Année 2004- 2005

Master 2 Recherche de l'université de Toulouse III
Spécialité : Hydrologie, Hydrochimie, Sol, Environnement

Dynamique des éléments traces dans une plaine d'inondation amazonienne : la plaine d'inondation de Curuai

Etude réalisée par Arlie Natacha

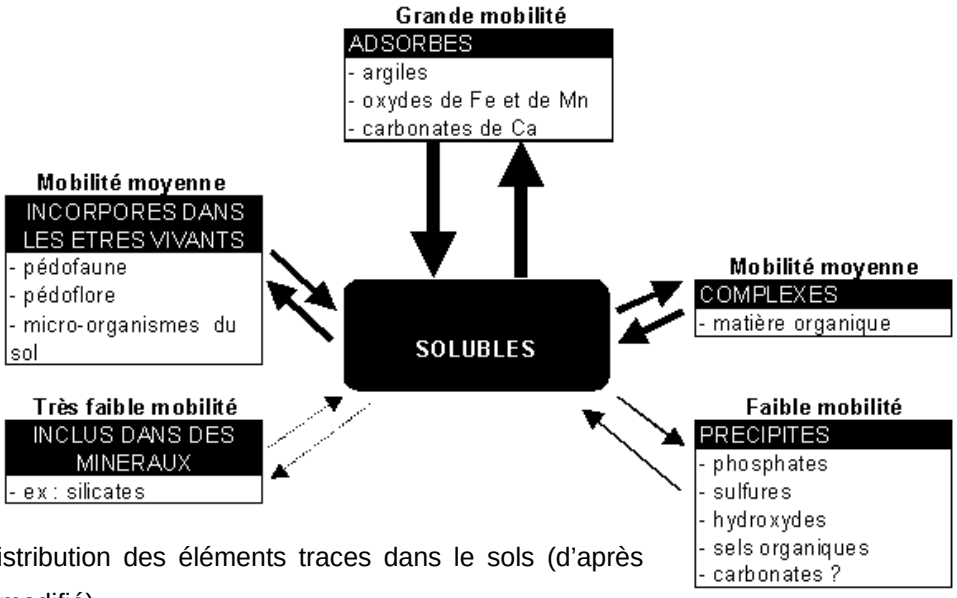
Sous la direction de Priscia Oliva et Laurence Maurice Bourgoin

Introduction

Les plaines d'inondation ou varzea en portugais sont des espaces de transition entre les milieux terrestres et aquatiques, ce qui en font des espaces naturels particulièrement vulnérables (Mitsch et Gossentick, 1993). En raison de ces particularités topographiques et pédologiques, l'eau s'accumule dans ces zones, faisant d'elles des éléments déterminants dans la gestion de l'eau. En effet, elles retardent la propagation des eaux et contribuent donc à la régulation des débits de rivière ou fleuve. Les propriétés (physique, chimique et biologique) des sols établis sur ces zones déterminent son fonctionnement. Les facteurs comme le pH, le potentiel rédox, la teneur en eau affectent le taux de transformation d'une phase solide vers une forme chimique soluble (Brümmer et al, 1986). La variabilité de la composition des minéraux sédimentaire du sol dépend en partie de la teneur en éléments traces (Sposito, 1989)

Cependant, la faible diffusion de l'oxygène de l'atmosphère au travers du sol et la présence de matière organique facilement dégradable contribuent à générer un milieu déficitaire en oxygène à l'origine des conditions réductrices qui affectent la réactivité et la mobilité de certains éléments dans le sol. Dans ces sols dit hydromorphes, les conditions d'anaérobiose provoquent une modification de l'activité biologique des sols, un ralentissement de la décomposition de la matière organique (Alard et al, 2002) ainsi qu'une réduction et une mobilisation des oxydes de fer de façon très différente suivant les variations de pH et de Eh de l'eau (Duchauffour, 1983).

Les éléments traces sont définis comme des éléments chimiques dont la teneur dans la phase solide est inférieure à 100 mg/kg (Sposito, 1989), ils sont 68 éléments et ne représentent que 1 % de la lithosphère (Adriano, 1986). Parmi ces éléments, certains sont considérés comme indispensables pour les êtres vivants et les plantes (Robert, 1996). Initialement aux stades de l'altération et des processus pédogénétiques, la composition en éléments traces d'un sol est modifié selon l'influence des différents processus pédogénétiques, anthropiques et naturels (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). D'après Alloway (1995) et Brümmer (1986), les processus les plus importants qui affectent la biodisponibilité et le comportement des éléments traces dans le sol sont ceux qui concernent l'adsorption des éléments traces de la phase liquide vers la phase solide et la complexation des éléments dans la solution de sol et exercent ainsi une influence majeure sur leur absorption par les racines des plantes. Les éléments traces peuvent également être adsorbés à la surface des minéraux argileux, des oxydes de fer, d'aluminium et de manganèse, ou bien inclus dans les macromolécules organiques présentes ou encore dans le réseau des minéraux primaires et secondaires (Baize, 1997). (Figure (1))



Figrue(1) : distribution des éléments traces dans le sols (d'après Juste, 1995, modifié)

Dans les sols tropicaux, certains éléments traces migrent en même temps que l'aluminium et le fer, d'autres au contraire s'accumulent en surface (Pb) en raison des complexes qui se forment avec la matière organique. Quant aux ions métalliques (Fe^{2+}, Mn^{2+}, Cu^{2+}…), ils peuvent former des sulfites relativement stables dans les sols hydromorphes. D'autres éléments comme Co, Cd, Ni et Zn peuvent facilement coprécipiter avec les sulfites de fer (Kabata-Pendias et Pendias, 1992). Il peut y avoir aussi des co-précipitations avec les oxydes de Fe, d'Al ou de Mn.

Ce travail s'intègre au sein d'une réflexion sur la dynamique des éléments en traces dans une plaine d'inondation du cours moyen de l'Amazone en amont de la zone estuaire : la plaine d'inondation de Curuaï. Les objectifs sont de caractériser et de quantifier le rôle tenu par cette varzea dans le transferts des éléments traces. Ainsi, afin d'évaluer l'impact de la varzea sur la formation et la composition des sols, les caractéristiques physiques et chimiques de 4 échantillons de sols prélevés en des lieux stratégiques ont été analysées et étudiées. De plus, pour évaluer la contribution de l'Amazone sur la distribution des éléments traces, les MES ont été analysés dans les eaux d'entrée et de sortie. Ceci a permis de déterminer l'influence des sols de la plaine d'inondation de Curuai sur les eaux de l'Amazone, et par la même d'évaluer si elle avait une implication dans le relargage ou contraire le piégeage des éléments traces.

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un projet pluridisciplinaire financé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et intitulé ATI (Actions Transversales Incitatives) « Usage des sols et sédiments_Impacts sur la santé humaine ». Ce stage est réalisé au LMTG (Laboratoire des mécanismes de transfert en géologie), en partenariat avec des équipes de recherche de l'UPS, du CNRS et de l'IRD.

I. CONTEXTE GLOBAL DE L'ETUDE

Avant d'aborder les caractéristiques biogéochimiques des sols de la zone étudiée, il est indispensable de faire le point sur les caractéristiques physiques qui conditionnent le fonctionnement hydrologique de la zone.

I.1. Le bassin amazonien

I.1.1. Géomorphologie

Le bassin de l'amazone, le plus important des fleuves de la planète en terme de surface drainée et de débit, couvre $6{,}1.10^6$ km^2, soit près de 5% des terres émergées, et apporte à l'atlantique un volume d'eau qui représente environ 15% des apports hydriques aux océans (Molinier et al, 1992).
Ce bassin, situé entre les latitudes 5° nord et 20° sud, s'étend sur 7 pays :

- ✓ Le Brésil (63%)
- ✓ La Bolivie (16%)
- ✓ La Colombie (12%)
- ✓ L'Equateur (2.3%)
- ✓ Le Venezuela (0.6%)
- ✓ La Guyane (0.2%)

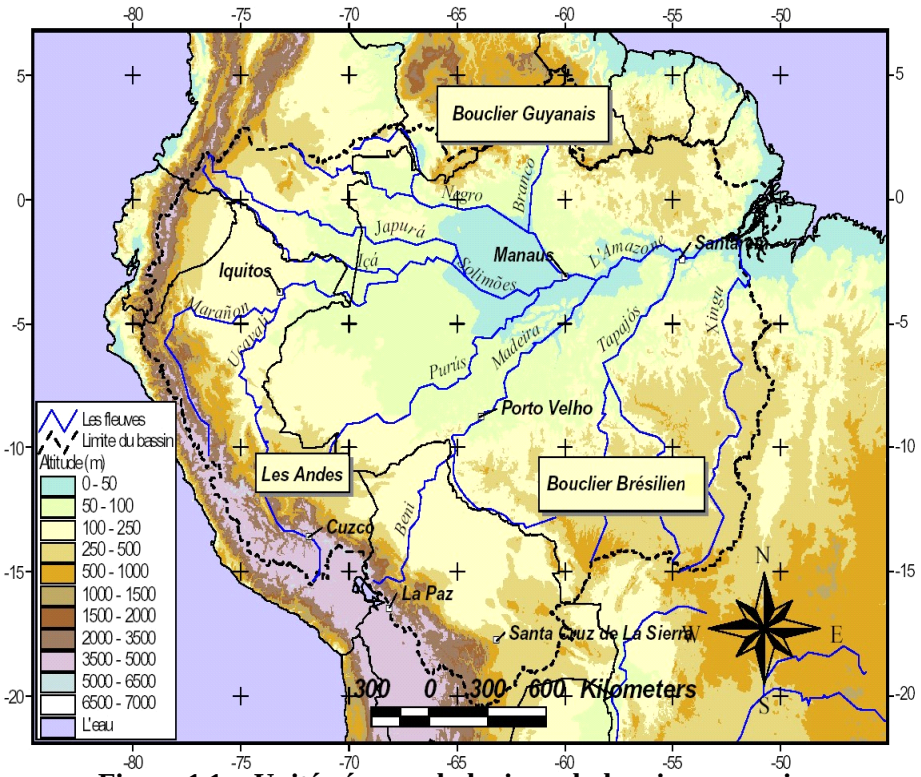


Figure 1.1. : Unité géomorphologique du bassin amazonien

Il est divisé en 3 grandes unités morpho structurales, héritées de l'histoire géologique du bassin :

- ✓ Les deux boucliers brésiliens et guyanais sont constitués de roches précambriennes
- ✓ La chaîne des Andes est caractérisée par un relief montagneux
- ✓ La plaine amazonienne comporte une importante couche sédimentaire piégée depuis le Cénozoïque

Ces unités occupent respectivement 44%, 11% et 45% de la superficie totale du bassin versant (Filizola, 2003).
Les principaux fleuves formateurs de l'Amazone présentent des caractéristiques hydrographiques liées aux trois unités morpho structurales. Les deux principaux tributaires d'origine andine, le Rio Maranon-Solimoes et le Rio Madeira, signent leurs apports à l'Amazone par des eaux chargées en matières dissoutes et particulaires (Sioli, 1984 ; Nordin et Meades, 1985 ; Richey et al, 1986). Les fleuves, drainant les bassins situés sur les boucliers, sont au contraire très pauvres en matières en suspension et très riche en matière organique. Bien que le relief soit très contrasté (de 0 à 6000 m), au niveau de la plaine amazonienne, qui s'étend depuis le piedmont de la chaîne des Andes jusqu'à l'océan atlantique, la pente moyenne est de 1 à 2 $cm.km^{-1}$(Sioli, 1984).

I.1.2. Climatologie

Le bassin amazonien est soumis à un climat tropical avec un régime de précipitation essentiellement d'origine océanique et reçoit en moyenne 2460 cm.an^{-1}(Salati et al, 1978 ; Nimer, 1991, Hiez et al, 1991 ; Molinier et al, 1992). Sur la majeure partie du bassin, on peut distinguer une saison « sèche » et une saison « humide ». Des disparités sont cependant observées :

- ✓ Les minima observés sur le bassin sont de 300 mm.an^{-1} dans certaines vallées andines du Pérou et de la Bolivie
- ✓ Les maxima, observés dans les régions équatoriales humides, peuvent atteindre dans des cas extrêmes jusqu'à 6000mm.an^{-1}

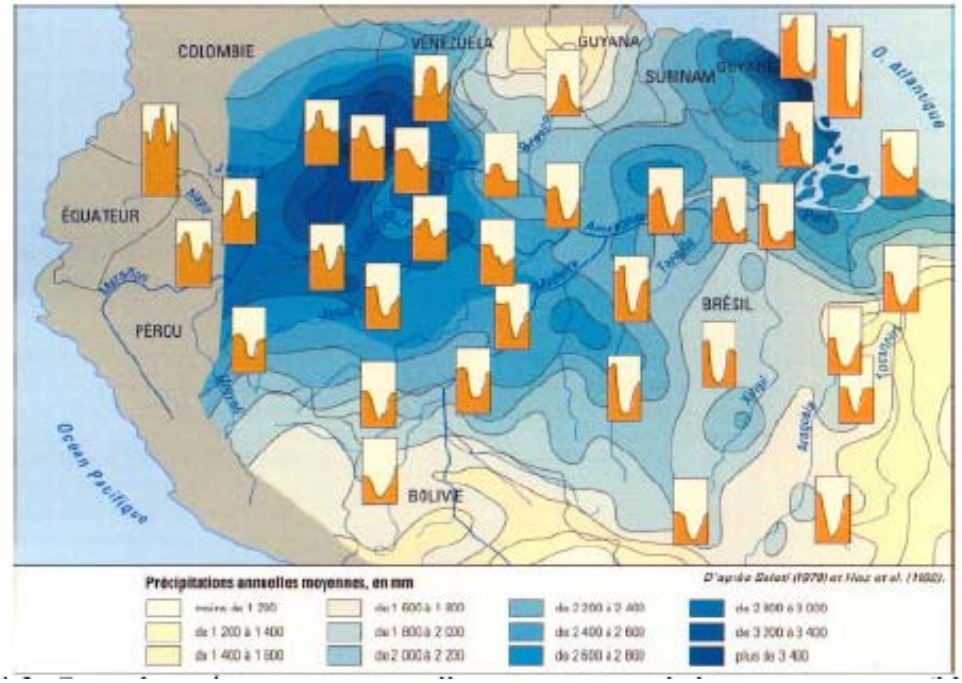


Figure 1.2. : Carte des précipitations annuelles moyennes sur le bassin amazonien (Molinier et al. 1992)

Une importante hétérogénéité saisonnière existe entre le nord et le sud du bassin. Au nord de l'Equateur, dans le bassin du Rio Negro, le maximum saisonnier est observé de mai à juillet, alors qu'au sud, le maximum de pluviométrie est enregistré de décembre à mars.

Dans le bassin amazonien, les caractéristiques majeures des zones d'inondations résident dans leur dynamique hydrologique engendrée par la variation du niveau des eaux du fleuve, qui conditionne leurs interconnexions au cours principal.

I.1.3. Hydrologie

En terme de débit, l'Amazone est le fleuve le plus important au monde, avec un module inter annuel de 209 000 m^3/s (Molinier et al. 1992). Une de ses singularités est qu'il ne lui reste que 60 mètres de dénivelé sur les 3100 km à parcourir jusqu'à son embouchure, expliquant ainsi que l'effet de l'onde de marée se mesure sur une très longue distance en amont (jusqu'à 900 km).

Les apports hydriques des affluents de l'Amazone dans la partie sud du bassin (rive droite) et la partie nord (rive gauche) sont respectivement de 46% et 54%. La variabilité climatique est sensiblement différente au sud et au nord du bassin. En effet, les pluies sont plus importantes au sud et le maximum de pluviométrie se situe entre les mois de janvier et de mars. Dans le nord du bassin, où les pluies sont très abondantes, le maximum de pluviométrie est observé du mois de mai au mois de juillet. Les crues des affluents de l'Amazone sont étroitement liées à l'hétérogénéité spatiale de ces régimes pluviométriques. Ainsi, pour les affluents de rive droite, le pic de crue se situe avant le mois de juin, alors que les affluents de rive gauche entrent en période de crue systématiquement après ce même mois de juin.

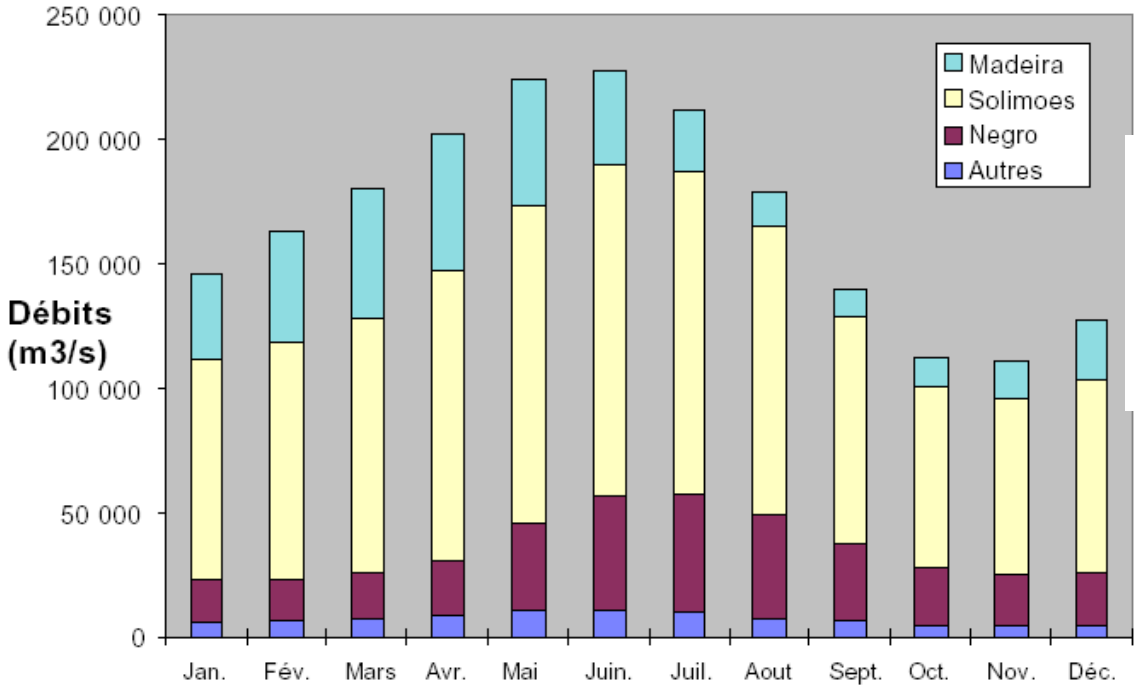


Figure I.3. : Décomposition du diagramme de crue de l'Amazone à Obidos (Guyot et al, 1999)

I.1.4. Sédimentologie

Le flux de matière en suspension exporté par l'Amazone à la zone estuaire a été estimé entre 600 à 800.10^6 t/an à partir d'un réseau décadaire de mesure, mis en place dans le cadre du programme Hybam et du réseau brésilien (Filizola, 2003), ceci à permis de mettre en évidence les zones de production sédimentaire, établi dans le versant oriental de la cordillère, une zone de transfert ainsi qu'une zone de dépôt sédimentaire, intégrant la partie de la plaine amazonienne.

