



PEUT-ON SE PASSER DU CUIVRE EN PROTECTION DES CULTURES BIOLOGIQUES ?

RÉSUMÉ DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE - JANVIER 2018



Le cuivre est utilisé, dans la plupart des agricultures et en particulier l'agriculture biologique (AB), pour contrôler diverses maladies fongiques ou bactériennes, principalement sur vigne, en productions fruitières et en cultures légumières (y compris la pomme de terre). Il constitue la seule matière active à effet fongicide fort et gamme d'action large homologuée en AB. Or la mise en évidence d'effets environnementaux négatifs du cuivre, notamment sur les organismes du sol et les auxiliaires des cultures, a conduit à des restrictions réglementaires d'usage (plafonnement des doses applicables par hectare et par an), et même à son interdiction comme pesticide dans certains pays européens (Pays-Bas, Danemark).

Ces restrictions croissantes des doses de cuivre autorisées, et la menace persistante d'interdiction totale, posent des difficultés aux producteurs, et plus particulièrement à ceux qui, en AB, ne peuvent recourir à des fongicides de synthèse. En découlent une demande récurrente d'"alternatives" au cuivre adressée à la recherche, et des travaux expérimentaux assez nombreux pour identifier et tester de telles alternatives. Cependant, les résultats restent dispersés : il n'existe à ce jour aucune synthèse de ces travaux, qui permettrait de fonder les préconisations sur des connaissances validées et génériques. Par ailleurs, l'adoption en pratique des innovations demeure limitée.

C'est pourquoi, suite à une suggestion du Comité Interne Agriculture Biologique (CIAB) de l'INRA, l'Institut Technique de l'Agriculture Biologique (ITAB) et le Méta-programme "Gestion durable de la santé des cultures" (SMaCH) 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.

L'ESCo a ainsi exploré : les différentes solutions techniques possibles (variétés résistantes aux maladies, substances d'origine naturelle à effet biocide et/ou stimulant les défenses naturelles des plantes, agents microbiologiques de lutte, conduites des peuplements cultivés à visée prophylactique) ; l'intégration de ces solutions individuelles au sein de systèmes de production/protection intégrée ; les freins et les conditions nécessaires à leur adoption et à leur diffusion.

Ce travail d'analyse approfondie des acquis scientifiques et techniques montre que de nombreuses méthodes présentent une certaine efficacité contre les pathogènes ciblés par les traitements à base de cuivre, mais aussi que, pour permettre une forte réduction ou l'abandon du recours au cuivre, ces différentes méthodes devront être combinées au sein de systèmes qui restent insuffisamment explorés. Ces résultats intéressent particulièrement l'agriculture biologique, plus affectée par les restrictions d'utilisation du cuivre et qui recherche donc plus activement des solutions alternatives, mais également les autres formes d'agriculture qui tentent de réduire leur consommation de pesticides.

Les usages phytosanitaires du cuivre : agents pathogènes ciblés, impacts environnementaux et réglementation

• Les utilisations phytosanitaires du cuivre

Indispensable à la vie cellulaire mais toxique au-delà d'une certaine concentration, le cuivre est largement utilisé pour ses propriétés antimicrobiennes, tant en contexte agricole que pour des applications en médecine vétérinaire et humaine. Le mécanisme exact par lequel il agit sur les microorganismes est aujourd'hui encore inconnu; cependant, plusieurs hypothèses (fuite d'électrolytes cellulaires, perturbation de la balance osmotique, chélation par les sites actifs de certaines protéines, génération d'un stress oxydant) ont pu être avancées.

Pour ces utilisations sanitaires, le cuivre est principalement employé sous forme ionique, dans des formulations à base de sels (sulfate ou hydroxyde) combinés à divers adjuvants. La bouillie bordelaise (sulfate de cuivre + chaux) est emblématique de ce type de formulation. En agriculture, ces produits sont généralement utilisés en pulvérisation sur les parties aériennes des cultures ; ils peuvent aussi être employés en traitement des semences (pour les céréales) ou en application locale (badigeon sur les plaies des arbres, applications localisées au sol).

• Les agents pathogènes ciblés par les usages du cuivre

Les produits à base de cuivre sont utilisés pour lutter contre certaines mycoses et bactérioses. Les mycoses cibles du cuivre sont causées par des ascomycètes (tavelure du pommier...) ou des oomycètes (mildiou), qui présentent des cycles biologiques comparables : une phase de survie, généralement dans des résidus de culture restés dans ou à proximité des parcelles (litières

de feuilles, repousses, tas de déchets de tri) permettant les infections primaires, puis une phase d'extension épidémique (contaminations secondaires) permettant au parasite de coloniser plus ou moins rapidement un grand nombre d'organes sensibles (voir la figure page 4). Les bactérioses cibles présentent également des épidémies polycycliques. Le cuivre vise essentiellement la prévention des infections secondaires ; il n'est que très rarement employé pour réduire ou détruire l'inoculum primaire, peu accessible aux traitements.

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 pratiques aux questions qui se posent aux gestionnaires.

L'analyse est conduite par un collectif pluridisciplinaire d'experts chercheurs d'origines institutionnelles diverses. Le corpus documentaire est constitué par recherche dans la base de données bibliographiques internationale Web of Science (WoS). L'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 reprenant les éléments clés.

Pour l'ESCo "Cuivre", une dizaine d'experts issus de différents organismes (INRA, universités, instituts...) ont été mobilisés. Leur travail s'est appuyé sur un corpus bibliographique d'environ 900 références composées essentiellement d'articles scientifiques et d'un corpus plus restreint de documents plus techniques.

