

# Bioaccessibilité des métaux dans les sols : influence de la taille des particules et utilisation pour l'évaluation des risques sanitaires

**Muriel MAZZUCA** | [muriel.mazzuca@univ-lille2.fr](mailto:muriel.mazzuca@univ-lille2.fr)

Université de Lille, Droit et santé, EA 4483 - IMPECS - Impact de l'environnement chimique sur la santé humaine, Lille

Mots clés : **Bioaccessibilité, métaux, neuro-développement, sols, taille de particule, vieillissement du sol**

La bioaccessibilité\* d'un contaminant dans les sols est définie comme la fraction de ce contaminant qui peut être extrait du sol par les fluides digestifs, au niveau du système salivaire et du tractus gastro-intestinal (1). Elle reflète la dose maximale d'un contaminant disponible à l'absorption (fraction dissoute) en incluant tous les procédés physiques, chimiques et microbiologiques du corps humain, du broyage dans la bouche à la précipitation dans l'intestin (2). La fraction bioaccessible peut se définir comme le ratio de la quantité existante sur la quantité ingérée.

L'évaluation du risque pour la santé humaine concernant l'ingestion de sol ou de particules de sol prend de plus en plus en compte les résultats obtenus par des méthodes *in-vitro* de simulation de la digestion gastro-intestinale en routine, qui estime la quantité bioaccessible d'un contaminant. Celles-ci sont rapides et peu coûteuses contrairement aux tests *in-vivo* qui représentent un coût élevé, impliquent l'utilisation d'un grand nombre d'animaux tout en relevant de considérations éthiques.

La connaissance des paramètres influençant la bioaccessibilité d'un contaminant dans les sols peut contribuer à mieux comprendre les mécanismes de l'imprégnation humaine et ainsi conduire à une amélioration de la prévention vis-à-vis des sols pollués et de leurs prises en charge. De plus, la bioaccessibilité d'un contaminant est une donnée plus pertinente à intégrer dans une évaluation de risque par rapport à la concentration totale en contaminant. Une réflexion nationale est actuellement en cours pour pouvoir les intégrer dans les outils de gestion des risques sanitaires vis-à-vis des sols contaminés.

Les deux premiers articles présentés s'attachent à établir l'influence de différents paramètres sur la bioaccessibilité des métaux dans les sols tandis que le dernier tente d'établir des liens entre des données de bioaccessibilité de métaux dans les sols et des pathologies neurologiques chez l'enfant.

## Effets de la taille des particules ingérées sur les teneurs bioaccessibles d'éléments toxiques présents dans le sol

Qin J. et al. (2016). Particle size effects on bioaccessible amounts of ingestible soil-borne toxic elements. *Chemosphere*, vol.159: p.442-8

### Résumé

La méthode *in-vitro* unifiée UBM\* (3) recommande l'utilisation d'une fraction fine de sol (< 250 µm) pour évaluer la bioaccessibilité des éléments potentiellement toxiques contenus dans le sol (6). Cependant, il a été constaté que 90 % des particules adhérentes aux mains des enfants sont inférieures à 100 µm (7) et que les concentrations totales les plus élevées en éléments toxiques se retrouvent dans les fractions les plus fines des sols (8). Aussi les auteurs ont voulu étudier la bioaccessibilité des éléments toxiques du sol en fonction de la taille des particules afin de montrer les limites de l'utilisation de la fraction du sol inférieure à 250 µm sur l'évaluation des risques sanitaires liés aux sols pollués. Quatre fractions (< 2 µm - [2 - 63 µm] - [63 - 125 µm] - [125 - 250 µm]) provenant de deux pools de sols acides et alcalins ont été utilisées pour examiner l'influence de la taille des particules sur la bioaccessibilité d'éléments toxiques du sol en utilisant la

méthode UBM. Des caractéristiques physico-chimiques des deux pools de sols ont été déterminées (pH, conductivité électrique, teneurs totales en carbone organique\*), leurs concentrations en éléments toxiques pour Al\*, As\*, Cd\*, Cr\*, Cu\*, Fe\*, Mn\*, Ni\*, Pb\* et Zn\* ainsi que leurs répartitions en fonction de la taille des particules. Les résultats concernant les teneurs totales en éléments toxiques indiquent qu'il existe une augmentation significative de ces teneurs avec la diminution de la taille des particules du sol à l'exception du Cr et de l'As dans les pools de sols acides.

