

**Analyse géochimique de la composition des sédiments permien-triasiques (?) du  
bassin de Graissessac-Lodève : traçage des sources**

Chloé CHOPIN

Encadrant : Stéphane Pochat

Co-encadrants : Antoine Bézos, Carole La, Marion Rivoal

*Laboratoire de Planétologie et de Géodynamique de Nantes (LPGN), CNRS UMR 6112, Université de  
Nantes, 2 rue de la Houssinière, BP 92208, 44322 Nantes CEDEX3, France*

Stage financé par le projet RGF – AMI Pyrénées 2016

Master 2 Sciences de la Terre et de l'Environnement, spécialité Sciences de la Terre – Juin 2016

Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, Université de Rennes 1

## Résumé

Le bassin Carbonifère-Permien de Graissessac-Lodève est situé au sud du Massif Central (France) qui s'est construit à la suite de l'effondrement gravitaire des terrains paléozoïques. Il s'agit d'un bassin composé de séries sédimentaires relativement continues datées du Stéphaniens au début du Trias. De nombreuses études de terrain et en laboratoire ont été réalisées telles que des études sur des zircons, sur les traces de fission sur apatite, sur les paléocourants et sur la minéralogie sédimentaire du bassin (Saint Martin, 1992 ; Pfeifer *et al.*, 2016 ; Pochat *et al.*, 2005 ; Pochat & Van Den Driessche, 2011) pour mieux comprendre l'évolution tectonique du bassin. L'aspect principal de cette étude est de regarder la composition chimique de roches sédimentaires à granulométrie fine telles que des argilites et des pélites pour tracer les sources des sédiments du bassin de Graissessac-Lodève. Ces roches ont été analysées chimiquement via l'ICP-MS pour les éléments traces et via l'ICP-AES pour les éléments majeurs et mineurs. La pétrologie, la composition chimique sur ces sédiments Carbonifère-Permien montrent que des variations de composition chimique des roches sédimentaires sont dues à l'altération chimique, les effets de dilution et les influences chimiques des sources. Le CIA et le diagramme A-CN-K montre une amplitude d'altération et les effets du métasomatisme. Les effets de dilution sont directement reliés à la granulométrie de la roche. Pour les éléments tels que K, Al, Fe, REE, Ga, Ni, Zn, Co, Cr, Cs, Rb leur concentration sera élevée pour des granulométries fines contrairement aux éléments Si, Hf, Ta, Ca, Ba et Zr. Enfin, les rapports  $(La/Yb)_N$  et  $Eu/Eu^*$  permettent de conclure à une affinité parentale felsique certaine.

Mots clés : bassin de Lodève – géochimie des sédiments – sources – Permien

## Abstract

The Graissessac-Lodève basin is situated in the south of the Massif Central (France) and is built on paleozoic land. It's a basin composed of sedimentary series stephanian to Early Trias. Many studies were realized as studies on zircons, on fission traces on apatites, about paleocurrents and on sedimentology of the basin (Saint Martin, 1992 ; Pfeifer *et al.*, 2016 ; Pochat *et al.*, 2005 ; Pochat & Van Den Driessche, 2011) to better understand the tectonic evolution of the basin. The main focus of this study is to look at the chemical composition of sedimentary rocks with fine grain size like argillites and shales in order to trace the sources of sediments of Graissessac-Lodeve basin. These rocks were chemically analyzed by ICP-MS and ICP-AES. Petrology and chemical composition on these Carboniferous-Permian sediments show that chemical composition variations are due to chemical weathering, dilution effects and chemical influences of sources. The CIA and the diagram A-CN-K shows an amplitude of alteration and the effects of metasomatism. Dilution effects are connected directly from the grain size of the rock. For some elements as K, Al, Fe, REE, Ga, Ni, Zn, Co, Cr, Cs, Rb, their concentration will be high for fine particle sizes in contrast to the elements as Si, Hf, Ta, Ca, Ba and Zr. Finally, the  $(La / Yb)_N$  and  $Eu / Eu^*$  ratios allow to say there is a parental felsic affinity.

Keywords : Lodève basin – sediment geochemistry – sources – Permian

## Sommaire

I-	<u>Introduction</u> .....	3
II-	<u>Contexte géologique : de la chaîne Varisque au bassin de Graissessac-Lodève</u> .....	4
1-	<u>Contexte géologique de la chaîne Varisque</u> .....	4
1.1-	<i>Contexte tectonique et paléogéographique global</i> .....	4
1.2-	<i>Contexte climatique et paléofaciès global</i> .....	5
2-	<u>Contexte géologique du bassin de Graissessac-Lodève</u> .....	6
2.1-	<i>Le socle paléozoïque du bassin de Graissessac-Lodève</i> .....	6
2.2-	<i>Évolution stratigraphique et sédimentaire du bassin de Graissessac-Lodève</i> .....	8
III-	<u>Données stratigraphique et sédimentaire des échantillons de l'étude</u> .....	10
IV-	<u>Méthode analytique et démarches scientifiques</u> .....	11
1-	<u>Comparaison des analyses en majeurs et traces par ICP-AES et ICP-MS et évolution de l'efficacité des protocoles de mise en solution</u> .....	12
2-	<u>Protocole de préparation des solutions pour analyse des éléments majeurs, mineurs et traces par ICP-AES</u> .....	13
3-	<u>Protocole de préparation des solutions pour analyse des éléments traces par ICP-MS</u> .....	14
V-	<u>Résultats</u> .....	15
1-	<u>Pétrographie et géochimie des roches sédimentaires du bassin de Graissessac-Lodève</u> .....	15
2-	<u>Géochimie des roches sources</u> .....	19
VI-	<u>Discussion</u> .....	20
1-	<u>Rôle de l'altération</u> .....	21
2-	<u>L'effet de dilution</u> .....	22
3-	<u>L'influence des sources sur la composition chimique des sédiments</u> .....	23
VII-	<u>Conclusion</u> .....	24
VIII-	<u>Références bibliographiques</u> .....	24

### I- Introduction

Le bassin Carbonifère-Permien de Graissessac-Lodève est situé au sud du Massif Central (France) sur des terrains varisques. Il renferme environ 3000 mètre de sédiments datés de l'Autunien au Thuringien. Il constitue donc un bassin de référence puisque de nombreuses études de terrain et en laboratoire ont été réalisées telles que des études sur des zircons, sur les traces de fission sur apatite, sur les paléocourants et sur la minéralogie sédimentaire du bassin (Saint Martin, 1992 ; Pfeifer *et al.*, 2016 ; Pochat *et al.*, 2005 ; Pochat & Van Den Driessche, 2011). Ces études ont permis de mieux comprendre l'évolution tectonique du bassin.

Le but de cette étude est de regarder la composition chimique de roches sédimentaires pour tracer les sources des sédiments du bassin de Graissessac-Lodève. L'échantillonnage s'est effectué sur des roches à granulométrie fine telles que des argilites et des pélites, très abondantes dans ce bassin. Ces roches sont des sédiments clastiques intéressants dans le fait qu'ils sont enrichis en éléments traces et enregistrent l'intensité de l'altération météoritique selon différents processus comme le transport et la diagénèse. La pétrologie, la composition chimique en éléments majeurs, mineurs et traces sont analysés sur ces sédiments Carbonifère-

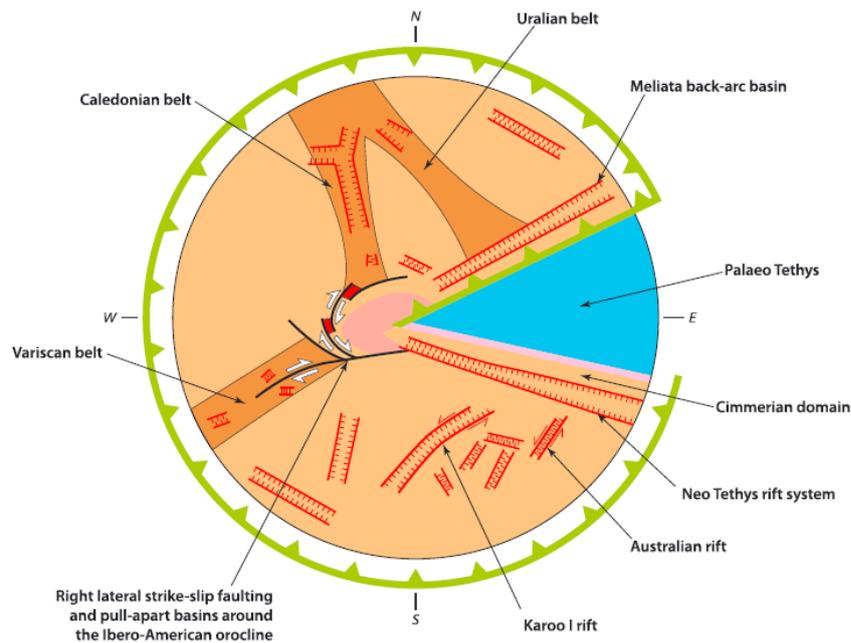
Permien et sur des roches dites sources de nature felsique relativement proche spatialement du bassin afin de voir des variations dans les compositions chimiques des sédiments dans le temps et dans l'espace.

## II- Contexte géologique : de la chaîne Varisque au bassin de Graissessac-Lodève

### 1- Contexte géologique de la chaîne Varisque

#### 1.1- *Contexte tectonique et paléogéographique global*

Le Permien est une période géologique ( $298,9 \pm 0,2$  à  $252,2 \pm 0,5$  Ma) durant laquelle la plupart des continents sont entrés en collision pour former le supercontinent Pangée. La Pangée s'est construite progressivement depuis la fin du Néoprotérozoïque pour former à la fin du Permien un continent fermé, avec un domaine océanique préservé appelé Téthys pointant vers l'Ouest. Ce continent a réellement existé pendant 120 Ma entre le milieu du Carbonifère et le Lias Inférieur. Cependant sa désintégration (Fig.1) a commencé dès le Carbonifère final par des systèmes de rifts sur les chaînes varisque et calédonnienne, dans le long de la bordure Est actuelle de l'Arabie et de l'Afrique où se situe le système Karoo I, le long de la bordure nord du Gondwana (c'est-à-dire la marge sud de la Paléotéthys), et dans le Gondwana Est dans les continents actuels de l'Inde, de l'Antarctique, et de l'Australie (Frizon de Lamotte *et al.* (2015).



**Figure 1 : Modèle à 270 Ma de la Pangée suggérant un mode d'extension par auto-subduction. D'après Gutiérrez-Alonso *et al.* (2008) ; Frizon de Lamotte *et al.*, (2015).**

La chaîne Varisque constitue le plancher paléozoïque de cette étude. Elle s'est formée sur une longue période allant du Silurien jusqu'au Carbonifère supérieur, et s'étend des Appalaches au Caucase. Elle résulte de la collision entre la plaque africaine qui fait partie du continent gondwanien et la plaque nord-européenne (Laurasie), induisant un raccourcissement intra-continentale de direction NW-SE (Chateaufort & Farjanel, 1989). Les systèmes de rifts provoquant la désintégration de la Pangée sont discutés, mais il est généralement

reconnu que le système de rifts en Europe de l'Ouest montre l'effondrement de la ceinture Calédonienne-Varisque, conduisant au développement d'un paysage « basin and range », caractéristique de beaucoup de grabens continentaux intramontagneux. Le rifting permien serait expliqué par la subduction de la ride médio-océanique de la Paléotéthys sous les continents de la Chine du Nord et de la Laurasia (Fig. 1), impliquant un slab-pull typique d'un modèle de rift passif sur des structures plus anciennes selon Gutiérrez-Alonso *et al.* (2008).

### 1.2- Contexte climatique et paléofaciès global

Les périodes de glaciation dominant durant les temps paléozoïques. Les glaciers sont localisés essentiellement en hautes et moyennes latitudes, et leurs dimensions atteignent un maximum du Carbonifère supérieur à la fin du Permien. La répartition de la ceinture glaciaire durant cette période est due à la disposition même de la Pangée ; la plupart des terrains émergés se trouvant dans l'hémisphère Sud. Ainsi les glaciers ne sont pas présents dans l'hémisphère Nord océanique, où la plupart des continents se situe dans des zones semi-arides et tempérées, ce qui marque le caractère asymétrique de la zonation climatique mondiale à la fin du Paléozoïque. Le niveau marin diminue durant le Paléozoïque supérieur, atteignant un minimum Phanérozoïque à la limite Permien-Trias. Les ceintures climatiques arides et semi-arides alors commencent à se développer largement dans les deux hémisphères dès la fin du Permien (Golonka & Ford, 2000 ; Zharkov & Chumakov, 2002).

Les changements paléoclimatiques au Carbonifère-Permien sont à l'origine de faciès tant confinés (présence de schistes bitumineux) qu'oxydés (grès rouges). Les sédiments stéphaniens généralement sombres possèdent des intercalations de charbon et montrent un climat essentiellement chaud et humide. La lithologie de l'Autunien ne diffère quasiment pas de celle des bassins houillers antérieurs avec une alternance de schistes, de grès ou arkoses, et de conglomérat. Les dépôts détritiques grossiers gréseux à conglomératiques résultent de milieux fluviatiles ou torrentiels indicatifs d'un gradient topographique ; tandis que les dépôts détritiques fins sous forme d'argilites, de silts et de grès fins plus ou moins argileux de couleur rouge ou grise et enrichis en matière organique sont généralement caractéristiques de milieux lacustre ou en plaine d'inondation. Le Saxonien peut comporter trois faciès différents selon la lithologie des bassins. Des conglomérats et des brèches polygéniques à matrice argilo-gréseuse résulteraient d'une érosion rapide des reliefs environnants, et sont apportés via des coulées boueuses. Des grès grossiers globalement homogènes reflèteraient un milieu fluviatile et un dépôt lacustre. Et enfin des dépôts silto-argileux laminés traduiraient des dépôts de milieux calmes lacustres lors du comblement du bassin (Châteauneuf & Farjanel, 1989). Les successions lithostratigraphiques types entre les bassins sont corrélées notamment grâce à la biostratigraphie (mais essentiellement de la microflore et de la macroflore). Ces faciès se retrouvent dans les dépôts stéphano-permiens de l'Europe de l'Ouest en domaine continental et épicontinental, et en domaine marin téthysien connus en Italie, en Sicile et en Tunisie. Quant aux reliques du domaine intramontagneux, elles existent aux Baléares, en Espagne centrale, en Provence, en Corse, en Sardaigne, dans les Pyrénées et sud du Massif Central (Broutin *et al.*, 1994 ; Châteauneuf & Farjanel, 1989).

## 2- Contexte géologique du bassin de Graissessac-Lodève

Le bassin de Lodève (Fig. 2), au centre de cette étude, est situé au sud du Massif Central (France) et s'est développé durant le Permien en réponse à l'effondrement gravitaire de la chaîne Varisque. Ce bassin s'étend actuellement sur plus de 300 km<sup>2</sup> et représente un empilement sédimentaire d'environ 3000 m. Il est de plus limité au sud par une faille normale de direction E-W (faille des Aires) et au Sud-Ouest par la faille des Cévennes de direction NE-SW, plongeantes vers le nord). Ce sont ces grands accidents qui contraignent la géométrie du bassin en héli-graben et son développement. A l'Ouest de ce bassin permien se trouve le bassin houiller de Graissessac, et le dôme métamorphique de la Montagne Noire constitué de croûte continentale exhumée. Ce dôme est contraint au Nord et au Sud par des nappes paléozoïques. Les Causses du Larzac - constituées de sédiments triasique à jurassique -, et les nappes dévonienne à carbonifère, jouxtent les terrains permien au nord et au sud respectivement. La partie Est du bassin de Lodève est marquée par la faille des Cévennes qui le sépare des terrains tertiaire et quaternaire du bassin de l'Hérault. Enfin, des intrusions basaltiques quaternaires se retrouvent dans tout le bassin du Lodévois.

### *2.1- Le socle paléozoïque du bassin de Graissessac-Lodève*

Le socle varisque est composé de nappes paléozoïques en contact tectonique avec le dôme métamorphique de la Montagne Noire ; se sont des sédiments d'âge Cambrien à Dévonien et Carbonifère. Ce socle plonge axialement vers l'est sous une formation de métasédiments appelés Schistes X. Le Cambrien est représenté par des roches schisto-gréseuses à des carbonates dolomitiques marins. Des filons minéralisés de barytine associés aux failles recoupent d'ailleurs ces formations marines. L'Ordovicien se résume en une formation gréseuse de flysch et de schistes gréseux dans les versants Nord et Sud de la zone axiale de la Montagne Noire. La période du Dévonien est représentée par des carbonates généralement dolomitisées dans le versant sud de la zone axiale de la Montagne Noire. Le Carbonifère inférieur et moyen se retrouvent actuellement dans les nappes du versant sud de la Montagne Noire et sont caractérisés par des dépôts détritiques de type flysch argilo-gréseux caractéristiques d'une sédimentation syn-tectonique de type Gilbert Delta d'un bassin d'avant-pays.

Le dôme métamorphique comporte des roches qui ont subi une déformation à haute température et présente deux familles de schistosité. L'exhumation du dôme est daté de 300 à 285 Ma, notamment par l'étude sur les zircons et les traces de fission sur apatite, et fut rapide ; de l'ordre de 1 à 17 mm/an (Pfeifer et al., 2016). Son exhumation est donc postérieure aux nappes paléozoïques puisqu'il les recoupe, et est la cause d'un soulèvement durant l'extension post-orogénique.