Le cuivre est ainsi homologué en protection des plantes pour plus de 50 "usages", définis chacun par une combinaison culture / agent(s) pathogène(s). Ces usages homologués du cuivre concernent des maladies fongiques et des bactérioses qui affectent des **cultures pérennes** (vigne, fruits à pépins, à noyau ou à coque), des **cultures maraîchères** (une douzaine de genres appartenant à diverses familles botaniques), 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. En **grandes cultures**, les usages homologués du cuivre sont limités au mildiou de la pomme de terre et à quelques maladies fongiques du blé et du seigle transmises par les semences.

Trois usages "majeurs" du cuivre

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

- **Le mildiou de la vigne**, dû à l'oomycète *Plasmopara viticola*, est une maladie très dommageable sur vigne, 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 occupent en France 782 700 hectares en 2016.

- **La tavelure du pommier**, causée par le champignon ascomycète *Venturia inaequalis*, est une maladie économiquement importante (les fruits tavelés ne sont pas commercialisables). Son contrôle nécessite, sur variétés de pomme sensibles à la maladie, 10 à 20 traitements fongicides par an. En France, les vergers de pommiers couvrent environ 36 500 hectares en 2016.

- **Le mildiou de la pomme de terre**, causé par l'oomycète *Phytophthora infestans*, est la maladie la plus grave de cette culture : elle est à l'origine de pertes de rendement et peut aller jusqu'à la destruction totale de la parcelle. 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 fongicides en moyenne, jusqu'à 15 ou 20 en zone à fort risque de mildiou. En France, la culture de pomme de terre occupe environ 200 000 ha.



Tavelure sur pomme



Mildiou sur raisin



Mildiou sur pomme de terre

• L'accumulation du cuivre dans les sols, sa phytotoxicité pour les cultures et son écotoxicité

L'application répétée de pesticides à base de cuivre est la principale source de pollution cuprique des sols agricoles, et cause une accumulation parfois massive de cet élément dans les horizons superficiels. En Europe, l'application quasi-ininterrompue de bouillie bordelaise pour lutter contre le mildiou a ainsi très fortement accru les teneurs des sols viticoles en cuivre, jusqu'à des

valeurs pouvant atteindre 200, voire 500 mg/kg (contre 3 à 100 mg/kg dans les sols naturels).

Des concentrations excédentaires en cuivre ont des effets phytotoxiques reconnus sur la croissance et le développement de la plupart des plantes, se manifestant notamment par des chloroses et une réduction de la biomasse totale. Certaines cultures, en particulier les légumineuses, la vigne, le houblon ou les céréales, sont particulièrement affectées.

Les effets délétères d'excès en cuivre sur les communautés microbiennes des sols, ainsi que sa toxicité pour certaines composantes de la faune du sol comme les collemboles, semblent bien établis. Les impacts sont plus controversés pour d'autres groupes, en particulier les vers de terre (la dose létale est assez élevée pour certaines espèces, mais une toxicité chronique est souvent observée, avec des impacts mesurables sur les paramètres de la reproduction et 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 sur d'autres composantes de la faune des sols importantes pour 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).

• Les restrictions réglementaires d'usage

La mise en évidence de ces 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'UE, en agriculture conventionnelle (AC) comme biologique, à une dose maximale de 6 kg/ha/an de cuivre 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), et même à 2 kg/ha/an pour les petits fruits et 1,5 kg pour les fruits à noyau. D'autres pays (Pays-Bas, Scandinavie) ou associations (*Demeter* en Allemagne par exemple) ont choisi d'interdire totalement les utilisations phytosanitaires du cuivre, en AB comme en AC, tout en lui conservant un usage fertilisant. Il en est de même de la plupart des cahiers des charges en biodynamie, qui prohibent très généralement l'emploi phytosanitaire de cuivre.

• La consommation effective de cuivre

En AB, trois enquêtes récentes, réalisées en France et en Suisse, montrent que la consommation effective de cuivre, si elle est souvent sensiblement inférieure aux doses maximales autorisées, reste quand même élevée. En Suisse, elle avoisine 3 kg/ha/an en cultures de pomme de terre ou sur vigne (cépages sensibles au mildiou), 2,5 kg/ha/an pour la production de cerises, et 1 kg/ha/an en vergers de pomme et de poire ; ces doses se situent entre 60 et 80% des doses maximales autorisées. En France, l'utilisation 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), avec de très fortes disparités entre régions : 1,6 kg Cu/ha/an en Alsace, 5,6 kg en Val de Loire, et jusqu'à plus de 6 kg en Champagne, Midi-Pyrénées ou Languedoc-Roussillon. Les variations interannuelles sont également marquées : la consommation moyenne française est ainsi de 3 kg Cu/ha/an en année de faible pression maladie, contre 5 en année de forte pression. La même enquête relève des tendances très similaires en arboriculture fruitière et en productions légumières.

Les alternatives au cuivre : une gamme large de méthodes, à effets partiels

L'abondance des publications scientifiques et techniques montre que la recherche, tant académique qu'appliquée, est active pour l'identification et l'évaluation de solutions phytosanitaires alternatives à l'emploi massif de cuivre, les résultats étant potentiellement transposables ou élargis à d'autres pesticides ciblant les mêmes pathogènes. Si une masse considérable d'information est ainsi disponible, elle apparaît très inégalement répartie entre les champs de recherche et de développement. L'essentiel des efforts porte sur la caractérisation de pratiques ou leviers individuels (c'est-à-dire non intégrés ou combinés dans un système de production).

