

Note synthétique du projet Ecoverger

- 20 Octobre 2020 -



Programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides - APR 2014 « Résistance et pesticides »

Isabelle GRECHI^{1,3}

Daniélé BEVACQUA², Julie BORG², Michel GENARD², Françoise LESCOURRET²,
M. Mahmoud MEMAH², Thierry MICHELS^{1,3}, Frédéric NORMAND^{1,3}, Laurent PARROT^{1,3},
Daniel PLENET², Alain RATNADASS^{1,3}, Gilles VERCAMBRE²

¹ UPR HortSys, CIRAD

² UR PSH, INRAe

³ Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier

Table des matières

1	Pertinence et limites de la démarche choisie pour accompagner la conception de vergers moins dépendants des pesticides.....	1
1.1	Recours à la modélisation dans la démarche de conception	1
o	Pertinence de la modélisation dans la démarche de conception	1
o	Généricité des modèles développés pour les deux cas d'étude (pêcher et manguié)...	1
1.2	Implication des utilisateurs finaux dans la démarche de conception.....	2
o	Des contextes de production différents nécessitant des solutions adaptées	2
o	Importance de la circulation des connaissances entre les acteurs.....	2
1.3	Mise en œuvre et limites méthodologiques de la démarche de conception.....	3
o	Difficultés de la mise en œuvre opérationnelle de la démarche de conception	3
o	Limites méthodologiques de la démarche de conception.....	4
2	Quelles leçons tirer des avancées du projet sur l'efficacité des leviers de gestion des bioagresseurs alternatifs aux pesticides dans les vergers ?.....	5
2.1	Efficacité et performances des leviers de gestion des bioagresseurs alternatifs aux pesticides et recommandations auprès des utilisateurs finaux.....	5
o	Les différents types de leviers mobilisés.....	5
o	Efficacité et mise en œuvre des leviers mobilisés à l'échelle du verger.....	5
o	A quelle échelle déployer les leviers mobilisés : à l'échelle du verger ou du bassin de production ?	8
2.2	Freins et opportunités à l'adoption des leviers de gestion des bioagresseurs alternatifs aux pesticides et recommandations auprès des gestionnaires publics.....	9
o	Freins et opportunité à l'adoption des leviers mobilisés du point de vue des utilisateurs finaux.....	9
o	Recommandations auprès des gestionnaires publics pour faciliter l'adoption des leviers de gestion des BA alternatifs aux pesticides.....	10

Comment concevoir des systèmes de culture innovants reposant sur une protection des cultures économe en pesticides, capables d'assurer une production suffisante en quantité et en qualité, et potentiellement adoptables par les producteurs ?

Le projet Ecoverger a abordé cette question sur les systèmes fruitiers, avec pour objectif de développer une démarche et des outils d'aide à la conception de solutions techniques en vergers de manguiers et de pêchers. Une démarche de conception assistée par modèle et impliquant les utilisateurs finaux a été retenue comme voie méthodologique privilégiée.

La présente note, en réponse aux recommandations du CSO R&I, vise à faire un bilan global des avancées du projet pour les décideurs. Elle vient compléter les résultats détaillés et les éléments plus factuels qui ont été décrits dans le rapport final du projet. Plus précisément, cette note s'attache à présenter les éléments suivants :

- Une analyse critique sur la démarche mobilisée pour accompagner la conception de vergers moins dépendants des pesticides ;
- Une analyse globale sur la gestion de différents types de bioagresseurs (BA) dans les vergers tropicaux et tempérés par la mobilisation de leviers alternatifs aux pesticides.

1 Pertinence et limites de la démarche choisie pour accompagner la conception de vergers moins dépendants des pesticides

1.1 Recours à la modélisation dans la démarche de conception

o Pertinence de la modélisation dans la démarche de conception

Nous avons fait l'hypothèse que la modélisation était un cadre méthodologique adapté dans une démarche visant à accompagner la conception de vergers moins dépendants des pesticides. Cette hypothèse est vérifiée. Les modèles permettent en effet d'apporter des résultats complémentaires à ceux obtenus expérimentalement, et ainsi de mieux appréhender les effets des leviers de gestion des BA sur les performances du verger. Ils permettent notamment :