## 2.2-Évolution stratigraphique et sédimentaire du bassin de Graissessac-Lodève

Le bassin de Graissessac-Lodève comprend une série sédimentaire carbonifère-permienne voire Trias enregistrée de façon relativement continue pour ces périodes (Fig. 3). Il est constitué de sédiments qui reposent en discordance sur les terrains paléozoïques de l'Europe hercynienne, sur près de 3000 m d'épaisseur. Le Carbonifère supérieur est largement représenté dans le bassin stéphanien de Graissessac, discordant sur le dôme métamorphique et la sédimentation du Permien inférieur du bassin de Lodève comble au Nord les reliefs cambriens et présente des minéralisations en uranium, en baryum et en cuivre (Alabouvette, 1982 ; Saint Martin, 1992). La séquence de ce bassin débute par une unité basale conglomératique puis la formation de Mounis de la fin du Carbonifère (Gzhelien, -304 Ma) montrant une transition graduelle vers le Sud-Est d'un système alluvial proximal conglomératique. Ce bassin s'est formé lors d'une compression NW-SE tardi-hercynienne et comprend deux familles de failles de direction N10°E et N100°E à N90°E. L'étage Stéphanien de ce bassin comporte une série détritique de passées charbonneuses caractéristiques d'un milieu de décantation. La géométrie du bassin de Graissessac et la lithologie de base suggèrent ainsi une subsidence de nature brutale et localisée d'origine tectonique (Pochat & Van Den Driessche, 2011). La série détritique de conglomérat à des grès fins est typique d'un environnement de haute énergie contrairement aux dépôts charbonneux qui sont caractéristiques de milieux réduits et de basse énergie tel qu'un lac profond. Les Formations Pabau et Houillère de la fin du Carbonifère et les Formations Usclas et Loiras du début du Permien (jusqu'à -284 Ma) correspondent à cet environnement lacustre très profond. L'ancienne mine de la Padène, au sud de Graissessac, montre cette sédimentation de type Gilbert Delta qui est parcourue par des failles diffuses et sub-planaires qui se développent dans les niveaux à charbon qui permettent la formation de chevauchements dans ces milieux à charge sédimentaire importante. Des stratifications obliques et des séquences granodécroissantes sur un affleurement au Sud de Saint Privat indiquent la présence de chenaux et d'un paléo-courant de direction E-W pour Formation d'Usclas. La sédimentation lacustre profonde se termine vers la fin du Permien inférieur dans la Formation du Viala caractérisée par des fentes de dessiccation, des rides de vagues et des pélites rouges typiques d'un environnement lacustre peu profond, ainsi que par la présence de sédiments siltiques caractéristiques d'une plaine d'inondation à des grès fins à grossiers (Pochat *et al.*, 2005 ; Lopez *et al.*, 2008).

Les Formations Rabejac et Salagou (fin Cisularien à Changhsingian) sont des successions monotones sur plus de 2000 m d'épaisseur dans le bassin de Lodève. La sédimentation se caractérise à la base par un conglomérat, puis par des pélites ou des silts argileux avec des intercalations de bancs plus grossiers, grisâtres à la base puis de couleur lie de vin avec quelques niveaux verdâtres vers le Permien supérieur. Le début de la série détritique est réduite puis s'oxyde, marquant un apport d'oxygène et indiquant soit un brassage plus important ou soit une baisse du niveau d'eau. En outre, des empreintes de tétrapodes mammaliens, par exemple visibles à La Lieude, permettent d'attester des périodes d'émersion. Ainsi, l'environnement au Permien pourrait être celui d'une plaine d'inondation ou d'un lac (Lopez *et al.*, 2008). Au pied du barrage du lac du Salagou dans les pélites, la présence de rides de vagues suggère un environnement lacustre (Pochat *et al.*, 2005). A noter de plus la présence de structures polygonales qui ne sont pas des fentes

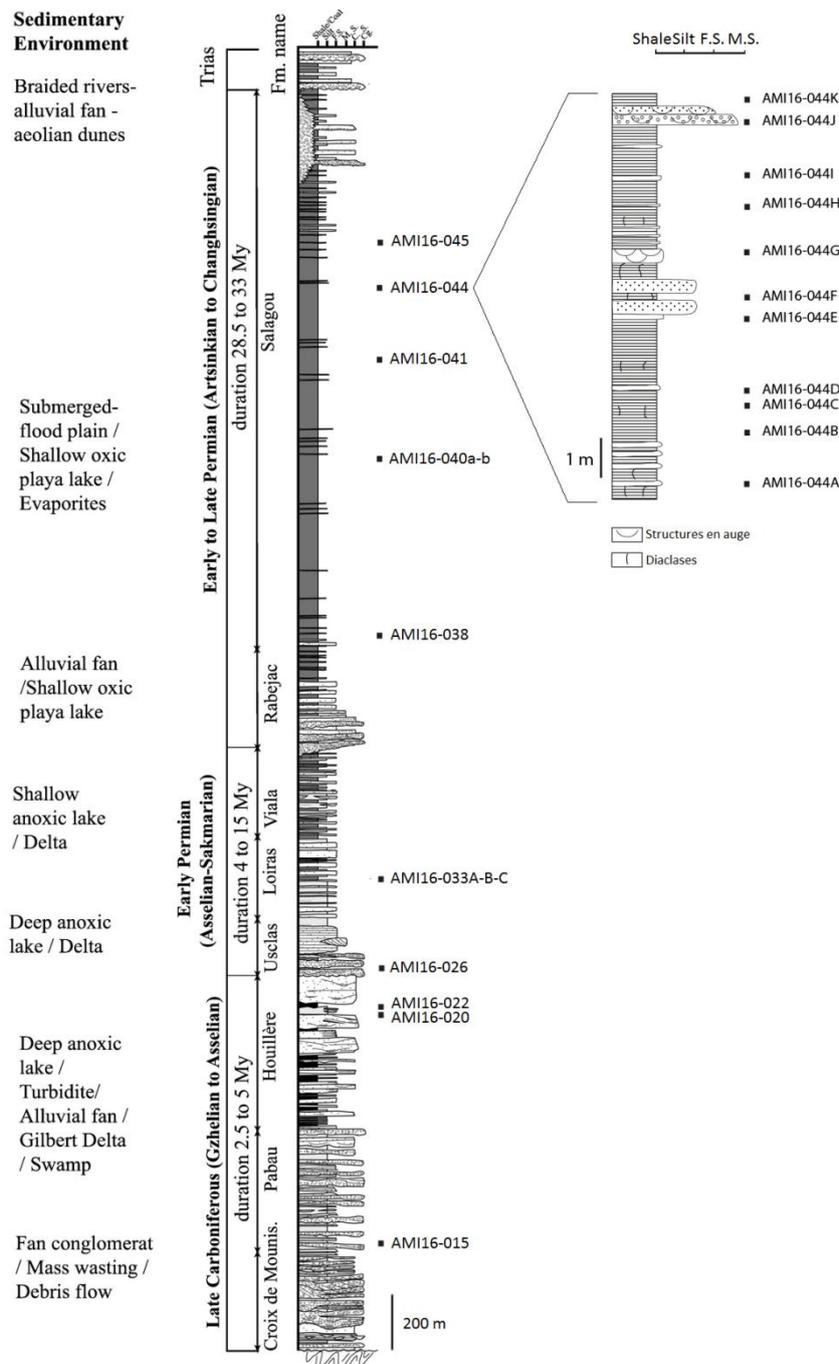


Figure 3 : Log stratigraphique du bassin de Graissessac-Lodève avec la position des échantillons de l'étude (D'après Pochat & Van Den Driessche, 2011). La colonne stratigraphique droite montre le détail sur une petite échelle.

de dessiccations - comme il est possible d'en observer dans une plaine d'inondation - car elles se retrouvent dans la partie la plus grossière de la roche, mais seraient dues à la diagénèse. Le bassin permien de Lodève montre également des variations latérales de faciès, montrant des pélites lie de vin contenant des bancs plus compacts gris qui se raréfient vers l'Est. Les apports sédimentaires proviendraient essentiellement de l'Ouest du bassin par des drainages principaux axiaux et secondaires transverses typiques des bassins tectoniques de type rift (Pochat, 2005).

Le sommet des séries du Permien et les séries du début du Trias débutent par des sédiments plus grossiers et conglomératiques caractéristiques des debris flow de cônes alluviaux puis la sédimentation continue avec des sédiments éoliens dunaires.

### III- Données stratigraphique et sédimentaire des échantillons de l'étude

Quatre échantillons sédimentaires de couleur foncée carbonifères voire début du Permien et 19 échantillons sédimentaires rougeâtres à gris-verdâtres permien ont été choisis de manière à avoir une coupe stratigraphique plus ou moins complète sur toute la séquence du bassin de Graissessac-Lodève. AMI16-015, AMI16-020 et AMI16-022 sont d'âges Gzhelien à Asselien ; AMI16-026 et AMI033A-B-C sont quatre échantillons datés du Permien inférieur, respectivement de l'ensemble d'Usclas et du Loiras ; et les échantillons AMI16-038, AMI16-040a-b, AMI16-041, AMI16-044, AMI16-045 appartiennent à l'ensemble du Salagou (Permien supérieur). AMI33A-B-C et AMI40a-b sont issus du même endroit, tout comme les échantillons AMI044 qui sont en fait une série d'échantillonnage d'un même affleurement sur une petite échelle afin de voir si des variations notables seront visibles ou non. Ces échantillons sont soit de couleur rouge (AMI16-44A-B-C-E-F-G) tandis que AMI16-044D-G-I-J-K sont verdâtres. Les échantillons carbonifères sont des silts ou des grès fins tandis que ceux d'âge Permien sont à granulométrie plus fine ; des argilites ou des pélites, à l'exception d'un grès fin (AMI16-044G). La composition minéralogique de chacun des échantillons diffère peu (Annexe 1) ; les minéraux les plus abondants sont généralement les quartz, les carbonates et la présence d'argile. Une recristallisation de carbonates secondaires dans les diaclases est d'ailleurs bien visible, notamment pour l'échantillon AMI16-044A. Les argilites présentent peu de quartz. En outre, tous les échantillons sauf AMI16-015 contiennent beaucoup de carbonates et d'argiles. AMI16-015 est quant à lui composé de beaucoup de biotites et de quartz. Les structures en auge aperçues sur le terrain dans les silts à La Lieude seraient structures polygonales dues à la diagénèse.

Certaines roches proches spatialement proches des dépôts carbonifères-permiens sont susceptibles d'être à l'origine de la composition de ces roches sédimentaires. Ainsi une métadolérite, des schistes, un orthogneiss, des granites, des porphyroïdes, le carbonate cambrien et la brèche ont été récoltés sur le terrain pour être observés pétrologiquement (Annexe 1) et chimiquement (Annexe 7). AMI16-001 est une métadolérite en intrusion dans les Schistes X et possède des plagioclases bien préservés et beaucoup de minéraux secondaires tels que des muscovites, des épidotes automorphes, et des chlorites caractéristiques d'une déformation bas grade. Les schistes (AMI16-002 et AMI16-007) proviennent de deux ensembles différents : AMI16-002 fait partie de l'ensemble des Schistes X datés du Paléozoïque et est difficile à contraindre minéralogiquement ; AMI16-007 possède des laminations horizontales et contient essentiellement des quartz et des carbonates. AMI16-003 est un orthogneiss qui possède un plan de foliation marqué par les biotites et provient du mont Pinot ; AMI16-004 est un granite du mont Matubot. Ces derniers proviennent d'endroits géographiquement proches et auraient le même âge que le bassin de Lodève, contrairement au granite AMI16-009 qui provient du granite du Mendic. Les deux granites AMI16-004 et

AMI16-009 montrent une recristallisation dynamique des quartz. AMI16-005 a une matrice quartzo-feldspathique et possède des muscovites entourées de chlorite recristallisée. Ces derniers contiennent de rares chlorites qui ont remplacé une partie des biotites de la roche. AMI16-008 est un échantillon récolté dans les carbonates cambriens et contient exclusivement des minéraux carbonatés. AMI16-031 est une brèche hercynienne provenant de la carrière des roches bleues et est composée principalement de carbonates et de quartz. Enfin, AMI16-046 provient du Valat Grand possède des phénocristaux de quartz rectangulaires et en veines et beaucoup de carbonates.

#### IV- Méthode analytique et démarches scientifiques

Selon Basu et al. (2016), les compositions minéralogiques et chimiques des roches sédimentaires sont indicatives de leur provenance puisqu'elles sont les produits finaux des processus associés à l'altération chimique et mécanique, au transport, au dépôt, au recyclage et à la diagénèse. Ainsi, des échantillons sédimentaires datés du Carbonifère au début du Trias ont été échantillonnés dans le bassin de Graissessac-Lodève, comme décrits précédemment (cf. III). Au total 69 échantillons ont été récoltés sur le terrain : 23 échantillons de roches sédimentaires et 8 échantillons de sources proximales au bassin de Lodève ont été pris pour étude. Les lames minces de ces échantillons ont été observées au microscope et la pétrographie a été décrite (Annexe 1). Les échantillons de roches sédimentaires sont des roches à granulométrie fine tels que des grès fins, des silts et des argilites afin de s'affranchir au mieux des processus de transport et de diagénèse. De plus, les minéraux lourds seront concentrés dans ces roches.

Les compositions en éléments majeurs et traces ont été déterminés respectivement par les méthodes d'ICP-AES et ICP-MS. La préparation des échantillons consiste à mettre en poudre une partie fraîche de l'échantillon. Pour cela, des sucres sont réalisés en coupant l'échantillon à l'aide d'une scie diamantée ; ils sont ensuite nettoyés plusieurs fois au bain à ultrasons dans de l'eau pour enlever toute poussière jusqu'à ce que l'eau soit claire, puis ils sont séchés à l'étuve à 60°C. Selon la pétrographie de la roche, aphyrique ou porphyrique, les sucres sont broyés par un broyeur à billes en agate ou par un broyeur à mâchoires respectivement. Le broyeur à mâchoires a été seulement utilisé pour les roches porphyriques ; la préparation est moins propre que le broyeur à billes mais elle est nécessaire pour ce type d'échantillons difficiles à broyer. Un passage dans le broyeur à billes de la roche totale a tout de même été effectué par la suite pour obtenir une poudre assez fine pour être analysée, inférieure à 20 µm.

La perte au feu est alors mesurée sur ces poudres. Elle permet de quantifier le degré d'altération et la quantité d'eau et de carbonates présents dans l'échantillon. Cela consiste en la calcination d'environ 1g d'échantillon contenue dans un creuset en porcelaine dans un four à environ 1050°C pendant 1 heure. La masse avant et après calcination est mesurée, et la calcination peut alors provoquer une perte de masse de l'échantillon due à la perte des volatils, et/ou un gain de masse s'il y a la présence suffisante de Fe<sup>2+</sup> qui

s'oxyde en Fe<sup>3+</sup> (Segard, 2013). La perte au feu se calcule comme il suit : 
$$\text{Perte au feu (\%)} = \frac{\text{poids échantillon} - \text{poids échantillon calciné}}{\text{poids échantillon}} * 100$$

Les analyses en éléments traces, mineurs et majeurs s'effectuent par la suite à l'aide de l'ICP-MS et de l'ICP-AES. Plusieurs protocoles d'attaque ont été testés lors de ce stage car plusieurs problèmes sont survenus.

### 1- Protocole de préparation des solutions pour analyse des éléments traces par ICP-MS

Pour chaque échantillon, 50 mg sont prélevés et déposés dans un bécher savillex puis mis en solution avec 50 mL d'eau pure, 50 mL d'acide nitrique HNO<sub>3</sub> (16N) puis 14 gouttes d'acide fluorhydrique HF 40% p.a. (environ 0.5 mL). Les béchers sont ensuite chauffés à 120°C jusqu'à la dissolution complète des échantillons, pendant 24 heures. Les solutions sont évaporées ensuite à 120°C jusqu'à l'obtention de résidus secs. Ces résidus sont repris avec 1mL de HNO<sub>3</sub> (16N) à 80°C pendant 12h puis évaporés à sec pour enlever l'acide fluorhydrique (HF).

Pour ces mêmes échantillons réfractaires nous avons effectué un test de mise en solution dans un four à micro-ondes MARS 6CEM. Pour cela, 50 mg de poudre d'échantillon sont transférés dans un réacteur à micro-ondes en Teflon dans lequel sont ajoutés 5 mL de HNO<sub>3</sub> et 5mL de HF. Les réacteurs sont placés dans le carrousel du micro-onde et chauffent jusqu'à une température palier de 210°C. Deux reprises successives dans 1 mL de HNO<sub>3</sub> (16N puis 4N) après évaporation terminent les attaques (Fedyunina *et al.*, 2011 ; Navarro *et al.*, 2008).

Certains échantillons n'étant pas dissous à l'issue de cette procédure, nous avons effectué une double attaque sur les échantillons, en ajoutant deux gouttes d'acide perchlorique (HClO<sub>4</sub>) qui est un puissant oxydant. Les résidus finaux sont aussi repris deux fois avec 1mL de HNO<sub>3</sub> (16N) pendant 12h puis quelques heures à 110°C. Malgré un échantillon non analysé avec cette méthode, la double attaque paraît plus efficace que le four à micro-onde dont quatre échantillons ont été mal attaqués. Mais la comparaison reste délicate puisque les échantillons analysés et mal attaqués n'étaient pas les mêmes pour ces protocoles.

La mise en solution finale des échantillons qui sont analysés s'effectue par l'ajout de 50 g de Solution Standard Interne (SSI), de l'échantillon en solution, d'une goutte d'acide fluorhydrique (HF) et d'eau pure jusqu'à 250 g. et de l'échantillon dans des flacons en HDPE de 250 mL. La SSI est préparée à partir de solutions mono-élémentaires de Germanium (Ge), Rhodium (Rh), Indium (In), Thulium (Tm) et Bismuth (Bi) concentrés à 1000 ppm. Ces standards internes doivent être concentrés à 50 ppb pour le Ge et 20 ppb pour le Rh, l'In, Tm et le Bi, avec une acidité d'HNO<sub>3</sub> à 5%. Elle sert à corriger les intensités brutes mesurées de la dérive instrumentale et des effets de matrice.