De la même façon, il existe une tendance à l'augmentation de la bioaccessibilité gastrique des éléments toxiques des sols avec la diminution de la taille des particules pour tous les éléments étudiés dans les deux pools. Dans le pool alcalin, il n'existe pas de différences significatives entre la bioaccessibilité gastrique des éléments toxiques de la fraction [63 - 125 µm] et celles de la fraction [125 - 250 µm] pour Al, Cr, Fe, Ni, Pb et Zn. Dans le pool acide, il n'existe pas de différences significatives entre la bioaccessibilité gastrique des éléments toxiques bioaccessibles de la fraction [2 - 63 µm] et celles de la fraction [63 - 125 µm] pour Al, As, Cu, Fe, Mn, Pb et Zn. La fraction < 2 µm présente les valeurs de bioaccessibilité gastrique les plus élevées pour les deux pools.

Une tendance similaire est observée pour les valeurs de la bioaccessibilité intestinale. Les valeurs de la bioaccessibilité

intestinale de tous les éléments toxiques étudiés dans les deux pools de sols tendent à augmenter lorsque la taille des particules diminue. Dans le pool alcalin, il n'existe pas de différences significatives entre la fraction [63 - 125 µm] et la fraction [125 - 250 µm] sauf pour Cu et Mn. Dans le pool acide, il n'existe pas de différences significatives entre la fraction [2 - 63 µm] et la fraction [63 - 125 µm] pour As et [63 - 125 µm] et [125 - 250 µm] pour Cr. Comme pour la bioaccessibilité gastrique, la fraction < 2 µm présente les valeurs de bioaccessibilité intestinale les plus élevées pour les deux pools.

En conclusion pour tous les éléments toxiques étudiés, il existe une relation linéaire étroite entre les teneurs totales et les valeurs de bioaccessibilités gastrique et intestinale. Les bioaccessibilités gastrique et intestinale augmentent avec la diminution de la taille des particules, celle-ci étant inversement proportionnelle à la teneur totale en éléments toxiques, ce qui démontre l'importance du rôle de la taille des particules potentiellement ingérées de sol sur la bioaccessibilité des éléments toxiques. Les résultats de cette étude montrent que la bioaccessibilité est la résultante de phénomènes complexes variables d'un élément à l'autre ainsi qu'avec la taille des particules de sol.

### Commentaire

Cette étude descriptive montre bien l'existence de liens significatifs entre la taille des particules ingérées de sol et la bioaccessibilité gastrique et intestinale en éléments toxiques. Les auteurs décrivent quelques singularités concernant le comportement de certains métaux comme l'As, l'Al ou le Cr et tentent de l'expliquer en se basant sur des résultats d'études bibliographiques. Néanmoins leur conclusion reste à conforter avec des études plus ciblées. Des analyses statistiques plus approfondies entre les trois catégories de résultats (teneur totale, bioaccessibilité gastrique et bioaccessibilité intestinale vs fractions des sols) auraient pu être envisagées pour l'ensemble des éléments toxiques étudiés provenant de deux pools de sols. Il aurait été intéressant que des paramètres physico-chimiques des sols (en plus du pH) soient inclus dans une analyse statistique multivariée et que d'autres paramètres soient recherchés (spéciation de l'élément toxique,  $MO^+$ ,  $C/N^+$ ,  $CEC^+$ , teneur en  $CaCO_3^+$ , humidité, ...). Ainsi des corrélations plus fines entre la taille des particules de sols et les teneurs en éléments toxiques auraient pu être démontrées et des paramètres influençant la variabilité de la bioaccessibilité gastrique et intestinale auraient probablement été mis en évidence. Néanmoins, cette étude confirme que la bioaccessibilité en éléments toxiques est maximale dans les fractions les plus fines des sols. De ce fait, comme ce sont les particules de sols les plus fines qui adhèrent le plus aux doigts des enfants et sont donc susceptibles d'être majoritairement ingérées, et l'intégration de leur taille dans les analyses de risque sanitaires est à considérer. Une réflexion serait alors à mener sur la fraction granulométrique des sols la plus pertinente à inclure dans les analyses de risques afin de ne pas minimiser leurs conclusions.

