

Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ?

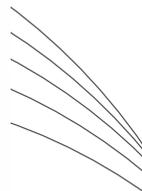
Expertise scientifique collective

Didier Andrivon, Isabelle Savini, coord.

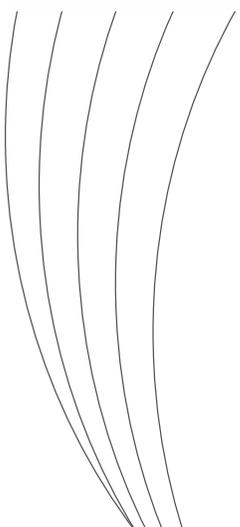


Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ?

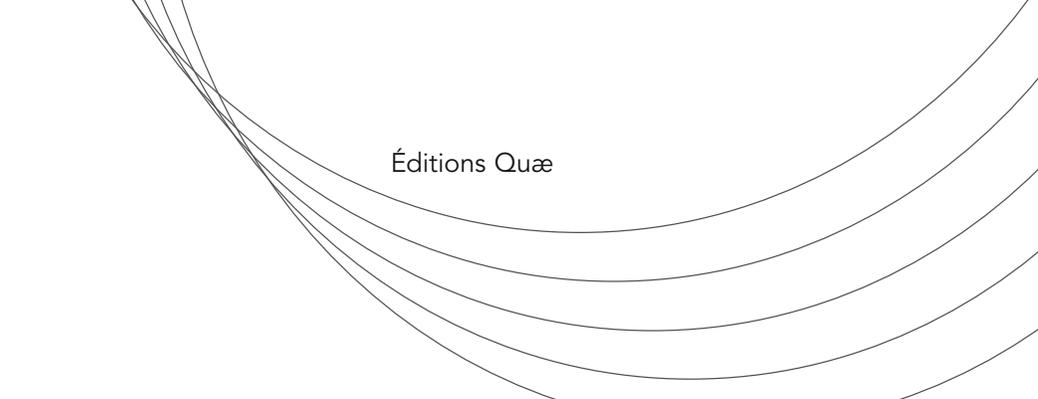
Expertise scientifique collective



Didier Andrivon, Isabelle Savini, coord.



Éditions Quæ



Expertise réalisée à la demande du métaprogramme « Gestion durable de la santé des cultures » de l'Inra et de l'Institut technique de l'agriculture biologique.

Le rapport d'expertise, source de cette synthèse, a été élaboré par les experts scientifiques sans condition d'approbation préalable par les commanditaires ou l'Inra. La synthèse a été validée par les auteurs du rapport.

Ces documents sont disponibles sur le site web institutionnel de l'Inra (www.inra.fr).

Responsable scientifique :

Didier Andrivon, Inra, département Santé des plantes et environnement, Rennes

Suivi du projet, rédaction et coordination éditoriale :

Isabelle Savini, Inra, Délégation à l'expertise, à la prospective et aux études (DEPE)

Contacts :

Didier Andrivon : didier.andrivon@inra.fr

Isabelle Savini : isabelle.savini@inra.fr

Directeur de la publication :

Guy Richard, Inra, Directeur de la Délégation à l'expertise, à la prospective et aux études (DEPE)

Pour citer cet ouvrage :

Andrivon D., Bardin M., Bertrand C., Brun L., Daire X., Fabre F., Gary C., Montarry J., Nicot P., Reignault P., Tamm L., Savini I., 2019. *Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ?* Éditions Quæ, 126 p.

En couverture : crédit photo wikimedia – Pg1945.

Éditions Quæ
RD 10, 78026 Versailles Cedex
www.quae.com
© Éditions Quæ, 2019

ISBN : 978-2-7592-2997-0 eISBN : 978-2-7592-2998-7 xISBN : 978-2-7592-2999-4

Le Code de la propriété intellectuelle interdit la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Le non-respect de cette disposition met en danger l'édition, notamment scientifique, et est sanctionné pénalement. Toute reproduction, même partielle, du présent ouvrage est interdite sans autorisation du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20 rue des Grands-Augustins, Paris 6^e.

Table des matières

Introduction	5
1. Éléments de contexte	9
Le cuivre : propriétés et utilisations	9
Les alternatives au cuivre : nature et réglementation	19
2. Les méthodes alternatives à l'usage du cuivre	25
Les préparations naturelles biocides	25
Les agents microbiologiques de biocontrôle	33
Les résistances variétales	41
Les stimulateurs des défenses naturelles des plantes	61
L'isothérapie, les préparations homéopathiques et biodynamiques	70
3. La gestion agronomique des risques phytosanitaires	75
Les méthodes prophylactiques	75
La protection physique contre les infections	80
La conduite des plantes et des couverts	82
Éléments de conclusion	84
4. L'insertion des leviers alternatifs dans des systèmes intégrés de protection	87
Les évaluations et comparaisons de systèmes de culture	88
Les stratégies d'acteurs, la mise à disposition et l'acceptabilité des innovations	95
Éléments de conclusion	98
5. Conclusions générales	101
Une masse considérable d'information disponible...	101
...Mais très inégalement répartie entre les champs de recherche et de développement	101
Des solutions individuelles à effets partiels...	102