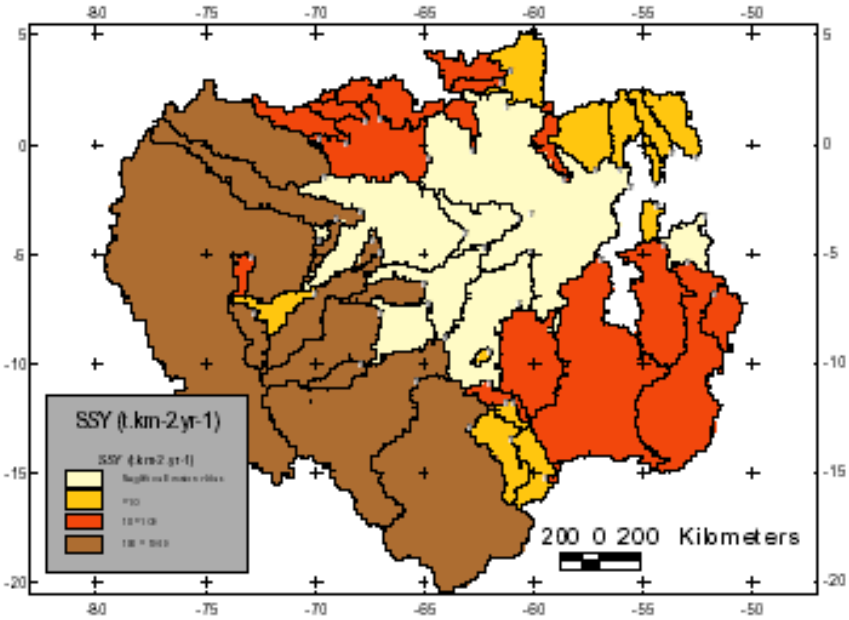


Figure I .4.: Distribution des flux sédimentaires estimés dans tout le bassin amazonien

Les flux négatifs, en jaune clair, correspondent à une zone de dépôt sédimentaire.

I.1.5. Pédologie

Les couvertures de sol d'Amazonie brésilienne du groupe alter do chao, largement représenté en Amazonie, sont probablement constituées par des sédiments datant du crétacé ou du début du tertiaire (Puzter, 1984 ; Horbe et al, 2003). L'intense altération chimique sous climats tropicaux a entraîné la formation de sols ferrallitiques (Kronberg et al, 1979). Le manteau d'altération est uniformément constitué d'argile de type kaolinite, à faible capacité d'échange, d'oxydes et d'hydroxydes de fer et

d'aluminium, d'un squelette quartzeux en proportion variables suivant la nature de la roche mère ou du sédiment, et accessoirement de quelques minéraux restants tel que l'anatase et le zircon (Bernoux, 1979). L'ensemble est fortement désaturé et acide.
Les matériaux originels sont constitués par des produits d'altération de sédiments mal classé et irrégulièrement stratifié du groupe « barreiras ». Le modelé est celui d'un plateau disséqué par des vallées à fond plat (Soubiès, 1984).
Les cartes pédologiques (RADAMBRASIL, 1976, 1978 ; EMBRAPA, 1979) indiquent la dominance des « latossolos amarelos distraficos argilos », correspondant à des sols ferrallitiques fortement désaturés de l'horizon B, typiquement jaune. La végétation est en général, dans la partie de la plaine amazonienne, une forêt dense lorsqu'elle n'est pas soumise aux activités d'origine anthropique (extraction du bois, culture, mines…)
De plus, les sols de zone d'inondation ou varzeas en portugais sont soumis au processus d'hydromorphie, qui se traduit par une accumulation de matière organique en surface, mais aussi par des marques de réduction, d'oxydation et de redistribution des composés du fer en particulier. Dans certain cas, outre les marques pré-citées, se produit une décoloration ou un jaunissement, et au moment des inondations, se constitue une nappe perchée et des poches d'eau dans les décimètres supérieurs du sol.

I.1.6. Biogéochimie

De nombreuses études géochimiques (Gaillardet et al, 1997 ; Konhauser et al, 1994 ; Seyler et Boaventura, 1998) ont été menées sur le bassin versant de l'Amazone ainsi que sur ses principaux sous bassins.

La variabilité temporaire des concentrations en éléments traces reflètent soit sa source, soit la remobilisation, soit les processus biologiques de l'amazone ou des lacs interconnectés. Il peut arriver que plusieurs processus se produisent en même temps.
Les diversités lithographique, météorologique géomorphologique et hydrologique sont à l'origine de trois grandes classes d'eaux, distinguées par Sioli dès 1975 :

- les eaux blanches, originaires des Andes et fortement chargé en sédiments, de couleur ocre, sont fortement minéralisées et présentent de très faibles concentration en carbone organique et un pH neutre.
- les eaux claires, issues des boucliers brésiliens et guyanais, sont pauvres en matière en suspension. Limpides et de couleur vert jaune à vert olive, elles sont le siège de blooms phytoplanctoniques réguliers mais présentent de grandes hétérogénéités dans leur contenu en ions majeurs.
- les eaux noires drainent généralement des bassins forestiers et podzoliques, donc riches en matière organique dégradée de types acides humiques et fulviques, acidifiant très fortement le pH. Ces eaux sont transparentes et de couleur brune, très faiblement minéralisées et très peu chargées en suspension.

I.2. Présentation du cadre de l'étude : la plaine d'inondation de Curuaï

La Varzea de Curuaï se situe au Brésil (figure I.5.), dans l'état de Para, près d'Obidos.

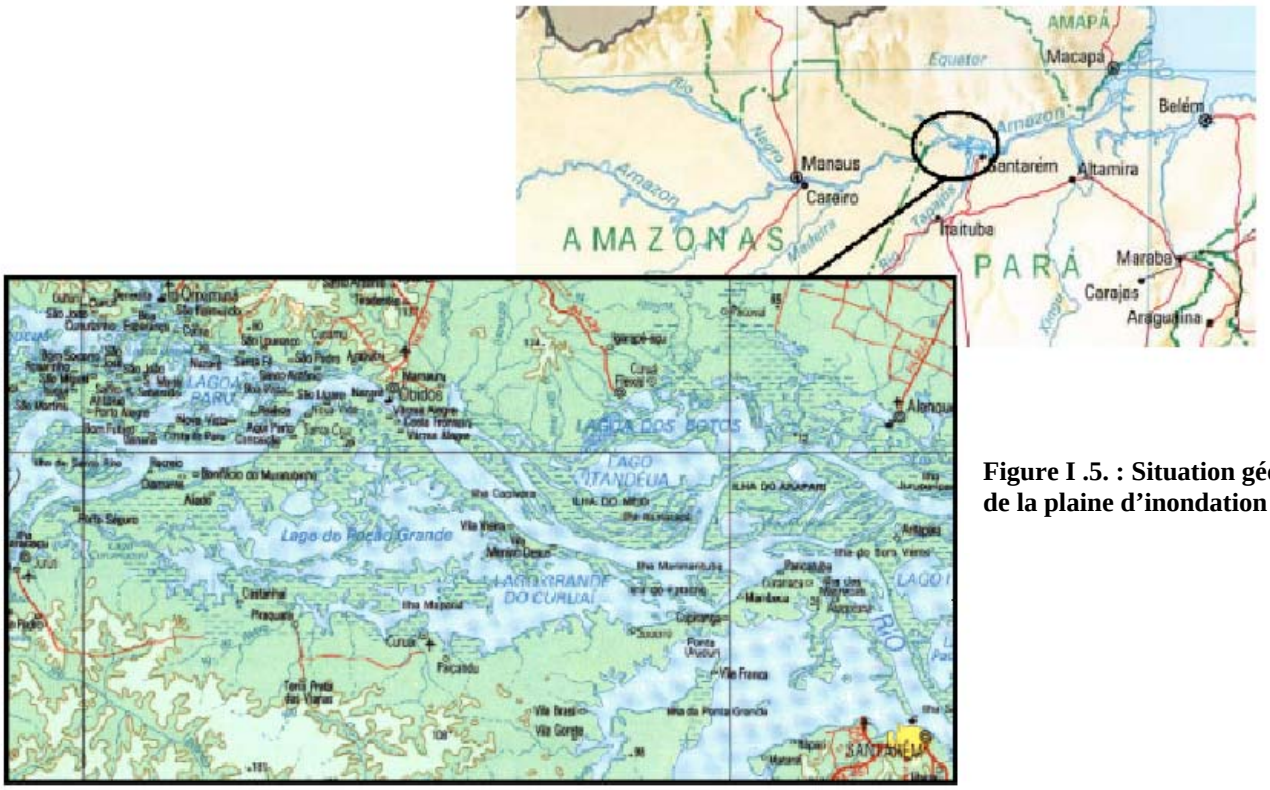


Figure I .5. : Situation géographique de la plaine d'inondation de Curuai

Elle est bordée au Nord, à l'Est et à l'Ouest par l'Amazone et au sud par la forêt tropicale (figure I.5.).

La superficie totale de la Varzéa est d'environ 3600 km^2, la surface des zones inondées entre 700 km^2 en étiage et 2300 km^2 en hautes eaux. Par la géomorphologie de ses lacs et chenaux d'inondation, elle est particulièrement représentative des zones inondables du cours moyen et inférieur de l'Amazone.

Situé à 900 km de l'océan et ayant une longueur totale de plus de 100 Km en rive droite du fleuve, la Varzea de Curuaï est constituée d'une vingtaine de lacs interconnectés et reliés au fleuve par plusieurs chenaux permanents ou intermittents (figure I.6.). On compte environ 16 lacs bien individualisés lors des hautes eaux. L'eau des ces lacs a trois sources distinctes : le cours principale de l'Amazone et les eaux de ruissellement sur le bassin versant local, ainsi que la pluie directe. On peut également prendre en compte la pluie directe car la surface inondée est importante.

La pluviométrie moyenne à Curuaï est de 2447 mm par an (moyenne obtenue sur les données de l'ANEEL-ANA entre 1990 et 1999). On peut distinguer deux saisons, l'une très pluvieuse de janvier à mai et une deuxième plutôt sèche de juin à décembre. Entre les hautes eaux (optimum en juin) et les basses eaux (minimum en décembre), l'amplitude de marnage est de l'ordre de 7m. (6,6 m)

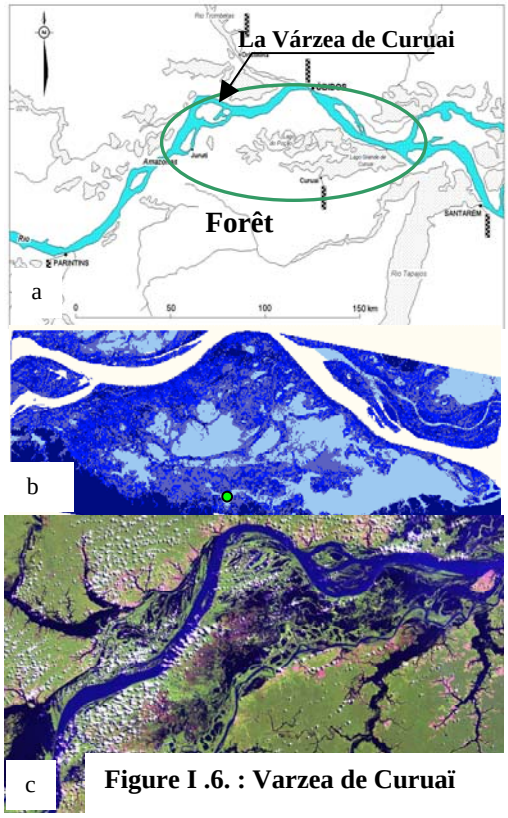


Figure I .6. : Varzea de Curuaï

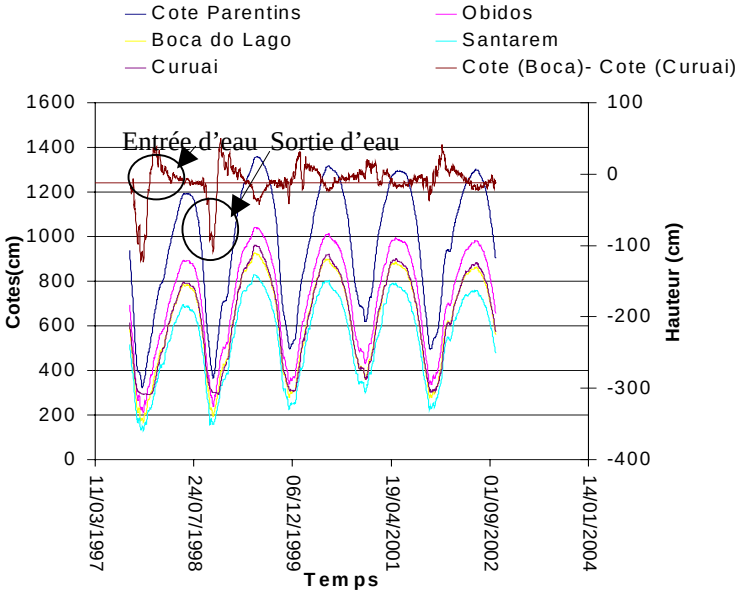


Figure I .7. : Variation de la cote du fleuve au niveau de la várzea

.

Les résultats de mesure des cotes sur le Varzea permettent de mettre en évidence l'évolution saisonnière de la cote et la relation entre la Varzea et l'Amazone : la variation de la cote du fleuve a un comportement relativement sinusoïdal, avec une phase de crue de fin novembre à juin et une phase de décrue de juin à décembre.

Les lacs, qui composent la Varzea, fonctionnent comme des réservoirs naturels. L'eau s'écoule du fleuve vers la Varzea pendant la phase de remplissage (de décembre à juin), y séjourne pendant plusieurs mois et s'y mélange à la pluie et aux apports par ruissellement du bassin versant local, puis à partir du pic de crue, une partie des eaux retenues dans les lacs rejoint le fleuve (entre juillet et octobre novembre) (Maurice Bourgoin et al, 2005).

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Les sols étudiés

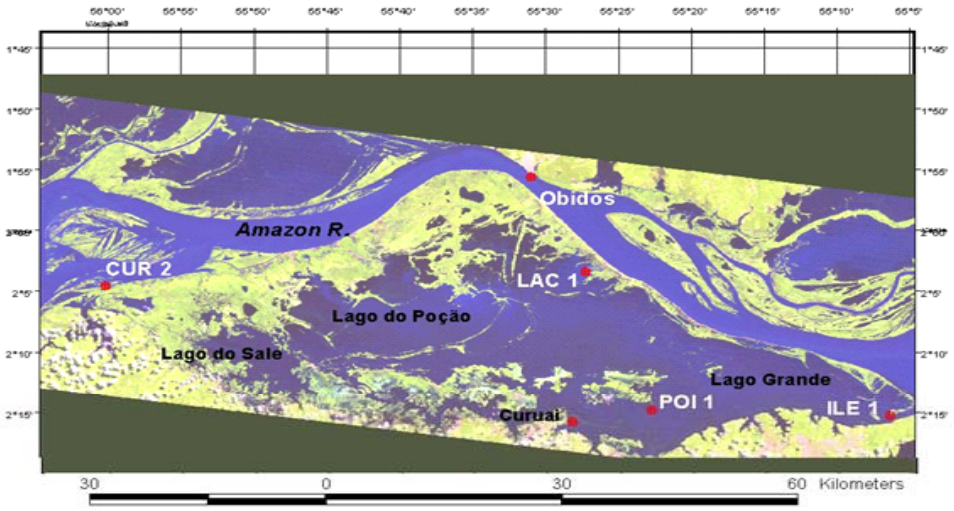
II.1.1. La mission d'échantillonnage

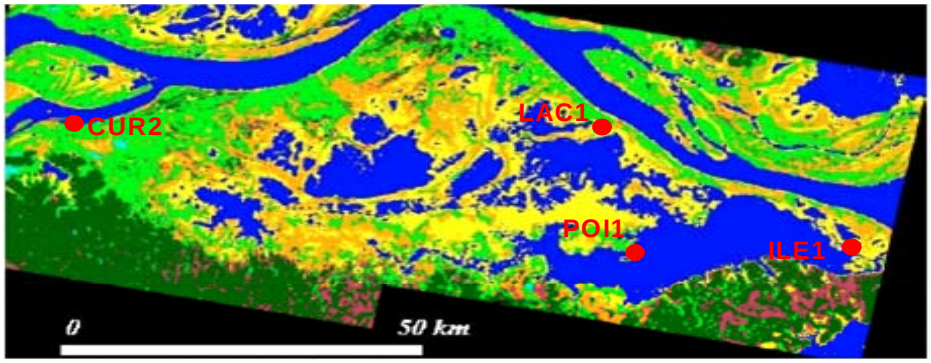
La campagne de prélèvement a été effectuée en novembre 2004, soit au cours de la saison sèche en étiage, à une période de référence indépendante des perturbations liées au remplissage de la varzéa et aux aléas climatiques. A cette période, les sols et sédiments présentent l'avantage d'être émergés facilitant donc leur prélèvement.

II.1.2. Sélection des échantillons

Des couvertures de sol d'Amazonie brésilienne, développées aux dépens de formations sédimentaires sablo-argileuses à argileuses du groupe alter do chao, ont été étudiées dans la plaine d'inondation de Curuaï. L'originalité de la jeune couverture pédologique de la plaine d'inondation de Curuaï tient dans le développement simultané de la géogénie et de la pédogenèse.

Les points de prélèvement étudiés (figureII.1.), se situent sur les berges des lacs composant la varzea. Les sites sélectionnés présentent des conditions identiques de climat, une végétation diversifiée et une morphologie de plateaux entaillés par le réseau hydrographiques. Les prélèvements ont été réalisés en saison sèche, au niveau minimal des eaux dans les lacs de la varzea. Les échantillons ont été prélevés à la tarière jusqu'à la profondeur (cf annexe 2). La description des différents sols étudiés est disponible en Annexe.





Forêt inondable
Végétation basse inondable
Prairie inondable
Forêt non inondable
Végétation basse non inodable
Eaux permanentes
Forêt toujours inondée

✓ ***ILE1***

Cet échantillon a été prélevé sur des prairies inondables, situées au milieu des deux seuls chenaux de sortie des eaux de la varzea vers l'Amazone et utilisées comme zone de pâturage en étiage. En saison sèche, la nappe libre apparaît autour de 200 cm.

