

**UNIVERSITE PAUL SABATIER
TOULOUSE
MASTER & EAUX, SOLS,
ENVIRONNEMENT**

**Rapport de Stage
(Module 3M86SEM)**

**Effectué au
Laboratoire des Mécanismes et Transferts en Géologie
(LMTG OMP UMR 5563 UPS/CNRS/IRD)**

sous la direction de Me. Oliva et M. Seyler

**Contribution à l'étude minéralogique et
géochimique des sédiments en suspension du Rio
Marañòn (Pérou).**

par Sylvaine GOIX

2006 – 2007

Résumé

Le Rio Marañón, affluent de l'Amazone, prend sa source dans les hauteurs du plateau Andin. Son bassin versant draine toute la partie Est du Pérou et le Sud de l'Equateur. Le travail présenté dans ce mémoire porte sur les analyses minéralogiques et chimiques des matières en suspension (MES) prélevées sur le Marañón et ses principaux affluents lors d'une mission en octobre 2005. le but de ce travail est d'évaluer la provenance de ces MES et les mécanismes régissant leur mobilité dans cette partie de l'Amazone. La géochimie et la minéralogie des matières en suspension prélevées le long du Marañón et de ses affluents varient avec l'origine du cours d'eau et les processus contrôlant la zone traversée. Ainsi, au Nord, les processus d'érosion contrôlent le bassin hydrologique, augmentant les teneurs en éléments et en minéraux caractéristiques des Andes dans les MES, tandis qu'au Sud, des processus de sédimentation bloquent ces éléments et minéraux, laissant aux cours d'eau une signature sans particularité propre minéralogiquement et chimiquement. En effet, que ce soit pour le Marañón lui-même ou pour ces affluents drainant la zone d'inondation, les spectres de terres rares, la minéralogie et les facteurs d'enrichissement restent identiques.

SOMMAIRE

1. Introduction :
2. Matériel et méthodes :
 1. Contexte géographique:
 2. Contexte géologique:
 3. Méthodes d'analyse
3. Résultats:
 1. Analyse minéralogique par diffraction par rayons X:
 2. ICP-MS:
4. Analyse:
 1. Analyse minéralogique par diffraction par rayons X:
 2. ICP-MS:
5. Discussion:
 1. Minéralogie:
 2. Diagramme des terres rares
 3. Facteurs d'enrichissement
6. Conclusion:

1.Introduction :

Le bassin amazonien est le plus important bassin hydrographique du monde en termes de surface ($6,1.10^6$ km²) et de débit moyen (209 000 m³/s). Du fait de cette extension, l'Amazone et ses affluents drainent des formations géologiques et des environnements très variés, des Andes jusqu'à l'estuaire. C'est pourquoi l'étude du bassin amazonien est apparue comme une évidence pour la communauté scientifique intéressée par la compréhension et la quantification des transferts de matière et d'éléments vers les océans (Gaillardet et al., 1999).

Au LMTG, dans le cadre de l'observatoire de recherche en environnement (ORE) HYBAM, des actions de recherche sont menées sur les contrôles géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion, de l'altération et des transferts de matière dans le bassin amazonien (Guyot et al., 1996, Laraque et al., 2004).

En termes de processus d'érosion et de transfert de matière « solide », il a été montré que les affluents d'origine Andine ont un rôle majeur (Guyot et al., 1996). Les principaux affluents Andins de l'Amazone sont, du Nord au Sud, le Rio Napo (100 520 km²; 6 300 m³/s), le Rio Marañón (360 550 km²; 14 700 m³/s) et le Rio Ucayali (360 490 km²; 13 800 m³/s). Ces rivières et leurs affluents drainent dans un premier temps les hauteurs des plateaux Andins avant de circuler dans les vastes plaines d'inondation. C'est dans ces zones de sédimentation récente qu'ils confluent avec l'Amazone. Des études récentes ont montré qu'au Nord de l'Amazone, dans la plaine d'inondation Equatorienne, des processus d'érosion augmentent la charge en particules sédimentaires (MES) (Guyot et al., 1996), tandis qu'au Sud, dans la plaine d'inondation Bolivienne, des processus de sédimentation diminuent la charge en MES (Laraque et al., 2004).

Ce mémoire a pour but d'analyser les matières en suspensions prélevées en Octobre 2005 au Pérou, le long du Marañón et de certains de ses affluents (21 échantillons). Il s'agit dans ce travail de mieux comprendre les processus qui entrent en jeu dans les transferts de matières en suspension dans cette partie du bassin amazonien (nature et origine des matériaux transportés). Pour cela, les échantillons ont été étudiés minéralogiquement (diffraction des rayons X) et chimiquement (composition chimique après attaque totale).

En ce qui concerne la chimie des MES, compte tenu des objectifs de ce travail, nous nous sommes focalisés sur l'analyse des éléments mineurs et « traces », et plus particulièrement sur les terres rares (REE). Parmi les nombreux outils permettant de discriminer l'origine des particules (par exemple l'utilisation des rapport isotopiques, des diagrammes de terres rares...) nous avons choisis de raisonner avec les diagrammes de terre rares normalisés et les facteurs d'enrichissement.

Les données obtenues seront discutées et mises en rapport avec les données déjà existantes telles que les teneurs en éléments dissous provenant de la même campagne d'échantillonnage, ou les données déjà publiées sur la géologie et la géochimie des différents compartiments de la zone d'étude.

2. Matériel et méthodes :

Les échantillons sont notés de 1 à 23 mais les échantillons 10 et 11, pour cause de défauts d'étiquetage n'ont pas été analysés. Nous disposons donc de 21 échantillons.

1. Contexte géographique:

Le Río Marañón prend sa source au Pérou, à environ 5.800 mètres d'altitude, du glacier du Nevado de Yapura, dans les Andes à l'est du pays. Après avoir parcouru 1.600 kilomètres, il fusionne avec le Rio Ucayali et ensemble, ils donnent naissance à l'Amazone près de la localité de Nauta dans la région de Loreto.

Les affluents échantillonnés confluent avec le Marañón soit par sa rive gauche, c'est à dire en venant plutôt du Nord ou de l'Ouest (Rio Santiago, Rio Morona, Rio Tashipahua, Rio Pastaza, Rio Ungumayo, Rio Nucuray, Rio Uritucayu, et Rio Tigre), soit par sa rive droite, c'est à dire en venant plutôt du Sud ou de l'Est (Rio Utcubamba, Rio Shiraco, Rio Nieva, Rio Cahuapanas, Rio Huallaga). Le tableau 1 récapitule les lieux d'échantillonnage ainsi que les dates de prélèvement.

| Échantillon | Fleuve | Lieu | Date | Latitude Sud | Longitude Ouest |
|-------------|------------|--------------------------|----------|--------------|-----------------|
| 1 | Mayo | Tarapoto | 09/10/05 | 6,41309 | 76,59997 |
| 2 | Utcubamba | Choruja | 09/10/05 | 6,02302 | 77,95085 |
| 3 | Maranon | Puente coral quemado | 10/10/05 | 5,75474 | 78,69252 |
| 4 | Utcubamba | Ppuente de bagua chica | 10/10/05 | 5,63659 | 78,35674 |
| 5 | Shiraco | Puente venezuela | 11/10/05 | 5,13543 | 78,30795 |
| 6 | Nieva | Santa maria | 11/10/05 | 4,60401 | 77,97 |
| 7 | Santiago | Confluence | 12/10/05 | 4,42494 | 77,64422 |
| 8 | Maranon | Borja | 13/10/05 | 4,47303 | 77,54685 |
| 9 | Morona | Confluence | 14/10/05 | 4,71017 | 77,07295 |
| 12 | Cahuapanas | Confluence | 15/10/05 | 4,86392 | 76,62026 |
| 13 | Pastaza | Confluence | 15/10/05 | 4,88913 | 76,39526 |
| 14 | Maranon | Amont confluence pastaza | 15/10/05 | 4,91 | 76,44350 |
| 15 | Ungumayo | Confluence | 16/10/05 | 4,92392 | 76,15065 |
| 16 | Huallaga | Confluence | 16/10/05 | 5,07846 | 75,63032 |
| 17 | Maranon | Aval hualaga | 17/10/05 | 5,01642 | 75,55335 |
| 18 | Nucuray | Confluence | 17/10/05 | 4,94890 | 75,52384 |
| 19 | Urituyacu | Confluence | 18/10/05 | 4,82022 | 75,40105 |
| 20 | Tigre | Confluence | 19/10/05 | 4,45437 | 74,09804 |
| 21 | Maranon | Avall tigre | 20/10/05 | 4,48419 | 74,04250 |
| 22 | Ucayali | Confluence | 22/10/05 | 4,45929 | 73,44292 |
| 23 | Maranon | Tamshiyacu | 25/10/05 | 4,50158 | 73,54996 |

Tableau 1: correspondance entre les numéros d'échantillon et les lieux des différents fleuves échantillonnés avec la date et les coordonnées géographiques exactes

La situation géographique des points d'échantillonnage est représentée sur la figure 1 (image Google earth^R).

Figure 1: carte du bassin du Marañón représentant les 21 points d'échantillonnage

2. Contexte géologique:

Le bassin du Marañón est essentiellement constitué de dépôts sédimentaires s'étendant du précambrien jusqu'au quaternaire (cartes géologiques du Pérou : ingemmet 1999). Prés de la côte Pacifique, dans la cordillère des Andes, au Nord et au Sud du Marañón, s'étendent de longues zones volcaniques (essentiellement Cénozoïques), avec quelques intrusions granitiques.