...Mais encore insuffisamment insérées au sein de systèmes intégrés de protection des plantes	104
Sepasser du cuivre : des marges de manœuvre considérables	105
Plusieurs domaines insuffisamment explorés en recherche, mais cruciaux dans une perspective d'élimination complète du cuivre	110
Des enseignements à tirer depuis et vers les systèmes dits « conventionnels »	111
Sélection bibliographique	113
Annexe. Le corpus bibliographique analysé	119
Auteurs et éditeurs de l'expertise	123

Introduction

Des utilisations importantes du cuivre, soumises à des restrictions croissantes

DEPUIS LA FIN DU XIX^e SIÈCLE ET LA MISE AU POINT DE LA BOUILLIE BORDELAISE, le cuivre est un élément majeur des méthodes de protection des cultures contre diverses maladies (mildious, certaines mycoses et la plupart des bactérioses), en particulier sur vigne, productions fruitières et cultures légumières. S'il reste aujourd'hui largement employé dans diverses formes d'agriculture dites « conventionnelles », aux côtés d'autres pesticides, le cuivre joue un rôle crucial dans les systèmes agrobiologiques, car c'est actuellement la seule substance active homologuée en agriculture biologique (AB) ayant à la fois un effet biocide fort et une large gamme d'action.

Si la plupart des utilisations du cuivre sont justifiées par son efficacité biologique, elles posent des problèmes écotoxicologiques (risques avérés pour les populations microbiennes du sol, les vers de terre, certains organismes aquatiques et des auxiliaires des cultures). La mise en évidence de ces impacts environnementaux du cuivre a motivé des restrictions réglementaires d'usage (plafonnement des doses applicables par hectare et par an), et même son interdiction comme pesticide dans certains pays européens (Pays-Bas, Danemark), ce qui génère des distorsions de concurrence entre pays.

Les alternatives à l'emploi du cuivre : des travaux nombreux... nécessitant une synthèse critique des connaissances

CES RESTRICTIONS CROISSANTES DES DOSES DE CUIVRE AUTORISÉES¹ ainsi que la menace persistante d'une interdiction totale à l'échelle européenne posent des difficultés aux producteurs, et plus particulièrement aux agriculteurs en AB, qui ne peuvent recourir à des pesticides de synthèse. En découle une demande récurrente d'« alternatives » au cuivre adressée à la recherche, qui a émergé il y a une vingtaine d'années mais reste inscrite dans les priorités de recherche récentes (par exemple celles figurant dans le plan français de développement de l'AB « Ambition Bio 2017 »).

Cette question des « alternatives » au cuivre a donc fait l'objet de nombreux travaux de recherche et de recherche-développement (R&D), dont trois programmes européens majeurs depuis le début des années 2000, et de beaucoup d'actions de recherche d'envergure plus limitée partout dans le monde. Il existe également de nombreux essais de solutions alternatives, conduits par les centres techniques et les producteurs, pour

1. En novembre 2018 (après la parution de la présente expertise), la Commission européenne a voté la réautorisation pour sept ans des composés issus du cuivre en agriculture, en plafonnant cet usage, à compter du 1^{er} février 2019, à 28 kg/ha sur sept ans, soit 4 kg/ha/an en moyenne, contre 6 kg/ha/an auparavant.

évaluer la pertinence technique de telle ou telle molécule ou préparation. Des connaissances ont également été acquises sur les mécanismes biologiques sous-jacents (induction de défense des plantes contre les bioagresseurs, écologie des pathogènes et des agents de lutte biologique...).

Un grand nombre de références techniques a ainsi été accumulé, mais l'adoption en pratique de ces possibles innovations reste limitée. De fait, les résultats restent dispersés, souvent fragmentaires, et peu accessibles. Aucune synthèse complète et critique de ces travaux n'existe en effet à ce jour. Scientifiques et responsables techniques ne disposent donc d'aucun « état de l'art » consolidé, évaluant scientifiquement les efficacités et les limites de ces solutions, pour identifier les priorités de recherche et fonder des préconisations pour la mise en œuvre pratique de ces solutions.

L'intérêt d'une expertise scientifique collective, et son cadrage

DANS CE CONTEXTE, LE COMITÉ INTERNE EN AGRICULTURE BIOLOGIQUE (CIAB) de l'Inra, à l'occasion de rencontres avec les porteurs d'enjeux, a suggéré la conduite d'une analyse critique de l'ensemble des acquis disponibles et validés sur le sujet. Se saisissant de cette proposition, l'Institut technique de l'agriculture biologique (ITAB) et le métaprogramme « Gestion durable de la santé des cultures » (SMaCH, *Sustainable Management of Crop Health*) de l'Inra ont, conjointement, commandé une expertise scientifique collective (ESCo) visant à réaliser une synthèse pluridisciplinaire et critique des connaissances scientifiques et techniques disponibles sur ce sujet. Ce type d'exercice est conduit à l'Inra par la Délégation à l'expertise, à la prospective et aux études (DEPE), selon des règles et procédures de travail définies (encadré 1) : l'analyse de la bibliographie internationale (prioritairement académique) est réalisée par un collectif d'experts scientifiques (chercheurs des organismes publics de recherche et d'enseignement supérieur).

