranitiques à étain - cuivre - (bismuth - arsenic) (Forez)				
Charrier (skarnoïde)	Gn	18,106	15,600	38,183
Arronnes	Gn	18,119	15,605	38,127
Le Crozet (skarn ?)	Gn	18,185	15,630	38,263
La Bombarde (Four à chaux) (skarn)	Gn	18,102	15,604	38,153
filons plombo-zincifères				
Mouillatout	Gn	18,219	15,651	38,351
Ternand	Gn	18,206	15,633	38,287
Auzelles	Gn	18,245	15,637	38,374
Montnebois	Gn	18,264	15,649	38,413
filon à barytine - fluorine - galène				
Forez - Bourbonnais				
Nizerolles	Gn	18,658	15,665	38,791
idem	dup	18,655	15,661	38,758
Ramillard	Gn	18,610	15,651	38,695
Le Poyet (Poyet bas)	Gn	18,720	15,657	38,741
Le Poyet (Poyet haut)	Gn	18,761	15,668	38,804
Charrier (filon Pb-Ba tardif)	Gn	18,577	15,663	38,679
Charrier (filon Pb-Ba tardif)	Gn	18,543	15,646	38,634
Charrier (Sainte-Marie)	Gn	18,608	15,650	38,697
Contenson	Gn	18,620	15,643	38,693
Contenson	Gn	18,678	15,651	38,724
Juré (la Mine)	Gn	18,522	15,641	38,620
Grésolles (Grandchamp)	Gn	18,502	15,637	38,579
Morvan				
Argentolle	Gn	18,646	15,669	38,709
Saint Prix (Les Molérats)	Gn	18,604	15,656	38,653
La Nuizière	Gn	18,338	15,636	38,430
Sainte-Foy l'Argentière	Gn	18,495	15,624	38,569
galène stratiforme dans Keuper (Morvan)				
Marigny/Yonne	Gn	19,066	15,684	38,809
	Gn	19,084	15,691	38,855
filon uranifère à pechblende				
Chaméane	Clt	18,774	15,672	38,340
	Clt	19,034	15,690	38,352
	Clt	20,105	15,756	38,374
idem	dup	20,090	15,738	38,320

granite	âge	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	W
granite de la Madeleine	FK (341 Ma)	18,121	15,620	38,202	13,8	45,4
	300 Ma	18,188	15,624	38,270		
	200 Ma	18,411	15,637	38,498		
granite du Mayet-de-Montagne	FK (341 Ma)	18,229	15,628	38,283	14,9	49,8
	300 Ma	18,302	15,632	38,358		
	200 Ma	18,542	15,646	38,608		
microgranite Forez (Charrier)	FNa (341 Ma)	18,313	15,609	38,244	14,0	46,0
	300 Ma	18,372	15,613	38,304		
	200 Ma	18,565	15,623	38,505		

Tableau 4.10 – Compositions isotopiques des minéralisations du Lyonnais – Morvan et Forez ; analyses : galène (Gn), clausenthalite (Clt), Py (pyrite) et Sp (sphalerite) ; FK : feldspath potassique, FNa : albite ; μ et W du microgranite sont des moyennes approchées des deux autres roches ; données d'après Marcoux (1987) et Marcoux et al. (1990).Table 4.10 – Isotopic compositions of the mineralizations of Lyonnais – Morvan and Forez; analyses: galena (Gn), clausenthalite (Clt), Py (pyrite) and Sp (sphalerite); FK: potassium feldspar, FNa: albite; μ and W of microgranite are approximate averages of the other two rocks; data according to Marcoux (1987) and Marcoux et al. (1990).

avec leur contexte de zones océaniques restreintes, ce qui n'est pas le cas de Chizeuil, un amas sulfuré d'affinité crustale pure (cf. § 3.2.1). Aucun *trend* ne se dessine avec les autres minéralisations, indiquant que ces amas polymétalliques ne contribuent pas au nourrissage des minéralisations postérieures.

Les minéralisations périgranitiques de type skarn et skarnoïde du Forez (Charrier...) affichent des compositions proches de celles des granites viséens du Forez qui constituent donc très probablement la source du plomb et des métaux associés. Les filons plombifères ont des compositions assez proches malgré leur dispersion géographique, et une source granitique serait très compatible avec un âge permien très probable (vers 260-280 Ma) de ces filons. Les filons fluo-barytiques liasiques offrent eux une vaste gamme de compositions, favorisée par leur âge récent qui entraîne un plus fort enrichissement radiogénique des sources (probablement granitiques). Marigny, dans les calcaires du Trias supérieur, possède une composition très radiogénique, assez proche de celle de la Maline en bordure cévenole, également du Trias (des grès), mais en l'absence d'analyses de roches, il n'est pas possible de proposer une source crédible.

4.8 - Centre-Bretagne

Le Centre-Bretagne (Fig. 4.25) est occupé par le grand bassin carbonifère de Châteaulin avec ses bordures ordoviciennes à dévoniennes et les grands massifs hercyniens de monzogranites médio-armoricains (Huelgoat, Plouaret, Quintin, Rostrenen...), mis en place entre 343 ± 3 Ma et 290 ± 9 Ma et de leucogranites sud-armoricains (Pontivy, Langonnet... datés de 334 ± 4 Ma à 304 ± 5 Ma). Trois grands types de minéralisations s'y rencontrent : les amas sulfurés volcano-sédimentaires polymétallique du Dévonien (Bodennec, Porteaux-Moines, Menez Albot, Torhoat...), les filons à plomb-zinc-argent (Pontpéan, Huelgoat, Plélauff, Baud...) et les filons à uranium exploités au XX^e siècle (Le Bonote, Le Vouëdec, Rustuel...) dont plusieurs (Quistiave, Le Vouëdec, Kerlec'h Saint-Herbot...) montrent de la galène et d'autres sulfures clairement postérieurs à la pechblende (Fig. 4.26). L'encaissant est très variable, souvent granitique.

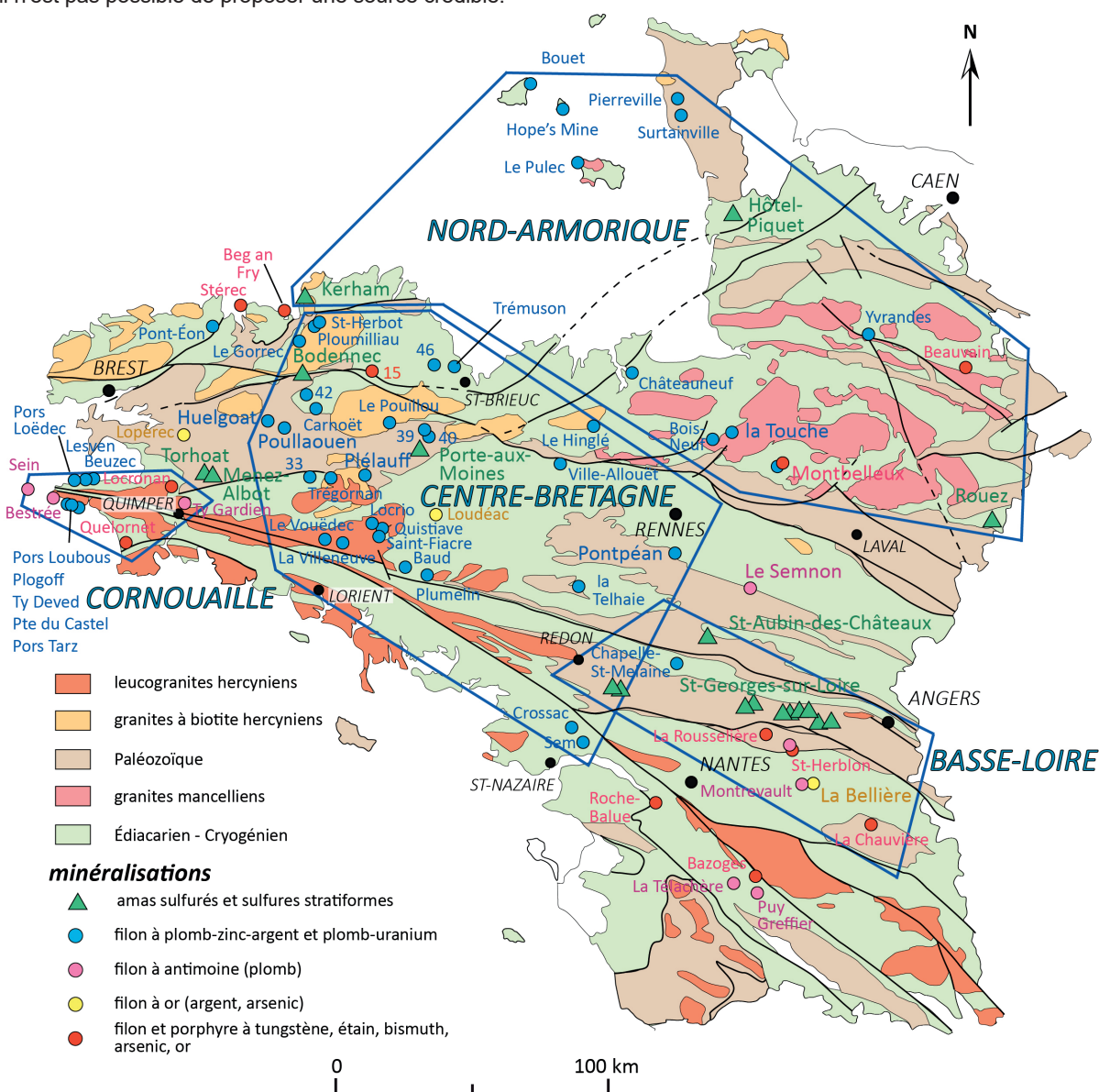


Figure 4.25 – Localisation des secteurs étudiés avec les gîtes analysés. Les chiffres renvoient au tableau d'annexe 1a.

Figure 4.25 – Location of the sectors studied with the deposits analyzed. Figures refer to Appendix Table 1a.

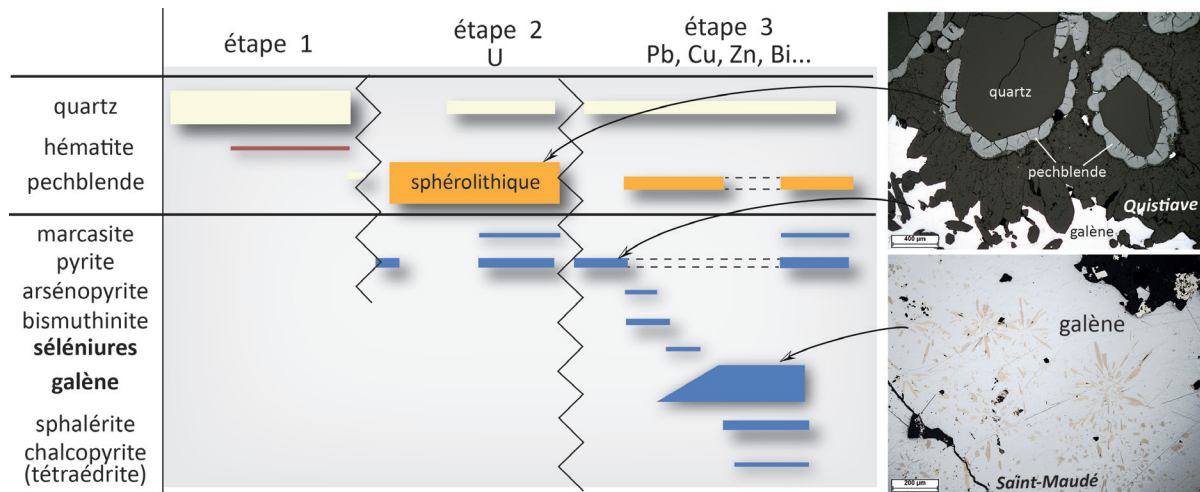


Figure 4.26 - Succession paragenétique montrant l'antériorité de la pechblende par rapport aux galènes analysées et autres sulfures (d'après Marcoux, 1980). Pechblende précoce encapsulant du quartz et galène tardive (Quistiave, Morbihan), et galène massive avec cubanite (cristaux brunâtres) du filon plombifère de Saint-Maudé (Baud, Morbihan). Photos au microscope en lumière réfléchie © E. Marcoux.

Figure 4.26 - Paragenetic succession showing the anteriority of pitchblende compared to analyzed galenas and other sulphides (after Marcoux, 1980). Early pitchblende capping quartz and late galena (urano-lead vein of Quistiave, Morbihan), and massive galena with cubanite (brownish) (lead vein of Saint-Maudé, Baud, Morbihan). Photos (reflected light microscope, plane polarized light) © E. Marcoux.

Les amas sulfurés volcanosédimentaires avec leur champ spécifique de compositions isotopiques ont été abordés en détail plus haut. Les filons plombifères et urano-plombifères dessinent un champ, étendu mais commun, avec un groupement des rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 18,21 et 18,50 (Fig. 4.27 ; Tab. 4.11), où se situent tous les filons exploités (Pontpéan, Plélauff, Huelgoat, Crossac...) ou de découverte récente (La Telhaie), signifiant que c'est le même épisode hydrothermal qui a apporté le plomb dans les deux familles de filons. Seul le filon à quartz, barytine et galène de Pen-ar-Vouillen en Ploumilliau ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,75$) sort de ce champ. Il n'existe aucun lien apparent entre la composition isotopique et l'importance économique du filon.

Les massifs principaux de ce domaine très granitique ont été analysés. Leur champ global de compositions (corrigées à 270 Ma, âge probable de mise en place des filons plombifères) recouvre presque parfaitement celui des filons, argument fort en faveur de leur rôle de source quasi-exclusive du plomb des filons (Fig. 4.27). À noter que les filons qui sortent du champ « granitique » sont encaissés par des schistes édiacariens (Pontpéan, Baud, Carnoët) ou du Cadomien (ou Édiacarien ?) à Trémuson. Le champ global des granites calculé à 250 Ma (autre âge possible des filons) diffère peu de celui à 270 Ma, on observe cependant que davantage de filons lui sont extérieurs, suggérant une dilution du plomb granitique. Source et âge sont deux paramètres interdépendants, la datation précise des minéralisations permettrait de progresser aussi sur la question de la source.

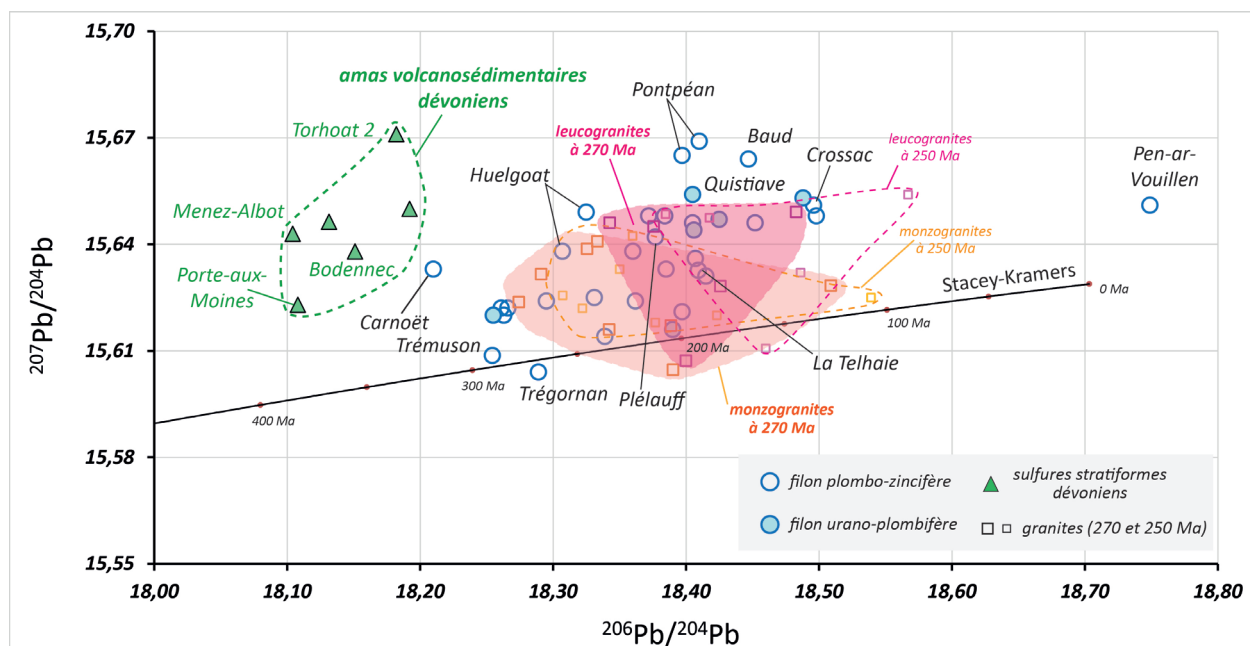


Figure 4.27 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des principales minéralisations stratiformes (Bodenec, Porte-aux-Moines et Menez Albot représentées par leur moyennes) et filoniennes, et des granites hercyniens du Centre-Bretagne. Les âges du granite de Rostrenen variant de 310 ± 11 Ma à 328 ± 12 Ma (Bos et al., 1997), un âge moyen de 319 ± 8 Ma a été retenu pour les calculs.

Figure 4.27 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the main stratiform mineralizations (Bodenec, Porte-aux-Moines and Menez Albot represented by their averages) and veins, and Hercynian granites of Central Brittany. The ages of the Rostrenen granite vary from 310 ± 11 Ma to 328 ± 12 Ma (Bos et al., 1997), an average age of 319 ± 8 Ma was used for the calculations.

gîte	minéral	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	roche analysée	situation	âge	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
filons plombo-zincifères					massif de Rostrenen - Plélauff							
Kerhuo	Gn	18,407	15,636	38,408	granite porphyroïde (319 ± 8 Ma)	Glomel	FK	18,215	15,641	38,278	nd	nd
Plélauff	Gn	18,377	15,642	38,432			FK	18,268	15,637	38,229		
Trégornan	Gn	18,289	15,604	38,323	granite à biotite leucocrate (319 ± 8 Ma)	Locrio (Guern)	RT à 270 Ma	18,333	15,641	38,264	8,2	14,1
Locrio	Gn	18,362	15,624	38,302			RT à 250 Ma	18,360	15,642	38,278		
Saint-Fiacre	Gn	18,452	15,646	38,423			FK	18,193	15,619	38,197		
Baud (Saint Maudé)	Gn	18,447	15,664	38,506	granite porphyroïde (319 ± 8 Ma)	Localo (Plougernével)	RT à 270 Ma	18,274	15,624	38,306	10,2	44,3
Plumelin	Gn	18,405	15,646	38,447			RT à 250 Ma	18,307	15,626	38,350		
Pen ar Voullien (Ploumilliau)	Gn	18,749	15,651	38,878	granite leucocrate (319 ± 8 Ma)	Prat Mérien (Persquen)	FK	18,164	15,615	38,064	nd	nd
Plusquellec (Coat an Nec'h)	Gn	18,266	15,622	38,328			FK	18,257	15,611	38,201		
Carnoët (Menez plom)	Gn	18,210	15,633	38,339	granodiorite (319 ± 8 Ma)	Guendoll (Plélauff)	RT à 270 Ma	18,342	15,616	38,349	10,7	60,1
Huelgoat	Gn	18,307	15,638	38,345			RT à 250 Ma	18,377	15,618	38,409		
Huelgoat	Gn	18,325	15,649	38,424	massif leucogranitique de Bubry-Pontivy							
Poullaouen	Gn	18,261	15,622	38,331	leucogranite (311 ± 5 Ma)	Kerlec'h (Lignol)	FK	18,309	15,639	38,201		
Pont-Eon	Gn	18,397	15,621	38,386			RT à 270 Ma	18,483	15,649	38,223	26,1	10,9
Châtelaudren	Gn	18,263	15,620	38,207			RT à 250 Ma	18,567	15,654	38,234		
Trémuson (moy. 3 an.)	Gn	18,254	15,609	38,178	leucogranite (311 ± 5 Ma)	Toulhouët (Inguiniet)	FK	18,276	15,600	37,949		
Le Poullou	Gn	18,385	15,633	38,425			RT à 270 Ma	18,400	15,607	38,007	18,6	28,2
Le Gorrec	Gn	18,295	15,624	38,337			RT à 250 Ma	18,460	15,611	38,035		
Le Ponthou	Gn	18,415	15,631	38,426	leucogranite porphyroïde (311 ± 5 Ma)	L'Échantillon (Pontivy)	FK	18,302	15,621	38,140	18,6 (admis id à Toulhouët)	28,2 (admis id à Toulhouët)
La Telhaie (moy. 3 an.)	Gn	18,409	15,633	38,430			RT à 270 Ma	18,426	15,628	38,198		
Pontpéan	Gn	18,397	15,665	38,486			RT à 250 Ma	18,486	15,632	38,226		
Pontpéan	Gn	18,410	15,669	38,491	leucogranite (311 ± 5 Ma)	Le Vouëdec (Berné)	FK	18,256	15,641	38,742		
Crossac	Gn	18,496	15,651	38,547			RT à 270 Ma	18,342	15,646	38,804	13	30
Le Sem	Gn	18,498	15,648	38,539			RT à 250 Ma	18,384	15,648	38,834		
Chapelle-Saint-Melaine (moy. 4 an.)	Gn	18,010	15,611	37,974	leucogranite mylonitisé (311 ± 5 Ma)	Guilligomarc'h	FK	18,289	15,640	38,284	13	15
disséminations et lits sulfurés à plomb-zinc dans schistes du Dévonien							RT à 270 Ma	18,375	15,645	38,315		
Ville-Allouët	Gn	18,331	15,625	38,428			RT à 250 Ma	18,417	15,647	38,330		
Ville-Allouët	Gn	18,339	15,614	38,416	leucogranite grossier (304 Ma ± 5 Ma)	Langonnet	FK	18,992	15,705	38,409	60,3	13
Le Mérel	Gn	18,384	15,648	38,447			RT à 250 Ma	19,519	15,736	38,444		
Le Mérel	Gn	18,360	15,638	38,427	massif de Questembert							
Le Bodéo	Gn	18,372	15,648	38,469	leucogranite	Questembert	FK	18,447	15,665	38,371	nd	nd
filons urano-plombifères à pechblende et galène							FK	18,350	15,658	38,349		
Saint-Herbot	Gn	18,390	15,616	38,459	massif de Lanvaux							
Le Hinglé (Ville-Hervé)	Gn	18,255	15,620	38,361	granite de Lanvaux (380 Ma)	Baud	FK	18,115	15,621	37,963		
Le Vouëdec	Gn	18,425	15,647	38,372			RT à 270 Ma	18,291	15,632	38,321	9,8	64,8
La Villeneuve	Gn	18,488	15,653	38,482			RT à 250	18,322	15,622	38,386		
Quistivie	Gn	18,405	15,654	38,467	massif de Plouaret							
Quistivie	Gn	18,406	15,644	38,423	granodiorite (329 Ma ± 5 Ma)	Bégard	FK	18,285	15,611	38,162		
sulfures stratiformes polymétalliques dévoniens							RT à 270 Ma	18,389	15,617	38,286	10,8	41,8
Porte-aux-Moines (moy. 12 an.)	Gn	18,108	15,623	38,154			RT à 250 Ma	18,423	15,620	38,328		
Bodennec (moy. 21 an.)	Gn	18,151	15,638	38,232	granite porphyroïde (329 Ma ± 5 Ma)	Le Ponthou	FK	18,350	15,619	38,337		
Menez Albot (moy. 4 an.)	Gn	18,104	15,643	38,236			RT à 270 Ma	18,509	15,628	38,402	14,8	19,7
Menez Albot (amas est)	Gn	18,192	15,650	38,256			RT à 250 Ma	18,539	15,625	38,415		
Torhoat (moy. 3 an.)	Gn	18,131	15,646	38,257	massif de Huelgoat							
Torhoat (amas 2)	Gn	18,182	15,671	38,315	granite à cordiérite (342 - 336 Ma)	Kerbizien (Huelgoat)	FK	18,245	15,634	38,167		
							RT à 270 Ma	18,325	15,639	38,179	7,5	3,6
							RT à 250 Ma	18,350	15,633	38,182		
					granite à grain fin (342-336 Ma)	Le Cloître (Huelgoat)	FK	18,243	15,596	38,117		
							RT à 270 Ma	18,390	15,605	38,201	13,7	25,3
							RT à 250 Ma	18,434	15,605	38,226		

Tableau 4.11 – Compositions isotopiques des minéralisations et des principaux granites du Centre-Bretagne.

Table 4.11 – Isotopic compositions of mineralizations and of the main granites in Central Brittany.

4.9 - Cornouaille : histoire de superpositions

Le district de Cornouaille (Finistère) avec le Cap Sizun qui plonge dans l'Atlantique à la pointe du Raz, est surtout connu pour ses filons de stibine (Ty Gardien, Kerdévet, Bestrée) dont un affleure sur l'Île de Sein (Beg ar Galez), l'indice minéralisé le plus occidental de l'Hexagone. Mais le district montre aussi de nombreux filons polymétalliques avec plomb, zinc, cuivre, antimoine montrant d'abondants sulfosels (bournonite, semseyite, zinkénite) : Pors Loubous, Pors Loëdec, Plogoff... L'étude minéralogique (Fouquet, 1980 ; Moëlo *et al.*, 1978) a montré que la genèse de tous ces filons relève de trois épisodes hydrothermaux couramment superposés (Fig. 4.28) : 1) précoce polymétallique (Plogoff, Porz Loëdec, Lesven... mais aussi Quelornet) qui semble limité à la Cornouaille ; 2) médian antimonifère à l'origine des filons de stibine (Ty Gardien, Bestrée...), qui relève du grand épisode antimonifère vers 295-300 Ma ; 3) tardif à plomb-zinc (Pors Tars, Pors Loubous, Plogoff...) déposant galène et sphalérite et générant les sulfosels de Pb-Sb (zinkénite, plagionite, semseyite, fülöppite...) dans les filons antimonifères, qui est le grand épisode plombo-zincifère permien (vers 250-270 Ma) d'extension ouest-européenne.

Les résultats isotopiques dessinent trois champs de compositions qui confortent cette succession à trois épisodes. Le moins radiogénique (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,23-18,24) se rencontre dans la bournonite de Plogoff et les galènes de Lesven et Pors Loëdec et correspond à l'épisode précoce. Le plus radiogénique (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,37 à 18,40) regroupe les sulfosels tardifs formés aux dépens de la stibine (Ty Gardien) ainsi que

la galène et semseyite de Plogoff et Beuzec et appartient au champ global des filons plombo-zincifères armoricains (Fig. 4.29 ; Tab. 4.12). Le champ intermédiaire (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,28 à 18,33), plus disparate, comprend des sulfosels indéniablement post-stibine (Ty Gardien, Bestrée, Sein) pour lesquels on peut proposer un mélange des deux plombs, mais également des galènes (Pors Loubous, Pors Tarz...) d'interprétation plus délicate. Le filon de Plogoff cumule le plomb précoce (bournonite) et le plomb tardif (semseyite et galène), mais l'épisode intermédiaire à stibine y est absent.

La source est délicate à apprécier, peu de roches locales ayant été analysées, mais le champ des leucogranites sud-armoricains (calculé à 270 Ma) se superpose assez bien à celui des minéralisations les plus radiogéniques ce qui plaide en faveur de leur rôle de source, au moins pour l'épisode permien (Fig. 4.29 ; Tab. 4.12). La trondhjémite de Douarnenez, pourtant largement présente dans le Cap Sizun, ne semble jouer aucun rôle de source, à moins d'admettre un mélange entre son plomb et celui des leucogranites pour générer le champ de l'épisode 1, une hypothèse qui reste à étayer. Le filon à arsénopyrite-galène de Quelornet affiche un rapport ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb assez bas (15,560), ce qui sous-tend une contribution mantellique, en accord avec sa position au sein du complexe ophiolitique de Peumerit, tandis que le filon périgranitique à wolframite de Locronan montre une composition (²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18,244) indiquant une source dans les granites hercyniens.

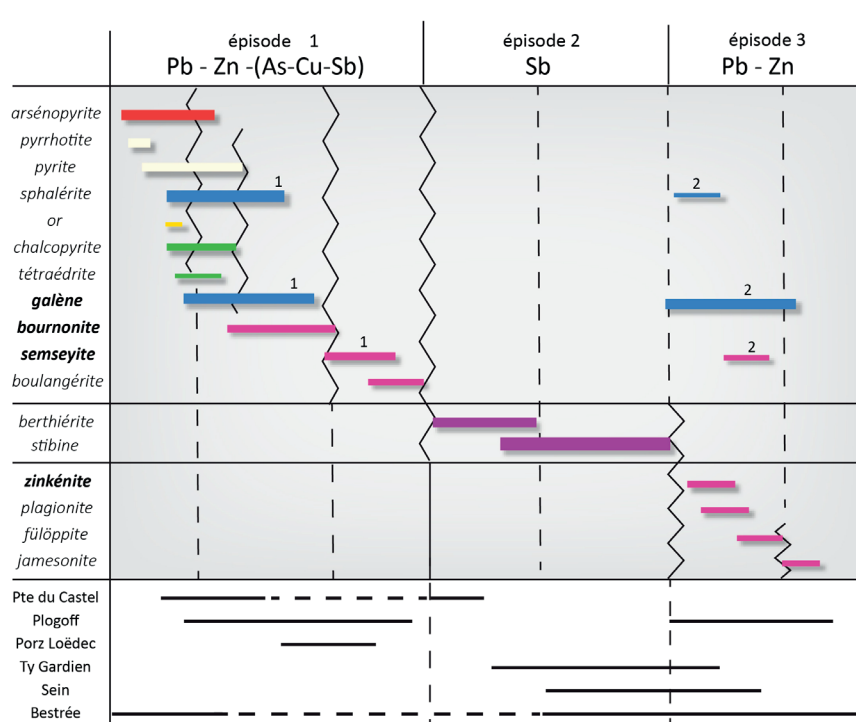
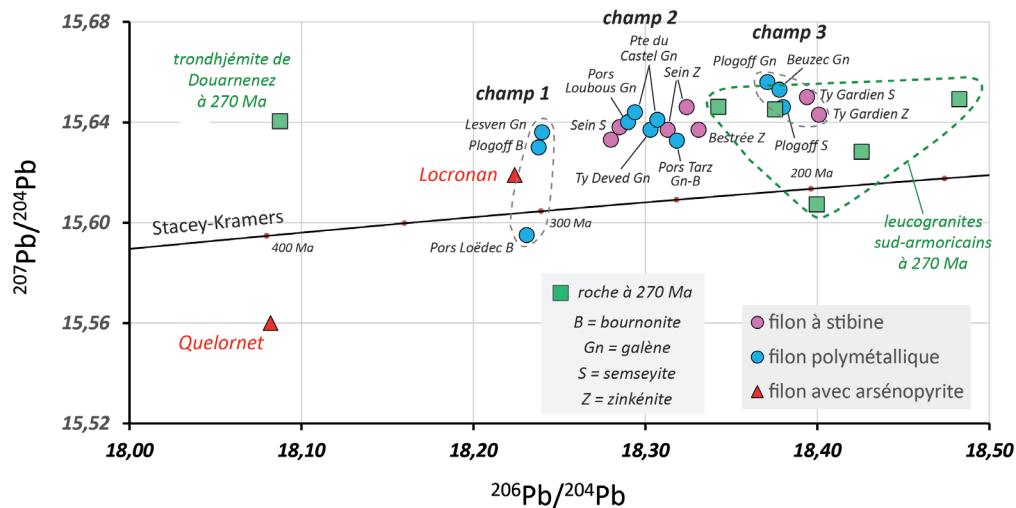


Figure 4.28 – Succession paragenétique des filons de Cornouaille (d'après Fouquet, 1980, modifié). Les filons périgranitiques à étain-tungstène ne sont pas représentés.

Figure 4.28 – Paragenetic succession of the Cornouaille veins (after Fouquet, 1980, modified). Tin-tungsten perigranitic veins are not shown.

Figure 4.29 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des principales minéralisations de Cornouaille et de quelques roches.

Figure 4.29 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the main mineralizations of Cornouaille and some rocks.



gîte	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
filons à stibine et sulfosels de Pb/Sb				
île de Sein (Beg ar galez)	Znk	18,324	15,646	38,442
idem	dup	18,313	15,637	38,380
île de Sein (Beg ar galez)	Sem	18,285	15,638	38,342
idem	dup	18,280	15,633	38,348
moy. 4 an.		18,301	15,639	38,378
Bestrée	Znk	18,331	15,637	38,345
Ty Gardien	Znk	18,401	15,643	38,319
	Sem	18,394	15,650	38,367
filons à sphalérite - galène (et sulfosels de Pb/Sb)				
Pors Loubous	Gn	18,290	15,640	38,373
Pointe de Plogoff	Bour	18,238	15,630	38,299
	Gn	18,371	15,656	38,483
	Sem	18,380	15,646	38,467
Ty Deved	Gn	18,303	15,637	38,375
Pointe du Castel	Gn	18,294	15,644	38,387
	Gn	18,307	15,641	38,397
Pors Tarz (moy. 3 an.)	Gn	18,318	15,633	38,364
Pors Loëdec	Bour	18,231	15,595	38,046
Lesven (avec stibine)	Gn	18,240	15,636	38,296
Beuzec	Gn	18,378	15,653	38,454
filons à arsenic-étain-(tungstène)				
Quelornet (~ 320 Ma)	Gn	18,082	15,560	38,107
Locronan (Pennevet) (318 Ma)	Gn	18,224	15,619	38,151

Tableau 4.12 – Compositions isotopiques des minéralisations de Cornouaille et des principales roches régionales (calculées à 270 Ma) (dup = duplicata).

Table 4.12 – Isotopic compositions of Cornouaille mineralization and the main regional rocks (calculated at 270 Ma) (dup = duplicate).

roche analysée	provenance	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Kerlec'h (Lignol)	18,483	15,649	38,223
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Toulhouët (Inguiniel)	18,400	15,607	38,007
leucogranite porphyroïde (311 ± 5 Ma)	L'Échantillon (Pontivy)	18,426	15,628	38,198
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Le Vouëdec (Berné)	18,342	15,646	38,804
leucogranite mylonitisé (311 ± 5 Ma)	Guilligomarc'h	18,375	15,645	38,315
trondhjémite Douarnenez (456 Ma)	nord Cap Sizun	18,038	15,638	38,341
amphibolite (~400 Ma)	Cap Sizun	18,091	15,512	37,777

4.10 - Basse-Loire : carrefour géologique et métallogénique

Ce secteur complexe (et très discuté, voir notamment Cartier et Faure, 2004 ; Pitra *et al.*, 2010) est coupé en deux par la faille de Nort-sur-Erdre, une suture éo-varisque majeure qui sépare Armorica au nord de Gondwana au sud (cf. Fig. 4.25). La suture sépare notamment la grande unité allochtone micaschisteuse des Mauges, datée de l'Édiacarien, qui s'étend largement au sud de la Loire, de l'unité paléozoïque et édiacarienne de Saint-Georges-sur-Loire qui porte des lentilles sulfurées et s'étend au nord. Le bassin carbonifère inférieur d'Ancenis s'est ouvert au Tournaisien sur le flanc sud de la suture.

Les minéralisations sont variées : au nord des sulfures polymétalliques stratiformes édiacariens dans l'unité allochtone de Saint-Georges-sur-Loire (La Comterie, La Haie-Claire, Panneccé, Belligné...), (Fig. 4.30), dans la nappe des Mauges les filons de quartz aurifère de La Bellière et antimonifère de Montrevault sur un décrochement sénestre contemporain de l'ouverture du bassin d'Ancenis (340 - 325 Ma), et dans le bassin d'Ancenis les minéralisations post-Dinantien : pégrinitiques Mo-Sn-W-Bi-Pb-Zn-As de La Rousselière et le district à tungstène et antimoine de Saint-Herblon.

Les compositions isotopiques reflètent cette variété de types et d'âges. Les amas sulfurés édiacariens de Saint-Georges-sur-Loire sont peu radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,57$ à $17,72$) avec une participation notable de plomb du manteau ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,507$ à $15,569$). Notons que Montmarçon, dans l'unité micaschisteuse para-autochtone d'Aigurande (Marche) a une signature isotopique identique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,65$ à $17,68$), suggérant une parenté, à défaut d'une continuité, entre les deux unités d'Aigurande et de Saint-Georges.

Les minéralisations hercyniennes sont nettement plus radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,05$ à $18,70$), (Fig. 4.31 ; Tab. 4.13). La valeur extrême est celle d'un sulfosel de Pb/Sb tardif du filon antimonifère Saint-Antoine à Montrevault ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,697$), bien différente de celle du filon aurifère voisin de La Bellière ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,217$). Tous les gîtes du synclinal d'Ancenis ont la même signature ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,053$ à $18,088$) ce qui suggère une source identique, non identifiée en l'absence d'analyses des roches locales (notamment du microgranite hôte de La Rousselière), mais qui semble cependant étrangère aux leucogranites sud-armoricains, plus radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,25$ à $18,35$). À Saint-Herblon, on retrouve la même signature dans les deux filons voisins mais très différents (wolframite-galène et stibine-zinkénite), posant la question de leurs relations (superposition ? télescope ?), irrésolvable avec les données disponibles aujourd'hui.

