

La biodiversité des sols est-elle impactée par l'apport de cuivre ou son accumulation dans les sols vignes ?

Synthèse des connaissances scientifiques

B. Karimi^(1*), V. Masson⁽²⁾, C. Guillard⁽¹⁾, E. Leroy⁽³⁾, S. Pellegrinelli⁽⁴⁾, E. Giboulot⁽⁵⁾, P-A Maron⁽⁶⁾ et L. Ranjard⁽⁶⁾

1) Novasol Experts, 21000 Dijon, France

2) Soins de la Terre, Les Crêts 71250 Château, France

3) Association des Champagnes Biologiques, Champagne Ruppert Leroy, La bergerie, 10360 Essoyes, France

4) Groupement d'Etude et de Suivi des Terroirs, F-21200 Beaune, France

5) Biobourgogne, F-21200 Beaune, France

6) Agroécologie, AgroSup Dijon, INRAE, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, F-21000 Dijon, France

* Auteur correspondant : battle.karimi@novasol-experts.com

RÉSUMÉ

Pendant 150 ans, le sulfate de cuivre a été utilisé de façon intensive comme fongicide pour lutter contre les maladies de la vigne. De ce fait, le cuivre s'est fortement accumulé dans les sols viticoles, atteignant des concentrations potentiellement nocives pour les organismes des sols. Bien que les doses de cuivre appliquées aujourd'hui soient 10 fois plus faibles qu'il y a 50 ans, son utilisation dans le contexte de la transition agroécologique est encore soumise à débat car il est un des rares pesticides autorisés en agriculture biologique. Dans ce travail, nous avons conduit une méta-analyse de la littérature académique internationale pour objectiver l'impact du cuivre sur la qualité biologique des sols quand il est appliqué aux doses agricoles actuelles, mais également l'impact de son accumulation dans les sols. Parmi les 300 articles passés en revue, seulement 19 répondaient à la question de façon pertinente.

Les résultats montrent que l'activité microbienne décroît de 30% à l'application d'une dose supérieure à 400 kgCu/ha/an. L'abondance des nématodes reste inchangée pour des doses de cuivre jusqu'à 3 200 kg/ha/an. La reproduction des collemboles et des enchytrées diminue de 50 % après application de 400 et 1895 kgCu/ha/an respectivement. La biomasse lombricienne est réduite de 15 % après application de 200 kgCu/ha/an. D'autre part, dans des sols avec des teneurs en cuivre supérieures à 200 kgCu/ha, la respiration microbienne est réduite de 50 %. Aucun effet des teneurs en cuivre du sol n'est observé sur les collemboles. Globalement, bien qu'une toxicité du cuivre soit observée sur la biodiversité du sol, la littérature montre qu'elle concerne des doses au moins 50 fois supérieures à la dose de 4 kgCu/ha/an actuellement auto-

Comment citer cet article :

Karimi B., Masson V., Guillard C., Leroy E., Pellegrinelli S., Giboulot E., Maron P.-A. et Ranjard L., 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, 71-92

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/>

risée par la Commission Européenne en viticulture. Par conséquent, appliquer du cuivre à 4 kgCu/ha/an ne devrait pas substantiellement modifier la qualité et les fonctions biologique du sol.

Traduit avec la permission de Springer Nature Customer Service Centre GmbH à partir de Karimi, B., Masson, V., Guillard, C. et al. Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards. *Environ Chem Lett* (2021), Springer. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01155-x>

Mots-clés

Cuivre, sol, biodiversité, vignes, agriculture, synthèse.

SUMMARY

IS SOIL BIODIVERSITY IMPACTED BY THE ADDITION OF COPPER OR ITS ACCUMULATION IN THE VINEYARDS?

Review of scientific knowledge

Copper has been successfully used in the sulfate form as a fungicide to control grapevine diseases since 150 years, yet high Cu accumulation in vineyards may alter soil life. Although actual Cu additions are about 10-fold lower than 50 years ago, the use of Cu in the context of the agroecological transition is still debated. Indeed, copper is one of the rare pesticides allowed for organic farming. Therefore, we performed a meta-analysis on Cu ecotoxicity. We selected 19 articles out of 300 articles relevant to copper and soil biological quality. Results show that microbial activity decreased by 30% when more than 400 kg of Cu was applied yearly per ha. Nematodes abundance remained unchanged for copper application up to 3,200 kg/ha/year. Collembola and enchytraeid reproduction declined by 50% after application of 400 and 1895 kgCu/ha/year, respectively. Earthworm biomass was reduced by 15% after application of 200 kgCu/ha/year. For soil Cu levels higher than 200 kgCu/ha, microbial respiration decreased by 50% and no effect was observed on collembola. Overall, while toxicity is observed, the literature studies involved Cu levels that are at least 50 times higher than the dose of 4 kg Cu/ha/year currently authorized by the European Commission for viticulture. As a consequence, applying copper at 4 kg/ha/year should not modify substantially soil biological quality and functions. Translated by the permission of Springer Nature Customer Service Centre GmbH from Karimi, B., Masson, V., Guillard, C. et al. Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards. *Environ Chem Lett* (2021), Springer. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01155-x>.

Key-words

Copper, soil, biodiversity, vineyards, agriculture, review

RESUMEN

¿IMPACTA LA BIODIVERSIDAD DEL SUELO EL APORTE DE COBRE O SU ACUMULACIÓN EN LOS SUELOS DE VIÑAS?

Síntesis de los conocimientos científicos

Durante 150 años, se utilizó el sulfato de cobre de manera intensiva como fungicida para luchar contra las enfermedades de la viña. Por consiguiente, el cobre se acumuló fuertemente en los suelos vitícolas, hasta alcanzar concentraciones potencialmente nocivas para los organismos del suelo. Aunque las dosis de cobre aplicadas hoy sean 10 veces más bajas que hace 50 años, su uso en el contexto de la transición agro-ecológica está todavía sometido a discusión porque es uno de los raros fungicidas autorizados en agricultura orgánica. En este trabajo, condujimos una meta-análisis de la literatura académica internacional para objetivar el impacto del cobre sobre la calidad biológica de los suelos cuando se aplica a las dosis actuales, pero igualmente el impacto de su acumulación en los suelos. Dentro de los 300 artículos revisados, solamente 19 contestaron a la pregunta de manera pertinente. Los resultados muestran que la actividad microbiana decrece de 30% con la aplicación de una dosis superior a 400 kgCu/ha/año. La abundancia de los nematodos queda estable para las dosis de cobre hasta 3200 kg/ha/año. La reproducción de los colémbolos y de los enquitreidos disminuye de 50% después de una aplicación de 400 y 1895 kgCu/ha/año respectivamente. La biomasa lombriciana se reduce de 15% tras una aplicación de 200 kgCu/ha/año. De otra parte, en suelos con contenidos en cobre superiores a 200 kgCu/ha, la respiración microbiana se reduce de 50%. Ningún efecto de los contenidos en cobre del suelo se observa sobre los colémbolos. Globalmente, aunque una toxicidad en cobre se observa sobre la biodiversidad del suelo, la literatura muestra que esta concierne dosis al menos 50 veces superiores a la dosis de 4 kgCu/ha/año actualmente autorizada por la Comisión Europea en viticultura. Por lo tanto, aplicar 4 kgCu/ha/año no debería modificar substancialmente la calidad y las funciones biológicas del suelo. Traducido con la permisión de Springer Nature Customer Service Centre GmbH a partir de Karimi, B., Masson, V., Guillard, C. et al. Ecotoxicity of copper input and accumulation for soil biodiversity in vineyards. *Environ Chem Lett* (2021), Springer. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01155-x>

Palabras clave

Cobre, suelo, biodiversidad, viñas, agricultura, síntesis

Le cuivre (Cu), sous forme de sulfate, est un fongicide naturel utilisé depuis la fin de XIX^e siècle pour lutter contre le mildiou, une maladie de la vigne largement répandue dans les vignobles européens. À faible dose, le cuivre est aussi un oligo-élément, essentiel à certains processus biologiques et certaines voies métaboliques chez les animaux, les plantes et les micro-organismes. Néanmoins, l'utilisation historique et intensive du cuivre a conduit à son accumulation dans les sols viticoles, à des niveaux suspectés d'avoir des conséquences néfastes pour le sol, les ressources en eau et la biodiversité (European Food Safety Authority 2018).

Pour être efficace, le cuivre doit être utilisé de façon préventive et appliqué sur les parties aériennes de la vigne (feuilles et bois). Lorsqu'il pleut, une partie du cuivre est lessivée dans le sol, où il est peu mobile (Bravin *et al.*, 2009). En effet, la matière organique, l'argile, une capacité d'échange cationique élevée et un pH neutre à alcalin favorisent la fixation du cuivre et son immobilisation dans l'horizon superficiel du sol (0 à 10 cm, Bravin *et al.*, 2009 ; Romić *et al.*, 2014 ; Brunetto *et al.*, 2018). Dans les vignes, le cuivre est généralement distribué dans la couche arable à cause du labour régulier qui homogénéise la teneur en cuivre sur les 20 à 25 premiers centimètres du sol (Düring *et al.*, 2002). Cette couche arable héberge également une importante diversité d'organismes tels que les micro-organismes, les nématodes, les collemboles, les enchytrées, les arthropodes et les vers de terre (Jiang *et al.*, 2007 ; Crowther *et al.*, 2019). Cette biodiversité assure un fonctionnement écologique et agronomique optimal du sol en termes de dégradation de la matière organique, de recyclage des nutriments, de maintien de la stabilité structurale du sol et de contrôle des pathogènes (Vivant *et al.*, 2013 ; Maron *et al.*, 2018). Par conséquent, l'altération de la biodiversité du sol par le cuivre pourrait se répercuter sur le fonctionnement du sol et sur la durabilité des vignes et des productions viti-viticoles. Si ces effets délétères étaient confirmés, son utilisation en viticulture serait incompatible avec les objectifs de la transition agroécologique. Étant donné l'immobilisation et l'accumulation du cuivre dans le sol, il semble essentiel d'évaluer objectivement son impact écotoxicologique sur la qualité biologique des sols. Une telle évaluation devrait permettre de déterminer l'existence de seuils de toxicité du cuivre et de justifier le besoin de limiter, ou pas, son utilisation en viticulture et en agriculture.

À ce jour, il n'existe aucune alternative naturelle de lutte contre le mildiou aussi efficace que le cuivre pour les viticulteurs en production biologique. Le cahier des charges de l'agriculture biologique a restreint son utilisation à une dose maximale de 6 kgCu/ha/an depuis 2002 (Cahier des charges Agriculture Biologique CE 889/2008). Plus récemment, depuis 2009, les fongicides à base de composés cupriques sont concernés par les mêmes processus réglementaires que les produits phytosanitaires de synthèse mis en place par

l'Autorité Européenne de Sécurité Alimentaire (European Food Safety Authority, EFSA) et par la Commission Européenne. L'objectif est de limiter l'impact de ces produits sur la santé humaine, mais également sur la biodiversité et les écosystèmes. Le dernier renouvellement de l'autorisation d'utilisation du cuivre dans l'agriculture par la Commission Européenne a restreint l'utilisation des produits phytosanitaires contenant des composés cupriques à une dose d'application maximale de 28 kgCu/ha sur une période de 7 ans, soit en moyenne 4 kgCu/ha/an (European Food Safety Authority, 2018). Le rapport conclut à un risque environnemental élevé mais souligne également un manque de données scientifiques pour évaluer avec rigueur l'impact écotoxicologique du cuivre, en particulier sur les organismes vivants du sol. Une récente méta-analyse a montré que les viticultures biologique et biodynamique, principales consommatrices de fongicides cupriques, présentent une meilleure qualité biologique des sols que la viticulture conventionnelle (Karimi *et al.*, 2020). Néanmoins, la contribution relative de chaque pratique viticole à ce résultat n'a pas pu être clairement établie et aucune information relative à l'impact spécifique de l'apport du cuivre n'a été fournie (Karimi *et al.*, 2020). Des études individuelles traitant de l'impact du cuivre sur les organismes du sol sont disponibles, mais à notre connaissance aucune synthèse de cette littérature n'existe, limitant ainsi notre capacité à conclure de façon robuste sur l'impact global du cuivre sur la qualité biologique du sol. Une synthèse de l'ensemble des connaissances scientifiques actuellement disponibles est donc nécessaire pour évaluer objectivement le risque écotoxicologique de l'utilisation du cuivre en viticulture.

Dans ce contexte, nous avons mené une méta-analyse pour évaluer l'impact du cuivre sur la qualité biologique des sols viticoles par un inventaire systématique de la littérature académique internationale publiée ces quarante dernières années. La littérature sur les sols viticoles étant pauvre, elle a été complétée par un inventaire sur les autres sols agricoles. Une analyse bibliométrique permet de suivre l'évolution du nombre d'études dans le temps et situer l'origine géographique des études. La synthèse des données issues des études a ensuite été réalisée pour évaluer l'« effet dose » de cuivre apporté sur les différents groupes biologiques. Pour distinguer l'effet du cuivre apporté de celui du cuivre accumulé dans le sol, l'« effet accumulation » sur les groupes biologiques du sol a aussi été exploré. Un seuil d'écotoxicité du cuivre a ainsi pu être identifié pour chaque groupe biologique du sol. Enfin, cette étude débouche sur une discussion quant à la pertinence des stratégies expérimentales mises en œuvre dans la littérature. Sur la base des lacunes identifiées, des pistes de recherche sont proposées pour évaluer l'écotoxicité du cuivre de manière plus appropriée et plus opérationnelle. Ainsi, les futures recherches devraient fournir des connaissances objectives aux parties prenantes et contribuer aux politiques

environnementales aux échelles européenne et nationale. La version anglaise de cet article est publiée dans *Environmental Chemistry Letters* (Karimi et al., 2021)

MATÉRIELS ET MÉTHODE

Recherche bibliographique et évaluation de la pertinence des articles

La combinaison de mots-clés utilisés pour la recherche est la suivante :

*Copper AND soil AND (*bio* OR *diversity OR organism*) AND (vineyard* OR viticulture* OR vine* OR grapevine*)*

où "AND" indique que les mots doivent apparaître simultanément dans les résultats de la recherche, "OR" indique qu'au moins un des termes apparaît dans les résultats, et * indique que la recherche cible tous les mots contenant la séquence de lettres donnée, associée à un préfixe si * est situé avant la séquence, et/ou associée à un suffixe si * est situé après la séquence (par exemple, *bio* inclut *biodiversity*, *biology* et *microbiology*, mais *antibiotic*). La recherche a été effectuée dans la base de données Web of Science.