Le périmètre de l'ESCo couvre :

- les différentes solutions techniques possibles : traitements à base de substances d'origine naturelle à effet biocide et/ou stimulant les défenses naturelles des plantes, emploi d'agents microbiologiques de lutte, utilisation de variétés résistantes aux maladies, conduites des peuplements cultivés à visée prophylactique ;
- l'intégration de ces solutions individuelles au sein de systèmes de production/protection intégrée ;
- les freins et conditions nécessaires à l'adoption et à la diffusion des méthodes alternatives.

L'ESCo considère *a priori* tous les « usages » (couple culture × agent pathogène) homologués pour les traitements à base de cuivre, en mettant l'accent sur quelques usages « majeurs » (par l'importance économique des cultures concernées), qui ont fait l'objet du plus grand nombre de travaux.

L'objectif de l'ESCo est de produire une synthèse des connaissances *publiées* utilisable par les différents acteurs concernés, et donc susceptible d'orienter leurs choix, en matière

d'actions de recherche ou de R&D, d'incitations visant à favoriser l'émergence d'itinéraires techniques « zéro cuivre » ou « très bas cuivre ». L'ESCO apporte un éclairage, mais ne formule en revanche pas de recommandations.

L'analyse s'est focalisée sur le cas de l'AB, qui est à la fois le mode de production le plus dépendant de l'utilisation de cuivre et le cadre dans lequel ont été produites beaucoup des références disponibles. Cependant, ses résultats intéressent toutes les formes d'agriculture qui cherchent à réduire leur consommation de pesticides de synthèse.

Statut et plan du document

LE PRÉSENT DOCUMENT EST UNE SYNTHÈSE DU RAPPORT produit par le collectif d'experts (disponible sur le site de l'Inra). Il ne mentionne que quelques sources bibliographiques majeures, l'ensemble des références bibliographiques mobilisées figurant dans le rapport d'expertise.

Le premier chapitre rappelle des éléments de contexte — qui ne font pas l'objet du travail scientifique d'expertise. Ces données de cadrage concernent le cuivre (ses usages homologués, les restrictions réglementaires d'utilisation et leur motivation, les utilisations effectives en production) et les alternatives au cuivre (la gamme des techniques mobilisables, les règles générales d'homologation et d'autorisation d'emploi, les méthodes d'évaluation). Il précise les sources documentaires disponibles concernant ces alternatives.

Le deuxième chapitre passe en revue les différents leviers techniques disponibles pour lutter directement contre l'agent pathogène et/ou indirectement en augmentant la résistance de la culture : préparations naturelles biocides, agents microbiologiques de biocontrôle, résistance génétique des plantes, stimulateurs de défense naturelle des plantes, homéopathie et isothérapie...

Le troisième chapitre est consacré aux moyens agronomiques visant à limiter les risques phytosanitaires : mesures prophylactiques pour réduire les sources de contamination (élimination des plantes et résidus de culture infectés, par exemple), protection physique contre les infections (bâches anti-pluie et anti-grêle, par exemple), modes de conduite des plantes ou des couverts (taille des arbres fruitiers, couverts en mélanges, par exemple) visant à créer des conditions défavorables au développement ou à la propagation des épidémies.

Le quatrième chapitre examine les données disponibles à l'échelle des systèmes de culture, ainsi que la question des freins à la production et à l'adoption des innovations qui constituent ces systèmes.

Un dernier chapitre de conclusions tire les enseignements des analyses, en matière de disponibilité actuelle des méthodes alternatives au cuivre, de possibilités de mise en œuvre, et de besoins de recherche. Il propose en outre des prototypes (théoriques à ce stade) de systèmes intégrés de protection envisageables pour les trois principaux usages du cuivre.

Encadré 1. L'expertise scientifique collective (ESCo).

L'ESCo est une activité d'expertise institutionnelle, régie par la charte nationale de l'expertise à laquelle l'Inra a adhéré en 2011. Elle se définit comme une activité d'analyse et d'assemblage de connaissances produites dans des champs très divers du savoir, et pertinentes pour éclairer l'action publique. Cet état des connaissances le plus complet possible, et son analyse, ne fournissent ni avis, ni recommandations, ni réponses directes aux questions qui se posent aux gestionnaires : il a pour seul objet de fournir un état critique des acquis scientifiquement avérés, mais aussi des questions controversées ou des champs mal couverts par l'activité scientifique, sur lequel les décideurs pourront s'appuyer pour établir leurs choix d'action.

L'analyse est conduite par un collectif pluridisciplinaire d'experts chercheurs d'origines institutionnelles diverses. Pour l'ESCo « Cuivre », une dizaine d'experts issus de différents organismes ont été mobilisés. Leur travail s'est appuyé sur un corpus bibliographique de près de 900 références, composé essentiellement d'articles scientifiques, complétés par des documents plus techniques. Cet exercice se conclut par la production d'un rapport qui rassemble les contributions des experts, d'une synthèse à l'usage notamment des décideurs, et d'un résumé à diffusion large.

