

Mobilité et biodisponibilité des Éléments Trace Métalliques (ETM) du Sol : Approches physicochimiques

Période : février 2010 à août 2010

Nastaran MANOUCHEHRI et Alain BERMOND

AgroParisTech – Chimie Analytique – Paris

Mots clés : Biodisponibilité, Éléments Trace Métalliques, Extraction Chimique, Fractionnement, Sol

De nombreux sols présentent, naturellement ou en raison d'activités industrielles et agricoles, des teneurs importantes en éléments trace métalliques (ETM)⁽¹⁾. La présence des ETM peut avoir des effets nocifs sur la santé humaine *via* la chaîne alimentaire. Cependant, en termes de toxicité, ce sont certaines formes physicochimiques des ETM qui sont importantes et non leurs concentrations totales. Il est donc nécessaire de quantifier ces formes potentiellement biodisponibles⁽²⁾, susceptibles de s'accumuler dans les organismes vivants et d'influer sur leur développement; c'est ce qu'on appelle, en général, la « spéciation »⁽³⁾ ou le « fractionnement »⁽⁴⁾. Dans la littérature scientifique, il existe de nombreuses méthodes de spéciation physicochimique pour étudier le devenir des ETM dans le sol et la solution du sol afin de faire une hypothèse de biodisponibilité. Certaines études visent principalement à déterminer, à l'aide d'extractions chimiques⁽⁵⁾, les fractions⁽⁶⁾ en métal potentiellement biodisponibles. Cet article est principalement consacré à l'analyse de quelques exemples récents de ces extractions chimiques en tant qu'outil de prédiction de la biodisponibilité.

Modélisation de l'extractibilité et de la solubilité des éléments trace métalliques des sols forestiers français en fonction des propriétés du sol

Gandois L, Probst A, Dumat C. Modelling trace metal extractibility and solubility in French forest soils by using soil properties. *Eur J Soil Sci.* 2010; 61: 271-286

Analyse

Les fractions mobiles⁽⁷⁾ et les propriétés du sol

Plusieurs auteurs estiment que les propriétés et constituants des sols déterminent en partie la mobilité des ETM et donc le risque lié à leur présence. Une grande partie de la littérature scientifique est ainsi consacrée à mesurer les fractions mobilisables en ETM, en utilisant des extractants chimiques ou des logiciels de spéciation chimique et à modéliser l'extractibilité (mesurée de façon expérimentale ou informatique) en fonction des différentes propriétés physico-chimiques du sol comme le pH, les teneurs en matières organiques et/ou en fer, les teneurs en carbonates, la capacité d'échange cationique, la texture, etc.

Les auteurs ont étudié l'extractibilité de 9 ETM (plomb, cadmium, cobalt, chrome, cuivre, nickel, antimoine et zinc) dans les sols de 6 sites forestiers français contaminés par des retombées atmosphériques.

Dans ce travail, trois fractions mobilisables ont été définies : la fraction soluble ou la concentration dissoute dans la solution du sol; la fraction extraite ou la concentration mesurée à l'issue d'une extraction par le chlorure de calcium (CaCl₂) et la fraction du métal en ion libre estimée par un logiciel de spéciation chimique (WHAM-VI).

Ces fractions ont été reliées au pH, le carbone organique dissous (COD), les teneurs totales en aluminium, fer, manganèse, calcium et les autres ETM afin de construire des modèles de prédiction. Dans ces modèles, la variabilité de la mobilité du métal a été expliquée, à l'aide des régressions linéaires multiples, par les facteurs physico-chimiques mentionnés ci-dessus.

Le pH est le paramètre le plus significatif pour la prédiction de la solubilité et l'extractibilité des ETM et plus particulièrement dans le cas des sols acides (pH<6). Une corrélation négative a été observée entre les fractions solubles/extractibles et le pH des sols acides pour tous les ETM étudiés.

Dans les conditions plus alcalines (pH>6), la solubilité de certains ETM n'était pas correctement prédite par le pH. Dans ce cas, le pH est le plus souvent couplé à d'autres caractéristiques physico-chimiques comme les teneurs en fer, le carbone organique total (particulaire) ainsi que les teneurs en carbone organique dissous. En fonction de l'association de l'ETM aux colloïdes organiques ou la phase inorganique, la prédiction de l'extractibilité et la solubilité a été améliorée en ajoutant le carbone organique dissous ou les teneurs en fer aux régressions multiples. Certains ETM comme le Cr et Sb présentent une forte affinité pour les oxydes de fer alors que d'autres comme le Cd, Co et Ni sont plus liés aux substances humiques. Cependant, le pH reste le facteur déterminant principal qui peut modifier le pouvoir des phases organique et inorganique à retenir certains métaux.