Pour identifier les articles répondant de façon pertinente à la question, quatre filtres ont été appliqués :

- 1- La thématique du titre, des mots-clés et du résumé est-elle en adéquation avec la problématique de la méta-analyse ?
- 2- L'article contient-il des données originales sur le cuivre et la biodiversité du sol ?
- 3- L'expérimentation a-t-elle porté sur des sols viticoles ou, à défaut, sur d'autres sols agricoles ?
- 4- Le dispositif expérimental et les modalités testées étaient-ils adaptés pour répondre à la problématique de la méta-analyse ?

Une recherche complémentaire portant sur d'autres contextes agricoles que la viticulture a été menée en suivant la même procédure. Les mots-clés utilisés pour cette seconde recherche sont : *Copper AND soil AND (*bio* OR *diversity OR organism*) AND (agricultur* OR farm* OR arable OR orchard*)*.

Terminologie de l'étude bibliographique

L'« effet dose apportée » renvoie à l'impact d'un apport de cuivre en quantité contrôlée en contexte expérimental, au laboratoire ou *in situ*. L'« effet accumulation » correspond à l'impact du cuivre accumulé dans le sol au cours du temps.

La qualité biologique d'un sol se définit comme la capacité d'un sol à héberger une grande quantité et diversité d'organismes vivants impliqués dans son fonctionnement et dans les services écosystémiques qu'il fournit (Karimi et al., 2020).

Les groupes biologiques du sol sont répartis entre macrofaune, mésofaune, microfaune et micro-organismes (Maron et Ranjard, 2019 ; Cortet et Hedde, 2020). La macrofaune du sol inclut les vers de terre et les macro-arthropodes tels que les araignées et les carabes. La mésofaune du sol est représentée par les collemboles et les acariens. Les organismes de la microfaune principalement étudiés sont les nématodes. Les micro-organismes du sol regroupent les bactéries et les champignons, mais dans certaines études, les micro-organismes sont considérés dans leur ensemble.

Les paramètres mesurés couvrent 3 propriétés principales de la qualité biologique des sols :

- 1- le patrimoine biologique, évalué par des mesures de biomasse, d'abondance, de richesse spécifique, de composition et de structure de communauté,
- 2- l'état fonctionnel, évalué par des mesures de dynamique des populations (mortalité, reproduction et taux de croissance), d'activité (respiration basale, activités enzymatiques, comportement des organismes) ou d'abondance de groupes trophiques ou fonctionnels,
- 3- l'état sanitaire, déterminé à partir de la présence ou de l'abondance de pathogènes et de parasites des cultures. Des indices agrégés comme les indices nématofauniques renseignent également la qualité biologique des sols.

ANALYSE BIBLIOMÉTRIQUE

Une recherche globale avec les mots *copper AND soil AND (*bio* OR *diversity OR *organism*)* a identifié 8282 articles en lien avec le cuivre et la biologie des sols. Parmi eux, 908 mentionnaient un contexte agricole, quel qu'il soit. Au sein de ces 908 articles, seulement 234 mentionnaient le contexte viticole. L'application du premier filtre (c'est-à-dire l'adéquation entre la thématique du titre, des mots-clés et du résumé avec la problématique de la méta-analyse) à ces 234 articles a permis de retenir un corpus de 48 articles apportant des informations sur le cuivre et la biodiversité des sols. L'analyse bibliométrique a été conduite sur ce corpus d'articles.

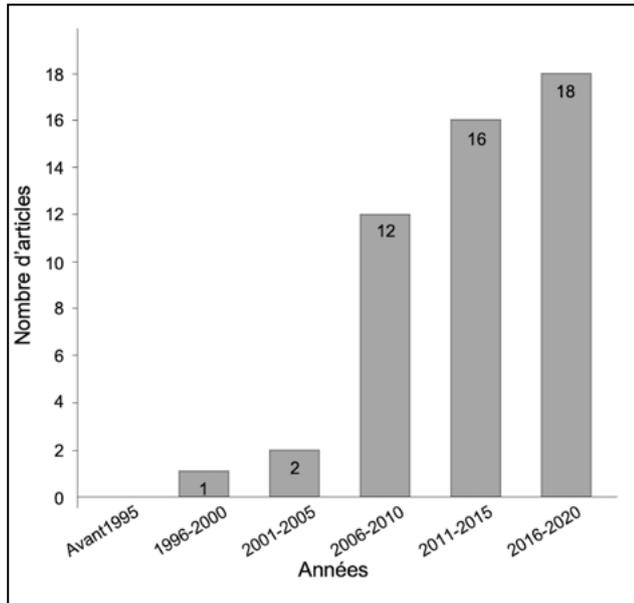
Distribution spatiale et évolution temporelle des études

Les premières études ont été publiées dans les années 90 et le taux de publication sur la thématique est resté faible jusque dans les années 2010. 80 % des articles ont été publiés entre 2010 et 2020, avec en moyenne 3 articles par an (*figure 1*).

La plupart des sites d'étude sur lesquels se basent les 48 articles retenus est localisée en Europe et en Chine. L'Afrique et l'Amérique du Sud sont également représentées dans de

Figure 1 - Evolution du nombre d'articles depuis les années 90 (source Web of Science).

Figure 1 - Evolution of the number of articles from the 1990's (source Web of Science).



rare études (figure 2). Plus de 45 % des articles concernent seulement 3 pays européens : l'Italie (17 %), la France (15 %) et l'Espagne (15 %), la Chine arrivant en 4^e position avec 12 % des articles. Ce classement concorde avec celui des pays producteurs de vins (OIV 2019).

Analyse des stratégies expérimentales

Parmi le corpus de 48 articles, 12 ont été exclus après lecture car des données étaient manquantes concernant la biodiversité des sols, l'application ou l'accumulation du cuivre ou le dispositif expérimental. Onze autres ne concernaient pas les sols viticoles et 21 ne répondaient pas de façon pertinente à la question de l'impact écotoxicologique du cuivre sur la qualité biologique des sols. Finalement, seules 4 études parmi les 48 étaient éligibles et considérées comme utiles et pertinentes. Dû au manque de données en contexte viticole, nous avons complété la méta-analyse avec 15 articles apportant des informations complémentaires dans d'autres contextes agricoles. Au total, ce sont 19 articles qui apportent des résultats sur des sols viticoles, de grandes cultures, de prairies, de vergers et en jachères.

Figure 2 - Distribution géographique des études incluses dans l'analyse bibliométrique

Figure 2 - Geographic distribution of the studies considered in the bibliometric analysis.

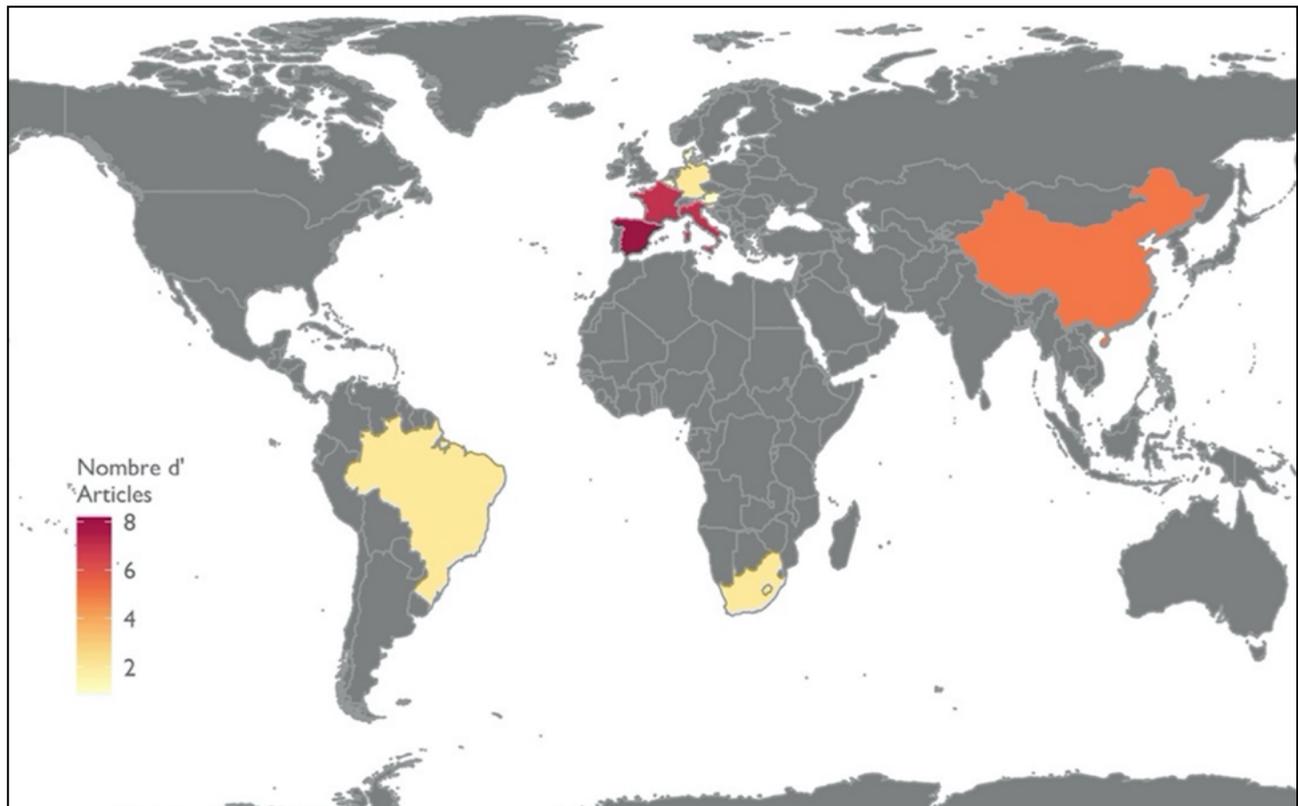


Tableau 1 : Nombre d'articles apportant des informations sur les effets « dose » et « accumulation » du cuivre pour chaque groupe biologique dans le cas de sols viticoles ou dans le cas d'autres sols agricoles.

Table 1 : Numbers of articles about the dose or accumulation effect of copper on the different biological groups in viticultural or agricultural soils.

Groupe biologique	Echelle d'observation	Patrimoine biologique		Fonctionnement biologique		Etat sanitaire	
		Contexte viticole	Autres contextes agricoles	Contexte viticole	Autres contextes agricoles	Contexte viticole	Autres contextes agricoles
EFFET DOSE APPLIQUEE							
Microorganismes	Communauté		6	2	4		
Nématodes	Communauté		3		2		
Collemboles	Population		1		2		
Enchytrées	Population		1	1	2		
Macro-arthropodes	Population						
Vers de terre	Population		3		3		
EFFET ACCUMULATION							
Microorganismes	Communauté		2	2	2		
Nématodes	Communauté						
Collemboles	Population				1		
Enchytrées	Population						
Macro-arthropodes	Population						
Vers de terre	Population						

Parmi ces 19 études, trois types de stratégies expérimentales ont été identifiés :

1-Expérimentations en laboratoire : les échantillons de sols proviennent d'1 ou 2 sites et les doses de cuivre ont été appliquées en conditions contrôlées (sous serres ou incubateur). Les conditions expérimentales sont découplées du contexte environnemental. Cette stratégie a été utilisée dans 14 articles.

2-Expérimentations contrôlées *in situ* : cette stratégie est généralement mise en place sur un seul site. Elle a été utilisée pour tester l'effet « dose apportée » dans un contexte pédoclimatique réaliste, mais également pour tester l'effet « accumulation » dans un sol hétérogène. Cette stratégie a été mise en place dans 3 articles.

3-Réseaux de parcelles : ces expérimentations incluent le plus grand nombre de sites (une dizaine à plus d'une centaine). Elles ont été utilisées pour mesurer l'effet accumulation. Les sites sont regroupés statistiquement selon la teneur en cuivre du sol. Cette stratégie a été déployée dans 3 articles.

Dans la plupart des études, la biodiversité a été mesurée dans la couche arable, c'est-à-dire sur les 20 premiers centimètres du sol, horizon dans lequel le cuivre est généralement distribué de façon homogène suite au travail du sol. Les recherches ont porté sur les micro-organismes (dans leur ensemble, mais aussi sur les bactéries et les champignons séparément), les nématodes, les collemboles, les enchytrées et les vers de terre. Aucune donnée n'a été trouvée sur les macro-arthropodes du sol. Le groupe le plus étudié est celui

des micro-organismes, tant dans les sols viticoles que dans les autres sols agricoles (tableau 1). Les données renseignent sur le patrimoine biologique (principalement biomasse ou abondance des organismes) et le fonctionnement biologique du sol (principalement activité ou groupes fonctionnels) mais aucune donnée ne renseigne sur l'état sanitaire du sol.

L'effet dose apportée a généralement été étudié par l'apport de produits commerciaux à base de cuivre, dont les formulations diffèrent selon les études: sulfate de cuivre, hydroxyde de cuivre(II), oxyde cuivreux(II), oxychlorure de cuivre ou chlorure de cuivre(II). Malgré cette diversité de formulations, 50 % des études ont utilisé du sulfate de cuivre, principalement sous forme de bouillie bordelaise. Une seule étude s'est intéressée à l'effet de différents fongicides cupriques sur la qualité biologique des sols (Vázquez-Blanco *et al.*, 2020). Aucune différence statistique n'a été observée sur les communautés microbiennes entre les 4 formulations commerciales testées. Toutefois, ce travail a montré que le cuivre apporté directement sous forme de sels a un impact accru comparé à des formulations commerciales. Aucune des études analysées n'a utilisé des sels de cuivre. Les doses testées s'étalent de 2,8 à 20000 kgCu/ha/an et la gamme de doses est très variable entre études (figure 3). Une seule étude inclut des doses similaires à celles actuellement appliquées par les viticulteurs dans son protocole expérimental (Ekelund *et al.*, 2003, doses de 2,8 et 6,4 kgCu/ha/an). Au contraire, presque 80 % des doses testées sont égales ou supérieures à 200 kgCu/ha/an. De plus, quelles que soient la forme et la dose apportées, la totalité de la dose a quasi systématiquement été appliquée en une seule fois, excepté dans Ranjard *et al.* (2006).