1. Éléments de contexte

Le cuivre : propriétés et utilisations

■ Propriétés biologiques et profils toxicologique et écotoxicologique du cuivre

Le cuivre est un élément important pour les systèmes biologiques. Constituant vital impliqué dans le transport des électrons et donc dans le métabolisme énergétique, il est aussi doté de propriétés antimicrobiennes. Un consensus se dégage aujourd'hui pour penser que la gestion par l'hôte de l'homéostasie du cuivre, entre composant vital et poison cellulaire, est utilisée par de nombreux organismes pour réguler les infections microbiennes. Ces propriétés antimicrobiennes du cuivre génèrent diverses applications en santé humaine, animale et végétale.

Les formulations à base de cuivre

Pour ces utilisations sanitaires, le cuivre est principalement employé sous **forme ionique**, dans des formulations à base de sels de cuivre (sulfate ou hydroxyde) combinés à divers adjuvants. La bouillie bordelaise (sulfate de cuivre + chaux) est emblématique de ce type de formulation. Ces produits sont généralement utilisés en pulvérisation sur les parties aériennes de la culture ; ils peuvent aussi être employés en traitement des semences (pour les céréales) ou en application locale (badigeon sur les plaies des arbres). Les mécanismes précis d'action biocide du cuivre sur les micro-organismes restent à ce jour incomplètement élucidés, mais plusieurs hypothèses (fuites d'électrolytes *via* la membrane cellulaire, stress oxydant, perturbation de la balance ionique, voire chélation sur les sites actifs de protéines bloquant leur fonctionnement normal) ont pu être avancées.

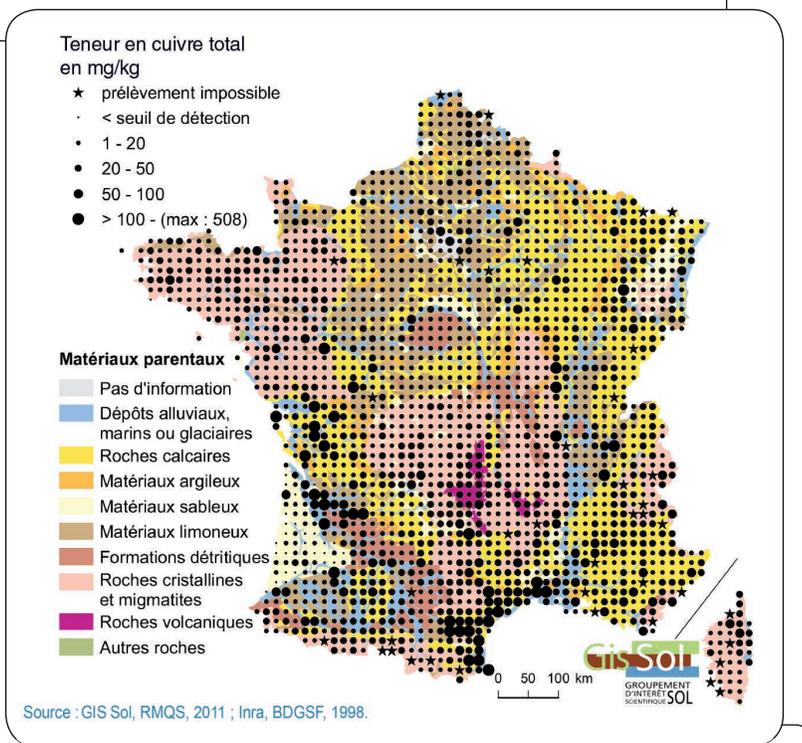
Plus récemment, sont apparus des emplois du cuivre sous **forme de nanoparticules** à base d'oxydes de cuivre (nano-CuO et nano-CuCO₃), qui peuvent être incorporées à différents supports (comme les textiles). Leur utilisation comme biocides pour le traitement des bois et des produits dérivés du bois, contre les champignons et insectes responsables de biodégradation, se développe.

L'accumulation dans les sols

La concentration en cuivre varie de 3 à 100 mg/kg dans les sols naturels, selon le substrat sous-jacent et le type de sol, et entre 5 et 30-45 mg/kg dans les sols agricoles non pollués. Dans ceux-ci, la teneur en cuivre de la solution du sol est généralement très basse (de l'ordre de 1 à 10 µm selon les types de sols), une fraction importante du cuivre étant retenue sur les matrices argilo-humiques.

Les activités humaines, et en particulier l'application répétée de pesticides à base de cuivre, sont la principale source de pollution cuivrique des sols agricoles, où elles causent une accumulation parfois massive de cet élément dans les horizons superficiels (figure 1.1). En Europe, l'application quasi ininterrompue de bouillie bordelaise pour lutter contre le mildiou a ainsi très fortement accru les teneurs en cuivre des sols viticoles, jusqu'à des valeurs pouvant atteindre 200, voire 500 mg/kg.