• Les principes d'action des méthodes alternatives

Ces alternatives peuvent être regroupées en trois grands types, selon les principes d'action qui les sous-tendent et leur positionnement vis-à-vis des phases du cycle de l'agent pathogène visé (figure ci-dessous) :

- **Les méthodes à action directe sur le pathogène lui-même**, qui regroupent l'application de substances biocides (extraits de plantes à action antimicrobienne en particulier), mais aussi l'emploi d'organismes pour la lutte biologique directe ; elles agissent sur la germination des spores ou le développement du pathogène ;

- **L'utilisation des capacités de résistance des plantes**, que ces résistances soient constitutives (création de **variétés résistantes**, exploitant les ressources génétiques de l'espèce cultivée ou d'espèces apparentées) ou induites après infection ou stimulation exogène (**stimulateurs de défense des plantes - SDP**) ; elles agissent *via* les différents mécanismes de défense dont dispose la plante pour bloquer la colonisation de ses tissus lors de l'infection ;

- **La mise en œuvre de pratiques agronomiques pour lutter contre les infections primaires (prophylaxie) ou secondaires (évitement)**. Au nombre des premières, figurent notamment la gestion des résidus de récolte potentiellement infectés ; parmi les secondes, le bâchage des cultures pour éviter la contamination du

feuillage par des spores présentes dans l'air ou dispersées par les éclaboussures de pluie, diminuer les durées d'humectation des feuilles et fruits, restreindre les plaies occasionnées par le vent ou la grêle, et limiter ainsi la germination des spores et les infections.

Le **"biocontrôle"** regroupe à la fois les méthodes à effets directs utilisant des substances ou produits "naturels" (à l'exclusion donc des préparations de synthèse minérale ou organique, comme les sels de cuivre), la lutte biologique, et la stimulation des défenses des plantes par des produits également d'origine naturelle. Il est important de noter que toutes les méthodes de biocontrôle ne sont pas *ipso facto* éligibles à l'utilisation en AB, et que certaines méthodes utilisées en AB (comme l'emploi de doses plus ou moins fortes de cuivre) sont exclues du champ du biocontrôle.

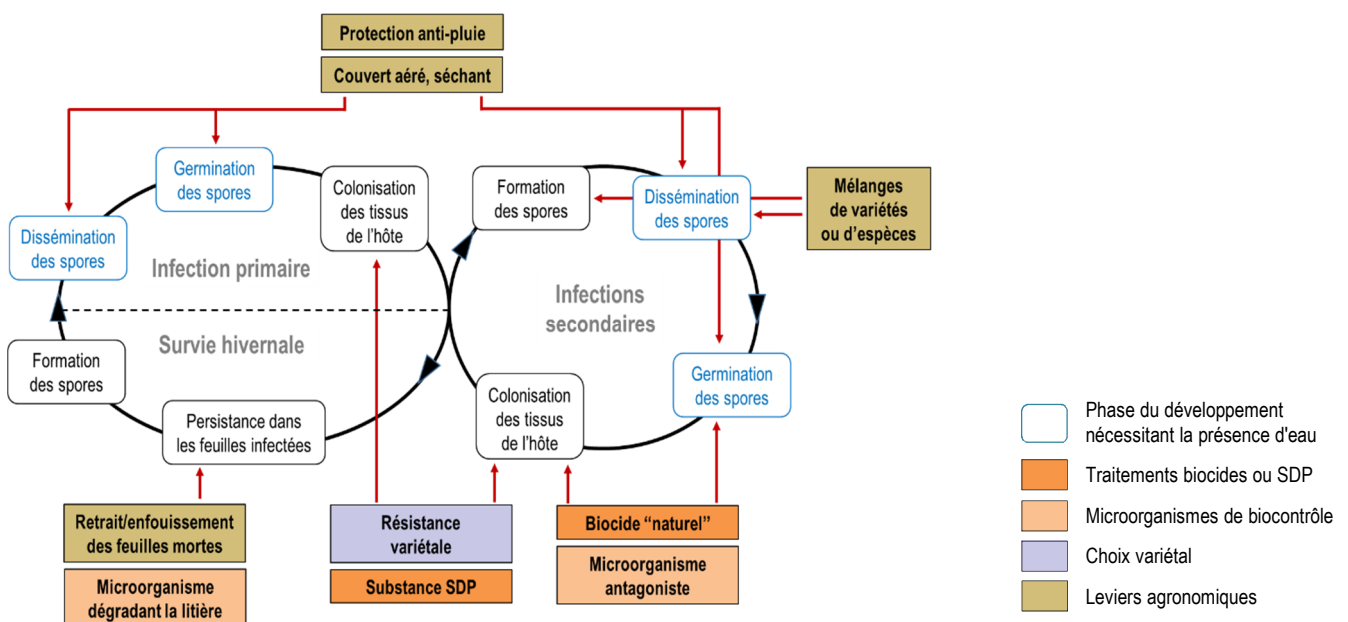
• Les évaluations d'efficacité

L'efficacité d'une méthode de lutte peut être mesurée par ses effets sur : la fréquence ou la sévérité des symptômes ou dégâts sur les feuilles ou les organes récoltés ; les pertes de récolte occasionnées par le pathogène ; la quantité de spores du pathogène présentes dans le milieu. Les évaluations portent sur des efficacités comparées, entre différentes modalités de protection, en AB et/ou en AC. L'efficacité d'une méthode alternative peut être comparée à celle des traitements standards à base de cuivre ou à celle d'un fongicide de synthèse de référence. Beaucoup d'essais évaluent aussi l'efficacité de la méthode alternative associée à une dose réduite de cuivre.

