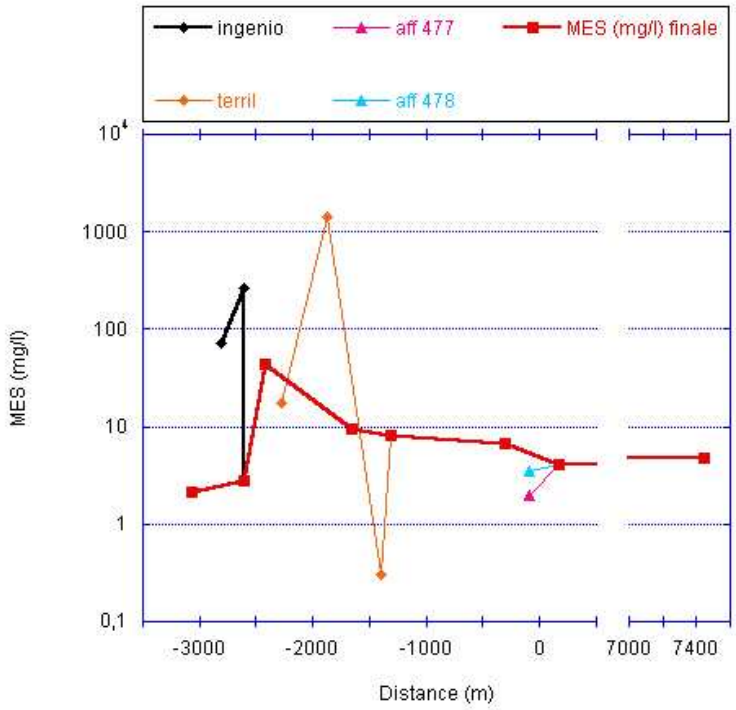
Ludivine Guislain
Etudiante-ingénieur Ecole des Mines d'Alès, France
Stagiaire IRD La Paz, Bolivie

Tuteur : Marc Roulet, chercheur IRD Bolivie

RAPPORT

Evolution de la Matière en Suspension
Filtres recueillis lors de la mission d'échantillonnage
À la mine Bolsa Negra, du 5 au 12 Mars 2006



La Paz - Bolivie

Année universitaire 2005-2006

Sommaire

Sommaire 2

Introduction 3

NOTA 3

I. Eléments analysés 4

II. Première approche quantitative 5

III. Evolution géographique et temporelle des éléments 8

IV. Comparaison des éléments rencontrés dans les MES avec les minéraux présents dans l'environnement géologique de la mine Bolsa Negra. 26

Conclusion 27

NOTA

L'utilisation du terme 'absent' ou 'non présent' ou tout autre synonyme se réfère en réalité à une absence de détection, qui n'est pas synonyme d'une absence totale de l'élément.
En annexe figure une photo de chaque filtre accompagnée d'un diagramme camembert montrant la proportion des principaux éléments. Les filtres sont présentés dans l'ordre de leur distribution géographique. Ceci permet ainsi d'évaluer qualitativement l'évolution de la Matière en Suspension (MES), notamment en fonction des changements de coloration.
Tous les graphes ont été élaborés avec le logiciel KaleidaGraph. Les bases de données ont été traitées sous Excel.
Il convient de lire ce rapport en parallèle avec le 1er concernant la mine Bolsa Negra afin de situer les différents points d'échantillonnages. En effet, les informations données dans le rapport cité ne seront pas répétées ici.
Le terme minier espagnol 'ingenio' se traduit par usine de concentration du minerai. Il est utilisé ici par commodité et désigne non pas une usine véritable mais plutôt un petit atelier artisanal ou se concentre le minerai.

Introduction

Les Matières en Suspension récoltées par filtration lors de la mission d'échantillonnage de la mine Bolsa Negra qui prit place au mois de mars 2006 ont été analysés par ICPMS en laboratoire. Cette analyse a permis de dégager 12 éléments principaux qui mettent en évidence l'influence de la mine sur le milieu naturel.
Nous présenterons dans un 1er temps la démarche de sélection de ces 12 éléments principaux puis nous représenterons leur évolution dans l'espace. Enfin, nous terminerons par une petite discussion en fonction des minéraux présents dans la région.

I. Eléments analysés

La digestion des filtres a permis l'analyse de 50 éléments. Le tableau I présente l'ensemble des éléments analysés triés par ordre croissant de densité. On notera l'absence du Silicium, du Bore, du Chlore, de l'Or et du Brome.

Densité	Eléments	Symbole
0,53	Lithium	**Li**
0,86	Potassium	**K**
0,97	Sodium	**Na**
1,55	Calcium	**Ca**
1,63	Rubidium	**Rb**
1,74	Magnésium	**Mg**
1,82	Phosphore	**P**
1,85	Berryllium	**Be**
1,87	Césium	**Cs**
2,07	Soufre	**S**
2,54	Strontium	**Sr**
2,7	Aluminum	**Al**
2,99	Scandium	**Sc**
3,59	Baryum	**Ba**
4,47	Yttrium	**Y**
4,54	Titane	**Ti**
4,79	Sélénium	**Se**
5,32	Germanium	**Ge**
5,72	Arsenic	**As**
5,91	Gallium	**Ga**
6,11	Vanadium	**V**
6,15	Lanthane	**La**
6,24	Tellure	**Te**
6,51	Zirconium	**Zr**
6,68	Antimoine	**Sb**

Densité	Eléments	Symbole
6,77	Ceryum	**Ce**
6,9	Ytterbium	**Yb**
7,13	Zinc	**Zn**
7,19	Chrome	**Cr**
7,31	Indium	**In**
7,31	Etain	**Sn**
7,43	Manganèse	**Mn**
7,87	Fer	**Fe**
8,23	Terbium	**Tb**
8,57	Niobium	**Nb**
8,65	Cadmium	**Cd**
8,9	Cobalt	**Co**
8,9	Nickel	**Ni**
8,96	Cuivre	**Cu**
9,75	Bismuth	**Bi**
9,84	Lutetium	**Lu**
10,22	Molybdène	**Mo**
10,5	Argent	**Ag**
11,35	Plomb	**Pb**
11,72	Thorium	**Th**
11,85	Thallium	**Tl**
13,31	Hafnium	**Hf**
16,65	Tantale	**Ta**
18,95	Uranium	**U**
19,35	Tungstène	**W**

Tableau I – Liste des éléments analysés rangés par ordre croissant de densité
(Source : www.lenntech.com modifié)

Parmi tous ces éléments, une partie seulement est considérée comme appartenant à la catégorie des métaux lourds. La définition de métaux lourds varie suivant les auteurs. En effet, on peut considéré comme métaux lourds tout élément de densité supérieure à 4 ou à 5, soit depuis l'Yttrium ou le Germanium dans le tableau I. L'Aluminium ne rentre ainsi donc pas dans la catégorie, bien que ce soir un élément toxique. L'Arsenic, bien que toxique, n'est pas un métal. Une autre définition englobe tous les éléments compris entre le Cuivre et le Plomb dans le Tableau de la Classification Périodique des Eléments (TCPE). Ainsi, le Bismuth, malgré sa densité élevée, n'est pas considéré comme un métal lourd, le Cobalt et le Nickel non plus. Le Chrome non plus alors que celui-ci peut être hautement toxique suivant son degré d'oxydation. Une autre encore considère tous les éléments métalliques à partir de la 4ème colonne du TCPE. Cette classification ne prend

donc pas en compte les éléments de la 3ème colonne incluant le groupe des Lanthanides et des Actinides. Elle laisse également un doute sur les métalloïdes dont fait partie le Plomb. Notons que les métaux lourds considérés comme les plus toxiques sont le Mercure, le Plomb et le Cadmium. Le Mercure est hors du cadre de cette étude.

Aucune des définitions n'est donc réellement satisfaisante. L'utilisation du terme « éléments traces » est une solution alternative mais n'est pas tout à fait satisfaisante non plus. En effet, certains éléments, comme le Fer par exemple, se trouvent en concentration telle qu'on ne peut plus parler de traces.

Nous ne ferons donc pas de classement dans le présent rapport. Les éléments seront traités en fonction de leur importance dans les Matières En Suspension (MES) concernant le cas particulier de la mine Bolsa Negra, indépendamment de leur caractère de « Traces » ou de « Lourds ». Néanmoins, un petit commentaire particulier sera fait si nécessaire.

II. Première approche quantitative

1) Critique des filtres

Avant de se lancer dans une description détaillée de l'évolution des MES, il convient d'être critique vis-à-vis des résultats obtenus. Le tableau II présente les filtres par ordre croissant de poids de MES contenu, la concentration en MES en mg/l associée, au nombre total d'éléments rencontrés supérieurs au seuil de détection et à la concentration totale de ces éléments en mg/g.

Filtre	Poids de matière (g)	Remarques sur la filtration et la pesée	[MES] (mg/l)	Nombre d'éléments	C totale (mg/g)
BNP011	0,0002	eau très limpide, très peu de MES	0,10	8	1577,2500
BNP054	0,0012		2,00	10	91,3083
BNP016	0,0013		2,17	10	312,3231
BNP040	0,0015		2,50	9	538,2667
BNP002	0,0016		2,67	7	379,4375
BNP013	0,0017		1,70	12	415,1765
BNP051	0,0021		3,50	13	197,3905
BNP034	0,0022		2,75	16	321,5227
BNP060	0,0025	Pertes par électrostatisme lors de la pesée finale	4,17	14	489,2120
BNP064	0,0041		6,83	10	563,1439
BNP057	0,0043		7,17	18	261,7186
BNP008	0,0048	impossible de récupérer toute les MES, remonte sur les bords de l'appareil de filtration	8,00	12	501,8396
BNP006	0,0052	Dépôt légèrement endommagé sur le bord en refermant la boîte	8,67	12	463,6538
BNP019	0,0054		9,00	14	521,8185

BNP022	0,0056	impossible de récupérer toute les MES, remonte sur les bords de l'appareil de filtration	9,33	16	520,1339
BNP043	0,0107		17,83	12	472,5271
BNP001	0,0108	très peu de MES d'où un seul filtre, MES ppt rapidement, MES se décollent du filtre sec, apparemment pas de pertes	5,40	24	218,5694
BNP028	0,026	endommagé le dépôt avec la pince, reposé sur le bord	43,33	16	386,1696
BNP036	0,0438	Pertes par électrostatisme lors de la pesée finale	73,00	11	359,1879
BNP031	0,1599	filtre apparemment bien mis mais particules sur le porte filtre. Légèrement endommagé avec la pince. Pertes par électrostatisme lors de la pesée finale	266,50	24	268,0210
BNP050	0,5594	Bord légèrement endommagé	1398,50	47	208,9450

Tableau II – Récapitulatif des filtres, poids de MES, éléments détectés, concentration totale de ces éléments.

A partir du filtre BNP 051, le poids de matière est supérieure à 0,0020 g et la détection suivant la digestion du filtre est supposée raisonnable. Le nombre d'éléments détectés est dans tous les cas supérieurs à 10. Les 5 filtres dont la masse de MES est comprise entre 0,0010 et 0,0020 g présente déjà un doute plus grand. Les concentration en MES dans l'eau sont assez faibles, inférieure à 3 mg/l. L'incertitude est donc très grande sur les concentrations observées. Le cas le plus problématique est le filtre BNP 011. Son poids de MES est très faible, mais ceci s'explique par la limpidité de l'eau et une concentration de 0,10 mg de MES par litre d'eau. Néanmoins, 8 éléments sont détectés par la digestion et la concentration totale d'éléments en mg/g est très élevée. L'incertitude sur cette valeur est encore plus élevée, mais la non connaissance des incertitudes sur les données fournies par le laboratoire d'analyse ne permet pas de conclure fermement. Par sécurité, il convient donc de considérer avec recul ces valeurs.