- De tester des innovations difficiles à évaluer sur le terrain (Ex : évaluation de l'effet de la synchronisation de la floraison sur la dynamique des cécidomyies des fleurs (CdF) – démontrant ainsi l'intérêt d'explorer davantage cette voie de régulation et de rechercher des leviers techniques permettant de synchroniser la floraison du manguier) ;
- D'explorer la combinaison de plusieurs leviers ainsi qu'un espace de recherche plus large pour chaque levier (Ex : exploration des effets combinés d'un gradient d'éclaircissage, d'un gradient d'irrigation et de récoltes sanitaires sur le développement de la moniliose) ;
- D'explorer la variabilité de la réponse du verger selon les conditions environnementales, et ainsi prédire les adaptations à des changements globaux comme le changement climatique (Ex : évaluation de l'effet des conditions climatiques sur le développement de la moniliose et projection, dans un contexte de changement climatique, de l'évolution du potentiel de production et de la sensibilité à la moniliose des vergers à l'échelle nationale).

o Généricité des modèles développés pour les deux cas d'étude (pêcher et manguier)

Le modèle de culture QualiTree développé sur pêcher (Lescourret et al. 2011) avait été initialement retenu comme cadre générique pour les deux modèles biologiques choisis comme cas d'étude dans le projet.

Le modèle de croissance et d'élaboration de la qualité du fruit à l'échelle du rameau, qui constitue une composante majeure de QualiTree, a été retenu pour les deux cultures fruitières, *i.e.* le pêcher et le manguier : il y a donc là une approche commune aux deux modèles biologiques qui est justifiée par des similarités dans l'élaboration de la qualité du produit et les

leviers de gestion des BA considérés, qui pour certains agissent sur la régulation « bottom-up » des BA. Du fait de l'interaction entre les processus physiologiques impliqués dans l'élaboration du rendement et de la qualité des produits ainsi que dans la sensibilité de la plante aux BA, des antagonismes peuvent exister entre les effets de ces leviers. Par exemple, l'éclaircissage, l'irrigation et le stade de maturité des fruits à la récolte sont des leviers de gestion des BA qui impactent à la fois la sensibilité du fruit aux BA et la qualité du fruit (calibre, teneurs en sucres). Un tel modèle prend alors tout son intérêt car il permet, une fois couplé à des modèles de BA, d'avoir une approche systémique qui considère l'ensemble des effets directs et indirects – via la régulation des BA et de leurs dégâts – des leviers considérés sur le rendement et la qualité de la production.

A l'inverse, des développements plus spécifiques ont été faits pour répondre aux spécificités des deux modèles biologiques. La floraison, par exemple, est un processus important dans l'élaboration du rendement pour le manguier. En effet, elle peut être un facteur limitant du fait de l'irrégularité de la floraison des arbres et de l'importance des dégâts occasionnés par plusieurs BA (parmi lesquels les CdF) sur les inflorescences. A l'inverse, la floraison est rarement limitante pour le pêcher (hors événements climatiques exceptionnels) dont la conduite nécessite un éclaircissage important. Cela justifie de modéliser la floraison sur manguier, alors que ce n'est pas nécessaire sur pêcher. Par ailleurs, d'autres spécificités du manguier par rapport au pêcher (arbre sempervirent, croissance rythmique, etc.) justifient de ne pas retenir le modèle QualiTree mais plutôt de développer un modèle plante spécifique, V-Mango, pour représenter le développement architectural et la croissance végétative du manguier.

Les modèles de BA développés sont quant à eux spécifiques aux traits de vie et types de dégât des BA et aux modes d'action des leviers considérés pour les gérer (action sur la dynamique du BA ou la sensibilité de la plante au BA par exemple).

1.2 Implication des utilisateurs finaux dans la démarche de conception

- Des contextes de production différents nécessitant des solutions adaptées

Les stratégies de production et de gestion des BA et les critères de performance varient en partie selon le profil de production, autant sur pêcher en milieu tempéré que sur manguier en milieu subtropical. Cette variabilité concerne notamment :

- Les stratégies de valorisation et les circuits de commercialisation de la production qui s'accompagnent de différents objectifs et contraintes de production, parfois formalisés dans des cahiers des charges (Ex : critères relatifs à la qualité gustative ou au stade de maturité des fruits à la récolte, etc.) ;
- Les contraintes par rapport à la disponibilité et l'affectation de la main-d'œuvre au sein de l'exploitation qui varient selon le type d'exploitation et la place qu'y occupe la culture (culture pivot ou secondaire) ;
- Les stratégies de gestion des BA qui se caractérisent par une diversité dans le raisonnement de la protection phytosanitaire (Ex : déclenchement des interventions phytosanitaires sur seuil, en préventif ou en curatif) et une variabilité dans l'intensité de la mobilisation des leviers de gestion alternatifs ;
- La hiérarchisation des critères de performance, même si le rendement du verger et l'aspect visuel du fruit (incluant son calibre) sont les critères prépondérants pour les deux cultures fruitières ; seules les exploitations engagées en Agriculture Biologique accordent moins d'importance à l'aspect visuel des fruits.