Le Rio Marañón prend sa source dans des terrains sédimentaires crétacé, puis atteint rapidement une formation datant du Carbonifère-Permien sédimentaire qu'il suit sur plusieurs centaines de km. Il traverse ensuite des formations de roches intrusives acides datées mézo-cénozoïques et des formations métasédimentaires d'âge protérozoïque. Puis le rio Marañón quitte les haut plateaux andins pour rejoindre le bassin sédimentaire de la zone d'inondation, avec, de l'amont vers l'aval une succession de formations crétacé, jurassique, paléogène, néogène et enfin, quaternaire, qui constitue le substrat du Marañón sur les 700 derniers km avant sa confluence avec l'Amazone. Les échantillons 3, 8, 14, 17, 21 et 23 ont été prélevés directement le long du cheminement du Marañón.

L'échantillon 3 est prélevé au niveau des premiers terrains crétacés rencontrés. Les affluents qui alimentent le Marañón avant ce point traversent essentiellement des terrains crétacé, précambrien-dévonien, des roches intrusives acides méso-cénozoïques et des roches effusives du Cénozoïque.

L'échantillon 8 est prélevé en amont du Rio Santiago, au niveau des terrains néogènes. Les affluents échantillonnés lors de cette campagne situés en amont du point 8 sont : Rio Nieva, Rio Shiraco, Rio Utcubamba.

L'échantillon 14 est prélevé à 150 km du point 8 sur le Marañón, au niveau des terrains sédimentaires quaternaires. Les affluents situés entre les points 8 et 14 sont : Rio Santiago, Rio Morona, Rio Potro, Rio Cahuapanas.

L'échantillon 17 est situé une centaine de km plus loin sur le Marañòn, toujours dans les terrains quaternaires. Les affluents situés entre les points 14 et 17 sont: Rio Pastaza, Rio Ungumayo, et Rio Huallaga.

L'échantillon 21 est situé 250 km plus loin sur le Marañòn, toujours sur les terrains quaternaires. Les affluents situés entre les points 17 et 21 sont : Rio Nurucay et Rio Uritucayu.

L'échantillon 23 est situé 80 km plus le loin sur le Marañòn. Seul le Rio Tigre conflue avec le Marañòn entre le point 21 et 23.

L'échantillon 1 a été prélevé sur le Rio Mayo, qui n'est pas un affluent direct du Marañòn, mais du Huallaga, qui se jette lui même dans le Marañòn 200 km plus loin. L'échantillonnage du Rio Mayo a été effectué après qu'il ait traversé des terrains sédimentaires crétacé et paléogène et des dépôts alluvionnaires du quaternaire.

Les échantillons 2 et 4 sont prélevés sur le Rio Utcubamba. L'échantillon 2 est prélevé dans la partie amont, après avoir traversé uniquement des terrains Jurassique et crétacé. L'échantillon 4 est prélevé près de la confluence avec le Marañòn, après avoir traversé des terrains Permien, Trias, Crétacé, et alluvionnaires du quaternaire.

L'échantillon 5 est prélevé sur le Rio Shiraco, près de sa confluence avec le Marañòn. Il traverse uniquement des terrains sédimentaires, avec, de l'amont vers l'aval : Trias, Jurassique, dépôts aluvionnaires du quaternaire, Crétacé et dépôts fluviatiles du quaternaire.

L'échantillon 6 est prélevé sur le Rio Nieva, près de sa confluence avec le Marañòn. Il traverse uniquement des terrains sédimentaires : crétacé, néogène, paléogène et dépôts aluvionnaires du quaternaire.

L'échantillon 7 est prélevé sur le Rio Santiago, près de sa confluence avec le Marañòn. Ses affluents prennent leurs sources dans les mêmes formations que le Pastaza, c'est à dire roches effusives du cénozoïques, des roches intrusives du mézocénozoïque, et du précambrien indifférencié. Il traverse ensuite lui même les terrains métasédimentaires jurassiques (supérieur et inférieur) avant d'atteindre les terrains sédimentaires crétacé, paléogène, et néogène où il conflue avec le Marañòn.

L'échantillon 9 est prélevé sur le Rio Morona, près de sa confluence avec le Marañòn. Il prend sa source dans dans la zone volcanique avant d'atteindre les terrains sédimentaires du Jurassique supérieur, puis traverse des terrains crétacé, néogènes et enfin, des dépôts alluvionnaires de l'holocène.

L'échantillon 12 est prélevé sur le Rio Cahuapanas, près de sa confluence avec le Marañòn; il traverse des terrains sédimentaires crétacé, paléogène, néogène, puis des dépôts aluvionnaires du quaternaire.

L'échantillon 13 est prélevé sur le Rio Pastaza, près de sa confluence avec le Marañòn. Il prend sa source au niveau de roches effusives du Cenozoïque, puis traverse des terrains précambriens indifférenciés et enfin des roches intrusives mézocénozoïques avant d'atteindre les terrains sédimentaires néogène, puis des dépôts aluvionnaires et palustres du Quaternaire, et enfin fluviatiles au niveau du point d'échantillonnage.

L'échantillon 15 est prélevé au niveau de la confluence avec le Rio Ungumayo. Il traverse des sédiments pléistocènes, puis des dépôts palustres, aluvionnaires et fluviatiles de l'holocène.-

L'échantillon 16 est prélevé sur le Rio Huallaga au niveau de sa confluence avec le Marañòn. Il prend sa source dans les hauts plateaux andins effusifs, puis traverse des dépôts alluvionnaires de l'holocène.

L'échantillon 18 est situé au niveau de la confluence du Rio Nucuray. Il traverse uniquement des dépôts sédimentaires du quaternaire.

L'échantillon 19 est situé au niveau de la confluence avec le Rio Urituyacu. Il traverse uniquement des dépôts aluvionnaires du quaternaire.

L'échantillon 20 est situé au niveau de la confluence du Rio Tigre. Il traverse des terrains sédimentaires du néogène, puis des dépôts aluvionnaires du quaternaire.

L'échantillon 22 est situé au niveau de la confluence du Rio Ucayali. Il traverse principalement des terrains sédimentaires quaternaire, mais certains de ses affluents circulent dans des terrains sédimentaires tertiaire.

La majorité des affluents du Marañon ne traversent donc que des terrains sédimentaires, et la plupart d'entre eux ne circulent que sur des dépôts du quaternaire. En revanche, le Rio Santiago, le Rio Pastaza et le Rio Morona, qui prennent leur source dans les Andes équatoriennes, subissent une forte influence volcanique.

3. Méthodes d'analyse

Les échantillons correspondent aux particules récupérées lors des filtrations réalisées pendant la campagne d'Octobre 2005 le long du Marañon et de ses affluents. Environ 300 ml de solution ont été filtrés pour chaque point d'échantillonnage. Les filtres (diamètre des pores de 0,2 μm , filtres en nitrate de cellulose) ont été lavés et pré-pesés avant la mission au LMTG. Lors de la manipulation des filtres sur le terrain, toutes les précautions ont été prises afin d'éviter les contaminations (pinces plastiques propres, récupération dans un porte filtre).

Après un stockage transitoire dans des sachets hermétiques en plastiques, les filtres ont été découpés à l'aide de ciseaux en céramique: un quart pour la diffraction des RX et le reste pour les analyses chimiques (ICP-MS et ICP-AES). Tous les filtres ont été ensuite stockés dans des piluliers propres, pesés (balance précise à 10^{-5} g) et recouverts par de l'eau MQ. Pour l'ensemble des analyses, il a fallu décoller la matière du filtre. Pour cela, les piluliers ont été soumis environ deux heures aux ultrasons (bac à ultrasons).

1. Diffraction des Rayons X:

Après cela, afin de bien séparer la matière et le filtre, les échantillons ont été placés 5mn à la centrifugeuse à raison de 3000 tours/min.

Après 72 h placés dans une étuve à 80°, les échantillons évaporés ont été emmenés aux Rayons X pour l'analyse.

Les analyses rayons ont été réalisées sur les échantillons totaux non broyés (diagramme « poudre »). Le modèle d'instrument utilisé est un « CPS-120 INEL » avec une anticathode Co muni d'un détecteur courbe (détection de 2 à 120°C). La quantité minimale pour qu'une phase soit « visible » par diffraction des rayons X est de 5%.

Compte tenu de la quantité très faible de matière filtrée, les analyses complémentaires pour la fraction argileuse (chauffage pour les collapsés, éthylèneglycol, glycérol) n'ont pas pu être effectuées. Seul l'échantillon 4 a été analysé sans chauffage et après chauffage à 550° pendant 3 heures.

2. Analyses chimiques:

Certains échantillons n'étant toujours pas décollés après le passage aux ultrasons, une spatule en céramique a été utilisée pour racler les filtres. Après séchage à l'étuve à 45°, les échantillons sont ensuite pesés, puis soumis à des attaques acides dans des Savilex afin d'être entièrement dissous, un blanc (blanc1) et un échantillon géostandard (STD2) sont également soumis à l'attaque.

Les piluliers et les Savilex utilisés pour les attaques et le stockage des échantillons ont été soigneusement lavés avec HCl 1N pour les piluliers et un mélange HF/HNO₃- bidistillé pour les Savilex.

Tous les échantillons ont subi une première série d'attaques avec 1) 1mL de H₂O₂ à froid pendant 24 h pour dissoudre la matière organique; 2) 1mL de HNO₃ bidistillé puis évaporation pendant 24 h à 45°; 3) à 90° pendant 24 h par un mélange HNO₃⁻ bidistillé-HF. À ce moment, les échantillons dissous sont évaporés puis repris dans 10 mL de HNO₃- à 10%, puis pesés et stockés.