### Effet du vieillissement sur la bioaccessibilité de l'arsenic et du plomb dans les sols

Liang S. et al. (2016). Effect of aging on bioaccessibility of arsenic and lead in soils. *Chemosphere*, vol.151: p.94-100

#### Résumé

La mesure de la bioaccessibilité des métaux dans les sols est de plus en plus utilisée dans l'évaluation des risques pour la santé humaine, et plus spécifiquement dans l'étude de l'imprégnation humaine aux métaux par ingestion (9). Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'effet du vieillissement des sols sur la bioaccessibilité des métaux. En effet, au cours du vieillissement, le processus de partitionnement des métaux dans le sol est modifié et peut altérer leurs propriétés biodisponibles\* (10). Pour étudier ce phénomène de vieillissement et son impact sur la bioaccessibilité de l'As et du Pb, trois sols de pH différents ont été enrichis avec des concentrations variées en As et Pb. Des paramètres physico-chimiques de ces sols ont été déterminés : pH, CEC, taille des particules, carbones organique et inorganique, oxydes de fer amorphe et cristallin, concentrations en Mn, Al, As et Pb, etc. Les sols ont été stockés à humidité constante et des échantillons ont été prélevés à différents moments, entre 1 et 76 semaines. La méthode PBET\* (11-12) a été utilisée pour déterminer les bioaccessibilités gastrique et intestinale des métaux et des extractions séquentielles ont été menées pour mesurer leur fractionnement dans les sols selon 2 x 5 formes géochimiques<sup>2</sup> pour As et pour Pb. L'analyse des propriétés physico-chimiques des 3 sols étudiés indique qu'ils sont très différents. Les résultats concernant l'effet du vieillissement sur la bioaccessibilité des métaux montrent que les bioaccessibilités gastrique et intestinale de l'As et du Pb diminuent avec le vieillissement quel que soit le type de sol ou la concentration initiale.

Cette diminution est très marquée pour l'As au cours des quatre premières semaines de vieillissement (4,7 % à 29 %) suivie d'une décroissance plus lente (0,3 % à 8,8 %). Les bioaccessibilités gastrique et intestinale sont similaires dans le temps et la présence d'oxyde de fer et de carbone organique réduit cette bioaccessibilité. Pour le Pb, les bioaccessibilités gastrique et intestinale sont très différentes. La faible bioaccessibilité du Pb en phase gastrique semble liée à la présence élevée d'oxyde de fer et de carbone organique, et celle en phase intestinale paraît être associée au pH acide des sols. La variabilité de la bioaccessibilité du Pb dans le temps est différente de l'As. Le temps d'équilibre pour l'As est plus long que celui de Pb au cours du vieillissement. La bioaccessibilité de l'As et du Pb dans les sols au cours du vieillissement est contrôlée par des paramètres du sol très différents. L'étude des fractions géochimiques de l'As et du Pb indique que dans la phase gastrique l'As bioaccessible se trouve principalement sous la forme d'As non spécifiquement adsorbés, tandis que le Pb se trouve sous la forme de carbonate. Pour la phase intestinale, le Pb bioaccessible serait principalement sous forme échangeable.

En conclusion, le vieillissement des sols semblerait présenter des répercussions sur les bioaccessibilités de l'As et du Pb qui diminueraient avec le temps et seraient influencées par

certaines paramètres physico-chimiques comme la présence d'oxyde de fer, de carbonate et le pH.

### Commentaire

Les objectifs de cette étude étaient (i) d'évaluer l'effet du vieillissement sur la bioaccessibilité de As et Pb dans différents sols et (ii) d'étudier la relation de la bioaccessibilité de As et Pb et de leur fractionnement dans des sols amendés. Ainsi, les auteurs montrent qu'il existe une influence du vieillissement sur la bioaccessibilité des sols et que celle-ci serait régie par des phénomènes complexes liés aux propriétés intrinsèques des sols ainsi qu'à chacun des éléments étudiés. De plus, ils observent que le vieillissement peut modifier la spéciation de As et Pb bioaccessibles présents dans des sols amendés.