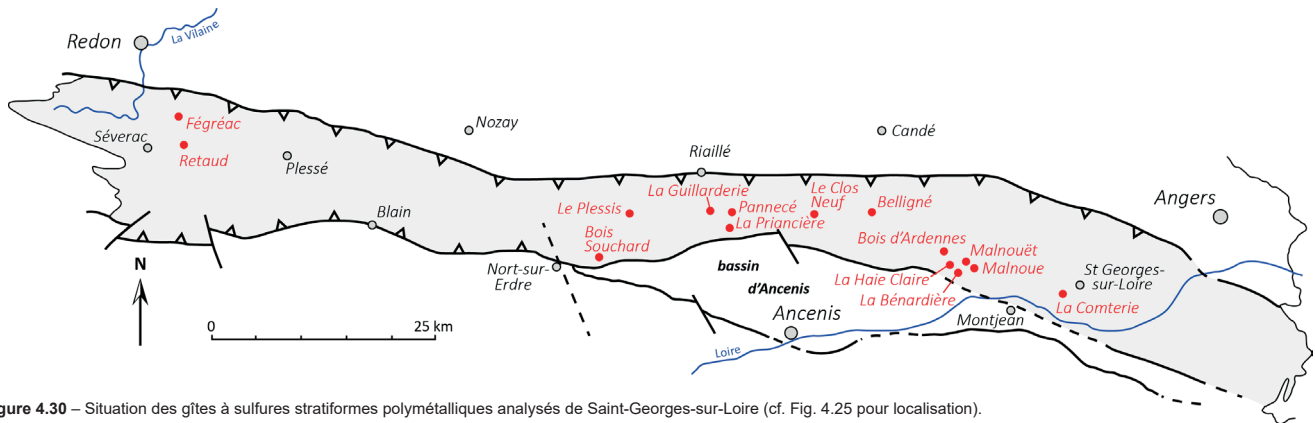


Figure 4.30 – Situation des gîtes à sulfures stratiformes polymétalliques analysés de Saint-Georges-sur-Loire (cf. Fig. 4.25 pour localisation).

Figure 4.30 – Situation of the analyzed polymetallic stratiform sulphide deposits of Saint-Georges-sur-Loire (see Fig. 4.25 for location).

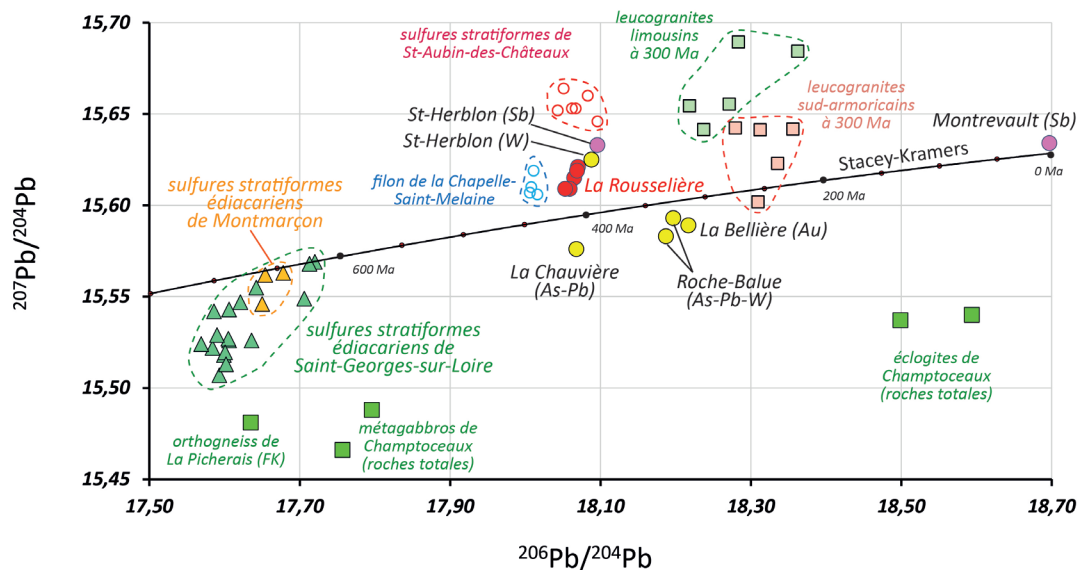


Figure 4.31 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des principales minéralisations de Basse-Loire et des leucogranites proches. Le gîte de Montmarçon est reporté pour comparaison.

Figure 4.31 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the main mineralizations of Basse-Loire and nearby leucogranites. The Montmarçon deposit is reported for comparison.

La nappe de Champtoceaux est un des traits structuraux majeurs du secteur. C'est un empilement complexe avec la nappe des Mauges qui surmonte des ophiolites peu métamorphiques à métagabbros amphibolitisés, des éclogites-migmatites et des micaschistes des Mauves, qui montre d'abondantes roches mafiques cambro-ordoviciennes et *pro parte* édiacariennes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ jusqu'à 17,75) à plomb mantellique franc ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ jusqu'à 15,466 et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ jusqu'à 37,33 ; Vidal et Postaire, 1985). Ces formations ont probablement participé au nourrissage des fluides hydrothermaux à l'origine de minéralisations du secteur : les amas sulfurés de Saint-Georges-sur-Loire, même s'ils sont allochtones, mais aussi les filons de La Chauvière ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,576$), de Roche Balue ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 15,59$) voire de La Bellière ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,589$).

Régionalement, on constate que les minéralisations voisines (filon polymétallique de La Chapelle-Saint-Melaine, et sulfures stratiformes de l'Ordovicien de Saint-Aubin) ont des signatures proches ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,00$ à $18,10$), ce qui plaide en faveur d'une source régionale commune aux minéralisations paléozoïques de Basse-Loire. Le caractère peu radiogénique peut suggérer une contribution des sulfures stratiformes édiacariens (notamment pour La Chapelle-Saint-Melaine) qui se-

raient alors assez largement présents dans le soubassement, un héritage régional qui reste cependant une hypothèse fragile.

4.11 - Nord-Armorique : plomb néoproterozoïque

Le Nord-Armorique porte des sulfures stratiformes néoproterozoïques (Rouez, Kerham, l'Hôtel Piquet) et des filons plus tardifs (Yvrandes, Bois-Neuf, Pulec, Bouet) qui affichent tous des valeurs de plomb très peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 17,75$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 37,78$), (Fig. 4.32 ; Tab. 4.14 ; Fig. 4.25). Tous ces gîtes minéralisés ont en commun d'être situés dans, ou à proximité immédiate, de formations magmatiques édiacariennes et cryogéniennes. Les compositions isotopiques des granites cadomiens manceux (seules roches protérozoïques analysées) confirment le rôle de source, dominante voire exclusive, joué par ces granites pour les filons minéralisés.

Des gîtes proches sont porteurs d'un plomb plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ compris entre 17,75 et 18,20) où on peut soupçonner une contribution de plomb cadomien : forte à Châteauneuf ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,945$ et $17,921$), plus discrète (ou absente ?) à Beauvain ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,111$) et La Touche ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 18,15$), tous au cœur du domaine manceux. On peut la soupçonner aussi à Montbelleux ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,945$) mais cette composition est aussi celle du plomb magmatique cadomien d'Alexain et cette source magmatique, un peu moins ancienne, paraît plus plausible pour ce filon périgranitique à wolframite-cassitérite.

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
sulfures stratiformes édiacariens (St-Georges-sur-Loire)				
La Haie-Claire 1	Gn	17,584	15,522	37,705
	Gn	17,642	15,555	37,733
La Comterie	Gn	17,606	15,526	37,676
	Gn	17,593	15,507	37,598
	Gn	17,605	15,527	37,669
	Gn	17,599	15,518	37,655
moy. 4 an.	Gn	17,601	15,520	37,650
Bois d'Ardenes	Gn	17,606	15,543	37,735
Belligné	Gn	17,706	15,549	37,786
	Gn	17,720	15,569	37,861
	Gn	17,713	15,568	37,872
	Gn	17,713	15,568	37,872
Bois-Souchard	Gn	17,621	15,547	37,656
	Gn	17,602	15,513	37,647
Pannecé	Gn	17,569	15,524	37,723
	Gn	17,590	15,529	37,769
Le Plessis	Gn	17,586	15,542	37,755
La Priancière	Gn	17,636	15,526	37,657
Le Retaud	Gn	17,616	15,553	37,763
	Gn	17,628	15,540	37,783
Fégréac	Gn	17,714	15,545	37,855
filon à antimoine				
Saint-Herblon II	Znk	18,096	15,633	38,264
Montrevault	Sem	18,697	15,634	38,575
filon à arsenic-plomb-tungstène et/ou (or)				
La Bellière	Gn	18,217	15,589	38,050
Saint-Herblon I	Gn	18,088	15,625	38,287
La Chauvière	Gn	18,068	15,576	38,063
Roche-Balue	Gn	18,197	15,593	38,101
	Gn	18,187	15,583	38,076

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
périgranitique à Mo-Sn-W-Pb-As				
La Rousselière	Gn	18,065	15,615	38,240
	Bour	18,070	15,621	38,256
	Gn	18,059	15,609	38,212
	Gn	18,069	15,619	38,251
	Gn	18,053	15,609	38,220
filon à plomb-zinc -(cuivre-antimoine)				
Chapelle-Saint-Melaine	Gn	18,016	15,606	37,953
	Meg	18,011	15,619	37,999
	Boul	18,008	15,610	37,980
	Jam	18,006	15,607	37,965
moy. 4 an.		18,010	15,611	37,974
sulfures stratiformes (Ordovicien inférieur de St-Aubin-des-Châteaux)				
Saint-Aubin-des-Châteaux	Gn	18,096	15,646	38,397
	Gn	18,062	15,653	38,328
	Gn	18,067	15,653	38,306
	Gn	18,051	15,664	38,315
	Gn	18,083	15,660	38,350
	Gn	18,043	15,652	38,278
moy. 6 an.		18,067	15,655	38,329
sulfures stratiformes édiacariens (Montmarçon)				
Montmarçon	Gn	17,650	15,546	37,764
Montmarçon	Gn	17,654	15,562	37,812
Montmarçon	Gn	17,678	15,563	37,818

roche analysée	provenance	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Kerlec'h (Lignol)	18,356	15,642	38,207
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Toulhouët (Inguiniel)	18,309	15,602	37,965
leucogranite porphyroïde (311 ± 5 Ma)	L'Échantillon (Pontivy)	18,335	15,623	38,156
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Le Vouëdec (Berné)	18,279	15,642	38,759
leucogranite mylonitisé (311 ± 5 Ma)	Guilligomarc'h	18,312	15,641	38,292
leucogranite des Millevaches (~ 315 Ma)	Saint-Julien-aux-Bois	18,362	15,684	38,491
	Saint-Mathieu	18,218	15,654	38,341
	La Brème	18,237	15,641	38,311
	Saint-Sylvestre	18,283	15,689	38,611
	Saint-Sylvestre	18,271	15,655	38,371
métagabbro (roche totale)	Champtoceaux	17,757	15,466	37,330
métagabbro (roche totale)	Champtoceaux	17,796	15,488	37,420
éclogite (roche totale)	Champtoceaux	18,594	15,540	38,020
éclogite (roche totale)	Champtoceaux	18,499	15,537	37,950
orthogneiss (FK)	La Picherais	17,635	15,481	37,598

Tableau 4.13 – Compositions isotopiques des minéralisations de Basse-Loire et des environs, ainsi que de quelques roches régionales (calculées à 300 Ma) ; granites du Millevaches (d'après Michard-Vitrac *et al.*, 1981) indiqués par analogie avec les leucogranites sud-armoricains.

Table 4.13 – Isotopic compositions of mineralizations in Basse-Loire and surrounding areas, as well as some regional rocks (calculated at 300 Ma); Millevaches granites (after Michard-Vitrac *et al.*, 1981) indicated by analogy with South Armorican leucogranites.

À l'inverse, d'autres gîtes possèdent un plomb plus radiogénique (Trémuson, Pierreville...) dont la source est à rechercher dans les granites hercyniens locaux, notamment les granites rouges pour Pierreville et Surtainville, et aussi Hope's Mine sur l'île de Sark, à probable plomb de mélange édiacarien-hercynien (Fig. 4.32).

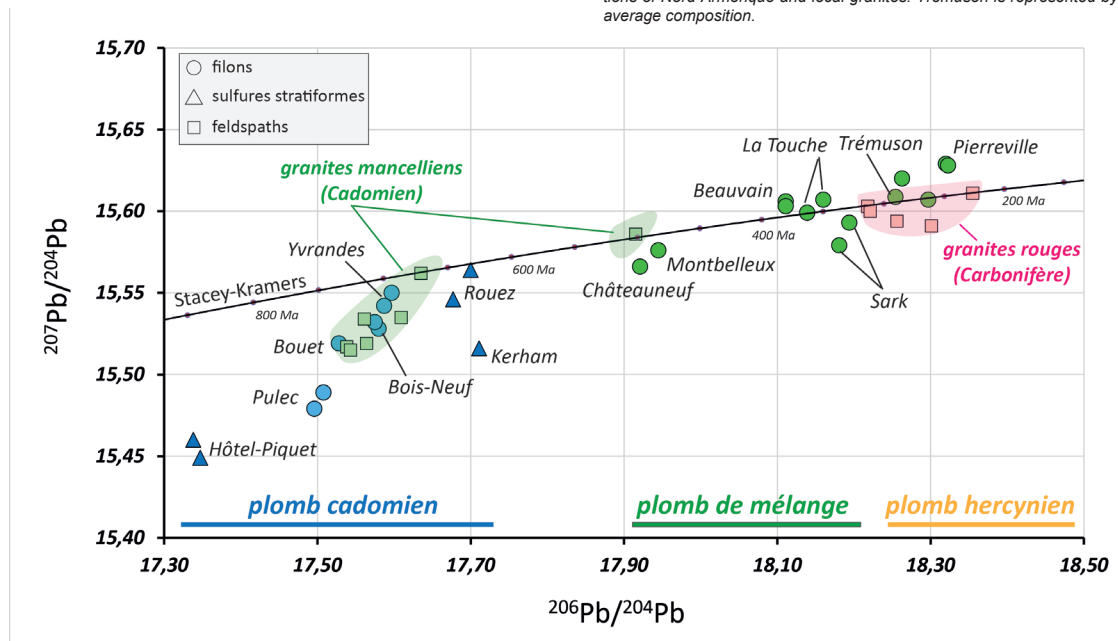


Figure 4.32 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des principales minéralisations de Nord-Armorique et des granites locaux. Trémuson est représenté par sa composition moyenne.

Figure 4.32 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of the main mineralizations of Nord-Armorique and local granites. Trémuson is represented by its average composition.

gîte analysé	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
sulfures stratiformes édiacariens - cryogéniens				
Rouez	Gn	17,700	15,564	37,689
	Gn	17,677	15,546	37,627
Kerham	Gn	17,711	15,516	37,318
	Gn	17,338	15,460	37,233
Hôtel Piquet	Gn	17,347	15,449	37,209
	Gn	17,347	15,449	37,209
filon à plomb-zinc				
Yvrandes	Gn	17,597	15,550	37,688
	dup	17,587	15,542	37,638
Bois-Neuf	Gn	17,580	15,528	37,614
	Gn	17,575	15,532	37,625
Pulec (Jersey)	Gn	17,496	15,479	37,463
	dup	17,508	15,489	37,487
Bouet (Guernesey)	Gn	17,528	15,519	37,536
Hope's Mine (Little Sark)	Gn	18,194	15,593	38,260
	Gn	18,181	15,579	38,233
La Touche	Gn	18,139	15,599	38,216
	Gn	18,160	15,607	38,255
Châtaudren	Gn	18,263	15,620	38,207
Trémuson (moy. 3 an.)		18,254	15,609	38,178
Surtainville (La Godaillerie)	Gn	18,297	15,607	38,187
Pierreville	Gn	18,320	15,629	38,261
	dup	18,323	15,628	38,249
Châteauneuf	Gn	17,921	15,566	37,989
périgranitique à Mo-Sn-W-Pb-As				
Montbelleux	Gn	17,945	15,576	37,893
Beauvain	Bour	18,111	15,606	38,137
	dup	18,111	15,603	38,123

roche analysée	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
granites mancelliens				
granite de Vire	feldspath	17,564	15,519	37,587
	feldspath	17,635	15,562	37,675
granite d'Athis	feldspath	17,538	15,517	37,583
	feldspath	17,561	15,534	37,634
granite de Louvigné	feldspath	17,543	15,515	37,569
	feldspath	17,609	15,535	37,643
granite de Bonnemain	feldspath	17,915	15,586	37,802
granite rouge tardi-hercynien				
granite de Ploumanach	feldspath	18,355	15,611	38,270
	feldspath	18,256	15,594	38,150
	feldspath	18,218	15,603	38,150
	feldspath	18,221	15,600	38,110
	feldspath	18,301	15,591	38,130

Tableau 4.14 – Compositions isotopiques des minéralisations du Nord-Armorique et des feldspaths des principaux granites régionaux : granite de Ploumanach d'après Michard-Vitrac *et al.*, (1981), (dup = duplicata).

Table 4.14 – Isotopic compositions of mineralization in North Armorica and feldspars of the main regional granites; Ploumanach granite after Michard-Vitrac *et al.*, (1981), (dup = duplicate).

4.12 - Vosges

Les signatures isotopiques des minéralisations (cf. Fig. 2.1) et des granites des Vosges se situent globalement sur ou sous la courbe de Stacey-Kramers ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ descendant jusqu'à 15,547) dénotant un environnement crustal affirmé. Les minéralisations se répartissent pour l'essentiel en deux populations.

La population peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,964$ à 18,182) correspond à des minéralisations de haute température souvent liées aux granites (Fig. 4.33) : skarn de Saulx, filon Bi-Cu (Lac des Perches) et filons antimonifères (Urbéis

et Lepuix-Gy – Giromagny-) ; les granites ont des signatures identiques attestant leur rôle très probable de source majeure du plomb. Une population bien plus radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,761$ à 18,883) porte notamment les grands filons plombo-argentifères septentrionaux (Sainte-Marie-aux-Mines, La Croix-aux-Mines) et méridionaux (Giromagny, Auxelles), ainsi que ceux à fluorine-barytine (Maxonchamp, Mont-de-Vannes). La source n'est pas granitique, leurs compositions et leurs rapports μ étant trop faibles. Trois analyses sont intermédiaires : Moosch, Lussé et surtout Charbes, dont la berthiérinite affiche un rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ particulièrement élevé (15,735) qui demanderait à être confirmé.

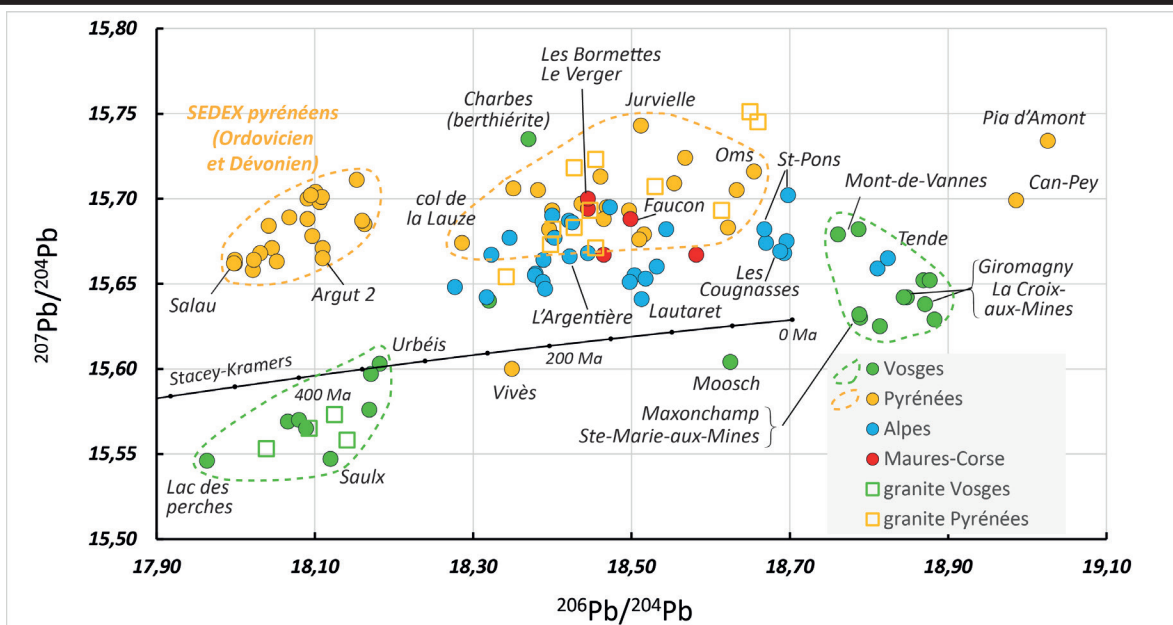


Figure 4.33 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des minéralisations et des principaux granites des Vosges, des Alpes, de Maures-Corse et des Pyrénées (données sur les tableaux d'annexe 1.1 et 1.2).

Figure 4.33 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of mineralizations and main granites from the Vosges, Alps, Maures-Corsica and Pyrenees (data in appendix tables 1.1 and 1.2).

4.13 - Pyrénées

Les signatures isotopiques des minéralisations (cf. Fig 2.1) et des granites se positionnent toutes (sauf le filon aurifère de Vivès) au-dessus de la courbe de Stacey-Kramers ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 15,662 à 15,743) traduisant une croûte continentale supérieure très épaisse dès l'Ordovicien dans cette région (Fig. 4.33). Les sulfures stratiformes SEDEX ordoviciens et dévoniens (Pierrefitte, Arrens... cf. Fig. 3.2) avec trois autres gîtes (Salau, Argut 2, La Manère) dessinent un champ peu radiogénique ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 17,998 à 18,163). Les autres gîtes, de types et d'âges variés, esquissent un champ assez diffus qu'ils partagent avec les granites (suggérant qu'ils peuvent être la source pour certains) d'où s'écartent deux gîtes stratiformes du secteur du Canigou (Pia d'Amont et Can-Pey : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vers 19) et le filon de Vivès. Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour aller plus loin dans l'interprétation.

4.14 - Alpes -Maures - Corse

Vingt-quatre gîtes dans les Alpes, cinq dans les Maures-Esterel et un en Corse, de types métallogéniques différents, ont été analysés (cf. Fig 2.1). On peut remarquer que les signatures sont toutes fortement radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,277 jusqu'à 18,824 à Tende), (Fig. 4.33), à cause *pro parte* de l'âge récent des gîtes, et d'origine clairement crustale ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 15,641 à 15,702) sans influence mantellique : les grands ensembles ophiolitiques alpins n'ont donc joué aucun rôle de source pour le plomb des minéralisations. Il ne se dégage pas d'organisation par secteurs ni de différence claire entre les types de gîtes, ou entre les gîtes des Alpes et des Maures-Esterel. Nous reviendrons sur le filon à sulfosels de Pb/Sb des Cougnasses.

5. Essai de synthèse : sources, recyclages et histoire métallogénique

La signature isotopique du plomb d'une minéralisation résulte de la combinaison de deux paramètres, son âge et sa source (souvent composite), donnant ainsi des informations qui contribuent à décrypter la genèse, conférant un rôle de traceur génétique aux isotopes du plomb.

Bien qu'indépendants, l'âge et la source sont indirectement liés : plus l'âge est récent et plus la source est susceptible d'être enrichie en isotopes radiogéniques. Une conséquence très fréquente est la convergence isotopique : lorsque deux minéralisations présentent la même signature isotopique alors qu'elles n'ont aucune parenté. L'explication peut être, par exemple, qu'un âge plus récent est contrebalancé par le nourrissage auprès d'une source moins radiogénique. Ce problème très fréquent de convergence isotopique est facilement soluble par une étude sérieuse des minéralisations replacées dans leurs cadres géologique et minéralogique, comme nous l'avons vu précédemment.

Ce chapitre va tenter de dégager des règles générales sur la source du plomb, intégrant l'héritage-recyclage, les causes de l'homogénéité ou au contraire l'hétérogénéité des signatures isotopiques, afin de mieux cerner ce rôle de traceur des isotopes de plomb.

5.1 - Dualité des sources du plomb : roches et minéralisations

Les fluides hydrothermaux qui circulent dans la croûte terrestre collectent les métaux dans l'environnement local-régional et les concentrent en sites minéralisés. Le plomb (et les métaux associés) présent dans les minéralisations sous forme de galène et/ou de sulfosels de plomb peut provenir de deux sources (Fig. 5.1) :

- lithologique, constituée de roches environnantes porteuses d'un plomb diffus : une source de fort volume - faible teneur (50 ppm en moyenne dans les feldspaths), qui représente la source « standard » ;

- gîtologique, constituée de minéralisations préexistantes « recyclées » : c'est une source de faible volume – forte teneur, très localisée mais hautement concentrée (d'un facteur 1000 si on admet une teneur de 5 % Pb) qui a une importance probablement sous-estimée dans la littérature (Marcoux et Moëlo, 1991).

Le plomb et les autres métaux prennent ainsi diverses supports minéralogiques (teneurs faibles dans les silicates, notamment les feldspaths, galène et autres sulfures...) mais demeurent « sur place » par un effet cumulatif illustrant les grandes lois métallogéniques d'héritage et de permanence proposées par Routhier (1980).

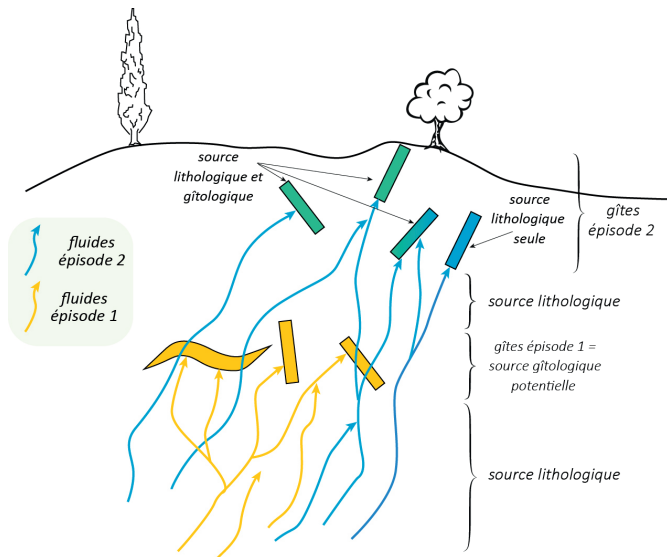


Figure 5.1 – Schéma de synthèse représentant les deux types de sources du plomb et des métaux associés.

Figure 5.1 – Synthesis diagram representing the two types of sources of lead and associated metals.

5.1.1 - Source lithologique : un constat de régionalisme

Bien que la recherche de la source soit pénalisée par un certain nombre de simplifications (accès aux seules roches affleurantes ou recoupées en sondages, lessivage sélectif probable des minéraux, mélanges hautement probables...), les résultats exposés précédemment montrent que l'environnement géologique local satisfait globalement très bien à ce rôle de source des métaux (même si ce n'est pas nécessairement l'encaissant immédiat - cf. Les Farges § 4.3.1-). Le nourrissage en métaux se réalise à peu de distance du dépôt impliquant, en corollaire, une migration de la source vers le dépôt limitée, à l'inverse de ce qui peut se produire pour le pétrole, par exemple, pour lequel des migrations sur de longues distances sont bien documentées. Ces sources locales sont solidement étayées dans des régions assez homogènes géologiquement où elles se révèlent souvent granitiques : Centre-Bretagne, Limousin, etc.

Logiquement, les minéralisations périgranitiques hercyniennes à étain, tungstène, arsenic et or où cristallisent les dernières émanations fluides du magma, portent fréquemment le plomb magmatique dont la signature isotopique initiale est mesurée sur feldspath potassique (Fig. 5.2). Les exemples sont nombreux : skarns de Saulx ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,12$), Charrier et la Bombarde en Forez ($18,10 - 18,11$) près du granite de la Madeleine ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ initial de $18,121$) et de Costabonne ($18,469$) au contact d'une intrusion de la génération Querigut – Saint-Laurent-de-Cerdans ($18,40-18,45$), filon à wolframite de Locronan ($18,224$), filon à cassitérite des Peyrouses près de Pontgibaud ($18,185$) et probablement le porphyre de Beauvain ($18,111$) etc. Le plomb magmatique cadomien ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,915$) a nourri le filon à wolframite de Montbelleux ($17,945$).

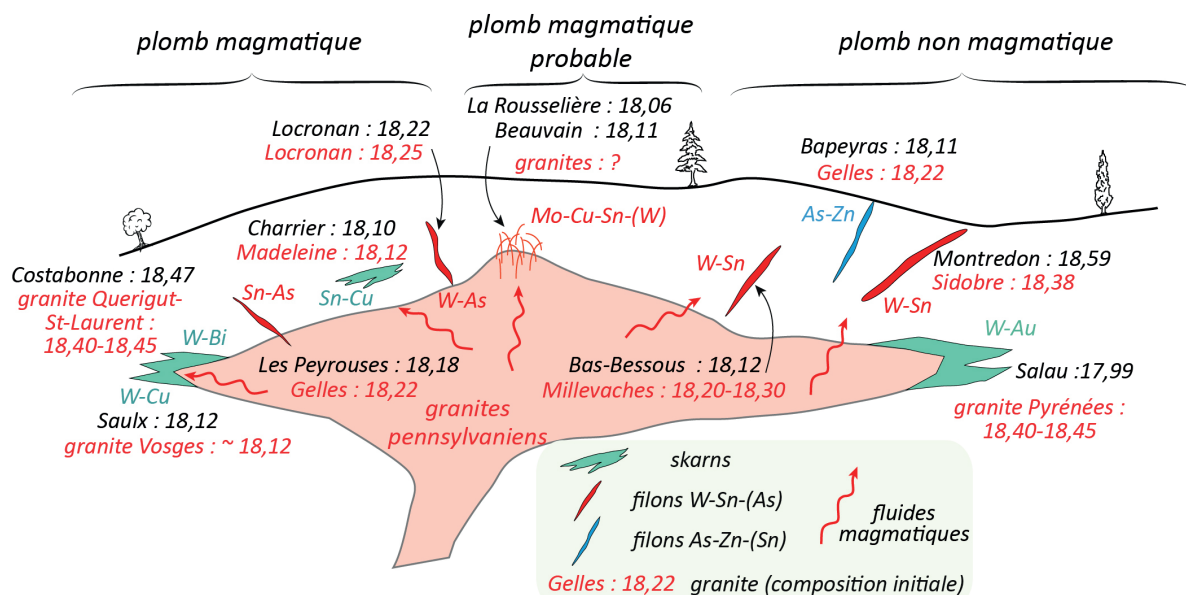


Figure 5.2 – Schéma de synthèse montrant les signatures isotopiques de minéralisations périgranitiques comparées aux signatures initiales des granites pennsylvaniens pères. Pour des raisons de lisibilité, les plombs d'origine non magmatique sont en position latérale, ce n'est pas nécessairement le cas dans la nature.

Figure 5.2 – Synthesis diagram showing the isotopic signatures of perigranitic mineralizations compared to the initial signatures of the parent Pennsylvanian granites. For reasons of readability, the leads of non-magmatic origin are in a lateral position, this is not necessarily the case in nature.

À l'inverse, d'autres minéralisations périgranitiques tardi-magmatiques portent du plomb clairement emprunté à l'encaissant. C'est le cas entre autres pour le skarnoïde du Lautaret (18,51), le filon à wolframite de Montredon (18,588) et de Salau en Ariège ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,998$), un skarn tardi-hercynien mais repris par une *shear zone* (Poitrenaud *et al.*, 2020, 2021) qui a apporté du plomb allochtone. D'autres gisements enfin sont mixtes avec une part notable à dominante (mais pas exclusive) de plomb magmatique. C'est par exemple le cas des filons stannifères du Limousin (Bas-Bessous, Moulin-Barret, Moulin-Rousset 18,12 à 18,159), tous moins radiogéniques que les granites générateurs du Millevaches ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 18,20 et 18,30), ou du filon à arsénopyrite de Bapeyras en Pontgibaud (18,115) lié au granite de Gelles (plus radiogénique : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,22$). Le cas n'est pas tranché pour le filon à wolframite de Saint-Herblon (18,088) et la coupole polymétallique voisine de La Rousselière (18,063) liés à des coupoles microgranitiques dont la composition est peut-être différente des leucogranites sud-armoricains ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 18,20 et 18,30).

Dans les contextes sédimentaires, plus diversifiés, la concurrence entre sources potentielles est forte et la « vraie » source délicate à identifier. On a tendance à privilégier les roches feldspathiques, plus riches en plomb mobilisable, comme les grès arkosiques ayant hérité des feldspaths granitiques mais la réalité est certainement plus complexe.

5.1.2 - Source gîtologique : héritage-recyclage de minéralisations préexistantes

Héritage métallique à l'échelle de la structure minéralisée

Il est très fréquent que plusieurs épisodes hydrothermaux se soient succédés et cumulés pour former la minéralisation que nous observons, c'est le polyphasage (Fig. 5.3 ; Tab. 5.1). C'est surtout le cas pour les filons, fractures colmatées promptes à se réouvrir pour accueillir d'autres fluides hydrothermaux ; ils sont alors dits polyphasés. C'est le cas du Céroux, Les Borderies, Labessette, Le Deveix dans le Massif central, Plogoff dans le Massif armoricain et probablement aussi d'Alteyrac dans le Gard ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 18,100 pour galène et jamesonite et 18,269 pour boulangérite), mais la minéralogie de ce filon n'a pu être étudiée de façon détaillée.

Les premiers éléments pour établir ce polyphasage sont apportés par les études de terrain et de minéralogie. Ce polyphasage s'accompagne habituellement d'un recyclage (ou héritage) des métaux « anciens » déjà présents dans la minéralisation : il va se traduire sur le plan minéralogique par la cristallisation de sulfures néoformés combinant les métaux anciens et ceux « nouveaux » des fluides hydrothermaux plus tardifs, et isotopique bien démontrable avec les isotopes du plomb. La démonstration convaincante de cet héritage-recyclage requiert donc l'utilisation conjointe de ces deux outils, minéralogique et isotopique.

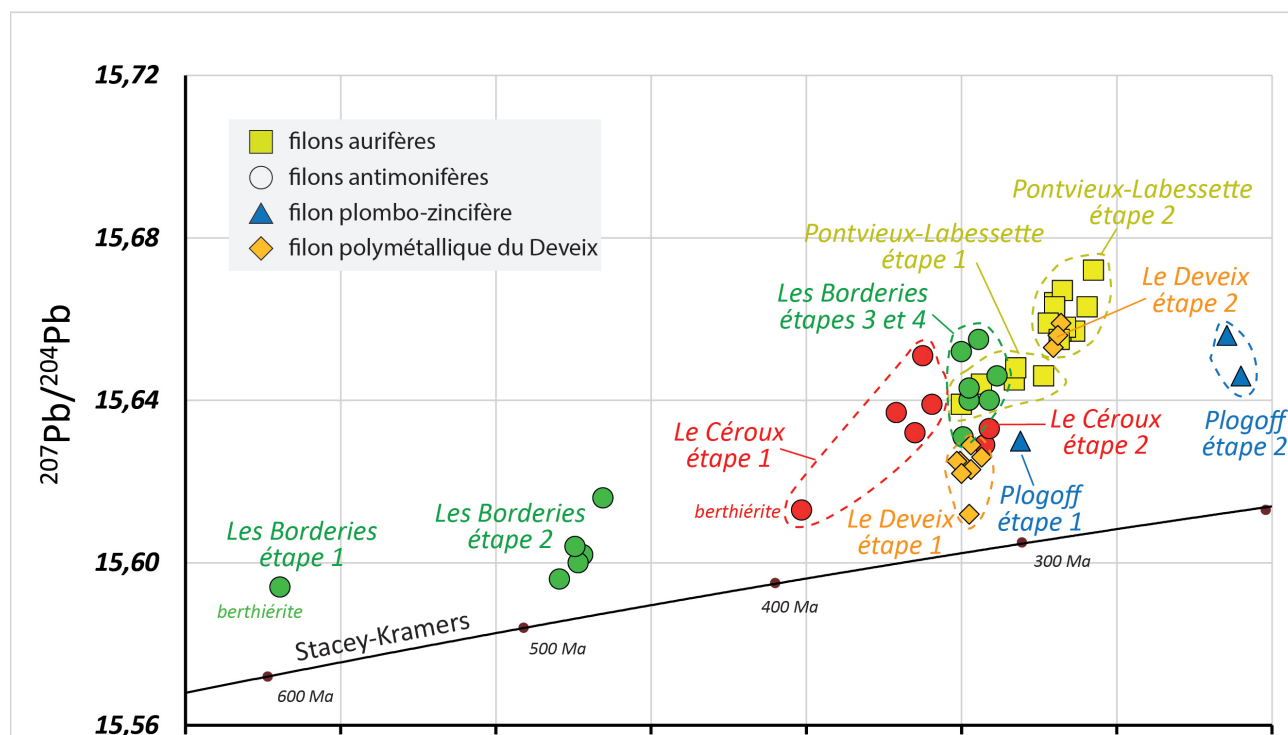


Figure 5.3 – Compositions isotopiques des principaux filons polyphasés étudiés.