Ceux qui n'ont pas été dissous subissent une deuxième série d'attaque avec un mélange 2 mL HCl bidistillé et 1 mL HNO₃⁻ bidistillé, puis laissés à 120° 4 jours. Pour l'analyse de ces échantillons, un blanc a été réalisé, à partir du mélange HCl/HNO₃⁻ (blanc2). On reprend avec 10 mL de HNO₃- à 10% ceux qui sont dissous.

Les autres ainsi qu'un troisième blanc (blanc3) subissent la troisième série d'attaque avec HNO₃⁻ bidistillé pendant une semaine à 140°, sont évaporés à 40° puis repris avec HNO₃⁻ 10% à 90° et pesés.

Le tableau 1 récapitule les traitements apportés aux différents échantillons.

| Références | Série 1 | Série 2 | Série 3 |
|------------|---------|---------|---------|
| 1 | X | X | |
| 2 | X | X | X |
| 3 | X | X | X |
| 4 | X | X | X |
| 5 | X | | |
| 6 | X | | |
| 7 | X | X | X |
| 8 | X | X | X |
| 9 | X | | |
| 12 | X | | |
| 13 | X | X | |
| 14 | X | X | X |
| 15 | X | | |
| 16 | X | X | |
| 17 | X | X | |
| 18 | X | | |
| 19 | X | | |
| 20 | X | | |
| 21 | X | X | X |
| 22 | X | X | X |
| 23 | X | X | |
| STD2 | X | X | X |
| Blanc | X | | |
| Blanc 2 | | X | |
| Blanc 3 | | | X |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Tableau 2 : récapitulatif des séries d'attaques subies par chaque échantillon, avec, en rouge, le dernier traitement subit.

1. ICP-MS

Les analyses ont été réalisées au LMTG à l'aide d'un AGILENT 750 CE. Les interférences principales ont été corrigées (pour les analyses sous argon) et quand la concentration de l'élément était suffisante les analyses ont pu être réalisées en mode hélium (qui limite les interférences). Les calibrations ont été réalisées en utilisant un standard externe et un standard interne (ajout d'In/Re).

Les dilutions nécessaires ont ensuite été réalisées pour préparer les échantillons au passage à l'ICP-MS.

Les contenus des piluliers de reprise sont transvasés dans un grand pilulier et complétés avec H2O mQ pour avoir 100 mg de solution. 3 mL ont été ensuite prélevés dans chaque pilulier, puis transférés dans des petits piluliers, et la masse de liquide pesée. Après ajout d'environ 0,15 g de In/Re, les piluliers sont complétés avec H2O mQ pour arriver à une masse de 15 g. Les échantillons sont ensuite stockés en attente de l'analyse, et les facteurs de dilutions sont calculés.

3. Résultats:

1. Analyse minéralogique par diffraction par rayons X:

L'analyse minéralogique par diffraction des rayons X donne des diffractogrammes très similaires. Certains diffractogrammes présentent de très fortes interférences qui gênent l'interprétation (échantillons 5, 15, 18 et 19). La figure 2 représente le diffractogramme de l'échantillon 15 à titre d'exemple de diffractogramme montrant des interférences.

Figure 2: diffractogramme de l'échantillon 15 à titre d'exemple des diffractogrammes interférés

Comme les diffractogrammes interprétables sont très semblables, nous avons choisis de montrer dans cette étude seulement l'un d'entre eux (échantillon 4) qui est assez représentatif de la totalité des échantillons.

Le diffractogramme de l'échantillon 4 est représenté dans la figure **XXX**:

Figure 3: diffractogramme de l'échantillon 4 à titre d'exemple des diffractogrammes non interférés

Les pics représentatifs que l'on peut remarquer sont: les raies 3,34; 4,26; 1,82 pour le quartz ; les raies 3,03; 2,10; 2,28 pour la calcite ; les raies 3,18; 3,21; 3,75 pour les feldspaths (ici absents, mais présent dans beaucoup d'échantillons) ; la raie 1,66 pour le graphite (les autres sont confondues avec celles du quartz) ; les raies 3,37; 10,1; 2,66 pour l'illite (micas) ; les raies 7,17; 1,49; 3,58 pour la kaolinite

comme on le voit sur la figure **XXX**, un bombement situé sur les grands angles empêche l'interprétation pour la phase argileuse, les pics autour de 14 pouvant être de la chlorite ou de la smectite, et celui autour de 7 pouvant être de la kaolinite ou de la chlorite.

On procède donc à une nouvelle analyse pour l'échantillon 4 après un chauffage à 550° pendant 3 heures.

Les résultats seront appliqués à l'ensemble des échantillons compte tenu des fortes similitudes entre les diffractogrammes en ce qui concerne la phase argileuse qui semble ne représenter jamais plus de 20% de la minéralogie totale.

Figure 4: diffractogramme de l'échantillon 4 après chauffage à 550° pendant 3 heures

On observe que la raie qui était à 7 Å a disparu après chauffage, ce qui signifie qu'elle correspond à une kaolinite et non à une chlorite..

Quand au pic qui était autour de 15 Å, il a disparu et il est remplacé par un pic à environ 10 Å, ce qui signifie que la phase argileuse supplémentaire est en fait de la smectite (ou argile gonflante), et non pas de la chlorite.

De plus, compte tenu de la qualité des diffractogrammes, nous ne pouvons pas définir réellement la présence ou non de minéraux interstratifiés.

On conclue donc que le mélange argileux correspond à un mélange de kaolinite et de smectite, et non pas de chlorite.

2. ICP-MS:

Les éléments analysés à l'ICP-MS sont les suivants : Li, P, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, Hf, Ta, W, Pb, Bi, Th, U, et les terres rares : La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Les teneurs en éléments en ppb ($\mu\text{g}/\text{kg}$ de matière sèche) obtenus après analyse à l'ICP-MS sont représentés en annexe dans le tableau 3.

4. Analyse:

1. Analyse minéralogique par diffraction par rayons X:

Les interprétations des diffractogrammes sont reportées dans le tableau 2:

| Échantillon | Quartz | Illite | Kaolinite | Plagioclase | Graphite | Calcite | Smectite |
|-------------|--------|--------|-----------|-------------|----------|---------|----------|
| 1 | 100 | X | X | Y | Y | | |
| 2 | 100 | X | | Y | X | X | |
| 3 | X | X | X | Y | X | 100 | X |
| 4 | 100 | X | | Y | X | X | X |
| 5 | 100 | X | | | X | | |
| 6 | 100 | X | | Y | Y | | X |
| 7 | 100 | X | X | X | X | | X |
| 8 | 100 | X | | X | Y | X | X |
| 9 | 100 | X | X | X | Y | | X |
| 12 | 100 | X | X | Y | Y | | X |
| 13 | 100 | X | | X | Y | | |
| 14 | 100 | X | X | X | X | | X |
| 15 | | | | | | | X |
| 16 | 100 | | X | X | Y | | X |
| 17 | 100 | X | X | X | Y | | X |
| 18 | 100 | X | | X | | | X |
| 19 | X | 100 | | X | | | X |
| 20 | 100 | X | | X | Y | | X |
| 21 | 100 | X | X | X | X | | X |
| 22 | 100 | X | X | X | Y | | X |
| 23 | 100 | X | X | X | X | | X |

Tableau 4 : récapitulatif de la composition minéralogique des échantillons. X représente la présence de minéral, Y la présence en trace du minéral. 100 indique le pic principal. Les lignes bleutées indiquent des échantillons interférés.

On remarque que tous les échantillons semblent contenir du quartz et une ou plusieurs phases autour de 10 Angstroms que l'on peut interpréter comme étant des illites/micas. Le quartz est dans la majorité des cas le pic principal, sauf pour l'échantillon 3.

Seuls les échantillons 2, 3, 4, et 8 contiennent de la calcite, et il s'agit du pic principal pour l'échantillon 3.

Les échantillons 7, 8, 13, 16, 17, 18, 20, 21, 22 et 23 contiennent des feldspaths. Les échantillons 1, 2, 3, 4, 6, et 12 semblent en contenir également mais dans des quantités beaucoup plus infimes.

Tous les échantillons contiennent du graphite, mais les échantillons 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21 et 23 semblent en contenir une fraction plus importante (intensité > 10).

pour les échantillons 5, 15, 18 et 19, il est difficile d'infirmier la présence ou l'absence de certains minéraux.

En ce qui concerne les minéraux argileux (hormis les illites), les échantillons 1, 3, 4, 7, 9, 12, 14, 16, 21, 22, 23 contiennent de la kaolinite et les échantillons 3, 4, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 contiennent des smectites (phases gonflantes).

2. ICP-MS:

Les résultats obtenus (tableau 3) nous ont permis de calculer les facteurs d'enrichissement et d'établir les spectres des terres rares.

1. Facteurs d'enrichissement:

Les facteurs d'enrichissement ont été calculés avec trois références : la croûte continentale supérieure (UCC: Upper Continental Crust, données de Taylor et Mc Lennan, 1985) , le Post Archean Australian Shales (PAAS : Post Archean Australian Shales, Roddaz et al., 2005), et le Rio Solimoes (Gaillardet et al., 1997) . Dans les trois cas, l'élément de référence choisit est le Th.