Une méthode peut être jugée intéressante même si elle ne permet pas, seule, d'assurer une protection suffisante pour une production commerciale ; la distinction entre des situations (années, sensibilité de la variété cultivée) de faible ou forte pression de la maladie considérée permet d'identifier les méthodes qui peuvent s'avérer suffisantes dans certaines conditions.

L'analyse approfondie des acquis scientifiques, mais aussi des manques actuels dans certains domaines, permet de dégager quelques conclusions importantes dans une perspective de réduction ou d'abandon des usages phytosanitaires du cuivre.

Les méthodes alternatives aux traitements cupriques, et leur action sur le cycle de vie des agents pathogènes



► Des solutions individuelles à effets partiels...

• Les méthodes à action directe sur l'organisme pathogène

○ L'utilisation de **préparations ou extraits naturels à activité biocide** fait actuellement l'objet de nombreux travaux. De composition souvent complexe, ces préparations ont fréquemment, outre leur activité biocide, une action de stimulation des défenses des plantes (cas de beaucoup d'huiles essentielles, mais aussi des phosphites). Leur forte activité antimicrobienne en conditions contrôlées en fait des candidats sérieux pour se substituer au cuivre, mais leur formulation reste difficile. De plus, leur emploi peut être rendu problématique du fait d'effets indésirables sur les produits récoltés (qualité organoleptique, accumulation de résidus) ou d'interrogations sur le statut de certaines préparations vis-à-vis des cahiers des charges de l'agriculture biologique (cas en particulier des phosphites, actuellement exclus).

○ L'emploi d'**organismes utilisables en lutte biologique directe**, agissant par antagonisme, hyperparasitisme ou compétition écologique, fait aussi l'objet de recherches plus ou moins systématiques pour identifier des souches à fort potentiel. Toutefois, il existe actuellement peu de produits formulés et homologués contre les agents pathogènes ciblés par l'usage du cuivre, et les souches ou espèces encore au stade de la recherche d'amont sont très loin de couvrir l'ensemble des usages du cuivre. Il y a donc encore peu de pistes réellement validées pour remplacer le cuivre par des agents de lutte microbiologique. Leur développement se heurte par ailleurs à des difficultés de mise en marché (formulation, procédures d'homologation) et d'efficacité au champ.

• L'utilisation des capacités de résistance des plantes

○ Des **variétés résistantes**, issues de programmes de création variétale ciblés, sont disponibles et efficaces vis-à-vis de beaucoup des maladies ciblées par le cuivre, y compris celles qui représentent actuellement une forte proportion des emplois de pesticides cupriques (mildious de la pomme de terre et de la vigne, tavelure du pommier...). Ces variétés présentent soit des résistances complètes, à déterminisme génétique souvent simple et se traduisant par une absence complète de symptômes ou par des petites nécroses localisées aux points d'infection (réactions hypersensibles), soit des résistances partielles, à déterminisme génétique le plus souvent complexe (nombreux *loci* ou QTL) et induisant un ralentissement plutôt qu'une absence de développement épidémique.

Malgré la disponibilité de matériel végétal résistant, l'usage des variétés correspondantes reste en pratique assez marginal. Cette situation apparemment paradoxale s'explique par des réserves des utilisateurs concernant : 1) la durabilité des résistances elles-mêmes, même si celle-ci peut être renforcée par une complexification des constructions génétiques à l'échelle de la plante (pyramidage de gènes ou de QTL dans un même génotype) ou des peuplements végétaux (associations de variétés ou d'espèces dans une même parcelle) ; 2) l'effet défavorable des résistances sur d'autres critères agronomiques (rendement, précocité) ou d'utilisation (qualité gustative, valeur alimentaire) des variétés ; 3) l'origine des résistances dans les variétés proposées, en particulier celles introduites par génie génétique ou biotechnologique (croisements interspécifiques, OGM, nouvelles techniques de création variétale comme l'édition de génome) vis-à-vis desquelles nombre de producteurs sont réticents ; et enfin 4) l'opportunité de changer de types variétaux alors que des solutions autres que la résistance génétique (en particulier les pesticides, y compris le cuivre) permettent de gérer l'état sanitaire des cultures. C'est particulièrement le cas dans des systèmes de production

sous signe de qualité, comme par exemple les appellations en viticulture qui imposent un choix très limité de cépages, en général sensibles. Ce type de "lock-in" (verrouillage socio-technique) est observable dans les systèmes productifs de nos pays, mais aussi dans les agricultures des pays émergents et en développement.

○ Les **stimulateurs de défense des plantes** (SDP) font actuellement l'objet de recherches actives. De nombreux produits et molécules possédant une activité biologique avérée en conditions de laboratoire ont ainsi été identifiés. Beaucoup d'entre eux (phosphites, extraits de microorganismes...) semblent avoir un mode d'action multiple, avec à la fois des effets d'induction de défense et des effets biocides directs. Si ces molécules sont souvent actives en conditions confinées de laboratoire, le transfert de cette efficacité au champ s'avère en général problématique, les protections conférées étant alors plus faibles ou plus aléatoires. Cela peut provenir de difficultés de formulation des produits (qui doivent pouvoir pénétrer la plante pour être reconnus), de positionnement du traitement (un stimulateur de défense doit forcément être appliqué en amont de l'infection, alors que beaucoup de biocides sont plus efficaces lorsqu'ils sont appliqués en présence du parasite visé) et de sa persistance d'action, voire de biais dans les méthodes d'évaluation. Or ces questions restent peu étudiées, l'essentiel des travaux étant actuellement dédié à la recherche de molécules ou de produits à efficacité démontrable au laboratoire. Il convient de noter que l'agriculture conventionnelle dispose de SDP de synthèse qui s'avèrent plus efficaces (et parfois moins phytotoxiques) que les SDP naturels acceptables en AB.