Pour les sols moins acides, des quantités importantes en carbone organiques particulaire peuvent induire à une forte concentration en carbone organique dissous et par conséquent une extraction importante des ETM en solution du sol sous forme COD-ETM.

Les concentrations en ions libres (estimée par WHAM-VI) étaient correctement prédites par le pH quel que soit le pH du sol.

Commentaire

Ce travail réalise une étude complète sur l'influence des propriétés du sol sur la mobilité d'un nombre important d'ETM et restitue les résultats obtenus dans de nombreux travaux similaires de la littérature. Une grande variabilité a été observée pour les fractions mobilisables en raison de la nature de l'ETM étudié et de ses liaisons avec les différents constituants du sol selon les conditions physicochimiques du milieu. La toxicité potentielle des ETM peut être prédite par un seul facteur ou par l'interaction de plusieurs facteurs liés au sol. Le pH reste le facteur le plus significatif à expliquer la variabilité des fractions soluble, extraite et ions libres lors qu'il s'agit des sols acides. Dans les conditions neutres ou alcalines, les phases organiques et/ou inorganiques peuvent intervenir, de manière secondaire, dans la prédiction de la solubilité de certains ETM. Les colloïdes de petite taille (organique ou hydroxyde) forment des complexes avec les métaux en milieu alcalin et augmentent leur extractibilité. Ce phénomène n'est souvent pas pris en compte dans les études d'évaluation de risque qui sont majoritairement basées sur la concentration en ions libres entraînant une sous-estimation de la toxicité réelle.

La littérature scientifique montre une grande unanimité sur l'ordre de la mobilité des métaux, et le degré de l'impact de certains facteurs physicochimiques sur cette mobilité. Néanmoins, les équations de solubilité/extractibilité sont site-, sol- et métal-dépendantes et il n'existe aucune équation universelle pour estimer la solubilité des ETM à partir des caractéristiques physicochimiques des sols.

Comparaison des extractions simples et séquentielles pour étudier la mobilisation des Éléments de Terre Rare dans différents types de sol

Rao CRM, Sahuquillo A, Lopez-Sanchez J. Comparison of single and sequential extraction procedures for the study of rare earth elements remobilisation in different types of soils. *Anal Chim Acta*. 2010 ; 662: 128-136.

Analyse

Les extractions chimiques simple et séquentielle

De nombreux auteurs considèrent que les concentrations en métal extraites par un ou plusieurs réactifs chimiques peuvent représenter les quantités potentiellement biodisponibles. Un nombre important des travaux scientifiques correspond à l'utilisation des protocoles d'extraction simple (utilisation d'un seul réactif par essai) ou séquentielle (utilisation du même échantillon que l'on soumet successivement à des réactifs de plus en plus agressifs) pour estimer les fractions mobiles et donc potentiellement toxiques.

Les auteurs ont combiné plusieurs schémas d'extraction chimique pour estimer la distribution des Éléments de Terre Rare⁽⁸⁾ (ETR) et de l'Yttrium⁽⁹⁾ dans la phase solide de 4 sols dont la contamination a différentes origines (ex : latérite, sol minier...). Les ETR sont de plus en plus abondants dans l'environnement du

fait des activités croissantes de l'industrie et de l'agriculture et leur spéciation est peu abordée dans la littérature scientifique. Les auteurs ont utilisé le schéma d'extraction simple à l'aide de 7 extractants chimiques (agent complexant, acide et sel dilué) et 1 protocole d'extraction séquentielle (le protocole BCR).

Trois catégories différentes d'extractants chimiques (acide acétique ou chlorhydrique; l'EDTA et DTPA en tant qu'agents chélatants; NaNO_3 , CaCl_2 et NH_4NO_3 comme sels dilués) pouvant atteindre les différents compartiments de la phase solide du sol ont été utilisées dans les schémas d'extraction simple. Quels que soient le type de sol ou l'extractant utilisé (acides ou agents chélatants), la plus grande mobilité a été observée pour l'Yttrium contrairement au cérium qui représente le minimum d'extractibilité.