Ces quelques constatations confirment l'importance de prendre en compte la diversité des profils de production pour adapter les solutions techniques à chaque contexte de production. Il ne s'agit pas de rechercher une solution universelle mais plutôt des solutions adaptées aux contraintes et objectifs spécifiques qui sont identifiés (et hiérarchisés) auprès des utilisateurs finaux.

- Importance de la circulation des connaissances entre les acteurs

La démarche et les objectifs initialement affichés dans le projet se basaient sur un *a priori* des chercheurs quant aux indicateurs de performance à cibler : impact environnemental via le

nombre de traitements phytosanitaires et impact sur la production via le rendement et la qualité des fruits. Sur manguier comme sur pêcher, la co-construction d'indicateurs avec les producteurs (et/ou experts de la filière) montre par exemple que la qualité visuelle (incluant le calibre) est très importante pour ces derniers, mais qu'ils sont globalement moins concernés par la qualité gustative des fruits. D'autre part, les résultats sur manguier montrent une grande diversité d'indicateurs du point de vue des producteurs, parmi lesquels les indicateurs relatifs au revenu, au rendement commercialisable, au mode de commercialisation, à la pression des BA, à la pénibilité du travail, à la qualité visuelle du fruit ou à la perception par le consommateur sont les plus cités. Sur pêcher, les indicateurs prépondérants sont le rendement et l'aspect visuel, mais d'autres indicateurs tels que la fermeté du fruit et les pertes de récolte sont également cités. Par contre, les indicateurs relatifs à l'impact environnemental des pratiques phytosanitaires ne semblent pas encore être pris en compte unanimement par les producteurs de mangue, et leur sensibilisation aux pratiques éco-responsables passent en partie par la perception des consommateurs. Sur pêcher, même s'il n'est pas cité, il a été identifié que le critère « zéro résidus de pesticides » devenait très important.

Par ailleurs, des divergences peuvent exister entre les perceptions des producteurs pour certaines pratiques et leur impact réel. Par exemple un impact *a priori* négatif du bâchage sur l'activité biologique du sol a été signalé par un producteur. Or nos résultats expérimentaux montrent que la bâche n'a pas d'effet négatif. Des freins *a priori* vis-à-vis d'une pratique peuvent ainsi être levés en transférant les résultats de la recherche auprès des producteurs.

Même si nous ne sommes pas allés jusqu'à la mise en œuvre opérationnelle de la démarche de co-conception dans le temps du projet, nos résultats illustrent déjà bien l'importance de la circulation des connaissances entre les producteurs et les chercheurs pour la co-conception des innovations techniques. L'implication des utilisateurs finaux dans l'identification et la hiérarchisation des indicateurs de performance, puis dans l'évaluation des solutions proposées, telle que prévue dans la démarche, apparaît d'autant plus pertinente.

1.3 Mise en œuvre et limites méthodologiques de la démarche de conception

o Difficultés de la mise en œuvre opérationnelle de la démarche de conception

La démarche de co-conception n'est qu'en partie éprouvée sur pêcher avec l'exploration – par simulation et optimisation - de scénarios techniques combinant plusieurs leviers de gestion des BA et évalués sur la base de plusieurs indicateurs de performance. Pour ce cas d'étude, un cadre de modélisation unique – le modèle de culture QualiTree couplé à un modèle épidémiologique pour la moniliose - est mobilisé. Ce cadre de modélisation est bien adapté pour évaluer/optimiser des combinaisons de différents leviers de gestion des BA sur la base de performances multicritère, et ainsi générer un ensemble de scénarios techniques parmi lesquels il est possible de sélectionner ceux qui sont les mieux adaptés à chaque profil de production. Pour le manguier, cette démarche a été partiellement adaptée car il n'y a pas de cadre de modélisation unique intégrant l'ensemble des leviers et indicateurs de performance considérés. La démarche a alors consisté à évaluer les performances des leviers de gestion des BA sur la base de plusieurs outils complémentaires : de l'expertise, des modèles biotechniques manguier-BA et l'outil de simulation CoHort¹.