Lors de la pesée de la matière sèche, il a été observé dans de nombreux cas une perte de matière par éléctrostatisme. La concentration des MES en mg/l est donc sous-estimée.
La mesure de la concentration des éléments en mg/g correspond bien au poids mesuré, mais celle-ci reportée en mg/l est donc sous-estimée également. Les filtres dont la concentration en MES en mg/l a été modifiée sont BNP011, BNP013, BNP054 et BNP057. Pour les 3 1ers filtres, la concentration en élément en mg/l est augmentée, elle double même pour le BNP054. En revanche, pour le BNP057, les concentrations diminuent. Le choix de la valeur à garder pour ces 4 filtres a fait l'objet d'un autre rapport. Nous rappellerons ici seulement les conclusions :
- valeur corrigée pour le BNP013
- valeur corrigée pour le BNP011
- valeur non corrigée pour le BNP054
- valeur corrigée pour le BNP057

2) Sélection des éléments

Des 50 éléments analysés, seul le Ta n'a été retrouvé dans aucun filtre.

Le filtre BNP059 contient tous les éléments sauf Ni et Cd. 17 des 50 éléments ne se trouvent que dans le filtre BNP050. Ce filtre correspond à l'aval du terril supérieur associé à la galerie principale. L'eau était très chargée et présentait une couleur orange bien marquée. Néanmoins, ces résultats sont directement liés au fait que ce filtre était le plus chargé et présentait le poids de MES de loin le plus élevé, 0,5594 g. Les éléments concernés sont Ba, Ca, Li, Mg, Na, Sr, Ti, Be, Ge, Hf, In, Lu, Nb, Se, Tb, Tl, Yb.
Pour Be, Ge, Hf, In, Lu, Nb, Se, Tb, Tl, Yb, les concentrations sont très faibles, de l'ordre du µg/g ou moins. Nous ne reviendrons donc pas sur ses éléments par la suite.

Les concentrations les plus importantes, supérieures à 100 mg/g sont obtenues pour l'Al et le Fe. Un seul filtre ne contient pas de Fer, le BNP054, concernant un des 2 affluents en aval du pont de Tres Rios. Le Fer est très élevé dans tous les autres filtres, de 76,9 mg/g à 1500 mg/g. Il représente en moyenne 67 % des éléments détectés. En annexe figurent les graphes camemberts des proportions relatives des éléments dans chaque filtre. Le Fer apparaît nettement comme élément majoritaire, suivi de près par l'Aluminium.

L'Aluminium est seulement absent de 5 filtres, BNP002, BNP011, BNP036, BNP040 et BNP 043. Dans les autres, il présente des concentrations s'étalant entre 1,2 et 235 mg/g.

Il n'y a pas d'autre élément qui présente une concentration supérieure à 100 mg/g dans aucun filtre.

Seuls 12 éléments présentent une évolution suffisamment suivie ou des concentrations suffisantes pour être traités complètement par la suite. Ces éléments sont Aluminium (Al), Cuivre (Cu), Fer (Fe), Soufre (S), Zinc (Zn), Argent (Ag), Arsenic (As), Bismuth (Bi), Cérium (Ce), Rubidium (Rb) et Tungstène (W).

Nous dirons néanmoins quelques mots sur certains autres éléments d'intérêt géochimique ou pour l'impact sur l'homme et l'environnement.

Le Cobalt ne se retrouve qu'en bas du terril de l'ingenio ou en bas du terril inférieur. Sur le cours d'eau principal, des traces sont détectées avant le terril inférieur et au niveau du pont de Tres Rios de nuit. La présence de Cobalt dans l'affluent 478 étant du même ordre de grandeur que dans les 2 terrils, nous pouvons nous poser la question de la présence de mines (abandonnées ?) en amont de ce cours d'eau. Le Cobalt disparaît néanmoins vers l'aval.
Le Gallium suit la même distribution que celle du Cobalt sauf qu'il est absent de l'affluent 478.

Le Scandium ne se retrouve que dans les terrils et pas dans le cours d'eau principal. Des traces sont détectées au pont de Tres Rios de nuit. Son utilisation comme marqueur géochimique n'est donc pas possible.

Le Chrome, qui est un élément hautement toxique sous certaines formes, ne sera pas traité car les peu de fois ou il est détecté dans les filtres, sa concentration est juste égale à la limite de détection de la technique d'analyse utilisée, sauf dans le filtre BNP050, le plus chargé.
Même remarque pour le Thorium qui dépasse guère la limite de détection.

Le Potassium ne sera pas traité non plus. Lorsqu'il est présent, il l'est en quantité importante, mais sa détection est très sporadique, quelques points sans liens apparents. De toutes manières, ce n'est pas un élément de préoccupation.

Le Plomb qui est un métal lourd hautement toxique est peu présent et son évolution n'est pas suivie. Il n'est pas présent à la source mais il est détecté en amont du terril de l'ingenio. Il est évidemment présent dans les terrils de l'ingenio et supérieur mais pas dans le terril inférieur. Il n'apparaît pas à l'aval des terrils dans le cours d'eau principal mais est présent de façon surprenante dans les 2 affluents. Il n'est pas détecté en aval de la triple confluence mais réapparaît à 7,5 kms en aval.

Les graphes suivant concernent l'évolution des MES dans le cours d'eau principal et ses affluents. Les 3 filtres en relation avec la galerie abandonnée, le haut du terril supérieur et la résurgence en aval de ce même terril seront traités séparément. Il s'agit des filtres BNP040, BNP002 et BNP001.
Les valeurs retenues pour les 2 points suivis dans le temps sont :

- la valeur de jour pour la source
- la valeur du dernier jour pour le pont de Tres Rios

Seuls les éléments présentant un intérêt particulier dans le cas étudié sont présentés.
12 éléments sont étudiés ici. Dans 17 filtres sur 21, ces 12 éléments représentent plus de 99 % de la masse totale des éléments analysés. Dans les 4 autres, ils représentent plus de 85 %.

III. Evolution géographique et temporelle des éléments

1) Variations temporelles

a) Variations temporelles à la source

La source a été échantillonnée de jour et de nuit pour mettre en évidence d'éventuelle variation diale.
Seuls 14 éléments sont présents, entre le jour et la nuit, en sortie du lac. Les principaux éléments absents sont : Ba, Ca, Cu, Li, Mg, Mn, Na, P, S, Sr, Ti, Zr, Ag, Cd, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn et W.
Un certain nombre d'éléments sont présents la nuit et absents le jour : K, Co, Ga et Sc. Ni et Cr ne sont en revanche présents que le jour.

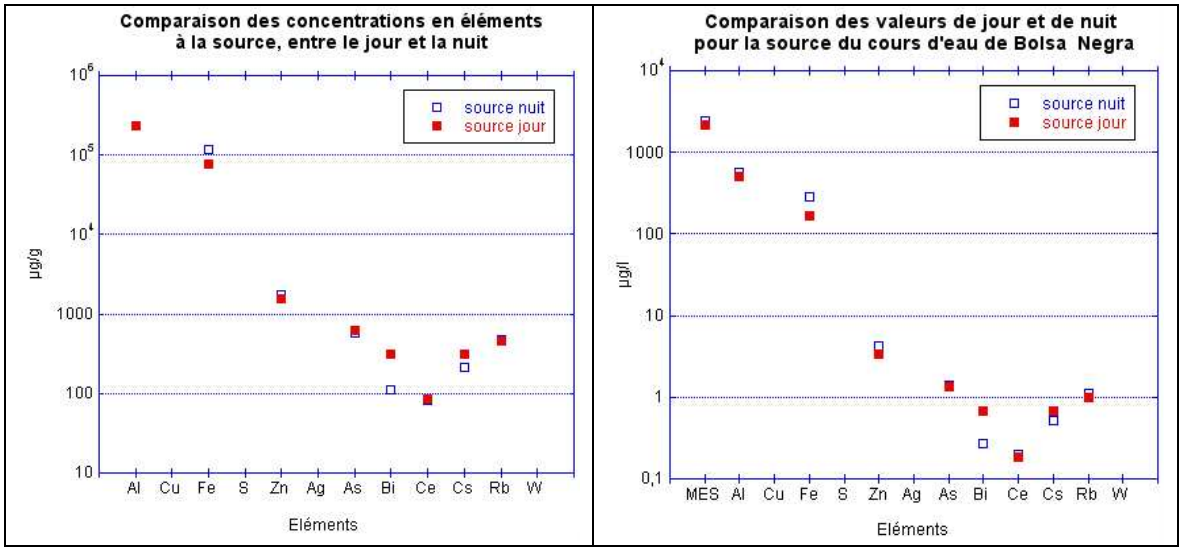


Figure 1 – Variation diale à la source du cours d'eau principal

Le graphe de la figure 1 représente les variations des 12 éléments sélectionnés. Un léger enrichissement nocturne se fait sentir pour le Fer. Dans le cas du Zinc et du Rubidium, les valeurs sont trop proches de celle du jour pour que la variation soit significative. En revanche, il semblerait que le Bismuth soit plus présent le jour, tout comme le Césium. Les autres éléments ne montrent pas de variations.
Les mêmes variations sont accentuées ou diminuées lorsque l'on passe en concentration volumiques. En effet, on note sur la figure de droite une très légère augmentation de la matière en suspension la nuit. Malheureusement, l'amplitude de cette variation n'est pas suffisante pour que l'on puisse la considérer comme significative.
On notera que l'Aluminium et le Fer sont déjà très présents à la sortie du lac considérée comme la source du cours d'eau de Bolsa Negra.

b) Variations temporelles au pont de Tres Rios

Le pont de Tres Rios a été pris comme point de référence. Il a été échantillonné le 1er jour de la mission et le dernier jour, soir j+7. Un échantillon nocturne a également été prélevé.

Lors de son passage sous le pont de Tres Rios, le cours d'eau a reçu toutes les eaux provenant de la mine. Sur tous les éléments analysés, seuls 14 ont été détectés dans les filtres du pont de Tres Rios. Parmi les éléments les plus importants, nous noterons l'absence de : Ba, Ca, Cr, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, P, Sr, Ti, Zr, Cd, Co, Nb, Pb, Sb, Sn. Seuls Cr, K, Ni et Co étaient présent à la source, les autres étaient absents également.

Le Cuivre et le Molybdène ne sont présents que dans le filtre nocturne. Par contre, il n'y a aucun élément présent le jour qui est absent la nuit.

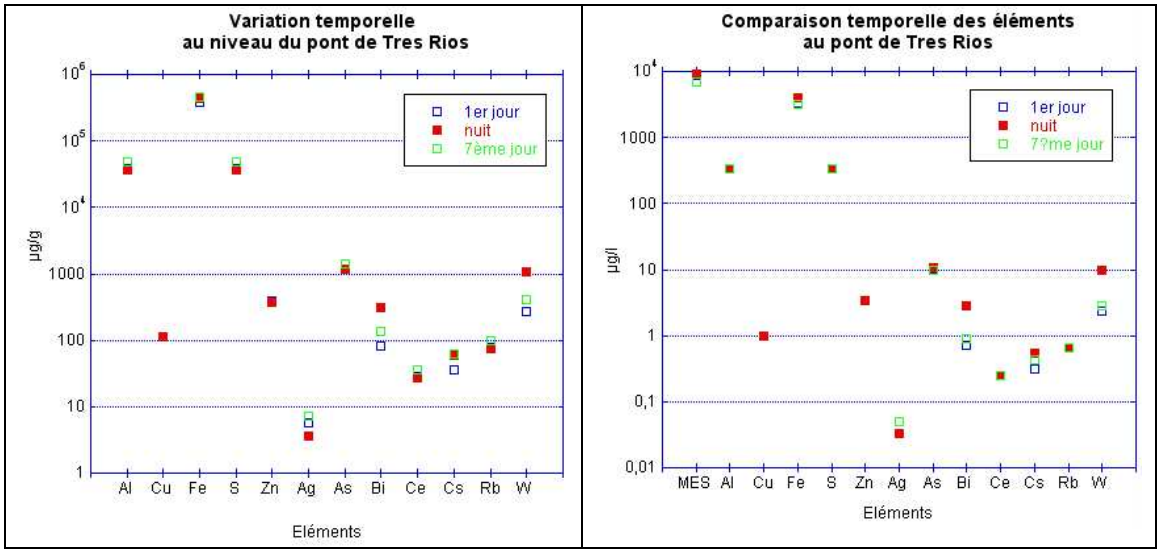


Figure 2 – Variation temporelle au pont de Tres Rios

D'une manière générale, on observe une augmentation des concentrations entre le 1er et le 7ème jour (figure 2). En revanche, de façon surprenante, deux éléments détectés le 1er jour sont absents le dernier : Zinc et Thorium. Les augmentations observées sont toutefois assez légères.
En revanche, l'enrichissement nocturne en Tungstène et en Bismuth semble assez significatif. Tout comme la baisse de l'Argent la nuit.