Le protocole séquentiel BCR, le plus reconnu des schémas séquentiels et validé par la commission de bureau de référence des communautés européennes, a été utilisé. Il consiste en l'utilisation successive de réactifs chimiques appropriés et de plus en plus agressifs en 4 étapes pour déterminer les concentrations en métal associées aux fractions échangeable, réductible, oxydable et résiduelle. La concentration du métal dans les 4 fractions est variable en fonction du type de sol et de cation étudié. La concentration varie de 0,2 % à 15 % des teneurs totales dans la fraction échangeable (F_1 , 1^{ère} étape), de 28 % à 59 % dans la fraction réductible (F_2 , 2^{ème} étape), de 9 % à 19 % dans la fraction oxydable (F_3 , 3^{ème} étape) et de 29 % à 49 % dans la fraction résiduelle (F_4 , la 4^{ème} étape ou la décomposition totale).

Les fractions extraites à l'issue de ces 4 étapes ont été par la suite comparées avec celle de l'extraction simple. La somme des concentrations des 3 premières étapes de BCR ($F_1+F_2+F_3$ représentant la fraction labile⁽¹⁰⁾) a été reliée aux concentrations extraites en une seule extraction. Les quantités extraites par acide chlorhydrique (HCl) représentent approximativement la fraction labile ($F_1+F_2+F_3$ à l'issue de BCR).

Commentaire

Dans un contexte où les techniques de mesure récentes focalisent sur la dynamique des milieux environnementaux, les approches extractives basées à l'équilibre font l'objet de nombreuses critiques. Cependant, ces dernières sont techniquement plus simples et économiquement plus rentables et continuent à apporter des éléments de réponse sur la répartition des métaux dans la phase solide; comme ce travail récent qui combine deux approches chimiques, couramment utilisées pour les ETM, afin d'étudier la spéciation des ETR contenus dans les sols. Cette étude comparative a le mérite d'utiliser différents types de réactifs chimiques et apporte des informations utiles sur la répartition des ETR dans la phase solide du sol et la capacité de chaque réactif à extraire les quantités extractibles, mobiles et donc potentiellement toxiques. Selon cette approche, les ETR sont principalement liés aux fractions réductibles et oxydables d'où l'extraction faible par les sels dilués qui représentent plutôt la fraction échangeable. Au contraire, une seule extraction chimique par HCl peut remplacer une procédure séquentielle longue et coûteuse où plusieurs réactifs sont impliqués pour produire

la même estimation des fractions facilement mobilisables. Bien que les extractions séquentielles permettent de définir les fractions de façon opérationnelle, les extractions simples restent les procédures les plus simples pour la surveillance de routine de la pollution.

Comparaison des mesures chimiques et biologiques de la biodisponibilité du métal dans le sol : Essai par simulation d'extraction à partir d'un modèle d'intestin du ver de terre

Smith BA, Greenberg B, Stephenson . Comparison of biological and chemical measures of metal bioavailability in field soils: Test of a novel simulated earthworm gut extraction. *Chemosphere*. 2010; 81: 755-766.

Analyse

Les extractions chimiques prédisent-elles la biodisponibilité ?

En général, la biodisponibilité est mesurée par deux approches empiriques couramment utilisées par les scientifiques : les techniques chimiques (mesure de l'extractibilité chimique pour simuler le transfert sol-organisme du métal) et les essais biologiques (mesure des résidus contaminants dans les tissus biologiques, les tests de toxicité et de bioaccumulation). L'extraction chimique est considérée comme la technique la plus simple et la plus rapide pour estimer les quantités potentiellement biodisponibles en ETM. Cependant, la pertinence de cette approche à prédire la toxicité engendrée chez le sujet exposé fait l'objet de plusieurs investigations qui comparent l'extractibilité de l'ETM avec les concentrations mesurées dans les différentes tissus de l'organisme exposé et les effets toxiques observés.

Les auteurs ont comparé les techniques de mesure de la biodisponibilité de Cu, Zn et Pb des sols contaminés par des pollutions d'origine urbaine (parcs à Toronto). L'extraction chimique a été comparée avec les approches biologiques. Les auteurs proposent de retenir comme technique la plus prédictive de la biodisponibilité des métaux celle pour laquelle la force du lien entre les estimations de la biodisponibilité et les données de toxicité est la plus grande.