Il est toutefois dommage que tous les paramètres physico-chimiques n'aient pu être analysés dans le temps afin de les corrélés aux variations de la bioaccessibilité de As et Pb. Des analyses de régressions linéaires multiples auraient pu être entreprises pour établir des équations mettant en exergue les principales variables susceptibles d'influer sur la bioaccessibilité de As et Pb et le changement de distribution de As et Pb au cours du temps. Les résultats ainsi obtenus sur le Pb et l'As étant très différents, d'autres études du même type seraient à envisager avec de nouveaux éléments toxiques et un nombre plus important de sol ayant des caractéristiques physico-chimiques variées afin de déduire des règles applicables à l'ensemble des sols pour chaque élément toxique. D'autres tests de mesure de la bioaccessibilité dans les sols pourraient aussi être envisagés comme la méthode UBM utilisée en Europe et en cours d'intégration à la norme XP ISO/TS 17924 (2). Les mesures de bioaccessibilité sont très variables pour un même élément toxique et sont influencées par différents facteurs (taille, paramètres physico-chimiques, vieillissement, etc.). Il est alors préférable lorsqu'une mesure de bioaccessibilité est réalisée de renseigner au maximum les sources de pollutions existantes et l'ensemble des caractéristiques sols.

### Utilisation d'un test d'extraction basé sur la physiologie pour évaluer les relations entre les métaux bioaccessibles dans le sol urbain et les conditions du développement neurologique chez les enfants

Hong J. et al. (2016). The use of a physiologically-based extraction test to assess relationships between bioaccessible metals in urban soil and neurodevelopmental conditions in children. *Environ. Pollut.*, vol.212: p.9-17

### Résumé

La Déficience Intellectuelle (DI) et l'Infirmité Motrice Cérébrale (IMC) sont des troubles graves du développement neurologique qui surviennent *in-utero* et deviennent manifestes pendant la petite enfance. La DI est caractérisée par une réduction du fonctionnement intellectuel et adaptatif avec un taux d'incidence aux USA de 10,4/1000 habitants (14). L'IMC est un trouble du comportement qui affecte la posture et l'équilibre avec un taux d'incidence de 2/1000 enfants nés vivants (15). L'exposition aux métaux

lourds contenus dans le sol a déjà été associée à des effets neurologiques chez les enfants. Cette publication présente les relations entre les bioaccessibilités gastrique et intestinale des métaux (Pb, Ni, Cr et Cd) contenus dans les sols, obtenues par la méthode PBET, et les résultats neurologiques d'enfants (DI, IMC) et le petit poids de naissance (PPN) (< 2500 g). Ainsi, des sols urbains ont été collectés en Caroline du Sud sur une zone de 105 km<sup>2</sup>. La bioaccessibilité des métaux a été corrélée avec les lieux de vie des enfants nés entre 1996 et 2002. Les relations entre les résultats de bioaccessibilité et les données de santé des enfants (DI, IMC, PPN) suivis sur 8 ans après leur naissance ont été étudiées. Sur 3091 enfants, 201 ont présenté une DI (6,5 %), 17 une IMC (0,55 %) et 409 avait un PPN (13,34 %). Deux méthodes d'analyses statistiques ont été utilisées. La première avec un modèle de régression linéaire simple, la seconde, avec un modèle additif généralisé (MAG<sup>\*</sup>) pour étudier de façon plus souple et plus réaliste les associations linéaires et non linéaires. Ces analyses ont été effectuées en prenant en compte les bioaccessibilités gastrique et intestinale des métaux dans les sols, des données sur la mère (ethnie, âge, nombre de naissances antérieures, consommation d'alcool, lieux de vie, ancienneté du logement) et l'enfant (DI, IMC, PPN et sexe). Les sols présentaient une bioaccessibilité gastrique comprise entre : 0,96% - 14,7 % pour Cr ; 32,7 % - 81 % pour Cd ; 2,69 % - 51,3 % pour Pb et 5,43 % - 41,3 % pour Ni et une bioaccessibilité intestinale comprise entre : 1,2 % - 15,7 % pour Cr ; 13,4 % - 55,6 % pour Cd ; 0,7 % - 30,9 % pour Pb et 2,6 % - 16,5 % pour Ni. Il a été mis en évidence une relation linéaire entre la bioaccessibilité gastrique, la bioaccessibilité intestinale et les teneurs totales en métaux pour Cd, Pb et Ni. La part bioaccessible des métaux est variable et dépend de l'élément étudié dans le sol.