Dans le temps du projet, il n'a cependant pas été possible d'aller jusqu'à la mise en œuvre effective et opérationnelle de la démarche de co-conception qui est basée sur de fortes interactions avec les utilisateurs finaux. En particulier, bien que les producteurs aient été mobilisés dans l'identification et la hiérarchisation des indicateurs de performance, il n'a pas été possible de conduire les ateliers de restitution des résultats obtenus auprès de ces derniers. La phase d'évaluation des solutions proposées par les utilisateurs finaux est pourtant importante car elle permettrait de valider et/ou faire évoluer les solutions proposées. L'expérience de ce projet

¹ L'outil de simulation CoHort représente la structure et le fonctionnement d'une exploitation arboricole dans sa dimension technique et son organisation du travail, et permet d'évaluer des scénarios en termes économique, environnemental et de bilan travail (Pissonnier 2017).

montre qu'il est toutefois difficile d'assurer à la fois le développement de modèles et la mise en œuvre de ces modèles dans une démarche de co-conception assistée par modèle dans le temps d'un projet.

o Limites méthodologiques de la démarche de conception

Sur la base de ces deux cas d'étude, certaines limites de la démarche de co-conception et des points de blocage pour sa mise en œuvre ont été identifiés :

- Certains indicateurs de performance (Ex : couleur et fermeté du fruit) et leviers potentiels de gestion des BA (Ex : fertilisation) sont identifiés par les producteurs (ou experts de la filière) mais ne sont pas encore intégrés dans les modèles biotechniques qui constituent le cadre de modélisation. Ceci confère une certaine inertie à la mise en œuvre de la démarche de co-conception, puisque la prise compte du point de vue de ces acteurs nécessite de compléter les modèles – ce qui nécessite un temps de développement ;
- Un recours à l'expertise ou à d'autres approches ou modèles est parfois nécessaire pour compléter les sorties du modèle biotechnique, transformer des variables latentes en des variables observables, et ainsi renseigner certains indicateurs non disponibles (Ex : expertise et outil CoHort utilisés pour accéder aux performances économiques à l'échelle du verger et à la répartition de la charge de travail à l'échelle de l'exploitation).

Des questions méthodologiques quant à la démarche de co-conception assistée par modèle et impliquant les utilisateurs finaux ont ainsi été soulevées :

- La démarche consistant à développer un cadre de modélisation unique sur lequel sont appliquées des méthodes d'optimisation peut-il (doit-il) se suffire à lui-même pour identifier des solutions techniques innovantes, ou ne faudrait-il pas plutôt l'intégrer dans une démarche plus large incluant d'autres outils ou approches complémentaires, comme par exemple des outils d'évaluation ou de l'expertise ?
- Comment mobiliser un ensemble d'informations issues de sources de nature différente et parfois supportées par des formats différents (dires d'experts, résultats expérimentaux, outils d'évaluation, modèles à différents pas de temps ou échelles spatiales, données qualitatives et quantitatives, etc.) ?
- Comment faciliter la diffusion de ces informations dans des ateliers participatifs et faciliter les échanges entre acteurs dans une démarche de co-conception ? Un support intégrant l'ensemble de ces connaissances et capable de les présenter aux utilisateurs finaux de façon simple, ludique et interactive ne serait-il pas nécessaire ?

D'autres limites de la démarche, plus générales, ont également été identifiées. Elles concernent :

- Les indicateurs sur les performances économiques : il est actuellement difficile de prendre en compte les différences de valeurs marchandes des fruits liées aux différents types de circuits de commercialisation et/ou aux cahiers des charges (meilleure valorisation AB, HVE, fruits « zéro résidus de pesticides ») car les prix sur ces marchés sont actuellement très peu documentés et fortement liés à des effets de niche ou à la demande des différentes clientèles ;
- La dimension « multi-pest » : les modèles développés dans le projet ne permettent pas (ou peu) de prendre en compte la dimension « multi-pest ». Or les pratiques jugées optimales pour la gestion d'un BA particulier le sont-elles aussi pour d'autres BA ? Cette dimension est surtout importante à prendre en compte pour les leviers de gestion des BA qui ne sont pas spécifiques, comme cela peut-être le cas des leviers avec un mode de régulation « bottom-up ».

Bien qu'il n'ait pas été possible d'aller jusqu'à la mise en œuvre effective et opérationnelle de la démarche de co-conception dans le temps du projet, l'ambition de réaliser cet objectif est maintenue. Certaines des limites et questions méthodologiques qui ont été soulevées seront d'ailleurs abordées dans un prochain projet du Plan Écophyto II+ (projet ODACE : « Outil d'évaluation et de Dialogue entre acteurs et chercheurs, pour Accompagner la conCEption de solutions de protection des plantes dans le contexte arboricole »).

2 Quelles leçons tirer des avancées du projet sur l'efficacité des leviers de gestion des bioagresseurs alternatifs aux pesticides dans les vergers ?

