



**HAL**  
open science

## Prise en compte du stockage et de la disponibilité du cuivre dans les sols viticoles pour en évaluer son écotoxicité

Gwenael Imfeld, Joelle Duplay, Sylvain Payraudeau

### ► To cite this version:

Gwenael Imfeld, Joelle Duplay, Sylvain Payraudeau. Prise en compte du stockage et de la disponibilité du cuivre dans les sols viticoles pour en évaluer son écotoxicité: Commentaires sur l'article de Karimi et al. (2021) La biodiversité des sols est-elle impactée par l'apport de cuivre ou son accumulation dans les sols vignes? Synthèse des connaissances scientifiques. *Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), pp. 71-92.. *Etude et Gestion des Sols*, 2021, 28 (1), pp.181-185. hal-03379002

**HAL Id: hal-03379002**

**<https://hal.science/hal-03379002>**

Submitted on 15 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Prise en compte du stockage et de la disponibilité du cuivre dans les sols viticoles pour en évaluer son écotoxicité

## Commentaires sur l'article de Karimi *et al.* (2021)

La biodiversité des sols est-elle impactée par l'apport de cuivre ou son accumulation dans les sols vignes ? Synthèse des connaissances scientifiques. *Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), pp. 71-92.

G. Imfeld\*, J. Duplay et S. Payraudeau

Institut Terre et Environnement Strasbourg (ITES), Université de Strasbourg/EOST/ENGEES, CNRS UMR 7063, 5 rue Descartes, Strasbourg Cedex F-67084, France

\* Auteur correspondant : imfeld@unistra.fr

### RÉSUMÉ

Les études de l'impact écotoxicologique du cuivre dans les sols viticoles reposent généralement sur l'effet de l'ajout d'une dose spécifique de cuivre (Cu). Cependant, les propriétés du sol et la dynamique de stockage du cuivre dans le sol doivent également être prises en compte pour déterminer à l'échelle du vignoble et de la région viticole les seuils d'écotoxicité à ne pas dépasser pour conserver une bonne qualité biologique du sol. Une utilisation de cuivre jusqu'à 28 kg/ha sur sept ans, soit 4 kg/ha/an en moyenne, conformément à la réglementation européenne actuelle, repousse globalement l'échéance de dépassement du seuil d'écotoxicité du cuivre impactant la biodiversité des sols. Toutefois, une amélioration de la qualité et de la durabilité de la production viticole en Europe passe par une utilisation locale adaptée et une évaluation de l'impact du cuivre plus spécifique, tenant également compte de la trajectoire de l'accumulation et de la disponibilité du cuivre dans le sol.

### Mots-clés

Cuivre, sol, biodiversité des sols, toxicité, viticulture durable

### Comment citer cet article :

Imfeld G., Duplay J. et Payraudeau S., 2021 - Prise en compte du stockage et de la disponibilité du cuivre dans les sols viticoles pour en évaluer son écotoxicité. *Commentaires sur l'article de Karimi, et al. (2021) – La biodiversité des sols est-elle impactée par l'apport de cuivre ou son accumulation dans les sols vignes ? Synthèse des connaissances scientifiques. Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), pp. 71-92 – *Etude et Gestion des Sols*, 28, 181-185

### Comment télécharger cet article :

<http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/>

### Comment consulter/télécharger

tous les articles de la revue EGS :

<https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/>

**SUMMARY****CONSIDERATION OF COPPER STORAGE AND AVAILABILITY IN VINEYARD SOILS TO ASSESS ITS ECOTOXICITY.****COMMENTS ON THE ARTICLE BY KARIMI et al. (2021)****Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards. *Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), pp. 71-92**

Studies on the ecotoxicological impact of copper in vineyard soils generally rely on monitoring the effect of adding specific dose of copper (Cu). However, soil properties and the dynamics of copper storage in the soil must also be taken into account to determine at the vineyard and wine-growing region levels the ecotoxicity thresholds that should not be exceeded to maintain good soil biological quality. The use of copper up to 28 kg/ha over seven years (average of 4 kg/ha/a), in accordance with current European regulations, generally postpones the deadline for exceeding the copper ecotoxicity threshold impacting soil biodiversity. However, the improvement of the quality and sustainability of wine production in Europe requires an adapted local use and a more specific evaluation of the impact of copper accounting for the trajectory of copper accumulation and availability in soil.