✓ ***CUR2***

Cet échantillon provient d'un site localisé sur un bassin forestier inondable le long d'un « igarapé », assurant l'entrée de l'eau dans la varzea lors de la période de montée des eaux. A cette période, la nappe permanente est proche de la surface.

✓ ***POI1***

Cet échantillon est localisé sur un sol supposé être la formation alter do chao. La végétation est relativement pauvre, quelques arbres et beaucoup de végétation basse. Durant cette période, la nappe se stabilise autour de 150 cm de profondeur.

✓ ***LAC1***

Cet échantillon est localisé dans une zone de fort dépôt de sédimentaire. La végétation se limite à de vastes prairies inondables. A partir de 110 cm de profondeur apparaît la nappe permanente.

II.1.3.Choix des horizons et préparation des échantillons de sol avant analyse

II.1.3.1. Les horizons

Les échantillons de sols sélectionnés sont répertorié en annexe 2 où ils sont stockés.

II.1.3.2. Préparation des échantillons

La concentration des métaux dans les échantillons géologiques dépend fortement de la taille des particules, les plus grandes concentrant en général beaucoup moins d'éléments que les petites (Förstner et

Wittman, 1979 ; Amiard-Triquet et Amiard, 1980). Ainsi, un broyage suivi d'un tamisage fin permet de s'affranchir du biais granulométrique.
Tout d'abord, nous avons procédé à l'obtention d'un échantillon le plus représentatif possible de l'ensemble de l'horizon. Pour cela, chaque échantillon a été quarté, broyé et tamisé à 100µ. Un quart de l'échantillon quarté est broyé et tamisé, le reste est conservé pour des analyses ultérieures.
Cependant, au cours de cette étape, des mesures de contrôle ont été prises afin d'éviter d'éventuels problèmes de contamination :

- le quartage a été réalisé sur des feuilles de papier propres
- le broyage a été fait à la machine puis finalisé manuellement dans un mortier en agate
- le tamisage a été fait à l'aide d'un tamis en nylon

Le matériel a été soigneusement nettoyé à l'alcool avant et après utilisation. Pour le nettoyage du tamis, la poussière qui reste sur le tamis est d'abord enlevé à l'aide d'un système d'air comprimé, puis le tamis est nettoyé à l'alcool, rincé à l'eau milliQ et séché, avant de procédé au tamisage de l'échantillon suivant.

II.2. Méthodes analytiques

Toutes les manipulations, de la préparation des échantillons à leurs analyses, ont été effectuées au LMTG de Toulouse.
Tous les produits chimiques utilisés sont de qualité analytique reconnue. L'eau ultra pure (de résistivité 18,2 MΩ/cm) est obtenue grâce à un système de production combiné.
La « verrerie », en contact avec l'échantillon est nettoyée avec une solution au HCl 1N puis rincé à l'eau ultra pure.

II.2.1. Analyses pédologiques

II.2.1.1. Teneur en eau

La détermination de l'humidité est faite sur l'échantillon brut. La méthode la plus simple consiste à mesurer la perte de masse après que l'échantillon ait été chauffé à 105°C jusqu'à ce que sa masse séchée devienne constante. La teneur en eau d'un échantillon de sol est alors obtenue par différence de poids entre l'échantillon humide pesé dès le prélèvement et le même échantillon ayant subi un séchage à 105°C, les données sont ensuite ramenées à un pourcentage.
Cependant, il faut être conscient que cette méthode n'est pas spécifique de l'eau, et que de grandes erreurs systématiques par excès peuvent survenir dans des échantillons qui libèrent des produits de décomposition volatils autres que l'eau lorsqu'ils sont chauffés. De plus, cette méthode peut également conduire à des erreurs par défaut lorsqu'elle est appliquée à des échantillons contenant de l'eau sorbée.

II.2.1.2. pH

La mesure de pH, mesurée ex-situ à partir de l'échantillon sec non broyé, est réalisée à l'aide d'un pH-mètre à l'aide d'une électrode de verre combinée dans un mélange sol/eau dont les proportions sont 1/2,5.

II.2.2. Protocoles analytiques

La détermination des teneurs totales en éléments traces métalliques des sols nécessite une mise en solution. Chaque série de mise en solution comporte systématiquement un essai à blanc pour détecter une contamination éventuelle des réactifs, et deux échantillons de référence (GA : granit ; SJS : San Joaquin Soil) qui permettent de contrôler la qualité des analyses d'éléments traces. Le SJS est une référence en terme de sol tropicaux tandis que le GA est un bon référent pour certains éléments tels que dont le Zr que nous utiliserons ultérieurement dans le traitement des données.
Afin de minimiser les risques de contamination, l'étape de mise en solution a été effectuée en salle « blanche ».

II.2.2.1.Minéralisation par fusion

Après séchage, broyage et tamisage, on ajoute 100 mg d'échantillon de sol au 600 mg de métaborate de lithium dans un creuset en platine. Après homogénéisation manuelle, on chauffe le creuset pour faire fondre le mélange échantillon – fondant. Une fusion de 15 minutes à une température voisine de 1000°C permet l'obtention d'un verre visiblement homogène. Après refroidissement, la bille de verre est mis dans un pilulier de 150 mL rempli au tiers par HNO_3 10%. L'acide va dissoudre la bille de verre, processus qui va être accéléré par agitation avec un barreau aimanté. Après dissolution complète de la bille de verre, on ajoute 250 µL de H_2O_2 puis on complète à 150 mL avec une solution de HNO_3 à 10%. On procède ensuite à la dilution, puis au dosage par ICP-MS.
Cette méthode présente l'avantage de pouvoir mettre en solution tous les matériaux géologiques ; son inconvénient est qu'elle peut conduire à la perte d'éléments volatils.

II.2.2.2. Minéralisation par attaque tri-acide

Après séchage, broyage et tamisage, on prélève 100 mg d'échantillon dans un savillex. L'utilisation de H_2O_2, à froid, permet d'attaquer en douceur la quantité relativement abondante de matière organique sans que l'échantillon déborde du savillex. En effet, l'ajout de H_2O_2 doit être fait avec précaution, afin d'éviter la projection ou/et la perte de l'échantillon par effervescence. Une fois que l'effervescence a disparu, nous pouvons fermer les savillex et les placer sur plaque chauffante. Cette opération devra être répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'effervescence en ajoutant H_2O_2 et que le liquide obtenu soit clair.
HNO_3 est ajouté préalablement en tant qu'agent mouillant. Outre son fort pouvoir oxydant, HNO_3 est utilisé car les éléments qui le composent (H, N, O) sont ceux qui se retrouvent majoritairement dans l'échantillon nébulisé avant l'entrée dans la torche de l'ICP-MS.
On chauffe progressivement pour accélérer l'action oxydante combinée de H_2O_2 et HNO_3.
Après évaporation, HF, associé à HNO_3, est ensuite ajouté afin de procéder à la destruction du réseau silicaté en milieu fermé. On chauffe ensuite les savillex ouverts pour permettre l'évaporation de SiF_4, H_2SiF_6 ainsi que de l'excédent de HF jusqu'à l'obtention d'un échantillon sec. L'élimination totale de HF est essentielle pour la réussite de l'analyse parce que l'ion fluorure réagit avec plusieurs cations pour former des complexes particulièrement stables qui interfèrent avec leur dosage.
Suite à l'évaporation de HF-HNO_3, la reprise avec H_2O_2 est rendue nécessaire du fait de l'abondance de matière organique humifiée. On chauffe, de nouveau les savillex ouverts pour assurer l'évaporation puis on reprend l'échantillon avec une solution de HCl, qui assure la décomposition de la matière inorganique. Suite à une nouvelle évaporation, on reprend l'échantillon avec le mélange combiné de HF-HNO_3, suivi de 15 minutes d'ultrasons. La minéralisation effectuée, l'échantillon est repris une dernière fois avec 3 mL de HNO_3, puis il est dilué avant le dosage par ICP-MS.
Les sols étudiés constituent une matrice complexe, mélange alambiqué de minéraux résidus d'altération de la roche mère et du bassin versant, de minéraux néoformés (oxyhydroxydes de fer et de manganèse), de matières organiques brutes et humifiées (charbons…), d'apport de l'Amazone, ce qui justifie la difficulté rencontrée lors de la mise en solution par cette méthode, et par la même, explique la présence, encore en fin d'attaque, de résidus inattaquables.
Cependant, cette méthode permet de contrôler le processus de minéralisation, étape après étape, ce qui empêche les réactions violentes dues à l'oxydation de matière organique.

II.2.3. Techniques de dosage

II.2.3.1. Dosage par ICPMS

L'appareil, sur lequel nous avons travaillé est un ICP-MS Elan 6000 de Perkin – Elmer dont la limite de détection est de 0,01µg/L et dont l'erreur est inférieur à 5%. Le couplage torche à plasma – spectrométrie de masse (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry) est une technique permettant de doser en quelques minutes plus de 50 éléments de la classification périodique.

II.2.3.2. Dosage par spectrométrie d'absorption atomique

Afin d'éviter toute contamination de l'ICP-MS ainsi que la multiplication des dilutions, les concentrations en fer et manganèse ont été réalisées par spectrométrie d'absorption atomique de flamme, sur l'appareil

Perkin Elmer 5100 PC en mode absorption atomique. L'aluminium responsable de nombreuses interférences lors de l'analyse ICP-MS sera également dosé par absorption atomique.

II.3. Certification : attaque acide et fusion

Chaque série de mesure était accompagnée d'un essai à blanc permettant de détecter une pollution éventuelle des réactifs ou de l'environnement expérimental et analytique. Les dosage de blanc de chimie, très pour l'élément le plus concentré), n'ont pas été pris en compte pour la détermination des teneurs en éléments traces, que ce soit dans les standards ou dans les échantillons.

II.3.1. Sources d'interactions

II.3.1.1. Existence de minéraux réfractaires

	Fusion						Attaque		
élts	GA09 (µg/g)	GA car (µg/g)	Erreur (%)	SJS09 (µg/g)	SJS car(µg/g)	Erreur (%)	SJS (µg/g)	SJS car (µg/g)	erreur (%)
Zr	150,75	150 +/-12	0,00	142,83	160,00	-0,12	61,58	160,00	-1,60
La	42,40	40 +/-3	0,06	22,41	23,00	-0,03	22,17	23,00	-0,04
Dy	3,75	3,3 +/-0,3	0,12	3,23	3,50	-0,08	3,02	3,50	-0,16
Ti	2175,17	2280+/-60	-0,05	3082,21	3420+/-24	-0,11	3398,94	3420+/-24	-0,01

On observe une erreur < à 5 % entre les concentrations lues et les valeurs certifiées des échantillons étalons choisis, à savoir le SJS (© NIST) et le GA sauf pour Zr, Ti, Dy et La des échantillons minéralisés par attaque acide.
Le zirconium, le titane et les terres rares (dysprosium et lanthane), contenus probablement au sein de minéraux réfractaires, n'ont été que partiellement minéralisés lors des attaques acides. Par conséquent, pour ces éléments, il est préférable de prendre les mesures obtenues à partir des fusions.
Le dysprosium et le lanthane, seuls éléments représentatifs de la famille des terres rares et dont on dispose des concentrations certifiées dans les étalons, sont pris comme éléments représentatifs de l'ensemble des terres rares. Par conséquent, pour l'ensemble de cette famille, ce sont les résultats obtenus à partir des fusions qui seront pris en compte.

II.3.1.2. Contamination liée aux protocoles de minéralisation

Lors des attaques acides, l'utilisation de HCl apporte, dans la solution consécutive à la minéralisation, des ions Cl^-, source potentielle d'interférences polyatomiques. De plus, lors des phases d'évaporation, beaucoup de chlorures métalliques peuvent être perdus (As, Cr, Zn, Al, Mo, Cd, Sb, Sn, Pb, Th).
De même, l'utilisation de HF présente le désavantage d'être une source d'interférence polyatomique dans la torche de l'ICP-MS. Ainsi, lors de l'étape d'évaporation, on peut parfois perdre des éléments tel que Cr, As(III), Se, Ge, Sb(III), Re, Os et Hg. (Vernet et Govindaraju, 1993).
Cependant, cette méthode permet de contrôler le processus de minéralisation, étape après étape, ce qui empêche les réactions violentes dues à l'oxydation de matière organique.
Dans les fusions au métaborate de lithium, les fondants décomposent la plupart des substances étant donné la température élevée requise pour leur utilisation (900 à 1000°C) et la forte concentration de réactif en contacte avec l'échantillon. En effet, une contamination par les impuretés du fondant est possible, voire même accrue par la quantité relativement importante de fondant (6 fois la masse de l'échantillon) nécessaire pour mener la fusion à bonne fin. De plus, la solution aqueuse, qui résulte de la dissolution de la fonte a une teneur élevée en sel, ce qui peut engendrer des difficultés dans les étapes ultérieures de l'analyse. En outre, les températures élevées requises pour la fusion augmentent le risque de perte par volatilisation, ainsi les éléments volatils (Se, Cd, Pb…) sont mieux mesurés grâce à une mise en solution par attaque acide que par fusion. Enfin, le récipient dans lequel la fusion s'effectue est presque inévitablement attaqué par le fondant, il en résulte une contamination supplémentaire de l'échantillon.

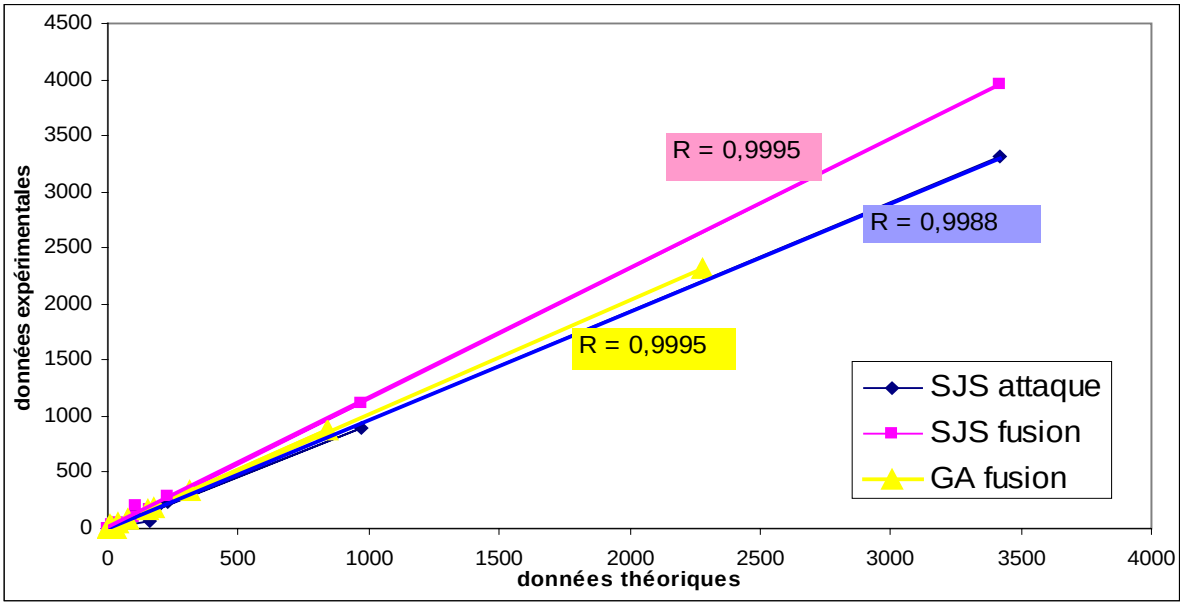
Cependant, de nombreuses substances courantes dans les sols, notamment les silicates et certains oxydes minéraux, ne sont attaqués que lentement, voire pas du tout, par les attaques acides, la minéralisation par fusion semble donc un bon compromis pour l'analyse de ces éléments, et la comparaison des résultats des minéralisations par les deux méthodes dans les étalons nous permet d'identifier les éléments interprétables après fusion et de ceux après attaque acide (tableau ci-après).

II.3.1.3. Reproductibilité vis-à-vis du standard

Les valeurs obtenues expérimentalement se sont révélées être en accord avec les valeurs certifiées des étalons, et ce quelque soit la méthode de minéralisation : attaque acide ou fusion. Seuls certains éléments ont été mieux détectés par une méthode plutôt que par l'autre, ce qui nous a permis une meilleure finalité dans le choix de nos résultats.

	Attaque		Fusion			
élts	SJS (µg/g)	erreur (%)	SJS03 (µg/g)	erreur (%)	GA08 (µg/g)	erreur (%)
Ti	3314,48	-0,03	3954,93	0,14	2322,28	0,02
Cu	29,21	-0,18	38,60	0,10	16,56	0,03
Zn	153,53	0,31	205,10	0,48	86,75	0,08
Rb	94,27	-0,02	108,94	0,12	180,24	0,03
Sr	233,29	0,01	289,76	0,20	343,53	0,10
Zr	60,05	-1,66	169,28	0,05	160,94	0,07
Ba	903,32	-0,07	1123,39	0,14	884,27	0,05
La	21,62	-0,06	27,63	0,17	45,27	0,12
Ce	43,18	0,03	52,38	0,20	84,94	0,11
Dy	2,77	-0,26	3,92	0,11	3,69	0,11
Pb (4 isotopes)	18,63	-0,01	25,85	0,27	34,09	0,12
U	3,07	0,02	4,08	0,26	5,21	0,04

Après avoir défini élément par élément la meilleure méthode de minéralisation, on a testé la corrélation entre les données théoriques de chacun des standards et les données expérimentales obtenues.



Les corrélations entre données expérimentales et données théoriques s'avèrent excellentes ; les écart-types sont < 5% sauf pour le Zn et le Ni. Les attaques acides ont donné de meilleurs résultats (droite de corrélation présentant une pente proche de 1).

II.3.1.4. Choix des résultats

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment, les valeurs des teneurs en plomb et en cadmium seront celles mesurées à partir d'une minéralisation par attaque acide. Pour les autres éléments, le titane, les terres rares et surtout le zirconium on préfèrera les valeurs obtenues à partir des fusions au métaborate de lithium.

III. RESULTATS

Les teneurs naturelles en éléments traces métalliques dans les sols dépendent de caractères liés aux éléments mais également aux sols. Les paramètres sélectionnés traduisent au mieux les processus de redistribution et de rétention des éléments traces métalliques, ainsi que le milieu physico-chimique dans lequel se passent ces processus. Les paramètres considérés permettent d'exprimer les relations entre les teneurs en éléments traces et le contenu tant minéralogique qu'organique, et reflètent les processus de migration et d'oxydoréduction.

III.1. Caractérisation pédologique et minéralogique des échantillons

La description des profils en annexe 2 permet de restituer les échantillons dans les différents profils.