○ Les méthodes fondées sur l'**homéopathie** ou l'**isothérapie** sont peu documentées, mais semblent d'une efficacité très discutée et ne constituent sans doute pas une alternative crédible aux autres possibilités. Elles ne font l'objet que de très rares publications académiques et techniques, et très peu de données scientifiquement évaluables les concernant sont actuellement disponibles.

• La mise en œuvre de pratiques agronomiques pour lutter contre les infections primaires

○ Plusieurs techniques physiques permettent de **limiter la survie de l'inoculum résiduel dans les parcelles** (élimination des résidus de culture infectés, gestion des repousses...) **ou d'empêcher son accès aux organes productifs** (enfouissement, bâchage, sélection sanitaire des semences et plants). **Elles s'avèrent très efficaces, mais sont souvent contraignantes pour le producteur.** Ainsi, par exemple, les bâches de protection des arbres fruitiers contre la pluie sont assez coûteuses, même si elles peuvent être couplées à des filets anti-grêle et/ou anti-insectes, déjà largement utilisés.

○ D'autres pratiques culturales sont intéressantes pour limiter nombre de maladies épidémiques, en particulier celles exploitant la **diversification spatiale et temporelle des variétés** dans les parcelles (variétés-populations, associations de variétés ou d'espèces pour freiner les infections secondaires), ou dans les paysages (mosaïques paysagères, successions culturales) qui limitent fortement les infections secondaires mais imposent également des contraintes agronomiques assez fortes, tant pour la conduite que pour la valorisation commerciale des cultures.

... mais encore insuffisamment intégrées au sein de systèmes complets de protection des plantes

Si les évaluations de nouveaux produits ou préparations foisonnent actuellement, force est de constater que très peu d'outils d'accompagnement et de pilotage spécifiques sont aujourd'hui développés

ou même en cours de développement. C'est le cas pour la mise au point d'outils d'aide à la décision (OAD) dédiés au biocontrôle, mais aussi pour l'évaluation de la réponse des génotypes végétaux à ces nouvelles préparations (SDP par exemple).

Par ailleurs, ces leviers alternatifs sont majoritairement pensés et évalués comme des moyens de substitution aux applications chimiques, alors que leur niveau partiel d'efficacité et les risques pesant sur leur durabilité (risque de contournement ou d'érosion des résistances variétales par exemple) impose de les insérer dans des stratégies intégrées, et donc plus complexes, de protection phytosanitaire. Malheureusement, les travaux d'évaluation de ces alternatives se situent ainsi plus dans une optique de simple substitution (remplacer du cuivre par un produit alternatif ou une pratique alternative) que dans une perspective de reconception des systèmes de production ou de protection des cultures. Les études portant sur la conception, la validation ou l'évaluation multicritère de systèmes de protection intégrée mobilisant ces alternatives, avec un objectif d'élimination totale ou partielle de l'emploi du cuivre, restent pour leur part très (et certainement trop) peu nombreuses. Il n'existe donc aujourd'hui que très peu de références ou de données scientifiquement évaluables sur des systèmes intégrés (y compris à dimension paysagère, comme l'agroforesterie). Faute de disposer de modèles paramétrés de manière adéquate et suffisamment précise, la conception et l'évaluation de tels systèmes restent ainsi difficiles.

► Se passer du cuivre : des marges de manœuvre importantes

• Une forte réduction des dosages de cuivre est possible, sans autre ajustement des systèmes de culture

Un grand nombre d'études sur des pathosystèmes très variés (mildious de la pomme de terre ou de la vigne, tavelure du pommier...) montrent qu'une **diminution de moitié des quantités de cuivre appliquées**, obtenue le plus souvent en conservant une cadence d'application identique mais en réduisant fortement les doses à chaque passage et en améliorant la qualité de la pulvérisation, **atteindrait, dans la plupart des cas, une efficacité identique ou très comparable** à celle obtenue avec une utilisation à pleines doses. Ainsi, une protection très satisfaisante vis-à-vis de ces parasites peut être fournie par l'emploi de 1,5 kg de cuivre métal par hectare et par an, contre 3 kg/ha/an dans la plupart des programmes "standard". De ce fait, une réduction significative de la quantité de cuivre autorisée ne se traduirait en général pas par une impasse phytosanitaire ou une mise en péril des productions, sauf en cas de très forte pression de maladie.

• Des systèmes expérimentaux sans cuivre sont efficaces...

Quelques expérimentations pilotes, réalisées en particulier dans le cadre de projets européens comme *Blight Mop*, *RepCo* ou *Co-Free*, ont permis de montrer que des systèmes complexes, associant plusieurs leviers (résistance variétale, SDP, pratiques agronomiques comme les associations végétales, prophylaxie...) peuvent présenter, en conditions de station expérimentale, voire (beaucoup plus rarement) d'exploitations agricoles, des efficacités de contrôle des maladies équivalentes à celle d'un programme de protection classique basé sur le cuivre. Le succès de ce type de conduite alternative semble toutefois moins difficile à atteindre et à répéter en cultures annuelles qu'en productions pérennes (arbres fruitiers, vigne), ainsi que là où il existe peu d'obstacles à l'emploi de résistances variétales (donc hors AOP, par exemple). Il faut

néanmoins noter que les efficacités observées sont très variables selon les combinaisons de leviers et les environnements considérés, et que les conclusions ci-dessus restent préliminaires, du fait du nombre limité de cas étudiés.