Si l'on s'intéresse à la MES en général, il n'y a pas de variation significative. La valeur du 7ème jour semble plus faible que le 1er, sans toutefois s'en éloigner beaucoup. La valeur nocturne est identique à celle du 1er jour.

2) Evolutions géographiques des Eléments

a) Evolution géographique sur le cours d'eau principal

La figure 3 présente l'évolution de la matière en suspension, de la source à 7,5 kms en aval du village de Tres Rios.

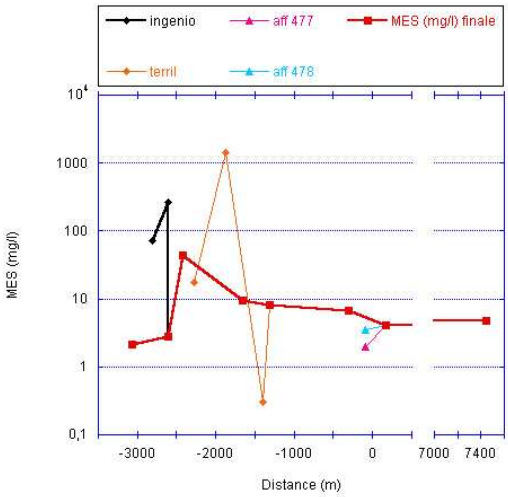
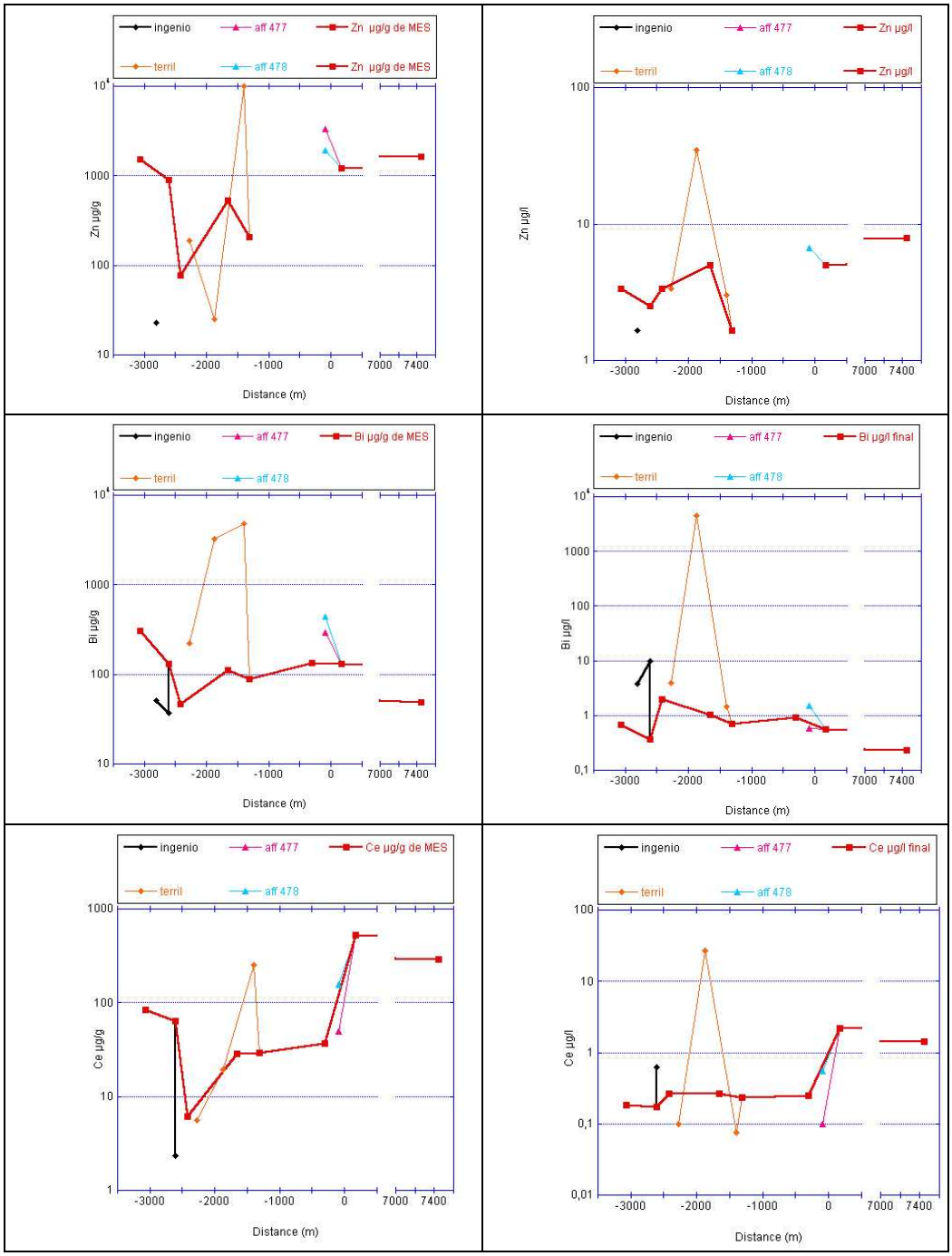


Figure 3 – Evolution géographique de la Matière en Suspension sur le cours d'eau principal et ses principaux affluents

Les MES augmentent légèrement et naturellement de la source à l'amont du terril de l'ingenio. Elles augmentent ensuite fortement suite à la contribution de l'effluent de l'ingenio qui se charge de plus en plus au fur et à mesure qu'il traverse le terril. Les MES rediminuent ensuite, de l'aval du terril de l'ingenio à l'amont du terril inférieur et continuent à diminuer jusqu'au pont de Tres Rios. En effet, si l'effluent de la galerie principale se charge fortement à la traversée du terril supérieur, il se décharge encore plus à la traversée du terril inférieur de manière à ce que celui-ci se jette presque limpide dans le cours d'eau principal. Cette évolution dans le terril s'explique par une forte pente dans le terril supérieur, donc un transport des particules sortant de la mine et un arrachage des particules présentes dans le terril, et une pente très faible dans le terril inférieur qui permet un dépôt rapide, notamment des éléments les plus lourds.
Les deux affluents sont moins chargés que le cours d'eau de Bolsa Negra et la résultante en aval de la triple confluence est ne diminution de la turbidité. Néanmoins, du fait des nombreux autres affluents et ainsi de l'augmentation du débit et de la force du courant, les MES réaugmentent légèrement vers 7,5 kms en aval.

Les graphes suivants représentent les évolutions géographiques des 12 éléments d'importance majeure dans le cas de la mine Bolsa Negra. Ils sont regroupés en fonction des similitudes dans leur comportement.


ingenio
aff 477
Zn µg/g de MES
terril
aff 478
Zn µg/g de MES
Zn µg/g
Distance (m)
ingenio
aff 477
Zn µg/l
terril
aff 478
Zn µg/l
Zn µg/l
Distance (m)
ingenio
aff 477
Bi µg/g de MES
terril
aff 478
Bi µg/g
Distance (m)
ingenio
aff 477
Bi µg/l final
terril
aff 478
Bi µg/l
Distance (m)
ingenio
aff 477
Ce µg/g de MES
terril
aff 478
Ce µg/g
Distance (m)
ingenio
aff 477
Ce µg/l final
terril
aff 478
Ce µg/l
Distance (m)

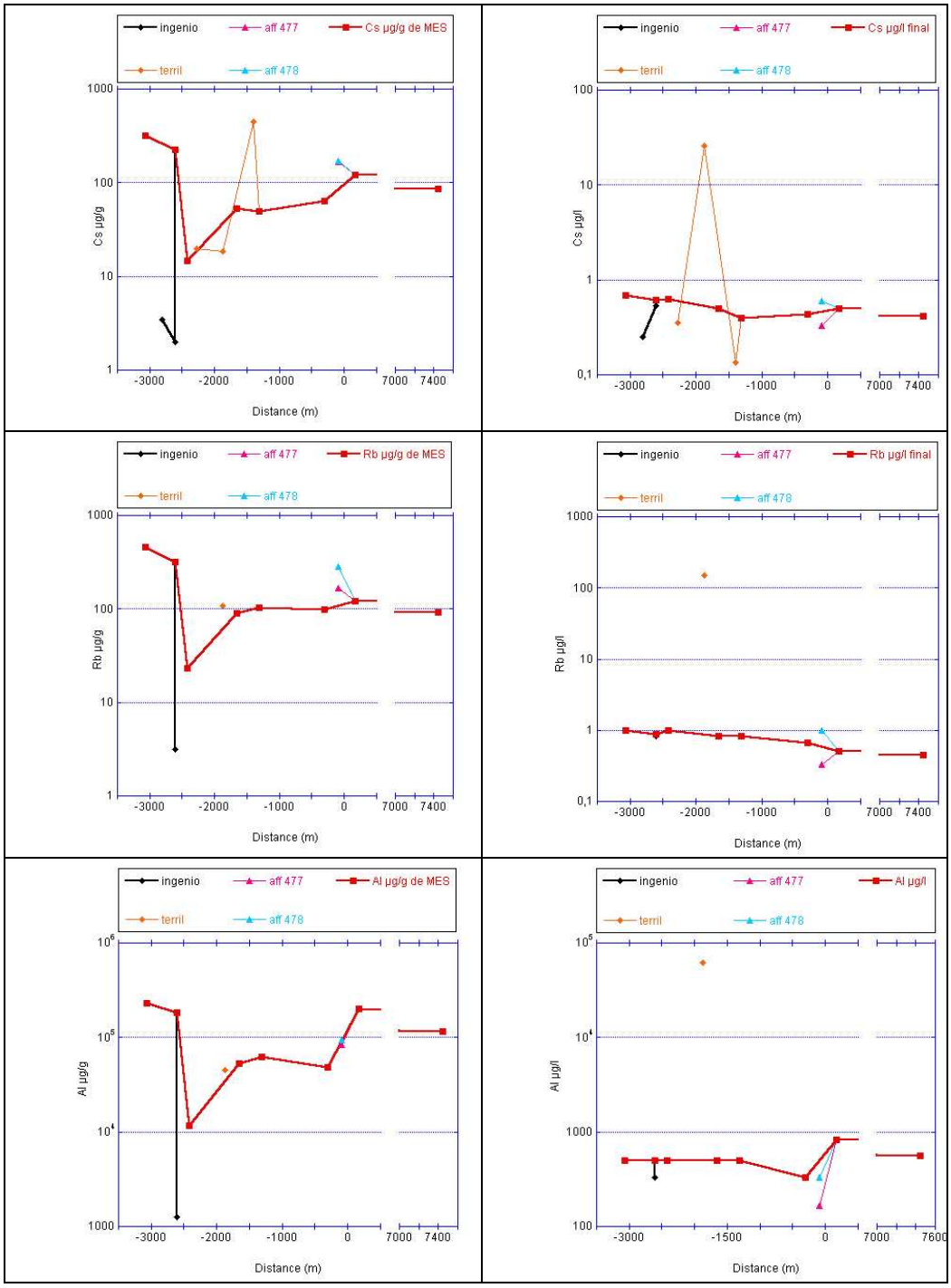


Figure 4 – Graphes géographiques des Eléments Zinc, Bismuth, Cérium, Césium, Rubidium et Aluminium

Le Zinc, le Bismuth, le Cérium, le Césium, le Rubidium et l'Aluminium montrent une évolution similaire dans le cours d'eau principal du point de vue de l'enrichissement des MES (graphes en µg/g – figure 4). Ils sont tous les 6 présents à la source et leur concentration diminue au passage de la série de cascades, avant d'arrivée à l'entrée du terril de l'ingenio. La contribution de l'affluent provenant de l'ingenio, provoque une chute des concentrations. En effet, les MES de l'affluent provenant de l'ingenio contiennent très peu de ces éléments, moins que celles du cours d'eau principal. Nous noterons que dans le cas du Zinc, la même évolution est observée sur le cours d'eau principal bien que celui-ci n'ait pas été détecté en aval du terril. Nous noterons également que le Cérium, le Rubidium et l'Aluminium, détectés en sortie du terril, ne le sont pas en sortie de l'ingenio.