La comparaison des données de la mère et celles d'enfants présentant une DI indique qu'il existe des différences significatives pour le sexe et le poids de l'enfant, l'ethnie et l'âge de la mère. Pour les enfants présentant une IMC, les différences significatives concernent le poids de l'enfant. Enfin, pour les enfants présentant un PPN, il existe des différences significatives avec le sexe de l'enfant, l'ethnie de la mère, sa consommation d'alcool et l'ancienneté de la maison.

Il n'existe pas de corrélation entre les concentrations totales en métaux ou leurs bioaccessibilités gastriques et la DI, l'IMC et le PPN. Pour ce qui est de la bioaccessibilité intestinale des métaux dans les sols, il existe des corrélations significatives avec le Pb et le Ni pour les enfants présentant des DI, le Cd pour les enfants présentant une IMC et le Pb et le Cd pour des enfants avec un PPN. Les résultats obtenus avec le MAG indiquent que le risque le plus élevé d'observer une DI est lié au sexe masculin de l'enfant, l'âge de la mère > 34 ans après ajustement sur Pb et Ni. Le risque d'observer une IMC est plus élevé lorsque l'enfant présente un PPN après ajustement sur le Cd. Le risque d'observer un PPN est lié à l'ethnie de la mère et sa consommation d'alcool après ajustement sur Pb et Cd.

Enfin, une valeur seuil de la bioaccessibilité intestinale du Pb a pu être déterminée pour prédire l'apparition d'un PPN, soit 130,6 mg/kg de Pb total. Les auteurs suggèrent qu'une fois les résultats confirmés, ils pourront conduire à des mesures de prévention appropriées auprès des femmes enceintes.

## Commentaire

Cette étude suggère l'implication de trois métaux (Pb, Cd et Ni) dans l'apparition de troubles neurologiques chez l'enfant en lien avec la bioaccessibilité intestinale et l'existence d'une valeur seuil de la bioaccessibilité intestinale du Pb à partir de laquelle la probabilité de PPN chez le nouveau-né est plus élevée. Cependant, la variabilité de la bioaccessibilité de ces trois métaux devrait être discutée et l'étude des effets de synergie des métaux pourrait être envisagée. Compte tenu de la diversité des propriétés des sols, la valeur seuil de bioaccessibilité intestinale du Pb déterminée pour l'apparition de PPN est propre au site de Caroline du Sud étudié et ne pourra pas être utilisée pour d'autres sites.

Cette étude est très originale car elle utilise des données de bioaccessibilités des sols pour étudier l'apparition de pathologies neurologiques *in-utero* ce qui n'est pas courant. Néanmoins, en ce qui concerne les facteurs environnementaux, relier des pathologies liées au développement neurologique uniquement à la bioaccessibilité de trois métaux présents dans les sols est une approche très simpliste. En effet, ces pathologies peuvent être reliées à bons nombres d'autres facteurs environnementaux (perturbateurs endocriniens, ...), sociaux, comportementaux, etc. qui ne sont pas pris en compte, ni cités. Il serait d'abord judicieux d'établir un inventaire des facteurs susceptibles d'avoir une influence sur l'apparition de ces pathologies avant de cibler uniquement l'influence des sols.

Ce type d'étude est ambitieux mais les incertitudes sur les données doivent être explicitées et réduites pour les futures recherches afin de permettre des conclusions plus tranchées.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Le sol est un compartiment de l'environnement très complexe et soumis à différents processus : dépôts, infiltration, ruissèlement, transfert entre autres. Il est à l'interface de l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère et se caractérise par de nombreux paramètres qui sont à prendre en compte dans l'évaluation des risques sanitaires liés aux sols contaminés.

La bioaccessibilité d'un contaminant dans les sols varie selon l'élément trace considéré et dépend de sa mobilité et de son piégeage dans ce compartiment. Ainsi les facteurs influençant leurs bioaccessibilités gastrique et intestinale d'un contaminant sont liés aux caractéristiques physico-chimiques du sol et à la spéciation du contaminant.

L'intégration de la bioaccessibilité peut être envisagée pour affiner l'exposition aux contaminants contenus dans les sols, afin d'apprécier les risques sanitaires de manière plus réalistes et propres au site étudié. Il reste à déterminer les facteurs susceptibles de l'influencer et de pouvoir établir des relations spécifiques afin d'appréhender aux mieux les risques sanitaires et environnement liés à la pollution des sols.