Figure 1.1. Les teneurs en cuivre des horizons de surface (0-30 cm) des sols de France.



Source : GIS Sol, 2011. *L'état des sols de France*, Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p.

La phytotoxicité pour les cultures

Des concentrations excédentaires en cuivre ont des effets nocifs reconnus sur la croissance et le développement des systèmes aérien et racinaire de la plupart des plantes, dont elles réduisent la biomasse totale. Certaines espèces ou familles, en particulier les légumineuses, la vigne, le houblon ou les céréales, sont particulièrement affectées.

La toxicité du cuivre est directement reliée à la biodisponibilité des ions cuivriques. Les concentrations médianes toxiques pour les plantes sont de seulement 2 μm en solution nutritive. Une part importante de l'effet toxique provient de l'inhibition de la photosynthèse et de la dégradation des chloroplastes, se traduisant par une chlorose plus ou moins sévère. Perturbant le métabolisme oxydatif de la plante, le cuivre en excès induit également les défenses générales de la plante, qui ont un coût métabolique.

Les applications de cuivre ont aussi une incidence sur la composition et donc la qualité des produits récoltés. Ainsi, par exemple, elles réduisent la teneur en polyphénols et donc les propriétés antioxydantes des feuilles d'olivier, et modifient la concentration et l'équilibre en composés aromatiques des cônes de houblon.

Des travaux scientifiques conduits dans les années 1990 sur différentes espèces végétales occupant des sites miniers fortement contaminés ont établi qu'il existait chez ces espèces une base génétique exploitable pour accroître la tolérance des végétaux à des excès de métaux lourds, et exploitable en bioremédiation de sols pollués. À notre connaissance, cette capacité de tolérance au cuivre n'a toutefois pas fait l'objet de sélection par les obtenteurs de variétés chez les espèces d'intérêt agricole.

L'écotoxicité

Les effets délétères d'excès en cuivre sur les communautés microbiennes des sols semblent bien établis. C'est d'ailleurs du fait de ses effets antimicrobiens que le cuivre est employé en agriculture. Champignons et bactéries étant souvent impliqués dans les chaînes trophiques et le bouclage des cycles biogéochimiques, il n'est donc guère surprenant que la perturbation de ces communautés microbiennes dans les sols puisse conduire à un appauvrissement des ressources localement disponibles pour d'autres organismes consommateurs.

La toxicité du cuivre pour certaines composantes de la faune du sol, comme le collembole *Folsomia candida*, est également bien établie. Les impacts sont plus controversés pour d'autres espèces indicatrices, en particulier les vers de terre. Les estimations des concentrations de cuivre létales pour les vers adultes diffèrent : certains travaux montrent des mortalités significatives pour des concentrations de 150 mg/kg de sol, alors que d'autres ne détectent aucun effet à ces teneurs. Le cuivre semble avoir une faible toxicité aiguë pour l'espèce-test de ver de terre *Eisenia foetida*, avec des concentrations létales 50 % (CL 50) supérieures à 5 500 mg/kg de sol sec en conditions de laboratoire. À des teneurs plus faibles, une toxicité chronique pour les vers de terre est souvent observée : retard à la maturité sexuelle, diminution du nombre de cocons et du taux d'éclosion. De plus, des doses même sans impact mesurable sur ces paramètres du cycle de vie ont des effets notables sur la physiologie des vers. Il est donc raisonnable de penser que les pollutions cupriques des sols ont des effets chroniques de long terme sur la dynamique des populations de vers de terre et d'autres composantes de la faune des sols importantes pour l'entretien des structures de ces sols et le bouclage des cycles biogéochimiques. Enfin, les applications de cuivre sont toxiques pour des espèces fongiques utilisées comme agents de biocontrôle (par exemple *Beauveria bassiana*, employé contre des insectes ravageurs).

Tableau 1.1. Usages actuels homologués du cuivre en France
(sources : base de données E-Phy et Guide ITAB, 2017).

