

Avis de Soutenance

Monsieur Hugo HENAUT

Biologie

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Réduire les effets du cuivre en viticulture par l'utilisation de coproduits biocarbone pyrolysés

Travaux dirigés par Monsieur Domenico MORABITO

Ecole doctorale : Santé, Sciences Biologiques et Chimie du Vivant - SSBCV

Unité de recherche : P2E - Physiologie, Ecologie et Environnement

Soutenance prévue le mardi 29 septembre 2026 à 14h00

Lieu : Bâtiment C (2ème étage) UFR de Droit Economie Gestion, 13 rue de Blois 45000 Orléans
Salle des thèses

Composition du jury proposé

M. Domenico MORABITO	Professeur des universités	Université d'Orléans	Directeur de thèse
Mme Camille DUMAT	Professeure	INP-AgroToulouse (École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse)	Rapporteure
M. Sylvain BOURGERIE	Maître de conférences	Université d'Orléans	Co-directeur de thèse
M. Grégory CHATEL	Maître de conférences	Université Savoie Mont Blanc	Rapporteur
Mme Astrid AVELLAN	Chargée de recherche	Géosciences Environnement Toulouse	Examinatrice
M. Thierry LEBEAU	Professeur des universités	Université de Nantes	Examineur
Mme Emilie DESTANDAU	Professeure des universités	Université d'Orléans	Examinatrice

Mots-clés : Biochar, Cuivre, Amendements biosourcés, Biohuiles, Pollution des sols, Viticulture durable

Résumé :

L'accumulation du cuivre (Cu) dans les sols viticoles suite à son utilisation pour lutter contre le mildiou de la vigne (*Plasmopara viticola*) pose de nombreux problèmes environnementaux. En particulier, la faune et la microflore du sol sont impactées, tout comme les végétaux, notamment lors de la replantation de jeunes vignes. Dans ce contexte, cette thèse explore l'utilisation de biochar, issu de la pyrolyse de coproduits viticoles (sarments, pépins, marc), dans une perspective d'économie circulaire. Grâce à sa forte porosité, sa grande surface spécifique, ses groupements fonctionnels et sa richesse minérale, le biochar est reconnu pour améliorer la qualité des sols et réduire la mobilité des éléments traces métalliques, tout en présentant des propriétés agronomiques intéressantes et un potentiel de séquestration du carbone, contribuant à l'atténuation du changement climatique. Dans un premier temps, un état de l'art portant sur plus de 110 études consacrées aux biochars issus de coproduits viticoles a été réalisé, en mettant l'accent sur leurs propriétés physicochimiques et leurs usages. Puis, les expérimentations menées dans le cadre de cette thèse ont permis de démontrer par des tests d'adsorption en batch que ces biochars présentent une forte capacité d'adsorption du Cu (jusqu'à 134 mg·g⁻¹ pour le biochar de marc), via divers mécanismes, principalement la précipitation et les interactions π -cations. Associés en mélange au sol, ils réduisent la biodisponibilité du cuivre en diminuant sa concentration dans les eaux poreuses. Cette immobilisation limite la phytotoxicité du Cu, comme observé par des tests effectués à l'aide d'une plante bioindicatrice (*Phaseolus vulgaris*) puis sur de jeunes plants de vigne (*Vitis vinifera*). Les résultats montrent une réduction du Cu, notamment dans les racines (−30 %), qui s'accompagne d'une amélioration de la croissance (hauteur, biomasse) et de l'état physiologique, fortement altérés en présence de Cu. En outre, ces biochars améliorent durablement diverses propriétés physicochimiques du sol (pH, CEC, capacité de rétention en eau) ainsi que des propriétés biologiques (notamment via la stimulation des activités enzymatiques). De plus, des expérimentations de maturation, menées à diverses échelles temporelles (jusqu'à un an) et selon plusieurs dispositifs (colonnes, systèmes en sandwich, mélanges) montrent que les biochars conservent leur capacité à immobiliser le cuivre dans les sols viticoles, malgré une diminution de leur efficacité d'adsorption (de −19 à −37 %), tout en améliorant les propriétés agronomiques et biologiques des sols. Au final, le biochar de marc se distingue particulièrement ce qui a conduit à tester différentes modifications post-pyrolyse (p. ex., apport de calcium, imprégnation bactérienne), avec des résultats contrastés. En outre, son application en bioaugmentation, combinée à des bactéries