### 2- Protocole de préparation des solutions pour analyse des éléments majeurs, mineurs et traces par ICP-AES

Pour chaque échantillon, 125 mg de poudre est pesé sur une balance de précision  $1.10^{-4}$  g. La mise en solution de chaque échantillon se fait avec l'ajout de 0,5 mL d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$  16N) et 40 gouttes d'HF dans des béchers savillex qui sont chauffés durant une nuit à  $90^\circ\text{C}$ , puis laissés à température ambiante. Ensuite la mise en solution finale se fait dans des flacons en HDPE où sont ajoutés successivement 5 g de Solution Standard Interne (SSI), le contenu du bécher savillex contenant la solution d'échantillon, une solution de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  à 20 g/L pour neutraliser l'HF jusqu'à atteindre 50 g. La SSI est en fait composée 20 g de solutions mono-élémentaires de Cobalt (Co) à 10 000 ppm et de Germanium (Ge) à 10 000 ppm, de 10 g de solution  $\text{HNO}_3$  à 69% et d'eau pure jusqu'à obtenir un poids de 500 g, afin que le Co et le Ge aient une concentration de 800 ppm dans la solution finale pour chaque échantillon. Chaque flacon est laissé au repos pendant 48 heures avant d'effectuer les analyses.

Les attaques à l'acide sont propres et rapides, mais les éléments comme le zirconium (Zr) et l'hafnium (Hf) sont difficilement attaquables ; la fusion alcaline à l'avantage d'éviter ce problème en chauffant à haute température. Les échantillons sont donc mis en solution après avoir subi une fusion alcaline. L'échantillon sous forme de poudre est mélangé avec un fondant, du méta-borate de lithium dans un creuset en platine pur qui est chauffé à  $1050^\circ\text{C}$  jusqu'à ce que l'échantillon s'incorpore dans le fondant fondu, permettant d'obtenir un verre. Ce verre est dissout dans la Solution de Standard Interne à l'acide nitrique  $\text{HNO}_3$  10% pour une analyse en solution à l'ICP-AES. (Navarro et al., 2008).

### 3- Comparaison des analyses en majeurs et traces par ICP-AES et ICP-MS et évolution de l'efficacité des protocoles de mise en solution

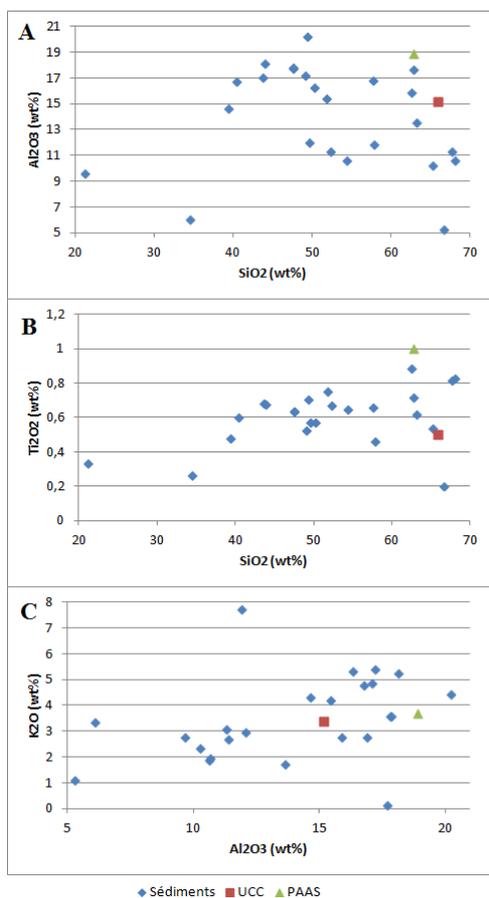
La première série « test » d'échantillons (AMI02T\_080216 (Annexe 2)) attaquée était composée de basaltes de la mission AMI15 provenant du Massif de La Rhune, du Massif de Mendaur et du pic d'Ibantelli dans le Pays Basque et seuls les éléments traces ont été analysés. La série AMI03M\_070316 (Annexe 3) était composée d'échantillons sédimentaires provenant de la mission AMI14 pour trois échantillons, de la mission AMI15 pour un échantillon, et de cinq échantillons tests (appelés LOD) provenant du bassin de Lodève récoltés antérieurement au stage. Cette série a été mise en solution standard afin d'obtenir les éléments majeurs des échantillons. Les cinq échantillons provenant du bassin de Lodève étaient mal attaqués et parmi eux trois échantillons ont dû être filtrés. Une seconde attaque à partir des poudres calcinées de ces cinq échantillons a été réalisée et se sont ces solutions qui ont été prises dans l'analyse. Lors du traitement des données, quelques réplicats pour trois échantillons provenant du bassin de Lodève ont été ignorés car pour LOD 8 leur concentration diminuait fortement pour les longueurs d'ondes des UV et pour LOD 3 et LOD Aut-Gris les dernières mesures étaient très faibles, demeurant sans explication. De plus la somme des pourcentages en poids d'oxydes des éléments majeurs et de la perte au feu n'était pas égale à 100 même avec les valeurs théoriques avant calcination calculées. L'hypothèse la plus probable est que la méthode de mise en solution n'était pas assez efficace, notamment pour attaquer les zircons contenus dans ces sédiments. Ainsi pour les prochaines séries d'analyse (AMI04M\_250416 et AMI03T\_200516) (Annexes 4 et 5) deux autres méthodes d'attaque ont été utilisées pour être en mesure d'attaquer les zircons ; par la fusion alcaline

pour les éléments majeurs et par le four à micro-ondes pour les éléments traces. Ces deux séries d'analyse contenaient les échantillons sédimentaires des missions AMI14, AMI15, AMI16 et des échantillons tests LOD. D'après les résultats en comparant les différentes méthodes d'attaques sur les échantillons communs pour les éléments majeurs, la fusion alcaline permet effectivement d'attaquer les zircons puisque la concentration en zirconium est plus importante avec cette méthode. La méthode avec le four à micro-ondes a donné de bons résultats mais quatre échantillons sont demeurés mal attaqués et les résultats ne montrent pas de différence notable avec le protocole de mise en solution dans les béchers Savillex. Pour les dernières séries d'analyses sur les échantillons « sources » du bassin de Graissessac-Lodève (AMI05M\_250616 (Annexe 6) pour les éléments majeurs et AMI04T\_060716 (Annexe 7) pour les éléments traces), la fusion alcaline et une double attaque dans les béchers Savillex ont été utilisées. Cette fois-ci des problèmes sont survenus avec la fusion alcaline ; des restes du verre obtenu étaient visibles dans 7 creusets sur 18 malgré le temps de mise en solution prolongé. De plus, les résultats n'étaient pas satisfaisants car la somme des pourcentages en poids d'oxydes des éléments majeurs et de la perte au feu n'était pas égale à 100 pour 6 échantillons qui ne correspondaient d'ailleurs pas forcément à ceux qui étaient mal dissouts. Par conséquent, les données des éléments majeurs ont été récupérées avec celles pour les éléments traces via l'ICP-MS et par une double attaque, hormis pour le silicium (Si) puisque l'ajout d'HF enlève une partie du silicium des échantillons. Avec la double attaque, seul l'échantillon AMI16-002 n'a pas été attaqué et n'a donc pas été analysé.

## V- Résultats

Trois facteurs contribuent à la géochimie en élément majeurs des sédiments clastiques : la proportion des différentes lithologies, l'extension et le régime de l'altération, et les effets de la ségrégation mécanique lors du transport (Kamber et al, 2005). Les signatures chimiques des assemblages de roches parents dans une province tectonique persistent dans les sédiments qu'ils produisent et sont préservés dans les roches sédimentaires correspondantes. Les éléments ou oxydes ainsi que certains rapports, principalement SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Th, Sc, Zr, Cr, Ni, Co, V, Y, La, Th/Sc, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>, (La/Yb)<sub>N</sub> et l'anomalie en Eu permettent de discriminer la provenance tectonique de la composition chimique massique des roches sources qui alimentent le bassin (Basu et al. 2016). Les éléments traces sont aussi importants puisqu'ils permettent d'estimer les abondances de la croûte supérieure ; c'est le cas pour les terres rares (REE) qui sont moins fractionnés par les processus sédimentaires (désagrégation chimique et physique) et les processus diagénétiques (McLennan 2001).

### 1- Pétrographie et géochimie des roches sédimentaires du bassin de Graissessac-Lodève



L'aluminium et le titane sont des éléments stables et immobiles, qui s'accumulent dans les matériaux résiduels lors des processus d'altération. Les diagrammes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs SiO<sub>2</sub> (Fig. 4(A)), TiO<sub>2</sub> vs SiO<sub>2</sub> (Fig. 4(B)) et K<sub>2</sub>O vs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Fig. 4(C)) montrent des variations de composition. La teneur en SiO<sub>2</sub> varie entre 20 à 70%, varie entre 5 à 21% pour Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et entre 0,2 à 0,9% pour TiO<sub>2</sub>. Les valeurs de SiO<sub>2</sub> par rapport à Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont anti-corrélés ; les échantillons ayant des teneurs élevées en SiO<sub>2</sub> et faibles en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ont des compositions gréseuses. Les diagrammes B et C montrent une forte corrélation entre TiO<sub>2</sub> et SiO<sub>2</sub> et entre K<sub>2</sub>O et Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et permettent également de distinguer les argilites à faibles pourcentages de SiO<sub>2</sub> et à forts pourcentages d'Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La composition chimique des sédiments clastiques

**Figure 4 : Diagrammes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs SiO<sub>2</sub> (A) ; TiO<sub>2</sub> vs SiO<sub>2</sub> (B) ; K<sub>2</sub>O vs Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C). Valeurs de références : UCC pour Upper Continental Crust (Taylor & McLennan, 1985) et PAAS pour Post-archean Average Australian Shales (Nance and Taylor, 1976).**

dépend de plusieurs facteurs incluant la

composition de la source, de l'altération météoritique et de la diagénèse. En effet, les feldspaths sont de loin les minéraux les plus réactifs dans la croûte supérieure ; ainsi les processus dominants durant l'altération chimique de la croûte supérieure sont la dégradation des feldspaths et la formation subséquente de minéraux argileux. Le calcium, le sodium et le potassium résultants de la dégradation des feldspaths sont généralement remobilisés dans les sols, et la proportion en aluminium augmente dans la roche résultante altérée. L'indice chimique le plus répandu pour déterminer le degré de la roche source altérée est le CIA (Fig. 5), en utilisant les proportions molaires suivantes (Nesbitt & Young, 1982) :

$$\text{CIA} = (\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})) * 100.$$

Les valeurs de CIA supérieures à 70% indiquent une altération intense typique d'une zone intertropicale actuelle, tandis que des faibles valeurs montrent une transformation chimique caractéristique de zones plus froides. Des roches ayant des valeurs de CIA entre 40 et 70% sont donc modérément altérées ; et des valeurs inférieures à 40% montrent qu'il n'y a pas ou peu d'altération.

CaO\* correspond à la concentration en CaO incorporé dans la fraction silicatée de la roche, c'est-à-dire à la concentration en CaO mesurée dans l'échantillon corrigée de la présence de carbonates secondaires et/ou d'apatite. D'après les observations faites sur les échantillons sédimentaires, aucune apatite n'a été trouvée ; cependant des carbonates secondaires sont généralement très abondants. Pour corriger la partie carbonatée des échantillons, je propose d'utiliser les mesures de pertes au feu qui sont fortement corrélées à la présence de carbonates secondaires. La perte au feu sur une roche carbonatée pure correspond à la perte de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> qui

correspond à 40% du poids de la roche. La perte au feu d'une argilite correspond à la perte des groupements hydroxyls (OH-) des argiles qui est variable et représente quelques pourcents de la masse de l'échantillon. La figure 1 présente la relation positive entre la perte au feu et le CaO qui sont mesurés dans nos roches sédimentaires. J'ai donc utilisé cette relation pour estimer et corriger mes mesures de CaO de la présence de carbonate secondaire par rapport à la perte au feu la plus faible afin de pouvoir exploiter les données malgré une marge d'erreur. En effet, l'oxyde de calcium et la perte au feu sont très corrélés de façon linéaire, passant par un pôle de calcite pure. Il en est de même pour une association MgO+CaO par rapport à la perte au feu, dont la droite de corrélation passe par le pôle fictif des carbonates. Les valeurs pour les argilites récoltés sur le terrain, c'est-à-dire pour AMI16-026, AMI16-033A, AMI16-033B, AMI16-033C, AMI16-040a AMI16-044b, AMI16-041, AMI16-041bis, AMI16-044A, AMI16-044B, AMI16-044C, AMI16-044D, AMI16-044H/f1, AMI16-044H/f2, AMI16-044I, AMI16-045, LOD-varve, ont donc été corrigées pour tous les éléments selon la perte au feu de l'échantillon AMI16-044I (Fig.5). Les figures suivantes montreront à chaque fois des valeurs corrigées pour chaque élément chimique ou rapport d'éléments.

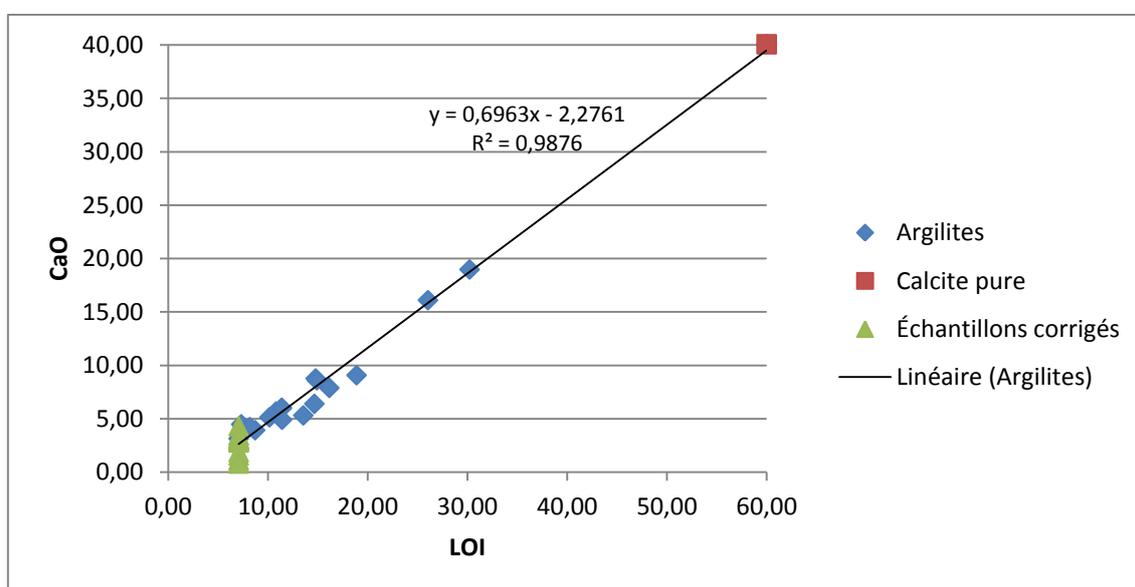
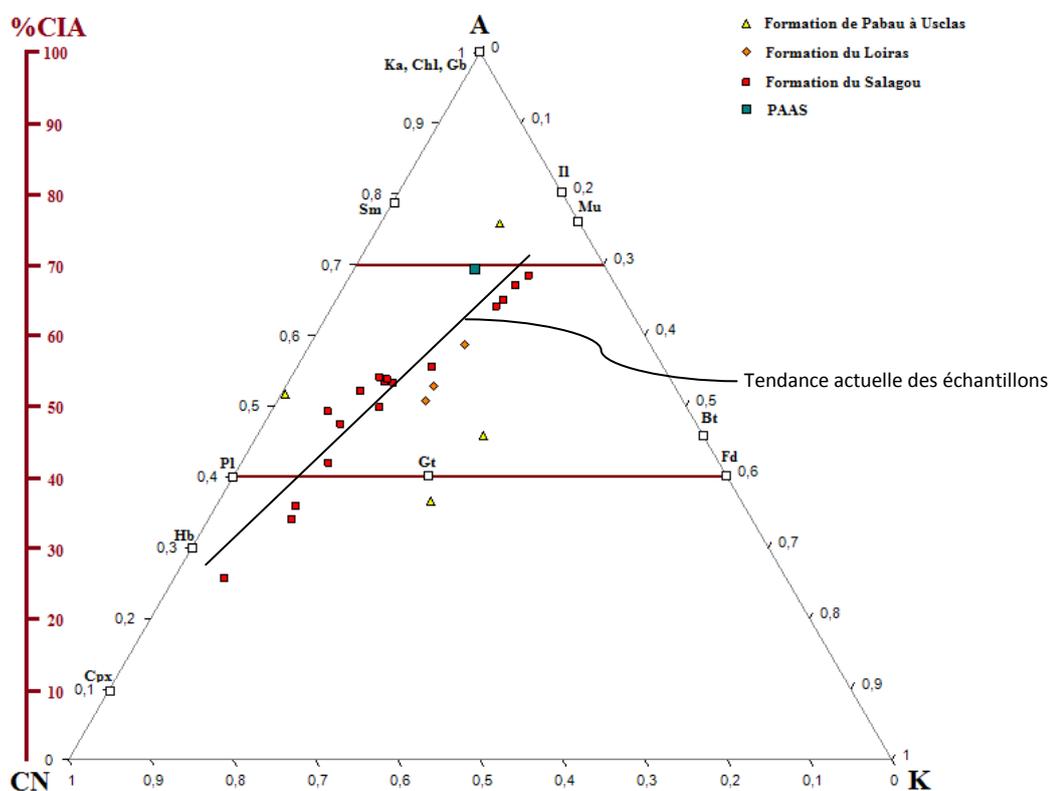


Figure 5 : Correction des effets des carbonates (calcite) sur les argilites (avec LOI : perte au feu).

La plupart des variations résultant de l'altération météoritique peut être visible dans le diagramme A-CN-K. La figure 6 montre que les échantillons de la fin du Carbonifère et du début du Permien (Formations de Pabau à celle d'Usclas) ont des points dispersés sur le diagramme. De plus, seul l'échantillon ayant un CIA de 36% a été corrigé des effets des carbonates, d'où une lecture difficile sur ce diagramme. La Formation Loiras semble refléter une composition granitique malgré les effets du métasomatisme et les échantillons sont modérément altérés. Les échantillons appartenant à la Formation du Salagou possèdent une certaine tendance linéaire avec des valeurs de CIA allant de 28 à 68%. Sur ce diagramme A-CN-K, l'altération et les effets du métasomatisme (Fig. 6) sont bien visibles. Selon Fedo et al. (1995), le CIA n'est pas directement mesurable car une correction des effets du métasomatisme est nécessaire pour retrouver la

composition originale des sédiments (Nesbitt & Young, 1989). La tendance prédite des granites et des granodiorites doit être parallèle au côté A-CN du diagramme (Fig. 6). De ce fait la plupart des échantillons sont enrichis en potassium et les valeurs du CIA sont surestimées (Nesbitt & Young, 1989).