Culture	Maladies/agents pathogènes	
	Bactérioses	Maladies fongiques
Agrumes	<i>Xanthomonas axonopodis</i> pv. <i>citri</i> et <i>citrumelo</i> , <i>X. citri</i> subsp. <i>citri</i>	
Arbres et arbustes		Maladies diverses
Cerisier	<i>Agrobacterium tumefaciens</i> <i>Pseudomonas</i>	<i>Coryneum</i> et <i>Polystigma</i>
Fruits à coque (noyer, noisetier, amandier)	<i>Pseudomonas avellanae</i> et <i>P. syringae</i> pv. <i>coryli</i> <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>juglandis</i>	
Kiwi	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>actinidiae</i>	
Olivier	Chancre (<i>Pseudomonas savastanoi</i>)	Maladie de l'œil de paon, <i>Fusicoccum</i>
Pêcher (+ abricotier)	<i>Xanthomonas arboricola</i> pv. <i>pruni</i> <i>Pseudomonas</i>	Cloque(s) <i>Coryneum</i> et <i>Polystigma</i>
Pommier (+ poirier, cognassier, nashi)	<i>Pseudomonas</i>	Chancre européen (<i>Nectria galligena</i>) Maladies du feuillage Tavelure (<i>Venturia inaequalis</i>)
Prunier	Bactérioses	Tavelure(s) Cloque
Cassissier		Maladies du feuillage
Framboisier		Maladies du feuillage
Vigne	Broussins (<i>Agrobacterium vitis</i>)	Excoriose (<i>Phomopsis viticola</i>) Mildiou (<i>Plasmopara viticola</i>)
Blé		Champignons autres que pythiacées [traitement des semences] : pourriture (<i>Bipolaris sorokiniana</i>), piétin-échaudage (<i>Gaeumannomyces graminis</i>), fusarioses (<i>Fusarium graminearum</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>Microdochium nivale</i>)
Seigle		Champignons autres que pythiacées [traitement des semences] : fusarioses (<i>Microdochium nivale</i> , <i>Fusarium</i> sp.)
Pomme de terre		Mildiou(s) : <i>Phytophthora infestans</i>
Artichaut	Bactérioses	Mildiou(s)
Carotte		Champignons (pythiacées)
Céleris	Bactérioses	
Chicorées – production de racines	Bactérioses	
Chicorées – production de chicons	Bactérioses [traitement des semences et plants]	
Choux	<i>Pseudomonas fluorescens</i> (brocoli) <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>campestris</i>	Mildiou(s)

Tableau 1.1. Suite.

	Culture	Maladies/agents pathogènes	
		Bactérioses	Maladies fongiques
Cultures maraîchères	Concombre (+ cornichon, courgette)		Mildiou
	Fraisier	Bactérioses	Maladies des taches brunes
	Haricots	Bactérioses	
	Houblon		Mildiou(s)
	Laitue	Bactérioses	Mildiou(s)
	Melon	<i>Acidovorax citruli</i> <i>Xanthomonas campestris</i> pv. <i>cucurbitae</i>	Mildiou
	Oignon	<i>Xanthomonas axonopodis</i> pv. <i>allii</i>	Mildiou(s)
	Poireau	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>porri</i>	Mildiou(s)
	Tomate	<i>Pseudomonas syringae</i> <i>Clavibacter michiganensis</i> <i>Erwinia chrysanthemi</i> <i>Ralstonia</i> Nombreuses <i>Xanthomonas</i>	Mildiou(s) : <i>Phytophthora infestans</i>
	Usages divers	Plantes d'intérieur et de balcon	
Porte-graine			Maladies diverses
Porte-graine – Betteraves industrielle et fourragère			Mildiou(s)
Porte-graine – PPAMC*, florales et potagères			Mildiou et rouille blanche Rouille(s)
PPAMC		Bactérioses	Maladies fongiques (mildiou)
Rosier			Chancre à champignons
Traitements généraux			Protection des plaies [traitement des troncs et branches]

* PPAMC : plantes à parfum, aromatiques, médicinales et condimentaires.
Entre crochets : les modes d'application autres que le traitement des parties aériennes.

Les **nanoparticules** contenant du cuivre s'avèrent également toxiques pour le système plante-sol, sans qu'il soit encore clair si cette toxicité est liée aux nanoparticules elles-mêmes ou au relargage d'ions cuivrées. Les effets sur les plantes sont similaires à ceux d'une hyperaccumulation d'ions dans le sol : forte réduction de croissance des plantes exposées et modification de la balance ionique des tissus végétaux. Les effets sur le compartiment microbien des sols (généralement attribués à la libération d'ions cuivrées) restent encore

peu caractérisés, mais ils sont avérés : réductions de la diversité microbienne, de composantes des communautés bactériennes telluriques favorables à la croissance des plantes, ou de l'assimilation du fer par les végétaux et les microbes. Par ailleurs, il semble que ces nanoparticules affectent fortement d'autres compartiments environnementaux, en particulier les milieux aquatiques : poissons, crustacés et algues paraissent en effet plus sensibles que les bactéries du sol à la toxicité des nanoparticules à base d'oxydes de cuivre.

■ Les utilisations du cuivre en protection des cultures

Les usages homologués

Le cuivre est homologué en protection des plantes contre diverses maladies, en particulier les mildious, différentes mycoses, mais aussi diverses bactérioses, en particulier sur vigne, productions fruitières et cultures légumières (tableau 1.1 et encadré 1.1).

- En **cultures pérennes**, les usages homologués du cuivre concernent des maladies fongiques et des bactérioses qui affectent la vigne et des cultures de fruits à pépins, à noyau ou à coque. Des applications de cuivre sont parfois également réalisées contre des maladies sur lesquelles ces produits ne sont pas homologués, notamment la moniliose des fleurs de l'abricotier ou le *black rot* de la vigne.
- En **cultures maraîchères**, le cuivre est également homologué contre des maladies fongiques et des bactérioses, pour une douzaine de cultures appartenant à diverses familles botaniques.
- En **grandes cultures**, les usages homologués du cuivre sont limités à la lutte contre le mildiou de la pomme de terre, et contre quelques maladies fongiques du blé et du seigle transmises par les semences.
- Enfin, le cuivre est homologué contre diverses maladies fongiques qui affectent des plantes à parfum, aromatiques et médicinales (PPAM), des espèces ornementales et des cultures porte-graine, ou qui se développent sur les plaies du bois.