III.1.1. Analyses pédologiques

III.1.1.1. Description pédologique

- ✓ ***ILE1***

Peu évolué, ce sol a une structure meuble et sableuse. En surface, des conditions réductrices donnent un horizon sec à textures bleu ocre. En profondeur, un horizon gris clair traduit un processus d'appauvrissement des constituants colorant le sol. Ainsi, lorsque le sol est engorgé par l'eau, le fer, élément colorant fortement le sol, est réduit à l'état ferreux et devient mobile.
A partir de 175 cm, l'eau libre apparaît entre les grains de sable, formant ainsi un horizon constant avec ou sans litage.

- ✓ ***CUR2***

La pédogenèse actuelle s'exerce principalement sur un matériau d'apport récent, et globalement, il a été observé un profil peu différencié de limon argileux, à taches bruns à bruns noirs diffuses. Malgré l'importance de l'apport de litière, elle ne s'accumule pas notablement. Du fait de la submersion temporaire du sol, il a été remarqué une oxydation rouge progressive dans les horizons de surfaces quand la végétation colonise intensément les sols ; et en profondeur, on a une argile gris bleu, mettant en évidence la présence de fer à l'état ferreux, ainsi que l'apparition d'un plan de litage. Entre 60 et 100 cm de profondeur, la zone de battement de nappe est responsable de l'alternance des périodes d'oxydation et de réduction de certains éléments dont les changements les plus spectaculaires sont ceux du fer et du manganèse. L'activité biologique est maximale dans les horizons de surface et décroît plus ou moins vite avec la profondeur.

- ✓ ***POI1***

En profondeur, peut être la présence de relique de l'Alter do chao, le matériau est une argile bariolée, rouge et souvent indurée. Sur l'ensemble du profil, on a une alternance d'horizon sableux et d'argile lourde. La prédominance d'horizon bariolé, présentant une association de zones grises et de zones rouille, signe le processus d'hydromorphie important qui a lieu sur tout le profil. On est en présence d'un sol rédoxique alternant entre périodes d'oxydation et périodes de réduction. La zone de battement de nappe apparaît entre 90 et 160 cm.

- ✓ ***LAC1***

La texture de l'ensemble est lourde, et la consistance de l'argile, ferme et pâteuse. Dans les horizons de surface, des couleurs gris clair traduisent l'existence de processus d'appauvrissement des constituants colorant le sol, et notamment par la migration du fer vers des horizons plus profond. En profondeur, on a un gley gris vert, signe d'un horizon réductique et où la réduction est permanente. Cette couleur traduit l'existence d'un milieu engorgé par l'eau dont le potentiel rédox baisse progressivement sous l'action des microorganismes du sol jusqu'à permettre la réduction du fer férrique en fer ferreux. En surface, l'activité biologique est maximale et décroît avec la profondeur. L'abondance des horizons bariolés met en évidence des conditions hydromorphes particulièrement marquées ; la zone de battement de nappe apparaît entre 30 et 100 cm.

III.1.1.2. Humidité

La connaissance de l'humidité de surface des premiers centimètres du sol a un intérêt direct sur la dynamique et l'état de l'eau dans les profils des différents sols. Dans ces sols de plateau, une grande partie de l'eau percole rapidement à travers les horizons de surface d'où un appauvrissement net dans les 60 premiers centimètres du sol, et au-delà de 70 à 80 centimètres de profondeur, l'eau percole verticalement et régulièrement, sauf pour CUR2 et ILE1.

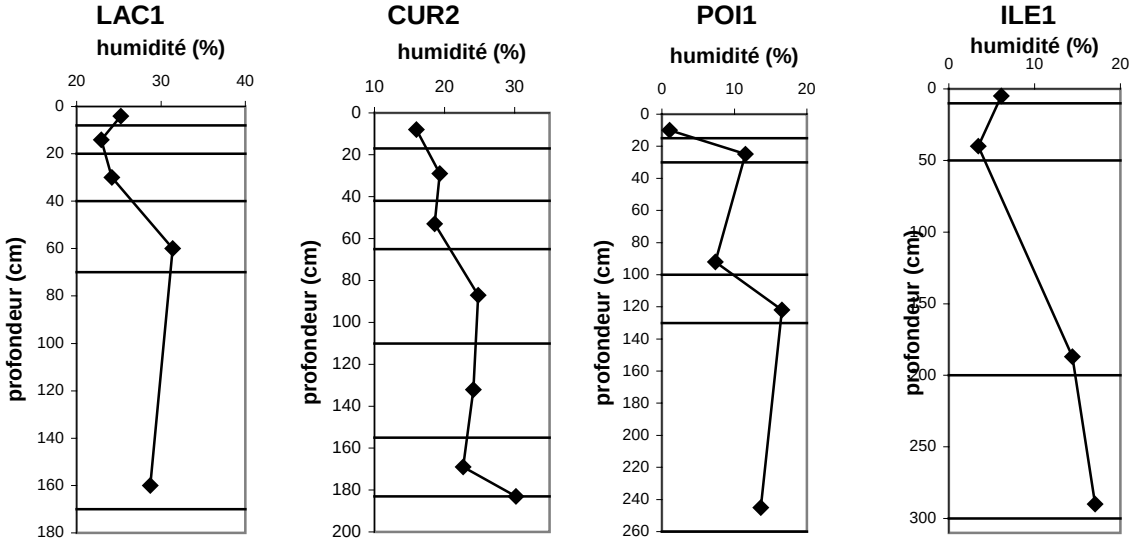


Figure III.1. : Teneur en eau (%) en fonction de la profondeur (cm)

A la différence des autres sols, CUR2 a une dynamique beaucoup plus atténuée. La présence d'un couvert forestier assure la conservation et le renouvellement de la couche d'humus, ce qui justifie un degré d'humidité plus élevé en surface par rapport aux autres sols, qui sont essentiellement couverts par des prairies.

La plus faible humidité des sols en surface augmente la minéralisation de certains éléments, et permet notamment la migration vers la surface du fer.

III.1.1.3. pH

La connaissance du pH permet de se faire une idée rapide du taux saturation en base, de l'état du complexe absorbant, de la nature de la matière organique et des conditions de mobilité de certains éléments tel que le fer, le manganèse.

On observe des pH acides à neutres dans tous les profils sauf dans les derniers horizons de ILE1. En surface, la présence d'humus et de matière organique explique des pH acides mais les fortes valeurs mesurées en profondeur du profil situé sur une île dans le chenal de sortie du système ont une autre origine.

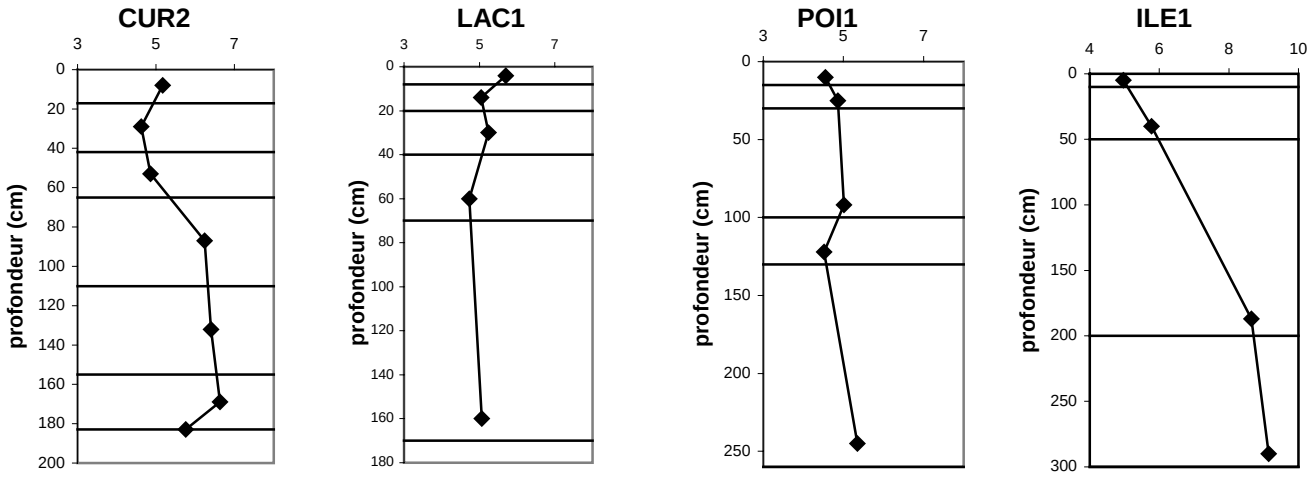


Figure III.2. : pH en fonction de la profondeur (cm)

III.1.2. Analyse minéralogique

L'étude diffractométrique aux rayons X a été réalisée à l'aide d'un SPS 120 INEL (condition d'analyse anticathode cobalt et un temps d'analyse de 20 min) sur l'ensemble des échantillons broyés à 100 µm. Les conditions d'analyse sont les suivantes : une anticathode au cobalt et un temps d'analyse de 20 min. L'ensemble des pics déterminés et considérés montre les résultats suivants :

- 14 à 14,2 A : (001) chlorite
- 10 A : (001) illite ou micas
- 7,1 à 7,2 A : (001) kaolinite et (002) chlorite
- 5 A : (002) illite
- 4,2 A : quartz
- 3,5 A (002) kaolinite et (003) chlorite
- 3,3 A : quartz
- 3,2 A : feldspath

L'ensemble des diffractogrammes indique que tous les échantillons sont dominés par une minéralogie silicatée. Dans les 4 sols étudiés, on trouve la dominance du quartz associé à des feldspaths et des phyllosilicates (chlorite, kaolinite, mica et/ ou illite). La diffraction des rayons X surestime les proportions de quartz. Ainsi, il est impossible de faire une estimation qualitative des proportions des différentes phases initiales. Cependant, les intensités des pics des phyllosilicates sont extrêmement variables et s'avèrent être corrélée avec la texture et par la même à la granulométrie de l'échantillon : les textures sableuses n'ont pas ou peu de phyllosilicates tandis que l'on observe des pics plus intenses de phyllosilicates pour les échantillons à texture argileuse.

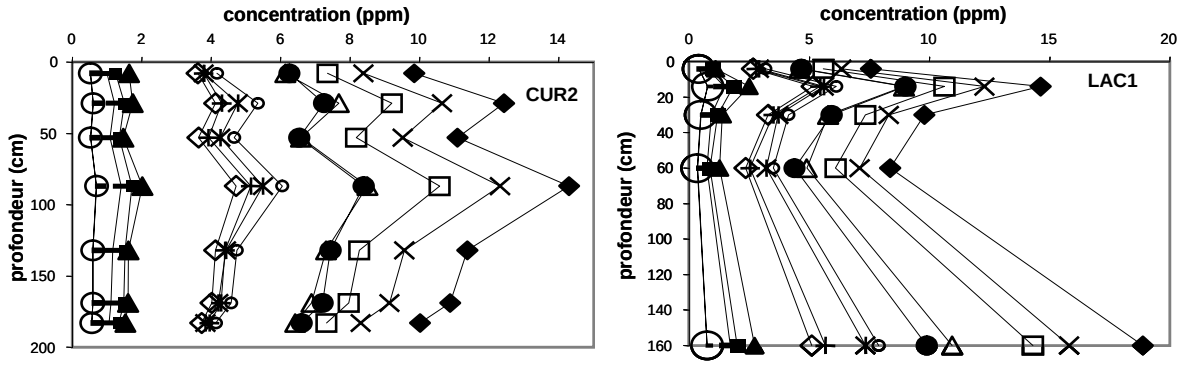
III.2. Présentation des profils de concentration

Les teneurs en éléments traces dans un sol résulte de la chimie de la roche, de l'évolution pédogénétiqque de ce matériau parental et de ces apports extérieurs. Dans le cas présent, les contributions de l'Amazone ont joué un rôle majeur. Les apports directs de suspension de l'Amazone, qui se déposeront dans les zones d'inondation sont d'origine andine.

Les divers profils de concentration obtenus vont être présentés par groupe d'éléments ayant le même comportement ou la même gamme de concentration selon la profondeur, en partant du fond vers la surface.

III.2.1. Les terres rares

Les concentrations en terres rares sont représentées en fonction de la profondeur de sol, ces dernières ont un comportement chimique « cohérent » avec la granulométrie. La présence de fines particules et notamment d'argile entraîne une augmentation des teneurs en terres rares tandis que la dominance de particules plus grossières telle que les sables entraîne de plus faibles concentrations.



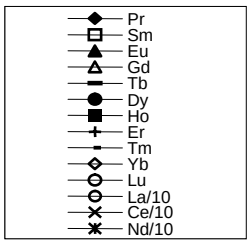
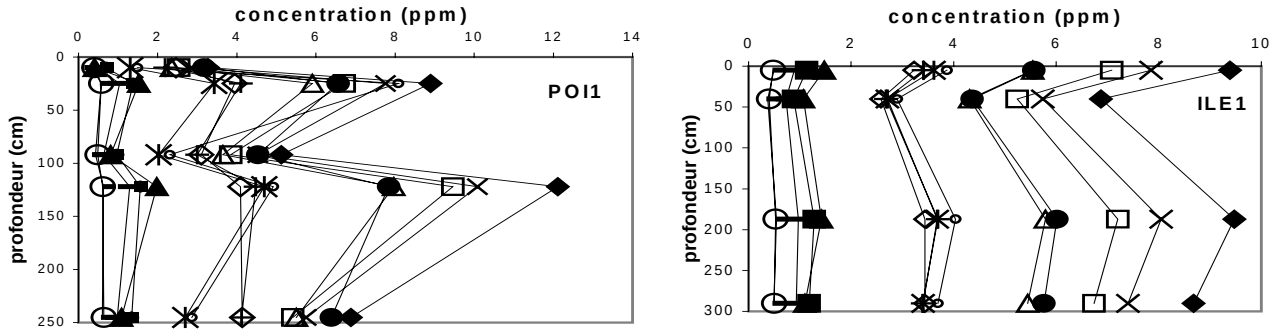


Figure III.3. : concentration (ppm) en fonction de la profondeur (cm)



III.2.2. Les éléments majeurs

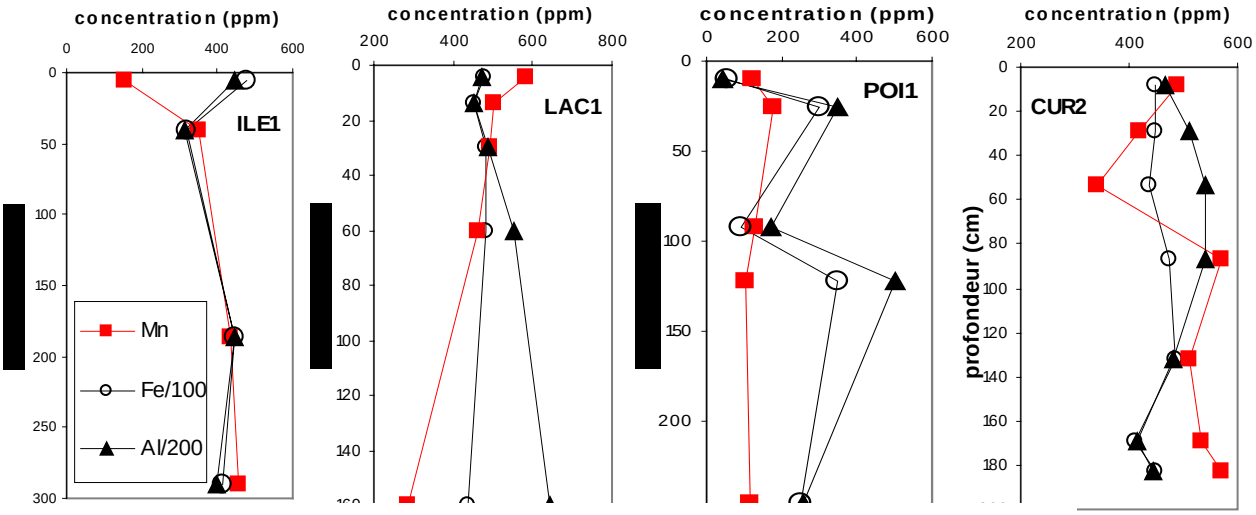


Figure III.4 : concentration (ppm) en fonction de la profondeurr (cm)

Les concentrations en éléments majeurs (Al, Fe et Mn) sont représentées (figureIII.4.) en fonction de la profondeur. Dans 3 des 4 types de sol étudiés : POI1, ILE1 et CUR2, les concentrations en Al et Fe présentent des profils identiques à ceux des terres rares des sols correspondants. Par conséquent, on en déduit que le facteur principal de la distribution de Al et Fe est la granulométrie

LAC1 présente, quant à lui, des profils singuliers en éléments majeurs. Des concentrations constantes sont observées en profondeur pour Al et Fe, et de faibles concentrations en subsurface.

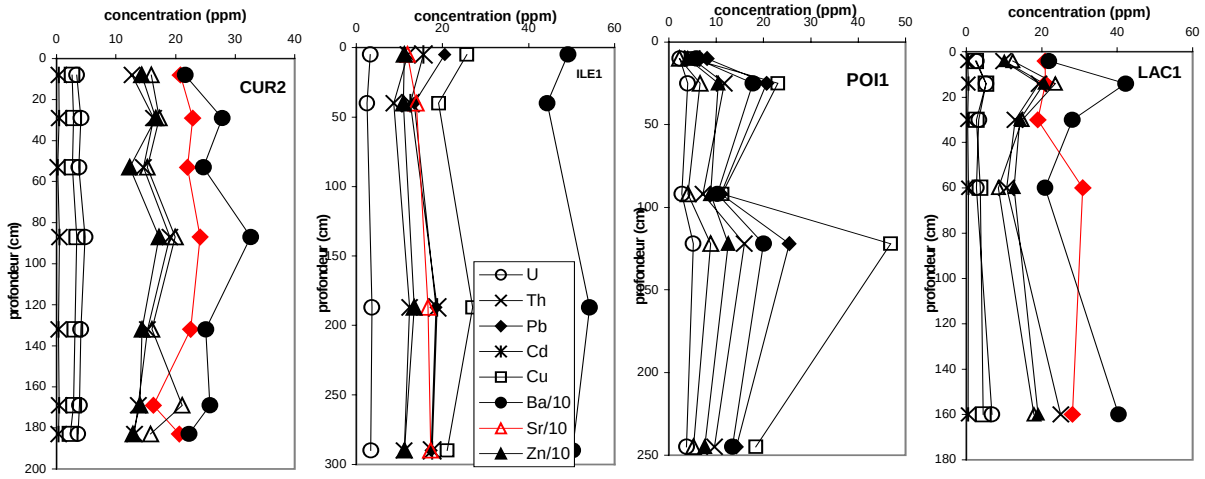
Le Mn, quant lui, présente un profil unique et ce quelque soit le type de sol considéré. Des concentrations très faibles ont été observées pour tous les sols. La dynamique particulière de cet élément sera développée ultérieurement.