Les variations du CIA vont de 28 à 68% pour cette Formation où les échantillons sont peu à altérés. A une petite échelle d'environ 8 mètres par exemple, on observe une grande amplitude de variation pour 11 échantillons provenant de la Lieude (Annexe 4). Selon McLennan (1993), les variations du CIA pour des roches sources ignées sont généralement minimales. Une importante variabilité peut alors résulter d'une provenance sédimentaire recyclée où l'altération météoritique est enregistrée. Bien que le CIA pour le point de référence PAAS est d'environ 70%, celle de la moyenne des sédiments sera donc plus basse, de l'ordre de 52% pour cette étude.

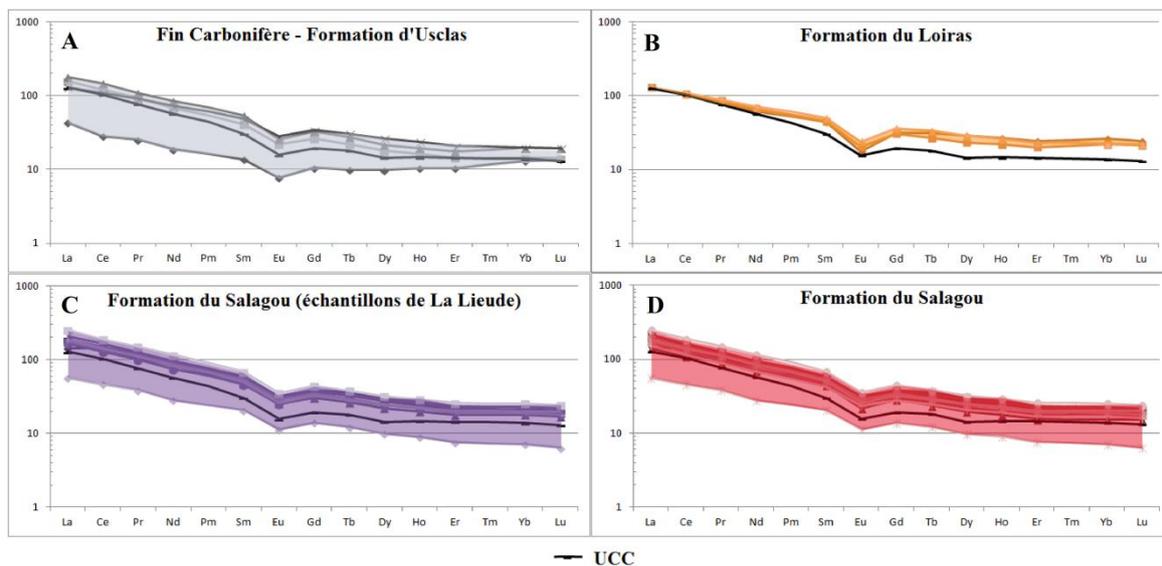


**Figure 6 : Diagramme ternaire A-CN-K (Nesbitt & Young, 1982) avec  $A=Al_2O_3$ ,  $C=CaO^*$ ,  $N=Na_2O$ , et  $K=K_2O$ . L'échelle % CIA montre le degré d'altération des échantillons avec deux paliers à 40 et 70%. La moyenne PAAS : Post-archean Average Australian Shales (Nance and Taylor, 1976) et les associations minéralogiques idéales sont inclus pour indication : Ka=kaolinite, Chl=chlorite, Gb=gibbsite, Il=illite, Mu=muscovite, Sm=smectite, Bt=biotite, Fd=feldspath, Pl=plagioclase, Hb=hornblende, Cpx=clinopyroxène.**

Les terres rares (REE) sont des éléments traces très peu mobiles durant le métamorphisme à gradient inférieur, la météorisation et l'altération hydrothermale (McLennan, 2001). La présence de quartz détritiques et de carbonates secondaires dépourvus de REE ont un effet de dilution sur les concentrations des REE mais

elle ne fractionne pas ces éléments entre eux. Cependant une correction sur les carbonates a été réalisée sur les échantillons à granulométrie fine (Fig. 5).

La figure 7 montre dans un premier temps des spectres assez similaires avec un enrichissement en Light Rare Earth Elements (LREE) – c'est-à-dire en éléments légers tels que Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, et Gd –, par rapport aux Heavy Rare Earth Elements (HREE) tels que Y, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, et Lu. Un rapport entre LREE et HREE permet de mesurer le fractionnement quantitatif des REE ; un rapport élevé du La par rapport à Yb normalisés aux chondrites  $(La/Yb)_N$  indique ainsi une altération intense dans la zone source. Ce rapport varie entre 3,27 et 11,05 pour les échantillons sédimentaires (Annexe 5). Ce sont l'échantillon AMI16-015 et ceux des Formation d'Usclas et du Loiras qui possèdent un rapport  $(La/Yb)_N$  faible autour de 3 à 5, tandis que les échantillons restants de la fin du Carbonifère et ceux de la Formation du Salagou ont des rapports autour de 8 à 11. Chaque spectre contient également une anomalie négative en Europium (Eu) marquant le caractère felsique des roches – c'est-à-dire un enrichissement en plagioclases – avec des rapports  $Eu/Eu^*$  oscillants entre 0,47 et 0,73 (Annexe 5) avec une moyenne de 0,64 proche de celle de la UCC ( $Eu/Eu^*=0,65$ ).



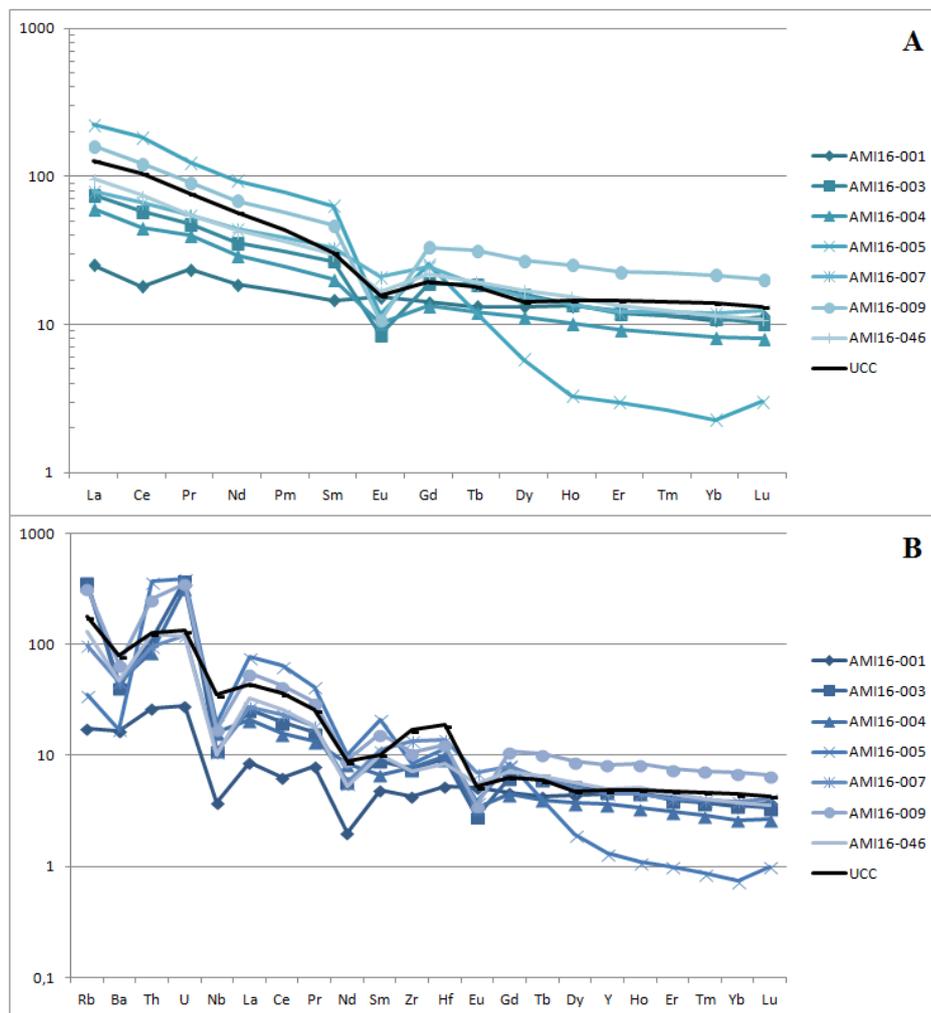
**Figure 7 : Diagrammes REE/Chondrites pour chaque Formation ou groupe de Formations sédimentaires du bassin. UCC = Upper Continental Crust (Taylor & McLennan, 1985).**

La figure 7(A) correspondant à la fin du Carbonifère et le début du Permien (Formation d'Usclas) présente un fractionnement important dans les LREE dû au spectre AMI16-015 dont le rapport  $(La/Yb)_N$  est très faible comparé aux trois autres spectres de cette même période. De plus, AMI16-015 est enrichi en HREE, mais les échantillons ne proviennent pas du même site et AMI16-015 a une granulométrie fine mais cependant plus grossière que les 3 autres échantillons. Les spectres de la figure 7(B) appartenant à la Formation du Loiras sont très uniformes. Ces trois échantillons proviennent d'une même localité et semblent ne pas montrer de changement de source. La figure 7(D) montre des spectres uniformes des échantillons de l'ensemble du Salagou avec une variation considérable des abondances absolues pour AMI16-044J qui est

principalement reliée à la taille des grains (effet de dilution) (McLennan, 2001). La figure 7(C) permet de montrer trois séquences granocroissantes pour les échantillons provenant de la Lieude de AMI16-044A à C (secondaire) ; de AMI16-044D à G ; et de AMI16-044H à J.

## 2- Géochimie des roches sources

Les échantillons « sources » ont des compositions chimiques différentes entre elles. Les échantillons AMI16-004, AMI16-005 et AMI16-009 ont cependant des pourcentages d'oxydes relativement semblables (Annexe 7). La figure 8(A) montre les valeurs des REE normalisées aux chondrites et la figure 8(B) un diagramme multi-élémentaire normalisé au manteau primitif avec à chaque fois la référence de la Croûte Supérieure Continentale.



Les données paraissent similaires à ceux de la croûte continentale supérieure moyenne (UCC) hormis pour AMI16-005 qui est appauvri en HREE et AMI16-001 qui est appauvri en LREE et se rapproche d'une

composition du manteau. De manière générale, les spectres sont plus fractionnés (Fig. 8A) dans les LREE. La figure 8(B) permet de voir des anomalies négatives en Ba, Nb, Nd, et Eu et des anomalies positives en Th et en U. Le Sm normalisé au manteau primitif montre une anomalie positive, sauf pour AMI16-004, contrairement au comportement de la UCC.

## VI- Discussion

Les échantillons sédimentaires montrent une diversité chimique qui peut être due à plusieurs facteurs : l'altération chimique, les effets de dilution et/ou les influences chimiques des sources dans la composition chimique des sédiments.

### 1- Rôle de l'altération

Les rapports Th/K vs CIA et  $Al_2O_3$  (Fig.9) peuvent montrer si l'altération a joué un rôle ou non dans la composition géochimique des roches. En effet, le rapport Th/K est un indice de météorisation qui combine l'élément Thorium (Th) immobile en fonction d'un élément mobile, le potassium (K).

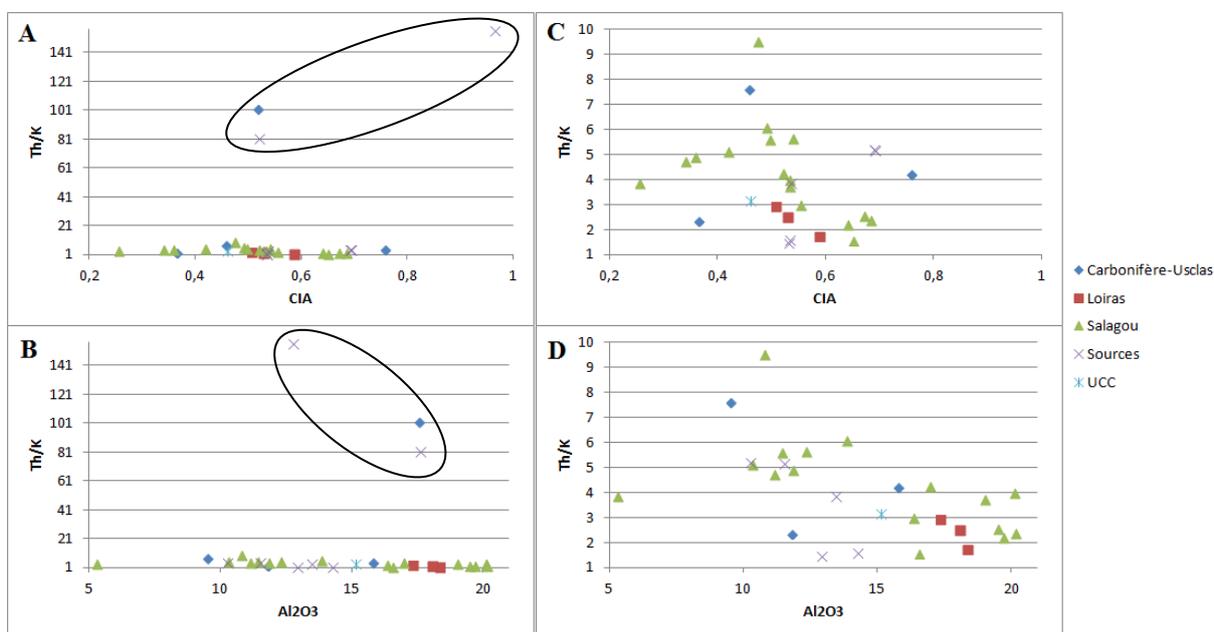


Figure 9 : Rapport Th/K vs CIA (A) et  $Al_2O_3$  (wt%) (B). C et D : Même rapport en enlevant 3 points (encadrés). UCC = Upper Continental Crust (Taylor & McLennan, 1985).

La figure 9(C) montre deux tendances pour les sédiments de la Formation du Salagou. Une première tendance linéaire marquée par une augmentation du rapport Th/K en fonction du CIA permet de montrer une altération sur ces échantillons. La seconde tendance visible également pour les échantillons de la Formation

du Loiras démontre qu'il y a un enrichissement en potassium lorsque le CIA augmente. Cette tendance se retrouve seulement pour les pélites rouges du Permien supérieur, chimiquement semblables.

Deux groupes distincts sont visibles sur la figure 9(D) pour la formation du Salagou. Le premier groupe est caractérisé par des valeurs de  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 15\%$  qui semble définir un trend d'altération et le second groupe avec  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$  qui n'est pas dans la continuité du trend des échantillons à faible pourcentage de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Le premier groupe est constitué de huit échantillons d'une même localité (La Lieude) et de deux autres échantillons géographiquement différents. Les lithologies sont également différentes, allant d'argilites grisâtres à verdâtres et de grès fin à moyen. Le second groupe est composé de pélites rouges très semblables chimiquement en éléments majeurs (sauf en  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$ ) et traces. Parmi les huit échantillons, deux ont été récoltés au pied du barrage du Salagou, cinq autres proviennent du même endroit (La Lieude) et un échantillon a été pris dans un endroit encore différent (au sud du lac du Salagou). Les trois échantillons de la formation du Loiras correspondent à une même localité, sont des pélites, appartiennent au second groupe et un échantillon contient des valeurs de  $\text{CaO}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$  différentes.

## 2- L'effet de dilution

Les figures 7 et 8 permettent de dire qu'il y a des effets de dilution lorsque la granulométrie de la roche sédimentaire en question est plus grossière ; l'exemple le plus remarquable est l'échantillon AMI16-044J qui est un grès fin à moyen échantillonné dans une séquence granocroissante d'un ancien chenal. Cependant tous les éléments ne varient pas de la même façon (Bouchez *et al.*, 2011). Pour la plupart des éléments, les concentrations augmentent lorsque la taille des grains diminue. Cela particulièrement vrai pour les éléments K, Al, Fe, REE, Ga, Ni, Zn, Co, Cr, Cs, Rb (Fig.10(C) et (D)). À noter que ce groupe d'éléments sont des éléments solubles ou insolubles. D'autres éléments tels que Si, Hf, Ta, Ca, Ba et Zr (Fig. 10(A) et (B)) ont des concentrations qui diminuent lorsque le rapport  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  augmente à partir d'un seuil entre 0,25 et 0,3.