Le rapport R représentant le facteur d'enrichissement est :

$$R = \frac{\frac{[\text{élément}]_{\text{échantillon}}}{[\text{Th}]}}{\frac{[\text{élément}]_{\text{référence}}}{[\text{Th}]}}$$

Le diagramme normalisé à l'UCC est représenté dans la figure 5:

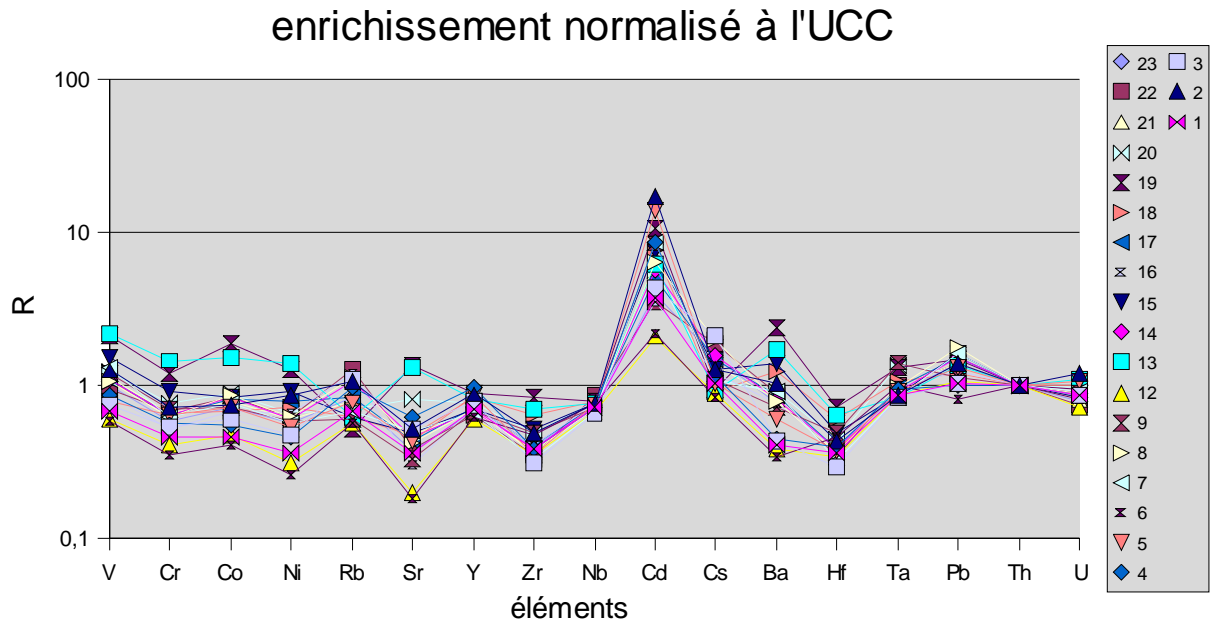


Figure 5: diagramme d'enrichissement normalisé à l'Upper Crust et référencé au Th

Les échantillons sont globalement appauvris par rapport à l'UCC

En comparaison avec l'UCC, les échantillons montrent un fort enrichissement en Cd et en Pb, et un léger en Cs. Ils montrent un appauvrissement moyen en V, Cr, Co, Ni, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba et Hf, et un léger en U. Tous les rapports sont à peu près égaux à 1 pour le Ta. Néanmoins, certains échantillons ne suivent pas ce schéma.

En effet, les échantillons 13 et 19 présentent un enrichissement en V, Cr, Co, Ni et Sr.

Les échantillons 2, 5 et 13 sont légèrement enrichis en U.

les échantillons 2, 13, 15, 18 et 19 présentent un enrichissement en Ba.

Les échantillons 9, 19 et 20 présentent un enrichissement en Ta.

Les échantillons 2 et 5 sont les plus enrichis en Cd.

les échantillons 6 et 12 sont les globalement les moins enrichis.

Le diagramme normalisé au PAAS est représenté dans la figure 6:

enrichissement normalisé au PAAS

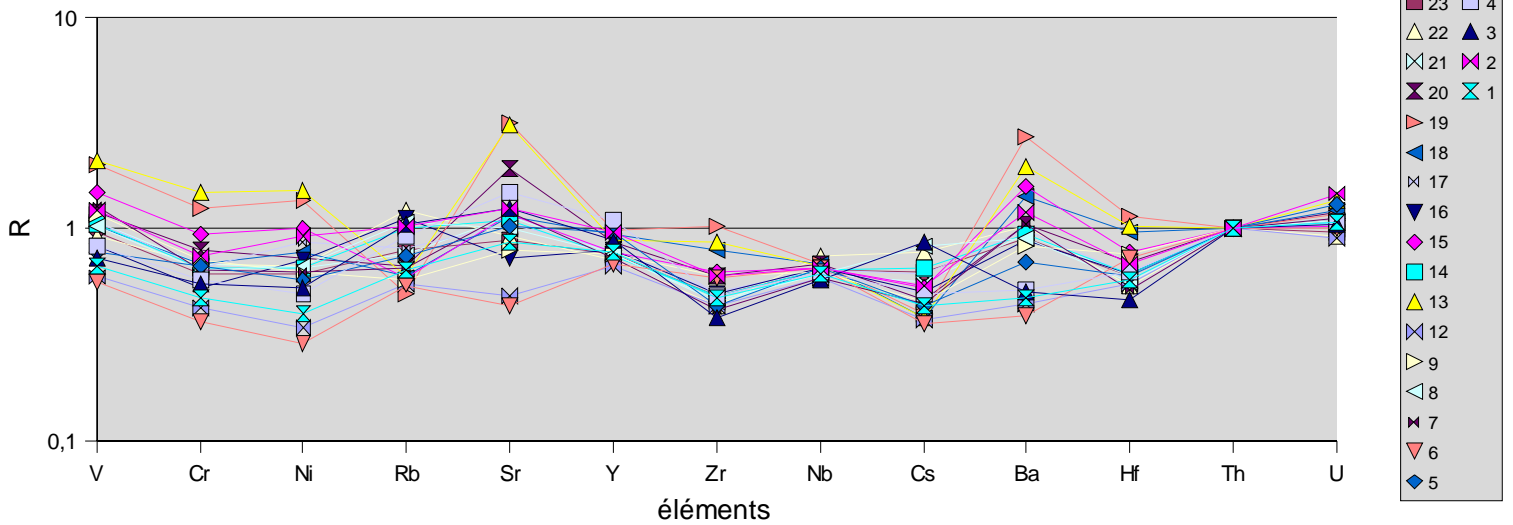


figure 6: enrichissements en éléments normalisés au PAAS et référencés au Th

En comparaison avec le PAAS, les échantillons montrent un appauvrissement en presque tous les éléments, à part pour l'U. Les rapports tournent autour de 1 pour V, Sr et Ba.

Les échantillons 19 et 13 ont un fort enrichissement par rapport aux autres en V (avec le 15), Cr, Ni, Sr (avec le 20 et le 4 en plus pour le Sr), Ba (avec le 15 et le 18) et Hf (avec le 18).

Les échantillons 1, 6, et 12 ont un fort appauvrissement en V, Cr et Ni.

Les échantillons 6 et 12 montrent un appauvrissement en Sr.

Les échantillons 1, 3, 4, 6, et 12 montrent un fort appauvrissement en Ba.

Le diagramme normalisé au Rio Solimoes est représenté dans la figure 7:

enrichissement normalisé au Rio Solimoès

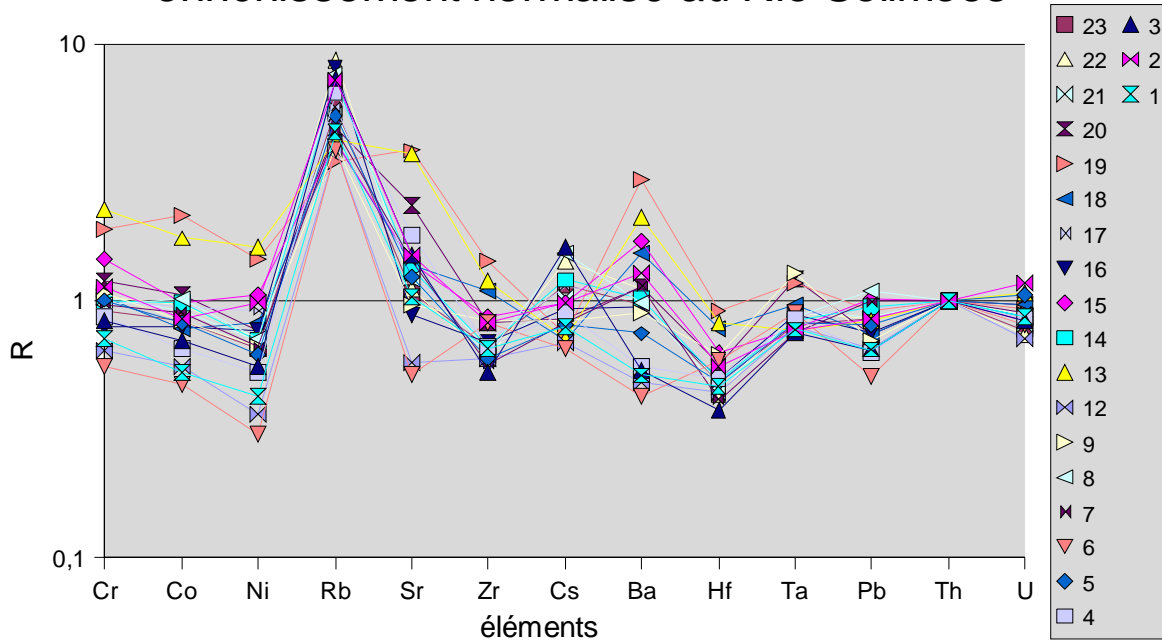


Figure 7: enrichissement en éléments normalisés au Rio Solimoès et référencés au

En comparaison avec le Rio Solimoès, les échantillons sont légèrement appauvris en Co, Ni, Zr, Cs, Hf, Ta, Pb et U. Ils sont très enrichis en Rb, légèrement en Sr. Les rapports tournent autour de 1 pour le Cr et le Ba.