Suite à la chute observée en aval du terril de l'ingenio, les concentrations de ces éléments en µg/g de MES augmentent jusqu'à l'entrée du terril inférieur. Ils rediminuent à nouveau en sortie du terril, suite à la contribution de l'affluent du terril. Il y a néanmoins 2 exceptions à cette règle. Le Cérium ne diminue pas mais garde la même concentration tout au long de la traversée du terril. Le Rubidium augmente légèrement au cours de la traversée et nous noterons que ceci provient très probablement du fait qu'il ne reçoit pas de Rubidium du terril, c'est-à-dire en fait que le Rubidium n'est pas détecté dans les MES de l'affluent du terril au moment de la convergence (il est détecté en aval du terril supérieur). La même remarque s'applique à l'Aluminium.

A ce sujet, les évolutions de ces 6 éléments sont bien différentes dans les terrils inférieurs et supérieurs. Mis à part le Rubidium et l'Aluminium qui ne sont détectés qu'en aval du terril supérieur, le Bismuth et le Cérium se comportent différemment des autres éléments. Au lieu de diminuer en aval du terril supérieur, comme les autres éléments, ils augmentent. En revanche, tous les éléments, excepté le Rubidium et l'Aluminium, montrent un enrichissement des MES entre l'aval du terril supérieur et l'aval du terril inférieur. Cette évolution est d'autant plus surprenante que, juste avant la convergence des deux cours d'eau, les concentrations sont bien plus élevées que dans le cours d'eau principal mais que la résultante est une diminution des concentrations dans le cours d'eau principal, alors qu'une augmentation serait attendue.

L'effet de l'affluent du terril se montre peut-être à retardement. En effet, il ne faut pas oublier que l'affluent du terril avait un débit faible et était très peu chargé en MES. L'homogénéisation des MES prend peut-être place un peu plus en aval que le point d'échantillonnage en aval du terril inférieur. Ainsi, nous observons un enrichissement des MES en ces 6 éléments de l'aval du terril inférieur jusqu'au pont de Tres Rios. Nous noterons néanmoins que cette augmentation ne se fait pas sentir dans le cas du Rubidium, qui reste constant voire même diminue légèrement. L'Aluminium diminue de façon plus franche. Le Zinc n'est, de façon surprenante, pas détectée au pont de Tres Rios.

Les MES des 2 affluents en aval du pont de Tres Rios contiennent ces 6 éléments, en quantité supérieure au cours d'eau de Bolsa Negra. Remarquons que, a priori, ces deux affluents ne drainent pas de mine en activité mai que, pourtant, leur MES sont plus enrichis en Zinc, Bismuth, Cérium, Césium, Rubidium et Aluminium que le cours d'eau

drainant la mine de Bolsa Negra. Les MES de l'affluent 478 sont plus enrichies que celles de l'affluent 477, sauf pour le Zinc. Il résulte de ceci une augmentation de l'enrichissement des MES à 165 m en aval de triple confluence par rapport au pont de Tres Rios. Le Bismuth fait là encore exception. Aucune variation n'est enregistrée entre le pont de Tres Rios et l'aval de la triple confluence.

Le Cérium et l'Aluminium posent problème en revanche car leur augmentation est totalement disproportionnée par rapport au 3 contributions. La valeur en aval de la triple confluence est même supérieure à la somme des 3 contributions. Ces 2 points sont donc probablement incorrects. Néanmoins, la baisse observée du Cérium et de l'Aluminium entre l'aval de la triple confluence et le point à 7,5 kms correspond à l'ordre de grandeur des autres baisses observées. Les MES présentent en effet une diminution de l'enrichissement dans ces éléments, sauf le Zinc qui augmente. Le Bismuth semble baisser de manière plus importante que les autres. De nombreux cours d'eau confluent avec le cours d'eau principal et l'augmentation du Zinc pourrait s'expliquer par un affluent très chargé en cet élément.

Cette 1ère analyse concernait l'évolution de l'enrichissement des MES avec les données des éléments en µg/g. Intéressons nous maintenant à l'évolution en µg/l qui nous permet de faire une 1ère approche de la qualité de l'eau vis-à-vis des normes de potabilité existantes. Le schéma d'évolution change considérablement. En effet, les charges de MES sont très variables d'un cours d'eau à l'autre et au sein même d'un même cours d'eau.

Ainsi, la baisse en enrichissement observée pour ces 6 éléments entre la source et l'amont du terril de l'ingenio est confirmée par la baisse des concentrations en µg/l. En revanche, la baisse d'enrichissement entre l'entrée et la sortie du terril de l'ingenio est opposée cette fois à une augmentation des concentrations en µg/l.
Regardons pour cela plus en détail ce qu'il se passe au niveau du terril de l'ingenio. Un point est toujours manquant pour discuter dans le cas du Zinc. Dans le cas du Bismuth, si les MES du terril étaient moins concentrées que celles du cours d'eau principal, la charge du 1er est telle que les concentrations en µg/l sont cette fois nettement supérieures dans le terril que dans le cours d'eau. On observe également une augmentation de la concentration, en µg/l, entre la sortie de l'ingenio et la sortie du terril correspondant alors que l'enrichissement, en µg/g diminue. Les mêmes remarques peuvent s'appliquer au Cérium, bien qu'il manque le 1er point. Pour le Césium également, même si les concentrations restent inférieures à celles observées sur le cours d'eau principal. Dans le cas du Rubidium, les concentrations en µg/l se confondent avec celles du cours d'eau principal. Dans le cas de l'Aluminium, il existe une différence de concentration entre le terril et le cours d'eau mais les concentrations volumiques restent constantes de la source à l'aval du terril inférieur.
Entre la sortie du terril de l'ingenio et l'entrée du terril inférieur, tous les éléments, excepté le Zinc et l'Aluminium, montrent une diminution de leur concentration en µg/l. En revanche, seul l'Aluminium ne montre pas de diminution entre l'amont du terril et l'aval du terril inférieur. Regardons donc ce qu'il se passe dans le système des 2 terrils, supérieur et inférieur. Tous les éléments se comportent cette fois de la même façon, à

savoir une augmentation importante entre le haut et le bas du terril supérieur et une diminution d'importance comparable entre le haut et le bas du terril inférieur. Ceci est directement à relier avec l'évolution de la charge en MES qui prend largement le dessus sur les enrichissements possibles. A noter que la charge est si faible au moment de la confluence avec le cours d'eau principal que la concentration en µg/l est chaque fois inférieure à celle du cours d'eau principal, d'où la diminution générale qui en résulte.
Notons que l'on peut extrapoler l'évolution du Rubidium et de l'Aluminium au même schéma, même s'ils n'ont pas été détectés à la sortie de la galerie ni à l'aval du terril inférieur.
Entre l'aval du terril inférieur et le pont de Tres Rios, on observe une légère augmentation du Bismuth, du Cérium et du Césium. La Rubidium et l'Aluminium diminuent légèrement et le Zinc n'est pas détecté au pont.
En µg/l, l'affluent 478 contient là encore les concentrations les plus élevées des 2 affluents. Les augmentations du Cérium et de l'Aluminium en aval de la triple confluence sont toujours aussi inexpliquées du point de vue des concentrations volumiques. Enfin, les concentrations volumiques de tous les éléments sauf le Zinc diminuent vers l'aval.

Remarques qualitatives :

Le Zinc est un métal et oligo-élément indispensable au métabolisme humain. Comme tout élément indispensable en faible quantité, l'excès de Zinc peut être toxique, sans toutefois être mortel.
Le Zinc peut avoir une influence sur l'augmentation de l'acidité de l'eau. Il est nocif pour les plantes et seules certaines sont résistantes. Les sols riches en Zinc sont improductifs. L'OMS n'ayant pas définit de concentration limite dans l'eau potable, aucun commentaire ne peut être fait sur les valeurs rencontrées ici.

Le Bismuth est considéré comme un des métaux lourds les moins toxiques. Néanmoins, des fortes doses peuvent être mortelles pour l'homme. Son impact sur l'environnement est peu connu mais a priori limité. Il ne figure pas non plus dans la nouvelle norme de l'OMS, nous ne pouvons donc pas juger les valeurs rencontrées ici.

Le Cérium appartient à la famille des Terres Rares. Il est nocif sous forme gazeuse, pour l'homme, et sous forme dissoute pour les organismes aquatiques. Il ne figure pas non plus dans la norme OMS.

Le Césium est un métal qui ne présente pas de toxicité particulière pour l'homme. Seul l'exposition à du Césium radioactif peut être nocive. Les composés du Césium sont très solubles dans l'eau. Le Césium ne figure pas dans le document de l'OMS.

Le Rubidium est un métal « vrai », il appartient à la même colonne que le Potassium. Il est très réactif à l'eau et peut provoquer des brûlures. Il est légèrement toxique par ingestion. Néanmoins, aucun effet sur l'environnement n'a été rapporté. Il ne figure pas dans la norme de l'OMS.

L'Aluminium est un métal non lourd. Il peut être toxique en quantité élevée. Sa forme la plus toxique est sa forme ionique. Il est insoluble pour des pH supérieur à 6 mais sa solubilité augmente fortement en milieu acide.
Dans les sols acides, l'Aluminium dissous présente une forte activité biocide et s'accumule dans les plantes. L'Aluminium réagit avec les Phosphates et les rend moins disponibles pour les organismes aquatiques.L'OMS n'a pas établit de limite pour l'eau potable mais conseille néanmoins une concentration inférieure à 0,2 mg/l pour des raisons techniques relatives au traitement de l'eau.

Aucun de ces 6 1ers éléments analysés ne figurent dans la dernière norme en vigueur de l'OMS. Les concentrations rencontrées ne sont donc a priori pas nocives pour l'homme. Néanmoins, l'effet du cocktail peut ne pas être négligeable et sur ce point nous ne pouvons rien avancer pour le moment.
Dans le cadre d'un éventuel traitement de l'eau dans une petite usine, les concentrations en Aluminium dépassent en tous points la valeur conseillée.

Les 2 éléments suivants, l'Arsenic et le Fer se comportent de la même façon et de manière opposé aux 6 éléments traités précédemment (figure 5). Ils sont présents naturellement à la source du cours d'eau. L'Arsenic diminue au passage des cascades alors que le Fer augmente.