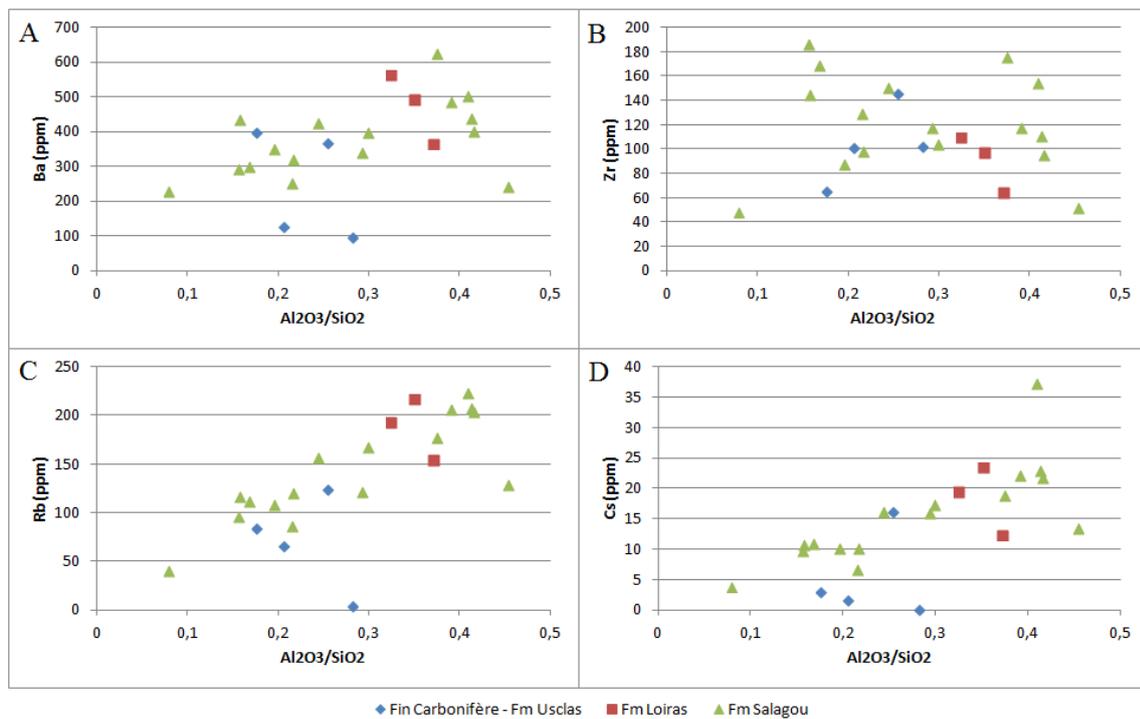


Figure 10 : Rapport  $Al_2O_3/SiO_2$  vs Ba, Zr, Rb et Cs (en ppm).

L'effet de dilution est bien représenté dans ces diagrammes (Fig. 10) pour les échantillons de l'Ensemble du Loiras et du Salagou. Les échantillons carbonifères montrent un effet de dilution sur des roches un peu plus grossière, ainsi la figure 10(A) ne montre pas la tendance décroissante du Ba comme il est possible de l'observer dans les échantillons les plus fins du Permien supérieur.

Ces observations montrent clairement un changement dans la composition des échantillons avec la taille des grains les constituants.

### 3- L'influence des sources sur la composition chimique des sédiments

La figure 7 indique peu de variations dans la composition chimique des REE des roches sédimentaires. La figure 8 montre quelques enrichissements de certains éléments pour les échantillons sources. Afin de déterminer si les échantillons sources sont effectivement à l'origine de certaines variations dans la composition chimique des échantillons sédimentaires, j'ai décidé de regarder les concentrations des cinq éléments (Fig. 12) où l'on voit une anomalie positive dans la figure 8, c'est-à-dire pour le Ba, le Sm, le Gd, le Th, et l'U.

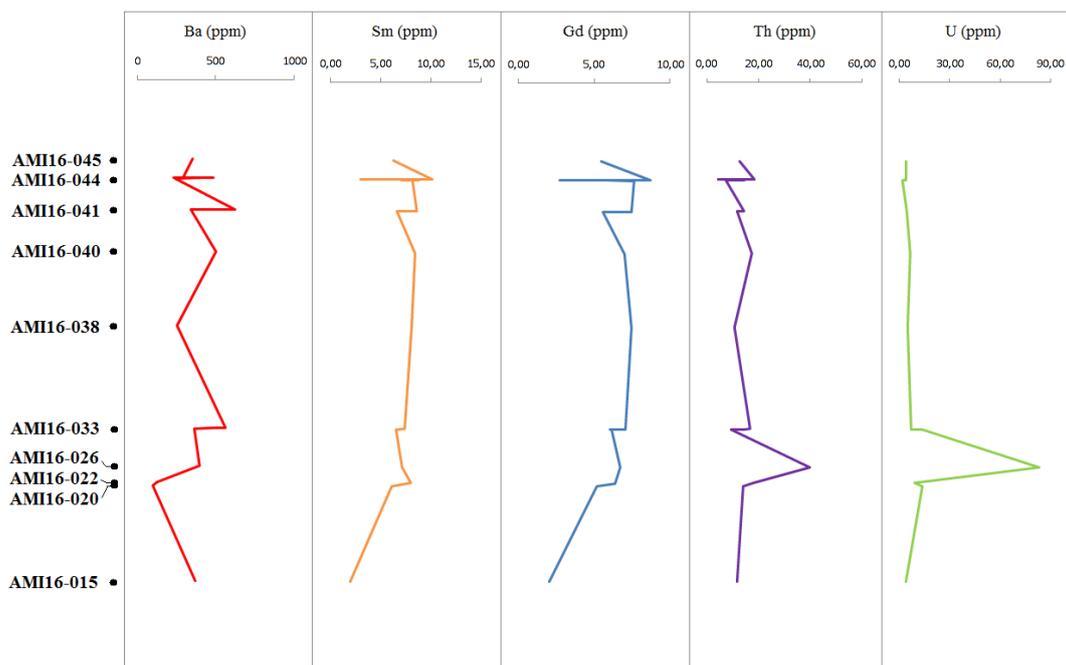
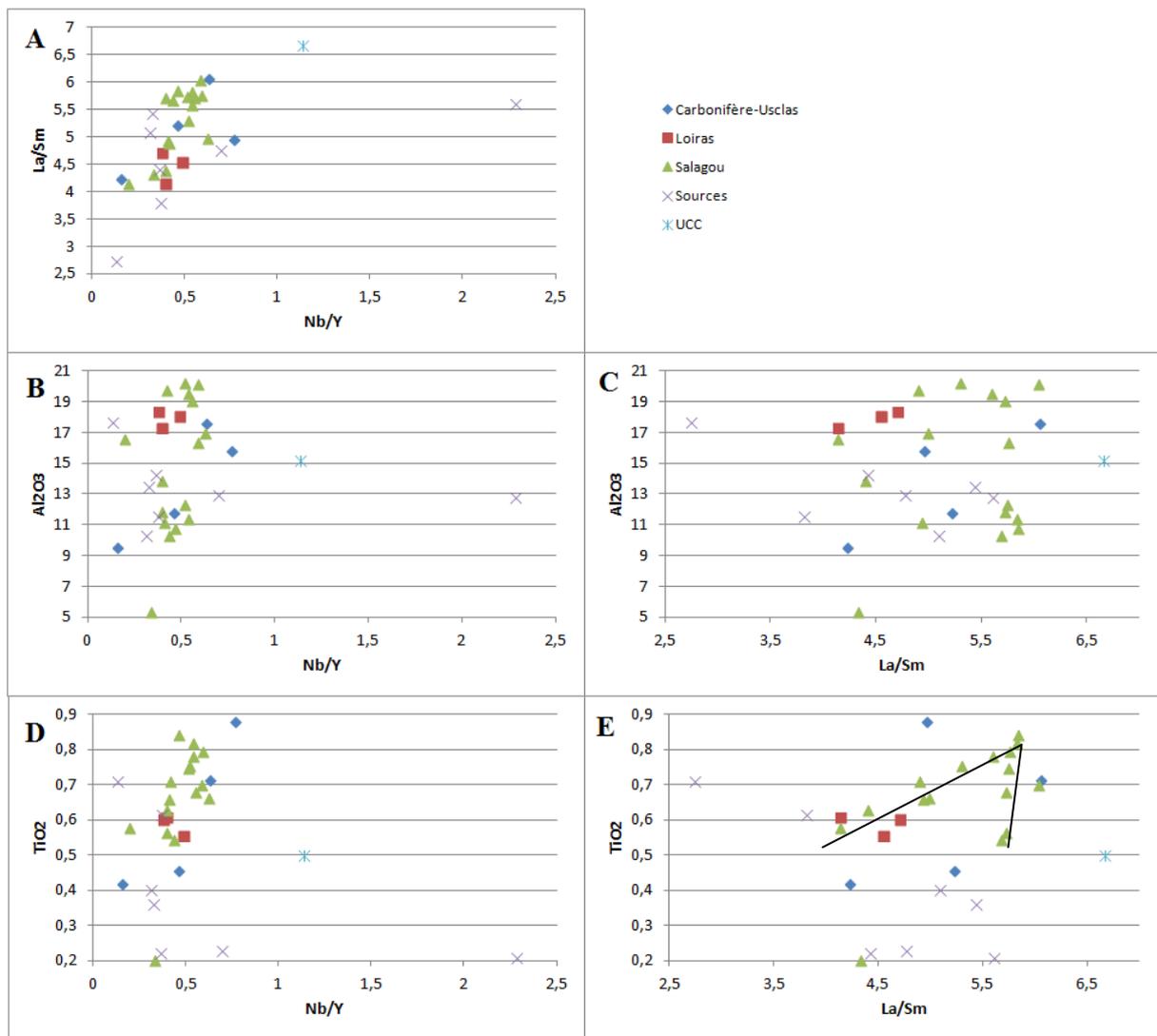


Figure 12 : Variation dans le temps et dans l'espace de certains éléments : Ba, Sm, Gd, Th et U.

Le Ba est un des éléments les plus incompatibles et est donc mobile et soluble. Sa concentration varie mais comporte deux maxima au Permien inférieur, enregistrés par la présence de mines de Barium, et vers la fin du Permien. La provenance des apports en Ba peut provenir de tous les échantillons sources qui possèdent des concentrations de l'ordre de 500 ppm.

Les éléments Sm et Gd sont des terres rares et possèdent les mêmes amplitudes de variations. D'après la figure 8, ces éléments varient probablement à cause des effets de dilution seulement.

Th et U sont fortement corrélés et se trouvent en fortes concentrations à la fin du Carbonifère. Des mines uranifères. Le comportement de l'Uranium dans les environnements sédimentaires dépend des conditions redox. U est soluble dans des environnements réduits comme un lac calme et profond ; c'est pourquoi de fortes concentrations sont visibles durant cette période. Les gisements d'Uranium peuvent être la résultante de plusieurs facteurs, notamment le volcanisme, l'hydrothermalisme et/ou le démantèlement des granites alentours. Dans les échantillons sources, le démantèlement des granites AMI16-003, AMI16-004, AMI16-009 pourraient être à l'origine de ce pic de concentration en U mais n'explique pas la diminution brutale des apports en U par la suite.



**Figure 11 : A : Rapports Nb/Y vs La/Sm. B et C : Rapport Nb/Y par rapport à  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$ . D et E : Rapport La/Sm par rapport à  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$ . UCC = Upper Continental Crust (Taylor & McLennan, 1985).**

La figure 11 montre une belle corrélation des rapports Nb/Y vs La/Sm pour tous les échantillons. La comparaison de ces rapports avec  $Al_2O_3$  et  $TiO_2$  indiquent également une bonne corrélation des rapports pour les échantillons sédimentaires. Sur la figure 11(E) deux tendances sont notables notamment grâce aux échantillons appartenant à la Formation du Salagou. Les échantillons ayant un rapport d'environ 5,7 auraient une source granitique provenant du granite du Mendic et du porphyroïde AMI16-005. La seconde courbe linéaire indiqueraient probablement une source composée de grès schisteux (AMI16-007).

## VII- Conclusion

Le bassin de Graissessac-Lodève est un bassin Stéphano-Permien contrôlé tectoniquement (Pochat & Van Den Driessche, 2011). D'après les résultats des analyses géochimiques et des observations pétrologiques, les variations de composition chimique des roches sédimentaires sont dues à l'altération chimique, les effets de dilution et les influences chimiques des sources.

L'Indexe Chimique d'Altération (CIA) permet de quantifier le degré d'altération des roches. Lorsqu'il est comparé au rapport  $\text{Th}/\text{K}_2\text{O}$ , les effets du métasomatisme sont identifiables sur les pélites rouges du bassin de Lodève.

Les effets de dilution sont directement reliés à la granulométrie de la roche. Pour les éléments tels que K, Al, Fe, REE, Ga, Ni, Zn, Co, Cr, Cs, Rb leur concentration sera élevée pour des granulométries fines contrairement aux éléments Si, Hf, Ta, Ca, Ba et Zr.

Aucun échantillon source n'a permis de savoir s'il a contribué à cette variation de composition chimique mise à part AMI16-005 et AMI16-009. Les spectres de REE/chondrites montrent une homogénéité qui ne permet pas de contraindre les résultats sur cet aspect. Cependant les rapports  $(\text{La}/\text{Yb})\text{N}$  et  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  permettent de conclure à une affinité parentale felsique certaine.

### VIII- Références bibliographiques

Alabouvette, B., avec la collaboration de Aubague, M., Bambier, A., Feist, R., Paloc, H., Notice explicative, Carte géologique de la France à 1/50 000 : Lodève (feuille 989). Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 1982, 52 p.

Arthaud, F., Carte géologique de la France à 1/50 000 : Lodève (feuille 989). Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 1982.

Basu, A., Bickford, M.E., Deasy, R., (2016), Inferring tectonic provenance of siliciclastic rocks from their chemical compositions: A dissent, *Sedimentary Geology*, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.11.013>.

Bogdanoff, S., Carte géologique de la France à 1/50 000 : Bédarieux (feuille 988). Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 1982.

Bouchez, J., Gaillardet, J., France-Lanord, C., Maurice, L., Dutra-Maia, P., (2011), Grain size control of river suspended sediment geochemistry : Clues from Amazon River depth profiles, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**, Q03008, doi:10.1029/2010GC003380.

Broutin, J., Cabanis, B., Châteauneuf, J.-J., Deroin, J.-P., (1994), Évolution biostratigraphique, magmatique et tectonique du domaine paléotéthysien occidental (SW de l'Europe) : implications paléogéographiques au Permien inférieur, *Bulletin de la Société géologique de France*, **165**, 163-179.

Châteauneuf, J.J., Farjanel, G., (1989), Synthèse géologique des bassins permien français. *Mémoire du Bureau de recherches géologiques et minières*, Éditions du BRGM, **128**, 306 p.

Fedyunina, N.N., Seregina, I.F., Bolshov, M.A., Okina, O.I., Lyapunov, S.M., (2012), Investigation of the efficiency of the sample pretreatment stage for the determination of the Rare Earth Elements in rock samples by inductively coupled plasma mass spectrometry technique, *Analytica Chimica Acta*, **713**, 97-102.

Frizon de Lamotte, D., Fourdan, B., Leleu, S., Leparmentier, F., de Clarens, P., (2015), Style of rifting and stages of Pangea breakup, *Tectonics*, **34**, 1-21, doi: 10.1002/2014TC003760.

- Golonka, J., Ford, D., (2000), Pangean (Late Carboniferous–Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **161**, 1–34.
- Gutiérrez-Alonso, G., Fernandez-Suarez, J., Weil, A.B., Murphy, J.B., Nance, R.D., Corfu, F., Johnston, S.T., (2008), Self-subduction of the Pangaeon global plate, *Nature Geoscience*, **1**, 549–553.
- Kamber, B.S., Greig, A., Collerson, K.D., (2005), A new estimate for the composition of weathered young upper continental crust from alluvial sediments, Queensland, Australia, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 1041-1058.
- Lopez, M., Gand, G., Garric, J., Körner, F., Scheider, J., (2008), The playa environments of the Lodève Permian basin (Languedoc-France), *Journal of Iberian Geology*, **34**, 29-56.
- McLennan, S.C., (1993), Sediments and soils: chemistry and abundances, In Ahrens, T.J., ed. AGU Handbook of Physical Constants, **3** : American Geophysical Union.
- McLennan, S.C., (2001), Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **2**, 2000GC000109.
- Nance, W.B., Taylor, S.R., (1976), Rare earth element patterns and crustal evolution – I. Australian post-Archean sedimentary rocks, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **40**, 1539-1551.
- Navarro, M. S., Andrade, S., Ulbrich, H., Gomes, C.B., Girardi, A.V., (2008), The Direct Determination of Rare Earth Elements in Basaltic and Related Rocks using ICP-MS: Testing the Efficiency of Microwave Oven Sample Decomposition Procedures, *Geostandards and Geoanalytical Research*, **32**, 167-180.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., (1982), Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites, *Nature*, **299**, 715-717.
- Nesbitt, H.W., Young, G.M., (1989), Formation and Diagenesis of Weathering Profiles, *The Journal of Geology*, **97**, 129-147.
- Pfeifer, L.S., Soreghan, G.S., Pochat, S., Van Den Driessche, J., Thomson, S.N., (2016), Permian exhumation of the Montagne Noire core complex recorded in the Graissessac-Lodève Basin, France, *Basin Research*, 1-14, doi: 10.1111/bre.12197.
- Pochat, S., Van Den Driessche, J., Mouton, V., Guillocheau, F., (2005), Identification of Permian palaeowind direction from wave-dominated lacustrine sediments (Lodève Basin, France), *Sedimentology*, **52**, 809-825.
- Pochat, S., Van Den Driessche, J., (2011), Filling sequence in Late Paleozoic continental basins: A chemira of climate change? A new light shed given by the Graissessac-Lodève basin (SE France), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **302**, 170-186.
- Saint Martin, M., (1992), Genese et evolution structural du bassin permien de Lodève (Herault-France), *Cuadernos de Geologia Ibérica*, **16**, 75-90.
- Taylor, S.R., McLennan S.M., (1985), *The Continental Crust: Its composition and Evolution*. Blackwell, Oxford.
- Zharkov, M.A., Chumakov, N.M., (2002), Climate during Permian-Triassic Biosphere Reorganizations, Article 1 : Climate of the Early Permian. *Stratigraphy and Geological Correlation*, **10**, 586-602.