Les échantillons 13 et 19 présentent un fort enrichissement en Cr, Co, Ni, Sr, Zr (avec le 18), et en Ba (avec le 18 et le 15).

Les échantillons 2, 5 et 13 sont légèrement enrichis en U.

2. Diagramme des terres rares:

Comme pour les facteurs d'enrichissement, les diagrammes de terres rares ont été calculés avec les trois références PAAS, UCC et Rio Solimoès.

Le rapport R est :

$$R = \frac{[\text{éléments}]_{\text{mesurés}}}{[\text{éléments}]_{\text{références}}}$$

Les résultats obtenus avec la référence à l'UCC sont représentés dans la figure 8:

REE normalisées UCC

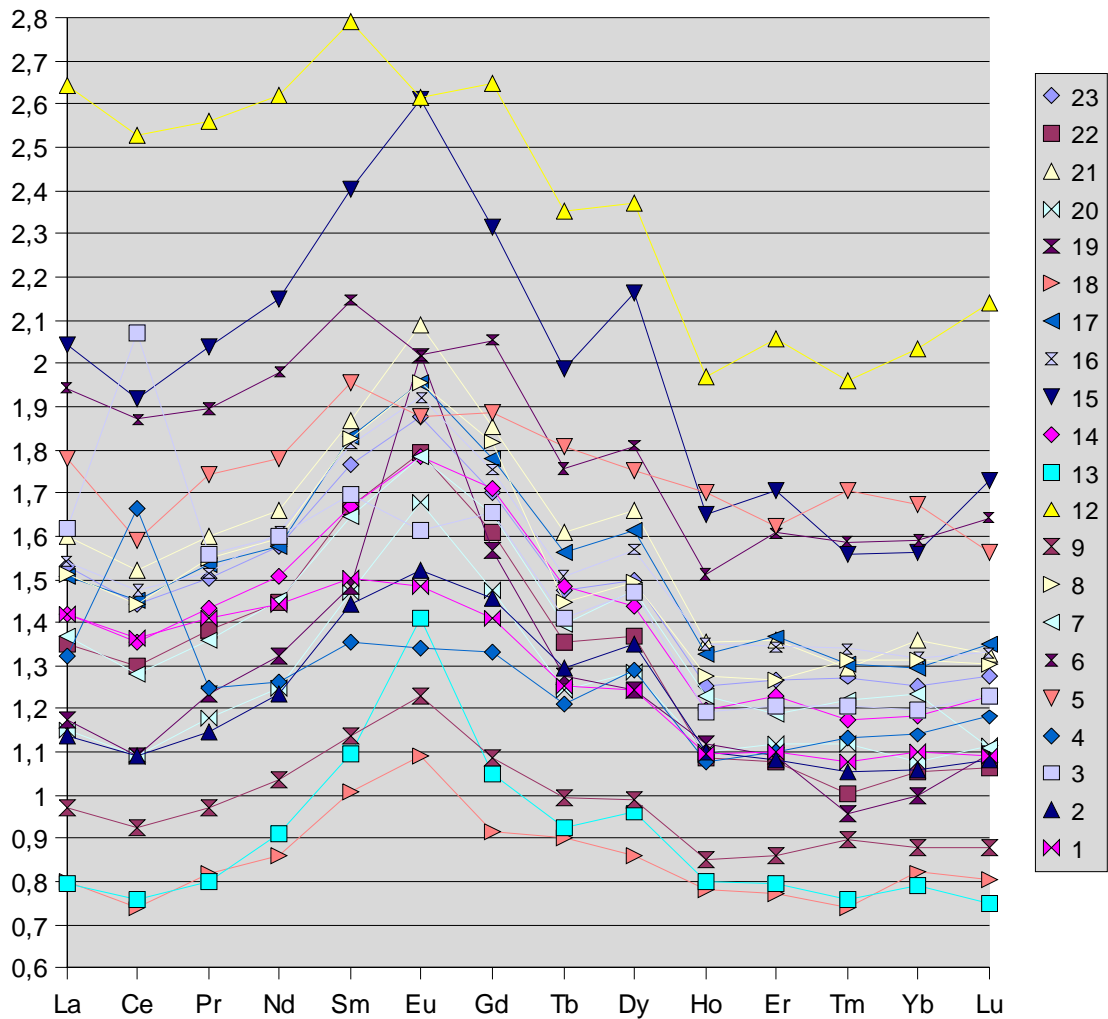


Figure 8 : spectre des terres rares normalisées au PAAS

Tous les rapports des échantillons sont compris entre 0,7 et 3 et ne sont globalement pas linéaires. La plupart des échantillons présentent uniquement un enrichissement en terres rares par rapport à l'UCC, hormis les échantillons 18, 13 et 9, globalement appauvris, et le 19 présentant un appauvrissement en Tm. Mais cet enrichissement est globalement moins important pour les terres rares lourdes et légères que pour les terres rares de masse moyenne.

D'après ce diagramme, nous avons pu différencier 3 groupes d'échantillons ayant des caractéristiques similaires.

Le premier groupe distingué est celui des échantillons 1, 5, 6, et 12 représenté dans la figure 9.

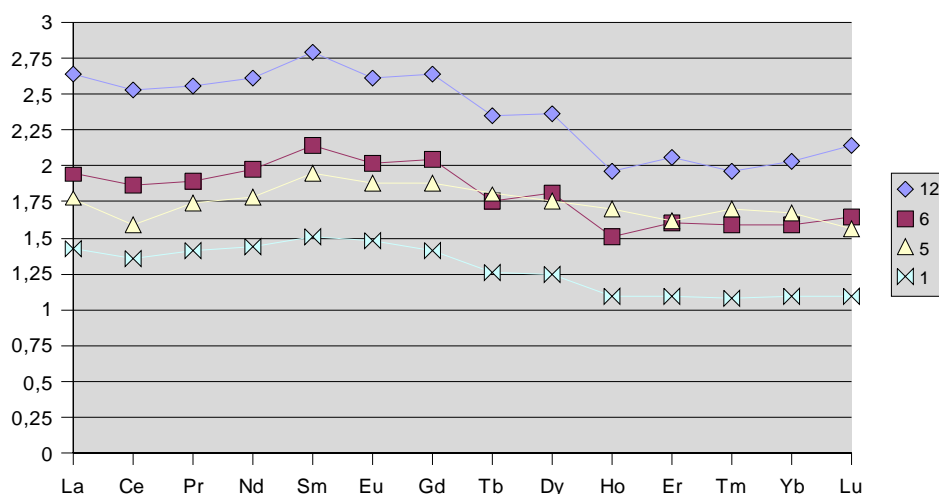


Figure 9: diagramme des terres rares normalisé à l'UCC pour les échantillons 1, 5, 6 et 12

Les échantillons 1, 5, 6, et 12 ont une valeur de R est comprise entre 1 et 3. Ils suivent sensiblement une même courbe mais en décalé, avec, du moins enrichit au plus enrichit : 1, 5, 6 et 12. Ils ont tous un R maximum pour le Sm, puis R baisse progressivement pour devenir à peu près constant à partir de Ho. Le profil est globalement enrichi en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes.

Le deuxième groupe distingué est celui des échantillons 3 et 4, représenté dans la figure 10.

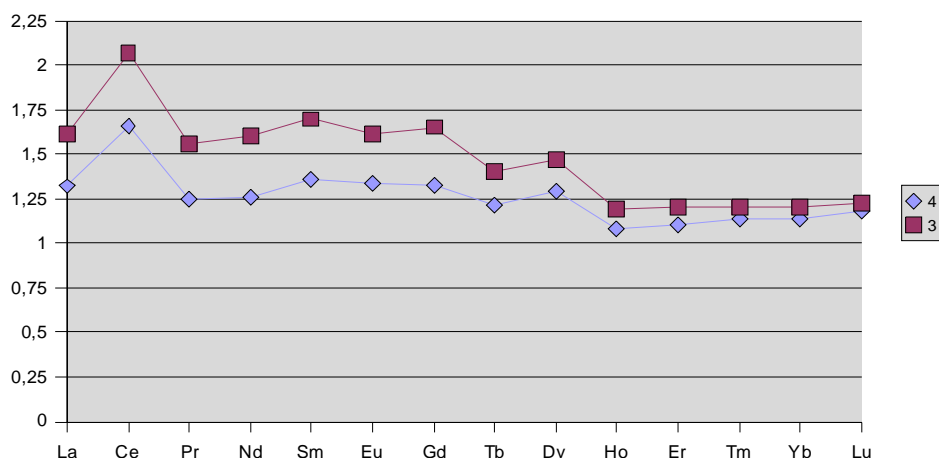


Figure 10: diagramme des terres rares normalisé à l'UCC pour les échantillons 3 et 4

Les échantillons 3 et 4 ont une valeur de R comprise entre 1 et 2. Leur courbe est décalée pour les terres rares légères mais se rejoint pour les terres rares lourdes, l'échantillon 4 étant moins

enrichit que le 3. Ils présentent un seul pic au niveau du Ce. Les autres valeurs sont globalement autour de 1,5, puis de 1 pour les terres rares lourdes. Le profil est globalement enrichi en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes. Le troisième groupe distingué est celui de tous les autres échantillons représentés dans la figure 11.