Le projet Ecoverger s'intéresse à trois cas d'étude particuliers : les systèmes moniliose - fruit sur pêcher et mouche des fruits (MdF) - fruit et CdF - inflorescence sur manguier. A travers ces trois cas d'étude, le projet permet d'étudier de façon approfondie des BA qui s'attaquent aux organes reproducteurs d'arbres fruitiers en milieu tempéré et subtropical.

Les résultats obtenus ont permis d'explorer des leviers de gestion des BA qui pourraient se substituer à l'emploi de pesticides, et d'identifier des freins potentiels ou des opportunités à l'adoption de ces leviers par les producteurs. Ils permettent ainsi de faire des recommandations auprès des utilisateurs finaux et peuvent également orienter les politiques publiques pour mettre en œuvre des mesures ou des aides visant à favoriser l'adoption de ces leviers.

2.1 Efficacité et performances des leviers de gestion des bioagresseurs alternatifs aux pesticides et recommandations auprès des utilisateurs finaux

o Les différents types de leviers mobilisés

Les leviers de gestion des BA mobilisés dans le cadre du projet Ecoverger se distinguent par leur mode d'action sur les BA (Tableau 1) :

- Des leviers qui visent à limiter l'incidence et la contamination de la culture par les BA, avec des stratégies d'évitement (consistant à réduire l'exposition des stades sensibles de la culture aux BA) ou d'atténuation de la culture (consistant à réduire la sensibilité de la culture au BA) ;
- Des leviers qui visent à limiter le développement des BA en réduisant les sources de contamination des cultures par exportation des organes contaminés, en perturbant le cycle de développement des BA, ou en réduisant le nombre de leurs cycles.

Les leviers se distinguent également par leur niveau d'innovation et de transformation des itinéraires techniques de référence (Tableau 1) :

- Des leviers qui consistent en une adaptation de pratiques déjà en place dans l'itinéraire ;
- Des leviers qui consistent à introduire une nouvelle pratique dans l'itinéraire.

Tableau 1. Description des leviers de gestion des BA étudiés dans le projet

Levier	Processus impliqué	Mode d'action	Niveau d'innovation	Cas d'application
Eclaircissage	Croissance du fruit	Atténuation de la culture	Adaptation	Moniliose / pêche
Irrigation	Croissance du fruit	Atténuation de la culture	Adaptation	Moniliose / pêche
Récolte	Stade de maturité du fruit	Evitement	Adaptation	MdF / mangue
Enherbement	Barrière physique Facilitation des prédateurs	Limitation du développement du BA	Adaptation	CdF / mangue MdF / mangue
Bâchage	Barrière physique	Limitation du développement du BA	Introduction	CdF / mangue MdF / mangue
Récolte sanitaire	Exportation des sources de contamination	Limitation du développement du BA	Introduction	Moniliose / pêche MdF / mangue
Taille	Synchronisation de la floraison	Limitation du développement du BA	Adaptation	CdF / mangue

o Efficacité et mise en œuvre des leviers mobilisés à l'échelle du verger

Les résultats du projet ont permis d'évaluer l'efficacité des différents leviers de gestion des BA et d'établir des recommandations pour leur mise en œuvre à l'échelle du verger.

Les stratégies qui visent à limiter l'incidence et la contamination de la culture sont pertinentes à la fois pour la gestion de la moniliose et des MdF car l'infection / infestation du fruit est influencée par l'état du fruit, notamment sa maturité (pour les MdF) ou la présence de fissures cuticulaires (pour la moniliose) :