## Annexe 1 : Pétrographie quantitative des échantillons sédimentaires et sources.

Echantillons	Lithologie	Quartz	Quartz xénomorphe	Carbonate	Zircon	Minéral opaque	Plagioclase	Orthose	Plagioclase	Biotite	Mica blanc	Argile	Granulométrie (µm)	Lamination	Epidote	Autres observations	Altération	Granulométrie (µm)	Matrice/Ciment	Orientation minéraux	Autres observations
AM15-001	mésadiorite	xxx		xxx			x		xxx						xxx			150	ciment	non	
AM15-002	schiste	xxx		xxx ?					xxx						xxx			50	matrice	oui	
AM15-003	orthogneiss	xxxx	x					x	xxx	xxx					xxx			1000	ciment	oui	lentilles de quartz
AM15-004	granite	xxxx							xxx	xxx					xxx			1100	ciment	non	plan de foliation
AM15-005	porphyroïde (rhylite)	xxx	x					??	??	??					xxx			100	ciment	non	
AM15-007	schiste	xxx		xxx			xx		xx	xx					xxx			200	ciment	oui	laminations
AM15-008	carbonate			xxxxx														100 à 500	ciment	non	
AM15-009	granite	xxxx	xx					xx	xx	xx					xxx			100 à 3000	ciment	non	
AM15-031	brèche	xxx		xxxx											xxx			50 à 100	ciment	non	
AM15-046	porphyroïde (andésite)	xxxx		xxx			xxx				xx				xxx			50 à 1500	ciment	non	
Echantillons																					
AM15-015	Silt	xxxx						xxxx			x		30	non							
AM15-020	Grès fin/silt	xxxx	xx							xxx			10	non							veines de quartz
AM15-022	Grès fin	xxxx		xxx					xxxx	xxx			50	oui							
AM15-026	Grès très fin	xx		xxxx					xx	xxx			Hétérogène : 30 à 70	oui							
AM15-033A	Argilite	x		xxxx					xx	xxx			20	oui							
AM15-033B	Argilite	x		xxxx					xxx	xxx			30	non							
AM15-033C	Argilite	xx		xxx					x	xxx			30	oui							
AM15-038	Argilite	xxx		xx					xxx	xxx			30	oui							
AM15-040b	Pelite	xxx		xxx					xxx	xxx			20	oui							
AM15-044A	Pelite	xx		xxx					xxx	xxx			non visible	non							veines de carbonate
AM15-044C	Pelite	xxx		xxxx					xxx	xxx			non visible	non							veines de carbonate
AM15-044D	Argilite fine	xx		xxx					xx	xxx			non visible	oui							veines de carbonate
AM15-044E	Grès fin	xxx	xx (ou Feldspaths ?)	xxxx			xx		xxx	hétérogène : 10 à 90	x		70	non							
AM15-044G	Grès fin	xxxx		xxxx				x ?		xxx				oui							
AM15-044I	Pelite	xxxx		xxxx				x		xxx			20	oui							
AM15-044K	Pelite	xxxx		xxxx					xx	xxx			20	oui							
AM15-045	Argilite	xxxx		xxxx					xx	xxx			30	oui							veines de carbonate

xxxx dominant  
xxx beaucoup  
xx quelques  
x rare  
aucun

## Annexe 2 : Données géochimiques de la séance AMI02T\_080216 (1/3)

AMI02T_080216									
Secteur	La Rhune								
Echantillon	AMIH5-01	AMIH5-02	AMIH5-03	AMIH5-04	AMIH5-05	AMIH5-06	AMIH5-07	AMIH5-08	AMIH5-08bis
Roche	Basalte								
Méthode analytique	ICP-MS								
Li	100,31	62,05	77,59	165,97	149,90	64,51	150,29	154,52	155,05
Be	2,07	2,07	2,06	1,92	4,59	1,60	1,58	1,54	1,52
B	4,90	10,03	9,94	11,13	12,48	10,32	5,40	7,27	7,17
Sc	21,12	23,09	29,16	24,39	29,86	31,67	24,06	24,10	24,14
V	179,71	142,78	160,77	149,65	144,01	186,50	153,80	151,48	153,03
Cr	179,36	95,96	118,57	169,97	92,83	154,96	147,20	163,07	163,07
Co	44,05	31,70	30,04	54,10	31,78	40,55	35,03	35,94	36,07
Ni	57,31	41,63	32,49	61,35	28,55	39,79	57,58	67,99	68,17
Cu	1,01	2,43	14,58	1,73	7,85	76,83	4,40	4,55	4,59
Zn	112,66	56,09	106,51	233,82	271,10	149,11	285,02	237,92	238,12
Ga	21,87	19,19	20,10	18,73	20,38	19,73	18,68	16,02	16,09
Rb	15,84	28,59	13,07	64,75	32,45	12,96	7,52	9,40	9,21
SR	180,85	338,94	429,45	77,87	99,57	365,64	59,86	47,63	48,52
Y	46,02	44,56	44,34	37,67	61,63	36,78	33,47	44,33	45,31
Zr	291,60	338,51	309,31	298,37	341,51	230,30	217,68	200,96	202,58
Nb	23,04	25,94	25,14	21,42	23,44	15,93	14,60	11,68	11,75
Mo	0,79	0,85	1,30	0,46	0,23	1,11	0,59	0,36	0,35
Sn	2,04	2,03	1,56	1,66	3,41	1,29	1,37	1,47	1,39
Sb	0,80	1,10	0,39	0,20	0,23	0,11	0,13	0,43	0,43
Cs	0,78	1,66	1,70	4,12	1,83	1,70	1,04	4,27	4,27
Ba	460,33	437,76	454,70	670,43	567,87	256,06	185,56	216,51	218,71
La	44,66	291,75	50,99	60,56	40,45	24,74	23,02	29,19	29,46
Ce	83,91	487,95	101,41	60,56	76,56	52,28	48,17	52,39	53,14
Pr	11,22	48,23	12,40	8,01	11,56	6,56	6,04	8,31	8,41
Nd	44,07	159,16	47,54	32,18	47,39	26,50	24,43	35,27	35,35
Sm	8,68	17,08	8,74	6,98	10,49	5,61	5,23	7,44	7,47
Eu	2,01	3,14	2,22	1,69	2,44	1,79	1,48	2,39	2,41
Gd	8,98	11,21	8,46	7,19	11,30	6,17	5,98	8,24	8,21
Tb	1,36	1,39	1,29	1,13	1,83	0,99	0,96	1,24	1,24
Dy	7,97	7,88	7,79	6,66	10,95	6,21	5,79	7,17	7,20
Ho	1,57	1,55	1,56	1,33	2,19	1,29	1,18	1,42	1,43
Er	4,19	4,22	4,27	3,57	6,05	3,61	3,26	3,68	3,71
Yb	3,81	3,85	3,95	3,36	5,97	3,48	3,12	3,12	3,15
Lu	0,58	0,59	0,60	0,52	0,91	0,54	0,48	0,48	0,48
Hf	6,53	7,15	6,43	6,10	7,35	4,76	4,63	4,28	4,29
Ta	1,37	1,43	1,42	1,26	1,44	0,93	0,83	0,65	0,65
W	0,55	0,69	0,56	0,40	1,90	0,32	0,46	0,41	0,41
Tl	0,09	0,14	0,03	0,37	0,12	0,05	0,05	0,06	0,07
Pb206	4,34	4,87	17,38	8,10	9,38	15,57	7,85	10,69	10,63
Pb207	4,49	4,98	17,85	8,18	9,46	16,08	7,77	10,56	10,64
Pb208	4,56	5,09	17,92	8,30	9,63	16,06	7,89	10,70	10,73
Th	6,92	8,90	6,20	6,21	12,31	2,87	3,75	3,54	3,53
U	0,72	1,17	1,06	0,70	2,78	0,49	0,75	0,75	0,75

## Annexe 2 : Données géochimiques de la séance AMI02T\_080216 (2/3)

Échantillon	Secteur Roche	La Rhune		Ibantelli		Ibantelli		Ibantelli		Ibantelli		Ibantelli		Sarre		Lehenbiscaye		Arantzua	
		AMH5-09 Basalte ICP-MS	AMH5-10 Basalte ICP-MS	AMH5-11 Basalte ICP-MS	AMH5-12 Basalte ICP-MS	AMH5-13a Basalte ICP-MS	AMH5-13b Basalte ICP-MS	AMH5-13d Basalte ICP-MS	AMH5-15 Ophite ICP-MS	AMH5-16 Ophite ICP-MS	AMH5-17 Basalte ICP-MS								
Li		62,17	115,34	157,53	58,16	197,67	191,97	33,70	11,69	39,12									
Be		4,31	1,34	2,14	1,27	1,49	2,18	0,57	0,56	2,20									
B		18,31	21,74	12,46	10,01	19,86	19,60	20,94	5,42	9,46									
Sc		26,19	26,33	25,12	31,14	29,91	25,31	39,39	40,31	31,92									
V		137,56	169,02	192,26	185,88	176,07	160,85	265,20	272,54	200,24									
Cr		64,68	212,97	174,41	252,36	252,97	172,17	218,74	222,03	191,99									
Co		20,19	45,77	32,15	39,21	34,64	35,73	39,64	42,51	35,92									
Ni		18,99	41,96	55,88	36,59	32,63	49,66	78,26	76,08	36,91									
Cu		16,79	42,83	3,09	9,21	2,85	11,97	122,26	142,60	20,98									
Zn		96,79	117,52	226,47	76,27	232,45	170,29	46,78	57,05	85,20									
Ga		20,52	17,02	18,12	18,07	17,17	17,73	15,47	15,98	17,84									
Rb		68,06	10,07	3,91	8,14	25,32	37,04	36,41	13,40	49,69									
Sr		159,16	68,68	116,32	443,46	83,04	93,87	216,27	176,27	446,47									
Y		51,95	33,87	60,23	30,05	26,61	31,64	18,40	19,96	35,44									
Zr		335,18	204,67	272,16	170,01	173,77	286,58	54,95	75,21	187,63									
Nb		23,35	13,99	0,87	10,41	10,40	21,49	4,95	5,01	15,71									
Mo		1,54	0,47	0,87	0,68	0,35	1,00	0,29	0,28	1,19									
Sn		4,28	1,20	1,58	1,05	1,12	1,74	0,52	0,78	1,52									
Sb		0,58	0,54	0,82	0,52	0,62	0,50	0,08	0,08	0,18									
Cs		2,81	5,79	7,94	0,96	6,34	5,24	0,81	0,90	1,67									
Ba		536,60	175,98	144,16	197,42	384,95	288,41	151,50	130,38	240,85									
La		51,97	24,31	43,00	17,56	14,72	35,37	8,08	6,60	16,55									
Ce		103,17	46,57	79,95	37,67	32,41	74,06	17,61	15,48	39,11									
Pr		12,49	6,34	10,97	4,92	4,18	9,12	2,32	2,15	5,40									
Nd		48,42	25,27	44,16	20,71	17,16	35,37	9,97	9,76	23,71									
Sm		9,55	5,15	1,20	4,50	3,78	6,49	2,54	2,62	5,58									
Eu		2,20	1,20	2,24	1,55	1,08	1,40	0,90	0,97	1,61									
Gd		9,72	5,62	10,48	5,05	4,33	6,14	3,08	3,25	6,33									
Tb		1,52	0,87	1,57	0,81	0,72	0,93	0,51	0,54	1,02									
Dy		8,95	5,42	8,89	5,05	4,54	5,58	3,18	3,41	6,17									
Ho		1,81	1,13	1,80	1,06	0,97	1,15	0,66	0,72	1,27									
Er		4,94	3,09	4,69	2,93	2,74	3,23	1,80	1,99	3,40									
Yb		4,68	2,87	3,88	2,83	2,65	3,16	1,68	1,90	3,11									
Lu		0,70	0,44	0,59	0,44	0,41	0,49	0,25	0,29	0,46									
Hf		7,39	4,46	5,66	3,64	3,66	5,85	1,53	2,00	3,88									
Ta		1,45	0,78	1,12	0,62	0,62	1,22	0,30	0,31	0,89									
W		1,45	0,26	0,58	0,24	0,24	0,47	0,21	0,18	0,22									
Tl		0,36	0,07	0,05	0,02	0,13	0,20	0,09	0,06	0,29									
Pb206		30,60	7,98	16,40	15,55	10,70	6,05	0,76	1,08	1,64									
Pb207		31,11	7,86	16,45	15,96	10,80	5,98	0,77	1,08	1,64									
Pb208		31,27	7,94	16,66	15,93	10,89	6,11	0,78	1,09	1,66									
Th		13,21	3,79	5,69	2,04	2,11	6,09	0,99	1,15	1,26									
U		2,57	1,31	1,21	0,40	0,44	1,14	0,24	0,28	0,30									

## Annexe 2 : Données géochimiques de la séance AMI02T\_080216 (3/3)

Échantillon	Secteur Roche	Arantza		Arantza		Arantza		Mendaur		Mendaur		Mendaur		Mendaur	
		AMH5-18 Diorite? ICP-MS	AMH5-19 Basalte ICP-MS	AMH5-20 Pegmatite ICP-MS	AMH5-21 Basalte ICP-MS	AMH5-22 Basalte ICP-MS	AMH5-23 Basalte ICP-MS	AMH5-24 Basalte ICP-MS	AMH5-25 Basalte ICP-MS						
Li		30,69	23,32	6,32	194,71	128,39	127,32	174,00	176,64						
Be		2,60	3,40	0,19	1,87	1,89	1,68	2,67	3,71						
B		11,74	6,07	1,86	11,29	7,28	11,12	10,05	12,24						
Sc		24,12	27,44	0,00	23,40	23,62	24,38	22,91	28,37						
V		141,10	164,11	0,00	167,21	141,93	156,42	140,97	154,86						
Cr		77,93	60,13	2,28	110,53	114,02	87,11	55,53	82,21						
Co		29,24	21,99	3,11	46,12	32,22	31,09	40,57	37,96						
Ni		46,81	14,56	2,87	47,43	41,62	44,20	30,41	30,08						
Cu		26,72	15,97	0,00	0,00	5,09	95,23	11,92	7,95						
Zn		106,69	111,96	0,00	301,60	300,08	162,24	291,52	284,07						
Ga		19,96	21,63	1,02	22,35	20,24	22,39	22,12	21,67						
Rb		59,68	76,56	10,07	9,13	6,15	13,59	3,75	20,17						
Sr		1251,70	1443,06	11,20	69,07	49,91	63,27	61,42	91,62						
Y		43,95	49,94	0,21	44,67	43,34	46,72	40,15	52,38						
Zr		353,95	336,22	2,32	337,39	312,17	405,92	356,02	371,63						
Nb		25,07	29,04	0,13	21,21	20,05	30,59	26,20	26,20						
Mo		2,88	0,42	0,00	0,42	0,64	0,94	1,20	0,86						
Mn		2,24	2,65	1,84	2,89	2,16	3,40	2,19	2,64						
Sb		0,52	0,29	0,18	1,26	0,81	0,83	1,02	0,48						
Sn		2,24	0,70	0,24	8,95	3,82	9,14	8,27	7,84						
Cs		1,87	0,70	0,06	3,45,13	81,49	91,96	56,55	333,60						
Ba		564,29	855,50	5,06	33,19	40,32	96,71	62,07	54,04						
La		50,28	60,72	0,50	74,89	87,64	203,70	129,34	105,79						
Ce		105,49	124,60	0,33	9,97	11,11	23,63	15,28	13,99						
Pr		13,00	14,82	0,19	40,95	43,42	88,67	57,47	54,80						
Nd		50,55	56,36	0,72	8,34	8,30	13,56	9,56	10,39						
Sm		9,50	10,42	0,16	1,77	1,86	2,68	1,78	2,19						
Eu		2,04	2,35	0,10	1,77	1,86	2,68	1,78	2,19						
Gd		8,93	10,01	0,13	8,38	7,94	10,84	8,43	10,28						
Tb		1,32	1,51	0,01	1,26	1,23	1,46	1,24	1,57						
Dy		7,66	8,70	0,07	7,50	7,35	8,22	7,11	9,19						
Ho		1,52	1,74	0,01	1,52	1,49	1,62	1,42	1,85						
Er		4,03	4,57	0,03	4,20	4,04	4,37	3,88	5,03						
Yb		3,69	4,10	0,06	3,94	3,54	4,08	3,69	4,92						
Lu		0,56	0,60	0,01	0,60	0,52	0,62	0,56	0,76						
Hf		7,39	7,12	0,03	7,28	6,83	8,82	7,67	7,89						
Ta		1,38	1,62	0,02	1,23	1,16	1,72	1,47	1,52						
W		0,76	1,23	0,37	0,68	0,89	1,35	0,99	1,27						
Tl		0,48	0,52	0,05	0,08	0,06	0,12	0,03	0,09						
Pb206		30,11	9,31	0,19	10,69	8,58	6,83	10,72	8,44						
Pb207		30,14	9,35	0,18	10,58	8,56	6,59	10,87	8,49						
Pb208		30,33	9,61	0,17	10,82	8,74	6,90	11,06	8,71						
Th		9,46	11,07	0,07	11,33	10,47	16,67	11,48	11,80						
U		1,46	1,67	0,22	1,95	1,80	2,83	2,22	2,26						

## Annexe 3 : Données géochimiques de la séance AMI03M\_070316

AMI03M_070316												
Secteur	Bidarray	La Rhune	La Rhune	La Rhune	La Rhune	Mendaur	LOD1	LOD3	LOD8	LOD-Aut-Gris	LOD-varve	
Échantillon	AMI14-03	AMI14-07	AMI14-07/bis	AMI14-08	AMI15-27	Argille	Silt	Pélide	Grès fin	Varve		
Roche	Pélide	Grès moyen	Grès fin	Grès fin	Grès fin							
Latitude	43°15'6.25"N	43°18'3.35"N	43°18'3.35"N	43°18'3.60"N								
Longitude	1°22'7.67"E	1°37'9.66"E	1°37'9.66"E	1°38'0.16"E								
Méthode analytique	ICP-AES											
SiO <sub>2</sub>	70.05	93.78	94.79	90.97	90.05	65.58	56.94	56.77	61.89	67.80		
TiO <sub>2</sub>	0.85	0.07	0.06	0.16	0.12	0.47	0.51	0.50	0.62	0.68		
CaO	0.15	0.08	0.08	0.08	0.13	7.12	0.13	7.06	0.12	4.41		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	6.45	0.12	0.12	1.72	1.48	1.00	4.90	1.35	2.36	3.69		
MgO	0.63	0.09	0.10	0.20	0.12	0.14	0.13	3.47	0.12	2.58		
MnO	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.11	0.20	0.01	0.03		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.84	2.42	2.47	4.15	4.80	12.07	12.70	11.10	12.77	13.81		
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.01	0.02	0.02	0.02	7.12	1.33	2.56	0.05	0.08		
K <sub>2</sub> O	4.24	0.67	0.70	1.28	1.45	0.22	5.86	0.70	7.77	4.16		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.02	0.02	0.02	0.08	0.11	0.04	0.09	0.03	0.11		
PF	2.98	0.58	0.59	0.86	0.91	5.90	2.30	10.74	1.08	8.05		
Total	100.51	97.85	98.94	99.47	99.15	99.83	84.96	94.52	86.84	105.40		
Cu	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23.37	30.75	39.01	15.52	0.00		
Cr	71.44	6.95	7.09	18.84	10.04	24.10	57.77	45.32	67.19	61.23		
Ni	24.44	3.84	3.85	8.37	4.47	3.80	37.63	14.31	25.38	21.74		
Ba	315.02	41.07	42.55	63.01	35.73	0.00	212.94	116.46	220.89	377.21		
Sc	14.90	0.95	0.99	3.60	2.58	7.99	41.44	12.62	23.67	13.37		
Sr	87.15	11.55	10.11	11.80	77.92	283.07	69.40	74.19	12.31	48.50		
V	110.09	7.66	7.72	18.49	13.47	24.87	151.45	41.47	514.56	85.27		
Y	19.46	3.38	2.84	3.95	2.00	21.78	22.29	19.05	28.60	25.03		
Zn	14.53	2.12	2.20	2.81	3.06	9.55	16.87	38.87	10.48	37.59		
Zr	95.56	6.91	5.42	13.39	8.60	48.77	20.72	34.06	17.14	57.34		