## GENERAL CONCLUSION

*Soil is a very complex environmental compartment, which is characterized by many parameters to take into account when performing risks assessment. The bioaccessibility of metals in soil depends on the metals mobility and trapping in this compartment. Factors influencing their bioaccessibilities are related to the soil physicochemical characteristics and metal speciation. Each metal has its own properties and their bioaccessibility is different.*

*Integrating bioaccessibility is intended to carry out a health risk assessment more realistic and specific to the site. It remains to determine the factors likely to influence it and to establish dose-response relationships in order to understand better the risks related to contaminated soil.*

## Lexique

**BARGE - Bioavailability Research Group of Europe** : Le groupe de travail BARGE rassemble des équipes de recherche néerlandaises, danoises, anglaises, autrichiennes, lithuaniennes, canadiennes, américaines, belges et françaises, qui travaillent sur le développement de tests *in-vitro* faciles à mettre en œuvre et peu coûteux afin d'évaluer la biodisponibilité des ETM\* présents dans des échantillons de sols (4-5). Dans ce but, un modèle de digestion gastro-intestinale est en cours d'optimisation pour l'évaluation de la biodisponibilité des ETM et la prise en compte des caractéristiques physico-chimiques des sols. Son utilisation permettrait d'identifier les paramètres influant sur les risques sanitaires engendrés par l'ingestion de sols contaminés. Il vise à mettre à la disposition des décideurs des données robustes sur la biodisponibilité qui pourront être utilisées dans l'évaluation des risques sanitaires et la mise en place de réglementations. Une proposition de norme ISO sur l'évaluation du risque que peut présenter l'ingestion de sols contaminés est cours de finalisation.

**Bioaccessibilité** : La fraction bioaccessible ou bioaccessibilité orale d'une substance présente dans une matrice, est la fraction massique de cette substance qui est extraite de cette matrice par actions des fluides digestifs dans le tractus gastro-intestinal (salive, fluides stomacaux et intestinaux). Elle peut se définir comme le ratio de la quantité extraite sur la quantité ingérée et correspond à la quantité maximale d'une substance ingérée disponible à l'absorption (transport à travers l'épithélium intestinal) et susceptible d'engendrer un effet toxique. La bioaccessibilité fait l'objet d'expérimentations *in-vitro* à l'aide de nombreux tests. Elle dépend des propriétés de la substance et de sa matrice. Cf. Afnor - Norme ISO/TS 17924 (2)

**Biodisponibilité** : La fraction biodisponible, ou biodisponibilité orale d'une substance présente dans une matrice, est la fraction de cette substance qui atteint la circulation sanguine (ou circulation systémique) et pourrait provoquer un effet sur la santé. Cette fraction peut se définir comme le ratio de la

dose absorbée sur la dose administrée, elle est divisée en trois processus :

la libération de la substance de sa matrice = bioaccessibilité  
le transport de la substance à travers l'épithélium = absorption  
la transformation de la substance dans le foie = métabolisme  
La biodisponibilité fait l'objet d'expérimentations *in-vivo* chez l'animal. Elle dépend des propriétés de la substance et de sa matrice. Cf. AFNOR - Norme ISO/TS 17924 (2)

**C/N** : Le rapport Carbone/Azote est un indicateur du fonctionnement du sol et de son activité biologique. S'il est élevé (> 12), il est le signe d'une dégradation trop lente de la MO<sup>+</sup>, s'il est faible (<8), il met en évidence une activité trop importante du sol.

**CaCO<sub>3</sub> - carbonate de calcium.** Les carbonates précipitent dans le sol et sont également présents sous forme de débris de roches comme héritage des roches calcaires et des autres roches carbonatées. La surface d'échange développée sur les carbonates est importante et explique leur affinité pour l'ion phosphate, le cadmium, le manganèse et le zinc. À cette propriété s'ajoute la présence du calcaire actif. Dès lors, la forte teneur en calcium du milieu joue un rôle sur l'immobilisation des ions phosphate et de certains oligo-éléments. Ainsi, en milieu très carbonaté, le bore et le fer peuvent précipiter et rester sous des formes insolubles aux pas de temps nécessaires à l'alimentation des plantes, provoquant des carences. L'importance des carbonates réside dans la régulation du pH, dans l'offre de l'élément calcium pour les organismes vivants, et dans le rôle structurant de l'agrégation des sols. En effet, le calcium a un rôle flocculant vis-à-vis des argiles et stabilise les composés organiques. Ces mécanismes participent à l'organisation et à la stabilité de la structure du sol.