**Key-words**

Copper, soil, soil biodiversity, toxicity, sustainable vine growing

**RESUMEN****TOMA EN CUENTA DEL ALMACENAMIENTO Y DE LA DISPONIBILIDAD EN COBRE EN LOS SUELOS VITÍCOLAS PARA EVALUAR SU ECOTOXICIDAD. COMENTARIOS SOBRE EL ARTÍCULO DE KARIMI, et al. (2021)****¿Impacta la biodiversidad de los suelos el aporte de cobre o su acumulación en los suelos de viñas? Síntesis de los conocimientos científicos. *Etude et gestion des Sols* 28 (1), pp. 71-92**

Los estudios del impacto ecotoxicológico del cobre en los suelos vitícolas se basan generalmente sobre el efecto de una adición de una dosis específica de cobre (Cu). Sin embargo, las propiedades del suelo y la dinámica de almacenamiento del cobre en el suelo deben ser igualmente tomadas en cuenta para determinar a escala del viñedo y de la región vitícola los umbrales de ecotoxicidad que no se deben sobrepasar para conservar una buena calidad biológica del suelo. Un uso del cobre hasta 28 kg/ha sobre siete años, o sea 4 kg/ha/año en promedio, en conformidad con la normativa europea actual, pospone globalmente el plazo de rebasamiento del umbral de ecotoxicidad del cobre que impacta la biodiversidad del suelo. No obstante, un mejoramiento de la calidad y de la sostenibilidad de la producción vitícola en Europa pasa por un uso local adaptado y una evaluación del impacto del cobre más específico, teniendo en cuenta igualmente la trayectoria de la acumulación del cobre en el suelo.

**Palabras clave**

Cobre, suelo, biodiversidad de los suelos, toxicidad, viticultura sostenible

Karimi et ses co-auteurs ont récemment présenté une éclairante revue sur l'écotoxicité du cuivre sur la biodiversité du sol dans les vignobles en s'appuyant sur une méta-analyse de la littérature académique internationale (Karimi et al., 2021a, 2021b). Cette étude est particulièrement bienvenue dans un contexte où les viticulteurs, et en particulier les viticulteurs biologiques, sont confrontés à l'absence de traitements alternatifs au cuivre efficaces contre le mildiou, et à l'éventualité d'une interdiction d'utilisation du cuivre (Andrivon et al., 2018). Karimi et ses co-auteurs parviennent à la conclusion que la dose actuellement autorisée pour la production viticole dans l'UE, soit un maximum de 28 kg cuivre/ha apporté sur 7 ans, soit 4 kg cuivre/ha/an en moyenne, n'a pas d'effets délétères significatifs sur les organismes du sol. Ils comparent également la dose annuelle moyenne de 4 kg cuivre/ha/an à un seuil d'écotoxicité du cuivre de 200 kg cuivre/ha/an défini à partir d'une méta-analyse approfondie des données disponibles. Bien que ce seuil de cuivre apporté de 200 kg cuivre/ha soit possiblement conservatif à l'échelle annuelle, la seule prise en compte d'une dose annuelle s'avère à notre avis insuffisante pour garantir l'intégrité de la fertilité des sols et de la biodiversité dans le temps et l'espace. En effet, le stock préexistant en cuivre dans le sol et sa disponibilité avant l'ajout d'une nouvelle dose de cuivre peuvent fortement varier à l'échelle du vignoble et entre les vignobles européens en fonction des propriétés physico-chimiques du sol, de la végétation et des différentes formes de cuivre dans le sol. Cela remet en question la notion d'utilisation inoffensive du cuivre à une dose spécifique, même si celle-ci est inférieure aux doses utilisées historiquement. Nous pensons qu'une telle vision peut entraver les efforts actuels visant à réduire l'utilisation du cuivre et les tentatives de développement d'alternatives au cuivre acceptées localement, et donner le sentiment que le risque associé à la dose actuellement autorisée est faible, voire inexistant.