Figure 5.3 – Isotopic compositions of the main polyphase studied veins.

étape	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Filon plombo-zincifère (et antimonifère) de Plogoff				
étape 1	Bour	18,238	15,630	38,299
étape 2	Gn	18,371	15,656	38,483
étape 3	Sem	18,380	15,646	38,467
Filons aurifères de Pontvieux				
étape 1	Jam	18,234	15,645	38,460
	Jam	18,235	15,648	38,442
	Bour	18,273	15,657	38,467
étape 2	Gn	18,285	15,672	38,551
	dup	18,281	15,663	38,521
Filons aurifères de Labessette				
Communal (étape 1)	Jam	18,200	15,639	38,392
	dup	18,213	15,644	38,408
Aubier (étape 2)	Gn	18,264	15,657	38,510
La Viallole (étape 2)	Gn	18,267	15,658	38,506
	Gn	18,260	15,664	38,513
	Boul	18,265	15,667	38,563
	Boul	18,260	15,663	38,525
La Viallole (étape 2)	dup	18,256	15,659	38,494
	Bour	18,253	15,646	38,451
	Sem	18,263	15,655	38,467

Tableau 5.1 – Compositions isotopiques des filons polyphasés de la figure 5.3.

Table 5.1 – Isotopic compositions of the polyphase veins in Figure 5.3.

Quatre cas peuvent se présenter :

1) En l'absence de plomb « ancien » dans la minéralisation précoce, aucun recyclage du plomb n'est possible et la signature des minéraux néoformés sera bien sûr exclusivement celle du plomb « nouveau ». C'est le cas par exemple des sulfosels de Pb/Sb formés par la remobilisation de l'antimoine par des fluides plombifères dans les filons à stibine de Bestrée, Sein et Ty Gardien (Finistère), qui ne portent que le plomb des fluides plombifères permians.

2) Dans le cas inverse d'un fluide hydrothermal tardif sans plomb « nouveau » qui remobilise une minéralisation porteuse de plomb « ancien », les minéraux néoformés conservent la même signature isotopique que les minéraux préexistants. Dans le petit filon plombo-zincifère de Plogoff (Finistère),

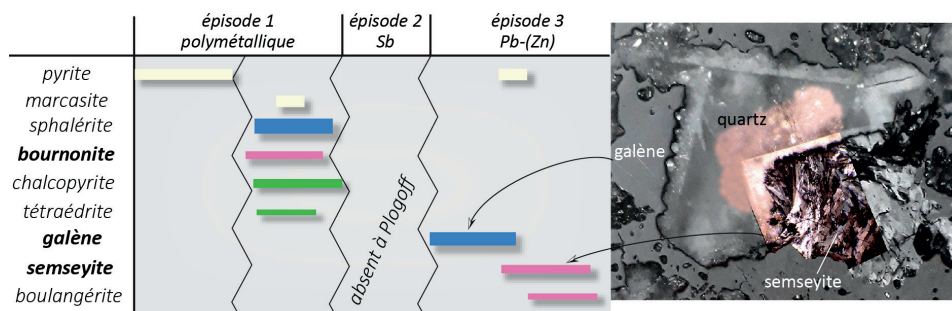


Figure 5.4 – Paragenèse du filon de Plogoff (Finistère). Photo au microscope en lumière réfléchie polarisée de l'épisode 3 avec semseyite pseudomorphosant un cristal automorphe de galène, toutes deux analysées © E. Marcoux.

Figure 5.4 – Paragenesis of the Plogoff vein (Finistère). Photo (reflected light microscope, analyzed polarized light) of episode 3 with semseyite pseudomorphing after galena automorphic crystal, both analyzed © E. Marcoux.

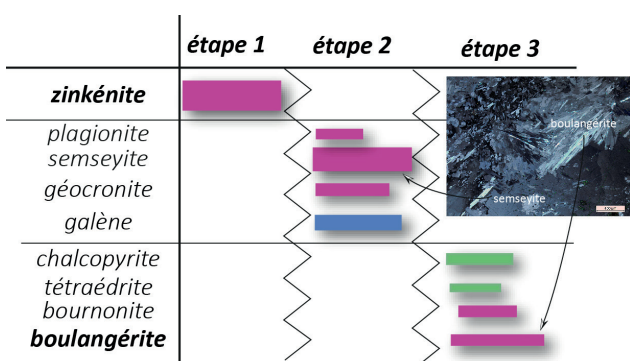


Figure 5.5 – Paragenèse du filon des Cougnasses (Hautes-Alpes). Photo au microscope en lumière réfléchie polarisée du minerai montrant la boulangerite tardive (étape 3) envahissant et remplaçant la semseyite précoce (étape 2) © E. Marcoux.

Figure 5.5 – Paragenesis of the Les Cougnasses vein (Hautes-Alpes). Photo (reflected light microscope, analyzed polarized light) of the ore minerals showing late boulangerite (stage 3) invading and replacing early semseyite (stage 2) © E. Marcoux.

Filon antimonifère des Borderies				
étape 1	Btr	17,761	15,594	38,065
étape 2	Jam 1	17,941	15,596	38,235
	Jam 1	17,956	15,602	38,244
	Jam 1	17,953	15,600	38,231
	And	17,951	15,604	38,254
étape 3	Znk 1	17,969	15,616	38,294
	Znk 2	18,205	15,640	38,354
	Znk 2	18,201	15,631	38,342
	Znk 2	18,205	15,643	38,363
	Sem	18,223	15,646	38,370
étape 4	Sem	18,211	15,655	38,427
	Plg	18,200	15,652	38,394
	Plg	18,218	15,640	38,381
	Jam 2	18,219	15,641	38,345
Filon antimonifère du Cérourx				
étape 1	Btr	18,097	15,613	38,203
	Jam	18,175	15,651	38,318
	dup	18,158	15,637	38,332
étape 1	Fül	18,170	15,632	38,259
	Znk	18,181	15,639	38,293
étape 2	Boul	18,215	15,629	38,264
	dup	18,218	15,633	38,258
Filon à barytine-galène-sulfosels de Pb/Sb du Deveix				
étape 1	Bour	18,213	15,626	38,448
	Gc	18,199	15,625	37,423
	Gc	18,197	15,625	38,428
	Sem	18,206	15,623	38,446
	dup	18,206	15,629	38,454
étape 1	Sem	18,200	15,622	38,438
	Gn	18,205	15,612	38,410
étape 2	Gn	18,264	15,659	38,475
	dup	18,259	15,653	38,457
	dup	18,262	15,656	38,462

la semseyite pseudomorphose clairement la galène (Fig. 5.4) et aux Cougnasses (Hautes-Alpes), la boulangerite tardive recoupe la zinkénite précoce (Fig. 5.5). À Saint-Pons (Alpes - de-Haute-Provence), de la boulangerite recoupe une zinkénite précoce et à Lepuix-Gy (Giromagny, Territoire de Belfort), c'est l'inverse : une boulangerite précoce cogénétique de la stibine est reprise pour former plagionite et zinkénite tardives (Fig. 5.6). À La Telhaie (Morbihan), de la galène remobilisée *in situ* émet des filonnets dans une galène plus massive

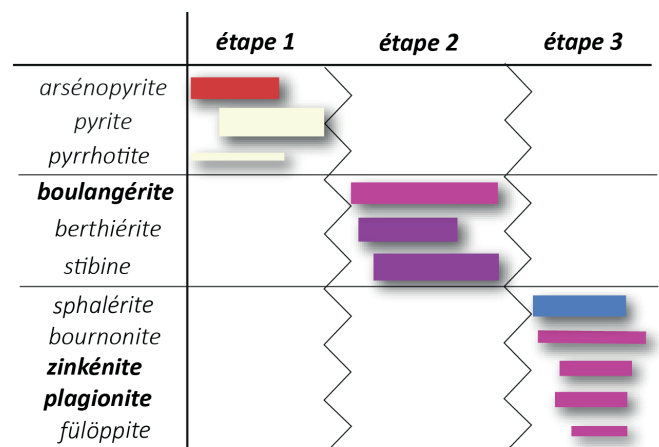


Figure 5.6 – Paragenèse du filon de Lepuix-Gy (Giromagny, Territoire de Belfort).

Figure 5.6 – Paragenesis of Lepuix-Gy vein (Giromagny, Territoire de Belfort).

(Cantinolle, 1984). Dans tous ces cas, il s'agit d'une simple redistribution du plomb préexistant lors de mouvements plus tardifs, épilogues de la mise en place des filons ou resets ultérieurs.

3) Le cas de figure le plus fréquent sur le territoire national reste cependant le cas intermédiaire où du plomb « nouveau » remobilise et se mélange avec du plomb « ancien ». Il est particulièrement bien illustré dans les filons antimonifères à stibine et sulfosels de Pb/Sb précoces porteurs du plomb « ancien » qui sont repris par le plomb « nouveau » d'un épisode ultérieur. Tous les métaux anciens, notamment l'antimoine, participent au recyclage et les minéraux néoformés sont le plus souvent des sulfosels de Pb/Sb (semseyite, boulangérite, zinkénite, fülöppite...), parfois avec cuivre (bournonite), dont les compositions isotopiques sont intermédiaires entre le plomb « ancien » remobilisé et le plomb « nouveau », organisés souvent en une droite de mélange. La proportion plomb ancien/plomb nouveau reste difficile à apprécier. C'est le cas par exemple dans les filons des Borderies (Puy-de-Dôme) et dans le district de Brioude-Massiac, notamment au Céroux (Fig. 5.7). La remobilisation de l'antimoine est parfois totale au point que la stibine a disparu et que le filon n'est plus composé que de sulfosels de Pb/Sb comme à Urbeis (Vosges).

On rencontre aussi ce cas dans les filons aurifères du Limousin (La Fagassière), et d'Auvergne (Pontvieux-Labessette), ainsi que dans le filon polymétallique du Deveix (Corrèze). Tous ces cas sont illustrés sur une figure de synthèse (Fig. 5.8).

4) Enfin, dans le cas de la reprise d'une minéralisation ancienne riche en plomb par un fluide également riche en plomb, l'héritage est difficile voire impossible à apprécier, comme par exemple aux Malines (Gard).

Un cas particulier est le filon uranifère à pechblende de Chaméane (Puy-de-Dôme) où les clausthalites (PbSe) dessinent trois groupes de compositions, tous très radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,77, 19,03$ et $20,10$) à cause de l'intégration du plomb radiogénique qui se forme en permanence *in situ* par désintégration de la pechblende (Fig. 5.9). Le filon montrant plusieurs générations de clausthalite (Johann *et al.*, 1982 ; celles analysées n'ont pas pu être replacées dans la succession paragénetique), chaque groupe pourrait correspondre à un épisode de dépôt, les valeurs les plus élevées s'attachant à l'épisode le plus tardif qui a intégré un maximum de plomb radiogénique. Ces résultats suggèrent des épisodes de remobilisation tardifs d'âges à préciser (liasiques ?).

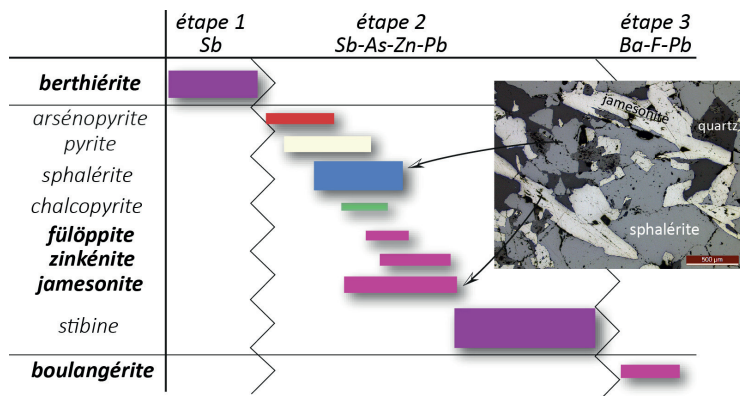


Figure 5.7 – Paragenèse du filon du Céroux (Haute-Loire). Photo au microscope en lumière réfléchie du minéral de l'étape principale (étape 2) à sphalérite et jamesonite (analysée) précédant le dépôt massif de stibine © É. Marcoux.

Figure 5.7 – Paragenesis of the Le Céroux vein (Haute-Loire). Photo (reflected light microscope, plane polarized light) of the ore from the main stage (stage 2) with sphalerite and (analyzed) jamesonite preceding the massive deposit of stibnite © É. Marcoux.

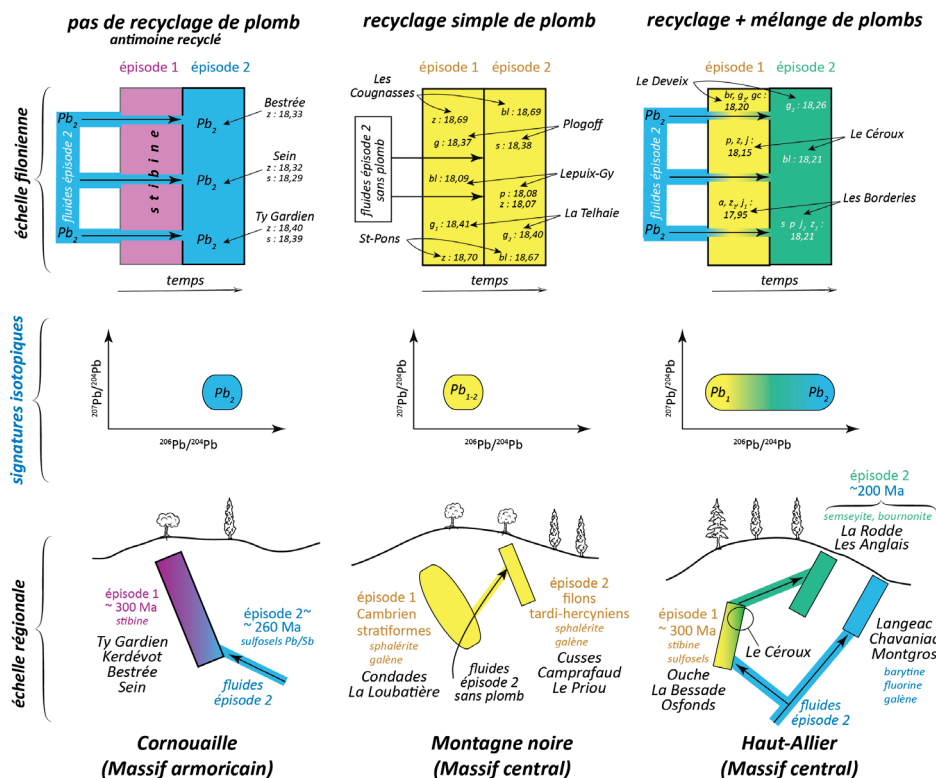


Figure 5.8 – Schéma de synthèse des principaux cas de remobilisation avec ou sans héritage/recyclage du plomb, à l'échelle filonienne et régionale, avec quelques exemples ; a : andorite, bl : boulangérite, br : bournonite, f : fülöppite, g : galène, gc : géocronite, j : jamesonite, p : plagionite, s : semseyite, z : zinkénite (cf. fig. 1.1).

Figure 5.8 – Summary diagram of the main cases of remobilization with or without lead inheritance/recycling, at the vein and regional scale, with some examples ; a : andorite, bl : boulangérite, br : bournonite, f : fülöppite, g : galena, gc : geocronite, j : jamesonite, p : plagionite, s : semseyite, z : zinkénite (see fig. 1.1).

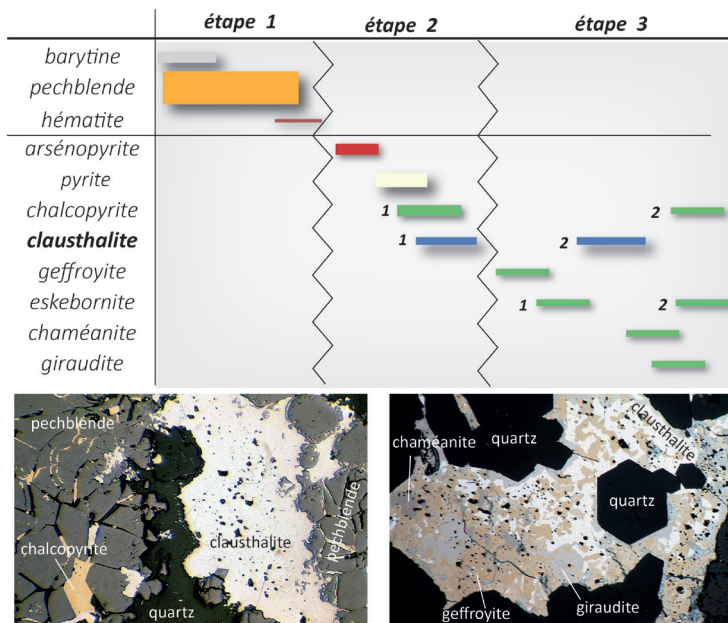


Figure 5.9 – Paragenèse du filon uranifère de Chaméane (Puy-de-Dôme). Photo au microscope en lumière réfléchie du minéral montrant la pechblende suivie du dépôt des sélénides : clauschalite dominante (analysée) accompagnée des 3 sélénides découverts à Chaméane : chaméanite, geffroyite et giraudite © É. Marcoux.

Figure 5.9 – Paragenesis of the Chaméane vein (Puy-de-Dôme). Photo (reflected light microscope, plane polarized light) of the ore showing pitchblende followed by the deposition of selenides : dominant (analyzed) clauschalite accompanied by the 3 selenides discovered at Chaméane : chaméanite, geffroyite and giraudite © É. Marcoux.

On peut donc conclure que la présence de plusieurs groupes, ou *clusters*, de compositions isotopiques pour un même gîte minéralisé, avec ou sans *trend*, traduit la superposition d'épisodes hydrothermaux, chronologiquement proches, et on peut alors parler d'étapes d'un même événement hydrothermal (Labessette...), ou au contraire très éloignés (Les Borderies), relevant d'épisodes distincts qu'il n'est pas toujours possible d'identifier. Ces filons sont donc au minimum diachrones, réouverts à plusieurs époques. Il est alors nécessaire d'étudier d'abord la minéralogie pour décrypter les paragenèses successives avant d'entreprendre les analyses isotopiques, une analyse « moyenne » (réalisée sur un concentré par exemple) n'ayant aucune signification.

Recyclage au plan régional

Le recyclage relevé à l'échelle d'un filon est transposable à l'échelle régionale. Nous avons vu que c'est notamment le cas dans le Haut-Allier, où les filons des Anglais, La Rodde, Bois-de-Madène et Communal-Rougier sont des intermédiaires entre les filons à antimoine et plombs hercyniens et les filons plombo-barytiques liasiques (Fig. 5.8). Ce caractère intermédiaire se traduit par la composition isotopique et par la minéralogie à sulfosels de Pb/Sb (semseyite-bournonite) dominants, assimilables à des mélanges galène + stibine. Il est probable que les minéraux d'antimoine, en traces dans tous les filons de fluorine-barytine liasiques du Massif central, soient issus du recyclage-héritage de ces filons de stibine-berthièrite. Connaître précisément l'extension de cet héritage permettrait d'évaluer l'ampleur des circulations hydrothermales.

En Montagne Noire, trois filons à galène-sphalérite dans le Cambrien (Cusses, Camprafaud, Le Priou) ont la même composition isotopique que les amas sulfurés stratiformes cambriens proches, démontrant qu'ils ont hérité exclusivement de l'héritage de ce plomb et que l'épisode hydrothermal qui les a formés n'a pas véhiculé de plomb nouveau. Rappelons que ce n'est pas le cas du filon zincifère de Saint-Salvy, à plomb magmatique hercynien.

Superposition simple : aucun héritage

L'héritage de plomb n'est cependant pas une règle absolue. Plusieurs sites montrent deux minéralisations contiguës ou superposées de types et d'âges très différents portant chacune sa propre signature isotopique sans droite de mélange décelable. L'héritage de plomb précoce est alors inexistant (ou trop ténu pour être établi).

On rencontre ce cas (liste non exhaustive) à Montmarçon dans la Marche (filon plombo-barytique attenant à une minéralisation stratiforme édiacarienne), Argut dans les Pyrénées (filon plombifère contigu à un SEDEX Ordovicien), Montbel-leux (Ille-et-Vilaine) où un filon à galène recoupe les filons périgranitiques cadomiens à wolframite-cassitérite, et Charrier (Allier) ou des filons tardifs à galène-barytine recoupent le skarnoïde à cassitérite-bornite (Fig. 5.10 ; Tab. 5.2).

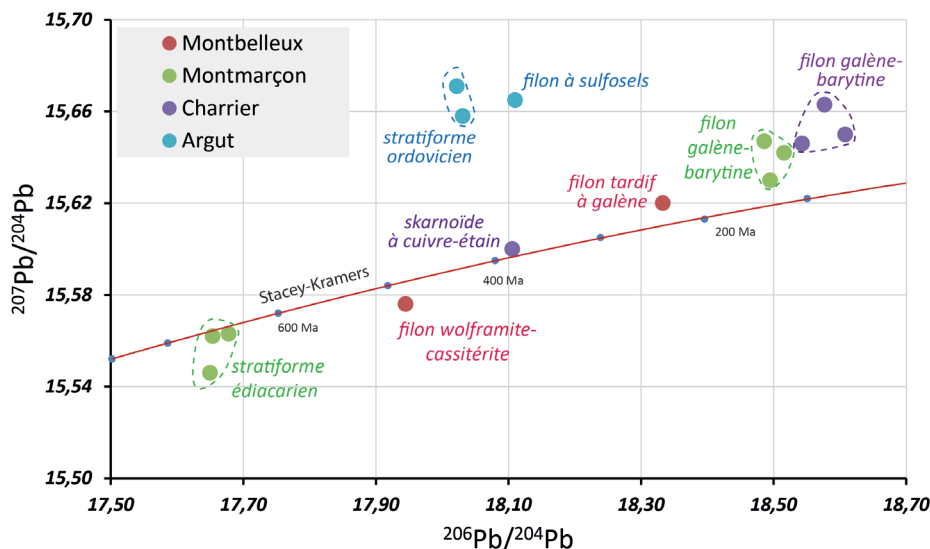


Figure 5.10 – Compositions isotopiques de 4 sites où les gîtes sont seulement superposés, sans héritage perceptible.

Figure 5.10 – Isotopic compositions of 4 sites where deposits are only superimposed, without perceptible heritage.

gîte	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Montbelleux (Ille-et-Vilaine)				
filon à wolframite-cassitérite	Gn	17,945	15,576	37,893
filon tardif à galène	Gn	18,333	15,620	38,291
Montmarçon (Indre)				
stratiforme Édiacarien	Gn	17,650	15,546	37,764
	Gn	17,654	15,562	37,812
	Gn	17,678	15,563	37,818
filon à barytine-galène	Gn	18,486	15,647	38,618
	Gn	18,495	15,630	38,559
	Gn	18,516	15,642	38,589
Charrier (Allier)				
skarnoïde à cassitérite-bornite	Gn	18,106	15,600	38,183
filon tardif à barytine-galène (filon Ste-Marie)	Gn	18,577	15,663	38,679
	Gn	18,543	15,646	38,634
	Gn	18,608	15,650	38,697
Argut (Haute-Garonne)				
stratiforme ordovicien	Gn	18,031	15,668	38,172
	dup	18,022	15,658	38,145
filon à sulfosels Sb-Pb-Cu	Meg	18,110	15,671	38,245
	Bour	18,110	15,665	38,226

Tableau 5.2 – Compositions isotopiques des 4 sites à gîtes superposés de la figure 5.10.

Table 5.2 – Isotopic compositions of the 4 sites with superimposed deposits in Figure 5.10.

5.2 - Homogénéité et variation isotopique dans un gîte monphasé : quelles causes ?

Des gîtes et gisements, filoniens ou stratiformes, admis comme monphasés car formés lors d'un épisode hydrothermal unique ont fait l'objet de séries d'analyses (cinq ou davantage). Certains, peu fréquents, ont révélé une homogénéité remarquable (à l'incertitude analytique près), alors que d'autres, plus fréquents, offrent une variabilité notable malgré l'absence de phénomènes d'héritage vus précédemment.

5.2.1 - Homogénéité de la signature isotopique

Ces gîtes à signature isotopique homogène sont des filons (Fournial, Les Farges, Saint-Salvy...), des stockwerks périgranitiques (La Rousselière), (Fig. 5.11) et des amas polymétalliques stratiformes (Bodenec, Porte-aux-Moines, Chessy, Sain-Bel), (Fig. 5.12). Les variations de dix gîtes ont fait l'objet de calculs simples de quantification (Fig. 5.13 ; Tab. 5.3). On s'aperçoit qu'elles sont relativement faibles, au maximum de quatre fois l'incertitude analytique (i.a.) : de 0,017 à 0,056 pour $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (i.a. de 0,013), de 0,012 à 0,042 pour $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (i.a. de 0,012) et de 0,031 à 0,11 pour $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (i.a. de 0,028). En considérant la valeur moyenne de chaque gîte, l'écart maximal mesuré représente de 0,8 ‰ (Porte-aux-Moines et La Rousselière, équivalent à l'incertitude analytique standard) à 3 ‰ de cette valeur. On peut donc considérer la signature isotopique de ces gîtes comme homogène.

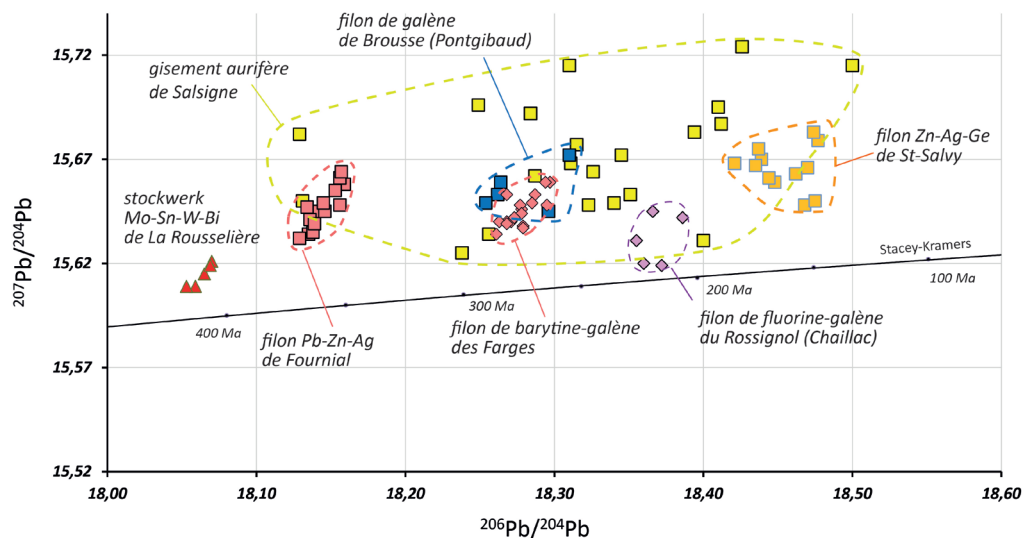
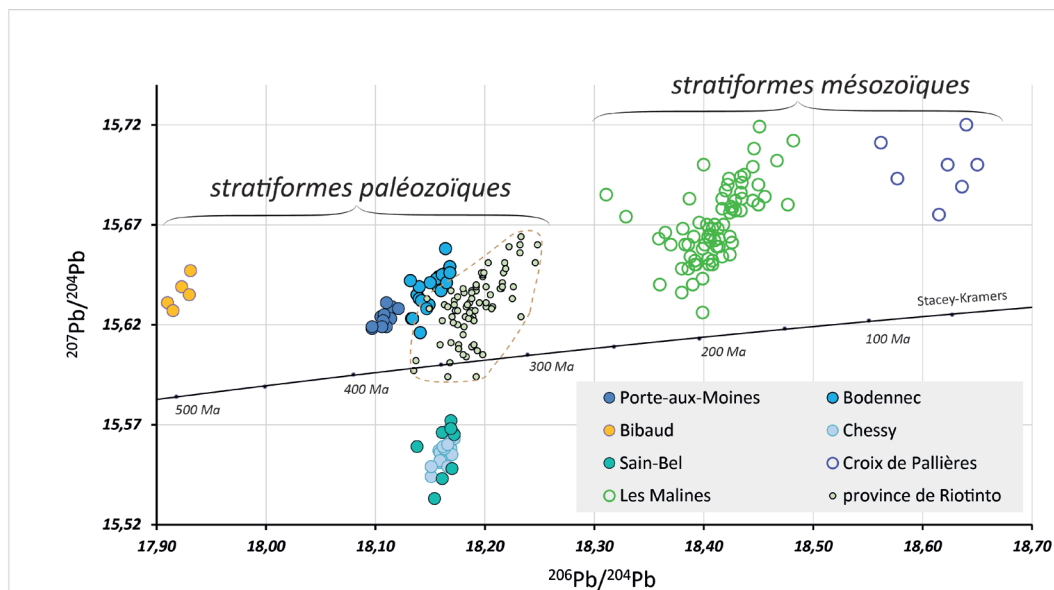


Figure 5.11 – Homogénéité et hétérogénéité isotopique de filons.

Figure 5.11 – Isotopic homogeneity and heterogeneity of veins.

Figure 5.12 – Homogénéité et hétérogénéité isotopique de gîtes stratiformes : comparaison avec les amas sulfurés de la province de Riotinto (Espagne et Portugal).

Figure 5.12 – Isotopic homogeneity and heterogeneity of stratiform deposits: comparison with the sulphide deposits of the Riotinto province (Spain and Portugal).



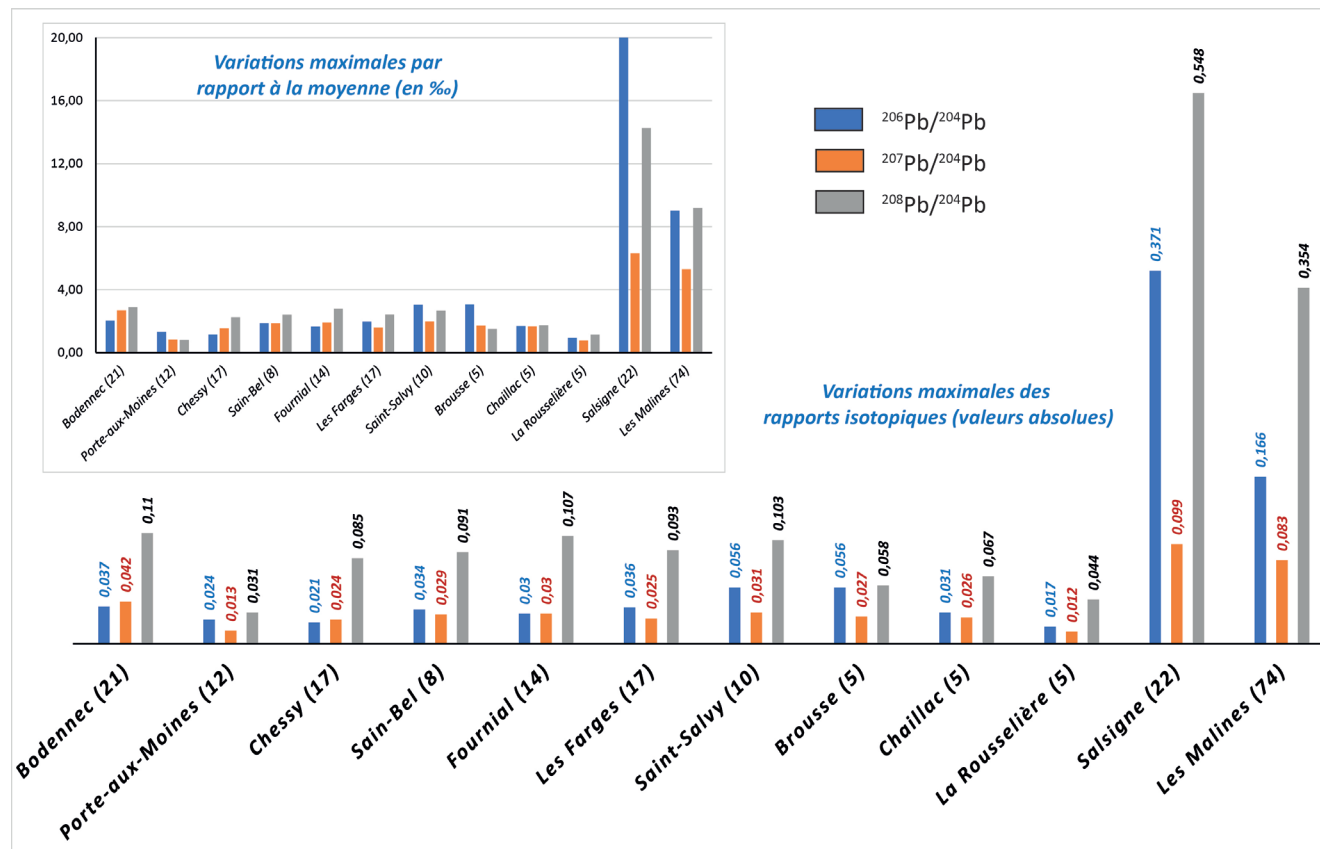


Figure 5.13 – Calculs des taux d'homogénéité pour différents types de gîtes.

Figure 5.13 – Calculations of homogeneity rates for different types of deposits.

site	analyses	type	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$					$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$					$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$				
			max	min	delta	moyenne	écart-type	max	min	delta	moyenne	écart-type	max	min	delta	moyenne	écart-type
Fournial	14	filon Pb-Zn-Ag	18,159	18,129	0,030	18,144	0,010	15,664	15,634	0,030	15,647	0,010	38,385	38,278	0,107	38,330	0,036
Les Farges	17	filon Ba-Pb-Ag	18,297	18,261	0,036	18,278	0,011	15,659	15,634	0,025	15,645	0,007	38,536	38,443	0,093	38,481	0,029
Saint-Salvy	10	filon Zn-Ag-Ge	18,477	18,421	0,056	18,454	0,019	15,679	15,648	0,031	15,666	0,010	38,583	38,486	0,103	38,552	0,032
Brousse	5	filon Pb-Zn-Ag	18,310	18,254	0,056	18,282	0,040	15,672	15,645	0,027	15,659	0,019	38,511	38,453	0,058	38,482	0,041
Chaillac	5	filonien et stratiforme F-Ba	18,386	18,355	0,031	18,371	0,022	15,645	15,619	0,026	15,632	0,018	38,529	38,462	0,067	38,496	0,047
La Rousselière	5	coupole périgranitique Mo-W	18,070	18,053	0,017	18,062	0,012	15,621	15,609	0,012	15,615	0,008	38,256	38,212	0,044	38,234	0,031
Salsigne	22	structure aurifère	18,500	18,129	0,371	18,319	0,089	15,724	15,625	0,099	15,673	0,028	38,733	38,185	0,548	38,426	0,144
Bodennec	21	amas sulfuré Zn-Cu-Pb	18,168	18,132	0,037	18,151	0,012	15,658	15,616	0,042	15,638	0,010	38,288	38,178	0,110	38,232	0,035
Porte-aux-Moines	12	amas sulfuré Zn-Cu-Pb	18,121	18,097	0,024	18,108	0,006	15,631	15,618	0,013	15,623	0,004	38,168	38,137	0,031	38,154	0,009
Chessy	17	amas sulfuré Zn-Cu	18,172	18,151	0,021	18,163	0,006	15,568	15,544	0,024	15,557	0,006	37,858	37,773	0,085	37,819	0,021
Sain-Bel	8	amas sulfuré Zn-Cu	18,172	18,138	0,034	18,162	0,011	15,572	15,543	0,029	15,557	0,014	37,866	37,775	0,091	37,828	0,032
Les Malines	74	stratiforme Zn-Pb	18,477	18,311	0,166	18,411	0,030	15,719	15,636	0,083	15,670	0,018	38,636	38,282	0,354	38,481	0,063

Tableau 5.3 – Variations des compositions isotopiques dans les gîtes de la figure 5.13.

Table 5.3 – Variations in isotopic compositions in the deposits of figure 5.13.

Cette constance est indépendante du type de gîte. On la retrouve dans des filons de différents types (plombo-zincifère de Fournial et Brousse, barytine-galène des Farges, zincifère de Saint-Salvy, fluorine du Rossignol) aussi bien que dans des sulfures stratiformes de type VMS (Chessy, Sain-Bel, Porte-aux-Moines, Bodennec) et SEDEX (Bibaud), impliquant soit une source unique, soit plusieurs sources avec une homogénéisation des fluides avant dépôt.

Cette constance requiert une formation très rapide de la minéralisation, la brièveté de l'épisode hydrothermal ne laissant pas le temps aux fluides hydrothermaux de modifier leur circuit et donc leur approvisionnement en métaux. La mise en place de la minéralisation se réalise lors d'un *pulse* hydrothermal très bref, ou en plusieurs *pulses* très rapprochés rassemblés d'un seul épisode qui a duré probablement moins de 1 Ma, comme dans le filon rubané des Farges, et à Chessy où on a distingué deux séquences successives. Dans le filon des Farges, les centres de couleurs des fluorines ont permis

de proposer une durée de l'ordre de 100 000 ans (Marcoux et Jébrak, 1987). Les isotopes du plomb fournissent donc un accès indirect à la durée de phénomènes hydrothermaux. On ne peut cependant pas en tirer de conclusion sur l'ampleur des circuits hydrothermaux : homogénéité ne rime pas avec échelle locale car une homogénéisation des fluides peut s'opérer à très grande échelle à condition d'avoir la perméabilité nécessaire (comme dans le district riche en roches volcanoclastiques de Riotinto, par exemple ; Marcoux, 1998).

