

## Ecotoxicologie du cuivre et du zinc dans les sols agricoles : caractériser l'effet protecteur de la fertilisation organique pour l'intégrer aux méthodes d'évaluation des risques

Malgré les multiples intérêts qu'apporte l'épandage des fertilisants organiques d'origine résiduaire, cette pratique participe de façon importante à la contamination chimique des sols agricoles. Le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont généralement les contaminants apportés en plus grande quantité sur les sols agricoles, avec des apports annuels moyens sur les sols français allant de quelques centaines de grammes à quelques kilogrammes par hectare et par an (Belon et al., 2012). Les fertilisants organiques sont la principale source de contamination des sols agricoles en Cu et Zn, avec un impact en termes d'écotoxicité terrestre et aquatique suspecté d'être majeur relativement aux autres contaminants apportés par la fertilisation organique (Leclerc et Laurent 2017 ; Sydow et al., 2018).

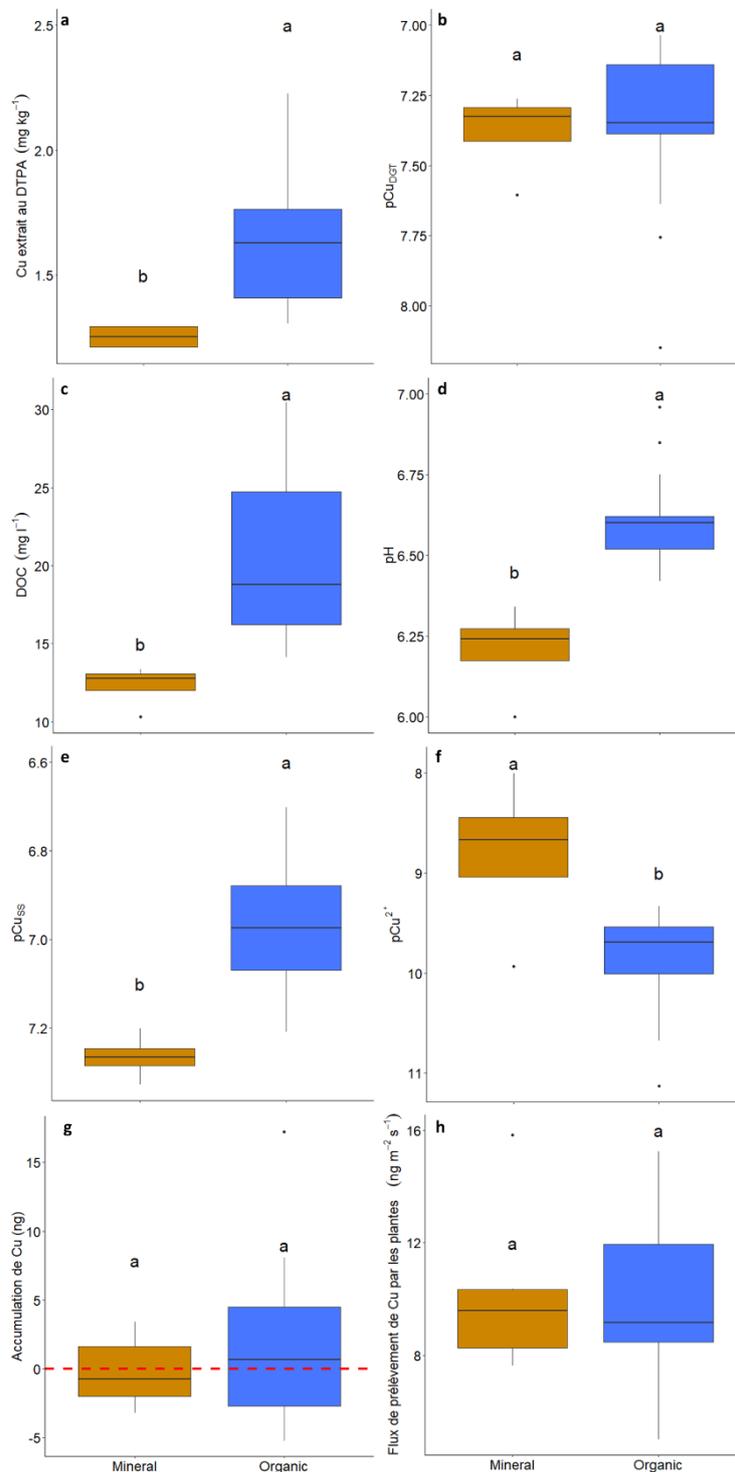
Au début des années 2010, des travaux expérimentaux ont pourtant suggéré que l'apport de fertilisants organiques pourrait avoir un effet protecteur sur l'écotoxicité du cuivre dans le sol (Smolders et al., 2012). Ces travaux ont cependant évalué cet effet protecteur relativement à une contamination fraîche du sol réalisé avec un sel soluble et sans caractériser les mécanismes sous-jacents. Afin d'évaluer l'importance environnementale de cet effet protecteur, nous en avons étudié les déterminants biotiques et abiotiques sur des échantillons de sol issus d'essais agronomiques de terrain menés sur une décennie.