... leur efficacité dépendant fortement de certaines composantes de ces systèmes...

Ces expérimentations montrent que **la résistance variétale est indispensable à tout système de protection sans cuivre**. Elle peut d'ailleurs s'accompagner de stratégies d'emploi permettant de renforcer son efficacité ou de protéger sa durabilité (associations variétales par exemple). Elle se trouve utilement renforcée par des mesures prophylactiques visant à éliminer l'inoculum résidant dans les parcelles (ramassage ou broyage des débris végétaux infectés) ou à empêcher l'accès de cet inoculum aux organes sensibles (bâches). En revanche, la gestion de la fertilisation (forme ou quantité), ainsi que le recours à des préparations bio-dynamiques ou isothérapeutiques se sont montrés généralement peu efficaces.

... et leur généralisation ou extension supposant des adaptations tout au long des filières

L'adoption de tels systèmes, qui impliquent potentiellement des ruptures majeures, requiert en outre un ajustement important des filières de production : débouchés pour des cultures de diversification introduites pour allonger les successions ; réseaux d'approvisionnement adaptés pour des gammes de produits larges ; valorisation des produits issus d'itinéraires sans cuivre...). Certaines démarches, comme le développement de "clubs" de producteurs pour promouvoir des variétés résistantes ou l'évolution du cahier des charges des AOC, mériteraient sans doute une attention plus soutenue.

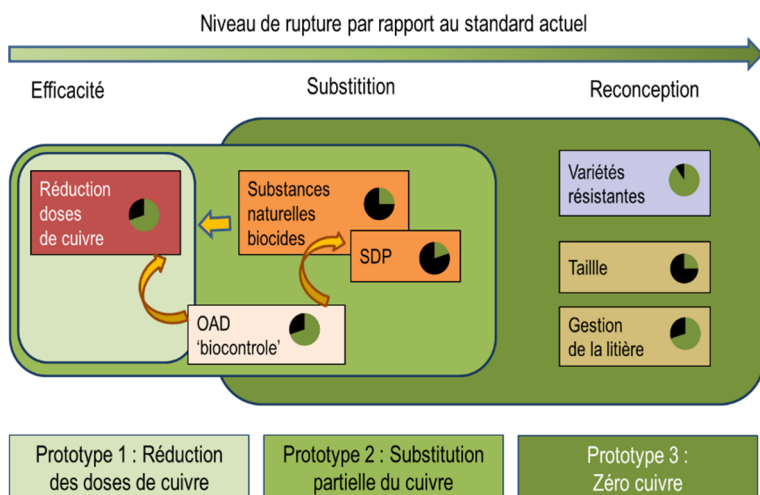
► Des prototypes à imaginer... et à tester ?

Les éléments collectés par l'ESCo permettent de se livrer à un exercice, purement intellectuel à ce stade, de construction de prototypes de systèmes de protection, en regard d'objectifs spécifiques à atteindre : remplacer les produits cupriques sans modifier les autres éléments du système, rechercher une protection maximale ou surtout durable... L'exercice a été tenté pour les trois pathosystèmes sur lesquels le plus de références sont disponibles, en se fondant sur le cadre conceptuel dit "ESR", pour *Efficacité* des intrants (optimisation de leur emploi dans une logique d'agriculture raisonnée ou de précision), *Substitution* par des intrants "naturels" ou des méthodes ponctuelles telles que la résistance variétale, et *Reconception* du système de culture dans une logique de protection intégrée.

La démarche suivante a été adoptée pour construire ces prototypes : i) disposer, le long d'un gradient de rupture par rapport aux pratiques actuelles, les leviers disponibles en culture (efficacité ou substitution) ou potentiellement utilisables sur la base de travaux de laboratoire ou d'expérimentations préliminaires (reconception), en indiquant pour chacun leur efficacité individuelle attendue par rapport à une absence totale d'intervention (témoin non traité) ; ii) spécifier les objectifs visés, en dessinant pour chaque pathosystème trois scénarios d'ambition croissante par rapport à l'élimination du cuivre, et iii) identifier les combinaisons intégrables pour approcher au mieux les exigences de ces objectifs. Faute d'éléments concrets, ni les coûts qu'engendrerait la mise en œuvre de chacun de ces prototypes, ni leurs conséquences pour la gestion des autres éléments du complexe parasitaire, n'ont été pris en compte.