5.2.2 - Variation de la signature isotopique : Les Malines et Salsigne

À l'opposé des cas présentés dans le paragraphe précédent, certains gîtes et gisements pour lesquels l'action d'un seul épisode hydrothermal apparaît très plausible, dessinent un « nuage » plus ou moins étendu de compositions isotopiques. Deux d'entre eux, les gisements, aurifère de Salsigne et zincifère des Malines, ont fait l'objet de mesures de leurs variations. Le caractère monophasé des Malines

n'est pas démontré, deux épisodes hydrothermaux au moins ayant pu s'y succéder au Trias et au Bathonien. Nous admettons ici un épisode unique bathonien.

Les variations sont très fortes : 0,166 (Les Malines) et 0,371 (Salsigne) pour $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 0,083 (Les Malines) et 0,099 (Salsigne) pour $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et 0,354 (Les Malines) et 0,548 (Salsigne) pour $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 5.13). L'écart maximal entre les valeurs mesurées représente de 8 à 20 ‰ de la valeur moyenne pour les deux rapports les plus variables $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ce qui est considérable. La variation est bien supérieure à celle observée dans l'ensemble de la ceinture pyriteuse de Riotinto, qui s'étend aujourd'hui sur plus de 250 km ! Puisque l'on peut exclure les phénomènes d'héritage, la cause est délicate à identifier et ne peut être proposée qu'au cas par cas.

Les variations de Salsigne sont difficiles à expliquer car c'est un gisement relevant d'un épisode hydrothermal unique. Mais il est très pauvre en plomb ce qui amplifie la moindre variation dans la source, dans un contexte lithologique justement très varié. On est donc conduit à proposer un système hydrothermal ayant sollicité de multiples sources et qui a déposé son contenu métal sans homogénéisation préalable.

Pour Les Malines, une genèse étalée sur plusieurs millions d'années qui laisserait aux fluides le temps de diversifier leur parcours et donc leurs sources de métaux, est une hypothèse cohérente pour expliquer les variations isotopiques. C'est l'interprétation proposée pour les gisements américains du type *Mississippi Valley Type* (MVT), où les études isotopiques du plomb montrent toujours d'énormes variations, bien supérieures à celles enregistrées dans la bordure cévenole (Cannon *et al.*, 1963 ; Doe et Delevaux, 1972), parfois à très petite échelle (Deloule *et al.*, 1986). Couplées avec les analyses isotopiques du soufre, ces résultats impliquent des transferts rapides et discontinus des fluides (Deloule et Turcotte, 1989). Toujours dans la bordure cévenole, on observe une variation comparable des compositions isotopiques dans le gisement voisin de La Croix de Pallières (et probablement dans les autres gîtes stratiformes mésozoïques), le plus faible nombre d'échantillons pouvant peut-être expliquer cette moindre variation.

6. Conclusion : acquis de l'isotopie du plomb pour la métallogénie de l'Hexagone

Peut-on identifier les apports de plomb dans l'histoire géologique de l'Hexagone ? Deux phénomènes géologiques, ubiquistes et fréquemment liés, apportent ce métal (et les autres) dans la croûte terrestre : le magmatisme, avec du plomb dispersé au sein des silicates (dans les feldspaths pour l'essentiel) de vastes ensembles rocheux, et l'hydrothermalisme, qui génère des concentrations polymétalliques très ponctuelles mais riches en plomb collecté au sein de roches-mères. En schématisant, l'écart de teneurs entre ces deux sources est d'un facteur 1 000 : 21 ppm dans un granite et 2 % dans les gîtes hydrothermaux. Un très modeste massif granitique de 1 km³ (soit 2,7x10⁹ t) contient donc 56 kt de plomb ! Une fois érodées, les roches magmatiques sont remaniées dans les sédiments, les feldspaths étant particulièrement abondants dans les grès arkosiques.

6.1 - Arrivées de plomb et époques métallogéniques

Schématiquement, on peut discerner trois grandes arrivées de plomb dans la croûte continentale de l'Hexagone, dénommées « épisodes » : cadomien, cambrien et hercynien, plus précisément Dévonien-Carbonifère (vers 419-299 Ma) (Fig. 6.1). Ces trois plombs sont tour à tour incorporés à la croûte, s'accumulant pour constituer un stock recyclable lors des événements géologiques ultérieurs, soit directement par lessivage hydrothermal des roches et/ou des minéralisations, soit indirectement par incorporation des feldspaths à des sédiments ensuite lessivés. Le décryptage de la source du plomb se complique plus on se rapproche de l'Actuel.

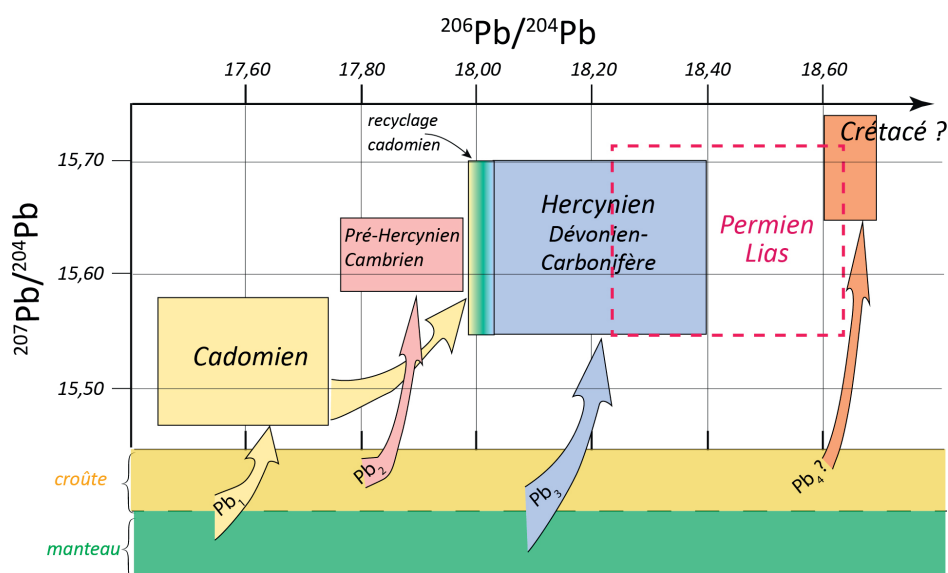
Plomb cadomien (~750 – 539 Ma)

Ce plomb est le moins radiogénique. Il est apporté essentiellement par le magmatisme, notamment l'important volcanisme, du cycle cadomien (~750 – 539 Ma) qui couvre pour l'essentiel l'Édiacarien, et l'hydrothermalisme associé qui génère les lentilles sulfurées de Saint-Georges-sur-Loire, possiblement issues d'olistolites provenant de la nappe des Mauges (et de Montmarçon dans la Marche). Il se caractérise par les rapports suivants : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 17,75$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 15,58$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} < 38,0$ qui dénotent une franche participation mantellique à relier à la subduction opérée à cette époque. On retrouve ce plomb mantellique dans les métagabbros et éclogites (plus tardifs) de Champtoceaux, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,757$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,47$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37,33$ à 37,42) ce qui implique une permanence du contexte mantellique dans cette région (cf. § 4.10).

On retrouve ce plomb mantellique dans les métagabbros et éclogites (plus tardifs) de Champtoceaux, ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,757$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,47$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37,33$ à 37,42) ce qui implique une permanence du contexte mantellique dans cette région (cf. § 4.10).

Figure 6.1 – Compositions isotopiques des différents plombs cadomien, cambrien et hercynien (et Crétacé ?) avec origine crustale et mantellique.

Figure 6.1 – Isotopic compositions of the different Cadomian, Cambrian and Hercynian (and Cretaceous?) leads with crustal and mantle origin.



Excepté Montmarçon, dans le nord du Massif central, tous les gîtes minéraux à plomb néoprotérozoïque se situent dans le domaine centre-nord armoricain (sulfures stratiformes protérozoïques et filons), et dans le synclinorium de Saint-Georges-sur-Loire (sulfures stratiformes édiacariens intégrés à des olistolithes), (Fig. 6.2). On peut dessiner deux domaines à « plomb cadomien », qui n'excluent pas des gîtes à plomb issu d'autres sources (Trémuson, Châtaudren...), celui de Basse-Loire se prolongeant probablement dans le nord du Massif central jusqu'à Montmarçon. Il est légèrement différent du plomb panafricain identifié au Maroc ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,74$ à $17,90$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,52$ à $15,575$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37,60$ à $37,82$; Marcoux et Jébrak, 2021) sur des gîtes édiacariens datés entre 574 et 550 Ma.

Plomb pré-hercynien (539 – 485 Ma)

Ce plomb est se caractérise par des valeurs s'étalant de $17,76$ à $17,98$ ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$), $15,58$ à $15,65$ ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et $37,77$ à $38,07$ ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$). Il est beaucoup plus discret, apporté par l'hydrothermalisme et le magmatisme cambrien associés au rifting pré-orogénique varisque. Il est présent dans les sulfures stratiformes SEDEX de Montagne Noire, les orthogneiss du Limousin, et dans le magmatisme et l'hydrothermalisme cambrien de la Mancellia (Montbelleux). Mais rien n'interdit que le magmatisme cambrien ait généré d'autres minéralisations stratiformes polymétalliques, comme possiblement à Sussac (Haute-Vienne).

Plomb hercynien (419 – 299 Ma)

Ce plomb est le plus largement distribué sur le territoire, le très important magmatisme hercynien qui s'étale sur presque 100 millions d'années ayant apporté des quantités considérables de plomb dans la croûte supérieure. Il est plus difficile de caractériser sa composition car de nombreux épisodes hydrothermaux et magmatiques se succèdent sur la période Dévonien-Carbonifère de 419 Ma à 299 Ma : chacun apporte sa contribution et peut recycler *pro parte* du plomb plus ancien.

Si on considère les amas sulfurés dévoniens d'une part, et le magmatisme hercynien (précoce de 340-326 Ma et tardif de 305-325 Ma) avec ses minéralisations périgranitiques associées d'autre part (étain, tungstène, bismuth, molybdène...) et l'événement « or 300 » (~ 295 à 305 Ma) avec ses filons aurifères (Limousin, Labessette) et antimonifères (Brioude-Massiac avec notamment Ouche et La Bessade, La Lucette...) qui clôt le cycle hercynien *sensu stricto*, on peut proposer les fourchettes de compositions suivantes : $18,03$ à $18,40$ ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, le rapport le plus discriminant), $15,55$ à $15,69$ ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) et $38,00$ à $38,50$ ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$).

Mais les convergences isotopiques sont la règle et compliquent les interprétations : deux épisodes hydrothermaux indépendants et diachrones comme l'amas sulfuré dévonien armoricain de Bodennec et le filon plombifère tardi-hercynien

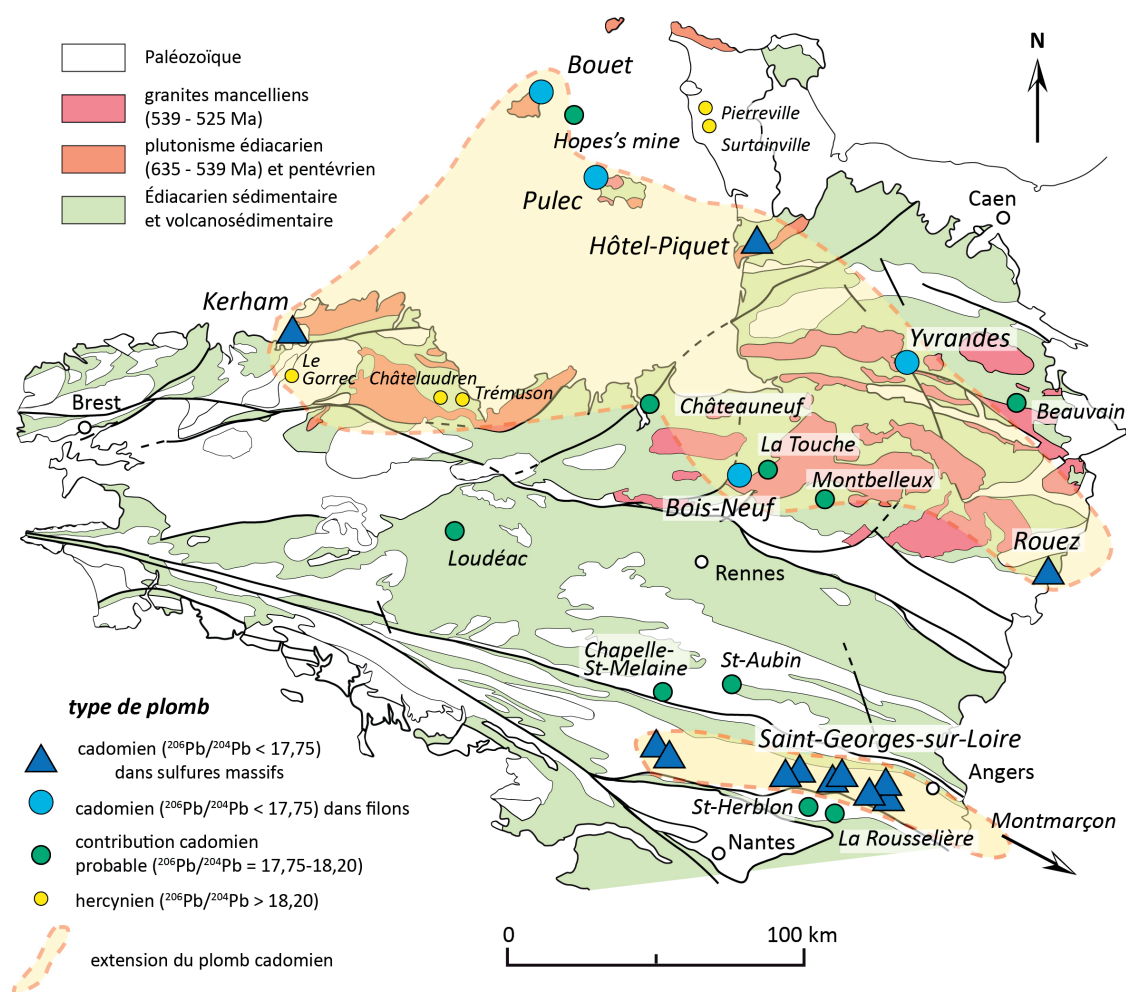


Figure 6.2 – Extension du plomb cadomien en Armorique.

Figure 6.2 – Extension of Cadomian lead in Armorica.

auvergnat de Fournial, par exemple, ont des compositions quasi identiques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 18,15$) alors qu'ils n'ont rien en commun ! Cette fourchette reste donc indicative, certains filons (Sainte-Marie-aux-Mines par exemple) n'étant pas datés et pouvant relever du fini-Hercynien vers 300 Ma, comme Saint-Salvy, ou du post-Hercynien.

Enfin les signatures particulièrement basses des berthiérîtes du Haut-Allier (avec un rapport $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 17,76 aux Borderies), systématiquement les plus basses dans les districts analysés, plaident pour un épisode antimonifère ancien mettant en place des filons à berthiérîtes (et or associé). L'épisode à 360 Ma (Pochon *et al.*, 2016b) proposé pour le filon du Semnon dans le Massif armoricain, a pu s'exprimer sur d'autres massifs anciens.

Post-Hercynien = un recyclage du stock des 3 plombs

Le magmatisme dans l'Hexagone se poursuit après le Carbonifère. Le volcanisme permien de l'Esterel et de Corse, et mésozoïque des Pyrénées a pu jouer un rôle de source pour les minéralisations mais il est très ponctuel. Vers 295-299 Ma, on peut considérer que le stock de plomb est constitué et contenu dans les deux sources, lithologique et gîtologique. Dès lors, il n'est plus question d'apport nouveau mais de recyclage : les circulations hydrothermales ultérieures vont piocher dans ces stocks, mélangeant différentes sources. La seule évolution, mais d'importance, est l'enrichissement en plomb radiogénique qui s'opère en permanence dans les roches à rapport μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) non nul, c'est-à-dire à peu près toutes. Cet enrichissement croissant avec le temps, plus l'hydrothermalisme est récent, plus il est susceptible de collecter du plomb radiogénique. Le champ des minéralisations post-hercyniennes va donc englober les valeurs les plus radiogéniques mais sera largement commun avec le plomb hercynien et aura bénéficié de multiples recyclages : on peut considérer que ses rapports $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ du plomb post-hercynien s'étendent de 18,20 à 18,90.

De nombreuses incertitudes demeurent quant à l'âge des filons post-hercyniens du territoire, un grand chantier à avancer... Néanmoins, les données disponibles, surtout d'ordre structural et stratigraphique, conjuguées aux datations existantes identifient deux épisodes hydrothermaux majeurs : au Permien et au Lias inférieur.

Au Permien un épisode hydrothermal uranifère s'exprime avec la mise en place des filons du Limousin et de Vendée bien datés vers 285 ± 10 Ma, suivi d'un épisode hydrothermal plombo-zincifère, probablement vers 280-250 Ma qui voit la mise en place des grands filons armoricains (Pontpéan, Huelgoat, Plélauff...), centraliens (Pontgibaud, Peyrebrune, Vialas...) et vosgiens (Sainte-Marie-aux-Mines, La Croix-aux-Mines). Le synchronisme de ces filons, bien que probable, reste à établir. Les compositions isotopiques varient beaucoup dans ces filons, reflétant des sources locales à plomb plus ou moins radiogénique.

Le second épisode hydrothermal majeur se déroule au Lias inférieur, vers 202 ± 10 Ma. C'est un hydrothermalisme de basse température sur marge passive lié à une thermicité de subsidence, consécutive à l'ouverture de l'Atlantique Nord et de l'Océan liguro-piémontais. Il s'étend sur toute l'Europe de l'Ouest (à l'exception notable du Massif armoricain) et

crée des filons à fluorine-barytine et souvent galène-sphalérite. Très invasifs, ces fluides infiltrent des roches diverses et opèrent une remobilisation de minéralisations préexistantes porteuses d'un plomb précoce moins radiogénique (Les Borderies, Le Deveix, Haut-Allier...). La coalescence des plombs « permien » et « liasique » vers 18,20 – 18,30 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) montre que la compréhension d'un gîte et d'un district doit prendre en compte toutes les données géologiques et minéralogiques.

Cet épisode liasique n'est pas l'épilogue de l'histoire hydrothermale métropolitaine. Les MVT stratiformes de la bordure cévenole se sont ainsi déposés au Trias ou, plus probablement, au Bathonien (166 – 168 Ma), très certainement en lien direct avec le rifting précoce puis l'ouverture à 160 Ma de l'océan liguro-piémontais.

Les âges du Crétacé inférieur mesurés dans les fluorines du Morvan (130 ± 15 Ma à Antully ; Gigoux *et al.*, 2015), du Tarn (111 ± 13 Ma ; Munoz *et al.*, 2005) et de Haute-Loire à Langeac et Chavaniac (120 à 101 Ma ; Marcoux *et al.*, 1990), s'ils sont confirmés, constituent peut-être une conséquence lointaine de la transtension le long de la faille nord-pyrénéenne ou de l'orogénèse alpine. Les âges du Jurassique supérieur (~ 146-156 Ma) dans des indices annexes de barytine-fluorine du Poitou-Millevaches (Cathelineau *et al.*, 2012), les adulaires datés à 56 et 59 Ma, et à 170 et 175 Ma respectivement à Lantignié et Voltennes (Baubron *et al.*, 1980) seraient à confirmer.

La subduction de l'Ibérie sous l'Europe amorcée dès le Crétacé supérieur vers 110 Ma a provoqué un hydrothermalisme à l'origine du talc de Luzenac (97-112 Ma ; Schärer *et al.*, 2002), des albitites des Pyrénées-Orientales (117,5 à 97,8 Ma ; Poujol *et al.*, 2010) et probablement d'une partie des minéralisations à plomb radiogénique du Canigou, avec peut-être un apport ponctuel de plomb crétacé puisé dans une croûte supérieure épaisse ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,324$ à 18,650 et $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,654$ à 15,751).

6.2 - Éléments de géodynamique : sources crustale et mantellique

Les compositions isotopiques du plomb des minéralisations peuvent tracer des terrains particuliers du socle, lorsque leurs signatures n'ont pas été trop diluées. Le plomb crustal, au sens de Stacey-Kramers et de Doe-Zartman, est largement dominant dans l'Hexagone. Cependant, le plomb cadomien et le plomb de la Brévenne possèdent des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ particulièrement bas, indiquant une participation notable du manteau comme source du plomb et traçant donc les paléo-océans. À l'inverse, les valeurs globalement élevées du rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ($> 15,70$) dans les Pyrénées traduisent la participation quasi-exclusive d'une croûte continentale supérieure suggérant un fort épaississement crustal plus précoce que celui, éocène, généralement admis.

Ponctuellement, des valeurs particulièrement élevées des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ont été mesurées. C'est le cas pour les filons à stibine de la Télachère en Vendée ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,727$ à 15,746 et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38,779$ à 38,925) et de Charbes dans les Vosges ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,735$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38,837$). Les valeurs élevées du rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ marquent une croûte continentale ancienne, alors que celle du rapport $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ trahissent la contribution de croûte inférieure. La région est certes le point de concours de domaines géolo-

giques très contrastés qui se reflètent dans ces compositions, mais des analyses complémentaires seraient nécessaires pour mieux la décrypter.

Si la théorie et les concepts de base de la géochimie isotopique du plomb ont relativement peu évolué depuis un demi-siècle (est-ce nécessaire dans la mesure où personne ne les a remis en cause ?), les exemples eux se sont multipliés et avec eux les implications sur les processus métallogéniques, notamment l'identification des sources des minéralisations.

Pour asseoir leur fiabilité, les interprétations des résultats isotopiques doivent impérativement s'appuyer sur les critères de terrain (une ou plusieurs structures minéralisées ? quels niveaux en contexte sédimentaire ?) et minéralogiques (une ou plusieurs étapes de dépôt permettant de soupçonner un recyclage ?).

Remerciements

Un grand merci à Denis Thiéblemont pour avoir assuré le suivi patient et la relecture très soignée de ce travail, à Julien Bernard qui en a permis la finalisation, à mon collègue Michel Faure pour avoir remis d'aplomb la géologie de la France et permis des interprétations plus justes, à Laurent Bailly (BRGM) de m'avoir aidé à compléter la galerie de photos au microscope métallographique et à Béatrice Cauuet (laboratoire TRACES, université de Toulouse) pour m'avoir fourni les photos des monnaies éduennes.

Je remercie également Michel Jébrak, mon ami et complice de très longue date, pour ses remarques toujours pertinentes et constructives et le reviewer anonyme, excellent connaisseur de l'isotopie du plomb, qui a « épluché » avec patience et compétence ce (long) manuscrit et permis de corriger des erreurs ou approximations.

Je ne voudrais pas oublier ici les Anciens qui ont collaboré de 1982 à 1986 à la première version de ce document, en noir et blanc et sans Windows : les minéralogistes Paul Picot, qui m'a formé à la métallographie avant de me confier sa relève, C. Laforêt et Y. Moëlo, les isotopistes J.-Y. Calvez et J.-C. Baubron, les métallogénistes J.-P. Milési, J.-L. Lescuyer, M. Jébrak à nouveau et tant d'autres de la grande maison BRGM d'alors.

Les informations de la «base indice» annexée à l'article sont extraites de la BSS du BRGM, patiemment rassemblées par Denis Thiéblemont. Un grand merci à lui et au BRGM.

Annexes

Annexe 1 - Données isotopiques

n°	site	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	remarques et précisions	minéral analysé	teneur Pb (ppm)	biblio	données utilisées pour bâtir les figures									
Massif armoricain									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
amas sulfurés stratiformes polymétalliques (SEDEX) - Édiacarien																		
	Rouez	17,700	15,564	37,689		Gn		(8)										
		17,677	15,546	37,627		Gn		(8)										
	Kerham	17,711	15,516	37,318		Gn		(19)										
amas sulfurés stratiformes polymétalliques (VMS)									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
Normandie-Pays de Loire (Édiacarien)																		
	Hôtel Piquet	17,338	15,460	37,233		Gn		(8)										
		17,347	15,449	37,209		Gn		(8)										
	La Haie-Claire	17,584	15,522	37,705	moyenne de 8 analyses	Gn		(19)										
		17,642	15,555	37,733		Gn		(19)										
	Fégréac	17,714	15,545	37,855		Gn		(19)										
		17,606	15,526	37,676		Gn		(19)										
	La Comterie	17,593	15,507	37,598	sondage DDH 4, 28.40 m	Gn		(19)										
		17,605	15,527	37,669	sondage DDH 4, 59.80 m	Gn		(19)										
		17,599	15,518	37,655	sondage DDH 4, 80.30 m	Gn		(19)										
	moyenne (4 an.)	17,601	15,520	37,650														
1	Belligné	17,706	15,549	37,786	sondage DDH 3, 32.10 m	Gn		(19)										
		17,720	15,569	37,861	sondage DDH 4, 50.90 m	Gn		(19)										
		17,713	15,568	37,872	sondage DDH 5, 102.20 m	Gn		(19)										
	moyenne (3 an.)	17,713	15,568	37,872														
2	Bois d'Ardennes	17,606	15,543	37,735	sondage DDH 1, 18.70 m	Gn		(19)										
3	Bois-Souchard	17,621	15,547	37,656	sondage DDH 2, 18.70 m	Gn		(19)										
		17,602	15,513	37,647	sondage DDH 2, 28.80 m	Gn		(19)										
4	Le Plessis	17,586	15,542	37,755	sondage DDH 3, 53.90 m	Gn		(19)										
5	La Priancière	17,636	15,526	37,657	sondage DDH 2, 73.40 m	Gn		(19)										
6	Le Retaud	17,616	15,553	37,763	sondage DDH 1, 28.10 m	Gn		(19)										
		17,628	15,540	37,783	sondage DDH 1, 30.90 m	Gn		(19)										
7	Pannecé	17,569	15,524	37,723	sondage DDH 1, 55.40 m	Gn		(19)										
		17,590	15,529	37,769	sondage DDH 1, 82 m	Gn		(19)										
Bretagne (Dévonien inférieur)																		
		18,108	15,623	38,153	sondage PAM 1 - 101.8 m	Gn												
		18,115	15,629	38,168	descenderie	S+Gn												
		18,105	15,624	38,165	sondage PAM 2 - 115.1 m	S+Gn												
		18,110	15,631	38,155	sondage PAM 1 - 133.5 m	S+Gn												
		18,114	15,623	38,152	sondage PAM 2 - 69.9 m	Gn												
		18,097	15,618	38,152	descenderie	S+Gn												
		18,110	15,619	38,143	sondage PAM 1 - 138 m	Gn												
		18,108	15,625	38,155	sondage PAM 1 - 99.4 m	Gn												
		18,121	15,628	38,159	sondage PAM 16 - 332 m	S+Gn												
		18,107	15,622	38,165	sondage PAM 15 - 104.9 m	S+Gn												
		18,106	15,619	38,143	sondage PAM 14 - 192.5 m	Gn												
		18,097	15,619	38,137	sondage PAM 14 - 196 m	Gn												
	moyenne (12 an.)	18,108	15,623	38,154														
		18,157	15,639	38,230	descenderie G 462 W, R 44 N	S+Gn												
		18,147	15,628	38,184	descenderie G 462 W, R 37 N	S+Gn												
		18,164	15,658	38,278	descenderie G 462 W, R 31 N	S+Gn												
		18,133	15,623	38,178	descenderie G 462 W, Al 102 N	S+Gn												
		18,158	15,644	38,288	descenderie G 417 E, PN 14,1 m	S+Gn												
		18,134	15,623	38,217	descenderie G 417 E, R 26 N	S+Gn												
		18,160	15,637	38,222	descenderie G 462 W, R 6 N	S+Gn												
		18,156	15,643	38,196	descenderie D 85 m, PE 25,2 m	S+Gn												
		18,138	15,635	38,207	descenderie G 462 W, R 162 N	S+Gn												
		18,165	15,646	38,264	descenderie G 462 W, R 162 N	S+Gn												
		18,141	15,616	38,207	descenderie G 462 W, Al 211,4 m	S+Gn												
		18,140	15,639	38,217	descenderie G 334 W, Al 67 m	S+Gn												
		18,132	15,642	38,234	descenderie G 462 W, R 130 N	S+Gn												
		18,161	15,645	38,276	descenderie G 462 W, R 130 N	S+Gn												
		18,168	15,649	38,288	descenderie G 400 W, R 15 S	S+Gn												
		18,165	15,641	38,261	descenderie G 400 W, al 8,2 m	S+Gn												
		18,150	15,641	38,243	descenderie G 340 E, Al 9,5 m	S+Gn												
		18,149	15,630	38,213	descenderie G 340 E, R 10 S	S+Gn												
		18,168	15,646	38,275	descenderie G 340 E, Al. 15 m	S+Gn												
		18,140	15,633	38,201	descenderie G 462 W, Al. 228,9 m	S+Gn												
		18,142	15,632	38,203	descenderie D 85 m, R 69 S	S+Gn												
	moyenne (21 an.)	18,151	15,638	38,232														
8	Menez Albot	18,111	15,649	38,247	sondage MAT 8, 91,7 m	Gn												
		18,107	15,633	38,196	sondage TAM 10	Gn												
		18,103	15,650	38,253	sondage TAM 83	Gn												
		18,095	15,642	38,248	sondage TAM 77	Gn												
	moyenne (4 an.)	18,104	15,643	38,236														
8	Menez Albot (amas est)	18,192	15,650	38,256	sondage MAT 9, 23,8 m	S+Gn												
9	Torhoat	18,129	15,649	38,259	sondage TOR 3, 152,7 m	S+Gn												
		18,135	15,651	38,270	sondage TOR 3, 150,9 m	Gn												
		18,130	15,639	38,242	sondage TOR 2, 55,5 m	Gn												
		18,182	15,671	38,315	amas 2 (sondage TOR 1, 93,2 m)	Gn												
	moyenne (4 an.)	18,144	15,653	38,272														
10	Leffo	18,093	15,631	38,190	sulfures disséminés dans Dévonien inférieur	Gn												
11	Les Essarts	18,094	15,629	38,188	sulfures disséminés dans Dévonien inférieur	Gn												
		18,089	15,623	38,168		Gn												
12	Allineuc	18,102	15,624	38,165	sulfures disséminés dans Dévonien inférieur	Gn												
		18,096	15,646	38,397		Gn		(9)										
		18,062	15,653	38,328		Gn		(9)										
		18,067	15,653	38,306		Gn		(9)										
		18,051	15,664	38,315	lentille polymétallique dans Ordovicien inférieur	Gn		(9)										
		18,083	15,660	38,350		Gn		(9)										
		18,043	15,652	38,278		Gn		(9)										
	moyenne (6 an.)	18,067	15,655	38,329														
minéralisations périgranitiques à W-Sn-As-Bi-(Au-Mo)									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
	Montbelleux 1	17,945	15,576	37,893	filon W-(Sn-Mo-Bi) cadomien	Gn												
		18,218	15,603	38,165		Gn												
	Beg an Fry	18,238	15,618	38,223														

n°	site	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	remarques et précisions	minéral analysé	teneur Pb (ppm)	biblio	données utilisées pour bâtir les figures									
filons quartzeux à uranium - plomb									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
56	La Villeneuve	18,488	15,653	38,482		Gn												
57	Le Hinglé (Ville-Hervé)	18,255	15,620	38,361		Gn												
58	Le Vouédec	18,425	15,647	38,372	pechblende et galène	Gn												
59	Quistiave	18,405	15,654	38,467	pechblende et galène	Gn												
60	Saint-Herbot	18,406	15,644	38,423		Gn												
		18,390	15,616	38,459	galène et minéraux uranifères	Gn												
lentilles stratiforme à plomb - zinc																		
	Les Sards	18,590	15,687	38,683	lentille dans jaspe hettangien	Gn												
	Melle	18,488 18,483	15,689 15,678	38,645 38,585	lentille galène-sphalérite dans dolomie du Domérien	Gn												
Massif central									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
amas sulfurés stratiformes polymétalliques (VMS et SEDEX)																		
Beaujolais-Brèvenne (VMS Dévonien)																		
	Bernay	18,227	15,554	37,922	village	Py	26	(14)	Fig. 6.5									
		18,243	15,580	37,982	sondage percuteur S 13/8	Py+Sp	55	(14)										
		18,307	15,612	38,118	sulfures disséminés (village)	Py	14,5	(14)										
		18,374	15,649	38,359	sulfures disséminés (sondage B 26 34,8 m)	Py+Cpy	134	(14)										
		18,521	15,623	38,457	sulfures disséminés (sondage percuteur S 2/20)	Py	16,3	(14)										
		18,370	15,602	38,194	sulfures disséminés (sondage percuteur S 4/4)	Py+Cpy	2,9	(14)										
		18,634	15,634	38,286	sulfures disséminés (sondage percuteur S 8/16)	Py	17,6	(14)										
		18,366	15,632	38,287	sulfures disséminés (sondage percuteur S 9/20)	Py+Cpy	4,4	(14)										
		18,355	15,621	38,134	sulfures disséminés (sondage percuteur S 12/16)	Py+Sp	7,8	(14)										
		18,159	15,551	37,814	stockwerk épisode I (descenderie)	Gn		(14)										
	Chessy	18,169	15,558	37,858	stockwerk épisode I (descenderie)	Py	53	(14)	Fig. 6.5									
		18,170	15,555	37,817	stockwerk épisode I (descenderie)	Py	58	(14)										
		18,160	15,553	37,803	séquence I (descenderie)	Gn		(14)										
		18,172	15,563	37,825	séquence I (descenderie)	Gn		(14)										
		18,158	15,557	37,820	séquence I (descenderie)	Gn		(14)										
		18,171	15,566	37,844	séquence II (sondage S 123A, 36,5 m)	Gn		(14)										
		18,168	15,563	37,832	stope	Gn		(14)										
		18,168	15,568	37,841	stope	Gn		(14)										
		18,159	15,556	37,815	stope	Gn		(14)										
		18,163	15,558	37,833	sondage sondage S123B, 38,3m	Sp	50	(14)										
		18,162	15,559	37,824	descenderie	Gn		(14)										
		18,159	15,552	37,800	sondage S5, 125,7 m	Gn		(14)										
		18,151	15,544	37,773	mine jaune	Gn		(14)										
		18,151	15,549	37,784	mine jaune	Gn		(14)										
		18,167	15,559	37,818		S+Gn		(14)										
		18,183	15,554	37,798		Py+Cpy	18	(14)										
		18,155	15,553	37,872	sulfures disséminés au toit de l'amas	Py	1 411	(14)										
		18,164	15,557	37,821														
	Chessy	18,173	15,571	37,872	goethite de gossan	Gth		(14)	Fig. 6.5									
		18,180	15,578	37,875	goethite de gossan	Gth		(14)										
		18,497	15,656	38,260	pyrite-chalcopryrite disséminées (sondage S5, 80,2 m)	Py	54	(14)										
		18,340	15,652	38,166	pyrite-chalcopryrite disséminées (sondage S5, 85,2 m)	Py+Cpy	155,2	(14)										
		18,636	15,632	38,201	pyrite-chalcopryrite disséminées (sondage S5, 88,0 m)	Py	209,6	(14)										
	Saint-Bel	18,161	15,566	37,843	collection (provenance précise ?)	Gn		(14)	Fig. 6.5									
		18,169	15,572	37,861	collection (provenance précise ?)	Gn		(14)										
		18,161	15,543	37,800	Saint-Antoine	Py	40,1	(14)										
		18,172	15,565	37,866	Saint-Antoine	Py	19,3	(14)										
		18,170	15,548	37,816	Gervais (sondage S8 07, 191 m)	Gn		(14)										
		18,154	15,533	37,775	Gervais (sondage S8 07, 185,3 m)	Sp+Gn		(14)										
		18,138	15,559	37,817	haldes Vieilles Mines	Gn		(14)										
		18,169	15,568	37,849	haldes Vieilles Mines	S+Gnp		(14)										
		18,162	15,557	37,828														
61	Savigny (Trésoncle)	18,189	15,553	37,835	lits pyriteux dans tuf Dévonien (sondage 9)	Py	146	(14)	Fig. 6.5									
62	Biesse	18,461	15,611	38,286	hydroxydes de fer et barytine	Gth	10,2	(14)										
63	Mas Saint-Jean	18,165 18,303	15,656 15,610	38,606 38,312	carrière	Py	14,2 4,0	(14)										
Marche (VMS Édiacarien)																		
	Montmarçon 1	17,650	15,546	37,764		Gn												
		17,654	15,562	37,812		Gn												
		17,678	15,563	37,818		Gn												
Montagne Noire (SEDEX Cambrien)																		
64	Argentières (La Balme)	17,912	15,629	38,034	calcaires dolomitisés du Cambrien moyen	Gn		(12)	Fig. 6.5									
65	Bibaud	17,931	15,647	38,052	calcaire dolomitisé du Cambrien inférieur	Gn		(12)										
		17,923	15,639	38,045	calcaire dolomitisé du Cambrien moyen (Tête Rousse)	Gn		(12)										
		17,910	15,631	38,057	calcaire dolomitisé du Cambrien moyen (Tête Rousse)	Gn		(12)										
		17,930	15,635	38,017	dolomies du Cambrien moyen (Bibaud Est)	Gn		(12)										
		17,915	15,627	38,002	dolomies du Cambrien moyen (Bibaud Est)	Gn		(12)										
		17,922	15,636	38,035														
66	Brusques	17,760	15,590	37,780	calcaires et schistes noirs du Cambrien	Gn		(7)										
	Condades	17,790	15,590	37,770		Gn		(7)										
67	Ferrals-les-Montagnes	17,900	15,620	37,960		Gn		(7)										
	La Loubatière	17,860	15,600	37,800		Gn		(7)										
68	Marcorcy	17,860	15,610	37,950		Gn		(7)										
69	Salsigne Est	17,946	15,623	38,025		Gn		(12)										
		17,941	15,630	37,991		Gn		(12)										
		17,943	15,626	38,026	stratiforme dans Cambrien inférieur (open pit)	Gn		(12)										
		17,982	15,651	38,072		Gn		(12)										
		17,953	15,633	38,029														
70	Villeneuve-Minervois	17,918	15,623	37,993	Cambrien supérieur	Gn		(12)										
Limousin (VMS Cambrien ?)																		
	Sussac	17,960	15,610	38,225	sulfures massifs plombo-zincifères "skarnifiés"	Gn		(20)										
Morvan (VMS Dévonien)																		
	Chizeuil	18,238 18,231	15,611 15,607	38,149 38,153	haldes	Gn		(14)										
filons et skarns à étain - tungstène-(As-Pb-Zn-Cu)									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
Auvergne (district de Pontgibaud)																		
71	Bapeyras	18,115	15,625	38,293	filon As-Zn-Pb-Cu	Gn		(2)										
72	Les Combres	18,144	15,646	38,343	filon As-Zn-Pb-Ag	Gn		(2)										
73	Les Peyrouses 1	18,180	15,645	38,332	filon Sn-As-(Pb-Sb)	Jam		(2)										
74	Les Sagnettes	18,124	15,628	38,299	filon As-Pb-Zn-(Sn, Cu)	Gn		(2)										
75	Mioche 1	18,185	15,653	38,361	filon Sn-As-(Pb-Sb)	Jam		(2)										
Forez-Bourbonnais																		
76	Arronnes	18,119	15,605	38,127	filon Sn-Bi-Cu-As	Gn												
77	Charrier 1	18,106	15,600	38,183	skarnoïde à Sn-Cu-Fe	Gn												
78	La Bombarde (Four à chaux)	18,102	15,604	38,153	skarn à galène	Gn												
79	Le Crozet	18,185	15,630	38,263	amas (skarn ?) Pb-Zn-As-Cu-Sb (jamesonite)	Gn												