L'effet accumulation a été étudié par des mesures sur le terrain de la teneur en cuivre du sol et des paramètres biologiques. De nombreuses études se sont intéressées à cette question mais les auteurs se réfèrent souvent à l'historique d'utilisation de la parcelle en termes de types de culture (par exemple prairies vs vignes) ou de mode de production (par exemple conventionnel vs biologique) plutôt que sur des quantifications directes de la teneur en cuivre du sol. Ces études n'ont pas été incluses à cette méta-analyse car elles n'établissent pas une relation robuste entre la qualité biologique du sol et le cuivre. Les 5 études prises en compte dans l'analyse portent sur des sols avec des

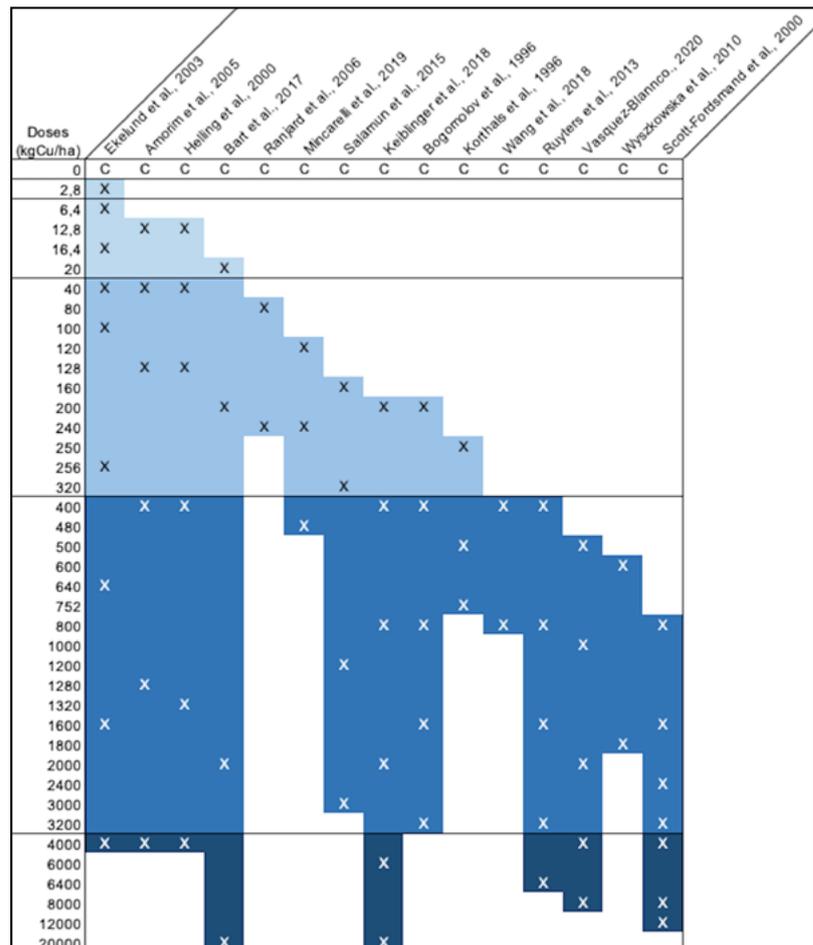
teneurs en cuivre comprises entre 60 kg/ha (15 mg/kg) et 18000 kg/ha (4500 mg/kg). Dans ces travaux, les sols dont les teneurs sont inférieures à 200 kg/ha (50 mg/kg) représentent généralement les témoins non-contaminés.

IMPACT DE LA DOSE DE CUIVRE APPORTÉE SUR LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DES SOLS

Des études portant sur l'impact de la dose de cuivre apportée sur les principaux organismes du sol ont été trouvées, excepté sur les macro-arthropodes tels que les insectes, les arachnides ou les myriapodes pour lesquels aucune donnée n'est disponible. Dans la suite de l'article, les résultats sont résumés par groupes biologiques tout contexte agricole confondu.

Figure 3 - Heatmap des doses utilisées dans les 15 études testant l'effet dose appliquée.

Figure 3 - Heatmap of the doses used in the 15 studies testing the dose effect.



Les micro-organismes

Sept articles fournissent des résultats sur l'effet de la dose apportée sur les communautés microbiennes du sol considérées dans leur ensemble (figure 4). Deux de ces articles apportent également des informations sur les communautés bactériennes et fongiques analysées séparément. Les doses appliquées, comprises entre 2,8 et 20 000 kgCu/ha, sont apportées en 1 seule fois, à l'exception d'une étude de terrain dans laquelle la dose totale a été apportée en 8 fois (Ranjard *et al.*, 2006). La forme de cuivre utilisée varie selon l'étude : hydroxyde de cuivre (1 étude), oxychlorure de cuivre (1 étude), chlorure de cuivre (4 études) ou sulfate de cuivre et bouillie bordelaise (3 études). Comme Vázquez-Blanco *et al.* (2020) ont montré que les différents types de fongicides cupriques ont des effets similaires sur les communautés microbiennes, nous avons synthétisé les effets observés indépendamment de la forme de cuivre utilisée.

Les résultats de la littérature montrent que la biomasse microbienne reste inchangée pour des doses apportées comprises entre 2,8 et 800 kgCu/ha (Ekelund *et al.*, 2003; Ranjard *et al.*, 2006), mais qu'elle baisse à partir de 800, 2000 ou 4000 kg/ha de cuivre selon le sol agricole (Ekelund *et al.*, 2003; Keiblinger *et al.*, 2018). Dans certains sols, la biomasse microbienne ne varie pas même à de très fortes doses (jusqu'à 3200 kgCu/ha dans Bogomolov *et al.*, 1996). Aux doses les plus fortes (jusqu'à 20 000 kgCu/ha), la perte de biomasse microbienne atteint 40 % à 60 %. Ajouté à ces résultats sur la biomasse, l'étude de Ekelund *et al.* (2003) montre que l'abondance des micro-organismes, c'est-à-dire leur nombre, n'est pas significativement impactée par des apports compris entre 2,8 et 4000 kgCu/ha dans un sol agricole.

Dans les différents travaux recensés, l'activité microbienne a été évaluée par une grande diversité de paramètres biologiques : la respiration microbienne mesure l'activité globale des micro-organismes dans leur ensemble (bactéries et champignons); les taux de croissance bactérien et fongique mesurent l'activité globale de chacune des communautés; les activités enzymatiques peroxydase et bêta-glucosidase renseignent sur le fonctionnement du cycle du carbone, l'activité uréase et le potentiel de nitrification sur celui du cycle de l'azote, les activités phosphatases acide et alcaline sur celui du cycle du phosphore et l'activité arylsulfatase sur celui du cycle du soufre.

Les résultats indiquent que la dose minimale induisant une diminution significative de la respiration varie selon le sol agricole : 400, 508, 640, 1600 ou 2000 kgCu/ha (Bogomolov *et al.*, 1996; Ekelund *et al.*, 2003; Keiblinger *et al.*, 2018; Vázquez-Blanco *et al.*, 2020). Étonnamment, 2 études rapportent aussi une stimulation de la respiration microbienne lors de l'apport de fortes doses de cuivre dans certains sols : à 200, 2000 et 6000 kgCu/ha (Keiblinger *et al.*, 2018) et à 400 kgCu/ha (Bogomolov *et al.*, 1996). Aux doses délétères, entre 400 et 8112 kgCu/ha, la respiration est réduite de 20 à 50 % (Bogomolov *et al.*, 1996;

Ekelund *et al.*, 2003; Keiblinger *et al.*, 2018; Vázquez-Blanco *et al.*, 2020). En contexte viticole, une diminution de 30 % de la respiration a été observée pour des apports de 508 à 8112 kgCu/ha (Vázquez-Blanco *et al.*, 2020). La dose maximale testée dans ces études (20000 kgCu/ha) induit 62 % de baisse de la respiration microbienne (Keiblinger *et al.*, 2018).

Le taux de croissance bactérien, mesuré dans un sol viticole après des apports de 508 à 8112 kgCu/ha, diminue de 50 à 86 % (Vázquez-Blanco *et al.*, 2020). Dans les mêmes conditions, le taux de croissance des champignons n'était pas affecté aux doses les plus faibles (508 et 1016 kgCu/ha) et il était moins sensible aux doses les plus élevées avec une diminution de seulement 20 % entre 2028 et 4056 kgCu/ha et de 45 % pour la dose maximale de 8112 kgCu/ha.

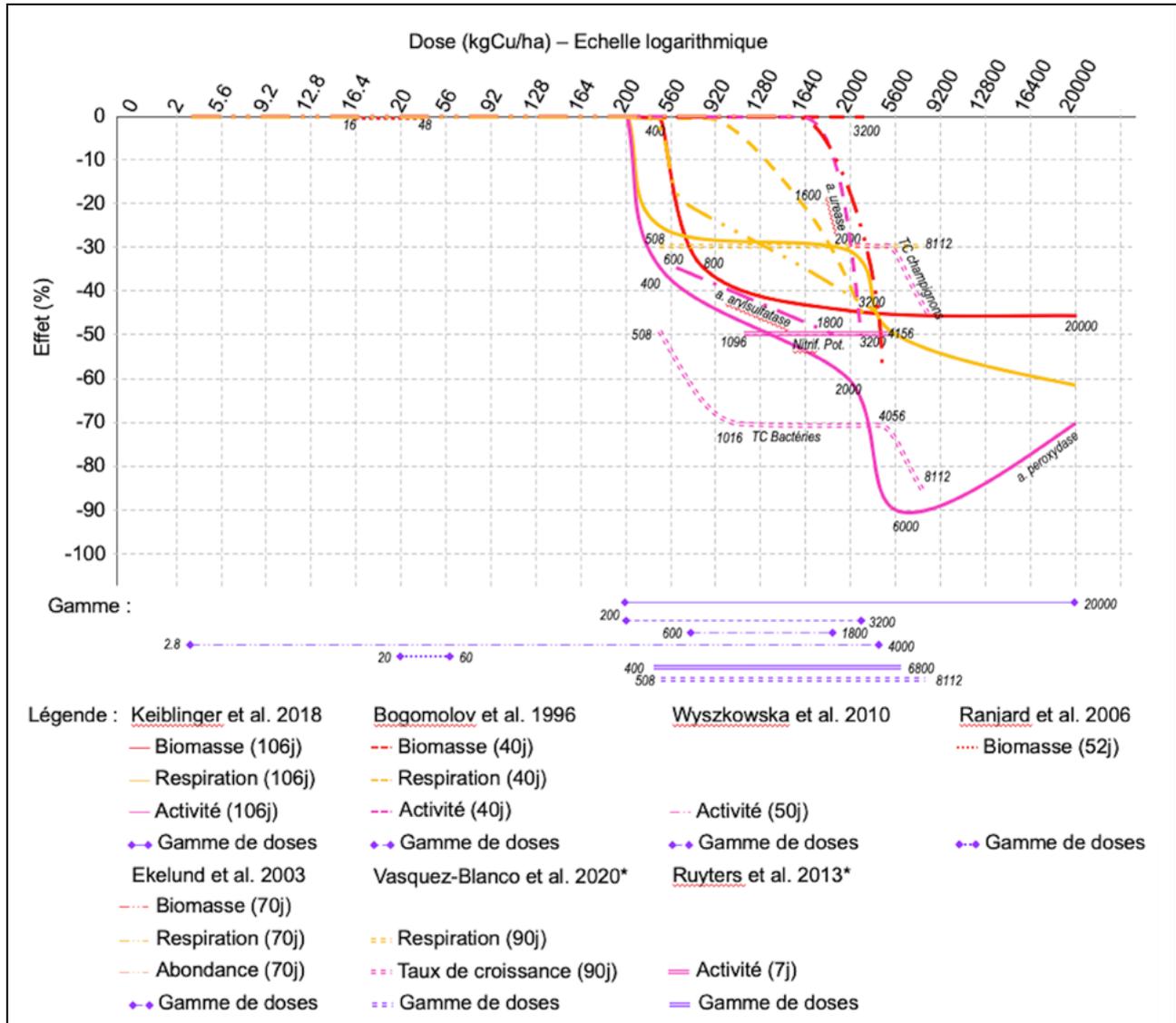
Plusieurs activités enzymatiques liées au cycle du carbone ont été mesurées dans différents sols agricoles (Wyszkowska *et al.*, 2010; Keiblinger *et al.*, 2018). Les résultats ont montré que l'activité peroxydase, nécessaire à la dégradation de la lignine, était stimulée dans un premier temps, 28 jours après l'apport de doses entre 2000 et 20000 kgCu/ha. Toutefois, après 106 jours, elle était réduite de 30 à 90 % quand l'apport de cuivre dépassait 400 kg/ha (Keiblinger *et al.*, 2018). L'activité bêta-glucosidase, impliquée dans la dégradation de composés celluloseux, était impactée dans une moindre mesure, avec une baisse de 16 et 20 % pour des apports de 600 et 1800 kgCu/ha respectivement (Wyszkowska *et al.*, 2010). Ces résultats suggèrent que des doses supérieures à 400 kgCu/ha freinent la dégradation de la matière organique.

Concernant le cycle de l'azote, les données de la littérature indiquent que l'activité uréase des sols agricoles n'est pas affectée par l'apport de cuivre entre 200 et 1600 kg/ha (Bogomolov *et al.*, 1996). Le seul effet significatif observé est une diminution de 50 % de l'activité uréase pour une dose de 3200 kgCu/ha. Dans une expérimentation sur 6 sols viticoles européens, une diminution de 50 % du taux de nitrification potentiel a été mesurée à partir de 1016 kgCu/ha (c'est-à-dire l'EC₅₀, la dose induisant une réponse de 50 % par rapport à l'effet maximum observable) pour le sol le plus sensible (Ruyters *et al.*, 2013). Dans les autres sols, un effet similaire a été mesuré à des doses 4 fois supérieures. Ces résultats suggèrent que l'activité liée au cycle de l'azote n'est pas influencée par l'apport de cuivre jusqu'à des doses de 1000 kg/ha, et ce quel que soit le type de sol.

Les résultats des mesures des activités phosphatases acide et alcaline montrent qu'elles sont réduites de 20 à 30 % (selon le type de sol et le type de culture) pour une dose minimale de 600 kgCu/ha. Cette diminution atteint 45 à 55 % pour une dose maximale de 1800 kgCu/ha (Wyszkowska *et al.*, 2010). L'activité arylsulfatase est légèrement moins impactée, avec une diminution de 35 % pour 600 kgCu/ha et de 60 % pour 1800 kgCu/ha (Wyszkowska *et al.*, 2010).