**Carbone organique** : Le stock de carbone organique des sols est fonction, d'une part, des flux entrant dans le sol et, d'autre part, des vitesses de biodégradation - ou de minéralisation - des MO<sup>+</sup> dans le sol. Les flux entrants reposent principalement sur la production végétale et sa gestion (récoltes, gestion des résidus, etc.). Les vitesses de minéralisation dépendent de la nature des MO et des conditions du milieu qui influencent l'activité des microorganismes (aération, humidité, localisation de la matière organique dans le sol, température, etc.). La capacité de stabilisation du carbone organique des sols - ou, autrement dit, leur capacité de protection vis-à-vis de la biodégradation - dépend en partie de leurs propriétés intrinsèques et en particulier de leur teneur en argile.

**CEC - Capacité d'Échange Cationique** : mesure chimique permettant d'approcher la capacité du sol à fixer de façon réversible les cations échangeables (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>,...).

**ETM - Éléments Traces Métalliques** : comme le fer, le plomb, le mercure, le chrome, le cuivre, l'étain, le cadmium, l'argent, le zinc, le titane, l'or, le nickel...

**MAG - Modèle Additif Généralisé** : en statistiques, le MAG est un modèle statistique pour fusionner les propriétés du modèle linéaire généralisé avec celles du modèle additif. Le modèle spécifie une distribution (comme la distribution normale, ou la distribution binomiale) et une fonction de lien g reliant la valeur attendue de la distribution aux prédicteurs, et tentant d'ajuster les fonctions  $f_i$  pour satisfaire :  $g(E(Y)) = \theta_0 + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_m(x_m)$

Les fonctions  $f_i$  peuvent être ajustées en utilisant les moyennes non paramétriques ou paramétriques, et

fournissant ainsi potentiellement de meilleurs ajustements aux données que les autres méthodes. En autorisant les ajustements non paramétriques, les MAGs bien conçus permettent de bons ajustements aux données d'apprentissage avec des hypothèses non contraignantes sur les relations réelles, peut-être aux dépens de l'interprétabilité des résultats.

**MO - Matière Organique** : les matières organiques du sol assurent de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales. Elles jouent un rôle de tampon vis-à-vis des autres milieux (biosphère, eaux, sous-sol) et participent au cycle des gaz à effet de serre. Elles améliorent la fertilité, l'aération, la réserve en eau et la biodiversité du sol. Elles limitent la compaction et l'érosion hydrique et favorisent le piégeage des métaux toxiques ou des micropolluants organiques.

**PBET - Physiologically Based Extraction Test** - Test d'extraction basé sur la physiologie, qui simule l'extraction gastro-intestinale. Il s'agit d'un système *in-vitro* visant à prédire la biodisponibilité des métaux à partir d'une matrice solide intégrant les paramètres du tractus gastro-intestinal d'un être humain (y compris le pH et la chimie de l'estomac et de l'intestin grêle, le ratio sol-solution, la composition de l'estomac et les taux de vidange gastrique). Il a d'abord été conçu pour l'étude spécifique de la biodisponibilité du Pb dans les sols (13). Des études antérieures ont montré que les résultats du test PBET sont corrélés avec la bioaccessibilité déterminée par des études *in-vivo* (11).

**UBM - Unified Bioaccessibility Method** - The BARGE\* UBM : Méthode de Bioaccessibilité Unifiée - Cette méthode a été élaborée par le groupe de recherche BARGE. C'est une étape scientifique importante dans la fourniture de données de bioaccessibilité par ingestion robustes et défendables dans l'évaluation des risques pour les professionnels et les universitaires travaillant sur la gestion des terrains contaminés.