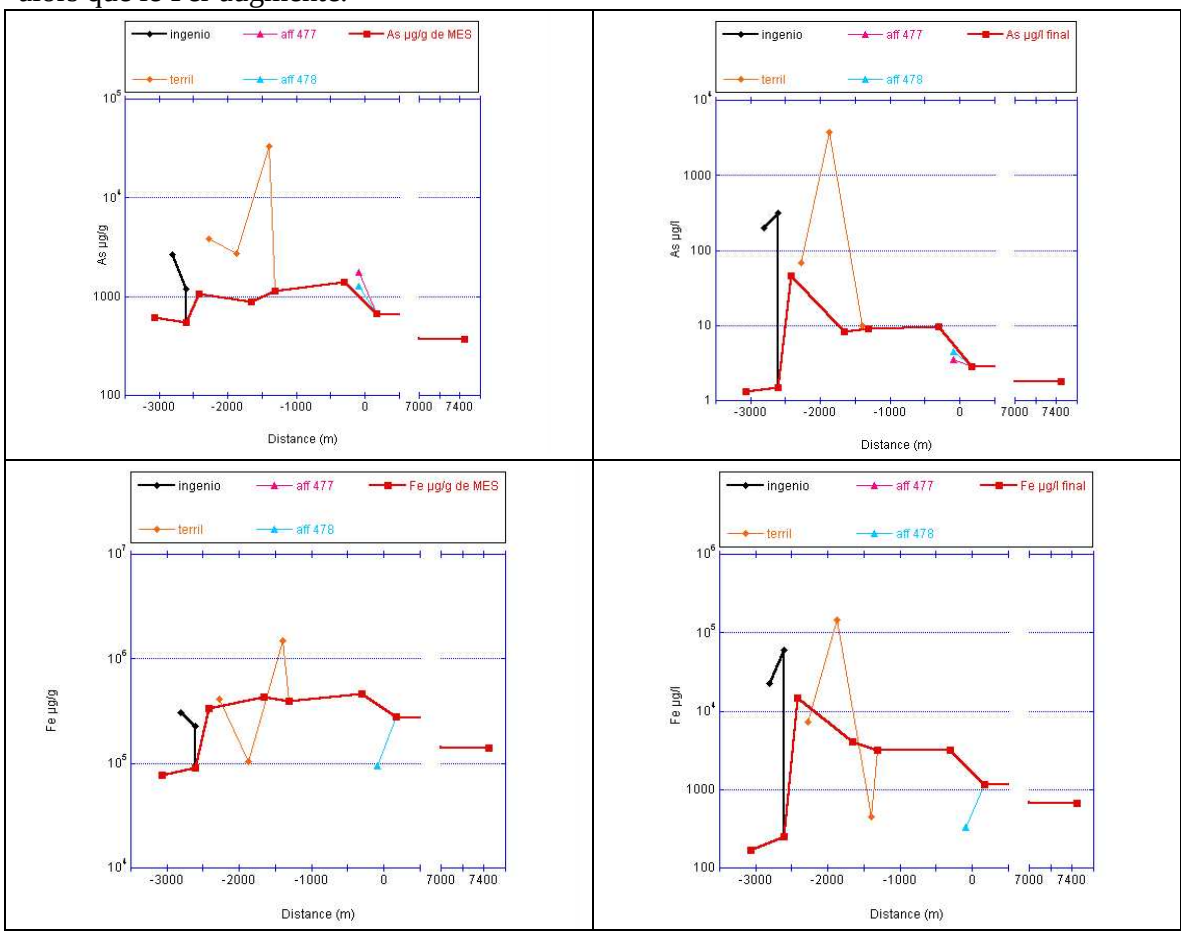


Figure 5 - Graphes géographiques des Eléments Arsenic et Fer

La concentration massique du Fer et de l'Arsenic diminue entre la sortie de l'ingenio et la sortie du terril associé. Néanmoins, la concentration reste supérieure à celle du cours d'eau et entraîne un enrichissement des MES de celui-ci. Les deux augmentations sont d'ailleurs disproportionnées par rapport aux débits relatifs des deux cours d'eau et des concentrations enregistrées.
Entre l'aval du terril de l'ingenio et l'amont du terril inférieur, l'Arsenic diminue mais le Fer augmente. A la traversée du terril, l'inverse se produit, le Fer diminue et l'Arsenic augmente. La concentration massique en Arsenic de l'affluent est en effet bien supérieure à celle du Fer. Néanmoins, l'évolution des 2 éléments dans les terrils inférieur et supérieur suit le même schéma. A savoir, une diminution entre la sortie de la galerie et le bas du terril supérieur et une augmentation de l'amont à l'aval du terril inférieur.
Entre l'aval du terril inférieur et le pont de Tres Rios, le Fer et l'Arsenic augmentent. Si l'Arsenic est présent dans les deux affluents, le Fer n'est présent que dans l'affluent 478. Le point obtenu en aval de la triple confluence est d'ailleurs quelque peu élevé si l'on considère que le Fer n'est pas détecté dans l'un des 2 affluents. En revanche, le point de l'Arsenic en aval de la triple confluence est anormalement bas si l'on considère les 3 contributions.
Pour les 2 éléments, la concentration massique diminue vers l'aval.

Regardons maintenant l'évolution de ces 2 éléments en concentrations volumiques. Cette fois, l'augmentation entre la source et l'amont du terril de l'ingenio se fait sentir pour les 2 éléments. L'augmentation au passage du terril de l'ingenio gagne en amplitude.
L'évolution dans le terril est inverse. Les concentrations massiques diminuaient de l'amont à l'aval du terril de l'ingenio, les concentrations volumiques augmentent.
Les 2 éléments montrent une diminution entre l'aval du terril de l'ingenio et l'amont du terril inférieur. A la traversée du terril inférieur, le Fer diminue et l'Arsenic augmente. Les 2 valeurs se conservent jusqu'au pont de Tres Rios.
L'évolution des concentrations volumiques dans les 2 terrils est inverse de l'évolution massique. Les valeurs en sorties respectives concordent avec l'évolution observée sur le cours d'eau principal.
La diminution observée en aval de la triple confluence est là encore difficilement explicable pour l'Arsenic et pas assez élevée pour le Fer si l'on tient compte du 2ème affluent dans lequel le Fer n'a pas été détecté.
Là encore, les concentrations volumiques diminuent vers l'aval.

Remarques qualitatives :

L'Arsenic n'est pas un métal lourd, mais c'est un des éléments les plus toxiques existants. Il est notamment associé au développement de cancers (Arsenic inorganique uniquement). L'Arsenic organique est moins nocif.

L'Arsenic est présent naturellement dans les minéraux et l'activité minière le libère. Il est peu soluble mais une fois en solution, il est très mobile et se diffuse largement. Une fois répandu, il est indestructible. Il s'accumule dans les plantes et modifie le matériel génétique des poissons.
La limite, provisoire, fixée par l'OMS pour l'eau de consommation est de 0,01 mg/l.

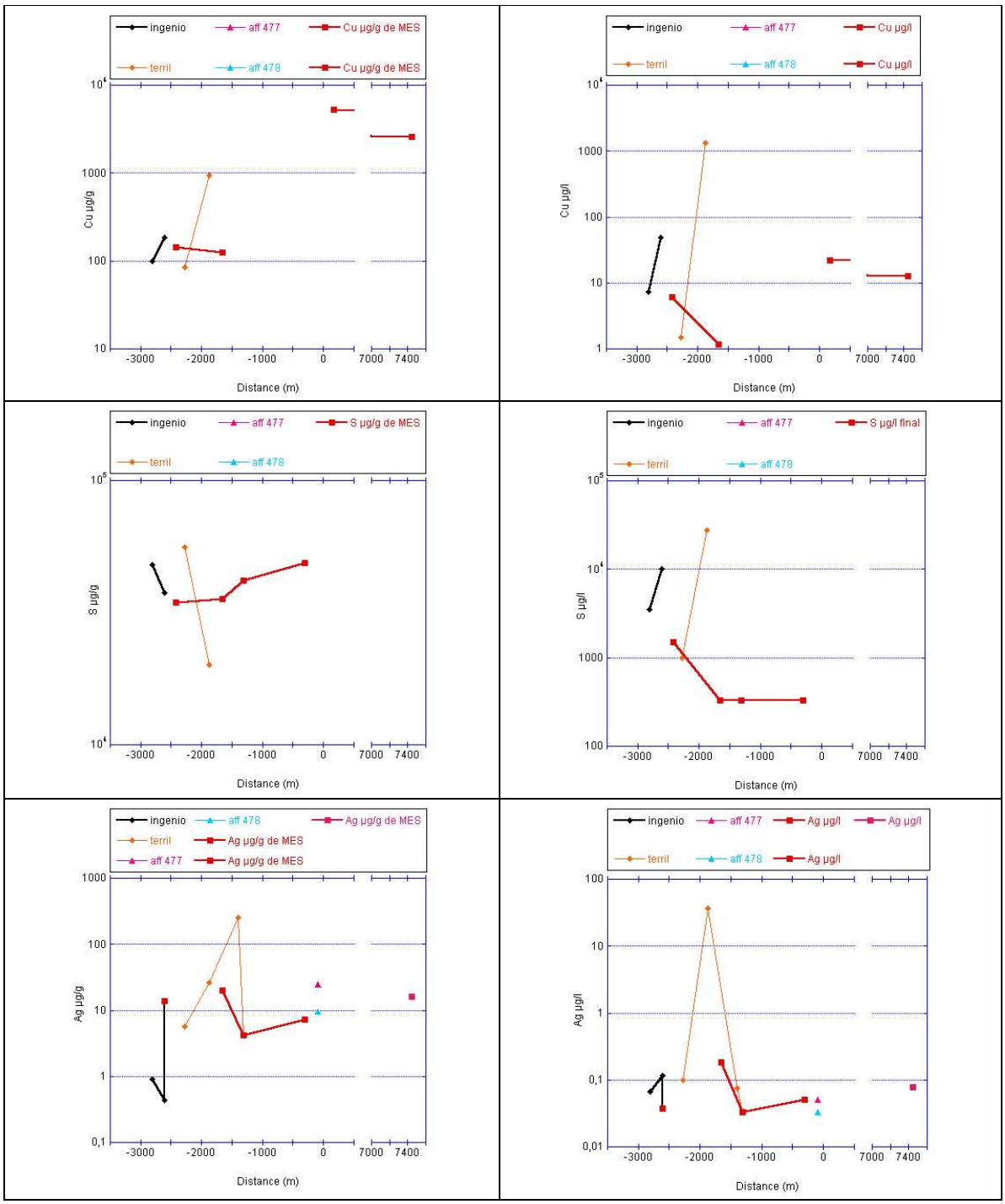
Cette limite est largement dépassée pour les terrils (Tableau III). Les valeurs du cours d'eau ne dépassent pas la limite mais s'en approchent dangereusement. Enfin, à 7,5 kms en aval, la concentration de l'Arsenic dans les MES exprimée en µg/l retrouve presque la valeur de la source.

	As µg/l	ingenio	terril	Affluent 477	affluent 478
Source	1,33				
		196,67			
		320,00			
Amont terril	1,50				
Aval terril	46,00				
			68,83		
			3800,00		
Amont terril	8,33				
			9,90		
Aval terril	9,17				
Pont Tres Rios	9,67				
				3,50	
					4,50
Aval triple confluence	2,83				
7,5 kms en aval	1,80				

Tableau III – Récapitulatif des valeurs rencontrées pour l'Arsenic

Le Fer est un métal essentiel pour l'homme, et comme tous les éléments essentiels, il peut être nocif en surdose. Un seul composé du Fer est dangereux pour l'environnement, le Fer(III)-Arsenite. L'OMS définit le Fer comme sans danger pour la santé aux concentrations généralement observées dans les eaux de consommation et signale que la couleur et le goût de l'eau sont altérée bien avant une quelconque limite pour la santé.
Dans notre cas, on constate en effet que les valeurs importantes de Fer sont associées à une forte coloration orange de l'eau et que la turbidité est telle que l'on est vite dissuadé de goûter l'eau.

Les 4 derniers éléments qui seront traités ici, le Cuivre, le Tungstène, le Soufre et l'Argent ne sont pas présents naturellement dans le cours d'eau et apparaissent à partir du terril de l'ingenio (Figure 6). Ils sont donc des sous-produits de l'exploitation minière. Leur point commun s'arrête là car leurs évolutions respectives par la suite ne suivent pas le même schéma.