Prototypes théoriques de systèmes de protection visant des objectifs croissants de non-recours au cuivre

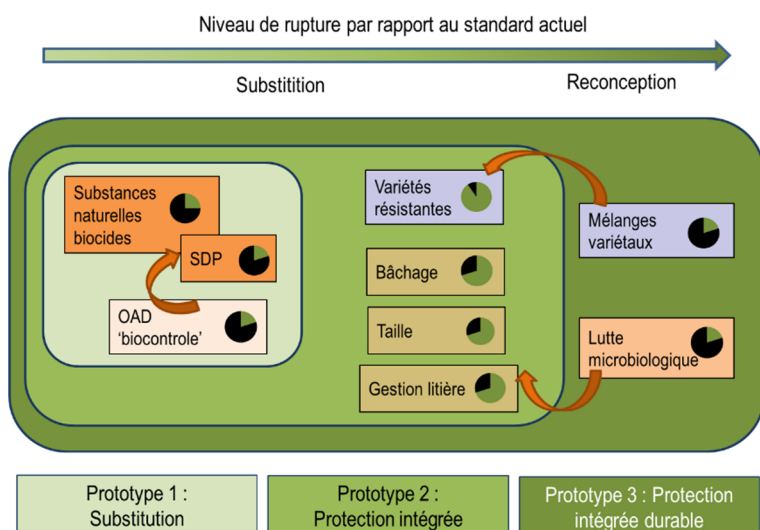
Cas 1 : Mildiou de la vigne



Il s'agit sans doute de la situation la plus délicate sur les trois envisagées, du fait de la disponibilité d'un assez faible nombre de leviers alternatifs, et dont certains (cépages résistants par exemple) sont difficiles à introduire rapidement dans les systèmes.

Le **prototyp 1** vise une protection à faible ou très faible utilisation de cuivre. Il repose pour l'essentiel sur une réduction directe des doses de cuivre, avec l'appui d'OAD (type Mildium) pour choisir au mieux les doses et dates d'intervention. La réduction d'emploi du cuivre pourra être renforcée par l'apport de SDP ou de préparations biocides, qui pourront se substituer à certains des traitements au cuivre (**prototyp 2**, substitution partielle). Enfin, l'objectif d'une protection "zéro cuivre" (**prototyp 3**) devra impérativement mobiliser, outre les solutions de biocontrôle du prototyp 2, l'emploi de cépages résistants, mais aussi des interventions à visée prophylactique, comme la gestion du microclimat grâce à la taille et l'élimination des litières infectées par ramassage.

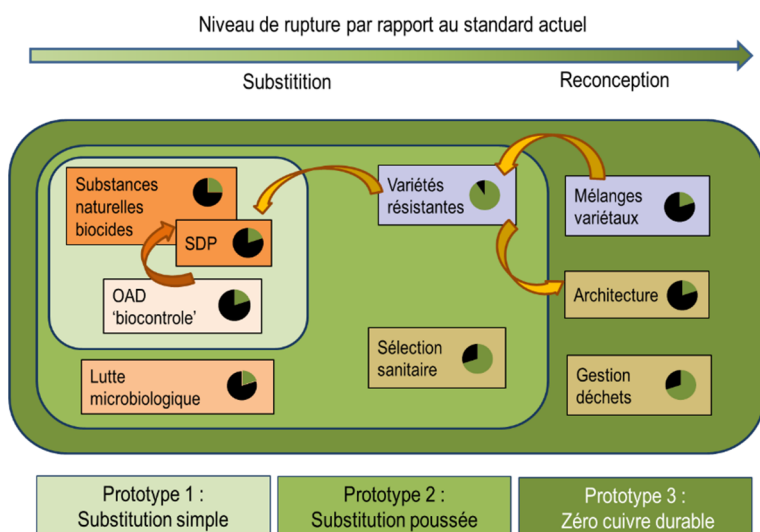
Cas 2 : Tavelure du pommier



Il s'agit là, a contrario, du cas pour lequel le plus grand nombre de leviers sont disponibles. C'est pourquoi les trois prototypes ont été construits en excluant tout recours au cuivre.

Dans le **prototyp 1**, l'objectif est juste de substituer ces traitements cupriques avec des produits de type biocontrôle (SDP ou biocides) positionnés à l'aide d'un OAD spécifique. Chacun de ces leviers n'ayant qu'une efficacité individuelle limitée, il est probable qu'un tel système serait peu satisfaisant en termes d'efficacité de protection, sauf en situation récurrente de très faible pression de maladie. Un **prototyp 2**, visant une protection intégrée sans cuivre, associerait donc à ces solutions de biocontrôle d'une part l'emploi de méthodes prophylactiques destinées à limiter fortement la pression d'inoculum dans la parcelle (bâchage, conduite centrifuge des arbres, élimination ou enfouissement des litières infectées), et d'autre part la culture de variétés résistantes. Enfin, un **prototyp 3** (protection intégrée durable) vise à renforcer les points potentiellement critiques du prototyp 2, à savoir le risque de contournement des résistances variétales (via des mélanges variétaux sur le rang) et celui d'apport exogènes d'inoculum (via une lutte microbiologique par hyperparasitisme).

Cas 3 : Mildiou de la pomme de terre



Comme dans le cas précédent, les trois prototypes ont été construits en excluant tout recours au cuivre.

Dans le **prototyp 1**, l'objectif est simplement de substituer ces traitements cupriques avec des produits de type biocontrôle (SDP ou biocides) positionnés à l'aide d'un OAD spécifique. Comme vis-à-vis de la tavelure, l'efficacité individuelle limitée de chaque solution individuelle rendra probablement un tel prototype insuffisant en termes d'efficacité, en particulier dans des environnements climatiquement très favorables au parasite. Un niveau plus important de substitution (**prototyp 2**), faisant en particulier appel aux variétés les plus résistantes du catalogue variétal et à une sélection sanitaire rigoureuse, notamment des plants autoproduits sans certification, devrait pallier ce manque d'efficacité, mais reste vulnérable à la fragilité de la plupart des résistances variétales très efficaces. Dès lors, un **prototyp 3** "zéro cuivre durable" renforçant cette résistance par d'autres mécanismes (architecture défavorable à l'infection, mélanges variétaux, réduction supplémentaire de la pression parasitaire par une gestion efficace des tas de déchets à proximité des parcelles) devrait idéalement être mis en place.