Approche chimique: le chlorure de calcium (CaCl_2) et l'hydroxypropyl- β -cyclodextrine (HPCD) sont utilisés en tant qu'agents extractants pour estimer les fractions biodisponibles par une extraction chimique simple. Il n'a pas été montré de corrélation significative entre les fractions extraites par CaCl_2 et les données de toxicité (à l'issue du test de toxicité), c'est-à-dire le taux de mortalité des vers de terre (*E. andrei* et *Folsomia candida*) et des plantes (Alfalfa et agropyre) exposés à la contamination. Les concentrations en métal dans les extraits du HPCD n'ont pas révélé les effets toxiques observés chez les sujets exposés. Selon cette étude, les réponses biologiques, qui sont en partie influencées par la répartition du métal dans le sol et les quantités mobilisables, n'ont pas pu être prédites par une extraction chimique simple.

Approche par méthodes d'essais biologiques: dans cette partie, les auteurs étudient le lien entre et les mesures de la

biodisponibilité par les techniques biologiques (simulation enzymatique et test de bioaccumulation) et la réponse biologique (test de toxicité) afin d'évaluer la pertinence des techniques utilisées (comme dans l'approche chimique) à prédire la biodisponibilité.

Les concentrations biodisponibles ont été mesurées par simulation de la composition enzymatique du fluide gastro-intestinal de ver terre (*E. andrei*), c'est-à-dire la mise en suspension des sols étudiés avec les enzymes α -amylase, cellulase, phosphatase et trypsine (pour une durée de 3,5 h) suivie d'une filtration avant la mesure des ETM dans les extraits. D'un autre côté, les teneurs totales en ETM ont été mesurées dans les tissus des vers de terre et les plantes étudiées (racine et partie aérienne). Le test de bioaccumulation a été effectué sur une durée de 21 jours afin de mesurer les concentrations en ETM cumulées dans les vers de terre en fonction du temps. Les mesures ont été réalisées pour les intervalles du temps de 0, 0,4, 1, 2, 4, 7, 10, 14, 17 et 21 jours (test de détermination des teneurs totales).

Le test de toxicité correspond à étudier la réponse biologique (le taux de reproduction et la survie chez les vers de terre et la masse sèche des parties racinaires et aériennes des plantes) des sujets exposés aux contaminations.

Contrairement aux mesures chimiques, les mesures biologiques (l'extraction du métal à partir du modèle de l'intestin du ver et la mesure des teneurs totales dans les tissus) se sont révélées de meilleurs indicateurs de la biodisponibilité. Cependant les effets toxiques n'étaient pas corrélés avec les teneurs totales en ETM dans les tissus et l'essai de simulation de l'intestin du ver se révèle meilleur indicateur des effets toxiques (particulièrement pour le Cu).

Une comparaison entre les approches chimiques et biologiques montre que la simulation enzymatique solubilise probablement, dans certains cas, des fractions qui ne sont pas atteintes par une extraction chimique par CaCl_2 . Par exemple, les fractions en Cu déterminées par la simulation enzymatique représentent des valeurs plus importantes. Contrairement au Pb et Zn, l'extraction de Cu par CaCl_2 n'a pas pu être détectée (limite de détection). De façon générale, les fractions chimiquement extraites étaient très variables d'un cation à l'autre et donc pas adéquates pour la prédiction des effets nocifs.

Par ailleurs, les teneurs totales en ETM dans le sol n'ont pas permis, en aucun cas, la prédiction du potentiel toxique (réponses biologiques) même pour un sol fortement pollué. En effet, la toxicité n'est pas seulement liée à la fraction biodisponible; les caractéristiques physico-chimiques du sol peuvent aussi affecter la sensibilité de l'organisme vis-à-vis de la toxicité.

Commentaire

Cette étude montre que, comparée à l'extraction chimique, la simulation biologique est vraisemblablement un meilleur indicateur de la fraction biodisponible chez les sujets étudiés. Malgré un nombre important d'études sur le lien entre les fractions chimiquement extraites et le potentiel toxique dans les organismes exposés, les extractions chimiques, du fait de leur caractère opérationnel (et non fonctionnel), ne peuvent pas