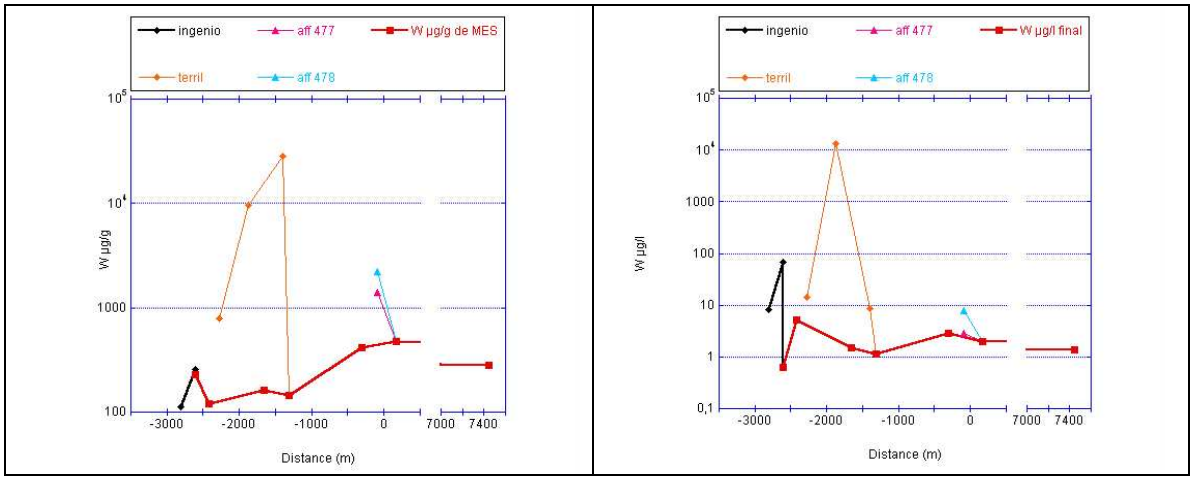


Figure 6 – Graphes géographiques des éléments Cuivre, Tungstène, Soufre et Argent

Le Cuivre est détecté de manière sporadique. Il apparaît et disparaît sans grande logique. Il n'est pas présent dans les deux autres affluents mais réapparaît en aval de la triple confluence sans avoir non plus été détecté au pont de Tres Rios.
Au niveau du terril de l'ingenio et du terril supérieur, les concentrations massiques et volumiques suivent la même évolution, à savoir une augmentation de l'amont vers l'aval.
Le Soufre est peu suivi également. Il apparaît dans les terrils où sa variation est opposée à celle du Cuivre, soit une diminution des concentrations massiques mais une augmentation des concentrations volumiques.
Si le Cuivre réapparaît en aval de la triple confluence, le Soufre, lui, disparaît définitivement après le pont de Tres Rios.
L'Argent fait l'objet d'une détection sporadique également. Il apparaît à l'ingenio et sa présence en aval du terril de l'ingenio est de courte durée puisqu'il a déjà disparu à l'arrivée au 2ème terril. Il réapparaît avant l'affluent du terril inférieur, probablement du fait d'un autre affluent dans ce même terril qui n'a pas été échantillonné, en amont de celui qui figure sur le graphique. Il est encore présent au pont de Tres Rios, mais, malgré sa présence dans les deux autres affluents, il n'est pas détecté en aval de la triple confluence. Il réapparaît à 7,5 kms en aval.

Pour terminer, le Tungstène, métal économique de la mine Bolsa Negra, est le seul des 4 à présenter une évolution suivie, de son apparition au niveau de l'ingenio à 7,5 kms en aval. Mis à part son comportement dans le terril de l'ingenio, son évolution est calquée sur celle du Bismuth.

Remarques qualitatives :

Le Cuivre est un métal essentiel pour la santé humaine et comme tout élément essentiel, la surdose est dangereuse.
Il est nocif également pour le développement de la végétation. L'OMS donne une limite de 2 mg/l. Cette limite n'est pas dépassée une seule fois dans aucun des échantillons.

Le Soufre n’est pas un métal. Les composés soufrés sont généralement néfastes à l’homme et à l’environnement. Le Soufre en tant qu’élément ne figure pas dans la classification de l’OMS.

L’Argent est un métal précieux, hautement toxique pour l’homme, surtout sous la forme de ses sels solubles.
Néanmoins l’OMS a jugé insuffisantes les données disponibles sur la toxicité de l’Argent pour développer des normes de concentration concernant l’eau potable.

Le Tungstène est le métal exploité dans la mine Bolsa Negra. Il contrarie les effets de l’oligo-élément Molybdène. Il n’a pas d’effets chroniques sur la santé bien qu’il puisse engendrer certaines irritations. Les composés du Tungstène sont à considérer comme toxique.
Aucune donnée d’écotoxicité n’est disponible sur le Tungstène. Il ne figure pas non plus dans la dernière norme des eaux potables de l’OMS.

Remarque : Les deux affluents en aval du village de Tres Rios, qui ne reçoivent pas d’effluents miniers en théorie, contiennent les éléments suivants : Al, Fe, Zn, Ag, As, Bi, Ce, Cs, La, Pb, Rb, Sb et W. Ces éléments sont à peu près les même que ceux rencontrés dans le cours d’eau drainant la mine Bolsa Negra. La présence de Plomb et de Tungstène est notamment surprenante. Il y a donc fort à penser que, si aucune mine en activité n’a été signalée dans cette région, il y a probablement des activités minières passées, des galeries abandonnées ou peut-être des activités sporadiques qui subsistent. On se souviendra notamment des quelques « ateliers » de récupération manuelle d’Or qui traitait les résidus déjà procédés à l’Arsenic de la mine Illimani.

b) Evolution géographique sur le terril supérieur

De la galerie de mine abandonnée à l'amont du terril supérieur la MES augmente légèrement (figure 7). La pente d'augmentation est beaucoup plus forte entre l'amont du terril et l'aval du terril supérieur. Notons que entre ces deux points, une partie du cours d'eau est aérien, l'autre est souterrain. En effet, le dernier point correspond à une résurgence en aval du terril.

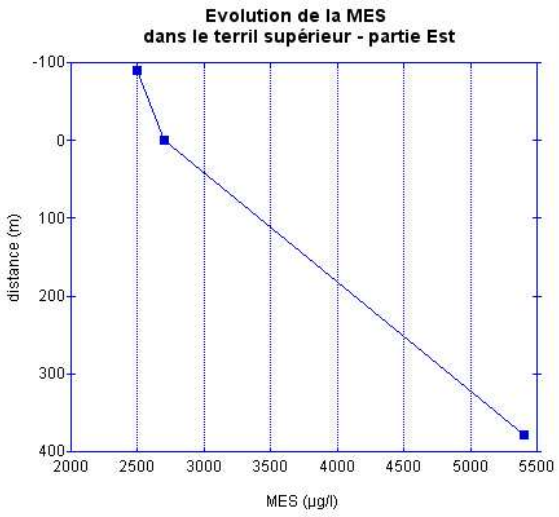


Figure 7 – Evolution des MES dans le terril supérieur – partie Est

Parmi les 12 éléments sélectionnés pour le cours d'eau principal, le Soufre est absent du système du terril supérieur.

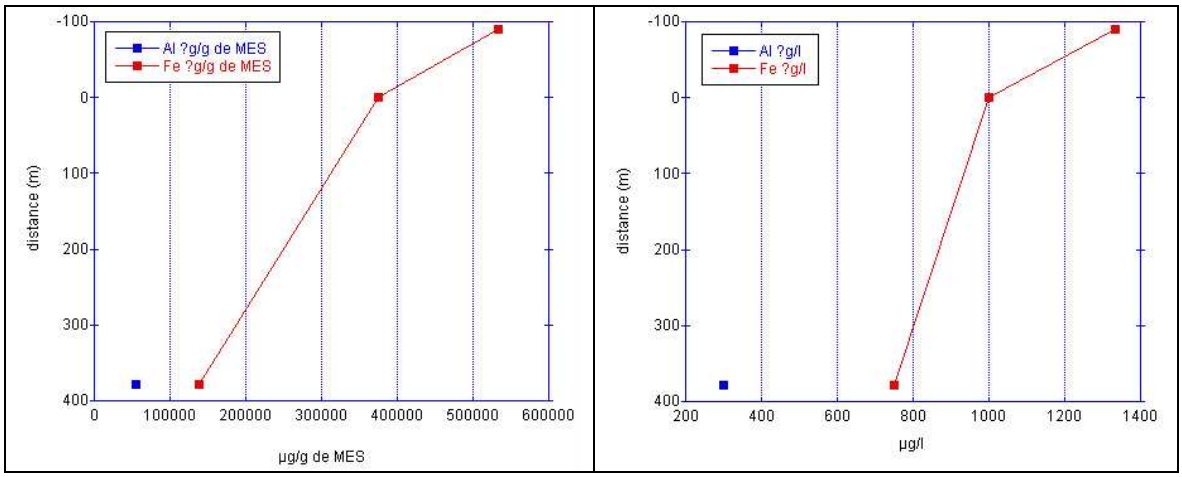


Figure 8 – Evolution du Fer et de l'Aluminium dans le terril supérieur – partie Est

Le Fer et l'Aluminium sont traités à part car leurs concentrations sont bien plus élevées que celles des autres éléments. La concentration volumique en µg/l suit la même évolution que l'enrichissement en µg/g. Il s'agit en revanche plus d'un appauvrissement que d'un enrichissement dans le cas du Fer. En effet, sa concentration diminue de la sortie de la galerie abandonnée à l'aval du terril. L'Aluminium, lui, n'apparaît qu'à la résurgence.

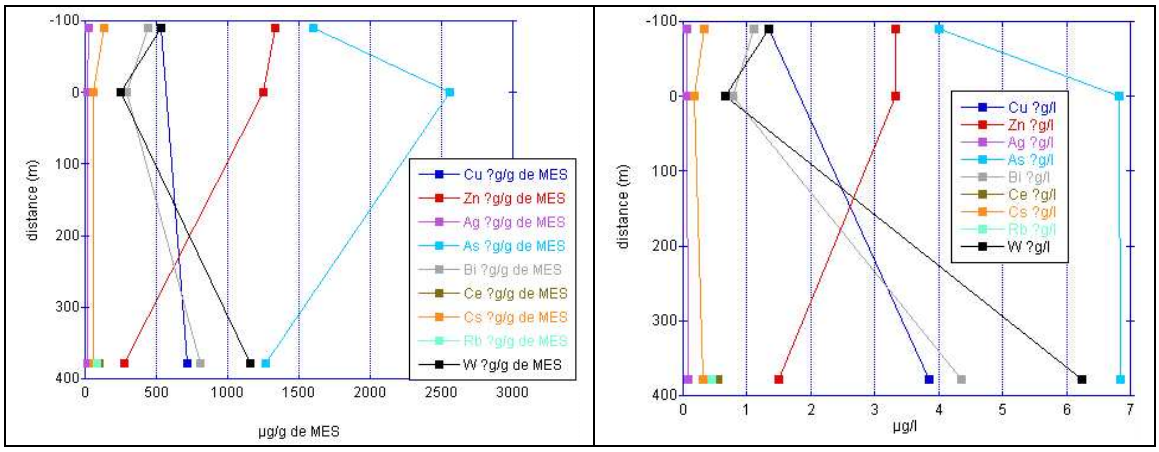
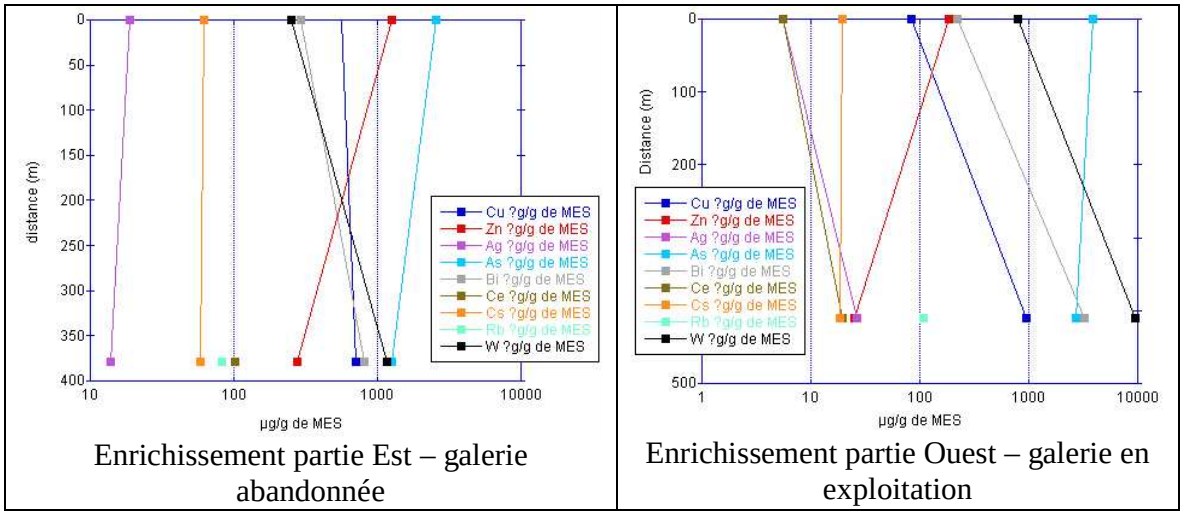


Figure 9 – Evolution des autres éléments dans le terril supérieur – partie Est

Les autres éléments sont un peu plus influencés par la variation de la quantité de MES.
Le Rubidium et le Césium n'apparaissent qu'à la résurgence. L'Argent est l'élément le moins concentré. Il reste constant tout au long de la traversée du terril. Le Césium également. En revanche, lorsque l'on passe en µg/l, on note une légère augmentation de l'amont à l'aval du terril, du à la forte augmentation de MES entre ces 2 points.
Le Cuivre n'est pas détecté en amont du terril alors qu'il est détecté en sortie de la galerie et en aval du terril. Il montre un léger enrichissement entre ces 2 points.
Le Tungstène et le Bismuth diminuent entre la galerie et l'amont du terril et réaugmentent vers l'aval. L'évolution de l'Arsenic et du Zinc est opposée. Ils s'appauvrissent tous deux fortement entre l'amont et l'aval du terril.