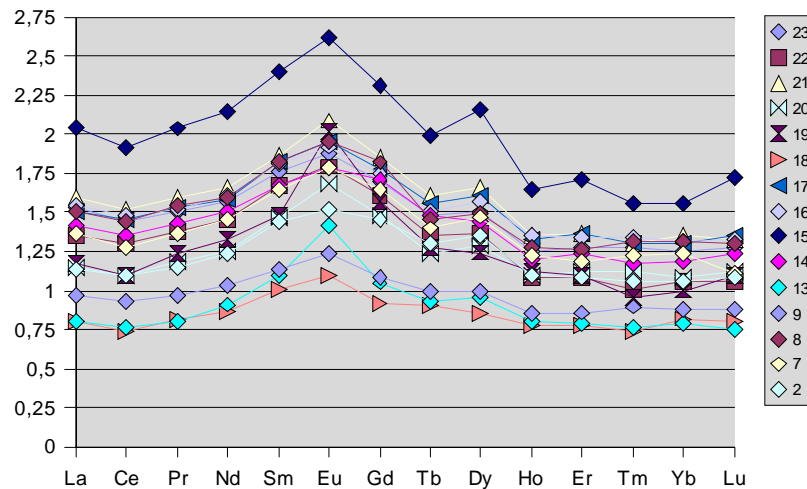


Figure 11 : spectre des terres normalisé à l'UCC pour les échantillons 2, 7, 8, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23.

Tous les autres échantillons ont une valeur de R comprise entre 0,75 et 2,75. les courbes sont très pochés, bien que les échantillons 13, 18 et 23 soient globalement moins enrichis, et l'échantillons 15 plus enrichis que les autres. Le profil est globalement enrichi en terres rares moyennes par rapport aux terres rares légères et lourdes. Tous présentent un enrichissement progressif pour les terres rares légères, avec leur maximum pour l'Eu, et un autre pic avec le Dy. Ils sont tous à peu près linéaires pour les terres rares lourdes, sauf le 7 présentant une anomalie négative en Lu et le 15 une anomalie positive en Lu par rapport à l'Yb. Les échantillons 8, 14, 17, 21 et 23, suivent cette même courbe, mais ils sont en plus tous les cinq confondus .

La figure 12 représente le diagramme des terres rares normalisé au PAAS.

REE normalisées PAAS

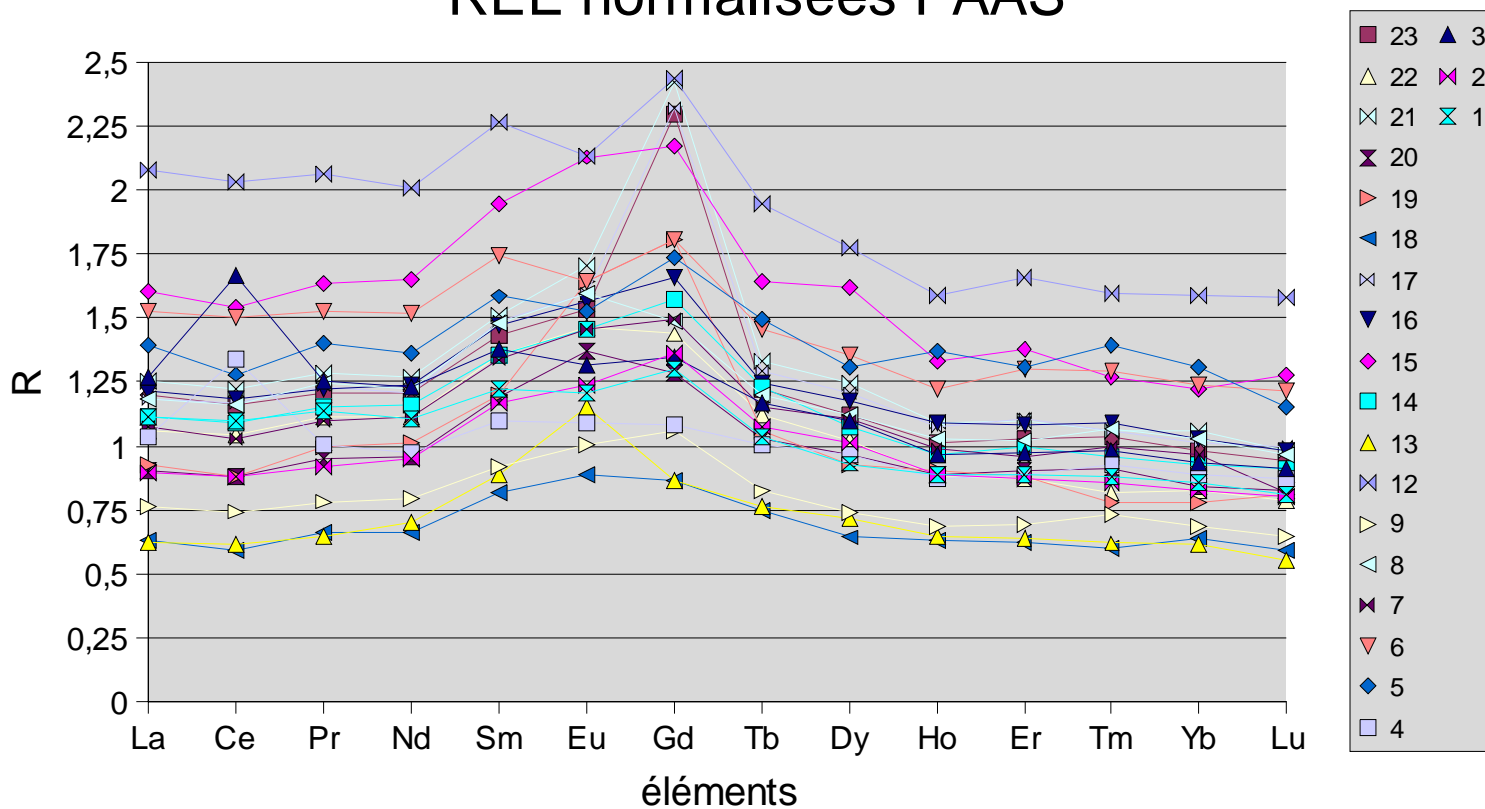


Figure 11: spectres des terres rares normalisé au PAAS

Les échantillons se regroupent de la même manière que pour la normalisation à l'UCC, mais les valeurs de R sont globalement moins élevées (elles vont de 0,5 à 2,5).

La figure 13 représente le diagramme des terres rares normalisé au Rio Solimoes:

REE normalisées Solimoès

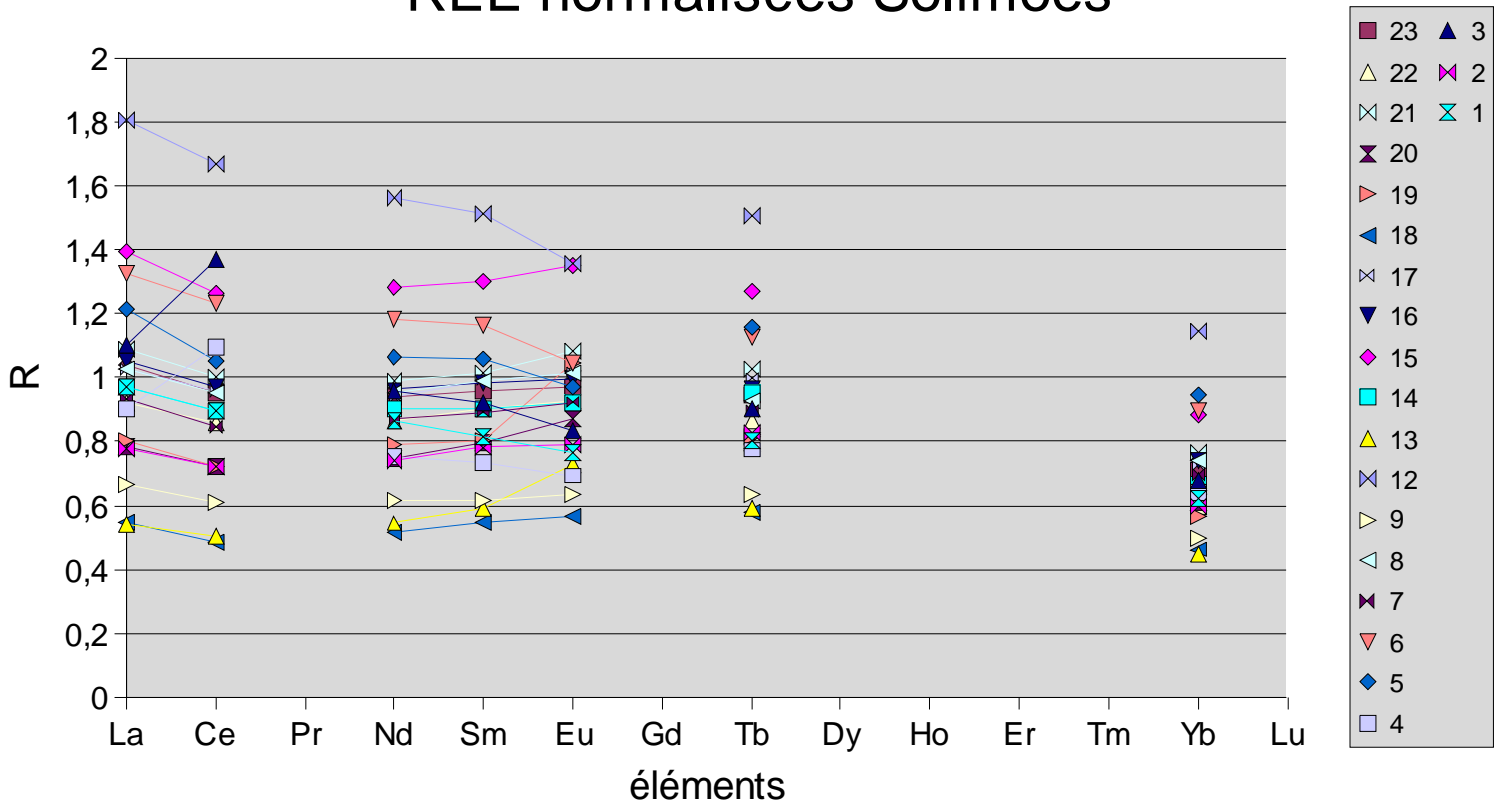


Figure 13 : spectre des terres rares normalisées au Rio Solimoès.