Comme le soulignent Karimi et ses co-auteurs, des teneurs supérieures au seuil d'écotoxicité pour garantir l'intégrité de la fertilité des sols et de la biodiversité ont été atteintes dans plusieurs sols de vignobles européens par l'accumulation historique des applications de cuivre (Komárek et al., 2010). Cela implique de spatialiser et de conditionner les risques écotoxicologiques liés à l'utilisation historique, actuelle et future du cuivre en agriculture, en intégrant notamment le pH du sol, la végétation et la teneur en matière organique. Reconnaître, évaluer et prédire ce risque écotoxicologique n'est pas seulement nécessaire, mais constitue également un facteur stimulant les études et l'innovation pour une viticulture durable. Il est urgent de définir localement les risques de toxicité pour les organismes, et les approches intégratives des pratiques culturales pour limiter l'accumulation de cuivre (Cesco et al., 2021). En effet, le cuivre ne se dégrade pas et chaque apport de cuivre dans le sol contribue à l'accumulation progressive dans le sol du vignoble étant donné que l'exportation de cuivre depuis les sols viticoles à l'échelle européenne est inférieure de deux ordres de grandeur

par rapport à son accumulation nette (Droz et al., 2021).

L'accumulation de cuivre dans le sol représente donc une menace agricole et environnementale concrète et immédiate à l'échelle européenne. En viticulture conventionnelle, le risque écotoxicologique combiné du cuivre et des fongicides organiques de synthèse dans le sol et les écosystèmes aquatiques connexes, sont encore peu étudiés. En outre, si la restriction à un taux d'application maximal de 28 kg cuivre/ha apporté sur sept ans diminue le taux d'accumulation du cuivre dans les sols, elle repousse simplement l'échéance à partir de laquelle une partie des vignobles européens aura atteint un seuil de toxicité de cuivre pour les organismes du sol. En considérant la distribution de la concentration de cuivre par type d'occupation du sol, les vignobles représentent la classe d'utilisation du sol avec la proportion la plus élevée (14,6 %) d'échantillons de sol affichant des teneurs en cuivre supérieures à 100 mg/kg (Ballabio et al., 2018). En France, la teneur en cuivre mesurée dans les vignobles est particulièrement élevée, avec une valeur moyenne de 91,3 mg/kg et près de la moitié des échantillons présentant des valeurs supérieures à 100 mg/kg de cuivre mesuré. Envisager l'apport moyen de 4 kg cuivre/ha/an signifie concrètement que le seuil écotoxicologique pour la qualité biologique du sol de 200 kg cuivre/ha (cuivre apporté) pourrait être atteint en 25 ans dans plusieurs vignobles français. Dans une étude récente, nous avons montré que la teneur en cuivre mesurée dans les sols viticoles européens est en moyenne 30 % plus élevée que le cuivre géogénique et le cuivre atmosphérique anthropique non agricole (Droz et al., 2021). Nous estimons que le seuil de 100 mg cuivre/kg sol (teneur mesurée), soit environ 150-250 kg cuivre/ha dans la couche supérieure de 10-15 cm du sol (stock estimé), est déjà dépassé pour environ 70 % des surfaces viticoles en Europe centrale et occidentale. Cette proportion devrait augmenter dans les prochaines décennies.

Il est donc nécessaire de prédire l'accumulation de cuivre dans les sols viticoles en Europe en tenant compte des risques locaux et de l'historique de l'utilisation du cuivre. Dans le futur, la proportion de la superficie des vignobles européens dépassant les valeurs de concentration sans effet (PNEC), généralement comprises entre 30 et 290 mg cuivre/kg selon les propriétés du sol, pourrait varier considérablement en fonction de la dose de cuivre appliquée chaque année (Droz et al., 2021). En supposant que les propriétés du sol (pH, teneur en matière organique, texture, structure et porosité en particulier) soient constantes, la proportion de surfaces viticoles dépassant la PNEC dans les 100 prochaines années devrait augmenter d'au moins 94 %, 2 % ou 0,5 % respectivement pour une utilisation de 8, 4 ou 2 kg cuivre/ha/an. Ces prédictions soutiennent l'idée que l'application du cuivre conformément à la réglementation européenne actuelle peut prolonger à moyen terme son utilisation avant que le seuil écotoxicologique potentiellement critique pour les vignobles européens soit atteint. Cependant, elles soulignent également le fait que le niveau de risque pour la qualité biologique du sol

peut être important dans certains vignobles et augmenter dans les prochaines décennies.