Cette petite analyse rapide permet d'approcher ce qu'il se passe dans le terril supérieur lorsque le cours d'eau circule en profondeur dans le terril et non en surface. Ainsi, comparons l'enrichissement des éléments entre les deux cours d'eau qui drainent le terril supérieur. Notons que le Soufre, absent dans la partie Est du terril est présent dans la partie Ouest. Afin de faciliter la comparaison, il ne sera pas représenté.



Enrichissement partie Est – galerie abandonnée

Enrichissement partie Ouest – galerie en exploitation

Figure 10 – Comparaison entre l'effluent sortant de la galerie en exploitation et celui sortant de la galerie abandonnée

Les valeurs atteintes du côté de la galerie en exploitation sont bien supérieures à celle obtenue du côté de la galerie abandonnée. Le Tungstène, le Bismuth et le Cuivre s'enrichissent de la même façon de l'amont à l'aval du terril. L'Arsenic et le Zinc s'appauvrissent de manière égale. Le Rubidium n'apparaît dans les 2 cas qu'à l'aval du terril. Le Césium reste à peu près constant dans les 2 cas. Le Césium qui augmente de l'amont vers l'aval dans la partie Ouest n'apparaît qu'à l'aval dans la partie Est, ceci peut-être pris pour une augmentation qui aurait entraîné une présence dépassant les limites de détection. Seul l'Argent se comporte réellement différemment. Il augmente de l'amont à l'aval dans la partie Ouest et diminue dans la partie Est.
Il n'y a donc pas de différence de comportement entre un effluent qui circule en surface et un effluent qui circule en profondeur du point de vue de l'enrichissement des MES. Néanmoins, il existe une grande différence dans la quantité de la MES. Celle-ci augmente considérablement entre l'amont et l'aval de la partie Ouest alors qu'elle diminue dans la partie Est. Le passage en profondeur donnant lieu à des phénomènes de filtration.

IV. Comparaison des éléments rencontrés dans les MES avec les minéraux présents dans l'environnement géologique de la mine Bolsa Negra.

Les minéraux présents dans le secteur de Bolsa Negra sont :

- Pyrrhotite FeS (Fe 60%, S 40%)
- Tungstite H_2WO_4
- Fluorite CaF_2
- Wolframite $(Fe,Mn)WO_4$
- Ferberite $FeWO_4$
- Scheelite $CaWO_4$
- Tourmaline $(Na,Ca)\ (Mg\ Fe^{2+}Fe^{3+})_3\ B_3\ Al_3\ (Al_3Si_6O_{27})(O,OH)_4$
- Muscovite $KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$

La Pyrrhotite est un minéral de haute température, de paragenèse magmatique à hydrothermale. Minéral commun et abondant dans la ceinture d'Etain et presque toujours associé aux minéraux d'Or, Tungstène, Etain, Bismuth et quelques fois au Plomb et au Zinc.
Il est très commun dans les veines hypothermales de quartz avec de la wolframite de la mine Bolsa Negra, des fois il peut constituer le seul « relleno »de la veine.

La Pyrrhotite s'altère très facilement en Limonite. Entre la zone primaire avec le sulfure et la zone d'oxydation on trouve une zone où elle est remplacée par de la Marcassite et de la Pyrite.

La Tungstite est un minéral secondaire assez commun dans les affleurements des veines de Wolframite où il forme un dépôt pulvérulent jaune au dessus de la Wolframite. Ce dernier est peu résistant aux actions météoritiques et disparaît rapidement. Ce minéral est très abondant dans les affleurements filoniens de Bolsa Negra. Ce minéral peut contenir de la Silice et de l'Oxyde de Fer (III).

La Fluorite peut être associé à tous les minéraux et à tous types de paragenèse. Elle contient nombreuses des terres rares à l'état de traces. Elle peut contenir du Plomb et du Zinc. Elle est cependant peu abondante dans les veines de Tungstène mais présente a Bolsa Negra.

La Wolframite contient entre 6 et 18 % de Mn et autour de 76 % de WO_3. Les impuretés sont Mg (jusqu'à 0,5 %) et parfois Ca, Ta, Nb, Sn. La Wolframite est un minéral très caractéristique des gisements neumatolitiques et hydrothermaux en relation avec un magma granitique. Elle se trouve presque toujours dans des veines de quartz associée à de nombreux autres minéraux. La Wolframite de la mine Bolsa Negra est hypothermale et riche en FeO. Il existe également de la ferberita spongieuse de 2ème génération présente sporadiquement dans les géodes du quartz, en petits cristaux tabulaires.

La Scheelite contient en général jusqu`à 8 % de Molybdène mais aucun des dépôts boliviens n'en contient. La Scheelite s'oxyde en Tungstite. C'est un minéral de haute température. Dans le gisement de la mine Bolsa Negra, il existe 2 générations de Scheelite ; la 1ère génération vient en remplacement de la Wolframite. L'autre type est d'une génération postérieure.

La Tourmaline s'est formé à partir des gaz dissous dans le magma qui ont imprégnés les roches sédimentaires métamorphisées environnantes. Ce procédé est antérieur à la formation des dépôts métallifères.

La Muscovite est associée à du quartz, de la pyrite et de l'arsénopyrite dans la mine Bolsa Negra.

Les éléments susceptibles de provenir des minéraux sont donc : Fe, S, W, Ca, F, Mn, Mg, B, Al, Si, K. Le Bore et la Silice ne font pas partie des éléments analysés. Nous avons vu que dans les MES, Ca, F, Mn et Mg n'ont pas été détectés. Il reste donc Fe, S, W, Al et K. Le Fer et l'Aluminium ont été trouvés en quantité très importante, le Soufre également. Le Potassium avait une distribution inégale mais ses concentrations étaient importantes. Enfin, le Tungstène, en tant que minéral exploité dans la mine Bolsa Negra, a fait son apparition à partir de l'exploitation minière et n'est pas relâché naturellement dans le cours d'eau.

L'Arsenic n'est pas présent dans les principaux minéraux mentionnés. En revanche, on nous dit que la Muscovite est associée à de l'Arsénopyrite. Celle-ci pourrait donc constituer la source de la grande quantité d'Arsenic rencontrée.
La présence du Cuivre est assez surprenante puisqu'il n'est pas mentionné de Chalcopyrite dans les minéraux principaux mais peut-être il en existe-t-il un petit peu.
La source du Zinc n'est pas précisée, celle de l'Argent et des autres éléments traces, comme le Rubidium, non plus. Ces éléments sont très probablement présents à l'état de traces dans les différents minéraux mentionnés ci-dessus.

Conclusion

Les principaux éléments présents dans les MES en quantité importante sont l'Aluminium, le Fer et le Soufre. Ces deux derniers éléments sont caractéristiques du drainage minier acide. L'Arsenic est ensuite très présent et représente l'élément le plus préoccupant vis-à-vis de l'impact environnemental de la mine Bolsa Negra, du point de vue des MES uniquement pour le moment. Le Tungstène, métal exploité, est libéré en quantité assez importante mais diminue rapidement. Les éléments lourds les plus préoccupants comme le Plomb et le Cadmium ne le sont pas dans l'environnement de la mine Bolsa Negra.
Il convient maintenant d'attendre les résultats des concentrations des éléments sous forme dissoute avant de donner des conclusions hâtives sur les raisons des évolutions observées

Bibliographie

Los Minerales de Bolivia y sus Parajes, Salomón Rivas V. et Federico Ahlfeld, tome I et II, 1998, 629 p.

Guidelines for drinking-water quality, Second Edition, OMS, 1996, disponible sur www.who.int

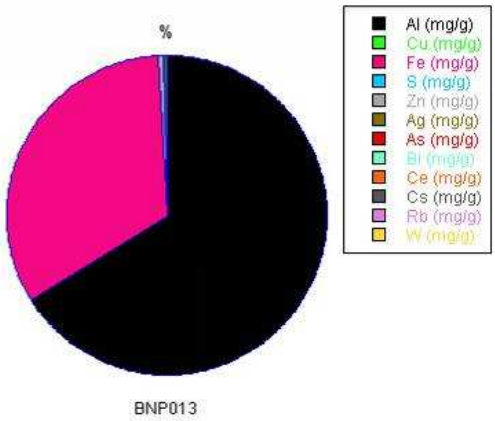
www.Lenntech.com, site d'une entreprise privée spécialisée en traitement de l'eau. Propose une description de tous les éléments du Tableau de la Classification Périodique des Eléments.

www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad44.htm effet de l'Argent sur l'environnement

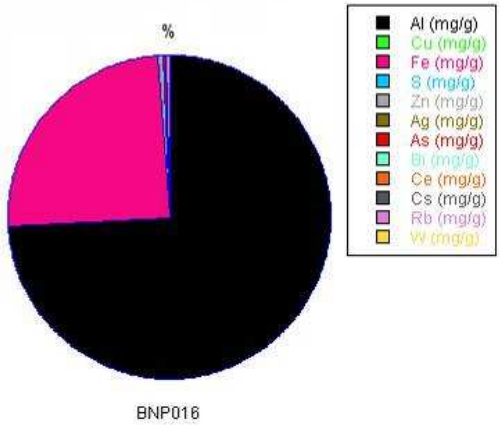
Annexes

Photographies des filtres analysés et graphes camemberts des proportions des principaux éléments rencontrés.

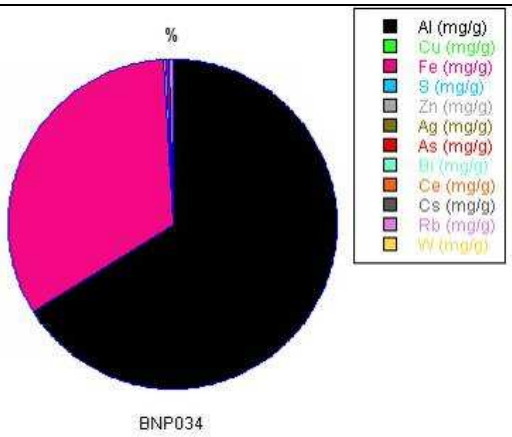
Sortie du lac de nuit

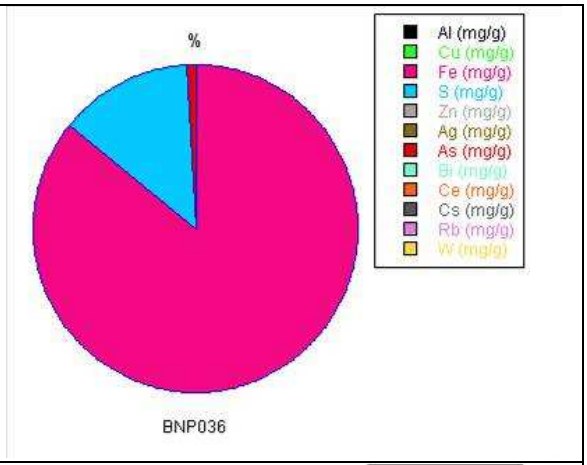
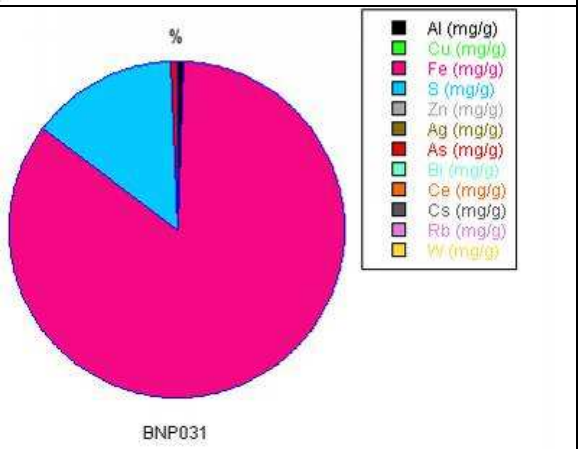