### Une évaluation du risque agronomiquement réaliste et intégrant les effets confondants

Evaluer le risque écotoxicologique lié à la contamination en Cu et Zn des sols agricoles recevant des fertilisants organiques requière des adaptations méthodologiques relativement aux protocoles classiquement mis en œuvre en écotoxicologie terrestre. Il est premièrement nécessaire de se placer dans un contexte agronomiquement réaliste, où les fertilisants organiques sont apportés au champ, de façon répétée dans le temps et à des doses raisonnables pour être représentatives des pratiques des agriculteurs. Pour ce faire, nous avons sélectionné plusieurs dizaines d'échantillons de sol parmi plus de 300 échantillons collectés pendant une décennie sur trois essais agronomiques comparant des modalités de fertilisation minérale et organique.

Il est deuxièmement crucial de tenir compte explicitement des facteurs confondants liés à la fertilisation organique. Ces facteurs confondants comprennent l'effet bénéfique de cette pratique sur les organismes du sol qui peut se surimposer à un éventuel effet toxique, le contexte de multi-contamination systématique qui rend complexe l'attribution d'un effet toxique à un contaminant en particulier et, enfin, l'évolution des propriétés du sol (notamment du pH et de la matière organique) au fur et à mesure des apports répétés de fertilisants organiques.

Pour contourner ces difficultés, les échantillons ont été sélectionnés au sein de chacun des trois essais afin de couvrir une gamme de niveau de contamination en Cu et Zn, de pH et de concentration en matière organique en lien avec les pratiques de fertilisation. Plutôt que de mesurer un effet toxique qu'il aurait été difficile d'associer à la présence de Cu et Zn en particulier, nous avons choisi de mesurer le prélèvement effectif (*i.e.* biodisponibilité) de Cu et Zn pour une espèce de plante cultivée (*Festuca arundinacea*) et une espèce de vers de terre retrouvée sur les sites d'étude (*Dichogaster saliens*), en considérant cette mesure comme un indicateur précoce d'un éventuel effet toxique. Le recours à des biotests de laboratoire pour mesurer la biodisponibilité a permis de limiter les effets confondants des pratiques de fertilisation sur la croissance des organismes étudiés. Enfin, afin de faire le lien entre l'apport de fertilisants au sol et les mesures de biodisponibilité, la disponibilité de Cu et Zn a été mesurée sur les échantillons de sol, à la fois sur la phase solide et la solution.



**Figure 1** : Niveau de contamination en cuivre (Cu) estimé par un extrait au DTPA (a), disponibilité globale de Cu estimée par la mesure en DGT (b), concentration en carbone organique dissous (c), pH (d), disponibilité de Cu en solution estimée à travers la concentration totale en Cu (e) et l'activité de Cu libre (f) et la biodisponibilité de Cu pour une espèce de vers de terre (g) et de plantes (h) dans un arénosol en fonction du type de fertilisation. Des lettres différentes indiquent une différence significative ( $p < 0,05$ ).

### **Une disponibilité atténuée dans le sol par la fertilisation organique**

Comme cela est présenté en détail dans l'article de Laurent et al. (2020), une décennie de fertilisation organique a, comme attendu, contaminé le sol en Cu et Zn comme le révèlent les mesures dans les extraits au DTPA (Figure 1a). Pourtant la disponibilité globale dans le sol, estimée à l'aide de mesures DGT, n'a pas ou très faiblement augmenté pour Cu (Figure 1b) et n'a pas augmenté, voire a diminué pour Zn. Ce constat semble pouvoir être expliqué par l'augmentation de la concentration en matière organique dissoute (MOD) et du pH des échantillons de sol ayant reçu une fertilisation organique (Figure 1c et d). Si l'augmentation de la concentration en MOD a induit une augmentation de la concentration totale de Cu en solution (Figure 1e), l'augmentation conjointe de la MOD et du pH a au contraire diminué l'activité de Cu libre en solution (Figure 1f). Concernant Zn qui a une affinité pour la matière organique beaucoup plus faible que Cu, l'augmentation de pH s'est accompagnée d'une diminution de la concentration totale et libre de Zn en solution. Ces résultats soutiennent l'idée d'un effet protecteur de la fertilisation organique sur la disponibilité de Cu et Zn dans les sols, capable de contrebalancer l'augmentation du niveau de contamination du sol.

### **Une biodisponibilité pour les plantes et les vers de terre équivalente malgré la contamination**

Comme cela est présenté en détail dans les articles de Laurent et al. (2023 et 2024), une décennie de fertilisation organique n'a pas fait augmenter la biodisponibilité de Cu et Zn pour les vers de terre et les plantes relativement à une fertilisation minérale (Figure 1g et h). Pour les vers de terre, l'absence d'augmentation de la biodisponibilité semble directement liée à l'effet protecteur exercé par la fertilisation organique sur la disponibilité de Cu et Zn dans le sol. Pour les plantes, l'absence d'augmentation de la biodisponibilité semble être plutôt due aux modifications des propriétés physico-chimiques induites par les activités racinaires qui ont eu pour conséquence d'homogénéiser la disponibilité de Cu et Zn dans la rhizosphère quelle que soit la modalité de fertilisation. En plus de l'effet protecteur de la fertilisation organique, les plantes semblent donc surimposer un effet rhizosphère qui limite la disponibilité de Cu et Zn malgré la contamination du sol.