En effet, le cuivre est partiellement immobilisé dans le sol sous différentes formes, coexistantes et évoluant dans l'espace et le temps. Il est donc crucial de considérer la spéciation du cuivre et sa biodisponibilité ultérieure, ainsi que les facteurs qui les contrôlent, afin d'évaluer la dynamique de l'impact écotoxicologique sur la qualité biologique des sols. Nous définissons ici la spéciation comme l'identification et la quantification des différentes espèces, formes ou phases définies dans lesquelles le cuivre est présent dans le sol. Elle dépend fortement de la minéralogie et de la chimie des sols. Cependant, les études écotoxicologiques sont souvent réalisées sans tenir compte de la distribution chimique et physique du cuivre historique entre les fractions du sol, en particulier dans les sols végétalisés, comme le sont les parcelles viticoles (Ruyters *et al.*, 2013). La distribution du cuivre entre les fractions granulométriques des sols viticoles, souvent caillouteux, varie fortement. Les fractions fines du sol concentrent généralement les résidus de cuivre ce qui affecte potentiellement la toxicité du cuivre. Le cuivre stocké dans le sol n'est pas une masse inerte et non réactive, distincte du cuivre nouvellement appliqué qui serait, lui, labile, réactif et potentiellement dangereux (Tom-Petersen *et al.*, 2004). Par exemple, la disponibilité et la toxicité associée du cuivre stocké dans le sol augmentent lorsque le pH du sol diminue en fonction de la végétation ou suite à un changement de pratiques, en particulier à un pH inférieur à 5,5. Bien que la matière organique du sol immobilise rapidement le cuivre, la diffusion du cuivre fraîchement appliqué est lente et progressive dans les oxydes métalliques du sol, les minéraux argileux et les carbonates précipités (Lock et Janssen, 2003; Pietrzak *et al.*, 2004). Il en résulte différentes fractions chimiques de cuivre dans le sol qui peuvent être re-mobilisées en fonction des conditions hydro-climatiques et pédologiques. De plus, l'export de cuivre hors des parcelles viticoles, principalement dû à l'érosion de la couche superficielle du sol, peut entraîner une perte de cuivre associée aux matières en suspension vers des parcelles non-viticoles ou des écosystèmes aquatiques. En effet, 10 % des vignobles sont situés à proximité d'une rivière (< 500 m) et les ruissellements provenant des bassins-versants associés constituent une source potentielle de contamination au cuivre (Andreadis *et al.*, 2013). Les processus de rétention et de mobilisation hors des parcelles viticoles ainsi que la disponibilité du cuivre stocké historiquement dans les différents composants du sol sont dynamiques et varient en fonction des propriétés du sol.

La disponibilité et la mobilité du cuivre dans le sol dépendent également de la végétation qui représente une composante intrinsèque des parcelles de vigne. Le cycle biogéochimique du cuivre dans le système sol-plante diverge de celui d'un sol non-végétalisé (Shabbir *et al.*, 2020). Les changements du pH et des

composés organiques de la rhizosphère induits par les racines de la végétation sur le cavaillon et dans l'inter-rang, ainsi que les plantes pérennes comme la vigne, contrôlent la spéciation du cuivre et la formation de complexes organométalliques solubles dans le sol, modifiant potentiellement le degré de toxicité du cuivre (Bravin *et al.*, 2009; Brunetto *et al.*, 2016). Ainsi, il peut être particulièrement important de considérer l'impact de la végétation sur la disponibilité et la toxicité du cuivre lors de la reconversion d'un vignoble en terre arable (Michaud *et al.*, 2007). De plus, les impacts à long terme de l'application répétée de cuivre sur la diversité taxonomique et fonctionnelle des macro- et micro-organismes des sols viticoles nécessitent des études plus détaillées de la dynamique de la disponibilité du cuivre et de la dissémination des déterminants de la résistance au cuivre par transfert horizontal de gènes dans le sol. L'application intra- et interannuelle récurrente de cuivre dans les sols viticoles pourrait favoriser la résistance conjointe au cuivre et aux antibiotiques, car ces deux effets sont intimement liés et peuvent être transférés à travers le domaine bactérien (Cesco *et al.*, 2021). Ainsi, il ne peut être exclu que l'utilisation actuelle du cuivre dans les vignobles contribue à développer et à disséminer une résistance concomitante au cuivre et aux antibiotiques *via* des mécanismes de résistance croisée.