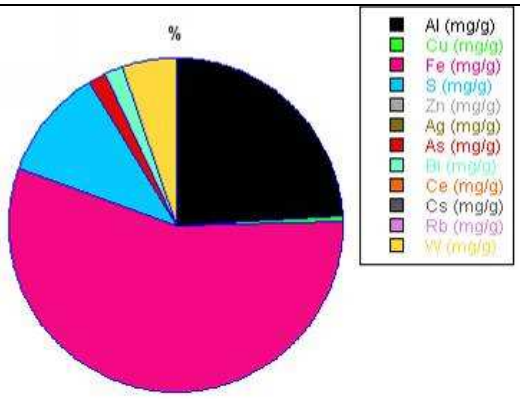
Sortie du lac de jour



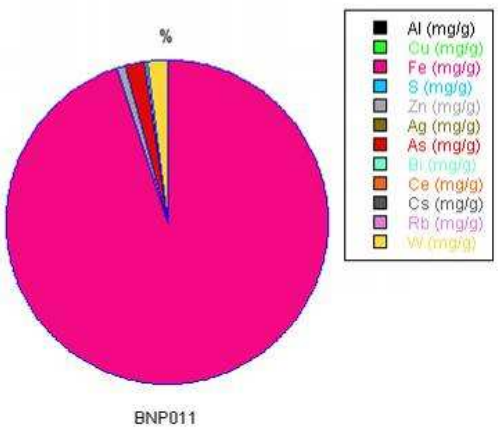
En amont du terril de l'ingenio



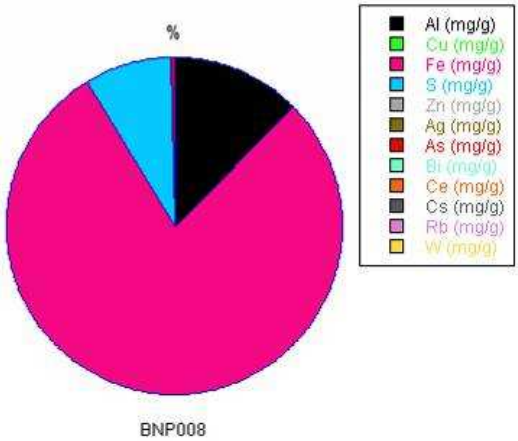
 En sortie de l'ingenio	
 En aval du terril de l'ingenio	
 En aval du terril de l'ingenio sur le cours d'eau principal	

 En amont du 2ème terril, sur le cours d'eau principal	 BNP022
 En sortie de la galerie principale	 BNP043
 En aval du terril supérieur	 BNP050

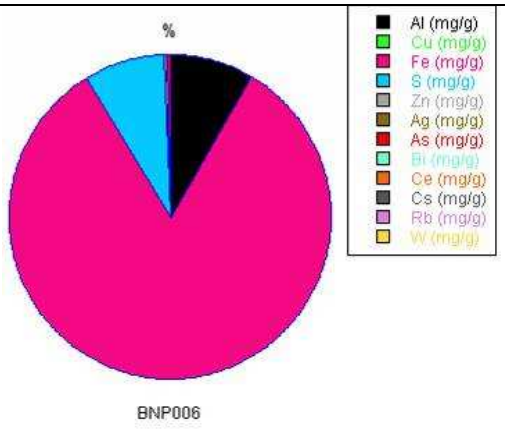
En aval du terril inférieur



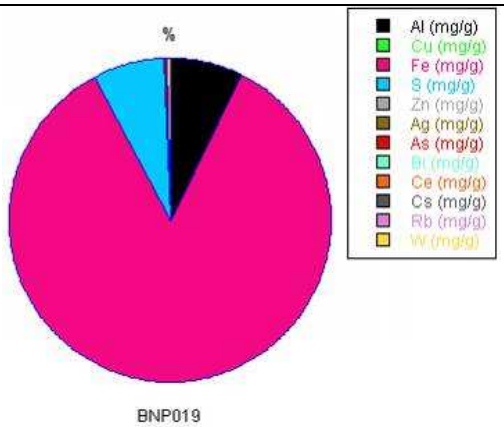
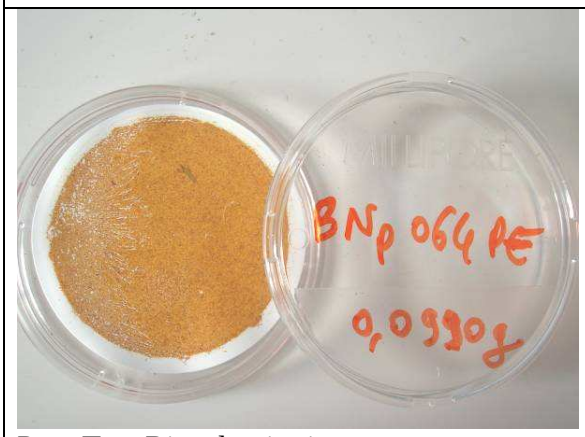
En aval du terril inférieure sur le cours d'eau principal

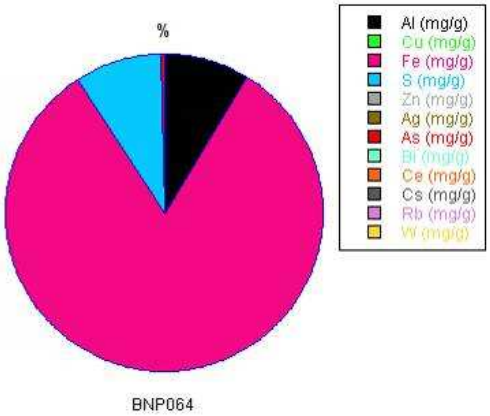


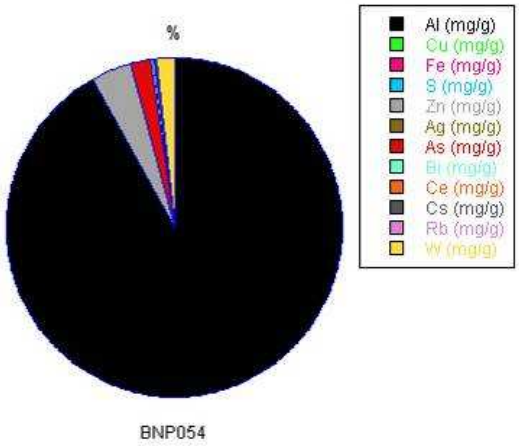
Pont Tres Rios le 1er jour

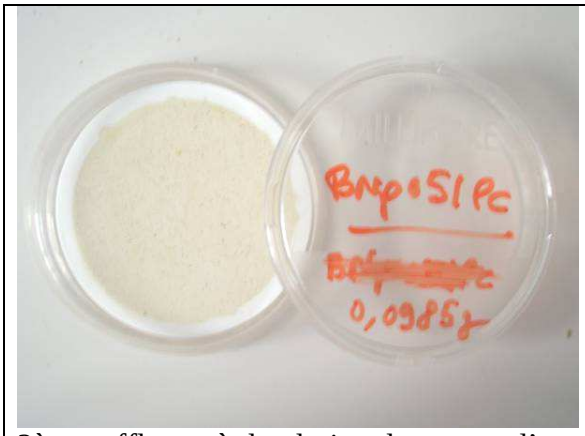
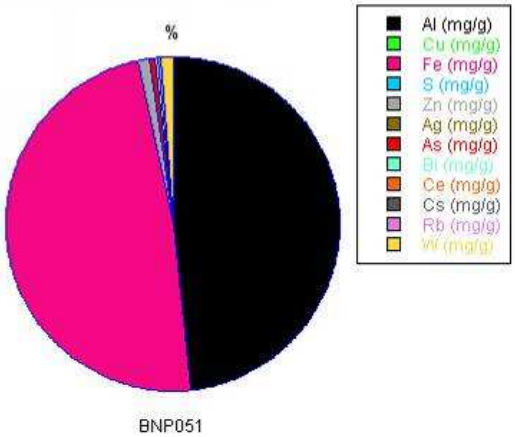


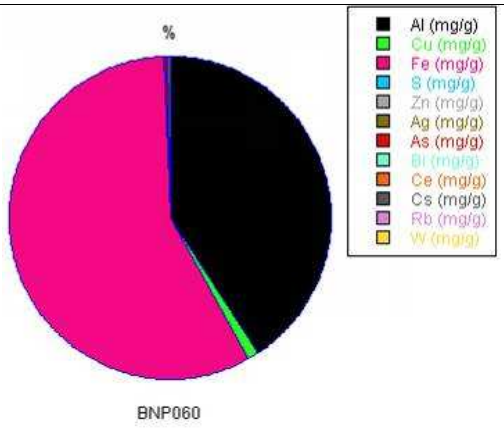
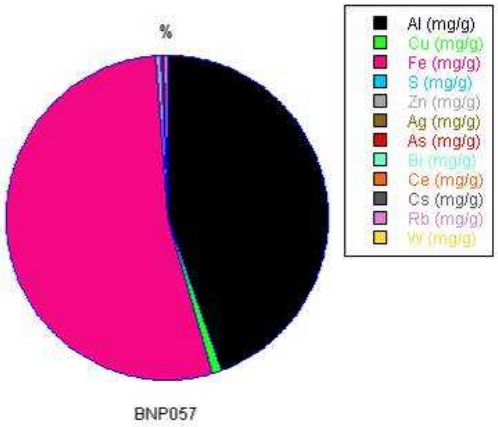
<table>
<tr>
<td>

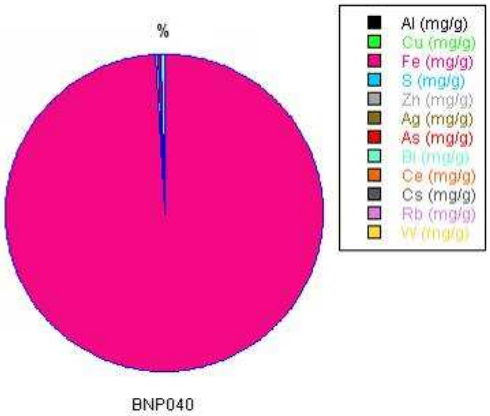
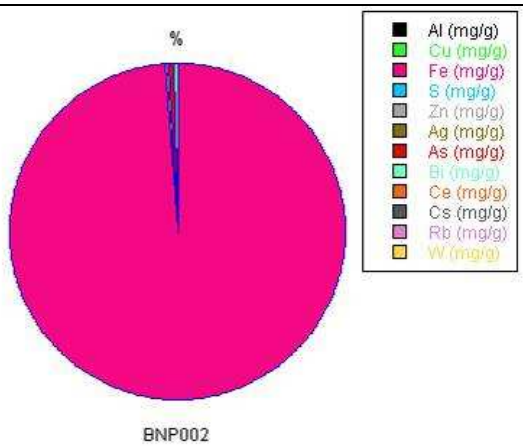
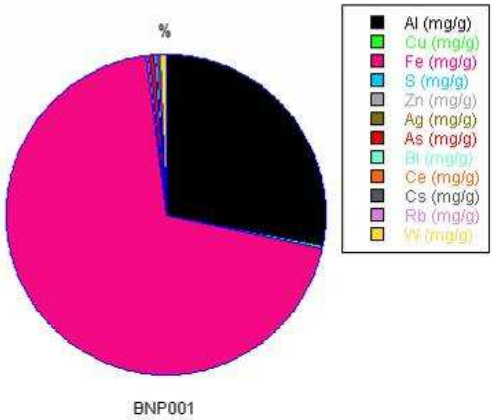
Pont Tres Rios de nuit</td>
<td> 
</td>
</tr>
<tr>
<td> 

Pont Tres Rios dernier jour</td>
<td> 
</td>
</tr>
<tr>
<td>

affluent à la droite du cours d’eau principal, juste en amont de la confluence</td>
<td> 
</td>
</tr>
</table>

 2ème affluent à la droite du cours d'eau principal, juste en amont de la confluence	

 165 m en aval de la triple confluence	
 7,5 kms en aval de la triple confluence	

 en dessous de la bocamina abandonnee	
 Ruissellement de falaise avant le terril supérieur	
 Résurgence en aval du terril supérieur