Figure 4 - Résumé des effets dose de cuivre appliquée recensés sur les micro-organismes du sol dans la littérature académique. Les différentes études sont indiquées par des types de traits différents. Les différents types de paramètres biologiques sont indiqués par des couleurs différentes. Pour les activités microbiennes, les paramètres mesurés sont détaillés sur la figure : a. = activité, TC = Taux de croissance, Nitrif. Pot. = Nitrification potentielle. La durée de l'expérimentation est donnée entre parenthèses dans la légende et est exprimée en jours. La gamme de doses testées est présentée pour chaque article, exprimée en kgCu/ha. Les valeurs sur la figure indiquent les doses clés de chaque étude. * indique que l'étude porte sur un ou plusieurs sols viticoles.

Figure 4 - Summary of the dose effect of copper on soil microorganisms provided by the academic literature. The different articles are indicated by the line type. The different types of biological parameters are specified by colors. For microbial activities, the measured parameters are detailed in the figure (a. = activity, GR = growth rate, Pot. Nitrif. Rate = potential nitrification rate). The duration of experiments is given in days in brackets in the legend. The range of doses is presented for each article, expressed in kgCu/ha. Numbers in the figure indicate cutoff doses. * results obtained in a viticultural context.



En complément de ces travaux évaluant l'impact à court terme du cuivre sur les communautés microbiennes dans leur ensemble, une étude a suivi en dynamique la réponse des communautés bactériennes et fongiques pendant 1 an après l'apport de cuivre sur 2 sols agricoles, au cours d'expérimentations en microcosmes et au terrain (Ranjard *et al.*, 2006). Un schéma de réponse similaire a été observé pour les bactéries et les champignons, caractérisé par une première phase de changement important de la composition des communautés suite à l'apport du cuivre, suivie par la résilience des communautés à moyen terme. Il faut noter que les changements étaient plus marqués pour les bactéries que pour les champignons. Plus précisément, en microcosmes, la composition des communautés changeait après l'apport de cuivre quels que soient le sol et la dose (80 ou 240 kgCu/ha). Après 52 jours, un gradient d'évolution de la composition des communautés apparaissait quand la dose de cuivre augmentait. *In situ*, les communautés étaient impactées 2 mois après l'apport mais ces changements étaient transitoires puisqu'une résilience était observée dès 4 mois, mettant en évidence des processus d'adaptation efficaces (Ranjard *et al.*, 2006). Une autre étude a évalué les communautés de champignons 4 mois après application du cuivre mais celle-ci, n'a pas montré de résilience à ce terme, avec des réponses très variables de la composition de la communauté selon la dose appliquée (entre 200 et 20000 kgCu/ha) et le type de sol (Keiblinger *et al.*, 2018). Cette étude a montré également que la richesse en champignons (le nombre de taxons détectés par une technique de métabarcodage ADN) n'était pas impactée par le cuivre pour des doses entre 200 et 20000 kg/ha apportées en une seule fois, quel que soit le sol (Keiblinger *et al.*, 2018). L'abondance en champignons changeait à court terme mais était rapidement résiliente. En effet, malgré une diminution de 90 % après 28 jours dès une dose de 200 kgCu/ha, aucune différence d'abondance n'était observée entre les sols contaminés et le témoin après 4 mois (Keiblinger *et al.*, 2018) en accord avec les précédents résultats de Ranjard *et al.* (2006).

Globalement, ces résultats montrent que les communautés microbiennes sont tolérantes au cuivre jusqu'à des doses de 400 kg/ha. La plupart des paramètres microbiens baissent de 30 à 60 % pour des doses entre 1600 et 8000 kgCu/ha (figure 4), c'est-à-dire 400 à 2000 fois la dose apportée par les viticulteurs sur une année. Les activités enzymatiques sont les paramètres microbiens les plus sensibles et les enzymes liées aux cycles du carbone et du soufre sont plus affectées que celles des cycles de l'azote et du phosphore à de fortes doses de cuivre. La biomasse, la densité et la respiration microbienne sont moins sensibles à l'apport de cuivre que les activités enzymatiques. L'abondance microbienne n'est pas du tout. De plus les études suggèrent des processus de résilience et d'adaptation à moyen terme des communautés microbiennes en termes de diversité, de composition et

d'abondance, même après application de très fortes doses de cuivre (jusqu'à 20000 kgCu/ha).

Les nématodes

L'impact écotoxicologique du cuivre sur les nématodes n'a pas été étudié en contexte viticole mais trois articles apportent des informations sur des sols cultivés ou de prairies. Dans ces études, le cuivre a été apporté sous forme de sulfate de cuivre, en un seul passage. Une des études a mesuré la réponse de la communauté de nématodes 10 ans après l'application *in situ* de 3 doses différentes (250, 500 et 750 kgCu/ha) (Korthals *et al.*, 1996). Les deux autres études ont mesuré, en microcosmes, les effets à court terme de doses entre 160 et 32000 kgCu/ha (Bogomolov *et al.*, 1996; Šalamún *et al.*, 2015). Les nématodes ont été suivis en termes d'abondance totale, de richesse en genres, d'abondance des groupes écologiques et d'indices nématofauniques (figure 5).

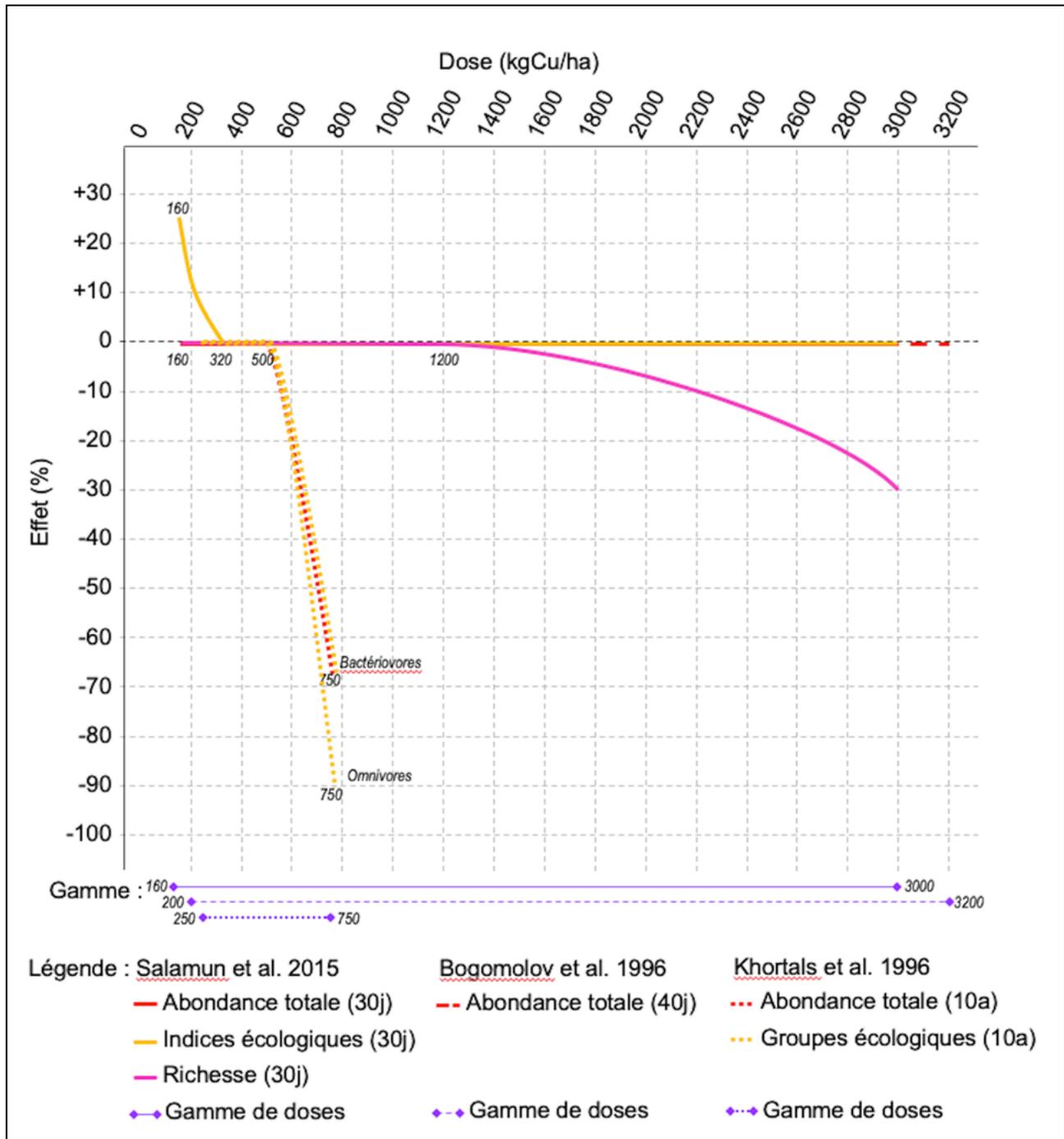
Les résultats obtenus en microcosmes ont montré que l'abondance totale des nématodes restait inchangée après l'apport de cuivre, même à de fortes doses allant jusqu'à 3000 ou 3200 kgCu/ha (Bogomolov *et al.*, 1996; Šalamún *et al.*, 2015). La richesse en genres n'était pas affectée jusqu'à des doses de 1200 kgCu/ha mais elle diminuait de 30 % pour 3000 kgCu/ha (Šalamún *et al.*, 2015). *In situ* et 10 ans après l'apport du cuivre, l'abondance des nématodes n'était là encore pas impactée quelle que soit la dose apportée, à l'exception d'un sol très acide (pH<5) dans lequel l'abondance des nématodes était divisée par 3 pour une dose de 750 kgCu/ha (Korthals *et al.*, 1996).

L'abondance des groupes écologiques a seulement été mesurée *in situ* 10 ans après l'apport (Korthals *et al.*, 1996). Les nématodes herbivores et fongivores étaient insensibles au cuivre, quels que soient la dose apportée et le pH du sol. L'abondance des nématodes bactériovores baissait de 66 %, seulement dans les sols très acides (pH = 4) pour l'apport de 750 kgCu/ha. Les nématodes omnivores étaient les plus affectés avec une diminution de 90 % de leur abondance à cette dose mais dans un sol avec un pH de 6,1. Ces réponses des nématodes bactériovores et omnivores suggèrent que les deux extrémités de la chaîne trophique peuvent être affectées sur le long terme par de fortes doses de cuivre dans des conditions pédologiques spécifiques.

Les indices nématofauniques ont été estimés dans une seule des études en microcosmes (Šalamún *et al.*, 2015). Deux indices ont été calculés à partir de l'abondance relative des espèces et des groupes écologiques: L'indice de maturité et l'indice de structure. L'indice de maturité, évalue la réponse à une perturbation environnementale ou à une contamination. Les résultats ont montré qu'il n'était pas négativement impacté par l'apport de cuivre jusqu'à des doses de 3000 kgCu/ha, mais qu'il augmentait de 17 % pour une dose 160 kgCu/ha. De même, l'indice de structure qui évalue la stabilité et la com-

Figure 5 - Résumé des effets dose de cuivre appliquée recensés sur les nématodes dans la littérature académique. Les différentes études sont indiquées par des types de traits différents. Les différents types de paramètres biologiques sont indiqués par des couleurs différentes. Le détail des groupes écologiques est donné sur la figure. La durée de l'expérimentation est donnée entre parenthèses dans la légende et est exprimée en jours (j) ou en années (a). La gamme de doses testées est présentée pour chaque article, exprimée en kgCu/ha. Les valeurs sur la figure indiquent les doses clés de chaque étude. Aucun des résultats n'a été obtenu en contexte viticole.

Figure 5 - Summary of the dose effect of copper on soil nematodes provided by the academic literature. The different articles are indicated by the line type. The different types of biological parameters are specified by colors. The names of ecological groups are detailed in the figure. The duration of experiments is given in days (d) or in years (y) in brackets in the legend. The range of doses is presented for each article, expressed in kgCu/ha. Numbers in the figure indicate cutoff doses. No result was obtained in a viticultural context.



plexité trophique de la communauté, n'était pas négativement affecté, mais il augmentait de 26 % pour 160 kgCu/ha. Cela suggère que même à de fortes doses, l'apport de cuivre peut être favorable aux nématodes en améliorant la complexité et la stabilité de la communauté.

Globalement, les résultats montrent que les nématodes ne sont que légèrement impactés par l'apport de cuivre, jusqu'à des doses de 3000 kgCu/ha (figure 5). Des doses inférieures à 200 kgCu/ha peuvent même stimuler les communautés. Dans les sols fortement acides (pH<5), l'abondance des nématodes et la structure de leur communauté sont fortement perturbées, probablement en raison d'une plus forte solubilisation du cuivre à ces pH. Toutefois, le pH des sols agricoles et viticoles est généralement compris entre 6 et 7,5, valeur optimale pour assurer la fertilité des sols et la croissance des plantes. Quand les sols sont naturellement acides ou acidifiés par les pratiques agricoles, le pH est rééquilibré par chaulage. Par conséquent, l'utilisation de cuivre par les viticulteurs sur des sols fortement acides est peu probable.

Les collemboles

Les collemboles sont des microarthropodes vivant principalement dans les premiers centimètres du sol. Deux articles apportent des informations sur l'impact écotoxicologique du cuivre apporté sur les collemboles de sols agricoles (grandes cultures et jachères, figure 6). Aucune donnée n'est disponible en vignes. Dans ces études, le cuivre a été apporté sous forme de chlorure de cuivre en une seule application. La première étude porte sur 7 sols agricoles européens et repose sur des tests écotoxicologiques standards recommandés par l'Organisation Internationale de Normalisation (International Standard Organization guideline, Amorim et al., 2005). L'espèce *Folsomia candida* a été suivie 70 jours après l'apport de doses comprises entre 40 et 4000 kgCu/ha. Les résultats sont exprimés sous forme d'EC₅₀, c'est-à-dire la dose induisant une réponse de 50 % par rapport à l'effet maximum observable, pour la survie et la reproduction de l'espèce. La seconde étude a suivi la dynamique de la population de *Folsomia fimetaria* dans un sol de jachère 28 jours après l'application de doses comprises entre 400 et 12000 kgCu/ha (Scott-Fordsmand et al., 2000).

Dans ces travaux, la survie des collemboles diminuait de 50 % pour des doses entre 3 476 et 8000 kgCu/ha en fonction du type de sol (Scott-Fordsmand et al., 2000; Amorim et al., 2005). L'impact sur la reproduction variait fortement selon le sol et l'espèce étudiée. La reproduction baissait de 50 % de l'apport de 408 à 4000 kgCu/ha et pour une dose de 8000 kgCu/ha, celle de *F. fimetaria* était interrompue (Scott-Fordsmand et al., 2000). *A contrario*, l'abondance des collemboles n'était pas significativement altérée par l'apport de cuivre à des doses comprises entre 800 et 12000 kgCu/ha (Scott-Fordsmand et al., 2000).