Légende : les petits cadrans indiquent l'efficacité propre de chaque levier ; les couleurs affectées aux types de leviers sont les mêmes que pour la figure de la page 4.

► Plusieurs domaines insuffisamment explorés en recherche, mais cruciaux dans une perspective d'élimination complète du cuivre

Parvenir à une protection phytosanitaire sans cuivre supposerait le plus souvent un réaménagement de fond des systèmes de protection, et plus largement des systèmes de production végétale. L'analyse fournie par la présente expertise montre que trois grands champs de recherche, indispensables à cette reconception des systèmes, sont aujourd'hui très insuffisamment investis par les communautés scientifiques spécialisées.

Le premier est d'ordre **phytopathologique**. Il concerne : i) le **développement d'outils de pilotage spécifiques aux méthodes alternatives** (par exemple, des OAD adaptés aux spécificités d'action des stimulateurs de défense des plantes ou des agents de lutte microbiologique) ; ii) **la prise en compte non plus de bioagresseurs uniques, mais de complexes de bioagresseurs d'une même culture** dans des stratégies de protection intégrée, et enfin, iii) **l'évaluation de la durabilité des leviers alternatifs ou des stratégies les incluant**.

Le deuxième domaine de recherche méritant un investissement important relève de **l'agronomie des systèmes**. Il inclut en particulier deux questions très peu étudiées jusqu'à présent : i) les **méthodes et outils de conception de systèmes de protection innovants ayant peu ou pas recours aux pesticides de synthèse** (règles d'assemblage des leviers pour les choix stratégiques, règles de décision pour les interventions tactiques) ; et ii) les **méthodes d'évaluations de long terme de tels systèmes intégrés**. Quelques travaux pionniers se sont intéressés à ces questions, mais ils restent rares et cantonnés à des cas relativement spécifiques (essentiellement des cultures pérennes ou des plantes industrielles de grande culture) et concernent très peu les cultures maraîchères ou spécialisées.

Enfin, le troisième domaine encore insuffisamment exploré se situe dans le champ des sciences économiques. Il serait ainsi nécessaire d'analyser en détail les **conséquences économiques pour les exploitations agricoles de l'adoption de méthodes alternatives de protection des cultures** (évolution des charges, du temps de travail...). Serait également à effectuer une étude approfondie des **stratégies industrielles** déployées en amont de l'agriculture, de leurs **impacts sur la disponibilité et la diffusion des innovations**, et de leur **variabilité en fonction des structures de marché** (marché de masse ou marché de niche) **et du poids des acteurs industriels concernés** (grands groupes de l'agrochimie *versus* microentreprises ou *start-up*). On peut en effet émettre l'hypothèse que la surface financière très limitée des *start-up* (les seules à se lancer exclusivement sur le marché des

produits de biocontrôle en favorisant, en général, l'exploitation de ressources issues de la recherche publique et donc non protégées) restreint fortement leurs capacités de R&D et de marketing, et les cantonne à une activité d'homologation *a minima* (par exemple, en catégorie "fertilisant" plutôt que comme produits phytosanitaires) et de distribution limitée de produits déjà éprouvés. *A contrario*, les grands groupes de la chimie phytosanitaire, s'ils sont rentrés plus ou moins récemment sur le marché du biocontrôle *via* le rachat de *start-up* ou de PME spécialisées, pourraient avoir des stratégies plus globales et des moyens financiers plus étendus pour assurer le développement et la promotion de ces solutions. Il serait donc pertinent que des économistes et des sociologues de l'innovation se penchent activement sur cette question pour voir si ces hypothèses peuvent être confirmées, tant théoriquement qu'empiriquement, dans le cas du biocontrôle.

► Des enseignements à tirer depuis et vers les systèmes dits "conventionnels"

Les opportunités et les freins au développement des méthodes et systèmes alternatifs à l'utilisation du cuivre en agriculture biologique sont identiques à ceux relatifs aux alternatives aux pesticides de synthèse dans les autres formes d'agriculture. Les solutions envisagées sont le plus souvent les mêmes (variétés résistantes, biocontrôle, utilisation accrue de la prophylaxie sanitaire...). Les questions posées sont également comparables, concernant le niveau de rupture dans les systèmes de protection phytosanitaire, les possibilités et difficultés d'assemblages de leviers à efficacité partielle ou transitoire au sein d'itinéraires intégrés de protection des cultures. Les conséquences sur l'organisation des activités et des filières, l'acceptabilité des innovations ou la capacité à surmonter les verrouillages socio-techniques sont aussi similaires. C'est pourquoi agriculture biologique et autres formes d'agriculture auraient des bénéfices mutuels à tirer d'approches plus concertées de recherche sur ces différentes questions, quitte à en transposer ensuite les résultats génériques aux spécificités de chaque système de production.

Pour en savoir plus

Andrivon D., Bardin M., Bertrand C., Brun L., Daire X., Fabre F., Gary C., Montary J., Nicot P., Reignault P., Tamm L., Savini I., 2018. *Peut-on se passer du cuivre en protection des cultures biologiques ?* Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective, INRA, 66 p.

Ce document ainsi que le rapport d'expertise sont disponibles sur le site de l'INRA (www.inra.fr).

Crédit photo wikimedia – Pg1945



147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France

Tél. : + 33(0) 1 42 75 90 00
www.inra.fr