- **Stratégie d'évitement en récoltant les fruits à un stade de maturité précoce** : la récolte des fruits à un stade de maturité précoce (stades 'vert-mature' ou 'point-jaune' très précoce) permet de réduire très fortement les pertes de rendement liées à l'infestation des mangues par les MdF (<4% de fruits infestés), sans compromettre pour autant la qualité des fruits (réduction de la masse fraîche et du degré Brix des fruits <5% en moyenne). Par ailleurs, l'efficacité de ce levier est relativement indépendante de la pression en BA dans le verger. Sa mise en œuvre requiert des récoltes journalières et le temps de travail est un peu augmenté par la recherche des fruits aux stades de maturité ciblés. Cette stratégie est parfois utilisée en vergers de pêcheurs, en particulier en AB, quand les conditions climatiques sont très défavorables et conduisent à un fort développement de monilioses. A dire d'experts, le maintien d'une qualité satisfaisante semble toutefois plus délicat à atteindre pour cette culture. Il serait intéressant d'analyser, par exemple par modélisation, les compromis entre dégâts et qualité pour déterminer si cette stratégie est également pertinente sur pêcher.
- **Stratégie d'atténuation de la culture en réduisant la croissance des fruits par adaptation de l'irrigation et de la charge en fruits de l'arbre** : un stress hydrique modéré en fin de croissance des fruits et une charge en fruit modérée permettent de réduire les pertes de rendement liées à l'infection des pêches par la moniliose. Mais contrairement à la stratégie d'évitement sur manguier, ces pratiques ont un impact important sur le potentiel de production de l'arbre et des effets antagonistes sur ses composantes (i.e., calibre, caractère sucré, rendement potentiel et pertes). Dans ces conditions d'application et si on considère une dépendance de la valeur marchande des fruits à leur calibre et à leur qualité, ces pratiques permettent d'atteindre des rendements et des revenus par arbre (en unité monétaire) relativement similaires à ceux obtenus en l'absence de maladie (dans le sens où elle serait gérée par des traitements phytosanitaires). Toutefois, si on ne considérait pas la valeur marchande de la qualité, ces pratiques ne permettraient pas de maintenir le même niveau de rendement et de revenus. Ceci confirme que les marges de manœuvre pour le développement de leviers alternatifs sont fortement dépendantes de la valeur marchande des fruits et donc des circuits de commercialisation permettant de les valoriser et/ou des signes de qualité sur lesquels on peut communiquer. La mise en œuvre de cette stratégie ne présente aucune difficulté puisque les pratiques sont déjà utilisées et leur adaptation ne demande pas de temps de travail supplémentaire.

Les stratégies qui visent à limiter le développement des BA par exportation des sources de contamination sont pertinentes pour la gestion des BA qui induisent des dommages sur des organes qui ne contribuent pas (ou plus) à l'élaboration du rendement. C'est le cas pour les fruits qui ne sont plus commercialisables quand ils sont infectés par la moniliose ou infestés par les MdF. A l'inverse, cette stratégie ne s'applique pas à des BA comme les CdF qui infestent les inflorescences puisqu'une inflorescence infestée peut encore produire des fruits si l'infestation n'est pas trop sévère. Ce levier est souvent mobilisé pendant la saison de production des fruits, mais il peut aussi être mobilisé par éliminer des organes contaminés plus en amont, comme les brindilles et les fruits momifiés des saisons précédentes (source de d'inoculum primaire de la moniliose) ou les jeunes fruits avortés quelques semaines après la nouaison (source de multiplication précoce des MdF) :

- **Stratégie visant à réduire les sources de contamination des cultures par élimination précoce des organes contaminés** : les jeunes fruits en état d'abscission sont très sensibles aux infestations par les MdF et constituent une source de multiplication précoce du BA. Les fruits peuvent être infestés sur l'arbre mais il est possible d'attendre qu'ils tombent au sol pour les éliminer. Cette pratique, en réduisant la multiplication précoce des MdF dans le verger, est susceptible de retarder/freiner leur développement dans le verger. Son efficacité réelle sur la dynamique ultérieure des MdF et leurs dommages sur les fruits n'a cependant pas encore été évaluée. La suppression de l'inoculum primaire de la moniliose par élimination des brindilles et des fruits momifiés des saisons précédentes ne permet de réduire les pertes de rendement liées à l'infection des pêches par la moniliose que si elle est totale et qu'il n'y a pas d'inoculum venant de l'extérieur du verger. Dès lors qu'il reste un peu d'inoculum dans le verger, les pertes de

rendement augmentent très vite et deviennent indépendantes du niveau d'inoculum car les multiplications secondaires deviennent rapidement prépondérantes dans la dynamique du BA. Dans les deux cas, les résultats suggèrent un effet partiel des méthodes de prophylaxie par élimination précoce des organes contaminés, qui sont donc à utiliser préférentiellement en combinaison à d'autres leviers. Leur efficacité réelle est toutefois difficile à estimer. L'introduction de récoltes sanitaires (ou prophylactiques) visant à éliminer précocement les organes contaminés induit une augmentation du temps de travail.