n°	site	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	remarques et précisions	minéral analysé	teneur Pb (ppm)	biblio	données utilisées pour bâtir les figures										
Limousin																			
80	Bas-Bessous	18,120	15,630	38,303	filon As-Sn-W à galène	Gn	(20)												
81	La Bertrande	18,010	15,652	38,350	filon As-Sn-W à galène	Gn	(20)												
82	Moulin-Rousset	18,152	15,640	38,309	filon As-Sn-W à galène	Gn	(20)												
83	Moulin-Barret	18,159	15,651	38,331	filon As-Sn-W à galène	Gn	(20)												
Montagne Noire -Tarn																			
84	Bardou	18,420	15,670	38,500	filon As-Zn-Pb-(Cu)	Gn	(7)												
85	Lacaune (La Vernède, Bouissas)	18,441	15,695	38,498	filon As-Pb-Sb-(Cu-Ag)	Bour													
	Montredon	18,588	15,723	38,612	filon W-Sn	Gn													
86	Olargues	18,410	15,660	38,470	filon As-Zn-Pb-(Cu)	Gn	(7)												
filons et gîtes aurifères									2.2	2.4	2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Auvergne																			
87	Labessette (Communal)	18,200	15,639	38,392	filon aurifère polymétallique	Jam	(3)												
	duplicata	18,213	15,644	38,408		Jam	(3)												
		18,264	15,657	38,510		Gn	(3)												
		18,267	15,658	38,506		Gn	(3)												
		18,260	15,664	38,513		Gn	(3)												
		18,265	15,667	38,563		Boul	(3)												
		18,260	15,663	38,525		Boul	(3)												
	duplicata	18,256	15,659	38,494		Boul	(3)												
		18,253	15,646	38,451		Bour	(3)												
		18,263	15,655	38,467		Sem	(3)												
moyenne (7 an.)																			
87		18,234	15,645	38,460	filon aurifère polymétallique	Jam	(3)												
		18,235	15,648	38,442		Jam	(3)												
		18,273	15,657	38,467		Bour	(3)												
		18,285	15,672	38,551		Gn	(3)												
	duplicata	18,281	15,663	38,521		Gn	(3)												
moyenne (5 an.)																			
Cévennes																			
88		18,108	15,640	38,300		Jam													
		18,096	15,644	38,320		Jam													
		18,095	15,638	38,281		Gn													
		18,100	15,641	38,300															
88		18,269	15,663	38,492		Boul													
		18,232	15,697	38,568		Jam													
89	Bulidou (Malbosq)	18,323	15,649	38,574		Bour													
Limousin																			
90	Beaune-les-Mines	18,163	15,631	38,301		Gn	(20)												
91	Maranas	18,164	15,629	38,231		Gn	(20)												
92	Champvert	18,285	15,628	38,619	filon aurifère à barytine-galène	Gn													
93	Cheni	18,137	15,647	38,325		Gn	(20)												
94	Douillac	18,110	15,641	38,339		Gn	(20)												
95	Gendre	18,124	15,608	38,250		Gn	(20)												
96	Ladignac (Camp de César)	18,119	15,627	38,276		Gn	(20)												
97		18,260	15,632	38,475	filon aurifère à barytine-galène	Boul+Bour													
		18,216	15,624	38,398		Gn													
		18,289	15,656	38,522															
		18,255	15,637	38,465															
98	Laurières	18,155	15,639	38,320		Gn	(20)												
99	La Tournerie	18,130	15,649	38,331		Gn	(20)												
100	Le Bourneix (Cros Gallet)	18,058	15,593	38,167		Gn	(20)												
		18,047	15,589	38,159		Gn	(20)												
101	Lécuras	18,302	15,625	38,429	filon aurifère à barytine-galène	Gn													
102		18,118	15,628	38,278		Gn	(20)												
		18,090	15,622	38,255		Gn	(20)												
102		18,059	15,603	38,166		Gn	(20)												
		18,068	15,597	38,162		Gn	(20)												
Marche - Bourbonnais																			
	Le Châtelet	18,201	15,608	38,269		Gn													
	Viges	18,121	15,612	38,181		Jam													
	Meillers (corrigé à 300 Ma)	18,204	15,648	38,364	sinter siliceux aurifère	Py	(18)												
Montagne Noire																			
103	Nartau	18,345	15,661	38,439	filon aurifère (sommet schistes X)	S+Gn	40 (12)												
		18,131	15,650	38,574	filon Fontaine de santé	Gn													
		18,284	15,692	38,388	filon Fontaine de santé	Gn(+Gv)													
		18,310	15,715	38,426	filon Ramèles	S+Gn	2 500 (12)												
		18,311	15,668	38,354	niveau 10 (M1) (contact Dévonien -schistes X)	S+Gn	431 (12)												
		18,340	15,649	38,343	niveau 13 (M2) (contact Dévonien -schistes X)	S+Gn	250 (12)												
		18,287	15,662	38,338	niveau 14 (M4) (contact Dévonien -schistes X)	S+Gn	78 (12)												
		18,326	15,664	38,338	niveau 15 (M5) (contact Dévonien -schistes X)	S+Gn	149 (12)												
		18,238	15,625	38,215	niveau 10 (M6) (contact Dévonien -schistes X)	S+Gn	122 (12)												
		18,345	15,672	38,366	niveau 10 (M7) (contact Dévonien -schistes X)	S+Gn	125 (12)												
		18,552	15,718	38,546	M3 ; (sommet schistes X)	S+Gn	75 (12)												
		18,387	15,652	38,324	niveau 14 (M9) (sommet schistes X)	S+Gn	82 (12)												
		18,977	15,662	38,733	M10 ; (sommet schistes X)	Py	16 (12)												
		18,563	15,703	38,518	M17 ; calcschistes (Dévonien inférieur)	Py	30 (12)												
		18,423	15,688	38,540	M18 ; calcschistes (Dévonien inférieur)	S+Gn	278 (12)												
		18,609	15,707	38,428	toit filon 6 (M11) (grès et siltites, base Cambrien inférieur)	S+Gn	19 (12)												
		18,427	15,685	38,472	toit filon 6 (M12) (grès et siltites, base Cambrien inférieur)	S+Gn	344 (12)												
		18,351	15,653	38,291	grès et siltites, base Cambrien inférieur	Gn	(12)												
		18,280	15,635	38,185	M13 ; alternances gréséo-carbonatées (Cambrien inférieur)	Py	63 (12)												
		18,401	15,682	38,557	M14 ; alternances gréséo-carbonatées (Cambrien inférieur)	Py	80 (12)												
		18,257	15,697	38,328	M15 ; alternances gréséo-carbonatées (Cambrien inférieur)	S+Gn	580 (12)												
		18,716	15,739	38,723	M16 ; (sommet grès Cambrien)	S+Gn	3 (12)												
filons à antimoine - (plomb - zinc)									2.2	2.4	2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Auvergne																			
104	Champagnac	18,272	15,630	38,487		Jam													
105		18,151	15,608	38,252	filon antimonifère avec Pb-Zn-Ag	Sem													
		17,761	15,594	38,065		Btr	(13)												
		17,941	15,596	38,235		Jam1	(13)												
		17,956	15,602	38,244		Jam1	(13)												
		17,953	15,600	38,231		Jam1	(13)												
106		17,951	15,604	38,254	filon antimonifère avec Pb-Zn-Ag	And	(13)												
		17,969	15,616	38,294		Znk1	(13)												
		18,205	15,640	38,354	filon antimonifère avec Pb-Zn-Ag	Znk2	(13)												
	18,201	15,631	38,342	Znk2		(13)													
	18,205	15,643	38,363	Znk2		(13)													
	18,223	15,646	38,370	Sem		(13)													
	18,211	15,655	38,427	Sem		(13)													
		18,200	15,652	38,394	filon antimonifère avec Pb-Zn-Ag	Plg	(13)												
		18,218	15,640	38,381		Plg	(13)												
		18,219	15,641	38,345		Jam2	(13)												
		18,210	15,644	38,372															

n°	site	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	remarques et précisions	minéral analysé	teneur Pb (ppm)	biblio	données utilisées pour bâtir les figures									
107	Les Râcles	18,462	15,695	38,548		Znk		(2)										
108	Peschadoires	18,209	15,629	38,351	filon Sb-As-Pb-(Sn)	Jam		(2)										
	Mérinchal	18,005	15,686	38,360		Stb												
	Auliac	18,174	15,628	38,375	berthiérîte, stibine et fulôppite	Fül		(4)										
109	Gour d'Oùr	18,164	15,642	38,272	berthiérîte et jamesonite	Jam		(4)										
110	Le Céroux (stade 1)	18,097	15,613	38,203	stibine, sulfosels Pb/Sb et sidérite	Btr		(4)										
		18,170	15,632	38,259		Fül		(4)										
		18,181	15,639	38,293		Znk		(4)										
	Le Céroux (stade 2)	18,175	15,651	38,318		Jam		(4)										
		18,158	15,637	38,332		Jam		(4)										
		18,156	15,634	38,281														
		18,215	15,629	38,264	stibine, sulfosels Pb/Sb et sidérite	Boul		(4)										
		18,218	15,633	38,258		Boul		(4)										
111	Marmeissat	18,117	15,634	38,265	berthiérîte-sphalérîte-or	Btr												
112	Osfonds	18,102	15,635	38,207	stibine-berthiérîte-sphalérîte	Btr												
113	Les Anglais	18,240	15,636	38,428	semseyite-bournonite et barytine	Sem		(4)										
		18,218	15,630	38,373		Bour		(4)										
114	La Rodde (Saint Paul)	18,241	15,627	38,388	semseyite, bournonite, galène et barytine	Bour		(4)										
		18,234	15,621	38,378		Bour		(4)										
		18,226	15,621	38,364		Sem		(4)										
		18,232	15,633	38,381		Gn		(4)										
		18,233	15,626	38,378														
115	Bois de Madène	18,305	15,627	38,408	stibine, semseyite, zinkénite et barytine	Sem+Znk		(4)										
116	Communal Rougier	18,242	15,642	38,440	semseyite, bournonite brytine et fluorine	Sem												
Limousin																		
117	La Ribière	18,256	15,655	38,421	filon à galène et sulfosels Pb/Sb	Boul												
	Le Theil	18,463	15,626	38,587	stibine et sulfosels Pb/Sb	Plg												
Cévennes - Montagne Noire																		
118	Bournac	18,250	15,670	38,410	stibine, galène et or	Gn		(7)										
119	La Viane (Le Bouissas)	17,865	15,609	37,836	stibine, galène, zinkénite, scheelite	Gn												
120	Peyremale	18,335	15,669	38,532	stibine, semseyite, barytine	Sem												
121	Vidaren	18,396	15,670	38,755	stibine-fulôppite	Fül												
filons quartzeux à plomb - zinc - (argent)									2.2, 2.4, 2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	
Auvergne - Forez - Lyonnais																		
122	Le Cazaret	18,249	15,639	38,333		Gn												
123	Joursac	18,204	15,624	38,397		Bour												
		18,214	15,643	38,425		Gn												
		18,207	15,633	38,405		Gn												
124	Tortebesse	18,298	15,669	38,467		Gn		(2)										
		18,308	15,671	38,435		Gn		(2)										
125	Banson	18,224	15,647	38,477		Gn		(2)										
126	Granges de Pérol	18,271	15,659	38,486		Gn		(2)										
127	Rosier	18,255	15,648	38,450		Gn		(2)										
		18,268	15,663	38,486		Gn		(2)										
		18,262	15,654	38,465		Gn		(2)										
		18,266	15,646	38,469		Gn		(2)										
		18,232	15,646	38,451		Gn		(2)										
128	Roure	18,232	15,644	38,432		Gn		(2)										
		18,248	15,6475	38,45425				(2)										
		18,292	15,660	38,488		Gn		(2)										
		18,292	15,660	38,489		Bour		(2)										
		18,283	15,665	38,484		Gn		(2)										
131	Brousse	18,296	15,645	38,462		Gn		(2)										
		18,310	15,672	38,511		Gn		(2)										
		18,262	15,653	38,453		Gn		(2)										
		18,254	15,649	38,455		Gn		(2)										
		18,264	15,659	38,472		Gn		(2)										
132	Barbecot	18,293	15,655	38,466		Gn		(2)										
133	Vitrac 1 (filon Pb)	18,281	15,665	38,500		Gn		(2)										
134	Montmartin	18,322	15,665	38,519		Gn		(2)										
135	Belmont (Belmont l'Etain)	18,239	15,655	38,512		Gn		(4)										
136	Fournial	18,135	15,634	38,278	secteur à galène-cassitérite-stannite	Gn		(4)										
		18,139	15,645	38,320		Gn		(4)										
	Fournial	18,129	15,632	38,287	secteur à sulfosels Pb-Sb-Ag	Gn		(4)										
		18,134	15,647	38,329		Gn		(4)										
		18,146	15,645	38,320		Gn		(4)										
		18,159	15,658	38,364		Gn		(4)										
		18,136	15,641	38,312		Gn		(4)										
		18,138	15,635	38,285		Gn		(4)										
		18,145	15,649	38,339		Gn		(4)										
		18,139	15,639	38,300		Gn		(4)										
		18,156	15,661	38,376		Gn		(4)										
		18,157	15,664	38,385		Gn		(4)										
		1																

n°	site	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	remarques et précisions	minéral analysé	teneur Pb (ppm)	biblio	données utilisées pour bâtir les figures										
Forez - Bourbonnais																			
193	Nizerolles	18,658	15,665	38,791		Gn													
	<i>duplicata</i>	18,655	15,661	38,758		Gn													
194	Ramillard	18,610	15,651	38,695		Gn													
195	Le Poyet (Poyet bas)	18,720	15,657	38,741		Gn													
	Le Poyet (Poyet haut)	18,761	15,668	38,804		Gn													
196	Charrier 2	18,577	15,663	38,679	filon Pb-Ba tardif	Gn													
		18,543	15,646	38,634	filon Pb-Ba tardif	Gn													
		18,608	15,650	38,697	filon Pb-Ba de Sainte-Marie	Gn													
197	Contenson	18,620	15,643	38,693		Gn													
		18,678	15,651	38,724		Gn													
198	Grésolles (Grandchamp)	18,502	15,637	38,579		Gn													
199	Juré (la Mine)	18,522	15,641	38,620		Gn													
Limousin - Marche																			
200	Bretelle de Champvert	18,326	15,625	38,482		Gn													
		18,366	15,645	38,503	galène dans barytine rubanée (filon du Rossignol)	Gn													
		18,355	15,631	38,462		Gn													
	Chaillac	18,386	15,642	38,516	galène dans fluorine violette (filon du Rossignol)	Gn													
		18,360	15,620	38,529	galène dans fluorine ambrée (filon du Rossignol)	Gn													
		18,372	15,619	38,519	stratiforme, imprégnation d'arkose (Les Redoutières)	Gn													
	<i>moyenne (5 an.)</i>	18,368	15,631	38,506															
201	Champarnaud	18,389	15,648	38,529		Gn													
202	Jouhé	18,699	15,660	38,748	filon à barytine sécant sur filon à Sn-W	Gn													
203	L'Age	18,579	15,671	38,698		Gn													
204	Le Pérault (Peurot)	18,523	15,637	38,762		Gn													
	Meyrignac de Bar	18,569	15,658	38,642		Gn													
		18,575	15,664	38,649		Gn													
		18,486	15,647	38,618		Gn													
	Montmarçon 2	18,495	15,630	38,559		Gn													
		18,516	15,642	38,589		Gn													
	<i>moyenne (3 an.)</i>	18,499	15,640	38,589															
205	Puy-les-Vignes 2	18,582	15,706	38,815	filon barytine-galène sécant sur pipe à W	Gn													
	Rancon	18,622	15,665	38,779		Gn													
	Urciers	18,209	15,669	38,449		Gn													
	Chabrignac (La fromagerie)	18,529	15,668	38,650		Gn													
	Neuil (St-Pardoux-la-Rivière)	18,504	15,690	38,676		Gn													
Morvan																			
	Argentolle	18,646	15,669	38,709		Gn													
	Saint Prix (Les Molérats)	18,604	15,656	38,653		Gn													
Sud et Est Massif central																			
	La Nuizière	18,338	15,636	38,430		Gn													
	Le Burc	18,284	15,689	38,557		Gn													
	Le Kaymar (La Boule)	18,294	15,647	38,674		Gn													
206	Le Minié (St Geniez d'Olt)	18,324	15,633	38,516	filon à fluorine bleue, sidérite et galène	Gn													
	Upie	18,334	15,667	38,510	filon recoupé par sondage	Sem													
207	Saint-Julien du Gour	18,580	15,640	38,550		Gn	(7)												
	Sainte-Foy l'Argentière	18,495	15,624	38,569		Gn													
stratiforme à galène-sphalérite									2.2	2.4	2.5	3.2	3.3	3.4	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10
Cévennes																			
208	Bessouridès	18,465	15,687	38,629	brèche minéralisée dans Hettangien	Gn													
209	Bois-Madame	18,408	15,671	38,479	dolomies et schistes noirs (Kimméridgien)	Gn													
		18,408	15,668	38,483		Gn													
210	Cadeyer	18,538	15,684	38,695	Hettangien	Gn													
		18,603	15,672	38,749		Gn													
211	Mine Joseph	18,548	15,697	38,731	grès (Trias basal)	Gn													
		18,518	15,674	38,660	grès (Trias basal)	Gn													
		18,581	15,696	38,762	imprégnations dans grès (Trias basal)	Gn													
	<i>moyenne (3 an.)</i>	18,549	15,689	38,718															
		18,615	15,675	38,793	amas principal : dolomies et schistes noirs (Hettangien)	Gn													
		18,650	15,700	38,831		Gn													
		18,623	15,700	38,799		Gn													
	Croix de Pallières	18,562	15,711	38,712	colonne du puits : Lotharingien (Sinémurien supérieur)	Gn													
		18,577	15,693	38,754	amas du mur : Trias	Gn													
		18,636	15,689	38,793	galène concrétionnée dans Hettangien	Gn													
		18,640	15,720	38,865	filonnet tardif dans Hettangien	Gn													
	<i>moyenne (7 an.)</i>	18,615	15,698	38,792															
212	Durfort (Grande Vernissière)	18,461	15,687	38,531	Lotharingien (Sinémurien supérieur)	Gn													
		18,460	15,673	38,513		Gn													
	Galès (Millau)	18,400	15,640	38,590	"filon" dans les calcaires du Carixien	Gn	(7)												
213	La Maline	18,947	15,690	38,897	"filon" dans grès du Trias	Gn													
		18,455	15,643	38,536		Gn	(10)												
214	La Boissière	18,469	15,665	39,617	nodules dans dolomie grise (Bathonien)	Gn	(10)												
		18,491	15,673	39,616		Gn	(10)												
	<i>moyenne (3 an.)</i>	18,472	15,660	39,256															
215	La Parade	18,686	15,698	38,869	imprégnations dans arkoses (Trias basal)	Gn													
216	Pradinas	18,503	15,675	38,664	Trias	Gn													
	Largentière	18,280	15,630	38,370	arkoses (Trias)	Gn	(7)												
		18,310	15,650	38,430		Gn	(7)												
	Le Bleymard	18,590	15,660	38,620	dolomies (Hettangien)	Gn	(7)												
217	Les Combettes (Nozières)	18,510	15,670	38,660	"filon" dans dolomies (Hettangien)	Gn	(7)												
		18,360	15,640	38,400	La Gardie : karst dans dolomies du Cambrien	Gn	(7)												
		18,370	15,660	38,450	Sanguinède : karst dans dolomies du Cambrien	Gn	(7)												
		18,329	15,674	38,422	Mars 1 : karst dans dolomies du Cambrien	Sp	(11)												
		18,311	15,685	38,282	Montdardier (karst dans dolomies du Cambrien)	Py	(11)												
		18,383	15,660	38,449		Py	(11)												
		18,386	15,660	38,433		Py	(11)												
		18,380	15,636	38,504	Montdardier (karst dans dolomies du Cambrien)	Sp	(11)												
		18,405	15,668	38,473		Sp	(11)												
		18,445	15,682	38,515		Sp	(11)												
		18,400	15,700	38,600		Py	(7)												
		18,410	15,670	38,480	Montdardier (Trias basal)	Gn	(7)												
		18,450	15,680	38,510		Gn	(7)												
		18,388	15,654	38,436		Sp	(11)												
		18,390	15,640	38,461		Sp	(11)												
		18,406	15,665	38,450		Gn	(11)												
		18,406	15,662	38,477		Sp	(11)												
		18,399	15,643	38,429		Gn	(11)												
		18,404	15,653	38,450		Gn	(11)												
		18,445	15,699	38,576		Gn	(11)												

n°	site	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	remarques et précisions	minéral analysé	teneur Pb (ppm)	biblio	données utilisées pour bâtir les figures																				
231	Crabioules	18,091	15,700	38,323	Ordovicien	Gn		(15)																					
	Taichougnes (St-Paul-de-Jarrat)	18,023	15,664	38,217	Dévonien	Gn		(15)																					
	Nerbiou	18,106	15,698	38,320	Dévonien	Gn		(15)																					
	<i>duplicata</i>	18,109	15,701	38,330		Gn		(15)																					
	Gèdre	18,153	15,711	38,357	calcaire (Siegénien)	Gn		(15)																					
	Arrens (Peyrardanne)	18,095	15,702	38,312	galène massive (Dévonien)	Gn		(15)																					
	Carboire	17,999	15,662	38,209	Dévonien	Gn		(15)																					
	<i>duplicata</i>	17,999	15,664	38,197		Gn		(15)																					
skarn à tungstène - (or, bismuth)																													
	Costabonne	18,469	15,695	38,537		Gb		(15)																					
	Salau	17,998	15,662	38,195		Gn																							
filons aurifères - (As-Pb-Ni-Cu)																													
232	Glorianes	18,400	15,678	38,412		Gn		(15)																					
233	Lo Naret	18,461	15,713	38,625		Gn		(15)																					
234	Vivès	18,349	15,600	38,551		Gn		(15)																					
filons et disséminations à plomb - zinc - (antimoine)																													
235	Aulus (l'Argentière)	18,068	15,689	38,296	calcaires et dolomies (Dévonien)	Gn				2,2, 2,4, 2,5	3,2	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	3,9	3,10											
	Arre	18,465	15,688	38,698	filon Pb-Zn-Ni-Co-As dans calcaires dévoniens	Gn																							
	Argut 2	18,110	15,671	38,245	filon à sulfosels Sb-Pb-Cu	Meg Bour																							
		18,110	15,665	38,226																									
	Col de la Redoute	18,497	15,693	38,694	filon Pb-Zn-Cu dans socle cambro-ordovicien	Gn		(15)																					
237	Coum-Arty	18,382	15,705	38,652	filon Pb-Cu dans calcaire griotte (Dévonien supérieur)	Gn																							
238	Foncouverte (Caixas)	18,351	15,706	38,798	filon plombo-zincifère avec cuivre	Gn																							
239	Gironella	18,437	15,697	38,668	socle cambro-ordovicien	Gn		(15)																					
240	Gavarrie	18,400	15,693	38,603	galène-sidérite dans socle cambro-ordovicien	Gn																							
241	Jurvielle (Es Garados)	18,512	15,743	38,727	lentille stratiforme manganèse-sulfures (Dinantien)	Boul																							
242	La Raillière (Héas)	18,568	15,724	38,887	Ordovicien	Gn																							
243	Le Couret	18,554	15,709	38,847	filon à galène-quartz-barytine dans socle ordovicien	Gn																							
stratiforme à plomb-zinc dans Crétacé																													
	Col de la Lauze	18,286	15,674	38,523		Gn																							
	244	Plateau d'Allans	18,396	15,682	38,571		Gn																						
stratiforme à zinc, plomb, cuivre, fer, barytine, fluorine dans cambro-ordovicien (Canigou)																													
245	Escaro	18,516	15,679	38,743	fluorine avec plomb-zinc	Gn		(15)		2,2, 2,4, 2,5	3,2	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	3,9	3,10											
	Can-Pey	18,986	15,699	39,207	sulfures de zinc-fer-plomb	Gn		(15)																					
	La Manère	18,052	15,663	38,150	sulfures de zinc-fer-plomb	Gn		(15)																					
	Oms	18,655	15,716	38,928	lentille Cu-Zn-Pb avec sidérite	Gn		(15)																					
	Pia d'Amont	19,026	15,734	39,417	fluorine avec plomb-zinc	Gn		(15)																					
	Pixerot	18,510	15,676	38,790	sulfures de zinc-fer-plomb	Gn		(15)																					
	Puig-Cabrera	18,622	15,683	38,737	sphalérite -galène-barytine	Gn		(15)																					
	Valmanya	18,633	15,705	38,940	sphalérite -galène-barytine	Gn		(15)																					
	Alpes																												
	skarnoïde à cuivre - étain - (bismuth)																												
		Lautaret (Col du Lautaret)	18,513	15,641	38,484		Aik																						
		18,504	15,655	38,494		Gn																							
filons à plomb - zinc - cuivre (argent, antimoine)																													
252	Chauvetane	18,379	15,656	38,443		Gn				2,2, 2,4, 2,5	3,2	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	3,9	3,10											
253	Gros-Villan	18,811	15,659	38,767		Gn																							
254	Le Crozat	18,532	15,660	38,668		Gn																							
	<i>duplicata</i>	18,518	15,653	38,664		Gn																							
255	Le Roux (Saint-Maurice-en-Valgaudemar)	18,473	15,695	38,738	fluorine	Gn																							
256	Lac de Cristol	18,277	15,648	38,422	sécant sur Houllier	Gn																							
257	Montchabert	18,317	15,642	38,513		Gn																							
258	Notre-Dame-de-la-Gorge	18,378	15,655	38,583		Gn																							
	Oulles (filon Hercule)	18,388	15,651	38,580	filon avec barytine	Gn																							
	<i>duplicata</i>	18,391	15,647	38,611		Gn																							
259	Sainte-Marie de Fouilly	18,498	15,651	38,607	filon de barytine	Bour																							
260	Tende	18,824	15,665	38,855	pélites du Permien	Gn																							
261	Tigello	18,323	15,667	38,496		Gn																							
	Tortissa	18,670	15,674	38,536		Gn																							
	Vallauria	18,445	15,668	38,474		Gn																							
262	Vallon de Merlier	18,421	15,687	38,606		Gn																							
filons à plomb - zinc - (cuivre, antimoine) et stratiformes associés																													
263	Les Bréziers	18,403	15,677	38,706	Domérien	Bour																							
		18,425	15,686	38,714		Gn																							
	Les Cougnasses	18,693	15,668	38,941	marnes (Dogger)	Znk		(16)																					
		18,696	15,675	38,944		Boul		(16)																					
	Peyreire	18,544	15,682	38,862	dolomies (Jurassique)	Gn																							
	Riou-Beyrou	18,400	15,690	38,745	spilites (Trias)	Plg+Boul																							
	Saint-Pons (Seyne)	18,698	15,702	39,038	marnes (Dogger)	Znk Boul																							
		18,668	15,682	38,932																									
stratiformes à plomb - zinc - (cuivre, argent)																													
	La Plagne	18,389	15,664	38,511	avec barytine dans Permo-Trias	Gn																							
	265	Les Prés	18,688	15,669	38,843	calcaires argoviens	Gn																						
266	Saint-Pierre Péone	18,346	15,677	38,457	dolomies (Trias)	Gn																							
	L'Argentière - La Bessée	18,422	15,666	38,552	lentille Pb-Ag-Zn-(Cu-Sb) et barytine dans Trias	Gn																							
Maures - Esterel - Corse																													
2,2, 2,4, 2,5 3,2 3,3 3,4 3,6 3,7 3,8 3,9 3,10																													
filons à plomb - zinc																													
267	Faucon l'Argentière	18,499	15,688	38,736	filon plombo-zincifère avec fluorine	Gn																							
	Le Verger	18,445	15,694	38,812		Gn																							
	Les Bormettes	18,445	15,700	38,818	filon Pb-Zn-Cu-Ni	Gn																							
268	Vaucron	18,465	15,667	38,658	filon Pb-Zn-Cu-As	Gn																							
stratiforme à galène-sphalérite																													
	Finosa (Fontana Rossa)	18,582	15,667	38,702	tuf du Permien	Gn																							

Tableau annexe 1.1 – Données isotopiques brutes complètes des minéralisations. Les numéros de référence sont ceux figurant sur les cartes de situation. Les données utilisées pour construire les figures 2.2, 2.4, 2.5, 3.2, 3.3, 3.4, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 et 3.10 sont indiquées par des cases colorées dans les dernières colonnes.

Appendix Table 1.1 – Complete raw isotope data of the mineralizations. The reference numbers are those appearing on the situation maps. The data used to construct Figures 2.2, 2.4, 2.5, 3.2, 3.3, 3.4, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 and 3.10 are indicated by colored boxes in the last columns.