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les collemboles sont affectés à partir d'une dose apportée de 400 kgCu/ha (figure 6). Leur sensibilité varie fortement en fonction du type de sol, avec des doses efficaces comprises entre 400 et 4000 kgCu/ha. Les résultats sur la survie et la reproduction sont du même ordre de grandeur pour les deux espèces étudiées, malgré une légère variabilité. Bien que ces études apportent une première réponse sur l'écotoxicité du cuivre pour les collemboles, des données supplémentaires sont nécessaires pour conclure de façon robuste. De plus, des données sur la diversité et la composition des communautés de collemboles seraient un plus pour évaluer plus finement l'impact de l'utilisation du cuivre en agriculture.

Les enchytrées

Les enchytrées ont été étudiées dans 3 articles, l'un en contexte viticole et 2 dans d'autres contextes agricoles (grandes cultures et jachères) (figure 7). Dans ces travaux, le cuivre était apporté sous forme de chlorure ou d'oxychlorure de cuivre et appliquée en 1 seul passage. Dans l'étude de Ruyters et al. (2013), la reproduction d'*Enchytraeus albidus* a été mesurée en microcosmes 42 jours après l'apport de doses comprises entre 400 et 6 400 kgCu/ha dans 6 sols viticoles différents. Les résultats sont exprimés sous forme d'EC₅₀, la dose induisant une réponse de 50 % par rapport à l'effet maximum observable. La réponse d'*E. albidus* a également été mesurée dans un sol de jachères 14 jours après application de doses comprises entre 20 et 20 000 kgCu/ha (Bart et al., 2017). La 3^e étude a suivi 2 espèces, *E. albidus* et *E. luxuriosus*, jusqu'à 70 jours après l'application de 12,8 à 1 280 kgCu/ha (Amorim et al., 2005).

Les résultats de ces travaux ont montré que pour des doses de 12,8 à 20000 kg/ha, l'apport de cuivre n'impactait pas la survie d'*E. albidus* dans un sol de jachères (Bart et al., 2017). La reproduction d'*E. albidus* et *E. luxuriosus* restait inchangée jusqu'à 1 280 kgCu/ha quel que soit le sol (Amorim et al., 2005), mais selon le sol celle d'*E. albidus* baissait de 50 % entre 1 896 et 2 468 kgCu/ha (Ruyters et al., 2013). La biomasse d'*E. albidus* diminuait légèrement à partir de 2000 kgCu/ha apporté, mais cette diminution ne devenait statistiquement significative que pour la dose maximale de 20000 kgCu/ha, représentant une baisse d'environ 60 % (Bart et al., 2017). L'activité des enchytrées a été évaluée en observant leur comportement d'évitement par rapport à une source de cuivre. L'évitement d'*E. albidus* augmentait progressivement pour des doses entre 200 et 2000 kgCu/ha et il devenait systématique pour 20000 kgCu/ha (Bart et al., 2017).

Ces résultats montrent que les enchytrées sont globalement peu, voire pas, sensibles à l'apport de cuivre (figure 7). Les principaux impacts sont une baisse de la reproduction à partir de 1800 kgCu/ha apportés dans les sols viticoles, et une

Figure 6 - Résumé des effets dose de cuivre appliquée recensés sur les collemboles dans la littérature académique. Les différentes études sont indiquées par des types de traits différents. Les différents types de paramètres biologiques sont indiqués par des couleurs différentes. La durée de l'expérimentation est donnée entre parenthèses dans la légende et est exprimée en jours (j). La gamme de doses testées est présentée pour chaque article, exprimée en kgCu/ha. Les valeurs sur la figure indiquent les doses clés de chaque étude. Aucun des résultats n'a été obtenu en contexte viticole.

Figure 6 - Summary of the dose effect of copper on soil collembola provided by the academic literature. The different articles are indicated by the line type. The different types of biological parameters are specified by colors. The duration of experiments is given in days (d) in brackets in the legend. The range of doses is presented for each article, expressed in kgCu/ha. Numbers in the figure indicate cutoff doses. No result was obtained in a viticultural context.

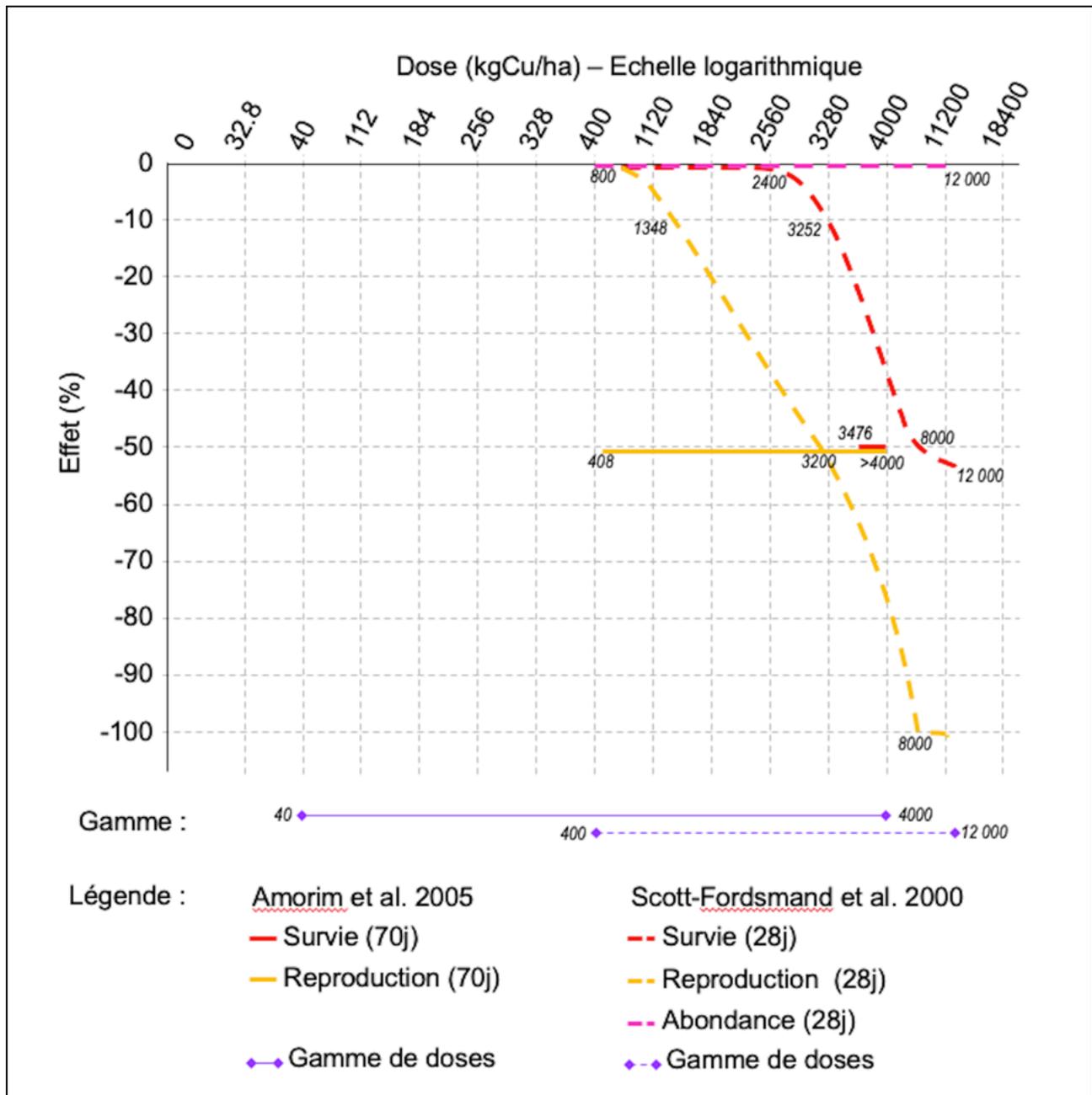
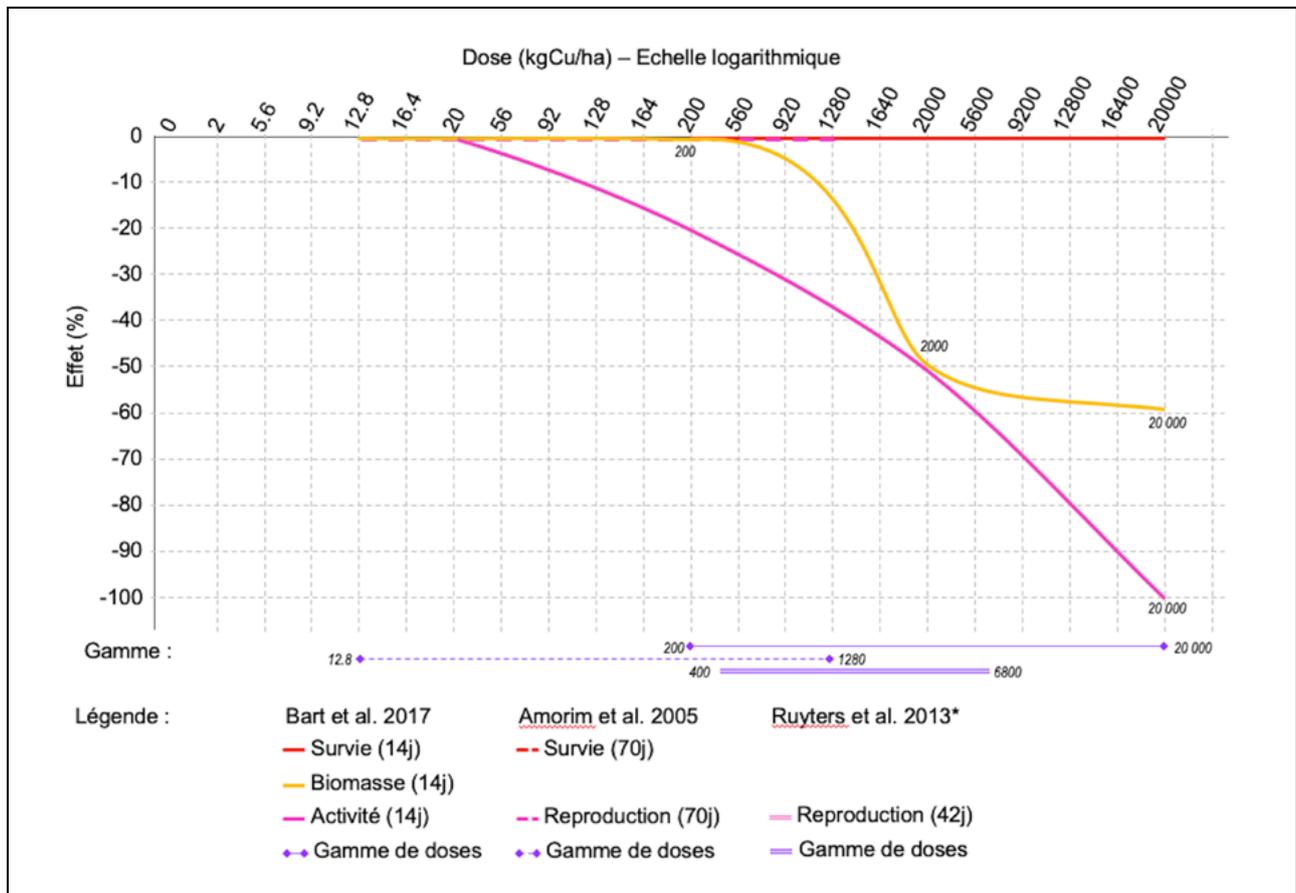


Figure 7 - Résumé des effets dose de cuivre appliquée recensés sur les enchytrées dans la littérature académique. Les différentes études sont indiquées par des types de traits différents. Les différents types de paramètres biologiques sont indiqués par des couleurs différentes. La durée de l'expérimentation est donnée entre parenthèses dans la légende et est exprimée en jours (j). La gamme de doses testées est présentée pour chaque article, exprimée en kgCu/ha. Les valeurs sur la figure indiquent les doses clés de chaque étude. * indique que l'étude porte sur un ou des sols viticoles.

Figure 7 - Summary of the dose effect of copper on soil enchytraeids provided by the academic literature. The different articles are indicated by the line type. The different types of biological parameters are specified by colors. The duration of experiments is given in days (d) in brackets in the legend. The range of doses is presented for each article, expressed in kgCu/ha. Numbers in the figure indicate cutoff doses. * results obtained in a viticultural context.



perte de biomasse pour la plus forte dose testée (20000 kgCu/ha) dans un sol de jachères. La survie de ces organismes n'a jamais été remise en cause.