Les stratégies qui visent à limiter le développement des BA en perturbant leur cycle de développement sont pertinentes pour des BA présentant un stade phénologique exposé et vulnérable. Les MdF et les CdF réalisent une partie de leur cycle de développement dans le sol : avant d'entrer en pupaison, les larves de dernier stade s'éjectent des organes infestés et s'enfouissent dans le sol. Une barrière physique au sol est susceptible de freiner leur enfouissement dans le sol, voire de les exposer davantage à des prédateurs, et ainsi rompre leur cycle de développement :

- **Stratégie visant à perturber ou rompre le cycle de développement des BA par une couverture du sol** : la couverture du sol au moment de la floraison par une bâche tissée ou un enherbement spontané haut permet de réduire les populations de CdF générant des dommages sur les inflorescences du manguier (réduction par 5 avec la bâche et par 3 avec l'enherbement par rapport à un sol fauché), sans avoir un quelconque effet indésirable sur la floraison du manguier ou l'activité biologique du sol. L'efficacité de la couverture du sol intervient dès la première année avec la bâche et au bout de deux années avec l'enherbement. La couverture du sol a un effet sur les multiplications du ravageur au cours de la saison, mais permet aussi de réduire les sources de contamination des saisons suivantes (i.e., le stock de larves en diapause qui se maintiennent dans le sol entre deux saisons de floraison). Si la bâche est maintenue au début de la croissance des fruits, elle peut se substituer à l'élimination précoce des fruits contaminés car elle réduit très fortement l'infestation des jeunes fruits avortés. L'enherbement doit au contraire être enlevé car il favorise fortement l'infestation de ces fruits et empêche de pratiquer des récoltes sanitaires. La mise en œuvre de cette stratégie requiert un investissement dans du matériel pour l'achat de la bâche et induit une forte augmentation du temps de travail pour sa mise en place dans le verger puis son retrait. A l'inverse, elle est assez facile à mettre en œuvre avec l'enherbement car il s'agit seulement d'adapter la fréquence et le moment du fauchage (ou désherbage) qui est déjà pratiqué, et ne demande pas de temps de travail supplémentaire.

Les stratégies qui visent à limiter le développement des BA en réduisant la période de sensibilité de la culture et ainsi le nombre de cycles de développement du BA est d'autant plus pertinente que les cycles de multiplication du BA sont courts et que la période de sensibilité de la culture est étalée. Comme le manguier présente une floraison qui peut être étalée en plusieurs « flushs », cette stratégie apparaît pertinente pour la gestion de la CdF :

- **Stratégie visant à réduire le nombre de cycles de développement du BA par une réduction de la période de sensibilité de la culture** : les résultats des simulations montrent que la synchronisation de la floraison, associée ou non à une couverture de sol, est *a priori* efficace pour réduire les populations de CdF générant des dommages sur les inflorescences du manguier. Cet effet est cependant plus faible quand les femelles exogènes, c'est-à-dire venant des vergers voisins, contribuent fortement à la dynamique du BA. Les modalités de taille permettant de synchroniser la floraison du manguier restent cependant à définir, mais nos résultats nous orientent déjà vers certaines pistes à explorer en particulier (Ex : taille avant la floraison pour synchroniser et stimuler le débourrement des bourgeons florifères). La mise en œuvre de cette stratégie est assez facile car la taille est déjà pratiquée, mais selon les modalités qui seront préconisées, elle pourrait demander un peu plus de technicité et de temps de travail.

Les leviers qui visent à limiter l'incidence et la contamination de la culture se sont avérés efficaces pour limiter le développement des BA et leurs dommages, mais ils peuvent parfois impacter le potentiel de production. A l'inverse, les leviers qui visent à limiter le développement

des BA semblent avoir une efficacité plus partielle mais n'ont pas d'impact sur le potentiel de production. Dans ce cas, il est préférable d'utiliser ces leviers en combinaison à d'autres leviers. La mise en œuvre de certains leviers peut générer des surcoûts liés à un investissement dans du matériel (bâche) ou à une augmentation du temps de travail liée à l'introduction d'une nouvelle opération dans l'itinéraire (Ex : pose et retrait de la bâche ; prophylaxie par élimination des organes contaminés) ou à l'augmentation de la technicité d'une pratique déjà en place (Ex : taille, récolte à des stades de maturité ciblés), ce qui peut négativement impacter la marge du producteur si la réduction du nombre de traitements phytosanitaires induite ne compense pas ces surcoûts. Le maintien des marges va alors dépendre de l'efficacité du levier à réguler les BA et leurs dommages, son effet sur le rendement potentiel et la qualité des fruits, les coûts de sa mise en œuvre et la réduction des coûts de la protection phytosanitaire, ainsi que des possibilités de valorisation des fruits par le circuit de commercialisation. Une évaluation globale de ces leviers, établie sur la base des résultats du projet, est synthétisée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Evaluation de l'efficacité des leviers de gestion des BA considérés dans le projet et de leur impact sur les performances pour un circuit commercial donné.