III.2.3. Les éléments traces

Concernant les éléments traces, et notamment U, Th, Zn, Cu et Ba, des évolutions de concentrations similaires sont observés entre les concentrations en ces éléments et les teneurs en terres rares, en Fe et en Al. La concentration en Cd, est, quant à elle, soit très faible soit inférieure aux limites de détection.

Quelques anomalies ont été observées, notamment au niveau des concentrations en Pb les sols CUR2 et LAC1.

L'anomalie liée au Pb ne peut en aucun cas être reliée aux variations des teneurs en éléments Fe et Al.



· **Figure III.5. : concentration des éléments traces (ppm) en fonction de la profondeur (cm)**

III.3. Normalisation

III.3.1. Choix des normalisations : Zr ou Ti

Certains éléments sont considérés comme des éléments invariant dans les sols, c'est notamment le cas de Ti, Sr, Zr…D'après E. Balan et al (2001), le zircon est un élément d'origine lithogénique stable dans les profils de sols tropicaux, c'est-à-dire que ce dernier est insoluble et ne participe pas aux processus biogéochimiques du sol. De plus, des études ont montrées que dans les formations pédologiques très altérés comme l'Amazonie, le zircon pouvait être considéré comme conservatif (Balan et al, 2001) Du fait de son faible taux d'altération dans ce type de sol, le zircon est un bon candidat à la normalisation, ce qui nous permet de nous affranchir des apports.

III.3.2. Echantillon de référence

Le sol est un continum dont les propriétés varient dans l'espace et dans le temps. Il est impossible de mesurer l'ensemble des propriétés des sols en chaque point de l'espace. Par conséquent, pour évaluer la contribution de l'Amazone, des références ont été nécessaires non seulement par rapport à l'état des sols mais aussi par rapport aux processus qui s'y déroulent. Le choix des échantillons de références est donc crucial dans la mesure où toutes les interprétations découlent de ce choix. Ont été choisit :

- une série dont l'échantillon de référence est un sédiment prélevé sur le même site que le sol étudié
- une série dont l'échantillon de référence correspond aux matières en suspension de l'Amazone (J. Gaillardet et al, 1993)
- une série dont l'échantillon de référence correspond à la formation alter do chao (Balan et al, 2004), c'est-à-dire à la composition de la roche mère du bassin versant étudié

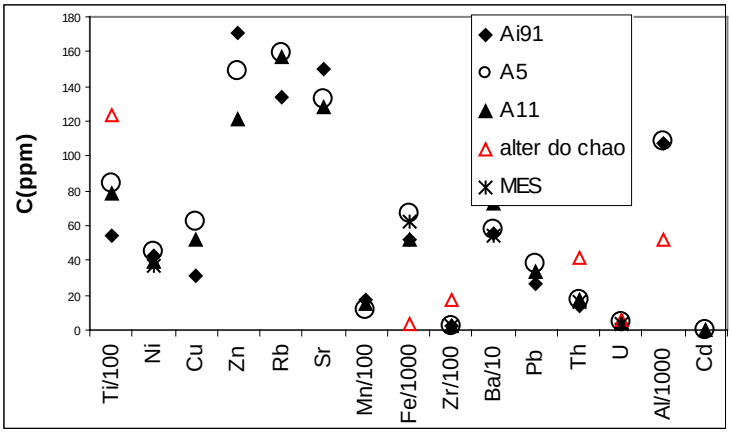


Figure III.6. : Représentativité des résultats

Compte tenu de la similarité des résultats obtenus avec les sédiments et les MES, seulement deux types de normalisation seront présentées : l'une avec les sédiments et l'autre avec l'alter do chao.

III.3.3. Appauvrissements en éléments métalliques vis-à-vis des sédiments

Les figures (III.7. et III.8) présentent les profils normalisés au Zr contenu dans des dépôts de sédiment proche des échantillons de sol prélevé en fonction de la profondeur.

III.3.3.1. Les éléments majeurs

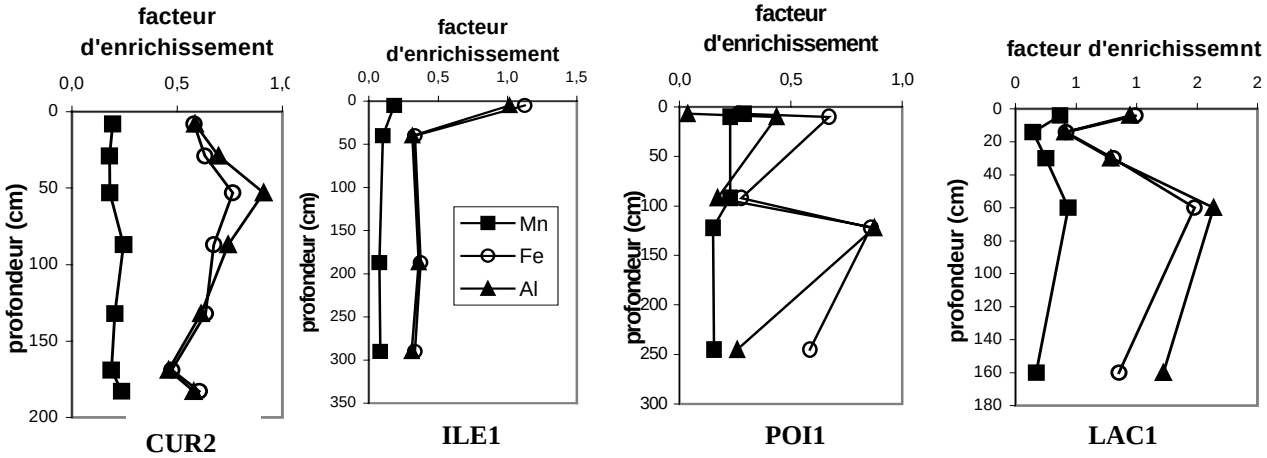


Figure III.7. : Facteur d'enrichissement des éléments majeurs (normalisation au Zr du sédiment) en fonction de la profondeur

Pour 3 des 4 sols : POI1, CUR2 et ILE1, les éléments majeurs présentent un appauvrissement global largement asservi à la constitution du sol. Seul LAC1 montre un léger enrichissement. Seul, le Mn est profondément appauvri, et possède par conséquent un profil très linéaire.

III.3.3.2. Les éléments traces

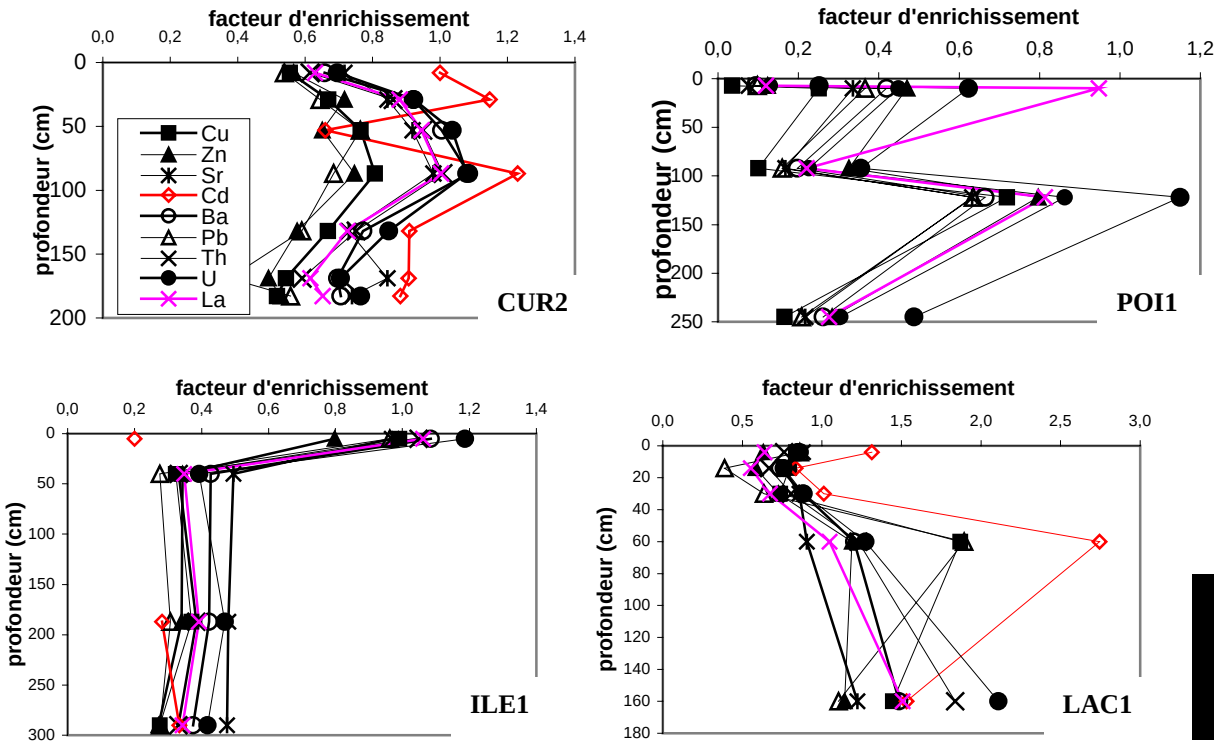


Figure III.8: facteur d'enrichissement des éléments traces (normalisation au Zr sédiment) en fonction de la profondeur (cm)

Sur chaque type de sol, tous les éléments ont un profil relativement similaire entre eux, à l'exception du Cd, qui est largement enrichi en LAC1 par rapport aux références sédimentaires et sur CUR2 où horizons 2 et 4 sont enrichis tandis que tous les autres sont appauvris.

III.3.4. Enrichissements métalliques vis-à-vis de l'alter do chao

Les figures (III.9) présentent les profils normalisés au Zr contenu dans les formations de type alter do chao en fonction de la profondeur.

Bien que les profils gardent la même allure qu'avec la normalisation au sédiment, on observe des enrichissements remarquables pour la totalité des éléments et ce sur l'ensemble des sols. Par conséquent, on peut penser que les sols prélevés correspondent davantage à une succession de dépôt de sédiment qu'à des sols de type alter do chao car les phénomènes pédogénétiques sont plutôt responsable d'appauvrissement que d'enrichissement..

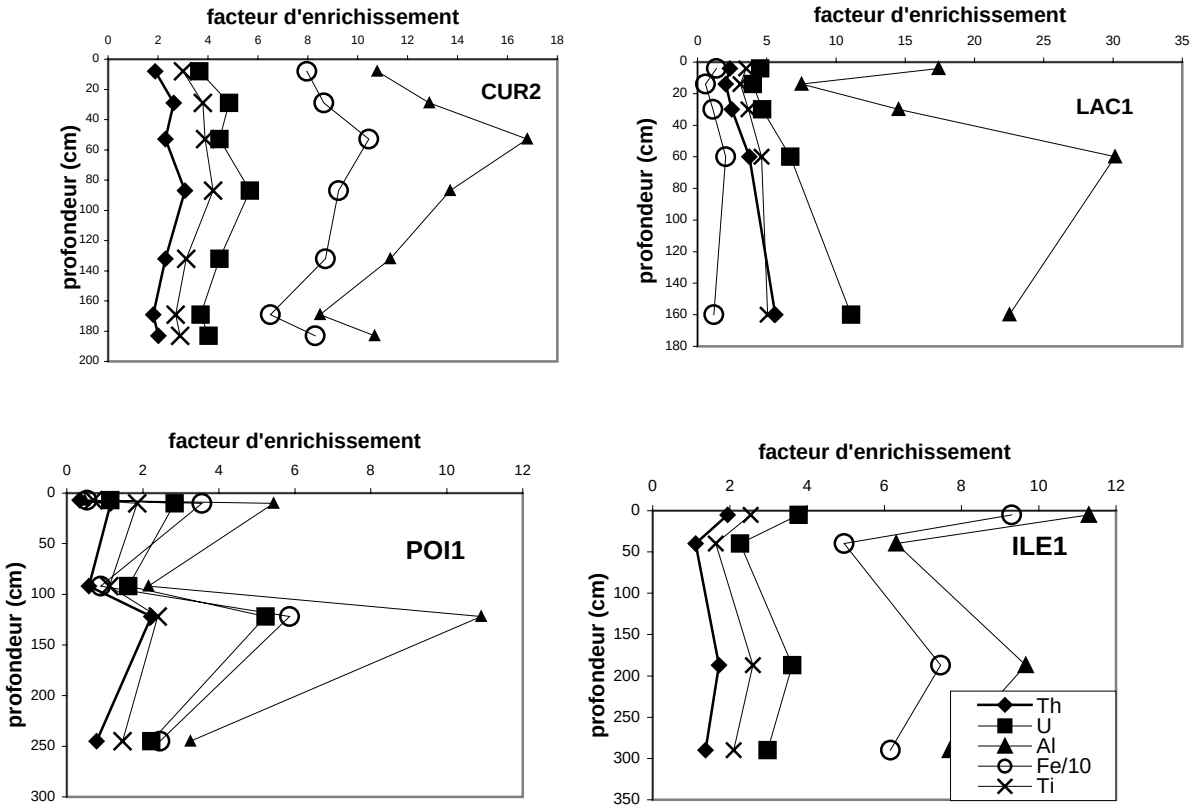


Figure III.9. : Facteur d'enrichissement (normalisation Zr alter do chao) en fonction de la profondeur (cm)

III.4. diagrammes de terres rares

Les figures (IV.1.) présentent le spectre de terres rares normalisées à la croûte terrestre pour tous les sols étudiés, et nous les avons comparés à celui obtenus pour les terres rares normalisées à la croûte terrestre des matières en suspension de l'Amazone obtenu près d'Obidos (Gaillardet et al, 1997).

Par soucis de comparaison, nous avons choisit de ne mettre que les terres rares décrites dans la publication de Gaillardet et al (1997). D'une manière générale, les spectres de terres rares obtenues montrent tous des enrichissements par rapport à la croûte terrestre et la forme des spectres et relativement homogène avec des enrichissements plus ou moins marqués en Sm et Eu..

IV.DISCUSSION

IV.1. Sol ou dépôt de sédiment

IV.1.1. Eléments géogénique et/ou pédogénétique

Nous avons vu que la normalisation par rapport à l'alter do chao indiquait un enrichissement important pour tous les éléments et tous les sols tandis que celle aux sédiments donnait quasiment le résultat inverse, c'est-à-dire un appauvrissement global plus ou moins important sauf pour LAC1.

Cela nous amener à penser que les échantillons étudiés appartiennent à des sols extrêmement jeunes, issus essentiellement de dépôt à une succession de dépôt de sédiment.

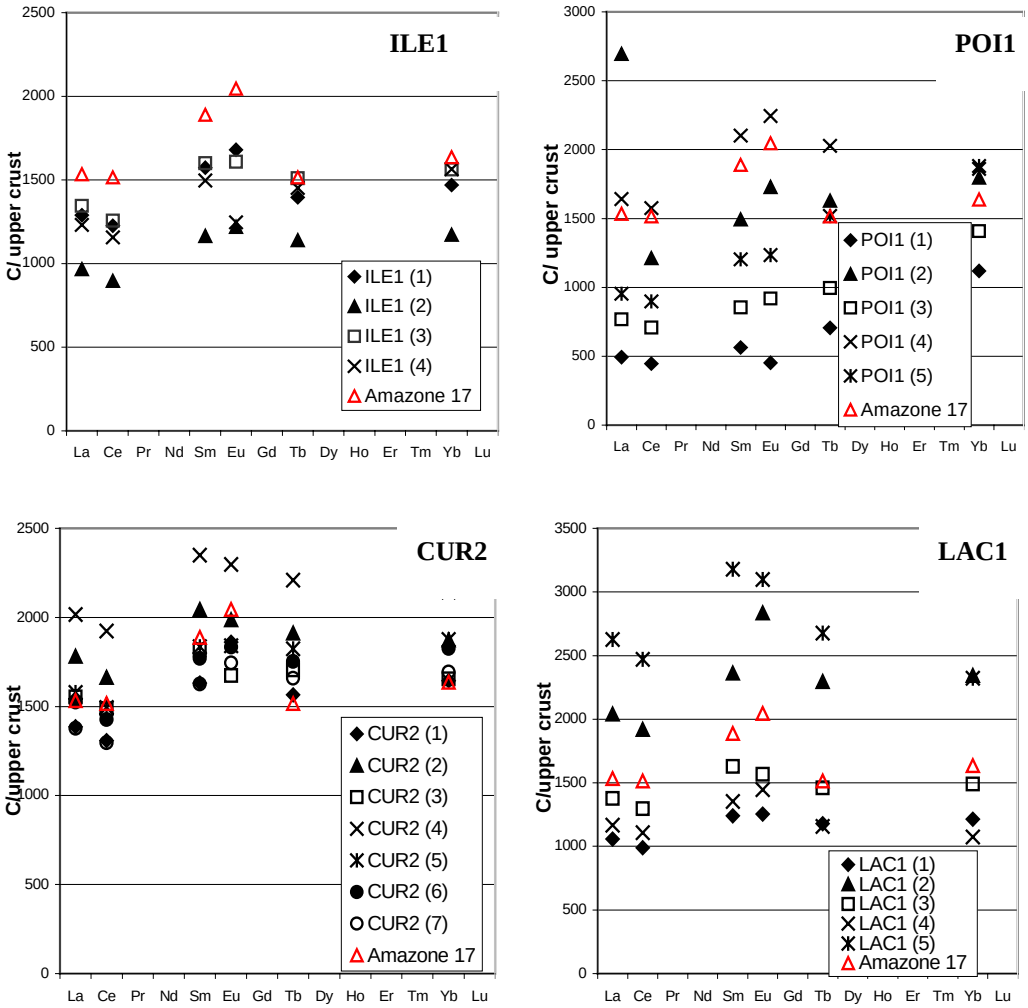


Figure IV.1. : spectres de terres rares

Les spectres de terres rares obtenues pour les différents sols et comparés à celui obtenu à partir des données de Gaillardet (1997) pour les MES de l'amazone, nous ont permis de confirmer l'empreinte sédimentaire des sols.

En effet, pour CUR2, LAC1 et ILE1, la forme des spectres obtenus pour les différents sols sont très proche de celle de l'Amazone actuel, avec l'apparition dans certains horizons d'une inversion de Sm/Eu. Au niveau de l'horizon de surface de CUR2, on note également un enrichissement en terres rares légères, qui pourrait être attribué à un effet de la végétation.

Pour POI1, les spectres de terres rares ne suivent plus du tout celui de l'Amazone sauf pour l'horizon 4 : les horizons 1, 2, 3 et 5 sont enrichis en terres rares lourdes par rapport au spectre de l'Amazone. De plus, on observe une inversion Sm/Eu pour l'horizon 1, et une anomalie positive en La pour l'horizon 2 ont également été observé dans les horizons. Des appauvrissements en terres rares lourdes ont été observés dans les horizons de certains sols (par exemple, Oliva et al., 1999 ; Viers and Wasserburg, 2004). On peut donc faire l'hypothèse sans toutefois pouvoir le vérifier que ce sol subit une influence de l'alter do chao.