cuprorésistantes isolées de sols viticoles et présentant des traits bénéfiques à la croissance des plantes, a permis d'atténuer plus efficacement les effets de la contamination au cuivre sur *P. vulgaris* que les applications séparées. En parallèle, les biohuiles (produits secondaires de la pyrolyse de sarments) et leurs différentes fractions ont fait l'objet d'études visant à évaluer leurs propriétés biologiques. Les résultats mettent en évidence leurs activités antibactériennes (sur souches modèles), antifongiques (sur levures) et répulsives (sur le puceron *Acyrtosiphon pisum*), ainsi qu'une influence variable sur la croissance des plantes. Cette thèse démontre l'intérêt de valoriser les coproduits viticoles, en particulier le marc de raisin, pour produire du biochar capable de répondre aux effets de la contamination cuprique. Les perspectives envisagées incluent l'étude d'autres coproduits viticoles, la validation en conditions réelles au vignoble ainsi que l'évaluation du potentiel des biohuiles sur des maladies spécifiques de la vigne pour réduire l'usage des traitements au cuivre.

Summary:

The accumulation of copper (Cu) in vineyard soils due to its use against downy mildew (*Plasmopara viticola*) raises significant environmental concerns. Soil fauna and microbial communities are particularly affected, as are plants, especially young vines during replanting. In addition, copper leaching into aquatic ecosystems is frequently observed, as vineyards are often located on sloping terrain. In this context, this thesis investigates the use of a material derived from the pyrolysis of viticultural by-products (prunings, grape seeds, grape marc), within a circular economy approach, to mitigate this issue. Owing to its porosity, high specific surface area, functional groups, and mineral content, biochar is widely recognized for its ability to improve soil quality and reduce the impact of trace metals through both direct (adsorption) and indirect mechanisms. It also provides agronomic benefits and contributes to carbon sequestration, thereby helping to mitigate climate change. First, the current state of knowledge on biochars produced from viticultural by-products (>110 studies) was compiled, with a focus on their physicochemical properties and applications. Under batch test conditions, these biochars can adsorb Cu up to 134 mg·g⁻¹ for marc-derived biochar, through several mechanisms, primarily precipitation and cation- π interactions. When applied to soils, they decrease copper bioavailability by lowering its concentration in pore water and enhancing its retention within the soil matrix (up to 98% for marc biochar at 4%). This results in reduced Cu phytotoxicity, initially demonstrated using a bioindicator (*Phaseolus vulgaris*), and subsequently confirmed in young vine plants (*Vitis vinifera*). Copper concentrations, particularly in roots, decreased (~30%), leading to improved growth (height, dry biomass) and physiological status, both of which are strongly impaired under copper stress. In addition, these biochars enhance several long-term soil properties, including physicochemical parameters (pH, CEC, water retention capacity) and biological functions (enzymatic activities related to key biogeochemical cycles). Across a range of ageing experiments conducted over different time scales (up to one year) and using various experimental setups (column, sandwich, mixture), biochars remained effective at immobilizing copper in vineyard soils, despite a reduction in adsorption capacity (19–37%). At the same time, they continued to improve soil agronomic and biological properties. Marc-derived biochar proved particularly effective, prompting further investigation into post-pyrolysis modifications (e.g., calcium addition, bacterial impregnation), which yielded contrasting results. Its combined application with copper-resistant, plant growth-promoting bacteria isolated from vineyard soils, as part of a bioaugmentation strategy, more effectively mitigated copper toxicity in *Phaseolus vulgaris* than when applied separately. In parallel, bio-oils, the secondary products of pyrolysis, as well as fractions obtained through their fractionation (in the case of pruning-derived bio-oil), were successfully evaluated for their antibacterial activity against laboratory strains, antifungal effects on yeasts, repellent activity against the aphid (*Acyrtosiphon pisum*), and their variable effects on plant growth. Overall, this thesis provides strong experimental evidence supporting the use of viticultural by-products, particularly grape marc, for biochar production to address copper contamination in vineyard soils. Future work should explore other viticultural residues and include field-scale experiments. In addition, assessing the effects of bio-oils on specific vine diseases could offer opportunities to partially replace copper-based treatments.