Sulfures et séléniures analysés - Aik = aikinite ; And = andorite ; Btr = berthierite ; Boul = boulangerite ; Bour = bouronite ; Cpy = chalcopyrite ; Clt = clausthalite ; Fül = fülöppite ; Gb = galénobismutite ; Gc = géocronite ; Gn = galène ; Gth = goethite ; Gv : gustavite ; Jam = jamaconite ; Meg = ménéginitite ; Plg = plagiogénite ; Py = pyrite ; S+Gn = sulfures divers dont galène ; Sem = semseyite ; Sp = sphalérite ; Sp+Gn = sphalérite avec galène ; Stb = stibine ; Znk= zinkénite

Sulfides and selenides analyzed - Aik = aikinite ; And = andorite ; Btr = berthierite ; Boul = boulangerite ; Bour = bouronite ; Cpy = chalcopyrite ; Clt = clausthalite ; Fül = fülöppite ; Gb = galenobismutite ; Gc = geocronite ; Gn = galena ; Gth = goethite ; Gv: gustavite ; Jam = jamaconite ; Meg = meneginitite ; Plg = plagiogénite ; Py = pyrite ; S+Gn = various sulphides including galena ; Sem = semseyite ; Sp = sphalerite ; Sp+Gn = sphalerite with galena ; Stb = stibnite ; Znk= zinkenite

Analyses dans Marcoux (1987) [incluant (1) : Marcoux *et al.* (1984) ; (2) : Marcoux et Picot (1985) ; (3) : Marcoux *et al.*, 1985 ; (4) : Marcoux et Bril (1986) ; (5) : Marcoux et Jébrak (1987), reprises pour l'essentiel des gîtes armoricains dans (6) : Marcoux (2017)], sauf : (7) : Brévar *et al.* (1982) ; (8) : Deschamps *et al.* (1994) ; (9) : Gloaguen *et al.* (2007) ; (10) : Le Guen et Lancelot (1989) ; (11) : Le Guen *et al.* (1991) ; (12) : Le Guen *et al.* (1992) ; (13) : Marcoux *et al.*

roche analysée	localisation	analyse	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
Massif armoricain							
granitoïdes hercyniens et tardi-hercyniens							
massif de Rostrenen - Plélauff							
granite porphyroïde (319 ± 8 Ma)	Glomel	FK	18,215	15,641	38,278		
granite à biotite leucocrate (319 ± 8 Ma)	Locrio (Guern)	FK	18,268	15,637	38,229	8,2	14,1
		RT	18,645	15,650	38,434		
		RT à 270 Ma	18,333	15,641	38,264		
		RT à 250 Ma	18,360	15,642	38,278		
granite porphyroïde (319 ± 8 Ma)	Locoal (Plouguernével)	FK	18,193	15,619	38,197	10,2	44,3
		RT	18,663	15,667	38,840		
		RT à 270 Ma	18,274	15,624	38,306		
		RT à 250 Ma	18,307	15,626	38,350		
granite leucocrate (319 ± 8 Ma)	Prat Mérien (Persquen)	FK	18,164	15,615	38,064		
granodiorite (319 ± 8 Ma)	Guendoll (Plélauff)	FK	18,257	15,611	38,201	10,7	60,1
		RT	18,753	15,666	39,072		
		RT à 270 Ma	18,342	15,616	38,349		
		RT à 250 Ma	18,377	15,618	38,409		
massif leucogranitique de Bubry-Pontivy							
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Kerlec'h (Lignol)	FK	18,309	15,639	38,201	26,1	10,9
		RT	19,741	15,687	38,388		
		RT à 300 Ma	18,356	15,642	38,207		
		RT à 270 Ma	18,483	15,649	38,223		
		RT à 250 Ma	18,567	15,654	38,234		
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Toulhouët (Inguiniel)	FK	18,276	15,600	37,949	18,6	28,2
		RT	19,296	15,654	38,433		
		RT à 300 Ma	18,309	15,602	37,965		
		RT à 270 Ma	18,400	15,607	38,007		
		RT à 250 Ma	18,460	15,611	38,035		
leucogranite porphyroïde (311 ± 5 Ma) <i>μ et W admis égaux à Toulhouët</i>	L'Échantillon (Pontivy)	FK	18,302	15,621	38,140	18,6	28,2
		RT à 300 Ma	18,335	15,623	38,156		
		RT à 270 Ma	18,426	15,628	38,198		
		RT à 250 Ma	18,486	15,632	38,226		
leucogranite (311 ± 5 Ma)	Le Vouëdec (Berné)	FK	18,256	15,641	38,742	13	30
		RT	18,969	15,679	39,257		
		RT à 300 Ma	18,279	15,642	38,759		
		RT à 270 Ma	18,342	15,646	38,804		
		RT à 250 Ma	18,384	15,648	38,834		
leucogranite mylonitisé (311 ± 5 Ma)	Guilligomarc'h	FK	18,289	15,640	38,284	13	15
		RT	19,002	15,674	38,542		
		RT à 300 Ma	18,312	15,641	38,292		
		RT à 270 Ma	18,375	15,645	38,315		
		RT à 250 Ma	18,417	15,647	38,330		
leucogranite grossier (304 Ma ± 5 Ma)	Langonnet	FK	18,992	15,705	38,409	60,3	13
		RT	21,863	15,822	38,603		
		RT à 250 Ma	19,519	15,736	38,444		
massif de Questembert							
leucogranite	Questembert	FK	18,447	15,665	38,371		
		FK	18,350	15,658	38,349		
massif de Lanvaux							
granite de Lanvaux (380 Ma)	Baud	FK	18,115	15,621	37,963	9,8	64,8
		RT	18,708	15,627	39,193		
		RT à 270 Ma	18,291	15,632	38,321		
		RT à 250	18,322	15,622	38,386		
massif de Plouaret							
granodiorite (329 Ma ± 5 Ma)	Bégard	FK	18,285	15,611	38,162	10,8	41,8
		RT	18,851	15,636	38,848		
		RT à 270 Ma	18,389	15,617	38,286		
		RT à 250 Ma	18,423	15,620	38,328		
granite porphyroïde (329 Ma ± 5 Ma)	Le Ponthou	FK	18,350	15,619	38,337	14,8	19,7
		RT	19,123	15,636	38,661		
		RT à 270 Ma	18,509	15,628	38,402		
		RT à 250 Ma	18,539	15,625	38,415		
massif de Huelgoat							
granite à cordiérite (342 - 336 Ma)	Kerbizien (Huelgoat)	FK	18,245	15,634	38,167	7,5	3,6
		RT	18,647	15,631	38,227		
		RT à 270 Ma	18,325	15,639	38,179		
		RT à 250 Ma	18,350	15,633	38,182		
granite à grain fin (342-336 Ma)	Le Cloître (Huelgoat)	FK	18,243	15,596	38,117	13,7	25,3
		RT	18,976	15,638	38,542		
		RT à 270 Ma	18,390	15,605	38,201		
		RT à 250 Ma	18,434	15,605	38,226		

roche analysée	localisation	analyse	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
massif de Ploumanac'h							
granite rouge (4)	Ploumanac'h	FK	18,355	15,611	38,270		
		FK	18,256	15,594	38,150		
		FK	18,218	15,603	38,150		
		FK	18,221	15,600	38,110		
		FK	18,301	15,591	38,130		
autres magmatismes							
trondjhémite de Douarnenez							
trondjhémite (473 ± 23 Ma)	Douarnenez	FK	17,510	15,605	37,889		
		RT	18,800	15,677	38,989		
		RT à 250 Ma	18,143	15,644	38,430	17,3	48,2
		RT à 270 Ma	18,087	15,641	38,382		
granites manceilliens							
granite (540 - 521 Ma)	Alexain	FK	17,915	15,586	37,802		
granite (540 - 521 Ma)	Athis	FK	17,538	15,517	37,583		
granite (540 - 521 Ma)	Bonnemain	FK	17,609	15,535	37,643		
granite (540 - 521 Ma)	Louvigné	FK	17,561	15,534	37,634		
		FK	17,543	15,515	37,569	3,5	19,3
		RT	17,900	15,553	38,199		
granite (540 - 521 Ma)	Vire	FK	17,564	15,519	37,587	3,5	19,9
		RT	17,920	15,556	38,205		
		FK	17,635	15,562	37,675	6,5	5,8
RT	18,010	15,534	37,703				
socle métamorphique							
micaschistes briovériens (600 Ma)	Pontivy	RT	18,602	15,633	38,566		
		RT à 600 Ma	17,948	15,594	37,921	6,7	21,4
		RT à 250 Ma	18,337	15,619	38,324		
amphibolite (~ 400 Ma)	Cap Sizun	FK	18,066	15,510	37,686		
		RT	18,143	15,511	37,964	1,2	13,9
		RT à 270 Ma	18,091	15,512	37,777		
gneiss oeilé (~ 400 Ma)	Le Pellerin	FK	19,267	15,665	39,239		
		RT	22,423	15,815	42,487		
orthogneiss (6)	La Picherais	FK	17,635	15,481	37,598		
Éclogites (5)	horst des Essarts	RT	19,725	15,793	38,770		
		RT	18,588	15,620	38,120		
		RT	19,285	15,749	38,730		
		RT	18,871	15,702	38,530		
		RT	18,132	15,561	37,750		
		RT	18,210	15,559	38,010		
	Champtoceaux	RT	18,594	15,540	38,020		
		RT	18,499	15,537	37,950		
Métagabbro (5)	Champtoceaux	RT	17,757	15,466	37,330		
		RT	17,796	15,488	37,420		
Massif central							
granites du Limousin - Auvergne							
leucogranite des Millevaches (~315 Ma) (4)	Saint-Julien-aux-Bois	FK	18,337	15,638	38,480		
		RT	18,853	15,665	38,700		
		RT à 300 Ma	18,362	15,639	38,491	10,3	14
		RT à 200 Ma	18,528	15,649	38,561		
leucogranite St-Yrieix (~310 Ma) μ et W admis à 12 et 40 (moyennes de granites)	Saint-Yrieix	FK	18,207	15,610	38,189		
		RT à 300 Ma	18,227	15,611	38,209	12	40
		RT à 200 Ma	18,420	15,622	38,409		
leucogranite des Millevaches (~315 Ma) (4) μ et W admis égaux à Saint-Julien	Saint-Mathieu	FK	18,193	15,653	38,330		
		RT à 300 Ma	18,218	15,654	38,341	10,3	14
		RT à 200 Ma	18,384	15,664	38,411		
leucogranite des Millevaches (~315 Ma) (4) μ et W admis égaux à Saint-Julien	La Brême	FK	18,212	15,640	38,300		
		RT à 300 Ma	18,237	15,641	38,311	10,3	14
		RT à 200 Ma	18,403	15,651	38,381		
leucogranite des Millevaches (~315 Ma) (4) μ et W admis égaux à Saint-Julien	Saint-Sylvestre 1	FK	18,258	15,688	38,600		
		RT à 300 Ma	18,283	15,689	38,611	10,3	14
		RT à 200 Ma	18,449	15,699	38,681		
leucogranite des Millevaches (~315 Ma) (4) μ et W admis égaux à Saint-Julien	Saint-Sylvestre 2	FK	18,246	15,654	38,360		
		RT à 300 Ma	18,271	15,655	38,371	10,3	14
		RT à 200 Ma	18,437	15,665	38,441		
monzogranite (345 ± 8 Ma)	Ussel	FK	18,089	15,592	38,161		
		RT	18,314	15,608	38,359		
		RT à 300 Ma	18,119	15,594	38,187	4,1	11,5
		RT à 200 Ma	18,185	15,598	38,245		
granite du Sillon houiller (326 ± 4 Ma) μ et W admis égaux au granite d'Ussel	Messeix	FK	18,087	15,597	38,145		
		RT à 300 Ma	18,104	15,598	38,160	4,1	11,5
		RT à 200 Ma	18,170	15,602	38,218		

roche analysée	localisation	analyse	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
granite à biotite (~ 320 Ma)	Gelles	FK	18,222	15,661	38,386	3,38	1,38
		RT	18,394	15,648	38,408		
		RT à 300 Ma	18,233	15,662	38,387		
		RT à 280 Ma	18,245	15,650	38,390		
		RT à 200 Ma	18,288	15,665	38,394		
granite du Bourbonnais (341 ± 4 Ma)	Madeleine - Bois-noirs	FK	18,121	15,620	38,202	13,8	45,4
		RT	18,848	15,629	38,950		
		RT à 300 Ma	18,188	15,624	38,270		
		RT à 200 Ma	18,411	15,637	38,498		
granite du Bourbonnais (341 ± 4 Ma)	Mayet-de-Montagne	FK	18,229	15,628	38,283	14,9	49,8
		RT	18,989	15,689	39,078		
		RT à 300 Ma	18,302	15,632	38,358		
		RT à 200 Ma	18,542	15,646	38,608		
microgranite	Charrier	FNa	18,313	15,609	38,244		
tuf viséen	Charrier	RT	18,925	15,673	38,837		
granite de la Tour d'Auvergne (~ 345 Ma)	La Tour d'Auvergne	FK	18,103	15,619	38,145	8,3	10,8
		RT	18,561	15,631	38,409		
		RT à 300 Ma	18,164	15,623	38,169		
		RT à 200 Ma	18,298	15,630	38,224		
granites du sud Massif central							
granite de la Margeride (~ 320 Ma) (grain moyen)	Saint-Chély d'Apcher	FK	18,385	15,695	38,550	13,1	10,0
		RT	18,933	15,674	38,554		
		RT à 300 Ma	18,428	15,698	38,560		
		RT à 200 Ma	18,639	15,710	38,610		
granite leucocrate de la Margeride (~ 320 Ma)	Lozère	FK	18,266	15,667	38,394	8,1	6,3
		RT	18,678	15,689	38,496		
		RT à 300 Ma	18,292	15,669	38,400		
		RT à 200 Ma	18,423	15,672	38,420		
aplite Margeride (~ 320 Ma)	Saint-Chély d'Apcher	FK	18,268	15,655	38,934	21,4	0,3
		RT à 300 Ma	18,338	15,659	38,394		
		RT à 200 Ma	18,683	15,679	38,396		
granite de la Margeride (4)	Margeride	FK	18,385	15,695	38,550		
granite de St-Guiral-Liron (2)	St-Guiral-Liron	FK	18,328	15,661	38,397		
		FK	18,345	15,666	38,455		
		FK	18,345	15,664	38,384		
		FK	18,324	15,667	38,465		
granite du Sidobre (4)	Sidobre	FK	18,383	15,684	38,450	4,2 à 5,65	1 à 3,5
		FK	18,450	15,650	38,380		
		RT	18,650	15,680	38,430		
socle métamorphique							
anatexites à cordiérite (~ 430 Ma)	Vieille-Brioude	FK	18,116	15,612	38,193	1,9	4,1
		RT	18,252	15,615	38,281		
		RT à 300 Ma	18,157	15,615	38,220		
		RT à 250 Ma	18,174	15,613	38,230		
		RT à 200 Ma	18,187	15,616	38,240		
orthogneiss (~ 430 Ma)	Le Céroux (Brioude)	FK	18,125	15,600	37,978	4,2	8,1
		RT	18,417	15,614	38,152		
		RT à 300 Ma	18,215	15,606	38,031		
		RT à 250 Ma	18,249	15,605	38,051		
		RT à 200 Ma	18,282	15,609	38,072		
paragneiss (~ 430 Ma)	Le Babory (Blesle)	FK	18,172	15,607	38,245	2,4	6,7
		RT	18,338	15,604	38,389		
		RT à 300 Ma	18,223	15,610	38,289		
		RT à 250 Ma	18,243	15,605	38,305		
		RT à 200 Ma	18,262	15,612	38,322		
granite d'anatexie (322 ± 7 Ma) μ estimé à 10 et W à 15	Lempdes	FK	18,135	15,600	38,089	10	15
		RT à 300 Ma	18,171	15,602	38,106		
		RT à 200 Ma	18,332	15,611	38,181		
anatexites (~ 430 Ma) μ et W admis identiques à anatexite de Cros-Bagnols	Marmeissat	FK	18,184	15,625	38,219	4,4	19,1
		RT à 300 Ma	18,203	15,626	38,245		
		RT à 200 Ma	18,276	15,630	38,345		
orthogneiss (~ 430 Ma) μ et W admis identiques à orthogneiss du Céroux	Saint-Alyre	FK	18,034	15,593	38,039	4,2	8,1
		RT à 300 Ma	18,124	15,599	38,092		
		RT à 200 Ma	18,191	15,602	38,133		
orthogneiss de Tauves 1 (~ 430 Ma)	Larodde	FK	18,067	15,583	38,379	4,5	24,1
		RT	18,377	15,582	38,896		
		RT à 300 Ma	18,163	15,583	38,536		
		RT à 280 Ma	18,177	15,585	38,561		
		RT à 200 Ma	18,235	15,583	38,656		
orthogneiss de Tauves 2 (~ 430 Ma) (duplicata)	Larodde	FK	18,076	15,594	38,424	4,5	24,1
		RT à 300 Ma	18,172	15,600	38,582		
		RT à 200 Ma	18,245	15,604	38,703		
anatexite de l'Artense (~ 430 Ma)	Cros (Bagnols)	FK	18,126	15,612	38,171	4,4	19,2
		RT	18,429	15,642	38,583		
		RT à 300 Ma	18,219	15,622	38,296		
		RT à 280 Ma	18,234	15,620	38,315		
		RT à 200 Ma	18,290	15,630	38,392		

Tableau annexe 1.2 : Données isotopiques complètes des feldspaths et roches totales.

Appendix Table 1.2: Complete feldspar and whole rock isotope data.

roche analysée	localisation	analyse	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	μ	W
orthogneiss à sillimanite (~ 430 Ma)	St-Thomas (Bort-les-Orgues)	FK RT RT à 300 Ma RT à 200 Ma FK (duplicata)	18,448 19,479 18,767 19,008 18,437	15,623 15,718 15,656 15,679 15,644	38,260 39,115 38,520 38,719 38,323	14,9	39,8
paragneiss à sillimanite (~ 430 Ma)	Champs-sur-Tarentaine	FK RT RT à 300 Ma RT à 200 Ma	18,539 19,679 18,892 19,158	15,626 15,688 15,647 15,662	38,262 38,943 38,469 38,627	16,5	31,6
orthogneiss de Meuzac (~ 433 Ma)	Limousin	FK RT RT à 300 Ma RT à 200 Ma	17,932 18,429 18,089 18,205	15,556 15,587 15,566 15,572	37,924 38,481 38,098 38,228	7,2	26
orthogneiss du Thaurion (457 ± 23 Ma)	Limousin	FK FK	17,882 17,739	15,587 15,564	38,063 37,871		
gneiss micaschisteux	Limousin	RT	18,083	15,554	38,125		
gneiss plagioclasiq	Limousin	RT	18,989	15,650	38,763		
grès de Thiviers	Limousin	RT	18,458	15,788	39,950		
métadolérite des grès de Thiviers	Limousin	RT	18,527	15,655	38,528		
schiste Dévono-dinantien	Forez	RT	18,782	15,640	38,778		
schistes noirs cambrien (1)	Saint-Salvy	RT RT à 280 Ma	18,850 18,330	15,750 15,730	38,380 nc		
roches de Salsigne (3)							
quartzite	nord de Salsigne R1	RT RT à 500 Ma	18,603 18,350	15,691 15,677	38,844 nc	3,2	nc
schistes X silicifiés	mine (niveau 15) R2	RT RT à 500 Ma	19,910 17,990	15,763 15,658	39,472 nc	24,0	nc
épicastite dans schistes X	ouest de Salsigne (R3)	RT RT à 500 Ma	20,241 17,893	15,766 15,633	39,982 nc	29,0	nc
schistes X à pyrrhotite	(sondage Malabau) R4	RT RT à 500 Ma	18,671 17,858	15,671 15,625	38,379 nc	10,0	nc
schistes X sombres	nord de Salsigne R5	RT RT à 500 Ma	19,490 18,136	15,684 15,601	39,252 nc	17,0	nc
schiste (Cambrien inférieur)	open pit R6	RT RT à 500 Ma	19,570 19,392	15,712 15,702	39,376 nc	2,2	nc
grès (Cambrien inférieur)	open pit R7	RT RT à 500 Ma	20,630 18,099	15,758 15,676	40,635 nc	18,0	nc
grès des alternances	open pit R8	RT RT à 500 Ma	18,776 17,913	15,675 15,626	38,617 nc	11,0	nc
calcaire des alternances (Cambrien)	panneau nord R9	RT RT à 500 Ma	17,941 17,831	15,604 15,598	37,929 nc	1,4	nc
dolérite altérée dans Cambrien inférieur	Roc Soufrat R10	RT RT à 500 Ma	17,991 17,968	15,617 15,615	38,158 nc	0,3	nc
grès ferrugineux (Dévonien de base)	Cammasou R11	RT RT à 400 Ma	17,932 17,875	15,652 15,648	38,057 nc	0,9	nc
grès ferrugineux (Dévonien de base)	Cammasou R12	RT	17,945	15,654	38,091	nc	nc
schiste dolomitique (Dévonien de base)	open pit R13	RT RT à 400 Ma	18,139 17,849	15,713 15,697	38,355 nc	4,6	nc
calcaire dolomitique (Dévonien de base)	Cammasou R14	RT RT à 400 Ma	18,027 17,958	15,679 15,675	38,186 nc	1,1	nc
calcschiste (Dévonien de base)	R15	RT RT à 400 Ma	19,117 18,424	15,745 15,707	38,783 nc	11,0	nc
Vosges (4)							
granite	Remiremont	FK FK	18,093 18,141	15,565 15,558	38,030 38,000	9,45 9,43	3,99 3,95
granite	Hohnneck	FK	18,125	15,573	38,050	9,46	3,98
granite	Champ du Feu	FK	18,039	15,553	38,010	9,43	4,01
Pyrénées (4)							
granite	Querigut	plagioclase FK FK FK FK FK FK	18,398 18,428 18,455 18,428 18,401 18,448 18,650	15,673 15,683 15,671 15,718 15,682 15,693 15,751	38,460 38,480 38,540 38,640 38,470 38,480 38,760	9,96 9,65 9,67 9,71 9,65 9,66 9,75	4,03 4,03 4,10 4,05 4,04 4,02 4,04
granite	Saint-Laurent-de-Cerdan	FK	18,455	15,723	38,610	9,72	4,08
granite	Cady (Vernet-les-Bains)	FK	18,614	15,693	38,660	9,64	4,01
granite	Ax-les-Thermes	FK FK	18,660 18,530	15,745 15,707	39,140 39,000	9,74 9,68	4,20 4,20
granite	Salvezines	FK	18,342	15,654	38,430	9,59	4,05

Âges des roches : Ballouard et al., (2017) pour Langonnet ; Barrière et al. (1975) pour la trondhjémite de Douarnenez ; Béchenne et al., (2006), Béchenne et Thiéblemont, 2011 pour les leucogranites sud-armoricains ; Bril et al. (1991) pour le granite d'anatexie de Vieille-Brioude ; Bos et al. (1997) pour Rostrenen ; Lin et al., (2016) pour le Forez ; Négroni (1982) pour le granite de Gelles ; Thiéry et al. (2009) pour les granites du Sillon houiller et du Bourbonnais. Voir Faure et al. (2005) et références incluses pour les âges des roches du Limousin.

Ages of rocks: Ballouard et al., (2017) for Langonnet; Barriere et al., (1975) for the Trondhjemitite of Douarnenez; Béchenne et al., (2006), Béchenne and Thiéblemont, 2011, for South Armoric leucogranites; Bril et al., (1991) for the anatexia granite of Vieille-Brioude; Bos et al., (1997) for Rostrenen; Lin et al., (2016) for Forez; Négroni (1982) for the Gelles granite; Thiéry et al., (2009) for the granites of the Sillon houiller and Bourbonnais. See Faure et al., (2005) and references included for the ages of Limousin rocks.

Analyses : (1) = Brévar et al. (1982) ; (2) = Le Guen et al. (1991) ; (3) = Le Guen et al. (1991) ; (4) = Michard-Vitrac et al. (1981) ; (5) = Vidal et Postaire (1985) ; (6) = Vidal (inédit). nc : non calculé.

Analyzes: (1) = Brévar et al., (1982); (2) = Le Guen et al., (1991); (3) = Le Guen et al., (1991); (4) = Michard-Vitrac et al., (1981); (5) = Vidal and Postaire (1985); (6) = Vidal (unpublished). nc: not calculated.

Annexe 2 - Apport à l'exploration minière : la fingerprint method

2.1 - Principe de la méthode

Développée dans les années 1980 en Australie (Gulson, 1986), la *fingerprint method*, l'empreinte digitale des minéralisations, a été conçue dans le but très concret d'aider à hiérarchiser les cibles minières découvertes lors des campagnes d'exploration.

La géochimie isotopique du plomb peut en effet être un outil de sélection efficace dès le stade amont des campagnes d'exploration. Les signatures isotopiques du plomb des indices nouvellement découverts permettent en effet de les rattacher à des types de minéralisations : il suffit ensuite de sélectionner ceux appartenant à un type reconnu économique dans la région pour hiérarchiser les cibles découvertes. La signature isotopique permet aussi d'établir des filiations entre minéralisations, de les attribuer à une époque métallogénique etc., des données indirectes mais qui peuvent aussi aider à orienter les campagnes d'exploration.

Pour la mettre en œuvre, il est nécessaire de posséder déjà des gisements économiques à signature isotopique établie, homogène, et significativement différente de celles des minéralisations non économiques. Celle-ci va servir de référence. Il faut cependant respecter une unité de lieu : la référence n'est valable que dans un périmètre limité, souvent le bassin de genèse pour les VMS. Mis au point sur les gisements de sulfures massifs d'Australie, cet outil est en effet particulièrement adapté à la recherche de ces gisements à signature homogène. Nous allons l'illustrer avec des exemples en France et en Europe de l'Ouest.

Il faut se rappeler que la remobilisation fixe une limite à cette méthode : en Montagne Noire par exemple, nous avons vu que les filons (tardifs mais non datés) de Cusses, Camprafaud et du Priou ont la même composition que les sulfures stratiformes cambriens car ils en dérivent en totalité. Dans ces trois cas cependant (et dans beaucoup d'autres), le terrain permet de reconnaître leur nature filonienne et d'éviter ainsi l'écueil.

2.2 - Échantillons analysables : sulfures et gossans

Les échantillons analysables sont variés : la galène et les autres minéraux de plomb sont évidemment idéaux, mais tous les autres minéraux (sulfures, oxydes, silicates...) sont utilisables, à condition qu'ils contiennent au moins quelques dizaines de ppm de plomb, ce qui est fréquemment le cas. Des corrections pour l'enrichissement radiogénique *in situ* peuvent cependant s'avérer nécessaires lorsque μ et W ne sont pas négligeables.

Brian Gulson (1986) avait déjà employé les oxydes de fer des chapeaux de fer (ou *gossans*) en exploration minière. Pour confirmer la pertinence de l'emploi des *gossans* dans les terrains paléozoïques d'Europe, des mesures ont été réalisées sur les sulfures et leurs *gossans* dérivés de trois grands amas de sulfures polymétalliques de la ceinture pyriteuse sud-ibérique portugaise : Aljustrel, Lousal et Sao Domingos, (Marcoux, 1987), (Fig. annexe 2.1 ; Tab. annexe 2.1). La minéralogie de ces *gossans* est à goethite ultradominante, plus ou moins cryptocristalline, conférant une couleur variable, jaune-ocre, rouge, brune ou noire, avec des sulfates, carbonates et phosphates disséminés de zinc (smithsonite, hydrozincite...), cuivre (azurite, malachite...) et plomb (anglésite, cérusite, pyromorphite...).

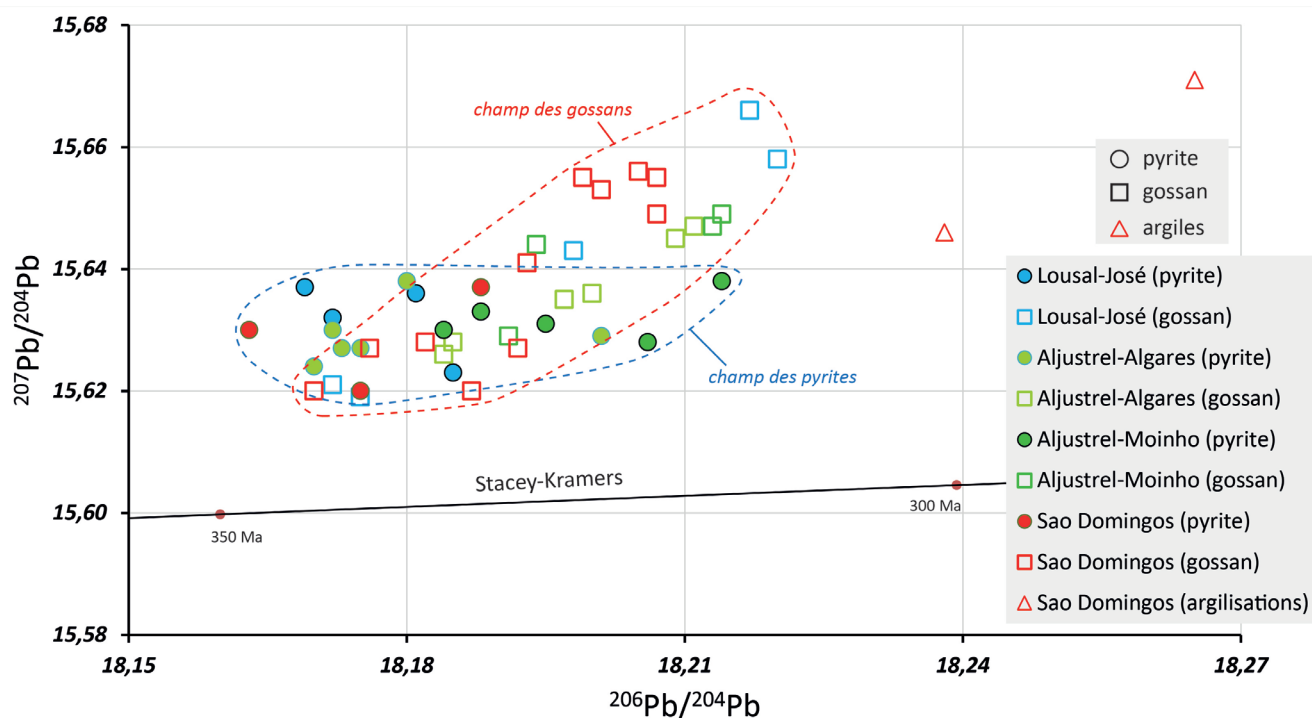


Figure annexe 2.1 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ des sulfures et de leurs gossans d'amas sulfurés portugais appartenant à la ceinture pyriteuse sud-Ibérique. Gossans et pyrites ont tous des teneurs en plomb élevées (> 300 ppm et de 952 à 3 514 respectivement) ce qui ne nécessite pas de corrections pour l'enrichissement radiogénique.

Appendix figure 2.1 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram of sulphides and their gossans from Portuguese sulphide ore deposits belonging to the South-Iberian pyrite belt. Gossans and pyrites all have high lead contents (> 300 ppm and 952 to 3,514 respectively) which does not require corrections for radiogenic enrichment.

échantillon	teneur Pb	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
Lousal (amas José, niveau 400)				
minéral pyriteux massif	1 468 ppm	18,172	15,632	38,235
	na	18,181	15,636	38,248
	na	18,169	15,637	38,234
	na	18,185	15,623	38,212
Lousal (moyenne)				
		18,177	15,632	38,232
Lousal (amas José)				
gossan	na	18,198	15,643	38,274
	na	18,220	15,658	38,239
	na	18,175	15,619	38,234
	na	18,172	15,621	38,214
gossan	na	18,217	15,666	38,334
	na	na	na	na
	na	na	na	na
	na	na	na	na
Aljustrel (amas Algarès, niveau 250)				
minéral pyriteux massif	2 486 ppm	18,201	15,629	38,204
	3 514 ppm	18,180	15,638	38,251
	952 ppm	18,172	15,630	38,249
	na	18,170	15,624	38,193
gossan	na	18,173	15,627	38,211
	na	18,175	15,627	38,228
	na	na	na	na
	na	na	na	na
Aljustrel (amas Algarès, surface)				
gossan	brèche à éléments rouges	na	18,184	15,626
	oxydes rouges et noirs	na	18,200	15,636
	oxydes ocre jaune	na	18,197	15,635
	oxydes rouges et noirs	na	18,185	15,628
gossan	oxydes	na	18,211	15,647
	brèche rouge et noire	na	18,209	15,645
	na	na	na	na
	na	na	na	na
Aljustrel (amas Moinho, niveau -155)				
minéral pyriteux massif	na	18,188	15,633	38,222
	na	18,184	15,630	38,198
	na	18,214	15,638	38,229
	na	18,195	15,631	38,202
gossan	na	18,206	15,628	38,206
	na	na	na	na
	na	na	na	na
	na	na	na	na
Aljustrel (moyenne)				
		18,187	15,630	38,218
Aljustrel (amas Moinho, surface)				
gossan	oxydes ocres	na	18,214	15,649
	oxyde rouge et noir	na	18,213	15,647
	brèche siliceuse	na	18,194	15,644
	filonnets vermillon	na	18,191	15,629
Sao Domingos				
minéral pyriteux massif	na	18,163	15,630	38,228
	na	18,175	15,620	38,205
	na	18,188	15,637	38,213
	na	na	na	na
Sao Domingos (gossan)				
gossan	oxydes rouges et jaunes	na	18,201	15,653
	na	18,193	15,641	38,283
	na	18,170	15,620	38,209
	na	18,207	15,655	38,314
gossan	oxydes jaunes	na	18,205	15,656
	na	18,199	15,655	38,298
	na	18,182	15,628	38,231
	na	na	na	na
gossan	oxydes rouges	na	18,176	15,627
	oxydes rouges dans brèches	na	18,207	15,649
	ocres bruns (sud cortá)	na	18,192	15,627
	brèche ferrugineuse	na	18,187	15,620
gossan	argilisation blanchâtre	na	18,265	15,671
	argilisation verdâtre	na	18,238	15,646
	na	na	na	na
	na	na	na	na

Tableau annexe 2.1 – Compositions isotopiques comparées des sulfures et gossans d'amas sulfurés portugais (figure annexe 2.1).

Appendix table 2.1 – Comparative isotopic compositions of sulphides and gossans from Portuguese massive sulphide ore deposits (Appendix figure 2.1).

Les résultats montrent que les sulfures et les gossans desincent deux champs largement communs, preuve que les gossans ont conservé la signature isotopique de la pyrite qui leur a donné naissance. Cela confirme que l'oxydation des sulfures n'entraîne pas de fractionnement isotopique du plomb (pas plus que la recristallisation métamorphique, par exemple), alors que c'est le cas pour les isotopes stables plus légers. Les valeurs plus élevées du rapport $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ à Lousal et Sao Domingos relevant probablement d'un biais analytique avec un fractionnement un peu fort. Deux échantillons d'argiles blanchâtres et verdâtres du gossan donnent des valeurs plus radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,238$ et $18,265$) montrant qu'il faut se cantonner aux oxydes dérivés de sulfures.

2.3 - Fingerprint method en France

2.3.1 - Bassin de Châteaulin : Bodennec et Porte-aux-Moines

Le bassin paléozoïque de Châteaulin s'étend largement en Bretagne centrale. Son remplissage se compose essentiellement de schistes viséens, mais ses larges bordures offrent des terrains sédimentaires et volcaniques s'étagant jusqu'au Cambrien. Les minéralisations rencontrées appartiennent pour l'essentiel à deux types : des amas sulfurés stratiformes dévoniens de type VMS distribués sur sa bordure nord (Porte-aux-Moines, Bodennec) et sud (Menez Albot, Torhoat...), et des filons plombo-zincifères post-hercyniens (Huelgoat-Poullaouen, Plélauff, Trémuson...), (Fig. annexe 2.2). L'exploration minière (1970-1990) s'est concentrée sur la recherche de VMS, seules cibles potentiellement économiques à l'époque.

Les signatures isotopiques des VMS sont assez homogènes ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,095$ à $18,192$ avec un net cluster entre $18,10$ et $18,15$) et surtout clairement différentes de celles des filons post-hercyniens ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18,210$ avec un cluster net entre $18,30$ et $18,50$), (Fig. annexe 2.3 ; Tab. annexe 2.2). Grâce à ce référentiel il devient possible, dans l'emprise du bassin de Châteaulin, d'attribuer des indices sulfurés de nature indéterminée recoupés en forages à l'un ou l'autre type.

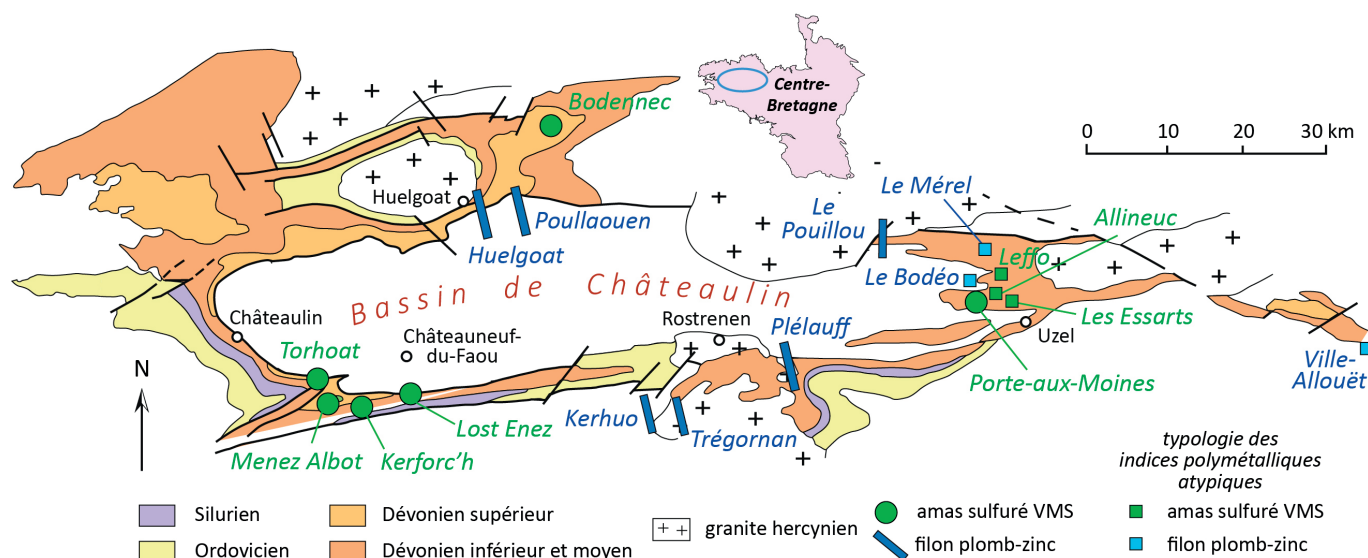


Figure annexe 2.2 – Localisation des minéralisations plombo-zincifères du domaine centro-armoricain (avec le bassin de Châteaulin et son extension orientale de Menez Bel-air où se situe l'indice plombo-zincifère recoupé en sondage de Ville-Allouët).

Appendix figure 2.2 – Location of lead-zinc mineralizations of the Central-Armorican domain (with the Châteaulin basin and its eastern extension of Menez Bel-air where the lead-zinc occurrence intersected in the Ville-Allouët borehole is located).

Les disséminations sulfurées de Leffo, Allineuc et Les Essarts ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,093$ à $18,102$) se rangent ainsi dans la famille des VMS dévoniens, alors que celles pseudo-stratiformes de Ville-Allouët, Le Bodéo et Le Mérel ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,331$ à $18,384$) ont la même composition que les filons plombo-zincifères tardi-hercyniens. Ces derniers résultent très probablement d'une diffusion dans des niveaux poreux du Dévonien à partir de structures filoniennes post-

hercyniennes, ce qui leur confère leur allure pseudo-stratiforme. À Trémuson (Côtes d'Armor), toutes les analyses ont porté sur des filons post-hercyniens mais certains indices sulfurés (non analysés) dans les terrains édiacariens (Villeneuve en Ville-Ahlen, Trégan, La Banche) ont une morphologie stratiforme. Des analyses isotopiques du plomb permettraient d'établir s'il s'agit (ou pas) de minéralisations stratiformes édiacariennes.

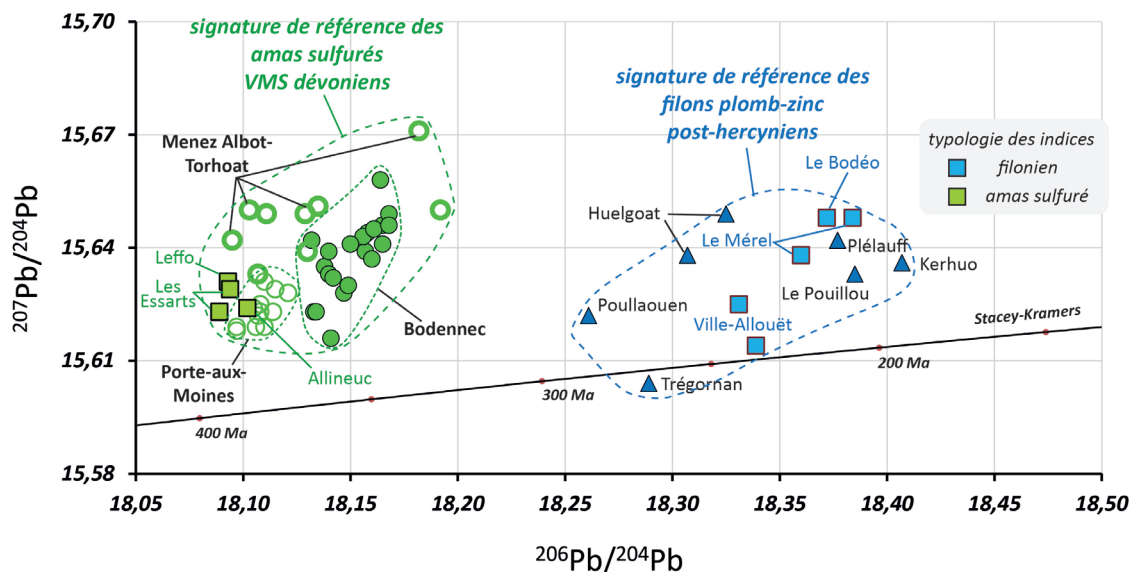


Figure annexe 2.3 – Diagramme $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les signatures isotopiques des amas sulfurés polymétalliques dévoniens et des filons plombo-zincifères du bassin de Châteaulin.