En conclusion, l'utilisation de cuivre jusqu'à 28 kg/ha sur sept ans, soit 4 kg/ha/an en moyenne, conformément à la réglementation européenne actuelle, repousse globalement l'échéance de dépassement du seuil d'écotoxicité du cuivre impactant la biodiversité des sols. Toutefois, cette utilisation réglementaire n'implique pas pour autant une amélioration durable de la qualité et de la production viticole en Europe. La variabilité de la teneur, de l'âge et de la mobilité du cuivre historiquement accumulé dans le sol doit être soigneusement évaluée dans chaque vignoble et à l'échelle des vignobles européens. Cela permettra de définir une utilisation locale adaptée et d'évaluer l'impact du cuivre de manière plus spécifique, afin d'élaborer des approches holistiques pour réduire la toxicité du cuivre, tout en tenant compte de la trajectoire de l'accumulation du cuivre dans le sol. La communauté professionnelle viticole subit une forte pression liée à l'héritage historique de l'utilisation du cuivre, à l'évolution rapide des réglementations et au changement climatique. Pour faire face à cette évolution, de nouveaux paradigmes et des approches intégratives doivent être urgemment définis dans toute l'Europe, mais en tenant compte également des spécificités locales, pour répondre aux exigences d'une viticulture durable (e.g., Karimi *et al.*, 2020). Ce n'est qu'ainsi qu'une augmentation inexorable du cuivre dans les sols par son utilisation systématique et massive pourra être évitée.

Malgré l'intérêt scientifique de l'étude de Karimi et co-auteurs et le fait qu'elle propose de nombreuses pistes de recherches pour répondre aux manques de connaissances scientifiques sur l'impact du cuivre dans les sols viticoles, il existe un risque que

certaines conclusions soient relayées auprès du monde agricole (par exemple, Le Point, 2021 ; Vitisphere, 2021) sans que soient prises en compte les remarques et les nuances mentionnées dans notre lettre à l'éditeur. C'est pourquoi nous pensons que cette mise au point est nécessaire.

## CONFLITS D'INTÉRÊTS

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêts.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Dominique Arrouays et un relecteur anonyme pour leurs commentaires utiles qui ont permis d'améliorer cette note à l'éditeur.