La dose maximale d'homologation des préparations à base de cuivre est actuellement de 6 kg de cuivre métal/ha/an. Les doses préconisées par le conseil technique aux producteurs peuvent être sensiblement inférieures à cette limite maximale.

Les agents pathogènes ciblés

Les micro-organismes pathogènes ciblés par les usages phytosanitaires du cuivre appartiennent à trois grands groupes, dont la biologie détermine les conditions de développement de la maladie et les moyens de lutte applicables. Ce sont :

- des **ascomycètes** (tavelure du pommier, par exemple), champignons qui présentent à la fois une reproduction sexuée (produisant des périthèces qui se conservent en hiver dans les feuilles mortes infectées, et d'où sortiront des ascospores responsables de l'infection primaire au printemps) et une reproduction asexuée (produisant sur les organes aériens de la plante des conidies, dont la dissémination assure les infections secondaires jusqu'à l'automne) ;

- des **oomycètes** (mildious), longtemps classés comme groupe proche des champignons, dont ils se distinguent par des hyphes non cloisonnés, un génome diploïde et la présence de spores nageuses (zoospores), mais qui présentent un cycle biologique similaire ;
- des **bactéries**, organismes procaryotes et à multiplication très majoritairement asexuée, et pénétrant dans la plante le plus souvent par des ouvertures naturelles (stomates, lenticelles, blessures) et non *via* des structures spécialisées.

Encadré 1.1. Quelques usages majeurs du cuivre.

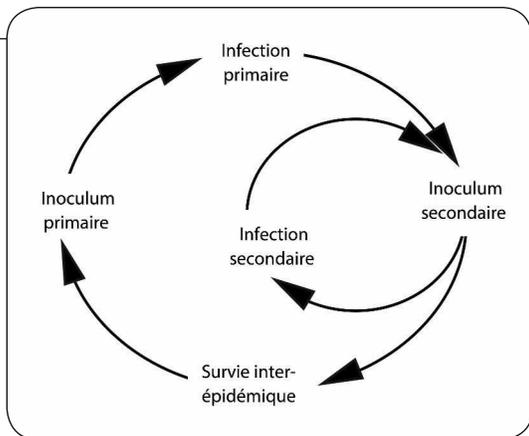
Certains usages du cuivre, notamment en AB, peuvent être considérés comme majeurs, par les surfaces et le poids économique de la culture concernée, les pertes de récolte occasionnées par les maladies visées et/ou les quantités de cuivre épandues. Ils font de ce fait l'objet du plus grand nombre de recherches et d'essais techniques.

- Le **mildiou de la vigne**, dû à l'oomycète *Plasmopara viticola*, est l'une des deux principales maladies (avec l'oïdium) de cette culture. Très dommageable, en particulier dans les régions à climat océanique, son fort potentiel épidémique impose une protection de très haute efficacité, faute de quoi la récolte peut être sévèrement affectée, voire entièrement détruite. La lutte contre le mildiou nécessite donc, en cas d'utilisation de produits de contact comme le cuivre et compte tenu de la forte sensibilité de la plupart des cépages, des applications nombreuses (jusqu'à une quinzaine par an). Les vignobles représentent de l'ordre de 782 700 ha en France (Agreste, 2016).
- La **tavelure du pommier**, causée par le champignon ascomycète *Venturia inaequalis*, est une maladie économiquement importante (les fruits tavelés ne sont pas commercialisables). Les vergers de pommiers reçoivent en moyenne 23 traitements fongicides/bactéricides par an (de 15 à 29 selon les régions), dont près des trois quarts ciblent la tavelure (Agreste). Le cuivre pouvant provoquer de la rugosité sur fruits, la protection des pommiers bio contre la tavelure utilise du cuivre (très efficace), du soufre et de la bouillie sulfo-calcique (sous réserve d'autorisation). Les traitements à base de cuivre servent également à contrôler le chancre européen (dû à *Nectria galligena*). La production de pommes de table couvre environ 36 500 hectares en France.
- Le **mildiou de la pomme de terre**, causé par l'oomycète *Phytophthora infestans*, est la maladie la plus grave de cette culture. Elle se manifeste par des symptômes de nécrose évolutive sur tous les organes (feuilles, tiges et tubercules). Elle est à l'origine de pertes de rendement pouvant aller jusqu'à la destruction totale de la parcelle, mais aussi, en cas d'attaques tardives, de pertes de qualité du fait des pourritures sur tubercules atteints. La maladie est importante dans toutes les régions de production, mais plus régulièrement sévère en zones océaniques. Elle motive l'application de 10 à 12 traitements en moyenne, jusqu'à 15 ou 20 en zone à fort risque de mildiou. En France, la pomme de terre occupe environ 180 000 ha.