De plus, bien que ces sols aient dans l'ensemble une empreinte sédimentaire marquée, de nombreux processus pédogénetique sont dès lors présents. D'une part, les processus géochimiques sont déjà bien amorcés et ce sur l'ensemble des sols. En effet, l'influence des conditions rédox, les réactions de complexation, précipitation et/ou co-précipitation interviennent sur tous les sols, certes de manière plus ou moins marquée selon les sols. D'autre part, la colonisation par la végétation signe également une évolution pédologique. Le développement et le fonctionnement des racines de végétaux, en relation étroite avec la granulométrie et la structure des différents horizons, sont particulièrement bien observés

sur POI1, CUR2, dans une moindre mesure sur ILE1 et pas du tout sur LAC1, qui n'est pas colonisé par la végétation.
A partir de ces données préliminaires, on peut dire que POI1, CUR2 et ILE1 pourraient être des sols jeunes tandis que LAC1, qui malgré des processus chimiques présents, est encore instable dû à l'absence de végétation et pourrait, par conséquent, être défini davantage comme un dépôt de sédiment.
Cependant, compte tenu de l'hétérogénéité des sols étudiés, les interprétations que l'on a pu faire à propos de ces différents sols sont toujours à prendre au conditionnel car il n'est pas sur que les mesures obtenues, même sur un site bien choisi soient extrapolable 50 mètres plus loin.

IV.1.2. Description circonspecte des sols

✓ *CUR2*

Le sol CUR2, localisé au niveau de l'igarapé principal d'entrée de l'eau dans la varzea, montre un appauvrissement léger en comparaison avec POI1 et ILE1. En surface, l'abondance de végétation entraîne un appauvrissement plus fort, ce qui tend à montrer que le sol fonctionne d'un point de vue biologique. Comme pour les autres sols, le Mn est fortement appauvri. De plus, la présence de racine en profondeur peut expliquer l'appauvrissement global observé pour l'ensemble des éléments. Cependant, l'absorption par les plantes est aussi largement influencée par la nature du sol : lorsque la teneur en humus ou en argile est élevée, les métaux restent solidement lié au sol. Dans ce cas, seul de petites quantités d'ion métallique se trouve disponible pour les racines par l'intermédiaire de l'eau, il y a donc moins de métaux absorbables pour les racines des plantes.
Le Fe et l'Al ont une distribution relativement homogène. Les conditions réductrices peuvent être responsable libération Fe^{2+} mais aussi de l'aluminium s'il s'agit de phases complexes (oxyhydroxydes de fer et l'aluminium, et plusieurs processus entrent alors en compétition :

- la complexation avec la matière organique assure une immobilisation des métaux dans les horizons de surfaces
- les formes libres ont, quant à elles, une affinité particulière pour les complexes organiques et les chélates, ce qui assure une migration du Fe et Al dans les horizons plus profonds

La diversité des processus en jeu assure une distribution homogène de ces deux éléments.
Ce sol est périodiquement rajeuni et constamment drainé par la nappe et stabilisé par une forte colonisation de la végétation. De nombreux processus pédologiques sont à l'origine de ces observations :

- l'assimilation de certains éléments par la végétation
- les processus d'oxydoréduction relativement constants sur l'ensemble du profil induisent une perte importante de Mn hors du profil et dans une moindre proportion des pertes en Fe
- la complexation des éléments traces avec la matière organique assurant une migration horizontale des métaux via la nappe.

De plus, la situation spatiale très particulière de CUR2, bout de terre situé entre l'Amazone et la varzea, laisse supposer qu'il existe des échanges élémentaires entre ces deux réservoirs, en complément des épisodes de débordement, les éléments pouvant être transportés soit par convection, soit par dispersion soit par diffusion.

✓ *POI1*

Le sol POI1 a été, suspecté dans un premier temps, d'avoir une origine initiale de l'alter do chao. La normalisation par rapport l'alter do chao montre un enrichissement global pour l'ensemble des éléments traces tandis que la normalisation par rapport au sédiment montre un appauvrissement important pour tous les éléments, avec néanmoins des variations en fonction de la profondeur.
Par conséquent, ce sol possède avant tout une empreinte sédimentaire mais les appauvrissements les plus fort traduisent déjà des processus de migration élémentaire due probablement à la présence de la végétation et à l'existence de phénomène d'oxydoréduction. De plus, la couleur du profil et la position de la nappe suggèrent une dynamique horizontale forte des éléments.
Dans ce sol, deux horizons ont attirés notre attention :

- l'horizon 4 de l'échantillon, constitué d'une argile noire, responsable d'une très forte rétention des métaux et comparable à l'horizon 5 de l'échantillon du sol LAC1

- l'horizon 5 de l'échantillon, qui malgré une couleur rouge marquée, montre un appauvrissement en Fe

L'horizon argileux noir présent à la fois au niveau de LAC1 et POI1 semble indiquer qu'il existe un continuum pédologique à l'échelle de la varzea et renforce par la même l'idée que la nature des horizons sus-jacents à cette zone soit sédimentaire. Par contre, on n'observe nulle autre part l'horizon de l'échantillon 5 du profil POI.

✓ ***ILE1***

Le sol ILE1, situé au niveau de l'igarapé de sortie de la varzea, présente un fort appauvrissement en tous les éléments et sur toute la profondeur, et ce que les horizons soient argileux ou sableux. Seul l'horizon de surface, plus organique lié à la colonisation de la zone par la végétation et le bétail, et légèrement moins appauvris. Ceci laisse à penser que le matériel qui arrive en ILE1 et qui assure par la même la constitution de ce sol est déjà particulièrement appauvri : tout laisse à croire que les eaux ont remobilisées des particules appauvris et les ont entraînés avec elles lors des épisodes de vidange de la varzea.

.

✓ ***LAC1***

Les profils de sol LAC1, présentent deux parties distinctes :

- les horizons de surface qui présentent un léger appauvrissement en tous les éléments
- les horizons profonds qui montrent un enrichissement pour tous les éléments
- seul le Mn est appauvri sur toute la profondeur

L'évolution des rapports normalisés semble indiquer une dépendance à la texture du matériel. En effet, à l'image du profil, ce sol très hétérogène pourrait refléter des apports successifs de granulométrie très différentes allant des argiles sableuses au sable, et par conséquent ayant une capacité de rétention différentes : les sables ayant la capacité la plus faible.

Cette observation est confirmée par l'étude minéralogique. En effet aucune observation n'a été observée dans la nature des minéraux. Cependant, les diagrammes de rayons X totaux montrent des variations dans l'intensité des pics, qui coïncident avec cet effet minéralogique.

Les analyses laissent à penser que LAC1 est avant tout une zone de dépôt, l'absence de végétation confirmant cette instabilité du sol. Une carotte sédimentaire effectuée tout près de la zone où a été échantillonnée le sol, a montré des taux de sédimentation très élevée, proche de 1 cm/an (Seyler, pers. comm.), ce qui confirme la forte dynamique sédimentaire qui existe dans cette zone.

IV.2. Dynamique des éléments traces

Le potentiel rédox du milieu est un facteur déterminant de la solubilité des éléments traces et de leur réactivité. Les mécanismes prépondérants sont les réactions d'oxydoréduction et l'entraînement et/ ou le piégeage associé à la précipitation ou la dissolution des oxydes et oxyhydroxydes. Les éléments sont donc influencés de deux façons par les réactions d'oxydoréduction :

- ✓ directement impliqués dans les réactions rédox tels que les couples Cu(II)/Cu(I) et U(VI)/U(IV)
- ✓ Associé à un élément majeur qui lui est directement impliqué dans les réactions rédox. Les phases solides de Fe(III) et Mn(IV,III) ont un fort pouvoir adsorbant pouvant modifier la distribution des éléments traces (Ballistriery et al, 1992 ; Viollier, 1995)

IV.2.1. Manganèse

IV.2.1.1. Distribution du Mn dans les profils de sol

Il a été observé un appauvrissement significatif du Mn sur tout le profil et sur tous les sols étudiés. Plus en détail, on a constaté que l'appauvrissement en subsurface est le plus important avec une perte de concentration avoisinant les 80 %. On peut penser que le Mn présent dans les plantes, retourne au sol par les litières sous forme complexé par la matière organique, d'où les concentrations plus élevées en surface.

Ensuite, par biodégradation, et accentuée par les pH acide de la surface, le Mn, par réduction, reprend sa forme échangeable et devient alors facilement adsorbable par la végétation.
Dans le cas particulier de ILE1, les pH basique de la profondeur (pH>8) assurent une immobilisation de Mn sous la forme de MnO_2.
Pour les sols CUR2 et LAC1, les conditions réductrices engendrées par le battement de nappe, libèrent Mn sous forme libre, qui migre vers la surface pour être probablement adsorbé par la végétation.
Dans le cas de POI1, la dynamique du Mn semble corrélait à la granulométrie du sol, les horizons argileux piègent le Mn, tandis que les zones sableuses le libèrent.

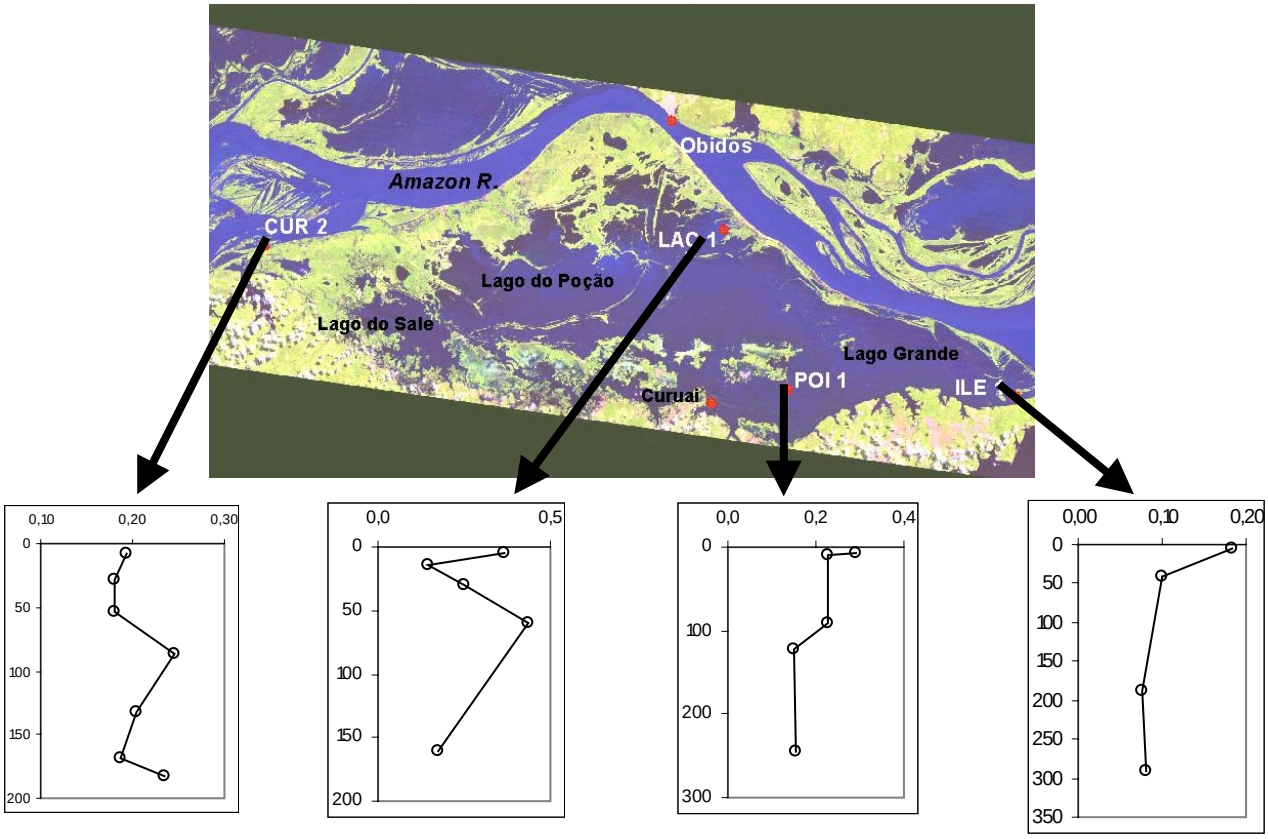


Figure IV.2. : Facteur d'enrichissement du Mn en fonction de la profondeur (cm)

IV.2.1.2. Rôle de la végétation

Les variations d'oxydoréduction influent sur la distribution du Mn. Il a été montré que sa concentration variait considérablement entre la période d'étiage et la période de hautes eaux (Viers et al, 2005). L'étude réalisée sur des eaux de lacs et diverses espèces de plantes a montrée que la concentration en Mn était maximale dans les plantes au cours de la saison sèche, et minimale, au maximum de crue, ce qui semble corroboré avec nos résultats. Cependant, plusieurs expérimentations seraient utile pour confirmer, ou au contraire infirmer, le fonctionnement de ces sols vis-à-vis de ce qui a déjà était observé au niveau des plantes et des eaux. En effet, un nouvel échantillonnage en période de hautes eaux nous assurerait une meilleure compréhension de la dynamique du Mn à l'échelle des cycles des saisons, et par conséquent une interprétation plus complète. En effet, à partir de données complètes sur le Mn, on pourrait évaluer les périodes oxydantes et réductrices et définir ainsi son influence sur le cycles des nutriments indispensables au bon développement de la végétation car il a été mis en évidence qu'à partir de certains seuils, certains éléments traces peuvent devenir toxiques pour les plantes (Adriano, 1986).
Cependant, l'état des connaissances actuelles semble être corrélé aux résultats obtenus puisque les 4 types de sols étudiés, prélevés en période d'étiage, présentent un très fort appauvrissement. De plus, d'après Viers et al (2005), l'appauvrissement en Mn est indépendant du type de végétation qu'il s'agisse d'arbres, d'espèces herbacées, pérennes ou annuelles, ce qui est parfaitement observé à l'échelle de notre étude puisque nos échantillons correspondant chacun à type de végétation, ne présentent pas d'écart significatif d'appauvrissement.

IV.2.2. Cadmium et plomb

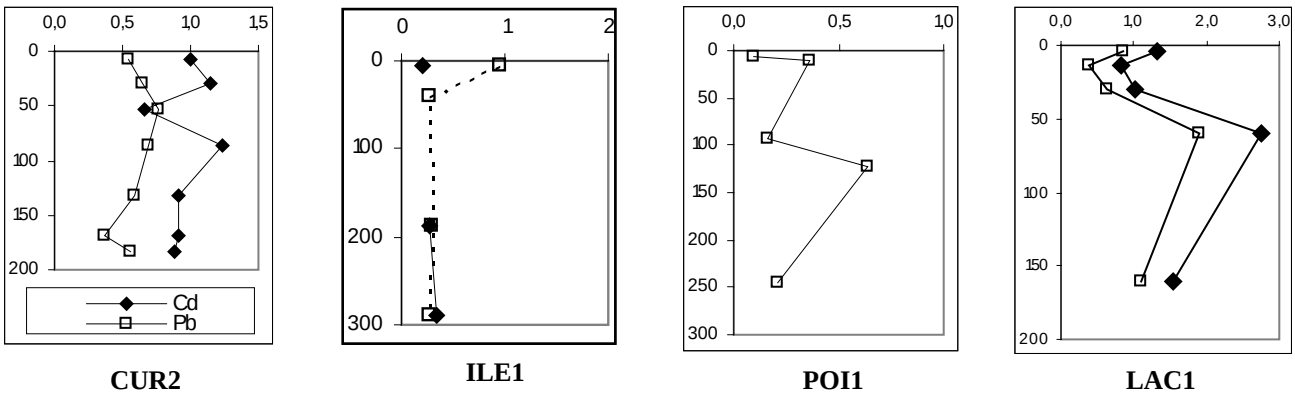


Figure IV.3. : Facteur d'enrichissement du Cd et Pb en fonction de la profondeur (cm)

La tendance des différents profils de sol reste profondément marquée par l'influence de la granulométrie : les particules les plus fines piégeant plus fortement le Cd et le Pb.
Sur CUR2 et ILE1, on observe un enrichissement en Cd : la migration est fortement influencée par le pH du sol, la quantité de matière organique et la texture du sol ; cette mobilisation est principalement déterminé par le contenu en argile (Rautengarten et al, 1995). De plus, d'après Kabata-Pendias et Pendias (1992), le Cd est l'élément qui présente la plus grande variabilité spatiale, ceci peut donc expliquer qu'on le retrouve en forte concentration en CUR2 alors qu'il n'est même pas détecté en POI1.En effet, dans le cas de POI1, la concentration en Cd est inférieure aux limites de détection.
Pour ce qui est du Pb, on observe un appauvrissent global largement asservi à la constitution du sol : l'argile et la matière organique (Christenden et al, 1999 ; Baize, 1997) représentent les phases d'adsorption dominante du Pb. De plus, la sorption du Pb peut également être influencé par le pH et les oxydes de fer (Elkhatib et al, 1992).