Plusieurs questions restent cependant en suspens. Si l'augmentation de la concentration en MOD est attendu dans tous types de sol recevant des fertilisants organiques, aucune augmentation du pH n'est attendu en sols calcaires. L'effet protecteur de la fertilisation organique pourrait donc être moindre en sols calcaires. Si la fertilisation organique est arrêtée, il est probable que la concentration en MOD et le pH diminuent, ce qui aurait pour conséquence une diminution de l'effet protecteur alors que le niveau de contamination restera identique. Enfin, si la fertilisation organique est pratiquée sur le long-terme au-delà d'une décennie, le niveau de contamination des sols augmentera de façon plus importante que dans les situations étudiées ici. Dans un contexte de niveaux de contamination plus élevés, cet effet protecteur restera-t-il suffisant pour limiter la disponibilité de Cu et Zn dans le sol et leur biodisponibilité pour les organismes vivants du sol ?

### **Une prise en compte partielle de cet effet protecteur dans les méthodes d'évaluation des risques**

Nous nous sommes enfin interrogés dans l'article synthèse de Avadí et al. (2022) sur la capacité des méthodes d'évaluation des risques actuellement disponible en écotoxicologie terrestre à tenir compte de cet effet protecteur de la fertilisation organique. Les méthodes d'analyse de risque prenant en compte les propriétés du sol dans l'estimation des seuils écotoxicologiques sont capables sur le principe d'intégrer cet effet (voir par exemple Oorts, 2018), bien que leur mise en œuvre dans ce contexte n'ait pas été validée expérimentalement. En revanche, en analyse de cycle de vie, le module d'écotoxicologie terrestre des éléments traces proposés dans le modèle USEtox de référence n'est actuellement pas en mesure de tenir compte de cet effet protecteur.

## Contacts

Céline LAURENT<sup>1</sup> et Matthieu N. BRAVIN<sup>2</sup>

CIRAD, UPR Recyclage et risque, F-34398 Montpellier



<sup>1</sup> Adresse actuelle : Université de Lorraine, INRAE, LSE, F-54000 Nancy, France

<sup>2</sup> [matthieu.bravin@cirad.fr](mailto:matthieu.bravin@cirad.fr)

## Pour en savoir plus

Avadí, A., Benoit, P., Bravin, M.N., Cournoyer, B., Feder, F., et al., 2022. Trace contaminants in the environmental assessment of organic waste recycling in agriculture: gaps between methods and knowledge. *Adv. Agron.* 174, 53–188. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.03.002>. cirad-03663482

Laurent, C., Bravin, M.N., Crouzet, O., Pelosi, C., Tillard, E., Lecomte, P., Lamy, I., 2020. Increased soil pH and dissolved organic matter after a decade of organic fertilizer application mitigates copper and zinc availability despite contamination. *Sci. Total Environ.* 709, 135927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135927>

Laurent, C., Bravin, M.N., Crouzet, O., Pelosi, C., Lamy, I., 2023. Does a decade of soil organic fertilization promote copper and zinc bioavailability to an epi-endogeic earthworm? *Environ. Sci. Pollut. Res.* 30, 17472–17486. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23404-y>

Laurent, C., Bravin, M.N., Crouzet, C., Lamy, I., 2024. Does a decade of soil organic fertilization promote copper and zinc phytoavailability? Evidence from a laboratory biotest with field-collected soil samples. *Sci. Total Environ.* 906, 167771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167771>

## Bibliographie citée

Belon, E., Boisson, M., Deportes, I.Z., Eglin, T.K., Feix, I., Bispo, A.O., Galsomies, L., Leblond, S., Guellier, C.R., 2012. An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Sci. Total Environ.* 439, 87–95.

Leclerc, A., Laurent, A., 2017. Framework for estimating toxic releases from the application of manure on agricultural soil: National release inventories for heavy metals in 2000–2014. *Sci. Total Environ.* 590–591, 452–460.

Oorts, K., 2018. Threshold Calculator for Metals in Soil A Global Tool for Terrestrial Risk Assessment, Background Document for Version 2.0. ARCHE Consulting.

Smolders, E., Oorts, K., Lombi, E., Schoeters, I., Zrna, S., McLaughlin, J., 2012. The availability of copper in soils

historically amended with sewage sludge, manure, and compost. *J. Environ. Qual.* 41, 1–9.

Sydow, M., Chrzanowski, Ł., Leclerc, A., Laurent, A., Owsianiak, M., 2018. Terrestrial ecotoxic impacts stemming from emissions of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from Manure: A spatially differentiated assessment in Europe. *Sustain.* 10, 1–19.

Wassenaar, T., Doelsch, E., Feder, F., Guerrin, F., Paillat, J.-M., Thuriès, L., Saint Macary, H., 2014. Returning Organic Residues to Agricultural Land (RORAL) – Fuelling the Follow-the-Technology approach. *Agric. Syst.* 124, 60–69.