## BIBLIOGRAPHIE

- Andreadis K.M., Schumann G.J.P., Pavelsky T. (2013). A simple global river bankfull width and depth database. *Water Resour Res* 2013, 49, 7164–7168. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20440>
- Andrivon D., Bardin M., Bertrand C., Brun L., Daire X., Fabre F., Gary C., Montarry J., Nicot P., Reignault P., Tamm L., Savini I. (2018). Can organic agriculture give up copper as a crop protection product? Condensed report of the Scientific collective assessment, INRA, 66 p. <https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/expertise-cuivre-en-ab-8-pages-anglais-1.pdf>
- Ballabio C., Panagos P., Lugato E., Huang J.-H., Orgiazzi A., Jones A., Fernández-Ugalde O., Borrelli P., Montanarella L. (2018). Copper distribution in European topsoils: an assessment based on LUCAS soil survey. *Sci Total Environ* 636:282–298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.268>
- Bravin M.N., Tentscher P., Rose J., Hinsinger P. (2009). Rhizosphere pH Gradient Controls Copper Availability in a Strongly Acidic Soil. *Environ Sci Technol* 2009, 43, 15, 5686–5691. <https://doi.org/10.1021/es900055k>
- Brunetto G., Bastos de Melo G.W., Terzano R., Del Buono D., Astolfi S., Tomasi N., Pii Y., Mimmo T., Cesco S. (2016). Copper accumulation in vineyard soils: rhizosphere processes and agronomic practices to limit its toxicity. *Chemosphere* 162:293–307. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.104>
- Cesco S., Pii Y., Borruso L., Orzes G., Lugli P., Mazzetto F., Genova G., Signorini M., Brunetto G., Terzano R., Virgani G., Mimmo T. (2021). A smart and sustainable future for viticulture is rooted in soil: how to face Cu toxicity. *Appl Sc* 11:3, 907. <https://doi.org/10.3390/app11030907>
- Droz B., Payraudeau S., Rodriguez-Martin J., Tóth G., Panagos P., Montanarella L., Borrelli P., Imfeld G. (2021). Copper content and export in European vineyards soils influenced by climate and soil properties. *Environ Sci Technol*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02093>
- Karimi B., Cahurel J.-Y., Gontier L., Charlier L., Chovelon M., Mahé H., Ranjard L. (2020). Revue scientifique sur la qualité biologique des sols de vignes et l'impact des pratiques viticoles. *Etude et Gestion des Sols*, 27 (1), p. 221-239. <https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/71-92>. <http://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-28-numero-1/>
- Karimi B., Masson V., Guillaud C., Leroy E., Pellegrinelli S., Giboulot E., Maron P.-A., Ranjard L. (2021b). Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards. *Environ Chem Lett*. 19, 2013–2030 <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01155-x>
- Komárek M., Cadková E., Chrástný V., Bordas F., Bollinger J.-C. (2010). Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. *Environ Int*. 36:138–51. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.10.005>
- Lock K., Janssen C.R. (2003). Influence of aging on metal availability in soils. In: Ware GW (ed) *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer New York, New York, NY, pp 1–21.
- Le Point (2021). Les vers de terre et le cuivre, une histoire d'amour (ou presque). [https://www.lepoint.fr/art-de-vivre/les-vers-de-terre-et-le-cuivre-une-histoire-d-amour-ou-presque-12-02-2021-2413743\\_4.php](https://www.lepoint.fr/art-de-vivre/les-vers-de-terre-et-le-cuivre-une-histoire-d-amour-ou-presque-12-02-2021-2413743_4.php) (dernier accès le 25 mai 2021).
- Michaud A.M., Bravin M.N., Galleguillos M., Hinsinger P. (2007). Copper uptake and phytotoxicity as assessed in situ for durum wheat (*Triticum turgidum* durum L.) cultivated in Cu-contaminated, former vineyard soils. *Plant Soil* 298:99-111. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9343-0>
- Pietrzak U., McPhail D.C. (2004). Copper accumulation, distribution and fractionation in vineyard soils of Victoria, Australia. *Geoderma* 122:151–66. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.005>
- Ruyters S., Salaets P., Oorts K., Smolders E. (2013). Copper toxicity in soils under established vineyards in Europe: A survey. *Sci Total Environ* 443:470–477. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.001>
- Shabbir Z., Sardar A., Shabbir A., Abbas G., Shamshad S., Khalid S., Natasha, Murtaza G., Dumat C., Shahid M. (2020). Copper uptake, essentiality, toxicity, detoxification and risk assessment in soil-plant environment. *Chemosphere* 259:127436. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127436>
- Tom-Petersen A., Hansen H.C.B., Nybroe O. (2004). Time and moisture effects on total and bioavailable copper in soil water extracts. *J Environ Qual* 33:505–512. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.5050>
- Vitisphere (2021). Un bureau d'étude conclut que le cuivre n'est toxique qu'à partir de 40 kg/ha/an. <https://www.vitisphere.com/actualite-93391-Un-bureau-detude-conclut-que-le-cuivre-nest-toxique-qua-partir-de-40-kghaan.htm> (dernier accès le 25 mai 2021).
- Karimi B., Masson V., Guillaud C., Leroy E., Pellegrinelli S., Giboulot E., Maron P.-A., Ranjard L. (2021a). La biodiversité des sols est-elle impactée par l'apport de cuivre ou son accumulation dans les sols vignes ? Synthèse des connaissances scientifiques. *Etude et Gestion des Sols*, 28 (1), p.