Les vers de terre

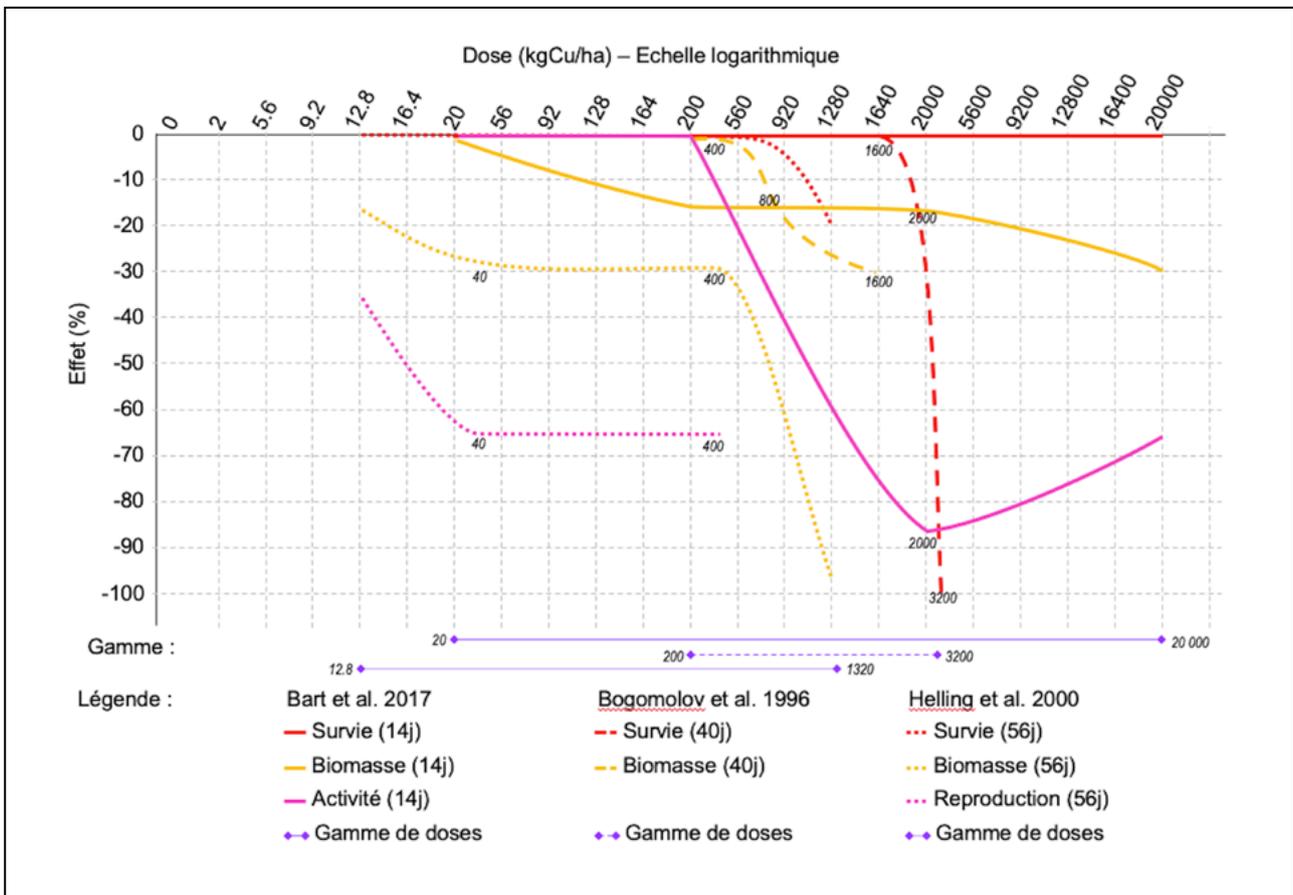
Les vers de terre ont uniquement été étudiés dans des sols agricoles non viticoles. Parmi les 5 articles référencés, trois renseignent sur l'écotoxicité du cuivre (Bogomolov *et al.*, 1996; Helling *et al.*, 2000; Bart *et al.*, 2017) et 2 sur sa cytotoxicité et génotoxicité (Wang *et al.*, 2018; Mincarelli *et al.*, 2019). L'écotoxicité a été étudiée dans 3 types de sols ou de substrats

différents (sol agricole, sol de jachère ou fumier de bovins sans urine). Le cuivre y a été apporté sous forme d'oxychlorure ou de sulfate en 1 seul passage. Les gammes de doses sont très variables entre études (*figure 8*): de 12,8 à 1 320 kgCu/ha (Helling *et al.*, 2000), de 200 à 3200 kgCu/ha (Bogomolov *et al.*, 1996) et de 20 à 20 000 kgCu/ha (Bart *et al.*, 2017). Les vers de terre ont été étudiés soit à l'échelle de la communauté (Helling *et al.*, 2000), soit à l'échelle de la population avec l'inoculation d'une espèce modèle (*Aporrectodea caliginosa* ou *Eisenia fetida*) (Bogomolov *et al.*, 1996; Bart *et al.*, 2017).

Dans une des études, la survie des vers de terre n'a pas été menacée jusqu'à 20000 kgCu/ha (Bart *et al.*, 2017). Dans

Figure 8 - Résumé des effets dose de cuivre appliquée recensés sur les vers de terre dans la littérature académique. Les différentes études sont indiquées par des types de traits différents. Les différents types de paramètres biologiques sont indiqués par des couleurs différentes. La durée de l'expérimentation est donnée entre parenthèses dans la légende et est exprimée en jours (j). La gamme de doses testées est présentée pour chaque article, exprimée en kgCu/ha. Les valeurs sur la figure indiquent les doses clés de chaque étude. Aucun des résultats n'a été obtenu en contexte viticole.

Figure 8 - Summary of the dose effect of copper on earthworms provided by the academic literature. The different articles are indicated by the line type. The different types of biological parameters are specified by colors. The duration of experiments is given in days (d) in brackets in the legend. The range of doses is presented for each article, expressed in kgCu/ha. Numbers in the figure indicate cutoff doses. No result was obtained in a viticultural context.



les 2 autres études, la mortalité a atteint 20 % pour une dose maximale de 1 320 kgCu/ha (Helling *et al.*, 2000), et 100 % pour une dose maximale de 3 200 kgCu/ha (Bogomolov *et al.*, 1996). La reproduction des vers de terre, estimée par le nombre de cocons, baissait de 35 % dès l'apport de 12,8 kgCu/ha et atteignait 65 % pour des doses de 40 à 400 kgCu/ha (Helling *et al.*, 2000). Selon l'étude, la biomasse lombricenne diminuait de 15 % après l'apport de 12,8, 800 ou 2 000 kgCu/ha et de 30 % après l'apport de 40, 1 600 ou 20 000 kgCu/ha (respectivement dans Helling *et al.*, 2000; Bogomolov *et al.*, 1996; Bart *et al.*, 2017 pour chaque dose). La plus importante perte de biomasse (95 %) était induite par une dose de 1 320 kgCu/

ha (Helling *et al.*, 2000). L'activité lombricenne, estimée par le temps de quiescence, diminuait jusqu'à 86 % pour l'apport de doses entre 2 000 et 20 000 kgCu/ha (Bart *et al.*, 2017).

Dans l'ensemble, ces résultats mettent en évidence une grande variabilité de l'impact écotoxicologique du cuivre sur les vers de terre liée aux caractéristiques physico-chimiques du sol et aux espèces utilisées pour l'expérience. L'étude d'Helling *et al.* (2000) a conclu à des impacts plus importants que les autres, ce qui s'explique par l'utilisation d'un fumier de bovins pour l'expérience et non d'un « vrai sol ». Les caractéristiques physico-chimiques d'un fumier sont en effet très différentes de celles des sols et peuvent augmenter artificiellement la mobilité

du cuivre et donc son impact sur les organismes. Parmi les 2 autres études, un effet délétère du cuivre sur les vers de terre était observé à partir de 200 kgCu/ha (figure 8).

Ajoutés à ces résultats sur l'écotoxicité du cuivre, deux articles apportent des informations sur sa cytotoxicité et génotoxicité, c'est-à-dire la réponse subcellulaire au contaminant. Les paramètres biologiques mesurés ont été les dommages à l'ADN, la réponse immunitaire ou le stress oxydatif, etc. La cyto/génotoxicité a été évaluée pour des apports de 120 à 800 kgCu/ha sur *E. andrei* et *E. fetida*. Les résultats ont montré que l'ADN d'*E. Andrei* était endommagé à hauteur de 20 % 6 jours après contact avec un sol contaminé avec 240 kgCu/ha et atteignait 45 % pour une dose de 480 kgCu/ha. Cette altération de l'ADN semblait néanmoins réversible car 9 jours après contact avec le sol contaminé, seuls 32 % de l'ADN étaient endommagés (Mincarelli et al., 2019). Les paramètres liés au stress oxydatif, à la réponse immunitaire, à l'activité cytolitique et à la production de peptides antimicrobiens restaient inchangés 6 jours après exposition au cuivre. La réponse immunitaire était en revanche fortement stimulée (+880 %) 9 jours après contact avec une dose de 480 kgCu/ha (Mincarelli et al., 2019). Les voies métaboliques du stress oxydatif étaient également stimulées à partir de 400 kgCu/ha, 28 jours après l'exposition (Wang et al., 2018). Selon que le cuivre était apporté sous forme de bouillie bordelaise ou d'oxychlorure, le stress oxydatif était 2 à 4 fois plus élevé pour 400 kgCu/ha, et 3 à 11 fois plus élevé pour 800 kgCu/ha (Wang et al., 2018). Ces résultats suggèrent que les effets cytotoxiques et génotoxiques du cuivre sont fortement variables à très court terme et entre espèces. De plus, il faut noter qu'en l'état actuel de nos connaissances, les effets génotoxiques et cytotoxiques ne peuvent pas être directement liés à la réponse écologique du patrimoine biologique du sol et à son fonctionnement.

IMPACT DE L'ACCUMULATION DU CUIVRE SUR LA QUALITÉ BIOLOGIQUE DU SOL

Cinq études ont été recensées concernant l'effet « accumulation du cuivre » sur les organismes du sol. Deux articles se basent sur le même réseau de parcelles viticoles, situées dans 7 régions d'Espagne et du Portugal (145 vignes dans Fernández-Calviño et al. (2010); 95 vignes dans Soler-Rovira et al. (2013)). Les teneurs en cuivre dans ces sols étaient comprises entre 15 et 666 mg/kg soit 60 et 2664 kgCu/ha. Un article s'est intéressé à des vergers de pomme d'âges différents (5, 15, 20, 30 et 45 ans), correspondant à un gradient de contamination au cuivre entre 88 et 560 kgCu/ha (Wang et al., 2009). Un autre a porté sur un sol de prairie contaminé au début du XX^e siècle par l'utilisation de sulfate de cuivre par

une usine d'imprégnation de bois (Nunes et al., 2016), cette contamination n'est donc pas d'origine agricole. La parcelle était caractérisée par un gradient de teneur en cuivre : 60, 1800 et 18000 kg/ha. Ces 4 études apportent essentiellement des informations sur l'impact écotoxicologique du cuivre accumulé dans le sol sur les micro-organismes (figure 9). En outre, les collemboles ont été étudiés sur le même sol de prairie historiquement contaminé par les activités d'imprégnation de bois (Nunes et al., 2016) avec cette fois un gradient de teneur en cuivre du sol compris entre 60 et 11648 kgCu/ha (Scott-Fordsmand et al., 2000).

Les micro-organismes

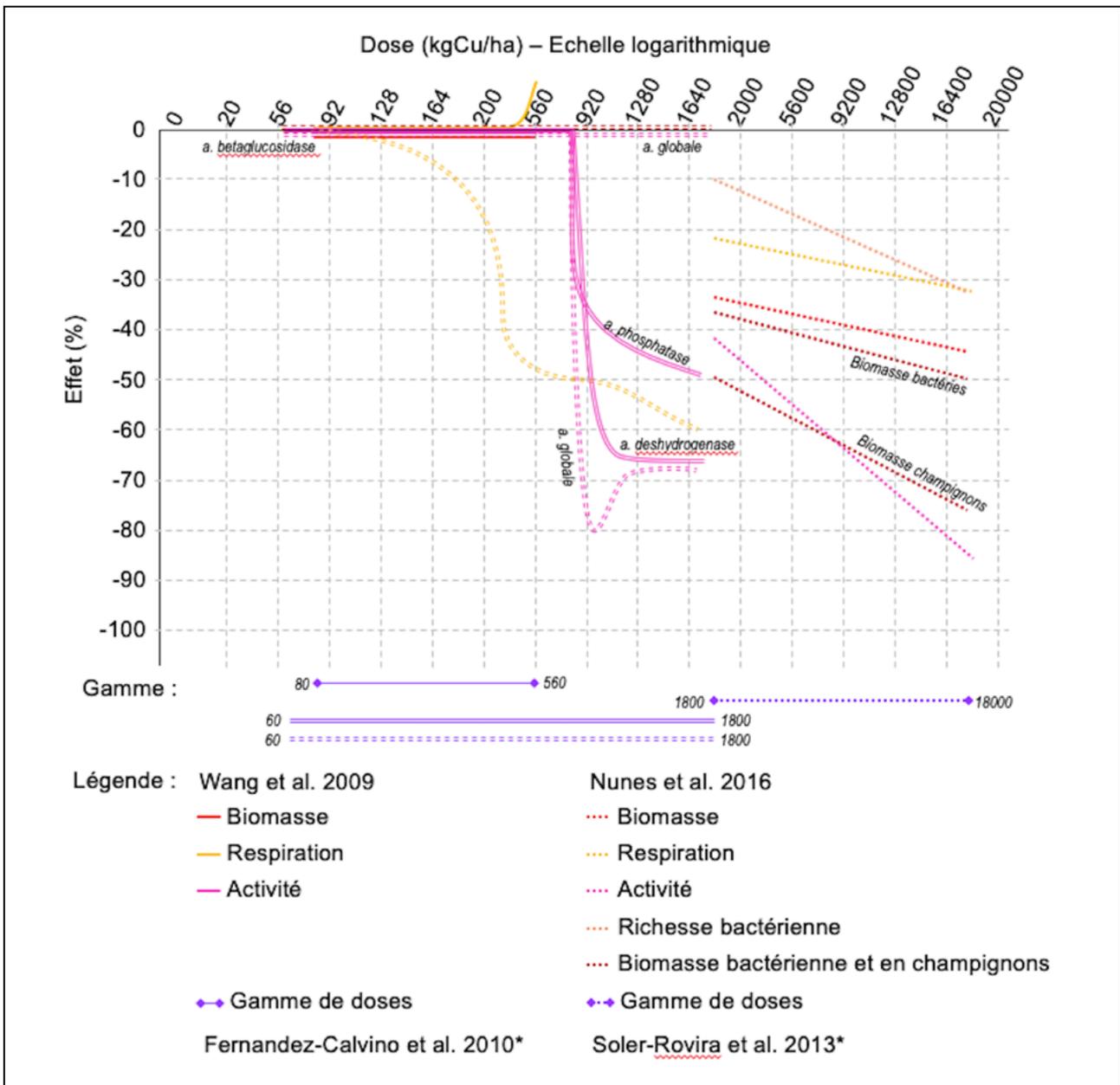
Les résultats des travaux recensés ne rapportent pas de variation de la biomasse microbienne du sol pour des teneurs en cuivre de sols de vergers entre 88 et 560 kgCu/ha dans des vergers (Wang et al., 2009) mais des diminutions de 33 et 45 % ont été mesurées pour des teneurs de 1800 et 18000 kgCu/ha respectivement dans une prairie contaminée (Nunes et al., 2016). Dans le même sol, la richesse bactérienne a été réduite de 10 et 33 % pour 1800 et 18000 kgCu/ha respectivement. Aucune donnée sur la biomasse et la diversité microbienne n'est disponible en contexte viticole.

Dans les sols viticoles, la respiration microbienne a diminué de 40 % pour des teneurs en cuivre comprises entre 200 et 400 kg/ha et cette diminution est restée stable dans les sols avec des teneurs plus élevées. La respiration a baissé au maximum de 58 % au-delà de 1200 kgCu/ha accumulé (Soler-Rovira et al., 2013). Dans les sols de vergers, la respiration microbienne est restée inchangée jusqu'à 400 kgCu/ha et a augmenté de 88 % pour 560 kgCu/ha accumulé dans le sol (Wang et al., 2009). Dans un sol de prairie, la respiration a baissé de 22 à 32 % pour des teneurs en cuivre accumulé entre 1800 et 18000 kg/ha (Nunes et al., 2016).