## Annexe 4 : Données géochimiques de la séance AMI04M\_250416 (1/4)

AMI04M_250416											
Secteur	Bidarray	La Rhune	La Rhune	Mendaur	Le Peras	Bois de Filhomme	Saint Privat	Mas d'Alary			
Echantillon	AMI4-03	AMI4-07	AMI4-08	AMI4-27	AMI6-015	AMI6-020	AMI6-022	AMI6-026	AMI6-033A		
Roches	Pélite	Grès moyen	Grès moyen	Grès moyen	Silt	Silt	Grès fin	Grès fin	Argillite		
Latitude	43°1'56,25"N	43°1'83,35"N	43°1'83,60"N	-	43°40'56,9"N	43°39'55,8"N	43°39'45,6"N	43°43'59,5"N	43°42'11,5"N		
Longitude	1°22'7,67"E	1°37'9,66"E	1°38'0,16"E	-	02°58'55,7"E	03°08'03,5"E	03°08'00,8"E	03°24'54,5"E	03°20'17,1"E		
Méthode analytique	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES		
SiO <sub>2</sub>	69,09	89,76	86,32	87,94	62,54	62,76	57,77	34,45	39,36		
TiO <sub>2</sub>	0,90	0,10	0,20	0,18	0,88	0,72	0,46	0,27	0,48		
CaO	0,11	0,04	0,04	0,09	0,74	0,19	6,64	16,12	9,09		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	6,32	0,13	1,64	1,44	7,29	6,37	2,71	3,15	5,69		
MgO	0,67	0,12	0,22	0,15	3,02	0,10	3,03	9,61	6,04		
MnO	0,05	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	0,08	0,07	0,15		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,58	2,46	4,10	4,76	15,88	17,70	11,89	6,08	14,64		
Na <sub>2</sub> O	0,22	0,04	0,04	0,03	0,42	9,72	0,05	0,10	2,65		
K <sub>2</sub> O	4,19	0,74	1,33	1,45	2,80	0,14	7,72	3,36	4,33		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,03	0,03	0,08	0,32	0,09	0,13	0,35	0,06		
PF	3,03	0,53	0,87	0,91	6,57	2,91	10,23	26,05	18,89		
Total	99,24	93,95	94,79	97,04	100,56	100,79	100,71	99,62	101,37		
CaO*	-	-	-	-	-	-	-	2,90	0,86		
PF*	-	-	-	-	-	-	-	7,07	7,07		
CIA	74,10	72,56	72,40	72,82	75,82	51,78	36,59	45,85	58,73		
Ba	319,06	40,83	62,76	34,53	347,95	89,63	105,45	347,19	334,79		
Ce	101,50	21,18	25,60	30,06	19,73	73,51	75,31	64,40	65,60		
Cr	71,38	5,77	20,17	9,33	92,92	64,21	46,65	39,89	79,23		
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	6,52	35,80	43,11	35,93	4,86		
Ga	20,28	9,22	9,36	9,22	20,93	18,83	13,71	9,22	17,00		
La	52,19	10,37	12,52	14,69	10,37	36,35	34,60	27,29	28,86		
Nb3163	85,12	35,55	47,38	45,08	92,22	86,08	57,60	61,53	80,87		
Sc	13,93	1,10	3,48	2,70	17,43	7,35	14,47	7,72	46,49		
Sm	3,92	1,22	1,48	2,53	2,60	3,87	4,87	9,18	4,00		
Sr	85,48	14,97	14,67	84,53	101,37	58,84	170,08	1220,02	328,82		
V	116,23	7,53	19,54	14,54	106,43	39,00	115,88	117,00	150,23		
Y	31,92	7,99	11,30	9,22	14,77	29,17	29,30	30,08	34,21		
Zn	12,67	0,09	0,68	0,57	119,23	15,66	34,04	25,27	46,32		
Zr	267,90	49,55	115,64	80,58	204,09	114,43	115,97	67,27	60,17		

## Annexe 4 : Données géochimiques de la séance AMI04M\_250416 (2/4)

Secteur	Echantillon	Mas d'Alary		Rabejac		Salagou		Salagou		Salagou		Salagou		La Lliende		La Lliende			
		AMI16-033B	AMI16-033C	AMI16-038	AMI16-040a	AMI16-040b	AMI16-041	AMI16-041bis	AMI16-044A	AMI16-044B	AMI16-033B	AMI16-033C	AMI16-038	AMI16-040a	AMI16-040b	AMI16-041	AMI16-041bis	AMI16-044A	AMI16-044B
	Roche	Argilite	Argilite	Argilite	Pélite	Pélite	Pélite	Pélite	Pélite	Pélite	Pélite	Pélite	Pélite						
	Latitude	43°42'11,5"N	43°42'11,5"N	43°41'03,7"N	43°39'27,3"N	43°39'27,3"N	43°38'42,2"N	43°38'42,2"N	43°38'42,2"N	43°38'42,2"N	43°38'42,2"N	43°37'55,0"N à 43°37'54,6"N							
	Longitude	03°20'17,1"E	03°20'17,1"E	03°20'35,4"E	03°24'23,6"E	03°24'23,6"E	03°20'45,1"E	03°20'45,1"E	03°20'45,1"E	03°20'45,1"E	03°16'13,0"E à 03°16'13,3"E								
	Méthode analytique	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES									
SiO <sub>2</sub>		49,03	50,26	63,16	49,34	57,59	47,48	47,50	21,22	40,36									
TiO <sub>2</sub>		0,53	0,57	0,62	0,70	0,66	0,64	0,64	0,34	0,60									
CaO		5,15	5,69	5,78	3,94	4,49	6,04	6,01	18,99	7,90									
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)		6,82	5,11	3,93	7,68	4,13	6,76	6,79	4,76	6,53									
MgO		3,63	3,69	0,97	3,20	2,72	3,63	3,67	13,62	7,03									
MnO		0,10	0,10	0,07	0,09	0,12	0,13	0,13	0,33	0,29									
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		17,20	16,33	13,60	20,20	16,86	17,79	17,83	9,63	16,75									
Na <sub>2</sub> O		2,62	2,91	4,34	3,02	4,24	3,97	3,60	0,30	0,76									
K <sub>2</sub> O		5,41	5,35	1,74	4,43	2,80	3,59	3,60	2,78	4,79									
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,18	0,22	0,12	0,20	0,13	0,13	0,13	0,11	0,20									
PF		10,16	10,82	6,32	8,72	7,33	11,39	11,40	30,22	16,16									
Total		100,82	101,06	100,65	101,53	101,06	101,56	101,67	102,29	101,37									
CaO*		3,00	3,09	2,79	4,32	3,04	3,00	2,87	1,58	1,89									
PF*		7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07	7,07									
CIA		52,81	50,72	49,25	53,40	52,12	53,41	53,79	65,09	64,17									
Ba		448,17	503,62	227,88	450,05	307,71	560,70	561,11	215,23	369,80									
Ce		64,24	65,76	70,51	93,55	64,58	91,23	90,26	84,95	88,76									
Cr		75,96	72,45	52,47	110,18	72,55	90,07	91,82	57,05	87,77									
Cu		8,10	0,00	31,45	14,07	28,30	25,71	25,51	7,72	46,85									
Ga		19,85	20,78	15,35	28,16	17,79	23,95	25,64	10,62	22,43									
La		28,45	28,83	32,04	45,52	30,24	44,19	44,13	32,48	39,67									
Nb3163		89,30	76,03	67,16	96,05	68,37	89,12	88,70	73,95	86,39									
Sc		13,25	12,64	13,70	18,97	15,07	17,95	17,89	9,70	18,75									
Sm		4,75	7,10	6,30	4,88	3,47	4,51	4,01	3,90	4,17									
Sr		147,77	150,60	84,67	137,64	108,41	298,94	299,58	126,60	156,60									
V		106,10	92,04	65,24	152,69	95,11	130,91	130,69	51,92	82,25									
Y		28,17	33,66	34,65	29,76	25,37	32,86	32,96	38,81	32,64									
Zn		33,92	28,66	52,20	127,95	94,15	117,26	118,54	80,07	106,92									
Zr		88,08	116,73	142,33	136,05	115,24	158,71	158,96	47,42	91,78									



## Annexe 4 : Données géochimiques de la séance AMI04M\_250416 (4/4)

Échantillon	Le Mas Canet		LOD1		LOD3		LOD8		LOD-Aut-Gris		LOD-varve	
	Roche	Argilite	Argilite	Silt	Pélite	Grès fin	Varve	Méthode analytique	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Latitude	43°37,08,07'N	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Longitude	03°16'58,31'E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Méthode analytique												
SiO <sub>2</sub>	54,35	65,31	61,10	0,56	57,23	70,04	63,57	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
TiO <sub>2</sub>	0,65	0,48	0,10	0,10	0,58	0,87	0,66	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
CaO	8,61	7,13	0,10	0,10	8,07	0,05	4,24	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	2,04	1,00	5,50	0,18	1,46	2,50	3,47	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
MgO	6,24	0,16	0,18	0,12	3,95	0,15	2,56	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
MnO	0,26	0,10	0,12	0,01	0,32	0,01	0,03	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,63	11,67	18,16	12,99	12,99	13,46	13,08	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Na <sub>2</sub> O	1,20	6,40	3,32	5,26	5,26	0,06	0,09	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
K <sub>2</sub> O	1,95	0,31	9,70	1,10	1,10	11,43	4,11	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	0,12	0,05	0,10	0,10	0,04	0,11	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
PF	14,92	5,94	2,32	10,87	10,87	1,11	8,19	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Total	100,95	98,61	101,11	101,93	101,93	99,73	100,10	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
CaO*	3,15	-	-	-	-	-	-	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
PF*	7,07	-	-	-	-	-	-	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
CIA	54,08	33,06	52,93	34,31	51,68	54,86	54,86	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Ba	315,95	0,00	333,67	154,21	277,80	385,73	385,73	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Ce	64,69	49,39	92,05	60,42	70,41	84,79	84,79	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Cr	61,77	26,54	62,51	48,57	72,66	56,71	56,71	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Cu	139,91	23,51	41,60	52,93	14,99	0,00	0,00	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Ga	12,37	11,69	18,51	9,76	19,77	16,13	16,13	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
La	31,81	23,80	41,84	26,32	28,22	42,73	42,73	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Nb3163	52,46	43,43	79,11	47,05	56,59	62,86	62,86	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Sc	11,05	7,67	55,39	12,62	25,06	12,25	12,25	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Sm	4,69	3,26	4,78	4,24	6,51	4,62	4,62	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Sr	716,16	273,79	108,73	90,44	14,48	47,70	47,70	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
V	274,54	23,55	176,97	43,77	563,52	81,36	81,36	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Y	24,76	24,97	40,88	28,42	99,95	28,79	28,79	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Zn	96,53	8,25	7,23	44,19	7,04	34,88	34,88	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
Zr	78,88	185,30	62,51	119,55	229,87	213,09	213,09	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES

## Annexe 5 : Données géochimiques de la séance AMI03T\_200516 (1/4)

AMI03T_200516											
Secteur	Bidarray	La Rhune	La Rhune	Mendaur	Le Peras	Bois de Filhomme	Saint Privat	Mas d'Alary			
Echantillon	AMI14-03	AMI14-07	AMI14-08	AMI15-27	AMI16-015	AMI16-020	AMI16-022	AMI16-026	AMI16-033A		
Roches	Pélite	Grès moyen	Grès moyen	Grès moyen	Silt	Silt	Grès fin	Grès fin	Argille		
Latitude	43°15'6.25"N	43°18'3.35"N	43°18'3.60"N	-	43°40'56.9"N	43°39'55.8"N	43°39'45.6"N	43°43'59.5"N	43°42'11.5"N		
Longitude	1°22'7.67"E	1°37'9.66"E	1°38'0.16"E	-	02°58'55.7"E	03°08'03.5"E	03°08'00.8"E	03°24'54.5"E	03°20'17.1"E		
Méthode analytique	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS		
Sc	13.51	0.96	3.28	2.46	17.09	7.28	14.57	8.05	46.73		
V	108.77	10.65	21.69	16.73	100.24	40.17	113.71	122.68	151.13		
Cr	69.25	7.30	18.28	9.92	86.72	60.85	44.77	39.35	75.10		
Co	6.82	0.51	1.21	0.64	16.77	13.41	2.44	10.31	25.73		
Ni	26.85	4.83	9.91	5.84	44.68	39.80	10.64	27.37	61.36		
Cu	3.90	0.00	0.42	0.00	11.33	43.33	0.74	40.99	4.09		
Zn	14.37	0.00	0.00	1.59	119.41	13.94	4.31	26.91	48.38		
Ga	19.55	2.01	4.03	4.78	20.83	18.83	15.82	8.18	20.58		
Rb	178.21	16.40	30.03	52.67	114.59	3.88	55.33	75.97	142.56		
Sr	89.79	20.21	18.72	84.65	91.13	65.04	172.75	1248.38	337.98		
Y	18.02	5.93	7.33	5.47	13.79	22.54	21.98	30.05	33.17		
Zr	146.49	23.06	42.57	39.86	134.67	99.15	84.20	59.31	58.92		
Nb	16.45	2.03	3.86	3.53	10.60	14.19	10.08	4.80	12.49		
Cs	13.26	0.91	1.94	2.67	14.91	0.11	1.40	2.77	11.46		
Ba	323.40	43.57	66.24	37.55	342.42	93.81	107.69	357.85	335.95		
La	55.82	11.08	11.85	13.52	9.34	36.08	34.88	27.37	28.49		
Ce	103.74	21.55	22.48	27.94	15.96	70.98	74.88	59.91	60.41		
Pr	12.12	2.57	2.65	3.28	2.16	8.29	8.41	7.52	6.91		
Nd	43.26	9.24	9.11	11.84	7.89	29.74	32.23	29.74	25.57		
Sm	7.27	1.93	2.02	2.72	1.88	5.96	6.64	6.47	6.06		
Eu	1.35	0.34	0.38	0.48	0.40	1.19	1.19	1.40	0.91		
Gd	4.46	1.28	1.50	1.67	1.92	5.01	5.32	6.06	5.66		
Tb	0.60	0.18	0.21	0.17	0.33	0.76	0.81	0.98	1.03		
Dy	3.38	0.94	1.19	0.86	2.22	4.24	4.34	5.74	6.46		
Ho	0.71	0.20	0.26	0.18	0.52	0.87	0.88	1.16	1.34		
Er	1.94	0.50	0.67	0.47	1.53	2.24	2.32	2.97	3.55		
Yb	2.13	0.48	0.69	0.53	1.92	2.20	2.60	2.82	3.80		
Lu	0.33	0.07	0.10	0.08	0.31	0.34	0.40	0.43	0.55		
Hf	4.70	1.29	1.78	1.67	4.96	3.25	2.98	1.98	2.38		
Ta	2.90	0.24	0.36	0.40	1.75	2.05	1.43	0.54	1.12		
Pb206	14.87	0.18	1.13	0.35	16.39	15.35	1.75	37.07	13.41		
Pb207	17.56	3.79	4.64	3.92	19.08	16.59	3.73	30.62	13.95		
Pb208	15.31	0.60	1.53	0.76	16.61	14.19	0.73	28.55	11.20		
Th	13.48	2.59	4.02	3.88	10.94	13.83	15.05	36.10	8.69		
U	3.84	1.26	1.64	1.48	3.84	13.30	7.75	75.12	12.80		
(La/Yb) <sub>N</sub>	17.68	15.44	11.46	17.15	3.27	11.05	9.00	6.54	5.06		
Eu/Eu*	0.73	0.66	0.66	0.69	0.64	0.67	0.61	0.68	0.48		
La/Sm	7.67	5.74	5.78	4.97	4.96	6.05	5.22	4.23	4.70		