Appendix figure 2.3 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagram showing the isotopic signatures of Devonian polymetallic sulphide ore deposits and lead-zinc veins in the Châteaulin basin.

échantillon	minéral	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
amas sulfurés stratiformes polymétalliques dévoniens (VMS)				
Porte-aux-Moines	Gn	18,108	15,623	38,153
	S+Gn	18,115	15,629	38,168
	S+Gn	18,105	15,624	38,165
	S+Gn	18,110	15,631	38,155
	Gn	18,114	15,623	38,152
	S+Gn	18,097	15,618	38,152
	Gn	18,110	15,619	38,143
	Gn	18,108	15,625	38,155
	S+Gn	18,121	15,628	38,159
	S+Gn	18,107	15,622	38,165
	Gn	18,106	15,619	38,143
	Gn	18,097	15,619	38,137
moy. 12 an.		18,108	15,623	38,154
Bodennec	S+Gn	18,157	15,639	38,230
	S+Gn	18,147	15,628	38,184
	S+Gn	18,164	15,658	38,278
	S+Gn	18,133	15,623	38,178
	S+Gn	18,158	15,644	38,288
	S+Gn	18,134	15,623	38,217
	S+Gn	18,160	15,637	38,222
	S+Gn	18,156	15,643	38,196
	S+Gn	18,138	15,635	38,207
	S+Gn	18,165	15,646	38,264
	S+Gn	18,141	15,616	38,207
	S+Gn	18,140	15,639	38,217
	S+Gn	18,132	15,642	38,234
	S+Gn	18,161	15,645	38,276
	S+Gn	18,168	15,649	38,288
	S+Gn	18,165	15,641	38,261
	S+Gn	18,150	15,641	38,243
	S+Gn	18,149	15,630	38,213
	S+Gn	18,168	15,646	38,275
	S+Gn	18,140	15,633	38,201
	S+Gn	18,142	15,632	38,203
moy. 21 an.		18,151	15,638	38,232
Menez Albot (sondage MAT 8)	Gn	18,111	15,649	38,247
	Gn	18,107	15,633	38,196
	Gn	18,103	15,650	38,253
	Gn	18,095	15,642	38,248
moy. 4 an.		18,104	15,643	38,236
Menez Albot (Est) (sondage MAT 9)	S+Gn	18,192	15,650	38,256
Torhoat (sondage TOR 3)	S+Gn	18,129	15,649	38,259
	Gn	18,135	15,651	38,270
	Gn	18,130	15,639	38,242
moy. 3 an.		18,131	15,646	38,257
Torhoat (amas 2) (sondage TOR 1)	Gn	18,182	15,671	38,315

filons plombo-zincifères tardi-hercyniens locaux				
Kerhuo	Gn	18,407	15,636	38,408
Plélauff	Gn	18,377	15,642	38,432
Trégornan	Gn	18,289	15,604	38,325
Huelgoat	Gn	18,307	15,638	38,345
Huelgoat	Gn	18,325	15,649	38,424
Poullaouen	Gn	18,261	15,622	38,331
Le Pouillou	Gn	18,385	15,633	38,425
sulfures disséminés pseudo-stratiformes de nature indéterminée/encaissant				
Leffo (Dévonien inférieur)	Gn	18,093	15,631	38,190
Les Essarts (Dévonien inférieur)	Gn	18,094	15,629	38,188
Leffo (Dévonien inférieur)	Gn	18,089	15,623	38,168
Allineuc (Dévonien inférieur)	Gn	18,102	15,624	38,165
Ville-Allouët (schistes dévoniens)	Gn	18,331	15,625	38,428
Ville-Allouët (schistes dévoniens)	Gn	18,339	15,614	38,416
Le Mérel (schistes dévoniens)	Gn	18,384	15,648	38,447
Le Bodéo (calcaires dévoniens)	Gn	18,360	15,638	38,427
Le Bodéo (calcaires dévoniens)	Gn	18,372	15,648	38,469

Tableau annexe 2.2 – Compositions isotopiques des amas sulfurés polymétalliques dévoniens et des filons plombo-zincifères du bassin de Châteaulin. Gn : galène, S+Gn : sulfures variés avec galène.

Appendix table 2.2 – Isotopic compositions of Devonian polymetallic sulphide deposits and lead-zinc veins in the Châteaulin basin. Gn: galena, S+Gn: varied sulphides with galena.

2.3.2 - Chessy et Brévenne

En Brévenne, environ 20 km à l'ouest de Lyon, (Fig. annexe 2.4), la signature isotopique des amas sulfurés anciennement exploités de Chessy et Sain-Bel est très homogène : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 18,138 à 18,183 (avec un net cluster vers 18,15) avec des rapports $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (15,557 à 15,580) et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (37,773 à 37,875) singulièrement bas traduisant une forte composante mantellique (Fig. annexe 2.5 ; Tab. annexe 2.3). Toujours à Chessy, la signature s'est parfaitement conservée dans le gossan ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 18,173 et 18,180 et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ = 37,872 et 37,875), indiquant que les gossans peuvent être employés dans une campagne d'exploration minière régionale. Le référentiel isotopique est donc bien établi dans le « périmètre de validité » dessiné par les formations volcanosédimentaires de Brévenne.

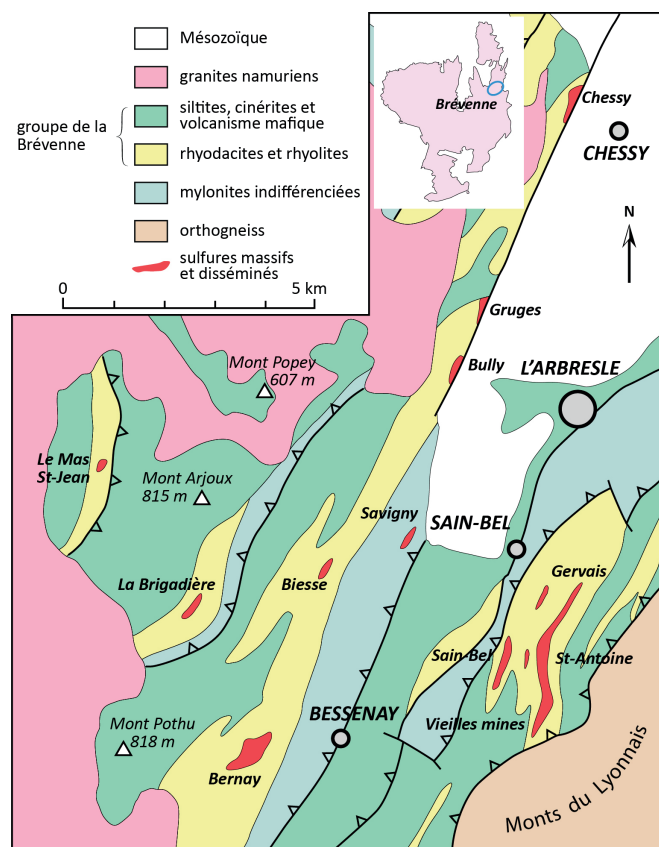


Figure annexe 2.4 – Localisation des minéralisations sulfurées polymétalliques de la Brévenne.

Appendix figure 2.4 – Location of the polymetallic sulfide mineralizations of Brévenne.

Par ailleurs, des lits à pyrite-chalcopryrite disséminées ont été recoupés en sondages dans les rhyolites du toit de l'amas à Chessy (S5 entre 80 et 88 m) et à Bernay (B26 et percutants). Ils affichent des signatures très différentes : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (> 18,30 sauf la pyrite de Mas Saint-Jean) et surtout $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (> 15,60) et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (> 38,11). Ces sulfures sont pauvres en plomb (2,9 à 209,6 ppm) mais les rapports μ calculés sur deux échantillons de Chessy sont faibles (0,96 et 1,73) impliquant que les corrections d'enrichissement radiogénique sont négligeables (Fig. annexe 2.5 ; Tab. annexe 2.3). Ils relèvent d'un épisode hydrothermal distinct de celui des amas, non daté, à source franchement crustale et de nature à définir. Au vu de la minceur des lits de sulfures et de leur caractère très pyriteux ils semblent loin d'une dimension économique. À Chessy, l'absence de *trend* montre qu'il n'y a pas eu de contamination par le plomb de l'amas de sulfures massifs sous-jacent, alors qu'elle est probable à Bernay.

Parmi les indices minéralisés en cours de reconnaissance en 1990, celui de Savigny porte la signature potentiellement économique, tandis que ceux du Mas Saint-Jean (pyrite disséminée) et de Biesse (gossan à goéthite et barytine) montrent celle de l'épisode non économique. Bernay, comme Chessy, possède les deux signatures isotopiques ce qui suggère de réelles potentialités économiques. Les $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ un peu plus élevés résultent d'un enrichissement radiogénique *in situ* des pyrites analysées. Il semble se dessiner une zonalité régionale avec un secteur oriental favorable (Chessy, Sain-Bel, Savigny et *pro parte* Bernay), et un secteur occidental à disséminations non économiques (Mas Saint-Jean, Biesse, Bernay *pro parte*), Chessy et Bernay se situant au point de rencontre des deux. Cette zonalité ne semble cependant pas refléter une différence lithologique. Il serait judicieux de déterminer la signature isotopique des autres indices sulfurés connus en Brévenne (Bully, Gruges, La Brigadière...) pour estimer leur potentiel économique.

2.3.3 - La fingerprint method : un guide approprié sous-employé ?

Des amas édiacariens et dévoniens cachés ?

Rouez, St-Georges-sur-Loire et Montmarçon sont des gîtes stratiformes édiacariens porteur d'un plomb de composition isotopique bien définie. Si la présence de plomb édiacarien ne présume en rien du stock métal présent, il faut garder à l'esprit que c'est la signature d'un amas de 100 Mt de

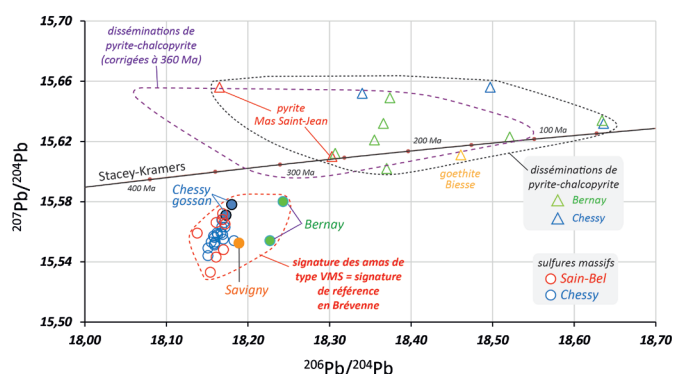


Figure annexe 2.5 – Diagrammes $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ montrant les compositions isotopiques des amas sulfurés VMS économiques et des sulfures disséminés non économiques. La correction à 360 Ma pour les sulfures disséminés (âge maximum possible, très hypothétique) ne change pas significativement la signature qui reste très différente de celle des VMS économiques dans les deux diagrammes corrigés avec le μ maximum (1,73) pour les échantillons à teneurs U et Pb mesurées.

Appendix figure 2.5 – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams showing the isotopic compositions of economic VMS sulfide ore deposits and non-economic disseminated sulfides. The correction to 360 Ma for disseminated sulphides (maximum possible age, very hypothetical) does not significantly change the signature which remains very different from that of the economic VMS in the two diagrams corrected with the maximum μ (1.73) for the samples at U and Pb contents measured.

site	échantillon	temps	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	minéral analysé (teneur Pb)	μ
Chessy	sondage S5, 80,2 m	t_0 (actuel) 360 Ma	18,497 18,397	15,656 15,651	38,260 nc	pyrite-chalcopryrite (54,0 ppm)	1,73
	sondage S5, 85,2 m	t_0 (actuel) 360 Ma	18,340 18,285	15,652 15,649	38,166 nc	pyrite-chalcopryrite (155,2 ppm)	0,96
	sondage S5, 88,0 m	t_0 (actuel) 360 Ma	18,636 18,537	15,632 15,627	38,201 nc	pyrite (209,6 ppm)	1,73 (estimé)
Biesse	surface	t_0 (actuel) 360 Ma	18,461 18,362	15,611 15,606	38,286 nc	goethite et barytine (10,2 ppm)	1,73 (estimé)
Mas Saint-Jean	carrière	t_0 (actuel) 360 Ma	18,165 18,066	15,656 15,651	38,606 nc	pyrite (14,2 ppm)	
		t_0 (actuel) 360 Ma	18,303 18,204	15,610 15,605	38,312 nc	pyrite (4,0 ppm)	
		t_0 (actuel) 360 Ma	18,307 18,208	15,612 15,607	38,118 nc	pyrite (14,5 ppm)	
Bernay	village	t_0 (actuel) 360 Ma	18,307 18,208	15,612 15,607	38,118 nc	pyrite (14,5 ppm)	
	sondage sd B 26 34,8 m	t_0 (actuel) 360 Ma	18,374 18,275	15,649 15,644	38,359 nc	pyrite-chalcopryrite (134,1 ppm)	
	sondage percutant S 2/20	t_0 (actuel) 360 Ma	18,521 18,422	15,623 15,618	38,457 nc	pyrite (16,3 ppm)	
	sondage percutant S 4/4	t_0 (actuel) 360 Ma	18,370 18,271	15,602 15,597	38,194 nc	pyrite-chalcopryrite (2,9 ppm)	
	sondage percutant S 8/16	t_0 (actuel) 360 Ma	18,634 18,535	15,634 15,629	38,286 nc	pyrite (17,6 ppm)	
	sondage percutant S 9/20	t_0 (actuel) 360 Ma	18,366 18,267	15,632 15,627	38,287 nc	pyrite-chalcopryrite (4,4 ppm)	
	sondage percutant S 12/16	t_0 (actuel) 360 Ma	18,355 18,256	15,621 15,616	38,134 nc	pyrite-sphalérite (7,8 ppm)	

Tableau annexe 2.3 – Compositions isotopiques actuelles et calculées à 360 Ma (âge maximum possible) des sulfures disséminés et des oxydés de Brévenne ; nc = non corrigé ; Th n'ayant pas été mesuré, W n'a pas ou pu être calculé (d'après Marcoux *et al.*, 1991).

Appendix table 2.3 – Current and calculated isotopic compositions at 360 Ma (maximum possible age) of disseminated sulphides and oxides from Brévenne ; nc = uncorrected ; Th not having been measured, W was not or could not be calculated (according to Marcoux *et al.*, 1991).

sulfures (Rouez), un paramètre qui serait pertinent partout sur la Planète pour approfondir les recherches sur les sites déjà connus (Montmarçon, Saint-Georges-sur-Loire) et rechercher d'autres représentants dans ces terrains qui occupent une vaste surface du territoire national.

La signature de Rouez a un « périmètre de validité » qui doit raisonnablement s'étendre au synclinal de Tennie, soit sur une soixantaine de km² (où les campagnes de géochimie sol menées par la société Variscan en 2016 avaient détecté plusieurs anomalies en zinc), (Fig. 2.6), et probablement aux autres synclinaux édiacariens voisins.

Dans le Morvan, la signature isotopique de l'amas sulfuré de Chizeuil, est un référentiel approprié pour la recherche d'autres gisements de type VMS dans la série volcanosédimentaire de la Somme, qui se prolonge vers le Nord sur plus de 30 km. Les disséminations pyriteuses (Tazilly...) et les *gossans* (Montarnu, Châtelet...) seraient notamment à considérer. Et les autres terrains dévoniens de l'Hexagone (Montagne noire, Sud-Limousin...) pourraient recéler de bonnes surprises (Fig. annexe 6.6).

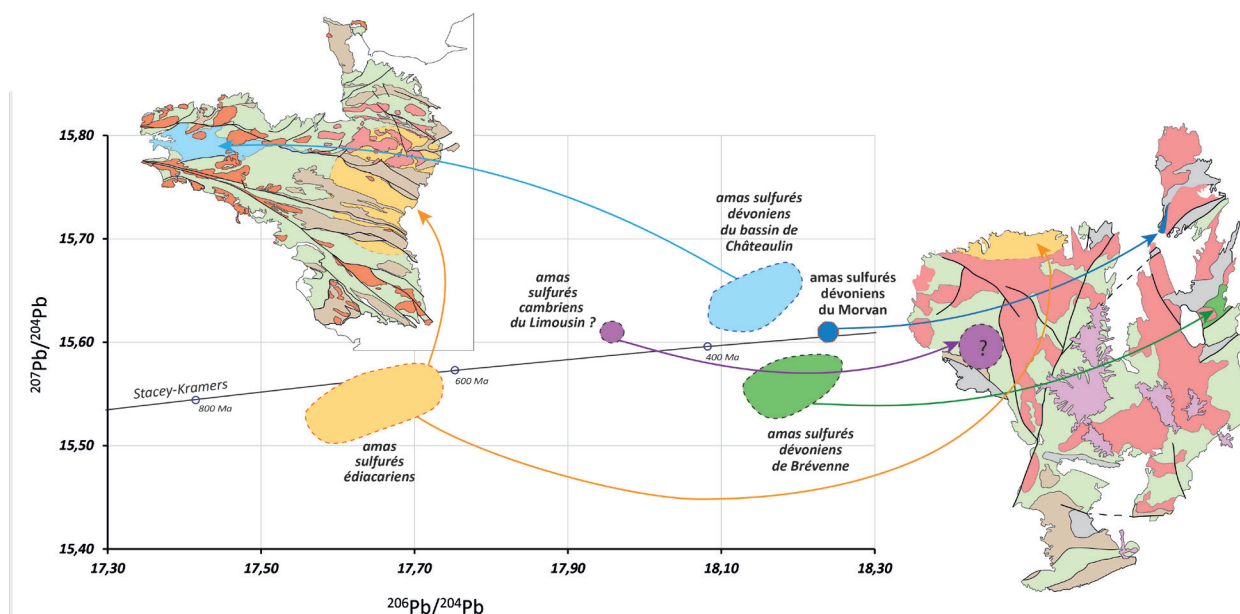


Figure annexe 2.6 – Synthèse des signatures isotopiques révélatrices d'amas sulfurés édiacariens, cambriens et dévoniens avec leurs « périmètres de validité », plus flou pour les amas édiacariens.

Appendix figure 2.6 – Summary of isotopic signatures revealing Ediacaran, Cambrian and Devonian massive sulphide deposits with their “perimeters of validity”, less well defined for Ediacaran deposits.

Filons et autres gisements

Pour les filons, la géochimie isotopique du plomb apporte une réponse indirecte mais néanmoins utile. Il faut rappeler qu'à l'échelle d'un district minier les grands types de filons dessinent globalement leurs propres champs de composition et que rapporter un indice à un type de gîte est toujours utile, la signature isotopique pouvant être un élément discriminant. Dans le Limousin, par exemple, les filons à galène abondante mêlés aux filons aurifères relèvent de l'épisode liasique à plomb radiogénique, ils se surimposent aux filons aurifères mais ne les tracent pas.

Plus ponctuellement, la similitude entre Crossac et le Sem en Loire-Atlantique suggère qu'il s'agit d'un même filon, comme les données de terrain l'avaient aussi indiqué. Dans les gîtes de type MVT, comme sur la bordure cévenole, la dispersion des compositions même au sein d'un même gîte (Les Malines, Croix-de-Pallières) semble rendre cette méthode caduque.

Filiation entre minéralisations : un guide d'exploration indirect

Ce point peut se résumer à la question : une minéralisation dérive-t-elle d'une autre plus ancienne ? La réponse, quelle qu'elle soit, a des retombées positives car elle permet de confirmer ou d'exclure des métalotectes proposés ou envisagés. Deux exemples sont rappelés ici.

Le filon zincifère de Saint-Salvy avait été considéré comme issu de la remobilisation de niveaux stratiformes cambriens (Foglierini *et al.*, 1980a) qui apparaissaient donc comme des guides de prospection pertinents, leur proximité étant un critère favorable à la présence de filons zincifères. Les résultats de géochimie isotopique du plomb excluent cette filiation, écartant ce rôle de métalotecte des niveaux cambriens et ouvrant ainsi de nouveaux secteurs à la recherche de filons zincifères (cf. Fig. 4.20). À Salsigne (Aude) la présence de sulfures aurifères stratiformes dans l'Édiacarien, le Cambrien et le Dévonien avait conduit à envisager des dépôts minéralisés syngénétiques à ces trois époques (et miraculeusement superposés à l'Hercynien !). En plus de critères structuraux et minéralogiques très clairs, les signatures isotopiques confirment qu'il n'y a qu'un seul épisode minéralisé tardi-hercynien, relevant très probablement de l'épisode « or 300 ». Les niveaux minéralisés stratiformes cambriens ou dévoniens, bien présents mais surtout à plomb-zinc, sont sans lien avec la minéralisation aurifère et ne constituent donc pas un guide d'exploration.

Annexe 3 - Isotopes du plomb en Guyane

La Guyane s'édifie pour l'essentiel au Paléoproterozoïque lors de l'orogénèse transamazonienne, équivalent de l'orogénèse birrimienne d'Afrique de l'Ouest. La croûte océanique créée vers 2,26-2,20 Ga est subductée de 2,18 à 2,13 Ga, générant un magmatisme volcano-plutonique d'arc à l'origine de ceintures de roches vertes (séries Paramaca et Armina). Cette subduction est synchrone de la phase tectonique majeure D1 (entre 2,16 et 2,12 Ga ; Milési *et al.*, 1995) et d'un hydrothermalisme sous-marin associé au volcanisme d'arc (Montagne d'or) ; elle s'achève avec la collision des deux boucliers africain et amazonien qui occasionne un magmatisme granitique vers 2,11-2,08 Ga. Un contexte d'extension géné-

ralisé et d'amincissement crustal prévaut ensuite, occasionnant la phase tectonique majeure D2 (entre 2,12 et 2,00 Ga ; Milési *et al.*, 1995) riche d'événements magmato-hydrothermaux avec notamment des minéralisations aurifères de type « or orogénique » assez polymorphes de nature encore discutée (Changement, Loulouie, Adieu Vat, Saint-Pierre, Espérance, Saint-Elie, Dorlin etc.) ayant en commun d'être associées à des stocks granitiques.

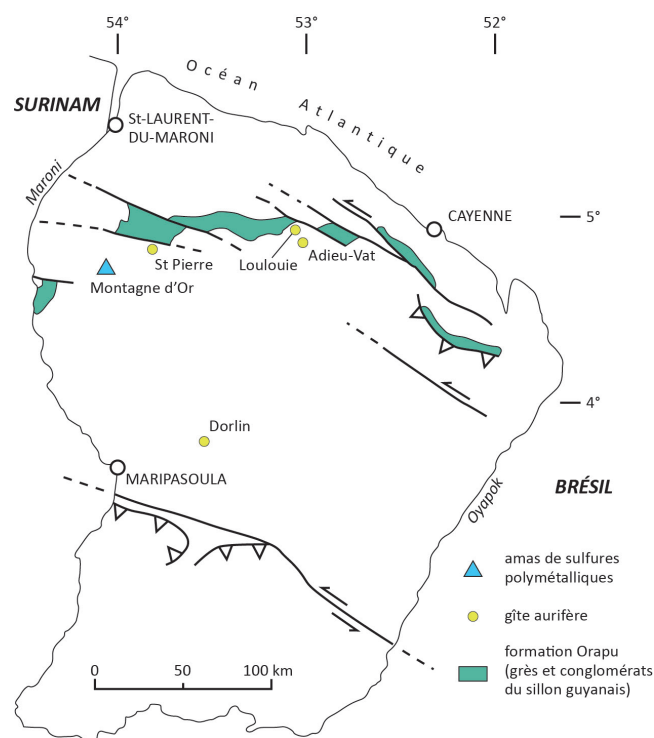


Figure annexe 3.1 – Carte de localisation des gîtes aurifères analysés et de Montagne d'or (géologie d'après Milési *et al.*, 1995).

Appendix figure 3.1 – Location map of the analyzed gold deposits and Montagne d'or (geology according to Milési *et al.*, 1995).

Les galènes de quatre gîtes aurifères ont été analysées : trois près de la formation Orapu du sillon nord-guyanais (Loulouie, Adieu-Vat et Saint-Pierre), et Dorlin (Marcoux et Milési, 1993), (Fig. annexe 3.1). Les signatures sont logiquement basses ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de 15,01 à 15,46) donnant des âges modèles allant de 2 068 Ma (Dorlin) à 1 955 Ma (Adieu Vat), en bon accord avec l'âge paléoproterozoïque du bouclier et une formation des gîtes syn à post-D2 (Fig. annexe 3.2 ; Tab. annexe 3.1). Les compositions sont assez contrastées : Adieu-Vat a des compositions plus radiogéniques et un rapport μ plus faible (9,23) que les autres gîtes (9,45 à 10,06). Loulouie et Adieu-Vat, géographiquement très proches, ont des signatures très différentes impliquant des sources distinctes.

Dans les diagrammes Pb/Pb, les dispersions des points aux alentours des courbes classiques d'évolution témoignent d'un socle en gestation où voisinent encore des milieux à signatures isotopiques très contrastées, comme des fragments de la croûte continentale archéenne et de la croûte océanique « jeune » à peine émergée du manteau. Ces sept analyses ne permettent pas de dégager des conclusions fortes mais constituent une base à compléter par des analyses sur les amas sulfurés de type Montagne d'Or.

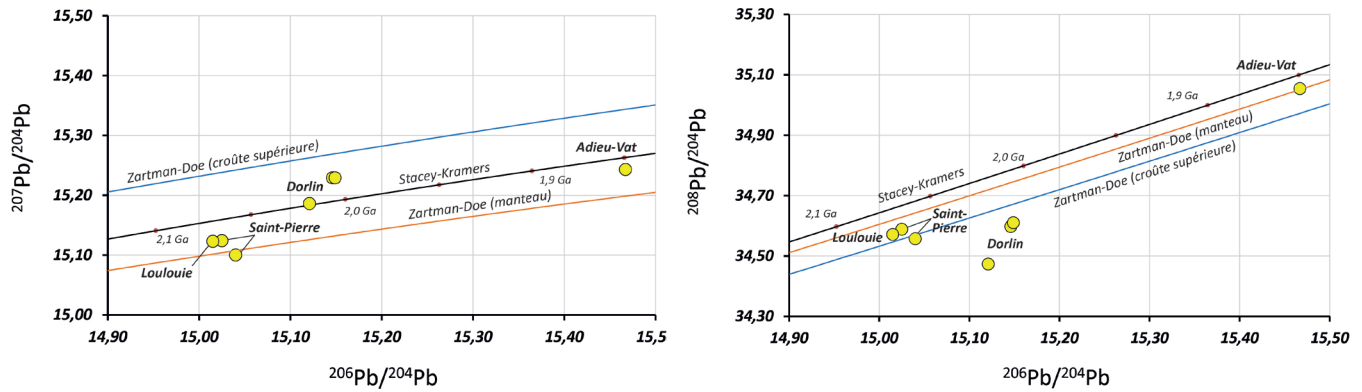


Figure annexe 3.2 – Diagrammes Pb/Pb des gîtes de Guyane (d'après Marcoux et Milési, 1993).

Appendix figure 3.2 – Pb/Pb diagrams of deposits in Guyana (after Marcoux and Milési, 1993).

site	échantillon	type	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ	âge modèle (Ma)
Saint-Pierre	SPR3-108 m	or mésothermal	15,025	15,124	34,588	9,45	2 008
	SPR3-108,1 m		15,040	15,100	34,557		
Adieu-Vat	ADV 6 - 142,8 m	or mésothermal	15,467	15,243	35,054	9,23	1 955
Loulouie	Loulouie 1	or mésothermal	15,015	15,123	34,571	9,46	2 016
Dorlin	THR S-6 - 52,8 m	stockwerk à or disséminé	15,121	15,186	34,473	9,76	2 023
	THR S-1 - 52,4 m		15,146	15,229	34,597	10,06	2 068
	THR S-1 - 52,4 m		15,149	15,229	34,610	10,05	2 066

Tableau annexe 3.1 – Compositions isotopiques de gîtes aurifères de Guyane (d'après Marcoux et Milési, 1993).

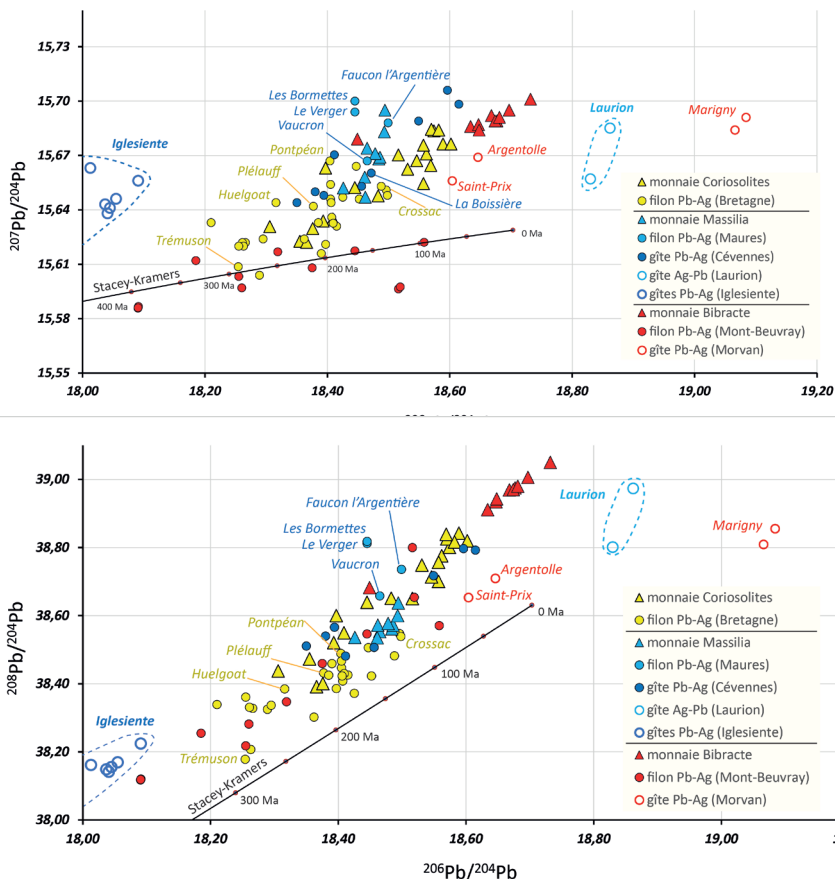
Appendix table 3.1 – Isotopic compositions of gold deposits in Guyana (after Marcoux and Milési, 1993).

Annexe 4 - Archéologie minière et isotopie du plomb

La géochimie isotopique du plomb est un outil de plus en plus utilisé en archéologie pour aborder des questions touchant les domaines des mines et de la métallurgie ancienne. Une des plus fréquentes demeure l'identification de la mine d'où ont été extraits le plomb d'objets usuels (Cattin *et al.*, 2009 ; Stos-Gale et Gale, 2009), et l'argent de monnaies (Nicolet-Pierre *et al.*, 1985 ; Nieto et Barrandon, 2003 ;

Dumas, 2010), le plomb et l'argent sont deux métaux associés dans les gisements : une mine de plomb est généralement aussi une mine d'argent. Ces monnaies en argent (et or) contiennent toujours des traces de plomb suite à un raffinage imparfait, ou à une volonté délibérée « d'économiser » de l'argent. On procède en comparant les compositions des monnaies et objets avec celles des mines susceptibles d'être la source des métaux, avec des résultats plus discriminants que ceux obtenus en comparant les cortèges d'éléments-traces.

Cette méthode a bien sûr ses limites : les refontes, impossibles à détecter, ou plus prosaïquement l'effacement, physique et/ou mémoriel, des mines exploitées par les Anciens, mais il nous a semblé judicieux d'aborder cette méthode à travers trois exemples (Fig. annexe 4.1 ; Tab. annexe 4.1).

Figure annexe 4.1 – Diagrammes Pb/Pb des monnaies et des mines-sources possibles de l'argent (d'après Marcoux, inédit et cette étude ; Cauuet *et al.*, 2023 ; Gruel et Gale, 1980 ; Vogl *et al.*, 2018 ; Boni et Koepfel, 1985).Appendix figure 4.1 – Pb/Pb diagrams of coins and possible silver source-mines (according to Marcoux, unpublished and this study; Cauuet *et al.*, 2023; Gruel and Gale, 1980; Vogl *et al.*, 2018; Boni and Koepfel, 1985).

4.1 - Monnaies phocéennes de Massilia

Nous avons analysé neuf monnaies d'argent frappées lors de l'inauguration de l'atelier de monnayage de la colonie phocéenne de Massilia au 5^e - 6^e siècle avant J.-C., fournies par J.-N. Barrandon du CNRS d'Orléans (Marcoux, 1985, inédit). Les compositions assez groupées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,426$ à $18,494$) permettent d'exclure deux origines de l'argent privilégiées par les archéologues : les grandes mines d'argent (et de plomb) du Laurium (ou Laurion, Grèce) qui alimentaient à cette époque le bassin méditerranéen, bien plus radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,830$ à $18,862$; Vogl *et al.*, 2018), et celles d'Iglesiente (sud-ouest de la Sardaigne), moins radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17,805$ à $18,091$; Boni et Koeppel, 1985). L'origine de l'argent pourrait simplement être locale à régionale : les mines de plomb-argent de la bordure cévenole, voire des Maures (Les Bormettes, Le Verger et Vaucron de compositions sub-identiques) ayant des compositions isotopiques compatibles.



Figure annexe 4.2 – Deux deniers d'argent éduens du 1^{er} siècle avant J.-C. provenant de l'oppidum de Bibracte (recto-verso). Photo et © A. Maillier, Centre archéologique de Bibracte.

Appendix figure 4.2 – Two Aedui silver denarii from the 1st century BC from the oppidum of Bibracte (double-sided). Photo and © A. Maillier, Centre archéologique de Bibracte.

4.2 - Monnaies des Éduens de Bibracte

On se référera à l'article de Cauuet *et al.* (2023) pour davantage de détails sur cette étude. En résumé, des analyses isotopiques du plomb ont été réalisées par M. Chiaradia (Genève) sur des deniers en argent frappés par les Éduens vers -30 à l'oppidum de Bibracte sur le Mont-Beuvray (Fig. annexe 4.2) et sur des minerais de plomb-argent extraits sur le site. Les rapports des monnaies s'étalent de $18,63$ à $18,73$ ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) pour 9 d'entre elles (avec $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de $15,679$ à $15,701$) et ceux des minerais sont étonnamment étalés mais différents ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,09$ à $18,56$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,586$ à $15,622$). Ces résultats montrent que l'argent des monnaies ne provient pas des filons plomb-argent exploités sur le site, datés du début du 1^{er} siècle avant J.-C. et donc antérieurs à l'édification de l'oppidum. La source de l'argent et du plomb ne peut être identifiée avec certitude mais le site minier voisin d'Argentolle, qui semble avoir été important autrefois pour l'argent (et le plomb), est un très bon candidat, ce qui n'est pas le cas de l'autre gîte voisin de Marigny.

4.3 - Monnaies celtiques des Coriosolites

Les Coriosolites étaient une peuplade celte qui occupait l'actuel Centre-Bretagne de -700 jusque vers l'an 400. Des analyses isotopiques du plomb ont été réalisées par Gruel et Gale (1980) sur 19 monnaies de l'époque romaine et comparées aux analyses que j'ai réalisées sur les mines de plomb armoricaines. Les compositions des monnaies sont dispersées ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,306$ à $18,602$) et dessinent une droite grossière qui suggère plusieurs origines (ou seulement deux mais avec des refontes). L'identification des mines-sources est impossible, le champ des monnaies débordant largement celui des filons plombifères de Bretagne centrale. Elles admettent notamment des valeurs radiogéniques ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre $18,50$ et $18,60$) connues en Armorique seulement dans le petit filon trégorrois de Pen-ar-Vouillen (sans anciens travaux miniers connus) et dans la mine des Sardis sur ses marges. Elles sont par contre assez courantes dans le Massif central suggérant des importations de métaux en Armorique. Il est tentant de voir dans la mine de Plélauff,

Monnaies des Coriosolites (Gruel et Gale, 1980)				Monnaies d'argent de Massilia (V-VI ^e BC)			Monnaies des Éduens (Bibracte)		
	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
VA	18,562	15,671	38,775	18,465	15,674	38,553	18,697	15,695	39,006
VA	18,574	15,684	38,801	18,462	15,647	38,572	18,668	15,692	38,969
VA	18,570	15,684	38,825	18,461	15,658	38,535	18,677	15,689	38,975
VB	18,557	15,654	38,700	18,494	15,695	38,637	18,634	15,686	38,911
VB	18,397	15,663	38,600	18,426	15,652	38,536	18,732	15,701	39,050
VB	18,355	15,623	38,473	18,484	15,668	38,561	18,674	15,689	38,970
VB	18,589	15,676	38,842	18,486	15,669	38,572	18,647	15,687	38,934
VB	18,602	15,676	38,820	18,478	15,671	38,577	18,449	15,679	38,682
IV	18,557	15,676	38,757	18,493	15,683	38,600	18,648	15,684	38,943
IV	18,546	15,667	38,713	Laurion			18,681	15,691	38,980
IV	18,582	15,684	38,816	18,830	15,657	38,801	minéralisations Pb-Ag du Mont-Beuvray		
I	18,516	15,670	38,650	18,862	15,685	38,973	18,091	15,587	38,120
I	18,409	15,635	38,549	Tableau annexe 4.1 – Compositions isotopiques du plomb des monnaies des Coriosolites (Gruel et Gale, 1980), de Massilia au V-VI ^e siècle BC (Marcoux, 1985 inédit), des monnaies des Éduens de Bibracte (Cauuet <i>et al.</i> , 2023) ; comparaison avec le plomb du Laurion (Vogl <i>et al.</i> , 2018) et des minéralisations plombo-argentifères du Mont-Beuvray (Cauuet <i>et al.</i> , 2023).			18,090	15,586	38,118
I	18,483	15,648	38,651				18,091	15,586	38,119
I	18,445	15,652	38,639				18,255	15,603	38,218
III	18,531	15,662	38,748				18,558	15,622	38,571
III	18,569	15,664	38,839				18,516	15,596	38,800
III	18,306	15,631	38,437				18,519	15,598	38,654
III	18,393	15,634	38,521				18,445	15,617	38,546
litharge	18,366	15,622	38,391				18,375	15,608	38,460
litharge	18,376	15,630	38,401				18,185	15,612	38,255
							18,319	15,617	38,347
							18,260	15,597	38,282

Appendix table 4.1 – Lead isotopic compositions of coins from the Coriosolites (Gruel and Gale, 1980), from Massilia in the 5th-6th century BC (Marcoux, 1985 unpublished), from the coins of the Aedui of Bibracte (Cauuet *et al.*, 2023); comparison with lead from Laurion (Vogl *et al.*, 2018) and lead-silver mineralization from Mont-Beuvray (Cauuet *et al.*, 2023).

exploitée au moins dès -170 et particulièrement riche en argent, une des sources principales du plomb et de l'argent de ces monnaies coriosolites. La mine d'Huelgoat, exploitée dès l'âge du Bronze, est aussi une source compatible, de même que Crossac.