## Publications de référence

**1 Dor F, Denys S et les membres du GT.** Quantités de terre et poussières ingérées par un enfant de moins de 6 ans et bioaccessibilité des polluants. État des connaissances et propositions. Saint-Maurice (Fra) : *Institut de veille sanitaire*, septembre 2012,

**2 AFNOR.** Qualité du sol - Evaluation de l'exposition humaine par ingestion de sol et de matériaux du sol. *Norme XP ISO/TS 17924* - 2008 mars

**3 Oomen AG, Hack A, Minekus M et al.** Comparison of five in vitro digestion models to study the bioaccessibility of soil contaminants. *Environ. Sci. Technol.*, 2002;**36**:3326-34

**4 Oomen AG** (2000). Bioavailability of soil borne contaminants. *University of Utrecht*.

**5 Versantvoort CHM, Oomen AG, VandeKamp E, et al.** Applicability of an in vitro digestion model in assessing the bioaccessibility of mycotoxins from food. *Food and Chemical Toxicology* 2005;**43**:31-40

**6 Wragg J, Cave M, Basta N, et al.** An inter-laboratory trial of the unified BARGE bioaccessibility method for arsenic, cadmium and lead in soil. *Sci. Total. Environ.*, 2011;**409**:4016-30

**7 Ikegami M, Yoneda M, Tsuji T, et al.** Effect of particle size on risk assessment of direct soil ingestion and metals adhered to children's hands at playgrounds. *Risk. Anal.*, 2014;**34**:1677-87

**8 Zong YT, Xiao Q, Lu SG.** Distribution, bioavailability, and leachability of heavy metals in soil particle size fractions of urban soils (northeastern China). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016 <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6652-y>

**9 Li J, Li K, Cave M, et al.** Lead bioaccessibility in 12 contaminated soils from China: correlation to lead relative bioavailability and lead in different fractions. *J. Hazard. Mater.*, 2015;**295**:55-62

**10 Degryse F, Smolders E, Parker DR.** Partitioning of metals (Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn) in soils: concepts, methodologies, prediction and applications-a review. *Eur. J. Soil Sci.*, 2009;**60**:590-612

**11 Ruby MV, Davis A, Schoof R, et al.** Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. *Environ. Sci. Technol.*, 1996;**30**:422-30

**12 Rodriguez RR, Basta NT, Casteel SW, et al.** An in vitro gastrointestinal method to estimate bioaccessible arsenic in contaminated soils and solid media. *Environ. Sci. Technol.*, 1999;**33**:642-9

**13 Ruby MV, Davis A, Link TE, et al.** *Environ. Sci. Technol.* 1993;**27**(13):2870-77

**14 Maulik PK, Mascarenhas MN, Mathers CD, et al.** Prevalence of intellectual disability: a meta-analysis of population-based studies. *Res. Dev. Disabil.*, 2011;**32**:419-36

**15 Himmelmann K, Uvebrant P.** The panorama of cerebral palsy in Sweden. Xi. Changing patterns in the birth-year period 2003–2006. *Acta Paediatr.*, 2014;**103**:618-24

**Xia Q, Peng C, Lamb D, et al.** Effects of arsenic and cadmium on bioaccessibility of lead in spiked soils assessed by Unified BARGE Method. *Chemosphere*. 2016;**154**:343-9.

### Liens d'intérêts :

Les auteurs déclarent n'avoir aucun lien d'intérêt.

### Revue de la littérature

**Fayiga AO, Saha UK.** Soil pollution at outdoor shooting ranges: Health effects, bioavailability and best management practices. *Environ Pollut.* 2016;**216**:135-45.

### Autres publications identifiées

**Li SW, Sun HJ, Li HB, et al.** Assessment of cadmium bioaccessibility to predict its bioavailability in contaminated soils. *Environ Int.* 2016;**94**:600-6

**Li HB, Zhao D, Li J, et al.** Using the SBRC Assay to Predict Lead Relative Bioavailability in Urban Soils: Contaminant Source and Correlation Model. *Environ Sci Technol.* 2016;**50**(10):4989-96

**McEwen AR, Hsu-Kim H, Robins NA, et al.** Residential metal contamination and potential health risks of exposure in adobe brick houses in Potosí, Bolivia. *Sci Total Environ.* 2016;**562**:237-46

**Ollson CJ, Smith E, Scheckel KG et al.** Assessment of arsenic speciation and bioaccessibility in mine-impacted materials. *J Hazard Mater.* 2016;**313**:130-7