## Annexe 5 : Données géochimiques de la séance AMI03T\_200516 (3/4)

Échantillon Roche Latitude Longitude	Méthode analytique											
	La Lieude AMI16-044C Pélite	La Lieude AMI16-044D Argille	La Lieude AMI16-044E Grès fin	La Lieude AMI16-044G Grès fin	La Lieude AMI16-044H1 Pélite	La Lieude AMI16-044H2 Pélite	La Lieude AMI16-044I Pélite	La Lieude AMI16-044J Grès grossier	La Lieude AMI16-044K Pélite	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Sc	14,76	11,54	11,62	9,86	15,81	17,50	11,12	3,86	10,08			
V	75,69	76,42	60,08	87,26	91,27	97,74	65,10	122,74	60,42			
Cr	72,04	63,70	56,85	48,49	85,51	92,05	56,43	17,43	48,23			
Co	15,36	11,96	12,78	8,58	17,32	17,74	11,70	5,20	9,11			
Ni	48,06	33,28	34,20	24,57	52,65	52,82	35,38	13,07	26,90			
Cu	52,58	66,10	32,94	77,23	19,19	14,74	93,66	31,40	73,63			
Zn	92,13	69,51	73,21	55,08	100,25	108,87	66,42	27,70	48,45			
Ga	20,00	13,57	15,60	12,66	23,23	24,71	14,34	4,52	12,44			
Rb	153,05	108,32	119,74	88,37	177,70	190,87	103,30	36,25	78,34			
Sr	122,72	127,64	461,74	245,04	225,87	216,74	197,56	12,03	139,22			
Y	25,17	32,97	29,60	24,47	26,58	27,48	29,34	81,21	33,34			
Zr	94,68	87,82	114,70	109,48	101,22	101,98	155,62	45,08	149,95			
Nb	14,81	13,37	11,65	10,62	14,21	14,20	15,71	4,00	15,38			
Cs	15,72	9,09	12,36	8,19	19,11	21,04	10,12	3,45	7,93			
Ba	364,69	289,14	324,90	329,74	419,21	404,49	278,66	206,13	236,99			
La	37,07	35,18	37,66	29,59	38,13	38,44	40,23	11,89	47,81			
Ce	74,42	74,42	76,88	59,59	78,59	78,15	79,98	25,59	93,64			
Pr	8,99	9,27	8,99	7,00	9,26	9,50	9,52	3,21	11,28			
Nd	33,88	34,66	33,08	25,64	34,63	35,98	34,83	11,50	42,60			
Sm	6,44	7,13	6,58	5,21	6,82	7,25	6,90	2,75	8,19			
Eu	1,30	1,48	1,31	1,05	1,38	1,48	1,33	0,57	1,60			
Gd	5,40	6,39	5,82	4,70	5,90	6,20	5,91	2,46	7,05			
Tb	0,85	1,05	0,92	0,75	0,91	0,95	0,93	0,39	1,09			
Dy	4,92	6,12	5,44	4,43	5,20	5,45	5,60	2,16	6,32			
Ho	0,99	1,25	1,10	0,92	1,05	1,10	1,14	0,44	1,28			
Er	2,57	3,18	2,85	2,36	2,68	2,82	2,97	1,09	3,32			
Yb	2,58	2,97	2,76	2,31	2,59	2,74	2,91	1,01	3,24			
Lu	0,38	0,42	0,41	0,35	0,37	0,40	0,45	0,14	0,48			
Hf	3,21	2,98	3,71	3,63	3,31	3,36	4,70	1,75	4,80			
Ta	1,53	1,24	1,07	0,99	1,46	1,51	1,42	0,35	1,46			
Pb206	25,09	3,20	15,48	4,15	28,34	32,10	4,41	1,39	4,18			
Pb207	27,58	6,54	18,31	7,44	30,52	34,32	7,63	4,60	7,38			
Pb208	25,63	3,62	15,97	4,54	28,69	32,65	4,84	1,43	4,58			
Th	12,09	12,80	10,96	9,21	12,08	12,74	13,98	3,97	14,91			
U	2,70	2,44	2,72	3,12	3,36	3,39	3,42	3,33	3,32			
(La/Yb) <sub>N</sub>	9,67	7,98	9,20	8,62	9,93	9,44	9,33	7,94	9,93			
Eu/Eu*	0,68	0,67	0,65	0,65	0,67	0,67	0,64	0,67	0,64			
La/Sm	5,75	4,93	5,72	5,68	5,59	5,30	5,83	4,33	5,84			

## Annexe 5 : Données géochimiques de la séance AMI03T\_200516 (4/4)

	Secteur	Echantillon	Roche	Latitude	Longitude	Le Mas Carnet		LOD1		LOD3		LOD8		LOD-Aut-Gris		LOD-varve	
						AMI16-045	Argillite	Argillite	Silt	Pétille	Grais fin	Varve					
				43°37,08,07"N	03°16'58,31"E	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS
Sc						11,13	7,70	52,57	12,61	23,18	12,34						
V						264,87	26,95	166,03	46,83	500,32	81,56						
Cr						58,62	25,56	58,83	47,04	65,09	54,90						
Co						15,14	1,64	14,48	10,74	4,94	3,78						
Ni						40,12	6,18	45,68	18,65	29,70	24,50						
Cu						144,29	30,43	48,67	61,85	20,39	2,64						
Zn						99,09	20,78	7,49	45,12	5,99	41,87						
Ga						14,89	11,18	20,92	11,25	19,72	18,07						
Rb						97,97	11,56	211,24	46,99	137,17	194,05						
Sr						713,35	274,35	110,27	94,05	19,41	53,07						
Y						24,87	21,05	38,96	25,12	68,17	25,89						
Zr						78,39	117,60	57,60	100,84	144,28	158,14						
Nb						12,74	8,65	10,74	11,99	15,06	13,72						
Cs						9,13	0,71	1,00	4,38	0,83	12,45						
Ba						316,39	9576,36	327,44	153,99	277,97	377,66						
La						32,40	22,92	39,89	25,62	27,62	42,85						
Ce						63,15	47,51	83,81	54,70	64,02	81,80						
Pr						7,58	5,82	10,75	7,16	9,49	9,86						
Nd						27,92	22,21	45,73	27,92	39,81	37,32						
Sm						5,65	4,91	10,11	6,04	12,56	7,69						
Eu						1,17	1,65	2,01	1,10	3,16	1,64						
Gd						4,94	4,55	7,26	5,28	14,40	6,18						
Tb						0,78	0,66	1,11	0,84	2,74	0,95						
Dy						4,58	3,66	6,56	4,68	16,15	5,08						
Ho						0,95	0,75	1,36	0,94	2,99	1,01						
Er						2,45	1,88	3,74	2,37	6,79	2,52						
Yb						2,42	1,82	4,18	2,26	5,17	2,47						
Lu						0,35	0,28	0,65	0,34	0,75	0,37						
Hf						2,72	3,82	2,44	3,35	4,84	4,88						
Ta						1,26	0,80	1,07	1,03	1,89	1,19						
Pb206						4,45	7,54	20,95	6,89	40,03	4,68						
Pb207						7,58	10,67	23,03	9,99	41,04	7,79						
Pb208						4,71	7,86	20,86	7,29	39,82	5,12						
Th						11,47	8,38	9,89	9,57	17,11	16,14						
U						3,42	3,88	5,19	3,16	10,67	3,25						
(LaYb) <sub>N</sub>						9,02	8,47	6,43	7,64	3,60	11,67						
Eu/Eu*						0,68	1,07	0,72	0,60	0,72	0,73						
La/Sm						5,74	4,67	3,95	4,24	2,20	5,57						

## Annexe 6 : Données géochimiques de la séance AMI05M\_210616

AMI05M_210616											
Secteur	Échantillon	La Billière	La Billière	Castanet	Castanet	Col des Cabanes	Services	Mendic	Mendic	Le Valat Grand	Le Valat Grand
Roche	AM116-001	AM116-002	AM116-003	AM116-004	AM116-005	AM116-007	AM116-009	AM116-009bis	AM116-046	AM116-046dup	
Latitude	43°38'4.02"N	43°38'10.6"N	43°38'25.3"N	43°38'41.3"N	43°41'15.1"N	43°41'46.3"N	43°43'22.5"N	43°43'22.5"N	43°35'34.67"N	43°35'34.67"N	
Longitude	3°33'7.9"E	3°33'8.2"E	2°58'08.8"E	2°57'53.4"E	3°03'43.8"E	3°02'25"E	3°07'47.5"E	3°07'47.5"E	3°21'49.97"E	3°21'49.97"E	
Méthode analytique	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES
SiO <sub>2</sub>	47,68	66,02	68,21	70,67	73,16	74,45	71,86	72,06	75,59	70,33	
TiO <sub>2</sub>	0,71	0,92	0,21	0,23	0,21	0,60	0,36	0,36	0,39	0,36	
CaO	6,83	0,07	0,58	0,46	0,06	0,20	0,64	0,63	0,17	0,16	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	10,94	6,77	1,91	1,50	0,18	5,13	2,26	2,25	3,56	3,44	
MgO	10,37	1,30	0,56	0,39	0,05	1,48	0,44	0,44	0,18	0,18	
MnO	0,17	0,01	0,03	0,02	0,00	0,05	0,02	0,02	0,06	0,06	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,90	17,02	13,40	14,03	12,55	10,98	12,72	12,78	10,40	9,56	
Na <sub>2</sub> O	3,67	0,67	2,20	2,77	0,06	2,00	2,64	2,64	1,13	1,29	
K <sub>2</sub> O	0,31	3,28	4,69	4,53	0,44	1,77	5,35	5,29	2,01	2,02	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09	0,11	0,21	0,13	0,15	0,14	0,12	0,11	0,15	0,14	
PF	5,50	3,54	0,77	1,20	4,54	2,00	1,98	1,98	2,41	2,41	
Total	104,15	99,71	92,77	95,94	91,41	98,79	98,41	98,57	96,05	89,95	
Ba	121,85	462,85	293,66	396,42	120,05	332,42	468,14	472,13	342,59	316,21	
Ce	48,07	84,40	39,55	31,60	101,54	49,67	71,82	71,18	51,90	47,07	
Cr	221,09	86,79	13,72	12,21	7,99	53,48	9,66	9,12	24,17	19,74	
Cu	69,69	6,89	5,61	6,28	3,79	1,23	9,30	8,78	5,91	5,88	
Ga	20,10	27,36	15,07	17,26	17,96	17,29	18,73	18,49	14,43	12,95	
La	6,75	40,50	15,55	13,87	52,15	19,26	35,56	35,46	20,97	20,92	
Nb3130	64,69	67,01	67,60	67,75	67,60	67,12	67,70	67,69	67,54	67,48	
Nb3163	123,40	87,91	48,79	46,98	36,91	74,77	52,92	52,94	62,19	60,99	
Nd	12,80	30,60	26,01	19,75	62,07	19,83	26,25	32,08	22,64	18,04	
Ni	186,51	26,11	4,96	2,67	1,27	33,12	3,39	3,34	15,09	8,25	
Pr	5,11	11,27	8,18	-2,28	9,24	6,28	5,52	5,79	3,03	8,01	
Sc	30,64	15,51	4,51	3,76	2,43	9,58	5,96	5,97	6,95	6,81	
Sm	0,83	3,05	2,74	8,65	8,66	2,17	5,86	6,12	7,81	2,15	
Sr	571,35	111,20	49,55	63,67	679,85	93,73	41,09	40,95	36,82	36,33	
V	170,56	155,83	17,27	16,92	6,36	84,60	25,05	25,22	38,57	35,36	
W	1,53	3,05	1,66	3,36	16,83	2,23	2,70	3,02	2,23	2,84	
Y	19,65	29,51	26,14	23,95	11,20	21,84	36,37	35,47	20,94	20,80	
Zn	80,56	72,44	46,85	38,78	2,47	63,52	18,73	18,75	44,86	43,46	
Zr	45,12	205,66	103,23	89,68	109,79	238,34	224,63	211,17	136,85	137,57	

## Annexe 7 : Données géochimiques de la séance AMI04T\_060716

AMI04T_060716												
Secteur	La Bilière	La Bilière	Castanet	Castanet	Col des Cabanes	Servies	Mendic	Mendic	Le Valat Grand	Le Valat Grand		
Echantillon	AMI16-001	AMI16-002	AMI16-003	AMI16-004	AMI16-005	AMI16-007	AMI16-009	AMI16-009bis	AMI16-046	AMI16-046dup		
Roche	Métadiorite	Schiste	Orthogneiss	Granite	Rhyolite	Shiste	Granite	Granite	Porphyroide	Porphyroide		
Latitude	43°38'4.02"N	43°38'10.6"N	43°38'25.3"N	43°38'41.3"N	43°41'15.1"N	43°41'46.3"N	43°43'22.5"N	43°43'22.5"N	43°35'34.67"N	43°35'34.67"N		
Longitude	3°37'91"E	3°38'2"E	2°58'08.8"E	2°57'53.4"E	3°03'45.8"E	3°02'25"E	3°07'47.5"E	3°07'47.5"E	3°21'49.97"E	3°21'49.97"E		
Méthode analytique	ICP-MS	-	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS		
Li	0.00	-	632.21	337.42	0.00	195.19	1022.86	1038.42	776.02	-	-	-
Na	3.03	-	2.97	3.08	0.08	1.87	2.67	2.68	1.29	-	-	-
Mg	9.70	-	0.67	0.37	0.00	1.66	0.47	0.47	0.15	-	-	-
Al	17.64	-	14.28	12.95	12.76	11.54	13.47	13.25	10.29	-	-	-
Si	50.73	-	54.84	54.84	55.16	55.12	55.00	55.03	55.12	-	-	-
P	0.08	-	0.22	0.13	0.16	0.13	0.12	0.12	0.15	-	-	-
K	0.03	-	5.92	4.97	0.20	1.56	5.61	5.58	2.02	-	-	-
Ca	6.19	-	0.65	0.49	0.08	0.20	0.66	0.66	0.17	-	-	-
Sc	29.53	-	4.91	3.78	1.90	9.56	6.27	6.17	7.10	-	-	-
Ti	0.71	-	0.22	0.23	0.21	0.62	0.36	0.36	0.40	-	-	-
V	164.90	-	17.95	17.41	6.81	80.92	25.89	25.63	37.09	-	-	-
Cr	176.68	-	13.14	11.90	7.47	53.73	9.21	9.09	20.56	-	-	-
Mn	0.17	-	0.03	0.02	0.00	0.06	0.02	0.02	0.07	-	-	-
Fe	11.19	-	1.94	1.53	0.09	5.43	2.39	2.37	3.85	-	-	-
Co	46.91	-	2.03	1.85	0.20	12.39	2.80	2.79	5.38	-	-	-
Ni	169.47	-	4.93	3.69	1.70	34.07	4.53	4.48	10.90	-	-	-
Cu	64.37	-	1.23	2.77	0.00	0.00	4.27	4.86	2.55	-	-	-
Zn	180.61	-	161.88	147.55	106.25	171.50	123.92	123.87	156.46	-	-	-
Ga	14.98	-	16.69	18.78	18.19	13.17	17.97	17.62	13.22	-	-	-
Rb	10.98	-	237.08	218.50	18.78	22.52	207.66	202.48	83.01	-	-	-
Sr	556.75	-	61.46	65.55	722.28	97.23	46.11	46.36	42.39	-	-	-
Y	20.25	-	21.57	16.40	6.00	20.43	37.71	37.58	22.96	-	-	-
Zr	48.19	-	83.89	86.30	95.31	151.94	120.03	125.18	80.96	-	-	-
Nb	2.69	-	7.87	11.42	13.70	7.63	12.26	12.03	7.14	-	-	-
Mo	0.43	-	0.29	0.29	0.29	0.37	1.26	1.47	0.58	-	-	-
Sn	0.00	-	0.42	0.20	30.35	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-	-
Sb	7.91	-	0.14	0.20	11.52	2.72	0.70	0.69	0.29	-	-	-
Cs	170.35	-	0.00	0.00	164.43	17.08	0.00	0.00	140.27	-	-	-
Ba	114.94	-	289.75	323.12	119.97	322.17	457.43	462.14	332.15	-	-	-
La	5.96	-	17.61	14.23	52.61	18.82	37.62	37.97	22.68	-	-	-
Ce	11.12	-	35.59	27.84	113.32	41.16	74.87	76.26	45.82	-	-	-
Pr	2.19	-	4.45	3.69	11.49	5.11	8.39	8.42	5.13	-	-	-
Nd	8.48	-	16.34	13.30	42.66	20.33	31.36	31.34	19.64	-	-	-
Sm	2.17	-	3.98	2.99	9.39	4.94	6.92	7.07	4.46	-	-	-
Eu	0.85	-	0.47	0.57	0.65	1.17	0.80	0.80	0.93	-	-	-
Gd	2.77	-	3.72	2.66	5.03	4.80	6.55	6.69	4.29	-	-	-
Tb	0.47	-	0.66	0.43	0.43	0.66	1.11	1.14	0.69	-	-	-
Dy	3.24	-	3.92	2.76	1.43	3.75	6.58	6.63	4.18	-	-	-
Ho	0.73	-	0.75	0.55	0.18	0.74	1.37	1.39	0.84	-	-	-
Er	1.97	-	1.90	1.49	0.36	1.95	3.64	3.65	2.16	-	-	-
Yb	1.69	-	1.76	1.30	0.36	1.90	3.44	3.46	1.83	-	-	-
Lu	0.28	-	0.25	0.20	0.07	0.30	0.49	0.50	0.27	-	-	-
Hf	1.62	-	2.89	3.03	3.54	4.29	3.89	4.07	2.60	-	-	-
Ta	50.64	-	50.75	50.55	50.68	50.75	50.61	50.68	50.82	-	-	-
W	0.00	-	0.50	1.43	14.04	1.48	0.85	0.00	0.00	-	-	-
Tl	0.15	-	1.06	1.13	0.20	0.44	0.85	0.83	0.44	-	-	-
Pb206	1.70	-	26.16	42.62	35.57	8.60	19.82	19.96	7.97	-	-	-
Pb207	5.25	-	30.06	43.50	37.03	11.69	21.75	22.08	11.20	-	-	-
Pb208	4.26	-	29.10	42.26	36.69	10.65	20.93	21.15	10.31	-	-	-
Th	2.24	-	9.42	7.24	31.14	8.06	21.67	21.86	10.48	-	-	-
U	0.58	-	8.06	6.81	8.26	2.52	7.45	5.94	2.49	-	-	-
(La/Yb) <sub>N</sub>	1.07	-	0.38	0.62	0.29	0.74	0.27	-	0.65	-	-	-
Eu/Eu*	2.37	-	6.75	7.40	97.91	6.68	7.38	-	8.36	-	-	-
La/Sm	2.74	-	4.42	4.77	5.60	3.81	5.43	-	5.09	-	-	-
CIA	52.00	-	53.35	53.30	96.36	69.24	53.60	-	69.01	-	-	-