simuler les phénomènes naturels du milieu alors que la définition de biodisponibilité comprend l'ensemble des phénomènes du milieu et de l'organisme et les effets nocifs sont sol-, métal- et espèce-dépendants. Cependant, les extractions chimiques peuvent fournir des informations utiles et complémentaires sur la mobilité relative du métal de la phase solide et son aptitude à migrer vers la solution afin de faire une hypothèse de biodisponibilité sur cette forme mobile.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Compte tenu de la complexité du milieu sol, la prédiction des quantités toxiques en ETM dans les conditions environnementales naturelles semble en dehors des capacités des méthodologies les plus récentes. La seule solution pour éviter les phénomènes complexes du milieu est de simplifier l'étape de désorption du métal de la phase solide du sol. Pour ce faire, les extractions chimiques ont été proposées et une large panoplie des méthodes chimiques existe pour la spéciation des ETM dans le sol ou la solution du sol et simuler le transfert sol-organisme du métal. Si la désorption de la phase solide est considérée comme la première étape de la biodisponibilité, ces approches peuvent fournir des informations utiles sur les quantités potentiellement biodisponibles même si la biodisponibilité dépend aussi de facteurs liés à l'organisme exposé. Par ailleurs, le lien entre la fraction extraite chimiquement et les effets toxiques est très ténu : car ce risque dépend des phénomènes liés au milieu, de la biodisponibilité *in vivo*, de la sensibilité des organismes au contact de l'ETM et de leurs modalités d'exposition (forte dose unique ou doses répétées et faibles). La considération de ces phénomènes (inclure l'aspect sol-, métal- et espèce- dépendant de la biodisponibilité dans les schémas extractifs) pourrait renforcer l'aspect fonctionnel des méthodes chimiques et améliorer leur valeur prédictive.

D'un autre côté, les méthodes extractives font l'objet de nombreuses critiques car elles sont toutes basées sur des mesures à l'équilibre alors que les milieux environnementaux sont des systèmes dynamiques. C'est pourquoi, certains auteurs se sont récemment intéressés à l'étude de la dynamique des micro-polluants métalliques en proposant des approches basées sur la cinétique des échanges sol-solution du sol-organisme des ETM. Les approches cinétiques font l'objet de la prochaine note d'actualité scientifique. Les aspects techniques, les avantages et les inconvénients seront décrits sous une optique de prédiction de la biodisponibilité.

Lexique

- (1) Élément Trace Métalliques (ETM) : La notion d'éléments-traces métalliques (ETM) tend à remplacer celle de métaux lourds qui a été et qui reste un concept mal défini car associant des métaux toxiques réellement lourds (mercure, plomb, cadmium) à d'autres à masse atomique plus réduite mais à comportement analogue (biopersistance en particulier). Ainsi, on inclut parfois dans la catégorie des métaux lourds certains éléments toxiques métalloïdiques comme l'arsenic. Il vaut mieux dans ce cas parler d'« éléments traces » ou « d'éléments en traces ».
- (2) Fraction biodisponible, biodisponibilité : le pourcentage d'une quantité donnée de xénobiotique atteignant la biophase (fluides biologiques) d'un organisme vivant. Le niveau de cette fraction influence directement l'activité ou la toxicité du xénobiotique.
- (3) Spéciation : identifier les différentes formes physicochimiques du métal
- (4) Fractionnement : différencier les fractions en métal par groupe de mobilité
- (5) Extraction chimique : une réaction chimique entre le métal et une substance chimique pouvant établir une liaison avec le métal et l'extraire de la phase solide du sol dans la solution
- (6) Fraction : une entité en métal ayant des forces de liaisons similaires avec les différents constituants du sol
- (7) Mobilité, fraction mobile ou mobilisable : la mobilité d'un ETM est liée à son aptitude à migrer de la phase solide du sol vers la solution et de se rendre biodisponible pour la flore et faune aquatique.
- (8) Lanthanides ou Éléments de Terre Rare (ETR) : tous les éléments, anciennement appelé « terre rare », parmi les 15 de numéro atomique compris entre 57 (lanthane) et 71 (lutécium). Les lanthanides et leurs dérivés sont utilisés dans la fabrication des céramiques conductrices et des catalyseurs. La chimie des ETR, leur solubilité et leur capacité à former des complexes est largement influencée par leurs rayons ioniques. D'une manière générale, ils sont très électropositifs et forment avec les autres éléments des complexes trivalents. En raison de leur similitude poussée, on les représente souvent indistinctement avec le pseudo-symbole chimique « Ln ».
- (9) Yttrium : élément de transition d'apparence métallique possédant un comportement chimique proche de celui des lanthanides. Il est utilisé dans la fabrication des tubes cathodiques des écrans.
- (10) Fraction labile : la fraction mobilisable potentiellement biodisponible.