P. infestans occasionne également d'importants dégâts sur la tomate (qui appartient à la même famille botanique que la pomme de terre), en particulier en cultures de plein champ.

Ces agents pathogènes ont en commun de générer des infections polycycliques (figure 1.2) et de dépendre de la présence d'eau liquide (ou au moins d'une humidité saturante), nécessaire à la dissémination et à la germination des spores de champignons (*sensu lato*), et à la dissémination des bactéries.

Figure 1.2. Cycle biologique schématisé de maladies fongiques polycycliques.



Les pesticides peuvent inhiber la croissance des tissus végétatifs (hyphes) et/ou la germination des spores issues de la reproduction sexuée ou asexuée. La lutte contre ces maladies polycycliques nécessite un traitement dès que les conditions climatiques (pluviométrie, température) sont favorables à l'infection primaire au printemps, puis aux infections secondaires tout au long de la saison. Les outils d'aide à la décision (OAD) existants, qui visent essentiellement à améliorer le positionnement des traitements (et à en limiter si possible le nombre), évaluent le risque d'infection grâce à des modèles simulant le développement de l'agent pathogène en fonction des conditions météorologiques.

Les restrictions réglementaires d'usage

La mise en évidence d'effets environnementaux négatifs des produits à base de cuivre a motivé des restrictions réglementaires d'usage. L'emploi du cuivre à des fins phytosanitaires est actuellement autorisé en France et dans la plupart des autres pays de l'Union européenne, en agriculture conventionnelle comme en agriculture biologique, à une dose maximale de 6 kg/ha/an de Cu métal. Certains pays ont toutefois décidé de limiter plus encore ces doses autorisées. C'est le cas de la Suisse, qui restreint cet emploi à 4 kg Cu/ha/an sur la plupart des cultures (moyenne lissée sur 5 ans, avec des pics

possibles jusqu'à 6 kg en cas de forte pression phytosanitaire une année donnée), voire même à 2 kg/ha/an pour les petits fruits et à 1,5 kg pour les fruits à noyaux. D'autres pays (Pays-Bas, Scandinavie) ou certifications (Demeter en Allemagne par exemple) ont choisi d'interdire totalement les utilisations phytosanitaires du cuivre, tout en lui conservant un usage fertilisant, sans contingentement de dose. Cette brèche réglementaire a pu conduire à des utilisations phytosanitaires « dissimulées » du cuivre dans certains contextes.

L'usage du cuivre est contesté au sein même de l'AB. Les formulations de produits à base de cuivre utilisées en agriculture sont toutes issues de la chimie minérale de synthèse. Leur autorisation d'emploi en AB apparaît donc comme contraire aux principes fondateurs de ce mode d'agriculture. Elle résulte simplement du fait que l'usage ancien des préparations à base de cuivre (la bouillie bordelaise date des années 1880) en faisait un élément de la pharmacopée phytosanitaire avant l'explosion, essentiellement après la Seconde Guerre mondiale, de l'usage de pesticides issus de la recherche chimique et pharmaceutique. Ce hiatus entre les principes fondateurs de l'AB et la nature synthétique des préparations à base de cuivre est une des motivations fortes de certains producteurs et organismes certificateurs, en particulier ceux du mouvement biodynamique, pour en refuser l'emploi.

Le différentiel réglementaire entre pays et productions, voire entre cahiers des charges, génère des impasses techniques dans les pays ayant aboli l'usage du cuivre et donc une diminution sensible de certaines productions biologiques, comme c'est le cas aux Pays-Bas pour la pomme de terre. Il crée aussi une distorsion de concurrence entre producteurs des différents pays, et motive donc une sollicitation insistante des pays ayant banni l'emploi phytosanitaire du cuivre pour généraliser cette interdiction au niveau européen.

La consommation effective de cuivre en agriculture biologique

Le cuivre constitue la seule matière active à effet fongicide fort et gamme d'action large homologuée en AB. Son remplacement dans ce mode de production est donc bien plus problématique qu'en agriculture conventionnelle, qui dispose le plus souvent de solutions alternatives sous forme de pesticides de synthèse, au moins contre les maladies majeures.

En AB, trois enquêtes récentes, réalisées d'une part en France par l'ITAB (Jonis, 2009) puis conjointement par l'ITAB et l'Institut français de la vigne et du vin (IFV) (Berthier et Chovelon, 2013), et d'autre part par l'Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL) suisse (Speiser *et al.*, 2015), montrent que la consommation effective de cuivre, si elle est généralement inférieure aux doses maximales autorisées, reste néanmoins élevée. En Suisse, elle avoisine 3 kg/ha/an en cultures de pomme de terre, de céleris ou de cépages européens (sensibles au mildiou) de vigne, 2,5 kg/ha/an pour la production de cerises, et 1 kg/ha/an en vergers de pommiers et de poiriers ; ces doses se situent entre 60 et 80 % des doses maximales autorisées.

En France, la consommation de cuivre en viticulture biologique avoisine en moyenne 5 kg/ha/an en année à forte pression de mildiou (soit environ un an sur deux durant la