Annexe 5 - Procédure analytique et calculs

5.1 - Procédure analytique

La procédure analytique est détaillée dans le mémoire de thèse (Marcoux, 1987). Je ne donnerai ici que les éléments essentiels. Une fois les échantillons prélevés il faut les dissoudre. Les sulfures sont dissous dans 2-3 gouttes d'HBr et le résidu sec repris dans HNO₃. La solution de Pb(NO₃)₂ est évaporée et prête pour l'analyse au spectromètre de masse. La dissolution des feldspaths, roches et gossans est plus complexe et nécessite un passage sur résine échangeuse d'ions (Ag 1-8 X sous forme d'acétate) pour obtenir la solution de Pb(NO₃)₂. Le spectromètre de masse utilisé est un Finnigan MAT 261 à thermo-ionisation équipé d'un barillet de 13 filaments. Le filament de rhénium 25 µ est chargé avec 3 µl de gel de silice partiellement évaporés puis avec 3 µl de H₃PO₄ 0,25 N à 100 ng/µl de Pb (soit 300 ng de Pb) obtenue par reprise du résidu de Pb(NO₃)₂ à analyser. La température d'émission se situe entre 1 200 °C et 1 350 °C, et 6 blocs de 10 balayages ont été enregistrés soit 60 valeurs des rapports ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb et ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb.

Les rapports ont été corrigés par rapport au standard NBS 982. Le fractionnement est de 1,254 ‰ par unité de masse. L'erreur à 95 % de confiance a été définie comme égale à 2 σ_{SD}, σ_{SD} étant l'erreur analytique interne ou *standard deviation*. Les incertitudes absolues sur les mesures sont comprises entre 0,008 et 0,013 pour ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (2 σ_{SD} = 0,46 à 0,72 ‰), 0,007 et 0,012 pour ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb (2 σ_{SD} = 0,48 à 0,78 ‰), 0,020 et 0,028 pour ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb (2 σ_{SD} = 0,56 à 0,72 ‰). La méthode du double spike, qui permet des corrections très rigoureuses du fractionnement, n'a pas été utilisée pour ces analyses.

Le polygone d'incertitude (reporté sur quelques figures) définit le champ dans lequel est située la valeur vraie de l'échantillon (Fig. annexe 5.1). L'analyse est par convention le centre de ce polygone. Sa représentation graphique tient compte de l'erreur analytique interne 2 σ_{SD} et de la reproductibilité 2 σ égale à 0,3 ‰ par unité de masse, un paramètre qui rend compte de la possible variation du fractionnement qui a pour effet de translater les points sur une droite de pente a passant par (x_o, y_o) et le point d'analyse. Le polygone d'erreur est alors délimité par les valeurs extrêmes (a + 2 σ) et (a - 2 σ) des pentes.

La mesure des « blancs » a été réalisée par introduction d'une quantité connue de spike ²⁰⁷Pb. Les blancs totaux de manipulation sont : < 0,1 ng pour les galènes, 0,5 ng pour les feldspaths et roches totales, 1,5 ng pour les gossans et sulfures non plombifères, soit des valeurs négligeables par rapport à la quantité de plomb analysée (300 ng) qui ne nécessitent pas de corrections.

5.2 - Calculs

Les calculs de µ et W peuvent se faire par deux méthodes. La première est directe et consiste à mesurer les teneurs en U, Th et Pb de la roche totale ainsi que sa composition isotopique et à appliquer les équations ci-dessous, µ et W étant des rapports atomiques et non pondéraux. Mais avec cette méthode les rapports et teneurs mesurés sont ceux actuels, les résultats sont donc biaisés.

$$\mu = \frac{^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}} = \frac{\text{U(ppm)}/\text{Pb(ppm)} \times (207,2/238) \times (1 + ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})}{1 + ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}}$$

$$W = \frac{^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}} = \frac{\text{Th(ppm)}/\text{Pb(ppm)} \times (207,2/232) \times (1 + ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})}{1 + ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} + ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}}$$

Les nombres 232, 238 et 207,2 sont les masses atomiques moyennes du thorium, de l'uranium et du plomb, respectivement.

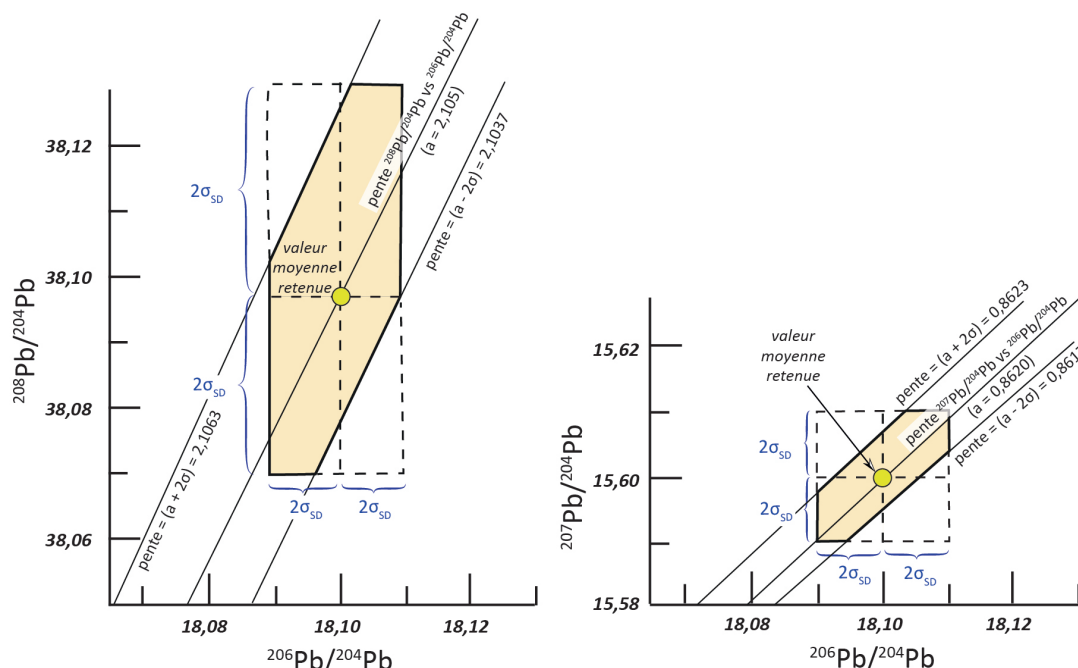


Figure annexe 5.1 – Polygones d'incertitude attachés aux mesures (d'après Marcoux, 1987).

Appendix figure 5.1 – Uncertainty polygons attached to measurements (after Marcoux, 1987).

La seconde méthode est indirecte mais rigoureuse. Elle consiste à mesurer d'abord la composition isotopique du feldspath potassique (FK), admise comme la composition initiale (les teneurs en U et Th y étant nulles à très faibles μ et W sont sub-nuls), puis celle de la roche totale qui donne la composition actuelle (t_0). Il suffit ensuite de calculer μ et W à partir des équations suivantes où ils sont les seules inconnues :

$$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{FK}} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t_0} - \mu \times (e^{0,155125 \times t} - 1)$$

$$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{FK}} = ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t_0} - \mu/137,88 \times (e^{0,98485 \times t} - 1)$$

$$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{FK}} = ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t_0} - W \times (e^{0,049475 \times t} - 1)$$

Cette méthode donne les valeurs exactes de μ et W mais nécessite une séparation de feldspath, deux analyses isotopiques (feldspath et roche totale), et aussi de connaître l'âge t de la roche.

Pour calculer les compositions isotopiques d'une roche à un âge t_2 (exprimé en Ga), on résout les équations suivantes, 3,7 Ga correspondant au début du second stade d'évolution dans le modèle de Stacey-Kramers (1975) :

$$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t_2} = ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{FK}} + \mu \times (e^{0,155125 \times 3,7} - e^{0,155125 \times t_2})$$

$$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t_2} = ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{FK}} + \mu/137,88 \times (e^{0,98485 \times 3,7} - e^{0,98485 \times t_2})$$

$$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{t_2} = ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{\text{FK}} + W \times (e^{0,049475 \times 3,7} - e^{0,049475 \times t_2})$$

BIBLIOGRAPHIE

- Alexandre P.** (2007) - U-Pb zircon SIMS ages from the French Massif Central and implication for the pre-Variscan tectonic evolution in Western Europe. *CR Géosciences*, 339, 613-621
- Ballouard C., Poujol M., Boulvais P., Zeh A.** (2017) – Crustal recycling and juvenile addition during lithospheric wrenching: the Pontivy-Rostrenen magmatic complex, Armorican Massif (France), Variscan belt. *Gondwana Research*, 49, 222-247 <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2017.06.00>
- Barrière M., Plusquellec Y., Darboux J.R., Garreau J.** (1975) - Carte géologique de la France au 1/50 000ème – Feuille Douarnenez et notice. Éditions BRGM Orléans
- Baubron J.C., Jébrak M., Joannès C., Lhégu J., Touray J.C., Ziserman A.** (1980) – Nouvelles datations K/Ar sur des filons à quartz et fluorine du Massif central français. *C. R. Acad. Sc. Paris t. 290*, 951-953
- Béchennec F., Thiéblemont D., Audru J.C.** (2006) - Carte géologique de la France au 1/50 000ème – Feuille Plouay et notice. Éditions BRGM Orléans
- Béchennec F., Thiéblemont D.** (2011) - Carte géologique de la France au 1/50 000ème – Feuille Bubry et notice. Éditions BRGM Orléans
- Boni M., Koeppel V.** (1985) - Ore-lead isotope pattern from the Iglesiente-Sulcis Area (SW Sardinia) and the problem of remobilization of metals. *Mineralium Deposita*, 20, 185-193
- Bos P., Castaing C., Clément J.P., Chantraine J., Lemeille F.** (1997) – Carte géologique de la France au 1/50 000 ème. Feuille Rostrenen. Éditions BRGM, Orléans
- Bouchot V., Milési J.P., Lescuyer J.L., Ledru P.** (1997) – Les minéralisations aurifères de la France dans leur cadre géologique autour de 300 Ma. *Chronique de la Recherche Minière*, 528, 13-62
- Bouchot V., Milési J.P., Ledru P.** (2000) – Crustal-scale hydrothermal palaeofield and related Variscan Au, Sb, W orogenic deposit at 310-305 Ma (French Massif Central, Variscan belt). *SGA News*, n° 10, December 2000, 6-12
- Bouchot V., Ledru P., Lerouge C., Lescuyer J.L., Milési J.P.** (2005) – Late-Variscan mineralizing systems related to orogenic processes: the French Massif Central. *Ore Geology Reviews* 27, 1-4, 169-197
- Bouladon J. Périchaud J.J., Picot P., Sainfeld P.** (1964) – Le faisceau filonien de Pontgibaud (Puy-de-Dôme). *Bulletin BRGM*, section I, 1-41
- Brévert O., Dupré B., Allègre C.J.** (1982) – Metallogenic provinces and the remobilization process studied by lead isotopes: lead-zinc ore deposits from the southern Massif Central, France. *Economic Geology*, 77, 564-575
- Bril H., Bonhomme M.G., Marcoux É., Baubron J.C.** (1991) - Ages K/Ar des minéralisations de Brioude Massiac (W Au As Sb ; Pb Zn), Pontgibaud (Pb Ag ; Sn) et Labessette (As Pb Sb Au) : place de ces districts dans l'évolution géotectonique du Massif central français. *Mineralium Deposita*, 26, 3, 189-198
- Cannon R.S., Pierce A.P., Delevaux M.H.** (1963) – Lead isotope variation with growth zoning in a galena crystal. *Science*, 42, 574-576
- Cannon R.S., Pierce A. P.** (1969) – Lead isotope guides for Mississippi Valley lead-zinc exploration. *Geological Survey Bulletin* 1312 G, 20 p.
- Cantinolle P.** (1984) – Altération hydrothermale et minéralisation liées à un filon plombo-zincifère de basse température : le gîte de La Telhaie (Morbihan). Thèse Univ. de Poitiers, 242 p.
- Cartier A., Huard M.** (1980) - Les gisements de fluorine d'Es-caro et de Sahorre. In *Métallogénie du Massif central et des Pyrénées*. 26ème CGI, Paris, 56-62
- Cartier C., Faure M.** (2004) - The Saint-Georges-sur-Loire olistostrome, a key zone to understand the Gondwana-Armorica boundary in the Variscan belt (Southern Brittany, France). *International Journal of Earth Sciences*, 93, 6, 945-958
- Cassard D., Chabod J.C., Marcoux É., Bourguine B., Castaing C., Gros Y., Kosakévitch A., Moisy M., Viallefond L.** (1994) - Mise en place et origine des minéralisations du gisement filonien à Zn, Ge, Ag (Pb,Cd) de Noailhac-Saint-Salvy (Tarn, France). *Chronique de la Recherche Minière*, 514, 3-37
- Cathelineau M., Boiron M.C., Holliger P., Poty B.** (1990) - Metallogenesis 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, 1-3, 59-79
- Cathelineau M., Boiron M.C., Fourcade S., Ruffet G., Clauer N., Belcourt O., Coulibaly Y., Banks D.A., Guillocheau F.** (2012) - A major Late Jurassic fluid event at the basin/basement unconformity in western France: 40Ar/39Ar and K–Ar dating, fluid chemistry, and related geodynamic context. *Chemical Geology*, 322-323, 99-120. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.06.008>
- Cattin F., Guénette-Beck B., Besse M., Serneels M.** (2009) – Lead isotopes and archeometallurgy. *Archaeological and anthropological Sciences*, 1, 137-148
- Cauuet B., Gruel K., Tamas C.G., Sizaret S., Marcoux É.** (2023) – Une production d'argent sur l'oppidum de Bibracte. De la mine à la monnaie. *Actes du Colloque de l'AFEAF (Association Française pour l'Étude de l'Âge du Fer) Gijon*, 2021, 31-45
- Chantraine J., Égal É., Thiéblemont D., Le Goff É., Guerrot C., Ballèvre M., Guennoc P.** (2001) - The Cadomian active margin (North Armorican Massif, France): a segment of the North Atlantic Panafrikan belt. *Tectonophysics*, 331, 1-2, 1-18
- Cheilletz A., Gasquet D., Filali F., Archibald D.A., Nespolo M.** (2010) – A late Triassic 40Ar/39Ar age for El Hammam high-REE fluorite deposit (Morocco): mineralization related to the Central Atlantic Magmatic Province? *Mineralium Deposita*, 45, 323-329
- Cheval-Garabédian F., Faure M., Marcoux É., Gouin J., Picault M.** (2020) - The La Bellière gold and antimony district (French Armorican Massif): a two-stage evolution model controlled by Variscan strike-slip tectonic. *Ore Geology Reviews*, 125, 103681
- Cheval-Garabédian F., Marcoux É., Faure M., Poujol M.** (2021) – The tungsten-gold veins of Bonnac (French Massif Central): new constraints for a Variscan granite-related genesis. *BSGF- Earth Sciences Bulletin*, 192, 7, 1-25 <https://doi.org/10.1051/bsgf/2020041>

- Cheval-Garabédian F., Marcoux É., Faure M., Raimbourg H.** (2023) – The La Lucette Sb-Au-(W) vein-deposit (Armorican Massif, France): new time and genesis constraints to decipher the 310-295 Ma Sb-Au metallogenic peak in the Variscan Belt. *Ore Geology Reviews* 163 105728 <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105728>
- Chiaradia M., Fontboté L.** (2003) - Separate lead isotope analyses of leachate and residue rock fractions: implications for metal source tracing in ore deposit studies. *Mineralium Deposita*, 38, 185–195. DOI 10.1007/s00126-002-0301-8
- Cumming G.L. and Richards J.R.** (1975) – Ore lead isotope ratios in a continuously changing earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 28, 155-171
- Deloule E., Allègre C.-J., Doe B.R.** (1986) - Lead and sulfur isotope microstratigraphy in galena crystals from Mississippi-Valley type deposits. *Economic Geology*, 81, 1307-1321
- Deloule E., Turcotte D.-L.** (1989) - The flow of hot brines in cracks and the formation of ore deposits. *Economic Geology*, 84, 2217-2225
- Doe B.R., Delevaux M.H.** (1972) – Source of lead in Southeast galena ores. *Economic Geology*, 67, 409-425
- Doe B.R., Zartman R.E.** (1979) - Plumbotectonics, the Phanerozoic. In: Barnes HL (editor) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. Wiley, New York, 22–70
- Doucet L.S., Li Z.X., Fougereuse D., Olierook H.K.H., Gamaleldien H., Kirkland C.L., Hartnady M.I.H.** (2023) – The global lead isotope system: toward a new framework reflecting Earth's dynamic evolution. *Earth Science Reviews*, 243, doi. [org/10.1016/j.earscirev.2023.104483](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104483)
- Dumas F.** (2010) – De Philippe Auguste à Charlemagne. Recherches sur l'argent des monnaies. *Revue numismatique*, 6ème série, 166, 41-50
- Faure M., Bé Mézémé E., Duguet M., Cartier C., Talbot J.Y.** (2005) - Paleozoic tectonic evolution of medio-europa from the example of the French Massif central and Massif armoricain. *Journal of the Virtual Explorer*, 2005, Electronic Edition, ISSN 1441-8142, volume 19, Paper 5
- Faure M., Thiéblemont, D., Beurrier M., Lach P., Guerrot C.** (2024) - Analyses isotopiques U/Pb sur zircon, monazite et xénotime de l'orthogneiss du septum de Chalencon dans les migmatites du Velay. Confirmation du magmatisme de l'Ediacarien-Cambrien inférieur. Nouveaux arguments en faveur d'un épisode hydrothermal au Permien supérieur. *Géologie de la France*, 2, 13-27
- Fogliérini F., Béziat P., Tollon F., Chabod J.C.** (1980a) – Le gisement filonien de Noailhac-Saint-Salvy (Tarn), 26è CGI, Gisements français, fascicule E6
- Fogliérini F., Bernard A., Verraes G.** (1980b) – Le gisement des Malines (Gard), 26è CGI, Gisements français, fascicule E5
- Fouquet Y.** (1980) – Les districts antimonifères de Quimper et du Cap Sizun (Finistère). Leur place dans la métallogénie de l'antimoine dans le Massif armoricain (France). Thèse 3ème cycle Univ. de Clermont-Ferrand, 192 p.
- Gigoux M., Delpech G., Guerrot C., Pagel M., Augé T., Négrel P., Brigaud B.** (2015). Evidence for an Early Cretaceous mineralizing event above the basement/sediment unconformity in the intracratonic Paris Basin: paragenetic sequence and Sm-Nd dating of the world-class Pierre-Perthuis stratabound fluorite deposit. *Mineralium Deposita*, 50, 455-463
- Gloaguen É., Branquet Y., Boulvais P., Moëlo Y., Chauvel J.J., Chiappero P.J., Marcoux É.** (2007) - Palaeozoic oolitic ironstone of the French Armorican Massif: a chemical and structural trap for orogenic base metal-As-Sb-Au mineralisation during Hercynian strike-slip deformation. *Mineralium Deposita*, 42, 399-422
- Graviou P., Peucat J.-J., Auvray B., Vidal P.** (1988) – The Cadomian orogeny in the Northern Armorican massif; petrological and geochronological constraints on a geodynamic model. *Hercynica*, 1, 1-13
- Gruel K., Gale N.H.** (1980) – L'argent des monnaies coriosolites in Mines et Fonderies antiques de la Gaule. Hors-Série du Centre régional de publications de Toulouse. Éditions du CNRS 1982
- Gulson B.L.** (1986) – Lead isotope in mineral exploration. *Developments in economic geology* n°23. Elsevier, 245 p.
- Holden N.E., Lide D.R.** (éditeurs) (2004) - Handbook of Chemistry and Physics, "Table of the Isotopes", Section 11 - CRC Press, 85è éd., 2712 p.
- Jébrak M.** (1984) - Contribution à l'histoire naturelle des filons (F, Ba) du domaine varisque Français et Marocain. Essai de caractérisation structurale et géochimique des filons en extension et en décrochement. Thèse doctorat ès Sciences, Univ. d'Orléans, Document du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 99, 510 p.
- Johann Z., Picot P., Ruhlmann F.** (1982) – Évolution paragenétique de la minéralisation uranifère de Chaméane (Puy-de-Dôme), France : chaméanite, geffroyite et giraudite, trois nouveaux sélénures nouveaux de Cu, Fe, Ag et As. *TMPM Tschermarks Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 29, 151-167
- Joseph D., Bellon H., Derré C., Touray J.C.** (1973) – Fluorite veins dated in the 200 million years range at la Petite Verrière and Chavagnac, France. *Economic Geology*, 68, 707-708
- Kramers J.D., Tolstikhin I.N.** (1997) - Two terrestrial lead isotope paradoxes, forward transport modelling, core formation and the history of the continental crust. *Chemical Geology*, 139, 75-110
- Laumonier B.** (2015) – Les Pyrénées alpines sud-orientales (France, Espagne) – essai de synthèse. *Revue de Géologie Pyrénéenne*, 2, 1, 44 p.
- Le Guen M., Lancelot J.R.** (1989) – Origine du Pb-Zn des minéralisations du Bathonien sous-cévenol. Apport de la géochimie isotopique du plomb des galènes, de leur encaissant et du socle. *Chronique de la Recherche Minière*, 495, 31-36
- Le Guen M., Orgeval J.J., Lancelot J.R.** (1991) – Lead isotope behaviour in a polyphased Pb-Zn ore deposit: Les Malines (Cévennes, France). *Mineralium Deposita* 26, 180-188
- Le Guen M., Lescuyer J.L., Marcoux É.** (1992) - Lead isotope evidence for a Hercynian origin of the Salsigne gold deposit (Southern Massif Central, France). *Mineralium Deposita*, 27, 129-136
- Leach D.I., Bradley D., Lewchuk M.T., Symons D.T.A., de Marsily G., Brannon J.** (2001) – Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. *Mineralium Deposita*, 36, 711-740, DOI10.1007/s001260100208

- Leroy J., Holliger P.** (1984) - Mineralogical, chemical and isotopic (U-Pb method) studies of Hercynian uraniferous mineralizations (Margnac and Fanay mines, Limousin, France). *Chemical Geology*, 45, 1-2, 121-134
- Lescuyer J.L., Bouchot V., Cassard D., Feybesse J.L., Marcoux É., Moine B., Piantone P., Tegye M., Tollon F.** (1993) - Le gisement aurifère de Salsigne (Aude, France) : une concentration syntectonique tardi varisque dans les sédiments détritiques et carbonatés de la Montagne Noire. *Chronique de la Recherche Minière*, 512, 3-73
- Lin W., Faure M., Li X.H., Chu Y., Ji W., Xue Z.** (2016) - Detrital zircon age distribution from Devonian and Carboniferous sandstone in the Southern Variscan Fold-and-Thrust belt (Montagne Noire, French Massif Central), and their bearings on the Variscan belt evolution. *Tectonophysics* 677-678, 1–33
- Ludwig K.R.** (2003) – Isoplot/Ex version 3: a geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication n° 4, 70 p.
- Marcoux É.** (1980) – Le district de Pontivy – Sa place dans la métallogénie plombo-zincifère du Massif armoricain (France). Thèse Univ. Clermont-Ferrand, 287 p.
- Marcoux É.** (1987) - Isotopes du plomb et paragenèses métalliques, traceurs de l'histoire des gîtes minéraux. Illustration des concepts de source, d'héritage et de régionalisme dans les gîtes français. Applications en recherche minière. Thèse de Doctorat d'État, Univ. de Clermont Ferrand II. Mémoire BRGM, n° 117, 289 p. + annexes
- Marcoux É.** (1998) - Lead isotope systematics of the giant massive sulphide deposits in the Iberian pyrite belt. *Mineralium Deposita*, 33, 1-2, 45-58
- Marcoux É.** (2017) – Mines et ressources minérales d'Armorique. Éditions Société de l'Industrie Minérale, Paris, 472 p.
- Marcoux É., Picot P.** (1985) - Les minéralisations de Pontgibaud (Puy de Dôme) : une approche par la géochimie isotopique du plomb et les paragenèses. *Chronique de la Recherche Minière*, 481, 27-38
- Marcoux É., Bril H.** (1986) - Héritages et sources des métaux d'après la géochimie isotopique du plomb. L'exemple des minéralisations filoniennes (Sb, Pb, Ba, F) du Haut Allier (Massif-central, France). *Mineralium Deposita*, 21, 35-43
- Marcoux É., Jébrak M.** (1987) - Approche géochimique de l'origine et de la durée des dépôts hydrothermaux dans le district d'Ussel (Massif-central, France). *C. R. Acad. Sci. Paris*, vol. 305, série II, 377-381
- Marcoux É., Moëlo Y.** (1991) - Lead isotope geochemistry and paragenetic study of inheritance phenomena in metallogenesis: examples from base metal sulfide deposits in France. *Economic Geology*, 86, 106-120
- Marcoux É., Milési J.P.** (1993) - Lead isotope signature of Early Proterozoic ore deposits in western Africa: comparison with gold deposits in French Guiana. *Economic Geology*, 88, 7, 1862-1879
- Marcoux É., Jébrak M.** (2021) – Plombotectonique des gisements du Maroc. *BSGF- Earth Sciences Bulletin* 2021, 192, 31, <https://doi.org/10.1051/bsgf/2021019>
- Marcoux É., Picot P., Moëlo Y.** (1985) - Évolution paragenétique des minéralisations sulfurées aurifères du district de Pontvieux Labessette (Puy de Dôme) - Apport des études isotopiques du plomb. *Bulletin de Minéralogie*, 108, 465-481
- Marcoux É., Moëlo Y., Picot P., Baubron J.C.** (1988) - Évolution minéralogique et isotopique (Pb) du filon sulfuré complexe des Borderies (Puy de Dôme, France). Implications métallogéniques. *Mineralium Deposita*, 23, 58-70
- Marcoux É., Pélisson P., Baubron J.C., Lhégu J., Touray J.C.** (1990) - Ages des formations filoniennes à fluorine barytine quartz du district de Paulhaguet (Haute Loire, Massif central français). *C. R. Acad. Sci. Paris*, vol. 311, série I, 829-835
- Marcoux É., Lescuyer J.L., Milési J.P.** (1990) - Géochimie isotopique du plomb du gisement de Chessy et des minéralisations volcano sédimentaires de la série de la Brévenne (Massif central). *Chronique de la Recherche Minière*, 501, 3-11
- Marcoux É., Joubert M., Lescuyer J.L.** (1991) - Origine des minéralisations stratiformes de la bordure du Canigou (Pyrénées Orientales, France) : apport de la géochimie isotopique du plomb. *C. R. Acad. Sci. Paris*, vol. 312, série II, 81-287
- Marcoux É., Cassard D., Chabod J.C.** (1993) - Source hercynienne du gisement filonien Zn (Ge) de Saint-Salvy (Tarn, France) - *C. R. Acad. Sci. Paris*, 316, série II, 1091-1098
- Marcoux É., Le Berre P., Cocherie A.** (2004) - The Meillers Autunian hydrothermal chalcedony: first evidence of a ~295 Ma auriferous epithermal sinter in the French massif central. *Ore Geology Reviews*, 25, 69-87
- Marcoux É., Poujol M., Wadier P.** (2022) - Le gisement à étain-cuivre-indium de Charrier (Allier) : un skarnoïde viséen (340 Ma) traceur de la métallogenèse varisque du nord Massif central. *BSGF- Earth Sciences Bulletin*, 193, 17 <https://doi.org/10.1051/bsgf/2022019>
- Mathonat M.** (1983) - La Série métamorphique du Cézallier (Massif central français) : lithologie et structure ; relations du groupe leptyno-amphibolique avec les autres formations de la région. Thèse Univ. Clermont-Ferrand, 216 p.
- Melleton J., Cocherie A., Faure M., Rossi P.** (2010) - Precambrian protoliths and Early Paleozoic magmatism in the French Massif Central: U–Pb data and the North Gondwana connection in the west European Variscan belt. *Gondwana Research*, 17, 13-25
- Michard-Vitrac A., Albarède F., Allègre C.J.** (1981) – Lead isotopic composition of Hercynian granitic K-feldspars constrains continental genesis. *Nature*, 291, 460-464
- Milési J.-P., Feybesse J.-L., Ledru P., Dommanget A., Ouedraogo M.-F., Marcoux É., Prost A., Vinchon C., Sylvain J.-P., Johan V., Tegye M., Calvez J.-Y., Lagny P.** (1989) - Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. *Chronique de la Recherche Minière*, 497, 3-98
- Milési J.P., Egal E., Ledru P., Vernhet Y., Thiéblemont D., Cocherie A., Tegye M., Martel-Jantin B., Lagny P.** (1995) - Les minéralisations du nord de la Guyane française dans leur cadre géologique. *Chronique de la Recherche Minière*, 518, 5-58
- Moëlo Y., Fouquet Y., Laforêt C., Chauris L.** (1978) – L'indice plombo-antimonifère de Bestrée (Cap Sizun, Finistère). *Bulletin de Minéralogie*, 101, 363-367
- Munoz M., Premo W.R., Courjault-Rade P.** (2005) - Sm–Nd dating of fluorite from the worldclass Montroc fluorite deposit, southern Massif Central, France. *Mineralium Deposita*, 39, 970–975; DOI 10.1007/s00126-00453-9

- Négroni J.M.** (1982) – Les minéralisations de F-Ba-Pb-Zn dans l'évolution structurale et métallogénique du district plomb-zincifère de Pontgibaud (France). *Bulletin BRGM*, 2ème série, section II, 3, 237-242
- Nicolet-Pierre H., Barrandon J.N., Calvez J.Y.** (1985) – Monnaies archaïques d'Athènes sous Pisistrate et les Pisis-tratides. *Revue numismatique*, 6è série - Tome 27, 23-44
- Nieto S., Barrandon J.N.** (2003) – L'apport des isotopes du plomb à l'étude des monnayages d'argent gaulois du centre de la Gaule. XIIIè Congrès international de numismatique, sept 2023, Madrid, 415-425
- Périchaud J.J.** (1971) – Les gisements métalliques du district à antimoine de Brioude-Massiac (Massif central français). *Bulletin du BRGM*, 2ème série, section II, 2, 1-55
- Pitra P., Ballèvre M., Ruffet G.** (2010) – Inverted metamorphic field gradient towards a Variscan suture zone (Champtoceaux complex, Armorican Massif, France). *Journal of Metamorphic Geology* 28, 2, 183-208. doi.org/10.1111/j.1525-1314.2009.00862.x
- Pochon A., Poujol M., Gloaguen É., Branquet Y., Cagnard F., Gumiaux C., Gapais D.** (2016a) - U-Pb LA-ICP-MS dating of apatite in mafic rocks: Evidence for a major magmatic event at the Devonian-Carboniferous boundary in the Armorican Massif (France). *American mineralogist*; https://doi.org/10.2138/am-2016-5736
- Pochon A., Gloaguen É., Branquet Y., Poujol M., Gumiaux C., Cagnard F., Gapais D.** (2016b) - Mafic rocks vs. Sb mineralisation: a role in the early metal distribution processes? Insights from the Variscan Armorican belt (France). *Terra Nova*, doi: 10.1111/ter.12201
- Poitrenaud T., Poujol M., Augier R., Marcoux É.** (2020) – The polyphase evolution of a late Variscan W/Au deposit (Salau, French Pyrenees): insights from REE and U/Pb LA ICP-MS analyses. *Mineralium Deposita*, doi.org/10.1007/s00126-019-00923-2
- Poitrenaud T., Marcoux É., Augier R., Poujol M.** (2021) - Le gisement de tungstène-or de Salau (Ariège) : sa place dans la métallogénèse des Pyrénées BSGF- *Earth Sciences Bulletin* 2021, 192, 16, 1-33 https://doi.org/10.1051/bsgf/2020044
- Pomiès C., Cocherie A., Guerrot C., Marcoux É., Lancelot J.R.** (1998) - Assessment of the precision and accuracy of lead-isotope ratios measured by TIMS for geochemical applications: example of massive sulphide deposits (Rio Tinto, Spain). *Chemical Geology*, 144, 137-149
- Poujol M., Boulvais P., Kosler J.** (2010) - Regional-scale Cretaceous albitization in the Pyrénées: evidence from in situ U-Th-Pb dating of monazite, titanite and zircon. *Journal of Geological Society*, 167 (4), 751-767
- Routhier P.** (1980) – Où sont les métaux pour l'avenir ? *Mémoire BRGM* 105, 410 p.
- Schärer I., Parceval de P., Polvé M., Saint-Blanquat de P.** (2002) - Formation of the Trimouns talc-chlorite deposit (Pyrénées) from persistent hydrothermal activity between 112 and 97 Ma. *Terra Nova*, 11, 1, 30-37
- Sinclair A.J., Macquar J.C., Rouvier H.** (1993) - Re-evaluation of lead isotopic data, southern Massif Central, France. *Mineralium Deposita* 28, 122-128
- Sizaret S., Marcoux É., Jébrak M., Touray J-C.** (2004) - The Rossignol fluorite vein, Chaillac, France: Multiphase hydrothermal activity and intra-vein sedimentation. *Economic Geology*, 99, 1107-1122
- Sizaret S., Marcoux É., Boyce A., Jébrak M., Stevenson R., Ellam R.** (2009) - Isotopic (S, Sr, Sm/Nd, D, Pb) evidences for multiple sources in the Early Jurassic Chaillac F-Ba ore deposit (Indre, France). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 180, 2, 83-94
- Stacey J.S., Kramers J-D.** (1975) - Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207-221
- Stos-Gale Z.A., Gale N.H.** (2009) - Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID). *Archaeological and Anthropological Sciences*. 1, 3, 195-213
- Thiéry V., Rolin P., Marquer D., Cocherie A., Fanning M., Rossi P.** (2009) - Visean sinistral wrench faulting along the Sil-lon Houiller in the French Massif Central: Late Variscan tectonic implications. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 180, 6, 513-528
- Touray J.C., Marcoux É., Hubert P., Proust D.** (1989) - Hydrothermal processes and ore forming fluids in the Le Bourneix gold deposit, Central France. *Economic Geology*, 84, 1328-1339
- Valenzuela A., Donaire T., Pin C., Toscano M., Hamilton M.A., Pascual E.** (2011) - Geochemistry and U-Pb dating of felsic volcanic rocks in the Riotinto-Nerva unit, Iberian Pyrite Belt, Spain: crustal thinning, progressive crustal melting and massive sulphide genesis. *Journal of the Geological Society*, London, Vol. 168, 2011, 717-731 doi: 10.1144/0016-76492010-081
- Vidal P., Postaire B.** (1985) – Étude par la méthode Pb-Pb de roches de haut grade métamorphique impliquées dans la chaîne hercynienne. *Chemical Geology*, 49, 429-449
- Vogl J., Rosner M., Curbera J., Peltz U., Peplinski B.** (2018) - Lead isotope analysis in magic artefacts from the Berlin museums. *Archaeological and anthropological Sciences*, 10, 1111-1127
- Zartman R.E., Doe B.R.** (1981) – Plumbotectonics. The model. *Tectonophysics*, 75, 135-162
- Zartman R.E., Haines S.M.** (1988) – The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – A case for bi-directional transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 1327-1339