On ne dispose pas de toutes les valeurs des terres rares pour le Rio Solimoès. Néanmoins, on peut remarquer que les valeurs de R sont beaucoup plus proches de 1 que pour les normalisations à l'UCC et au PAAS, en effet, ces valeurs sont comprises entre 0,5 et 1,8.

Les groupes d'échantillons remarquables dans les deux diagrammes de terres rares précédents semblent toujours valables, même si le peu de données disponibles ne peut confirmer la similarité complète des courbes.

Globalement, les échantillons qui montrent le plus fort enrichissement sont les 12 et 15 et les échantillons qui montrent le plus fort appauvrissement, sont les 9, 13 et 18.

Les échantillons 1, 5, 6 et 12 ont leur R compris entre 0,6 et 1,8.

Pour les échantillons 3 et 4, il est compris entre 0,6 et 1,4.

Pour les autres échantillons, il est compris entre 0,4 et 1,4. Dans cette série d'échantillons, on remarque que l'anomalie en Eu n'est plus qu'un léger enrichissement, à part pour les échantillons 13, 19, et 21.

5. Discussion:

Les pesées des filtres effectuées avant les procédures d'analyse et d'attaque nous ont permis d'estimer grossièrement la charge en MES pour les différents échantillons. Les plus chargés sont les 3 et 4 (autour de 1g/L de MES) et ils sont environ 10 fois plus chargés que les échantillons de la zone d'inondation.

1. Minéralogie:

Les échantillons 2, 3, 4 et 8 sont les seuls à présenter une minéralogie riche en calcite, et la calcite représente le pic le plus intense pour l'échantillon 3. Les échantillons 3 et 8 sont les seuls prélevés sur la partie amont du Marañón (le 3 étant plus en amont que le 8), et les échantillons 2 et 4 proviennent tous les deux de l'Utcubamba, le premier affluent du Marañón échantillonné en partant de l'amont, qui prend sa source dans les hauteurs du plateau Andin.

Les échantillons prélevés dans la partie plus avale du Marañón ne semblent pas contenir de calcite.

Ceci semble indiquer que le Marañón et l'Utcubamba traversent sur les hauts plateaux des terrains sédimentaires riches en carbonates.

Le fait que les affluents qui confluent avec le Marañón entre les échantillon 3 et 8 ne contiennent pas de calcite semble indiquer que la présence de calcite dans l'échantillon 8 résulte des MES drainées par le Marañón depuis le point d'échantillonnage 3. Comme on n'en retrouve pas dans les échantillons prélevés sur le Marañón en aval de ce point, on peut en déduire que la calcite s'est dissoute entre le point 8 et le point 14 (eau sous saturée vis à vis de la calcite).

En effet, si on compare ces données aux concentrations en HCO_3^- dans la phase dissoute, on remarque que les échantillons 3 et 4 présentent les concentrations parmi les plus importantes pour l'ensemble des échantillons (autour de 120 ppm).

Le graphite a été retrouvé (au moins sous forme de trace) dans tous les échantillons. Il est présent plus particulièrement dans les échantillons 2, 3, 4, 5, 7, 14, 17, 20, 21 et 23.

Le graphite a essentiellement deux origines : il se trouve en grande quantité dans les terrains Carbonifères, ou alors il provient d'incendies qui laissent derrière eux de grandes étendues de résidus carbonisés. Comme seul le Marañón traverse un terrain datant du Carbonifère, il ne semble pas y avoir de lien entre la présence de graphite et la géologie, on peut donc privilégier la thèse des incendies.

Seuls les échantillons 1, 2, 3, 4, 6 et 12 contiennent peu de feldspaths, (sachant que le diffractogramme de l'échantillon 5 était très interféré et ne permet donc pas d'être sûr de l'éventuelle présence de feldspaths). Les feldspaths sont des minéraux que l'on retrouve essentiellement dans les roches magmatiques. Leur présence dans la phase particulière d'une eau est indicatrice de l'érosion d'un terrain magmatique (ou métamorphique). Or, les Rios Mayo, Utcubamba, Shiraco, Nieva et Cahuapanas (correspondant aux échantillons 1, 2 et 4, 5, 6 et 12) prennent tous leur source dans les roches sédimentaires du plateau andin, peu susceptibles de libérer du feldspaths lors de l'érosion, situées entre le Marañón et le Huallaga.

Les échantillons 7, 9, 13, et 16 (Rio Santiago, Morona, Pastaza et Huallaga) prennent leur sources dans les hauteurs des Andes (dans la zone volcanique équatorienne pour les

échantillons 7, 9 et 13, et dans les Andes boliviennes pour le 16), ce qui explique la présence de grande quantité de feldspaths en aval, compte tenu de la faible dissolution du feldspath dans les eaux naturelles.

Tous les autres affluents du Marañon contenant une fraction importante de feldspath (Rio Ungumayo, Nucuray, Uritucayu, Tigre, Ucayali) ne circulent que dans la plaine d'inondation et ne traversent aucun terrain magmatique ou métamorphique. la présence de feldspaths dans les MES serait donc un signe d'érosion de ces matériaux sédimentaires récents qui doivent contenir des feldspaths.

En ce qui concerne les échantillons prélevés sur le Marañon, ils contiennent tous du feldspath en grandes quantités à partir de l'échantillon 8. La faible quantité contenue dans l'échantillon 3 semble indiquer que les feldspaths trouvés plus en aval sur le Marañon ne proviennent pas de l'amont du fleuve mais de l'apport des affluents, en particulier le Rio Santiago qui est le premier fleuve situé en amont du point 8 qui contient du feldspath.

Ces résultats corroborent les données de Guyot et al. et de Laraque et al. indiquant que le nord du bassin amazonien subit des processus d'érosion tandis que le Sud subit des processus de sédimentation.

2. Diagramme des terres rares

Durant la production de sédiments à partir des roches cristallines, les spectres de terres rares restent très semblables. C'est pourquoi ils sont utilisés pour identifier les provenances, les sources des roches sédimentaires et des sédiments (White, 2005).

1. Anomalies en Ce

Les échantillons 3 et 4 présentent une anomalie positive en Ce. L'échantillon 4 provient du Rio Utcubamba, près de la confluence avec le Marañon, et le 3 a été échantillonné dans le Rio Marañon, mais avant sa confluence avec l'Utcubamba.

Le Ce est un élément présent naturellement à l'état Ce^{3+} , mais qui s'oxyde facilement en Ce^{4+} . Dans les sols, lors des processus d'altération et de néoformation, il peut y avoir formation de cerianites secondaires (CeO_2) en milieux oxydants (Braun et al., 1998). L'anomalie positive en Ce (typique des sols latéritiques) pourrait donc ici indiquer que le Marañon et l'Utcubamba traversent des anciens sols possédant de la cérianite et que les processus d'érosion de ses sols ont arrachés aux même titre que les autres phases minérale cette cerianite. L'échantillon 2, qui a été prélevé près de la source de l'Utcubamba, ne présente pas cette anomalie, ce qui laisse supposer que l'enrichissement en Ce de l'Utcubamba se produit entre sa source et sa confluence.

De plus les spectres de terres rares pour ces deux échantillons (3 et 4) montrent des enrichissements relatifs en terres rares légères par rapports aux terres rares lourdes. Cette particularité est en corrélation avec une origine pédologique des matériaux analysés. En effet, la mobilité des terres rares durant les processus d'altération est principalement contrôlée par les conditions d'altération (ph, présence de ligands, ...) et la stabilité des minéraux primaires porteurs des terres rares (apatite, allanite, monazite,...). Les terres rares légères ont tendance à rester dans le sol sous forme de minéraux secondaires spécifiques, notamment les phosphates de terres rares (florencite, rabdophane). En contrepartie, la fraction dissoute des eaux de drainage, elle, aura tendance à montrer un enrichissement en terres rares lourdes. Dans le cas où la phase solide du sol présente en plus, une anomalie positive en Ce, les eaux elles, vont présenter une anomalie négative en Ce dans la fraction dissoute. Dans le cas présent, on

observe effectivement ce type de spectre pour la fraction dissoute de l'échantillon 4 suggérant un mécanisme d'altération actuel) (communication personnelle de Patrick Seyler). Il serait donc intéressant de faire une étude pédologique plus approfondie sur cette zone particulière.

2. Anomalies en Eu et Dy

Les échantillons 2,7,8,9,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23 présentent une anomalie positive en Eu, ainsi qu'une autre anomalie positive moins importante en Dy quand ils sont normalisés à l'UCC et au PAAS. Quand ils sont normalisés au Rio Solimoes, seuls les échantillons 13, 19 et 21 présentent encore une forte anomalie en Eu.