L'activité microbienne globale, estimée par des mesures de respiration induite par substrats (substrate-induced respiration, SIR) ou d'activité enzymatique déshydrogénase, a diminué de 65 à 75 % à partir de 600 kgCu/ha accumulé dans les sols viticoles (Fernández-Calviño et al., 2010; Soler-Rovira et al., 2013). Malgré cette baisse d'activité, le taux de croissance microbien est resté inchangé pour des teneurs de 60 à 2664 kgCu/ha (Soler-Rovira et al., 2013). Les résultats sont similaires en vergers, avec une activité microbienne globale stable jusqu'à 560 kgCu/ha (Wang et al., 2009). Plus précisément, l'activité bêta-glucosidase, impliquée dans le cycle du carbone et la dégradation de la matière organique, n'a pas été affectée pour des teneurs entre 60 et 1200 kgCu/ha dans les sols viticoles (Fernández-Calviño et al., 2010). De même, la dégradation de composés organiques complexes n'a pas été altérée (Nunes et al., 2016). En revanche, l'activité catabolique liée à la dégradation de composés simples (glucose, galactose,

Figure 9 - Résumé des effets accumulation de cuivre sur les micro-organismes du sol recensés dans la littérature académique. Les différentes études sont indiquées par des types de traits différents. Les différents types de paramètres biologiques sont indiqués par des couleurs différentes. Pour les activités microbiennes, les paramètres mesurés sont détaillés sur la figure (a. = activité). La gamme de teneurs en cuivre des sols est présentée pour chaque article, exprimée en kgCu/ha. Les valeurs sur la figure indiquent les teneurs clés de chaque étude. * indique que l'étude porte sur un ou des sols viticoles.

Figure 9 - Summary of the accumulation effect of copper on soil microorganisms provided by the academic literature. The different articles are indicated by the line type. The different types of biological parameters are specified by colors. The range of soil copper contents in soils is presented for each article, expressed in kgCu/ha. Numbers in the figure indicate cutoff doses. * results obtained in a viticultural context.



acide malique, etc.) a diminué respectivement de 26 à 42 % et de 26 à 85 % pour des teneurs de 1 800 et 18 000 kgCu/ha accumulé dans un sol de prairie. L'activité uréase, qui traduit le fonctionnement du cycle de l'azote, a réagi de façon versatile à la teneur en cuivre dans les sols viticoles. Alors qu'elle diminue de 45 à 55 % pour des teneurs en cuivre comprises entre 200 et 400 kgCu/ha et entre 600 et 800 kgCu/ha, elle a été similaire pour des teneurs inférieures à 200 kgCu/ha et supérieures à 1 200 kgCu/ha (Fernández-Calviño *et al.*, 2010). L'activité phosphatase, en lien avec le cycle du phosphore, s'est seulement révélée sensible à des teneurs supérieures à 600 kgCu/ha accumulé et a diminué au maximum de 48 % dans les sols les plus contaminés (Fernández-Calviño *et al.*, 2010).

Ces résultats soulignent que les communautés microbiennes sont affectées à partir de 1 800 kgCu/ha accumulé dans le sol d'une prairie fortement contaminée, alors que dans les sols viticoles, elles sont altérées dès 200 kgCu/ha, équivalant à 50 mgCu/ha. À cette teneur, le paramètre le plus sensible, la respiration microbienne est alors réduite de moitié (*figure 9*).

Les collemboles

Aucun effet de l'accumulation du cuivre dans les sols n'a été détecté sur les collemboles, même à de fortes teneurs (jusqu'à 11 648 kgCu/ha), sur la survie, la reproduction, l'abondance et la taille des adultes et des juvéniles (Scott-Fordsmand *et al.*, 2000).

DISCUSSION

Quel seuil d'écotoxicité du cuivre pour quel organisme ?

Pour être en accord avec les objectifs de la transition agroécologique, l'utilisation du cuivre par les viticulteurs et les agriculteurs ne doit pas induire d'impacts délétères sur la biodiversité des sols. Étant donné l'importance des questions environnementales en cause, l'évaluation du risque écotoxicologique des composés cupriques doit être scientifique, précise et aboutir à des conclusions génériques. Cette méta-analyse a pu référencer seulement 19 études scientifiques fournissant des données pertinentes sur l'écotoxicité du cuivre pour la biodiversité du sol dans le contexte agricole. La compilation de ces études a permis de répondre aux deux questions suivantes :

- 1- l'impact de la dose de cuivre appliquée comme fongicide, appelé « effet dose appliquée » ;
- 2- l'impact du cuivre accumulé dans le sol au cours du temps, appelé « effet accumulation ».

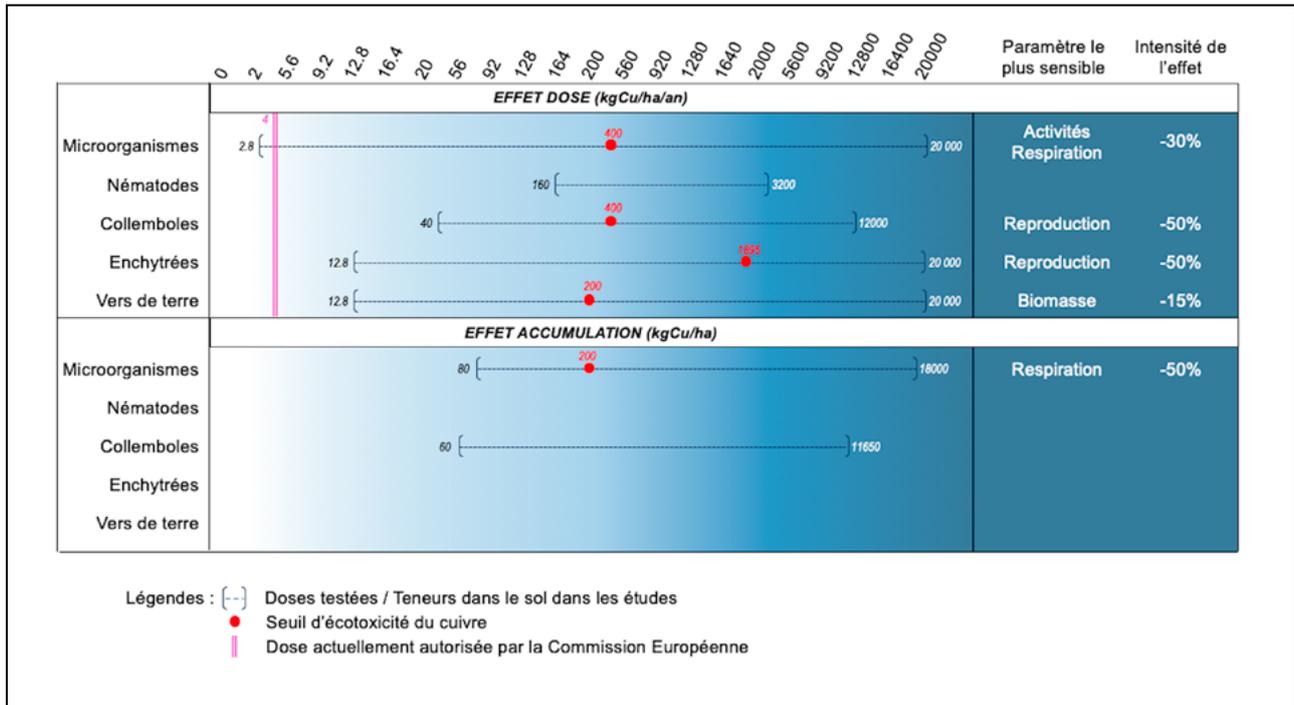
Les doses expérimentalement apportées pour répondre à l'effet dose appliquée se distribuent sur un gradient allant de 2,8 à 20 000 kgCu/ha/an. Malgré cette forte amplitude, 80 % des doses testées sont supérieures ou égales à 200 kgCu/ha/an, soit 30 à 50 fois les doses autorisées en viticulture biologique depuis les années 2000. Peu d'études ont testé des doses inférieures à 20 kgCu/ha/an (*figure 3*). Dans ces conditions expérimentales, notre synthèse montre que la qualité biologique du sol est impactée par le cuivre à partir de 200 kg/ha/an (*figure 10*). Cette dose peut être considérée comme le seuil d'écotoxicité du cuivre, c'est-à-dire la dose minimale appliquée induisant un effet délétère sur les organismes du sol quels qu'ils soient. Ce seuil varie selon le groupe biologique ciblé. Les vers de terre sont les plus sensibles avec un effet délétère sur la biomasse à un seuil de 200 kgCu/ha/an. Les micro-organismes et les collemboles présentent un seuil d'écotoxicité de 400 kgCu/ha/an, et les enchytrées présentent un seuil de 1 895 kgCu/ha/an. La sensibilité des nématodes à un apport de cuivre n'a pas été clairement établie, même pour des doses particulièrement élevées. Il est donc impossible de fixer un seuil d'écotoxicité pour ces organismes. L'écotoxicité du cuivre pour les macro-arthropodes n'est pas renseignée dans la littérature académique.

Il faut cependant garder à l'esprit que l'effet dose appliquée a presque systématiquement été évalué en appliquant une seule dose et en mesurant la réponse des organismes à court terme (généralement moins d'une centaine de jours). Ce protocole expérimental mesure les effets d'une contamination aiguë, alors que dans la réalité viticole, les fongicides cupriques sont la plupart du temps appliqués en très petites doses de façon répétée pendant toute la durée de la croissance végétative, ce qui équivaut à une contamination chronique. Les contaminations chroniques et aiguës sont connues pour avoir des conséquences différentes sur les organismes du sol. Une réponse biologique plus intense et irréversible est généralement observée pour des contaminations aiguës (Ranjard *et al.*, 2006 ; Bressan *et al.*, 2008 ; Karimi *et al.*, 2017) en raison d'un potentiel d'adaptation graduelle moins important et, par conséquent, d'une capacité de résilience réduite pour les communautés biologiques.

Dans l'ensemble, de nombreux groupes et paramètres de la biodiversité des sols restent encore inexplorés et des études supplémentaires ciblant ces organismes sont nécessaires pour approfondir nos connaissances des impacts écotoxicologiques du cuivre (*tableau 1*). De plus, les résultats référencés reposent généralement sur un ou une poignée de sites d'étude et sur une ou 2 espèces modèles pour les collemboles, les enchytrées et les vers de terre, ce qui conduit à des conclusions peu génériques. Malgré ces limites, cette méta-analyse a mis en évidence que l'écotoxicité du cuivre pour la biodiversité du sol a été observée seulement pour des doses égales ou supérieures à 200 kgCu/ha/an dans des conditions de contamination aiguë.

Figure 10 - Synthèse des seuils d'écotoxicité du cuivre pour chaque groupe biologique, c'est-à-dire la dose minimale de cuivre ou la teneur minimale de cuivre dans le sol pour laquelle des effets délétères ont été observés pour chaque groupe.

Figure 10 - Synthesis of the copper toxicity threshold for each soil organisms, i.e. copper minimal doses, and soil contents for which deleterious effects on soil organisms have been recorded.



L'effet de l'accumulation du cuivre évalue la réponse à une contamination chronique et historique comme celles couramment observées dans les sols viticoles (Ballabio *et al.*, 2018). Notre synthèse montre que les teneurs en cuivre accumulées dans le sol sont distribuées sur un gradient entre 60 et 18000 kgCu/ha. Concernant les micro-organismes, les résultats montrent qu'ils sont sensibles dès 200 kgCu/ha, avec une respiration microbienne diminuée d'environ 50 %. Les collemboles sont le seul groupe de la faune du sol à avoir été étudié et ils ne sont pas affectés par le cuivre accumulé jusqu'à des teneurs de 11 650 kg/ha. Aucune donnée n'a été trouvée sur l'impact du cuivre accumulé dans les sols sur les nématodes, les enchytrées, les macro-arthropodes et les vers de terre (figure 10). La part de biodiversité inexplorée est encore plus grande pour l'évaluation de l'effet accumulation que pour celle de l'effet dose appliquée (tableau 1). Sur la base des informations disponibles, cette méta-analyse conclut que l'écotoxicité du cuivre pour les organismes du sol due à son accumulation dans le sol est observée à partir de 200 kgCu/ha.

Résultats complémentaires des expérimentations de la Task Force Cuivre de l'Union Européenne

En complément de toutes les études publiées et incluses dans cette méta-analyse, la Task Force Cuivre de l'UE a mis en place une expérimentation dans des conditions plus réalistes. Bien que n'étant pas publiés dans un journal académique, limitant leur diffusion et leur accès, cette étude et tous les résultats qui en sont issus ont été évalués et approuvés par 3 experts internationaux indépendants. Toutes les informations sont disponibles sur le site internet de l'EFSA (<http://registerofquestions.efsa.europa.eu/roqFrontend/outputLoader?output=EN-1486>). L'étude a été menée en Allemagne par O. Klein et ses collaborateurs entre 2003 et 2013. L'évolution des communautés de vers de terre a été suivie dans le sol de 2 prairies en réponse à 3 doses différentes de cuivre (4,8 et 40 kgCu/ha/an). La dose annuelle a été apportée en 3 passages pendant 10 ans (Draft Renewal Assessment Report prepared according to the Commission Regulation (EU) N° 1107/2009, Copper Compounds Volume 3 – B.9 (AS), page 419). Ces conditions expérimentales sont relativement similaires aux pratiques courantes des viticul-

teurs, mis à part que ces sols de prairie et leur biodiversité sont assez différents de sols viticoles (Dequiedt *et al.*, 2011 ; Terrat *et al.*, 2017 ; Karimi *et al.*, 2018) et qu'ils n'ont jamais été exposés à des apports de cuivre avant l'étude. De plus, les viticulteurs appliquent généralement la dose annuelle en plus de 3 passages. L'étude a montré que pour 4 et 8 kgCu/ha/an, l'abondance et la biomasse totale de vers de terre n'étaient pas impactées, sauf pour 2 dates de mesures sur les 10 années de suivi. Ces effets étaient transitoires et ne persistaient pas dans le temps, suggérant qu'ils pourraient être partiellement dus au climat ou aux conditions d'échantillonnage plutôt qu'à l'apport ou l'accumulation de cuivre. En revanche, à 40 kgCu/ha/an, la contamination chronique a induit une perte significative de la biomasse et de l'abondance des vers de terre après 3 ans (soit après 120 kgCu/ha), touchant majoritairement les vers de terre endogés. Cet impact écotoxicologique était maintenu à long terme dans les deux prairies. Après de multiples analyses statistiques robustes, les auteurs de l'étude ont conclu que les doses de 4 et 8 kgCu/ha/an n'induisent aucun effet observable sur les vers de terre dans de tels sols de prairie. L'Autorité Européenne pour la Sécurité Alimentaire (EFSA) s'est reposée sur cette étude pour conclure à un risque environnemental élevé pour le cuivre. Considérant que les effets transitoires doivent être inclus dans l'évaluation du risque, l'EFSA a statué sur une Concentration Sans Effet Observé (No Observed Effect Concentration, NOEC) de 4 kgCu/ha/an (European Food Safety Authority, 2018).