IV.2.3. Zinc, uranium, thorium et cuivre

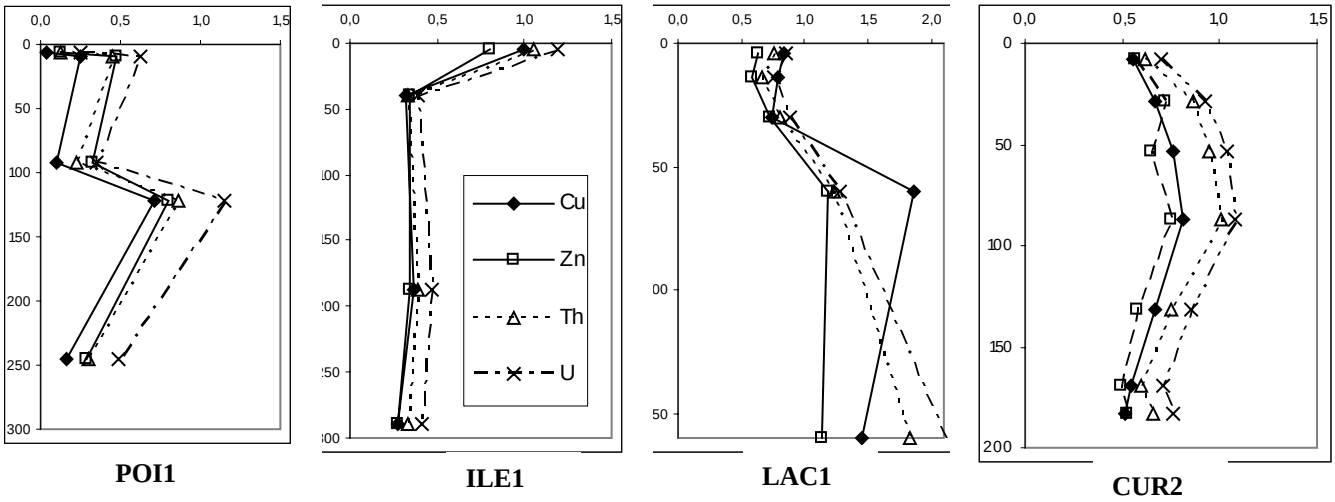
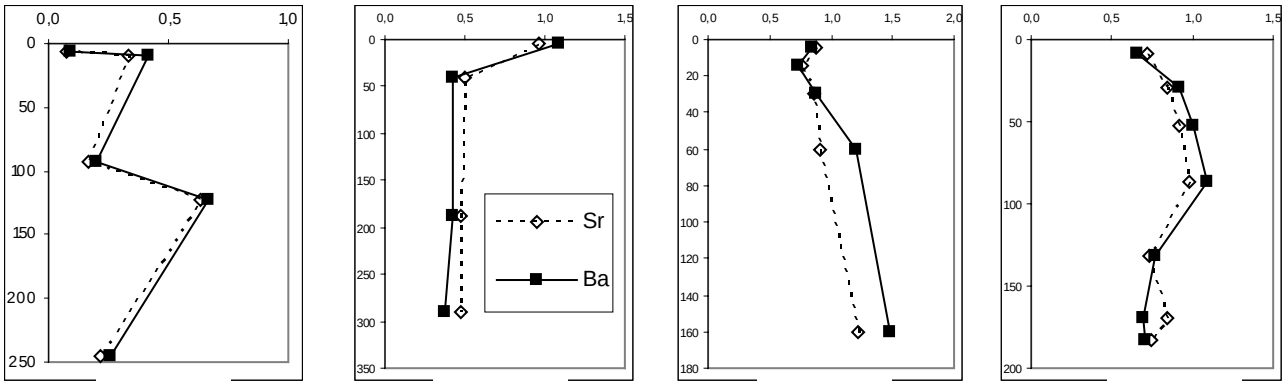


Figure IV.4. : Facteur d'enrichissement du Cu, Zn, U et Th en fonction de la profondeur (cm)

Concernant l'U et le Th, de très bonne corrélation sont observés entre les concentrations en ces éléments et les teneurs en Fe et en Al. Cependant, il reste difficile de trancher entre une hypothèse basée sur une désorption de ces éléments de la surface des oxyhydroxydes de fer du sol pendant la réduction et une hypothèse selon laquelle les augmentations constatées seraient simplement dues au fait que ces éléments sont liés à la matière organique du sol.
Dans ces sols, le Cu est bien réparti le long des profils mettant en évidence l'absence de migration, et se fixe préférentiellement sur la matière organique (parfaitement observé sur ILE1), les oxydes de fer et les argiles.

D'après Juste et al (1995), le zinc est considéré comme très mobile et disponible dans ce type de sol, légèrement acide. Cette forme libre, Zn^{2+}, est alors facilement adsorbée sur les composants minéraux du type argiles, hydroxydes de fer et d'aluminium ainsi que sur les composants organiques. L'enrichissement observé sur LAC1 pourrait être lié à la présence d'argile noire à une grande capacité de rétention en profondeur. En ce qui concerne l'appauvrissement sur l'ensemble des autres sols ILE1, CUR2, POI1, il semblerait qu'au passage des eaux sur ces sols, elles remobilisent les éléments et les entraînent avec elles.

IV.2.4. Strontium et baryum



POI1 **ILE1** **LAC1** **CUR2**

Figure IV.5. : Facteur d'enrichissement du Sr et Ba en fonction de la profondeur (cm)

Nous avons observés une corrélation positive entre Fe et Ba. Ainsi on peut penser que Ba est lié au cycle du fer : tout laisse à penser qu'en milieu oxydant, Ba semble associé aux oxyhydroxydes de fer, et en milieu réducteur, Ba serait libéré en solution avec le fer.
Quant à Sr, les études de Oubelkasse (1998) avaient montré que Sr et Ba étaient libérés au niveau des zones de rétention. On peut donc penser que Sr et Ba peuvent être adsorbés sur les argiles.

IV.3. Concomitance des influences Amazone – Varzea

IV.3.1. Impact de la végétation sur la varzea

Likens et Borman (1995), Schlesinger (1997), Meunier et al (1999), Chiarenzelli et al, Weiss et al (2002) ont tous mis en évidence le rôle déterminant des plantes dans le transfert des éléments traces. Durant les phases terrestres, la matière organique est rapidement décomposée. Pour illustration, d'après Junk et Howard-Williams (1984), le temps de demi vie de E. Polystachya, représentative des plantes herbacées présentes dans les varzeas, est de l'ordre de 14 jours. A partir de ces données, Viers et al (2005) ont estimé au niveau d'une plaine d'inondation amazonienne : la varzea de Manchataria ; d'une part les quantités de métaux stockés dans les végétaux ; et d'autre part les quantités d'éléments transitant par les plantes avant d'être relargués hors du profil de sol. Il a été également montré que les quantités d'éléments stockées ou transitant dans les plantes représentent 1 à 20 % du flux d'éléments annuels exporté chaque année dans la phase dissoute de la Varzea de Manchantaria. Compte tenu de la faible superficie de la varzea, les végétaux semblent jouer un rôle primordial. Quand le débit du fleuve augmente, ce dernier déborde et les MES s'accumulent dans la varzea. Quand les plantes meurent et que les débris organiques se recyclent libérant par la même les métaux que l'on retrouve soit dans la phase dissoute (eau libre ou eau interstitielle) soit sous forme d'accumulation en profondeur.
Dans la plaine d'inondation de Curuaï, malgré un système complexe d'interconnexion des lacs, on peut supposer un fonctionnement similaire à la varzea de Manchantaria, quant au rôle tenu par la végétation. Les varzeas, réservoir géochimique actif, ont un rôle dans la rétention des métaux via la végétation tant sur le long terme par assimilation des éléments par les végétaux que sur le court terme par accumulation temporaire suivi d'une remobilisation des éléments. Dans le but de quantifier le rôle tenu par la végétation sur le cycle géochimique des métaux dans les sols de la varzea ainsi que la capacité qu'on les végétaux à remobiliser les éléments, il serait intéressant de mettre en place un suivi constant basé sur des espèces végétales représentatives de la zone étudiée.

A grande échelle, la déforestation intensive du bassin amazonien pourrait être responsable d'une forte remobilisation des métaux et contribuer par la même à créer une pollution de l'Amazone.

IV.3.2. Influence de la varzea sur l'Amazone

Bonnet et al. (2005), ont à l'aide d'un modèle de bilan, estimé le rôle que pourrait jouer la varzea de Curuaï dans la rétention des éléments. Une première simulation prenant en compte uniquement l'ensemble des eaux entrantes et sortantes donne une sortie d'eau positive des eaux tandis qu'une seconde simulation avec les MES montre une accumulation des particules dans la varzea.
De plus, des simulations du comportement du Mn, du Fe et l'As ont été réalisées (Bonnet et al., 2005) : le modèle confirme que la varzea se comporte comme une source d'As, de Fe et Mn dans la phase dissoute vis-à-vis de l'amazone. Par conséquent, ce modèle semble en accord avec nos résultats : à l'issue de la phase d'inondation, les métaux sont remobilisés (enrichissement de la phase dissoute) et exportés hors de la varzea, ce qui explique l'appauvrissement général observé sur l'ensemble des profils de sol.

Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de définir le cadre préliminaire de l'étude de la dynamique des métaux dans les sols dans la plaine d'inondation de Curuaï. Ces sols présentent une forte empreinte sédimentaire, et ce malgré les processus pédogénétiques marqués en partie par la colonisation plus ou moins abondante par la végétation, l'activité des microorganismes et surtout les processus d'oxydo-réduction.
Les résultats mettent en évidence un appauvrissement général en tous les éléments quand on compare aux sédiments provenant de l'amazone, à l'exception de LAC1 qui est situé dans une zone d'accumulation sédimentaire forte non colonisée par la végétation. Il demeure que le résultat le plus spectaculaire reste l'appauvrissement général en Mn attribuable aux processus d'oxydo-réduction liés à l'engorgement plus ou moins temporaire en eau de ses sols. Du fait de conditions réductrices, les métaux dont le Mn sont libérés dans le milieu sous forme libre, et semblent être remobilisés par les végétaux colonisant la varzea ou les microorganismes (Viers et al., 2005).

A l'heure actuelle des analyses sont encore en cours concernant la determination fine de la granulométrie de nos échantillon et la mesure des paramètres pédologiques CEC (capacité d'échange cationique) et carbone organique. La connaissance des ces paramètres nous permettra d'affiner nos interprétations notamment vis-à-vis du rôle des fractions argileuses et de la matière organique sur la répartition des métaux dans les profils étudiés. De plus, la connaissance de la CEC nous permettra peut être de mieux appréhender les valeurs de pH obtenues, en particulier dans ILE1.
Un effort sur la détermination de la spéciation des éléments dans ces sols assurerait une meilleure compréhension du système sol et de sa dynamique en ETM. Il conviendrait pour cela de coupler les approches minéralogiques classiques (diffraction des rayons X sur les phases argileuses, réalisation et analyses minéralogiques de lames consolidées de sols,…) avec des techniques plus précises tel que l'EXAFS ou la spectroscopie Raman pour tenter de déterminer les associations entre les métaux et les phases de types oxyhydroxydes de fer ou de manganèse. Associées à ce type d'approche, des extractions sélectives pourraient nous permettre, peut être, de mieux quantifier les parts de métaux respectivement associées au oxyhydroxydes, à la matière organique, ou aux argiles.
Enfin, pour mieux cerner la dynamique des métaux et plus précisément celle du Mn à l'échelle de la varzea dans son ensemble, il serait intéressant de réaliser des prélèvements non seulement en période d'étiage mais aussi en périodes de hautes eaux. Ceci permettrait de confirmer ou au contraire d'infirmer l'hypothèse selon laquelle les éléments, en périodes de montée des eaux, seraient remobilisés sous forme libre et exporté hors de la varzea car au-delà de la compréhension des processus pédogénétiques, il serait particulièrement intéressant de quantifier l'impact de ces zones sur les cycles biogéochimiques de ces environnements.

Bibliographie

- **Adriano D.C., 1986**. Traces elements in the terrestrial environment. Springer-Verlang, New york
- **Alloway B. J., 1995**. Heavy metals in soils, Second Edition, Ed. Blakie Academic and professional, 363p.
- **Amiard-Triquet C. et Amiard J.C., 1980**, Radioécologie des milieux aquatiques, Masson, Paris, 191p.
- **Baize D., 1997**. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). Références et stratégies d'interprétation. INRA édition, Paris, 408p.
- **Balan E., Trocellier P., Jupille J., Fritsch E., Muller J.P., Calas G., 2001**. Surface chemistry of weathered zircons. Chemcal Geology 181 (2001) 13-22
- **Balan E., Allard T. , Fritsch E., Sélo M., Falguères C., Chabaux F., Pierret M.C. et Calas G., 2004**. Formation and evolution of lateritic profiles in the middle Amazon basin: insights from radiation-induced defects in kaolinite. Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 69, Mo.9, pp. 2193-2204, 2005
- **Balistrieri L. S., Murray J. W., Paul B, 1992.** The geochemical cycling of trace metals in the water colum of lake Smmamish, Washinton. Limnology and Oceanography, 37:529-48
- **Bonnet M. P., Barroux G., Seyler P., Pecly G., Moreira-Turcq P., Lagane C., Cochonneau G., Viers J., Seyler F. et Guyot J. L. (2005)** Seasonal links between the Amazon corridor and its flood plain: the case of the varzea of Curuaï
- **Brümmer G. W., Gerth J., Herms U., 1986.** Heavy metal species, mobility and availability in soils. In: The importance of chemical "speciation" in environment process, Bernhard M., Brickman F.E. and Sadler P.J. eds, Springer- Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Federal Republic of Germany, 169-192
- **Chiarenzelli J, Aspler L., Dunn C, Coussens B., Ozarko D., Powis K.,2001.** Multi element and rare earth element composition of lichens, mosses, and vascular plants from the central Barrenlands, Nunavut, Canada. Applied Geochemistry 2001; 16:245-70
- **Duchaufour Ph., 1983**. Pédologie I : Pédogenèse et classification. Masson, Paris, 477p.
- **Elkhatib E. A., Elshebiny G. M., Balba A. M., 1992**. Comparison of for equation to des cribe the kinetics of head desorption from soil. Z Pflanzenernähr. Bodenk, 155:285-291
- **Filizola N. 1999. O** Fluxo de sedimentos em suspensao nos rios da Bacia amazônica brasileira. Pub. ANEEL, Brazilia, 63p.
- **Filizola N, 2003.** Transfert sédimentaire actuel par les fleuves amzoniens PhD Dissertation, IRD Publications
- **Forstern U et Wittman, 1979,** Metal pollution in the aquatic environnement, Sringer-Verlag, Berlin, 486p.
- **Gaillardet J., Dupré B., Allègre C.J. and Négrel P., 1997**. Chemical and physical denudation in the Amazon river bassin. Chem. Geol. 142, 141-173
- **Guyot J.L., Cllège J., Cochonneau G., Filizola N., Guimaraes, Kosuth P., Molinier M., Oliviera E., Seyler F., Seyler P., 1999.** Caractéristiques hydrologique du bassin In Hydrologicaland geochemical Processin large scale river bassin, Manaus'99 Symposium Manaus 16-19 nov 1999
- **Junk, W. J., P. B. Bayley, and R. E. Sparks**, **1989** The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems. Proceedings of the International Lare river symposium p110-127-. Can Spec Publ Fish Aquat. Sci. 106
- **Junk, W.J. 1997**. The central Amazon flood plain: ecology of a pulsing system. Ecological studies 126 525p Springer
- **Juste C., 1995**. Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines, Convention ADEME-INRA, ADEME éd., 209p.
- **Kabata-Pendias A. et Pendias H., 1992**. Trace elements in soils and plants (2nde edition), CRC Press London, 413p.
- **Konhauser K.O., Fyfe W.S., Kronberg B.I., 1994.** Multi element chemistry of some Amazonian waters and soils. Chem. Geol. 111, 155-175

- **Kronberg B.I., Fyfe W.S., Leonardos, O.H., ans Santos A.M., 1979**. The chemistry of some Brazilian soils : element mobility during intense weathering. Chem. Geol., 24:211-229
- **Likens G.E., Borman F.H. (1995),** Biogeochemestry of a Forested Ecosystem. New York: Springer-Verlag; 1995. 159p.
- **Maurice Bourgoin, Martinez J.M., Grelaud J., Guyot J.L., Filizola N., 2005.** Role of the floodplains in the hydrology and sediment dynamics of the Amazon River, Brazil
- **Meunier J.D., Colin, Alarcon C.,1999** Biogenic silica storage in soils. Geology 1999;9:835-8
- **Molinier M., Cudo K. J., Guimaraes V., 1992**. Disponibilidade de agua na bacia amazonia. In II Simposio. International de Estudos Ambientais em florestas Tropicais Umidas, forest'92. Rio de Janeiro
- **Nordin C.F., Meade R. H., 1985**. The Amazon and Orinoco. River: 385-390
- **Nimer E., 1991.** clima, 61-71. In Georafia do Brasil, Volume 3, Regiao Norte. IBGE, Rio de Janeiro
- **Oliva P., Viers J., Dupré B;, Fortuné J.P., Martin F., Braun J.J., Nahon D., Robain H., 1999**. The effect of organic matter on chemical weathering : study of a small tropical watershed : Nsimi-Zoetele site, Cameroon. Geochimica Cosmochimica Acta, 63 : 4013-4035.
- **Olivry J. C. et Boulègue J.1995.** Grands bassins fluviaux périatlatiques : Congo, Niger, Amazone. Actes du colloque PEGI INSU-CNRS-ORSTOM, 336 p.
- **Putzer H., 1984**. The geological evolution of the Amazon Bassin and its mineral resources. In: H. Sioli (Editor)
- **RADAMBRAZIL (1976)** Projeto RADAMBRAZIL. Levantamento de Recursos Naturais, 10 (Folha SA.21 – Santarém Departemento Naccional da Produçao Mineral, Rio de Janeiro, Brazil
- **Rautengarden A. M., Schnoor J.L., Anderberg S., Olendrzynski K., Stigliani W. M., 1995**. Soil sensitivity due to acidand heavy metal deposition in east central Europe. Water, Air and soil pollution, 85, 737-742
- **Richey J. E., Meades R. H., Salati E., Devol A. H., Nordin C. F., Santos U. (dos), 1986.** Water discharge and suspenden sediment concentration in Amazon river: 1982-1984. Water Ressources Research, 22 (5):756-764
- **Salati, 1978**
- **Schlesinger W. H., Biogeochemistry, 1997**: an Analsis of Global Change. Second edition. Dordrecht: Academic Press, 588p.
- **Seyler P. et Boaventura G. R., 1998.** Distribution and partition of trace metals in the Amazon Basin; Hydrological process
- **Sioli, 1984.** The Amazon and its main affluents: hydrography, morphology of the river courses, and river types, 127, 165. The amazon, Siol h. (ed.), Plub. Junk, Dordrecht.
- **Sposito G., 1989**. The chemistry of soil. Oxford University Press, Ed. USA, 277p.
- **Viers J., Barrroux G., Pinelli M., Seyler P., Oliva P., Dupré B., Boaventura G. R., 2005**. The influence of the Amazon floodplain ecosystems on the trace element dynamics of the Amazon river mainstream (Brazil). Science of the total environment 339 (2005) 219-232.
- **Viers J. and Wasserburg G.J., 2004.** Behavior of Sm and Nd in a lateritic soil profile. Geochimica et Cosmochimica Acta, 68 (9): 2043-2054.
- **Weiss D., Shortyk W, Rieley J, Page S, Marlies G., Reese S., et al 2002.** The geochemistry of major and select trace elements in a forested peat bog, Kalimantan, SE Asia, and its implications for past atmospheric dust deposition. Geochimica et Cosmochimica Acta 66;2307-23