Les feldspaths plagioclases peuvent présenter facilement des substitutions de Eu^{2+} à la place du Ca^{2+} . En effet, l' Eu^{3+} peut se réduire en Eu^{2+} lorsque les conditions de fugacité en oxygène en profondeur sont basses. Par conséquent, si l'eau traverse des terrains riches en plagioclases formés à des conditions de fugacité en oxygène basse, les particules en suspension érodées présenteront des anomalies positives en Eu. (White 2005)

Par ailleurs, on remarque que tous les échantillons (1, 3, 4, 5, 6 et 12) ne présentant pas cette anomalie ne contiennent pas de plagioclases, ce qui confirme le lien entre l'anomalie en Eu et la présence de feldspaths.

parmi ces échantillons, les 8, 14, 17, 21 et 23, qui sont confondus, ont tous été prélevés sur le Marañón. Le premier échantillon prélevé sur le Marañón, le 3, ne présente pas les mêmes caractéristiques. C'est l'échantillon qui a été prélevé le plus en amont, dans la zone Sud du bassin amazonien plus sujette à la sédimentation, et qui ne présentait donc pas une grande quantité de feldspaths. Le Marañón serait donc enrichi en Eu, (et donc en feldspaths) par après sa confluence avec le Santiago, qui aurait donc une grande influence géochimique sur le Marañón.

3. anomalies en Sm

Les échantillons 1, 5, 6 et 12 présentent un seul pic en Sm. Ils ont tous été prélevés sur des affluents du Marañón prenant leur source au Sud du Marañón, et plus particulièrement à l'Ouest du Huallaga. Néanmoins, l'Ucubamba possède les mêmes particularités géographiques mais pas le même enrichissement en Sm. On remarque tout de même qu'il est très enrichi en Sm par rapport au Nd, même si l'Eu est plus important que le Sm.

3. Facteurs d'enrichissement

On remarque que quelle que soit la normalisation choisie, les échantillons sont globalement appauvris par rapport à la référence utilisée. Deux anomalies ressortent particulièrement : les anomalies en Cd quand les échantillons sont normalisés à l'UCC, et l'anomalie en Rb quand les échantillons sont normalisés au Rio Solimoes.

L'anomalie en Cd remarquée sur le diagramme normalisé à l'UCC (les données de références en Cd ne sont pas disponibles pour le PAAS et le Rio Solimoes) étant relative à tous les prélèvements, ne peut être associée uniquement à des phénomènes anthropiques ponctuels. Par ailleurs, elle ne semble pas non plus avoir une logique géographique. Le Pérou est un pays très riche en ressources minières, et entre autres en Cd, ce qui pourrait expliquer la richesse naturelle des eaux en Cd dans l'ensemble du bassin hydrologique (3^o exportateur de Cd du continent Américain. Bureau mondial des statistiques sur les métaux, 1991). Le Cd peut être aussi libéré dans l'atmosphère lors d'émissions naturelles (volcanisme). On estime à mille tonnes par an le Cd d'origine naturelle dans l'atmosphère (Nriagu and Pacyna, 1988)

De plus, à la richesse naturelle en Cd s'ajoute le Cd d'origine anthropique lié aux épandages d'engrais azotés.

Il est dommage de ne pas disposer de la donnée de référence en Cd du Rio Solimoes afin de pouvoir comparer les teneurs en Cd de ces deux parties distinctes du bassin Amazonien.

La normalisation au Rio Solimoes, en tant qu'affluent de l'Amazone, est censée être la plus proche de nos échantillons, en terme de concentration d'éléments. Mais quand on normalise au Rio Solimoes, les échantillons présentent une très forte anomalie en Rb, qui n'est pas présente avec les normalisations à l'UCC et au PAAS. Le Rb peut se substituer au K, en particulier dans les feldspaths potassiques, les micas et les feldspathoïdes, c'est à dire des minéraux magmatiques et volcaniques. Du fait de leur proximité avec la zone andine, toutes les eaux échantillonnées sont susceptibles de traverser des terrains contenant des minéraux secondaires d'altération tels que les micas, même s'ils ne contiennent pas de minéraux primaires tels que les feldspaths et les feldspathoïdes. Ceci expliquerait cet enrichissement en Rb par rapport au Rio Solimoes qui est situé beaucoup plus à l'Est des Andes et qui draine donc des terrains beaucoup moins riches en minéraux secondaires d'altération et en minéraux primaires.

6. Conclusion:

L'analyse minéralogique et géochimique de la matière en suspension prélevée dans le Marañon et ses affluents, permet donc de délimiter des zones influencées par des processus distincts et des terrains particuliers.

Une zone présentant des caractéristiques de processus de sédimentation s'étendrait entre le Marañon et le Cahuapanas. En effet, les échantillons prélevés sur le Rio Mayo, le Rio Shiraco, le Rio Nieva et le Rio Cahuapanas, qui prennent tous leur source dans les terrains sédimentaires situés sur le plateau Andin, présentent un même spectre de terres rares caractérisé par l'absence de pic en Eu, précédemment relié à l'absence de feldspaths dans les terrains traversés. Comme ce bassin est situé juste au dessous des Andes, le fait qu'il ne contienne pas de minéraux indicateurs de magmatisme indique que ces minéraux ont été stoppés lors de leur transport après érosion par des processus de sédimentation intenses. Ceci semble être corrélé avec l'étude de Guyot et al. 1996, qui relie de larges processus de sédimentation au sud du bassin amazonien.

Une zone présentant des caractéristiques de processus d'érosion des matériaux de la plaine d'inondation (matériaux déposés par des processus anciens d'érosion et de transport) s'étendrait au Nord du Marañon, entre le Rio Santiago et le Rio Tigre. En effet, tous les affluents prenant leur source dans cette zone (Rio Santiago, Morona, Pastaza, Ungumayo, Nucuray, Urituyacu) ainsi que le Rio Huallaga et Ucayali (qui prennent leur source au Sud du Marañon, mais dans les hauteurs des plateaux Andins), présentent les mêmes caractéristiques, c'est-à-dire une présence de feldspaths corrélée à un pic en Eu sur le diagramme des terres rares. Or, si la présence de feldspath est naturelle dans les eaux traversant des terrains magmatiques ou volcaniques (Rio Pastaza, Morona, Santiago, et Huallaga), elle est indicatrice d'érosion de feldspaths anciennement déposés pour les eaux qui ne traversent que des terrains sédimentaires (Rio Tigre, Ungumayo, Nurucay et Uritucayu). Ceci semble être corrélé avec l'étude de Laraque et al., qui relie de larges processus d'érosion au Nord du bassin Amazonien.

Une zone présentant des caractéristiques dynamiques d'érosion s'étendrait en amont du Marañón, et affecterait géochimiquement les échantillons prélevés sur l'amont du Marañón et sur l'Utcubamba. En effet, ce sont les seuls cours d'eau à contenir de la calcite, et le fait qu'elle ne soit pas encore dissoute indique une érosion récente. De plus, le Marañón près de sa source et l'Utcubamba près de sa confluence partagent le même spectre de terres rares, avec une anomalie en Ce évoquant la traversée de sols latéritiques. Un climat particulièrement chaud et humide sur cette zone précise (condition de la pédogénèse des sols latéritiques) viendrait compléter le fonctionnement isolé de cette zone d'étude.

Le Marañón, dès qu'il quitte le plateau Andin, semble peu influencé par ses affluents et montre des caractéristiques minéralogiques et géochimiques propres à lui, mais il présente en aval les mêmes caractéristiques globales que les affluents de la zone d'inondation (enrichissement en Eu par le biais du Rio Santiago).

Les résultats de ce travail sont donc cohérents avec les publications antérieures, mais soulèvent des questions pour lesquelles il faudrait réaliser des études supplémentaires.

Par exemple, pour pouvoir mieux comprendre l'origine de l'anomalie en Sm, il faudrait réaliser une deuxième série de prélèvements, afin de vérifier que cette anomalie n'est pas due à des artefacts, et effectuer des analyses de prélèvements de roches de la zone, pour voir si elles présentent également cette anomalie.

On pourrait également approfondir les recherches sur l'Utcubamba et le Marañón en faisant des analyses sur les sols de cette zone, ou en corrélant nos données à la paléoclimatologie du Pérou.

Bibliographie:

- Barroux G., 2006.** Etude biogéochimique d'un système lacustre de la plaine d'inondation amazonienne. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse III.
- Braun J.J., Viers J., Dupré B., Polvé M., Ndan J., Muller J.P., 1998.** Solid/liquid REE fractionation in the laterite system of Goyoum (east Cameroun). Implication for the present dynamic of the pedological covers under the most tropical region. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 62, 273-279.
- Espinoza Villar J-C., Fraizy P., Guyot J-L., Ordonez Galvez J-J., Pombosa R., Ronchail J., 2006.** La variabilité des débits du Rio Amazonas au Perou. *Climate variability and change*, IAHS Publ., 308.
- Gaillardet J., Dupré B., Allègre Claude J., Négrel P., 1997.** Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. *Chemical Geology*, 142, 141-173.
- Guyot J-L., Jouanneau J.M., Soares L., Boaventura Resende G., Maillet N., Lagane C.. Clay,** mineral composition of river sediments in the Amazon Basin, soumis.
- Rodaz M., Viers J., Brusset S., Baby P., Boucayrand C., Hérail G., 2005.** Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: Insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments. *Chemical Geology*, 226, 31-65
- Taylor and MacLennan, 1885.** The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- White W. M., 2005.** Geochemistry. Chapter 7. pp258-pp312