Quelles recherches futures pour combler le manque de connaissances et fournir des arguments aux décideurs ?

Comme précédemment discuté, les études disponibles à ce jour présentent plusieurs lacunes techniques et expérimentales qui limitent l'utilisation opérationnelle des données. Tous ces points délicats doivent être pris en compte dans les futures expérimentations pour répondre avec précision à la question de l'impact écotoxicologique du cuivre sur les organismes des sols agricoles et viticoles aux doses actuellement appliquées. Par conséquent, ces futures études devraient être en mesure de produire des données pour soutenir de façon robuste les politiques de régulation de l'utilisation du cuivre aux échelles européenne et nationale. Nous proposons ici une liste de points techniques à considérer dans les futures études afin de combler les lacunes dans nos connaissances :

- 1- Les doses testées doivent être comprises entre 2 et 40 kgCu/ha/an, avec plusieurs doses inférieures à 10 kgCu/ha/an.
- 2- Le type d'exposition doit être chronique. La dose annuelle devrait être appliquée en 4 à 12 fois sur 3 mois pour mimer les pratiques réelles.

3- L'échelle temporelle de l'évaluation devrait intégrer un suivi à court (jours ou semaines), moyen (mois) et long terme (années) de la biodiversité du sol. Cela devrait fournir une vue globale de la réponse biologique, depuis la perturbation jusqu'à la résilience ou l'adaptation si elle a lieu. Il sera également possible d'intégrer les variabilités climatiques, l'hétérogénéité d'échantillonnage ou d'autres risques environnementaux dans l'évaluation de l'écotoxicité du cuivre et de hiérarchiser ces différents facteurs.

4- Les expérimentations devraient également inclure différents types de sol, avec ou sans historique de contamination au cuivre, dans différents systèmes agricoles (vergers, vignes, autres). Plus le nombre et la diversité des sols testés seront importants, plus les conclusions seront génériques.

Il est essentiel que les recherches ultérieures soient basées sur différentes approches : expériences en microcosmes, expériences contrôlées *in situ*, réseaux de parcelles. Alors que les expériences en microcosmes fournissent des données sur la reproduction et la mortalité de la faune qui sont difficiles à mesurer *in situ*, les expérimentations de terrain apportent des informations sur la dynamique et la distribution des communautés intégrant l'hétérogénéité environnementale. D'autre part, les études basées sur des réseaux de parcelles constituent une opportunité d'être au plus près des innovations techniques des viticulteurs et de saisir l'hétérogénéité environnementale et agronomique globale d'un système de production réparti sur un territoire. Si le réseau comprend un nombre suffisant de parcelles, les résultats seront génériques et robustes. Cette approche par réseau de parcelles pourrait s'appuyer sur les sciences participatives et permettre de sensibiliser les viticulteurs aux questions environnementales.

CONCLUSION

Globalement, cette méta-analyse révèle, pour la première fois, que le seuil d'écotoxicité du cuivre pour la qualité biologique du sol est de 200 kg/ha/an en cas d'apport de cuivre dans le cadre d'une contamination aiguë. Ce seuil est la première dose pour laquelle un effet délétère a été constaté sur la biodiversité du sol et il est 50 fois supérieur à la dose de 4 kgCu/ha/an autorisée en viticulture par la Commission Européenne. Ainsi l'utilisation du cuivre à la dose de 4 kg/ha/an garantit l'intégrité de la biodiversité du sol sur laquelle reposent les fonctions et les services du sol, essentiels à la durabilité de la production viticole. Par conséquent, l'utilisation du cuivre selon la réglementation en vigueur est en adéquation avec les pratiques agroécologiques en viticulture et en particulier en viticulture biologique. En outre, cette méta-analyse met également en évidence que le cuivre accumulé dans le sol est délétère à partir de 200 kgCu/ha. De nombreux sols viticoles européens sont caractérisés par des teneurs en cuivre similaires ou plus

élevés et devraient être étudiés pour évaluer le risque localement dû à l'utilisation historique du cuivre. Enfin, cette méta-analyse a permis d'identifier de nombreuses lacunes dans la littérature disponible à ce jour. Nous suggérons d'intégrer des doses inférieures à 40 kgCu/ha/an, des conditions de contaminations chroniques, des mesures à long terme et d'augmenter la diversité des sols étudiés dans les futures recherches afin de fournir la réponse la plus précise possible à la question de l'écotoxicité du cuivre pour la biodiversité des sols dans les contextes agricoles et viticoles. Cela permettra de fournir aux différents acteurs des bases scientifiques plus opérationnelles pour la réglementation de l'utilisation du cuivre.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée grâce au soutien financier du consortium de vignerons français composé de: Domaine de Villaine, Champagne Fleury, Domaine de la Romanée Conti, Domaine des Comtes Lafon, Domaine Leflaive, Domaine Jean-Louis Trapet, Domaine Thibault Liger BelAir, Château Palmer, Château La Lagune, Domaine Dujac, Domaine Michel Lafarge, Domaine de la Coulée de Serrant, Domaine Marquis d'Angerville, Champagne Ruppert Leroy, Association des Champagnes biologiques, Château Pédesclaux, Château Latour, Clos de Tart, Les Grands Vignobles en Méditerranée.

BIBLIOGRAPHIE

- Amorim M.J. de B., Römbke J., Schallnaß H., Soares A.M.V.M., 2005 - Effect of Soil Properties and Aging on the Toxicity of Copper for Enchytraeus. *Environ. Toxicol. Chem.*, 24, 1875–1885.
- Ballabio C., Panagos P., Lugato E., Huang J.H., Orgiazzi A., Jones A., *et al.*, 2018 - Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey. *Sci. Total Environ.*, 636, 282–298.
- Bart S., Laurent C., Péry A.R.R., Mouglin C., Pelosi C., 2017 - Differences in sensitivity between earthworms and enchytraeids exposed to two commercial fungicides. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 140, 177–184.
- Bogomolov D.M., Chen S., Parmelee R.W., Subler S., Edwards C.A., 1996 - An ecosystem approach to soil toxicity testing : a study of copper contamination in laboratory soil microcosms. *Appl. Soil Ecol.*, 1393, 95–105.
- Bravin M.N., Marti A.L., Clairrotte M., Hingsinger P., 2009 - Rhizosphere alkalisation - A major driver of copper bioavailability over a broad pH range in an acidic, copper-contaminated soil. *Plant Soil*, 318, 257–268.
- Bressan M., Mouglin C., Dequiedt S., Maron P.A., Lemanceau P., Ranjard L., 2008 - Response of soil bacterial community structure to successive perturbations of different types and intensities. *Environ. Microbiol.*, 10, 2184–2187.
- Brunetto G., Comin J.J., Miotto A., de Moraes M.P., Sete P.B., Schmitt D.E., *et al.*, 2018 - Copper and zinc accumulation, fractionation and migration in vineyard soils from Santa Catarina State, Brazil. *Bragantia*, 77, 141–151.
- Cortet J., Hedde M., 2020 - La faune du sol pour évaluer l'impact des pratiques agricoles et la santé des sols. *Tech. l'Ingénieur*.
- Crowther T.W., van den Hoogen J., Wan J., Mayes M.A., Keiser A.D., Mo L., *et al.*, 2019 - The global soil community and its influence on biogeochemistry. *Science* (80-), 365.
- Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., *et al.*, 2011 - Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 20, 641–652.
- Düring R.A., Hoß T., Gäth S., 2002 - Depth distribution and bioavailability of pollutants in long-term differently tilled soils. *Soil Tillage Res.*, 66, 183–195.
- Ekelund F., Olsson S., Johansen A., 2003 - Changes in the succession and diversity of protozoan and microbial populations in soil spiked with a range of copper concentrations. *Soil Biol. Biochem.*, 35, 1507–1516.
- European Food Safety Authority, 2018 - Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance copper compounds copper(I), copper(II) variants namely copper hydroxide, copper oxychloride, tribasic copper sulfate, copper(I) oxide, Bordeaux mixture. *EFSA J.*, 16, 1–25.
- Fernández-Calviño D., Soler-Rovira P., Polo A., Díaz-Raviña M., Arias-Estévez M., Plaza C., 2010 - Enzyme activities in vineyard soils long-term treated with copper-based fungicides. *Soil Biol. Biochem.*, 42, 2119–2127.
- Helling B., Reinecke S.A., Reinecke A.J., 2000 - Effects of the fungicide copper oxychloride on the growth and reproduction of *Eisenia fetida* (Oligochaeta). *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 46, 108–116.
- Jiang D., Li Q., Liu F., Jiang Y., Liang W., 2007 - Vertical distribution of soil nematodes in an age sequence of Caragana microphylla plantations in the Horqin Sandy Land, Northeast China. *Ecol. Res.*, 22, 49–56.
- Karimi B., Cahurel J.Y., Gontier L., Charlier L., Chovelon M., Mahé H., *et al.*, 2020 - A meta-analysis of the ecotoxicological impact of viticultural practices on soil biodiversity. *Environ. Chem. Lett.*, 18, 1947–1966.
- Karimi B., Maron P.A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Bernard N., Gilbert D., Ranjard L., 2017 - Microbial diversity and ecological networks as indicators of environmental quality. *Environ. Chem. Lett.*
- Karimi B., Terrat S., Dequiedt S., Saby N.P.A., Horrigue W., Lelièvre M., *et al.*, 2018 - Biogeography of soil bacteria and archaea across France. *Sci. Adv.*, 4, 1–14.
- Keiblinger K.M., Schneider M., Gorfer M., Paumann M., Deltedesco E., Berger H., *et al.*, 2018 - Assessment of Cu applications in two contrasting soils—effects on soil microbial activity and the fungal community structure. *Ecotoxicology*, 27, 217–233.
- Korthals G.W., Alexiev A.D., Lexmond T.M., Kammenga J.E., Bongers T., 1996 - Long-term effects of copper and pH on the nematode community in an agroecosystem. *Environ. Toxicol. Chem.*, 15, 979–985.
- Maron P.-A., Ranjard L., 2019 - Qualité écologique des sols. *Tech. l'Ingénieur*.
- Maron P.-A., Sarr A., Kaisermann A., Lévêque J., Mathieu O., Guigue J., *et al.*, 2018 - High Microbial Diversity Promotes Soil Ecosystem Functioning. *Appl. Environ. Microbiol.*, 84, e02738-17.
- Mincarelli L., Tiano L., Craft J., Marcheggiani F., Vischetti C., 2019 - Evaluation of gene expression of different molecular biomarkers of stress response as an effect of copper exposure on the earthworm *Eisenia Andrei*. *Ecotoxicology*, 28, 938–948.
- Nunes I., Jacquiod S., Brejnrod A., Holm P.E., Johansen A., Brandt K.K., *et al.*, 2016 - Coping with copper: legacy effect of copper on potential activity of soil bacteria following a century of exposure. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 92, fwi175.
- OIV, 2019 - 2019 Statistical Report on World Vitiviniculture. 2019 Stat. Rep. *World Vitiviniculture*, 23.
- Ranjard L., Echairi A., Nowak V., Lejon D.P.H., Nouaïm R. & Chaussod R., 2006 - Field and microcosm experiments to evaluate the effects of agricultural Cu treatment on the density and genetic structure of microbial communities in two different soils. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 58, 303–315.
- Romić M., Matijević L., Bakić H. & Romić D., 2014 - Copper accumulation in vineyard soils : distribution, fractionation and bioavailability assessment. *In: Environmental Risk Assessment of Soil Contamination* (ed. Hernandez-Soriano, M.C.). pp. 799–825.

- 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.
- Šalamún P., Brázová T., Miklisová, D. & Hanzelová, V., 2015 - Influence of selected heavy metals (As, Cd, Cr, Cu) on nematode communities in experimental soil microcosm. *Helminthol.*, 52, 341–347.
- Scott-Fordsmand, J.J., Krogh P.H. & Weeks J.M., 2000 - Responses of *Folsomia fimetaria* (Collembola: Isotomidae) To Copper Under Different Soil Copper Contamination Histories in Relation To Risk Assessment. *Environ. Toxicol. Chem.*, 19, 1297.
- Soler-Rovira P., Fernández-Calviño D., Arias-Estévez M., Plaza C. & Polo A., 2013 - Respiration parameters determined by the ISO-17155 method as potential indicators of copper pollution in vineyard soils after long-term fungicide treatment. *Sci. Total Environ.*, 447, 25–31.
- Terrat S., Horrigue, W., Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelièvre M., Nowak V., et al., 2017 - Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *PLoS One*, 12.
- Vázquez-Blanco R., Arias-Estévez M., Bååth E. & Fernández-Calviño D., 2020 - Comparison of Cu salts and commercial Cu based fungicides on toxicity towards microorganisms in soil. *Environ. Pollut.*, 257.
- Vivant, A.L., Garmyn, D., Maron, P.A., Nowak, V. & Piveteau, P., 2013 - Microbial Diversity and Structure Are Drivers of the Biological Barrier Effect against *Listeria monocytogenes* in Soil. *PLoS One*, 8, 1–11.
- Wang Q.Y., Sun J.Y., Xu X.J. & Yu, H.W., 2018 - Integration of chemical and toxicological tools to assess the bioavailability of copper derived from different copper-based fungicides in soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 161, 662–668.
- Wang Q.Y., Zhou D.M. & Cang, L., 2009 - Microbial and enzyme properties of apple orchard soil as affected by long-term application of copper fungicide. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 1504–1509.
- Wyszkowska J., Kucharski M. & Kucharski J., 2010 - Activity of β -glucosidase, arylsulfatase and phosphatases in soil contaminated with copper. *J. Elem.*, 15, 213–226.