Annexe 1

ILE1				
Eléments	**ILE1 (1) (µg/g)**	**ILE1 (2) (µg/g)**	**ILE1 (3) (µg/g)**	**ILE1 (4) (µg/g)**
Ti	4693,18	3801,07	5600,23	5116,85
Ni	77,65	40,73	41,06	34,62
Cu	25,64	19,10	27,04	21,06
Zn	111,15	109,33	134,22	111,67
Rb	103,00	69,50	101,26	93,70
Sr	118,74	138,79	166,37	172,32
Zr	255,63	322,48	298,72	336,98
Fe	47715,20	32094,27	44726,16	41657,15
Mn	154,47	353,01	436,91	456,26
Al	89113,16	62743,98	89042,37	79996,77
Cd	0,20	-	0,28	0,33
Ba	491,55	442,88	541,43	501,97
La	38,69	28,97	40,35	36,94
Ce	78,51	57,38	80,46	74,01
Pr	9,39	6,87	9,47	8,68
Nd	36,13	27,05	36,78	34,03
Sm	7,08	5,24	7,20	6,74
Eu	1,48	1,07	1,42	1,10
Gd	5,54	4,31	5,79	5,44
Tb	0,89	0,73	0,97	0,93
Dy	5,56	4,36	6,01	5,76
Ho	1,13	0,88	1,28	1,18
Er	3,41	2,68	3,69	3,40
Tm	0,49	0,37	0,54	0,49
Yb	3,23	2,58	3,44	3,44
Lu	0,48	0,40	0,53	0,50
Pb (4 isotopes)	20,49	13,41	18,47	17,38
Th	11,93	8,63	12,36	11,11
U	3,21	2,43	3,59	3,33

LAC1					
Eléments	**LAC1 (1) (µg/g)**	**LAC1 (2) (µg/g)**	**LAC1 (3) (µg/g)**	**LAC1 (4) (µg/g)**	**LAC1 (5) (µg/g)**
Ti	4457,84	8784,79	5767,34	3944,07	6763,72
Ni	32,88	70,05	42,95	99,67	69,65
Cu	24,69	52,07	26,84	37,06	44,76
Zn	100,39	205,90	142,06	126,82	190,48
Rb	89,33	174,97	122,64	97,56	192,78
Sr	123,01	235,76	148,03	84,99	179,59
Mn	582,78	504,90	492,09	464,28	287,55
Fe	47848,33	44976,98	48173,33	48098,07	43496,08
Al	94395,32	90781,05	97242,93	104866,44	132931,12
Zr	176,07	391,80	217,28	118,34	184,94
Cd	0,37	0,52	0,35	0,52	0,45
Ba	437,45	845,52	561,81	417,56	806,84
La	31,77	61,20	41,31	34,98	78,78
Ce	63,28	122,83	83,02	70,91	158,18
Pr	7,57	14,62	9,79	8,37	18,87
Nd	29,00	55,98	37,09	32,15	73,29
Sm	5,58	10,62	7,33	6,09	14,30
Eu	1,10	2,50	1,38	1,27	2,73
Gd	4,60	8,95	5,79	4,89	10,94
Tb	0,75	1,47	0,94	0,74	1,71
Dy	4,66	9,00	5,92	4,38	9,89
Ho	0,97	1,85	1,18	0,86	2,00
Er	2,79	5,44	3,50	2,54	5,66
Tm	0,40	0,76	0,50	0,35	0,74
Yb	2,67	5,15	3,28	2,36	5,11
Lu	0,39	0,77	0,47	0,34	0,75
Pb (4 isotopes)	20,89	20,92	19,00	30,90	28,11
Th	9,88	19,25	12,90	10,71	25,02
U	2,65	5,20	3,36	2,63	6,82

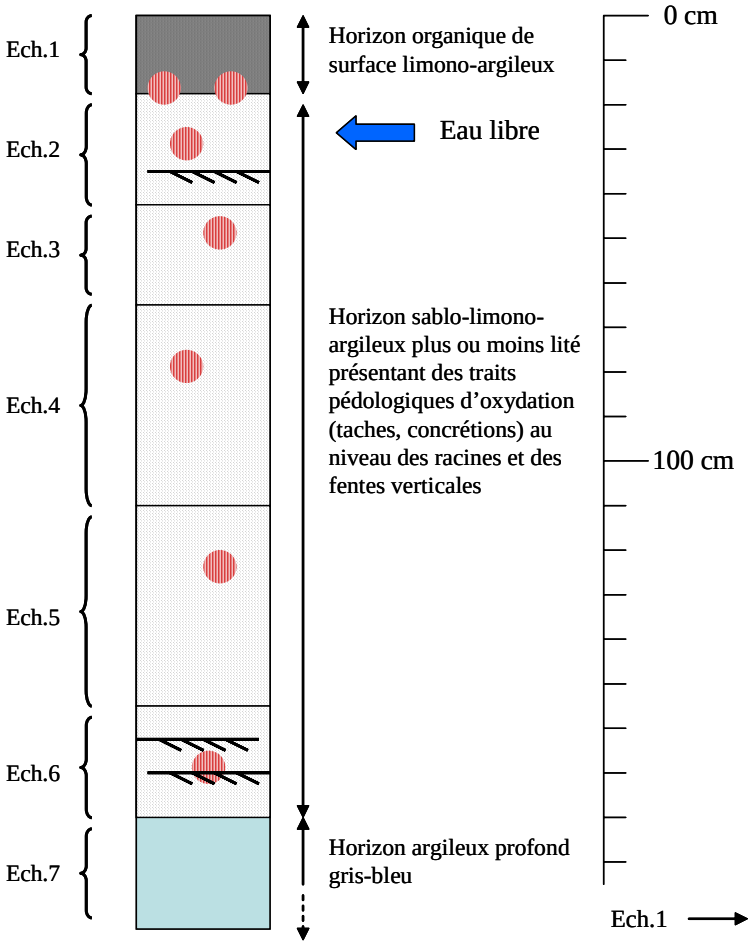
POI1					
Eléments	**POI1 (1) (µg/g)**	**POI1 (2) (µg/g)**	**POI1 (3) (µg/g)**	**POI1 (4) (µg/g)**	**POI1 (5) (µg/g)**
Ti	3095,96	5617,68	4163,89	5141,01	5374,29
Ni	22,66	29,82	19,73	33,28	35,07
Cu	4,70	23,03	11,24	46,81	18,37
Zn	39,73	104,00	88,21	125,02	75,98
Rb	18,36	72,38	38,89	86,81	46,44
Sr	22,00	65,94	40,39	88,19	51,79
Zr	611,62	418,77	512,74	297,06	507,38
Mn	123,13	175,61	130,24	106,15	114,71
Fe	6536,82	29868,86	9179,81	34966,21	24925,59
Al	8821,38	70233,60	33952,76	99907,57	50913,24
Ba	116,39	355,86	205,24	400,09	268,84
La	14,82	80,85	23,05	49,25	28,62
Ce	28,49	77,58	45,32	100,82	57,52
Pr	3,27	8,89	5,12	12,12	6,88
Nd	13,05	34,25	20,27	46,95	26,96
Sm	2,53	6,72	3,85	9,46	5,41
Eu	0,40	1,52	0,81	1,98	1,09
Gd	2,35	5,90	3,64	7,97	5,50
Tb	0,45	1,04	0,64	1,30	0,97
Dy	3,17	6,57	4,53	7,84	6,39
Ho	0,70	1,38	0,97	1,56	1,34
Er	2,19	4,10	3,00	4,47	4,12
Tm	0,34	0,58	0,43	0,63	0,60
Yb	2,46	3,95	3,10	4,09	4,14
Lu	0,40	0,57	0,48	0,61	0,64
Pb (4 isotopes)	8,07	20,65	11,00	25,41	14,23
Th	4,91	11,69	7,21	15,95	9,62
U	2,32	3,94	2,76	5,16	3,74

CUR2							
Eléments	**CUR2 (1) (µg/g)**	**CUR2 (2) (µg/g)**	**CUR2 (3) (µg/g)**	**CUR2 (4) (µg/g)**	**CUR2 (5) (µg/g)**	**CUR2 (6) (µg/g)**	**CUR2 (7) (µg/g)**
Ti	6067,09	7068,74	5871,90	7766,76	6257,95	6172,05	5610,78
Ni	40,52	52,72	43,14	58,97	88,69	43,89	40,89
Cu	26,06	28,84	26,77	34,58	30,92	28,65	23,26
Zn	143,12	166,46	122,71	172,26	143,75	139,73	128,26
Rb	111,90	156,43	138,11	184,23	135,85	123,83	116,49
Sr	159,44	172,61	152,45	199,17	160,29	211,13	157,82
Mn	489,53	417,81	341,84	569,73	510,57	533,34	572,01
Fe	44761,47	44679,69	43853,05	47414,97	48338,71	41084,35	44761,84
Al	93161,97	102187,00	122601,83	108107,22	96480,56	82566,59	88614,45
Zr	280,27	257,46	209,01	255,82	276,68	315,16	268,91
Cd	0,45	0,47	0,22	0,50	0,40	0,45	0,38
Ba	540,84	695,24	616,50	814,43	626,15	643,51	556,76
La	41,60	53,43	46,58	60,49	47,36	45,74	41,33
Ce	83,75	106,45	95,08	123,09	95,62	91,25	82,96
Pr	9,84	12,43	11,09	14,29	11,37	10,87	10,00
Nd	37,83	47,72	42,64	54,86	44,25	41,99	38,33
Sm	7,34	9,19	8,18	10,58	8,26	7,96	7,32
Eu	1,64	1,75	1,47	2,02	1,62	1,61	1,53
Gd	6,14	7,68	6,59	8,50	7,31	6,89	6,41
Tb	1,00	1,22	1,09	1,41	1,17	1,12	1,06
Dy	6,25	7,25	6,53	8,38	7,43	7,20	6,60
Ho	1,25	1,50	1,36	1,71	1,52	1,49	1,35
Er	3,78	4,30	3,92	5,14	4,40	4,29	3,95
Tm	0,53	0,60	0,54	0,69	0,60	0,60	0,56
Yb	3,62	4,12	3,64	4,72	4,13	4,02	3,73
Lu	0,53	0,61	0,53	0,71	0,59	0,59	0,56
Pb (4 isotopes)	20,78	22,84	21,98	24,13	22,50	16,26	20,64
Th	12,7	16,32	14,61	19,01	15,3	13,72	13,08
U	3,41	4,15	3,79	4,83	4,10	3,89	3,60

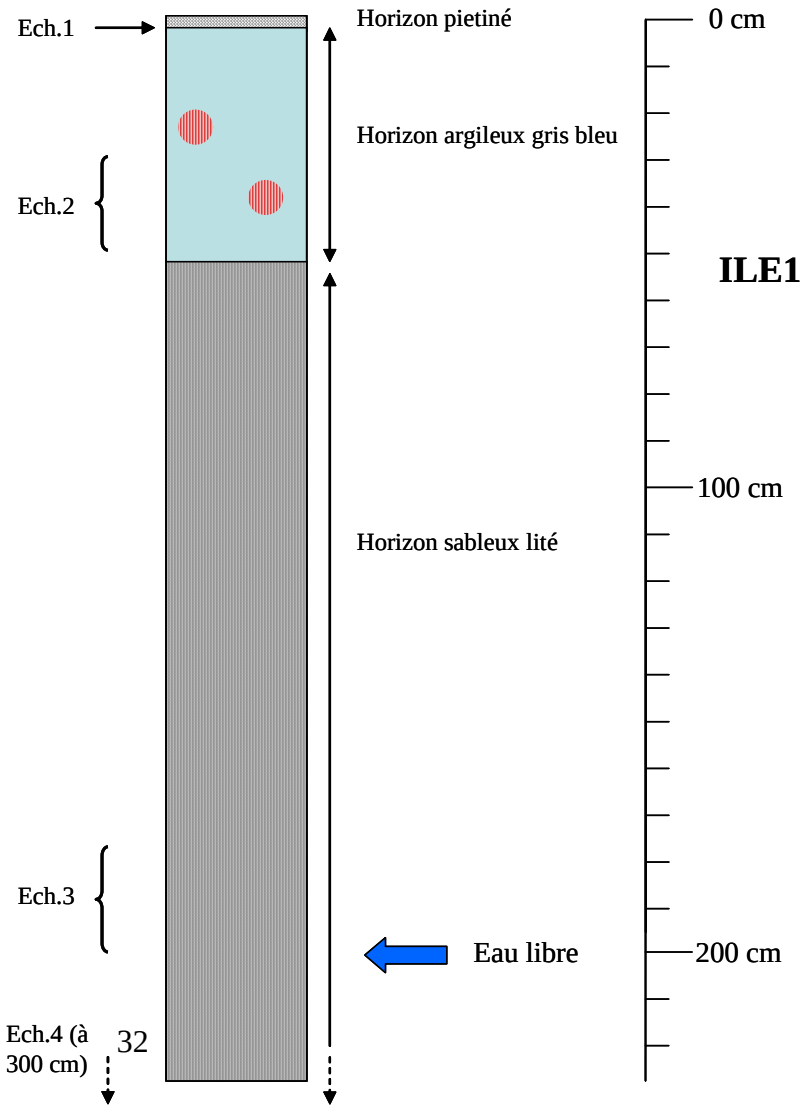
Annexe 2

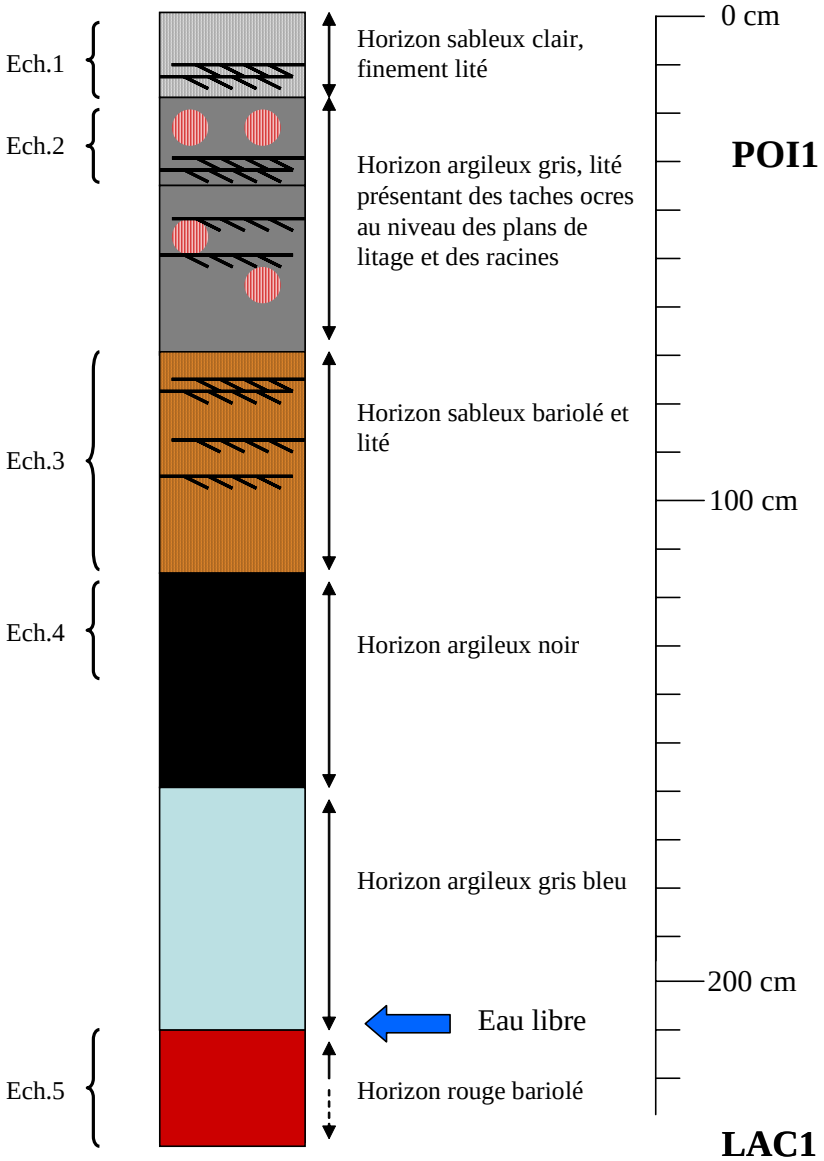
Description pédologique des différents profils de sols

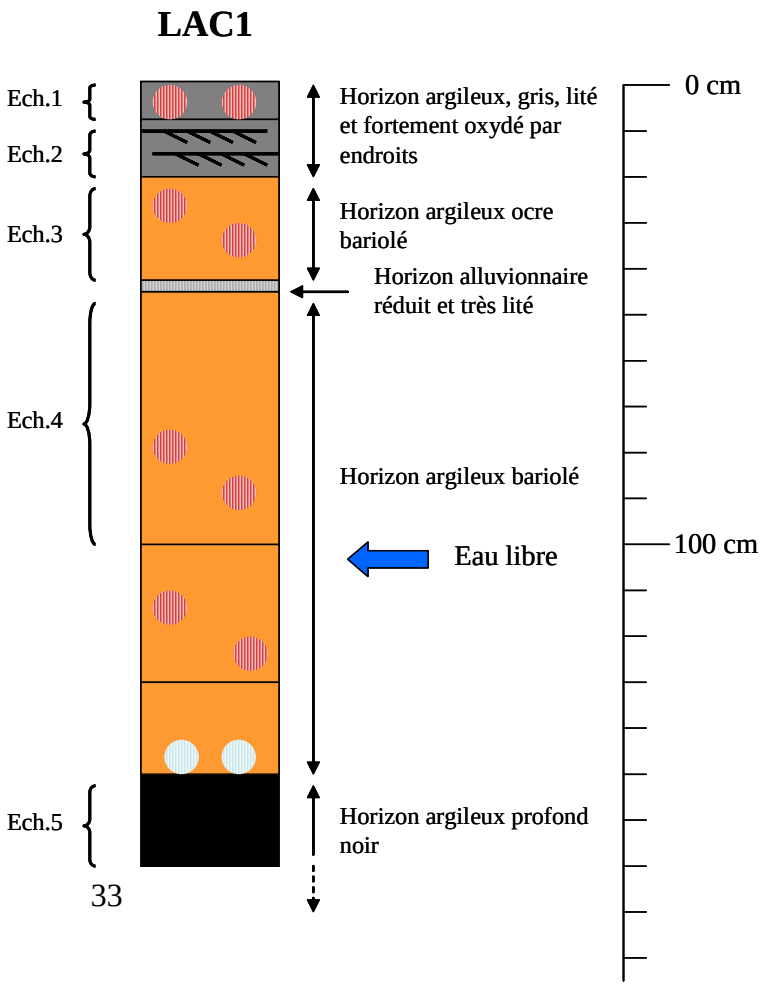
CUR2



ILE1




Ech.1
Ech.2
Ech.3
Ech.4
Ech.5
Horizon sableux clair, finement lité
Horizon argileux gris, lité présentant des taches ocres au niveau des plans de litage et des racines
Horizon sableux bariolé et lité
Horizon argileux noir
Horizon argileux gris bleu
Eau libre
Horizon rouge bariolé
0 cm
100 cm
200 cm
POI1


LAC1
Ech.1
Ech.2
Ech.3
Ech.4
Ech.5
Horizon argileux, gris, lité et fortement oxydé par endroits
Horizon argileux ocre bariolé
Horizon alluvionnaire réduit et très lité
Horizon argileux bariolé
Eau libre
Horizon argileux profond noir
0 cm
100 cm