Revue de la littérature

Manouchehri N, Bermond A. EDTA in soil science: A review of its application in soil trace metal investigations. *Terr Aquatic Environ Toxicol.* 2009; 3 : 1-15.

Peijnenburg WJGM, Zablotskaja M, Vijver MG. Monitoring metals in terrestrial environments within a bioavailability framework and a focus on soil extraction. *Ecotox Environ Safe.* 2007; 67: 163-179.

Young SD, Zhang H, Tye AM et al. Characterizing the availability of metals in contaminated soils. I. The solid phase: sequential extraction and isotopic dilution. *Soil Use Manage.* 2006; 21: 450-458.

Zimmerman AJ, Weindorf DC. Heavy metal and trace metal analysis in soil by sequential extraction: A review of procedures. *Int J Anal Chem.* 2010. doi:10.1155/2010/387803.

Publications de référence

Anju M, Banerjee DK. Comparison of two sequential extraction procedures for heavy metal partitioning in mine tailings. *Chemosphere.* 2010; 78: 1393-1402.

Beesley L, Moreno-Jiménez E, Lepp NCR et al. Mobility of arsenic, cadmium and zinc in a multi-element contaminated soil profile assessed by in-situ soil pore water sampling, column leaching and sequential extraction. *Environ Pollut.* 2010; 158: 155-160.

Ma WK, Smith BA, Stephenson GL et al. Development of a simulated earthworm gut determining bioaccessible arsenic, and zinc from soil. *Environ Toxicol Chem.* 2009; 28: 1439-1446.

Rao CRM, Sahuquillo A, Lopez-Sanchez JF. A review of the different methods applied in environmental geochemistry for single and sequential extraction of trace elements in soils and related materials. *Water Air Soil Poll.* 2008; 189: 291-333.

Soriano-Disla JM, Gomez I, Navarro-Pedreno J et al. Evaluation of single chemical extractants for the prediction of heavy metal uptake by barely in soils amended with polluted sewage sludge. *Plant Soil.* 2010; 327: 303-314.

Autres publications identifiées

Anju M, Banerjee DK. Comparison of two sequential extraction procedures for heavy metal partitioning in mine tailings. *Chemosphere.* 2010; 78: 1393-1402.

Article comparant deux schémas d'extraction séquentielle qui est une méthodologie déjà analysée dans la NAS.

Beesley L, Moreno-Jiménez E, Lepp NCR et al. Mobility of arsenic, cadmium and zinc in a multi-element contaminated soil profile assessed by in-situ soil pore water sampling, column leaching and sequential extraction. *Environ Pollut.* 2010; 158: 155-160.

Approche comparative des extractions séquentielles avec l'extraction simple; proche de ce qui a été analysé dans la NAS.

Hübner R, Astin KB, Herbert RJH. Dispersal and mobility of metal contamination across a salt marsh from coastal landfill sites using ammonium nitrate extractions as an indicator. *J Environ Monitor.* 2010; 12: 740-747.

L'extraction simple a été utilisée comme une méthode simple pour prédire la mobilité des ETM dans une zone côtière de décharge des déchets. L'extraction chimique s'est révélée un bon indicateur de la migration du métal du sol vers le milieu aquatique.

Issaro N, Besancon S, Bermond A. Thermodynamic and kinetic study of the single extraction of mercury from soil using sodium-thiosulfate. *Talanta.* 2010; 82: 1659-1667.

Un schéma d'extraction simple a été utilisé pour simuler la désorption du mercure de la phase solide des sols agricoles contaminés. La cinétique des échanges est considérée dans cette approche.

Roulier JL, Belaud S, Coquery M. Comparison of dynamic mobilization of Co, Cd and Pb in sediments using DGT and metal mobility assessed by sequential extraction. *Chemosphere.* 2010; 79: 839-843.

Approche comprenant les extractions séquentielles (basée à l'équilibre) avec une technique in situ qui mesure la dynamique des échanges dans le système sol/solution. Les approches cinétiques font l'objet de la prochaine NAS.

Mots clés utilisés pour la recherche bibliographique

Bioavailability, Chemical extraction, Fractionation, Sequential extraction, Single extraction, Soil, Speciation, Trace metal.