Levier	Cas d'application	Régulation des BA et de leurs dommages	Rendement potentiel	Qualité du fruit (°Brix / calibre)	Temps de travail	Marges
Eclaircissage x Irrigation	Moniliose / pêche	😊	😊	😊 / 😊	😊	😊
Récolte	MdF / mangue	😊	😊	😊	😊	😊
Enherbement	CdF / mangue	😊	😊	😊	😊	?
	MdF / mangue	😞	😊	😊	😊	?
Bâchage	CdF / mangue	😊	😊	😊	😞	😞
	MdF / mangue	😊 #	😊	😊	😊	?
Récolte sanitaire	Moniliose / pêche	😊	😊	😊	😊 / 😞	?
Taille	MdF / mangue	😊	?	?	😊	😊

Code d'évaluation : régulation des BA et de leurs dommages par le levier jugée efficace (😊), moyennement efficace (😊) et peu efficace (😞) ; indicateur de performance potentiellement amélioré ou maintenu (😊), un peu dégradé (😊), très dégradé (😞) par l'introduction du levier, ou non évalué (?). # Evaluation de la régulation du BA uniquement en début de la saison de production.

Cette évaluation reste toutefois prospective et demandent à être davantage précisée, par exemple avec des analyses de coûts/bénéfices plus poussées. Il est également nécessaire de tester/valider ces résultats en mettant en œuvre ces leviers *in situ* et en comparant les performances obtenues à celles de vergers témoins utilisant une protection phytosanitaire. Ce travail est actuellement en cours sur pêche-nectarine au sein du projet DEPHY EXPE EcoPêche. Ceci permettra d'établir si ces leviers permettent de se substituer, totalement ou en partie, aux pesticides.

- A quelle échelle déployer les leviers mobilisés : à l'échelle du verger ou du bassin de production ?

L'intérêt (voire la nécessité) de déployer les leviers de gestion des BA à l'échelle du bassin de production dépend de leur mode d'action et du comportement et des traits de vie du BA. Le déploiement à l'échelle du bassin de production n'est vraisemblablement pas nécessaire pour les leviers qui visent à réduire la sensibilité du fruit (Ex : gestion des dates de récolte, pilotage de la croissance du fruit par l'irrigation ou l'éclaircissage). Par contre, pour les leviers qui agissent sur la dynamique des populations de BA (Ex. couverture du sol et récoltes sanitaires), un déploiement à l'échelle du bassin de production peut s'avérer utile si l'importance de la dynamique locale du BA vs. la colonisation par des individus exogènes au verger est faible. L'échelle de déploiement à privilégier sera donc différente selon le type de levier mobilisé et le BA ciblé :

- Pour les CdF, les résultats de simulations montrent que la synchronisation de la floraison couplée à une couverture du sol perd en efficacité quand la pression exogène du BA est forte. Or ces mêmes simulations suggèrent que la pression exogène des CdF peut avoir une contribution non négligeable dans leur dynamique, d'autant plus que ce BA a de

fortes capacités de dispersion. Dans ce cas, une gestion plus globale à l'échelle du bassin de production aurait un intérêt pour amplifier l'efficacité du levier de gestion mobilisé ;

- Pour la moniliose, le modèle arrive à bien prédire les infections observées en fonction des pratiques et des conditions climatiques, et en ne considérant que le niveau d'inoculum primaire et le développement de la maladie dans le verger. Ceci suggère que les processus de colonisation passive du verger ont peu d'impact, au moins sur les deux années d'observation considérées dans notre étude. Dans ces conditions, la maladie peut être relativement bien gérée à l'échelle du verger par les leviers de gestion mobilisés, qui agissent à la fois par atténuation de la culture et par limitation du développement du BA. Afin de pouvoir généraliser (ou non) ce résultat, il serait important d'évaluer la variabilité interannuelle de la colonisation passive du verger par la moniliose ;
- Pour les MdF, la gestion des récoltes peut se raisonner à l'échelle de la parcelle puisque ce levier mobilise une stratégie d'évitement. Par contre pour l'élimination précoce des organes contaminés par des récoltes sanitaires, du fait du mode d'action du levier qui vise à réduire les dynamiques du BA et de la forte capacité de dispersion du BA, une gestion à l'échelle du bassin de production devrait être préconisée pour amplifier l'efficacité du levier gestion mobilisé.

2.2 Freins et opportunités à l'adoption des leviers de gestion des bioagresseurs alternatifs aux pesticides et recommandations auprès des gestionnaires publics

- o Feins et opportunité à l'adoption des leviers mobilisés du point de vue des utilisateurs finaux

Même s'il n'y a pas encore eu de restitution des résultats et d'interactions formelles avec les utilisateurs finaux, certains échanges préalables ainsi que les résultats déjà acquis permettent de faire un premier bilan des freins et opportunités potentiels à l'adoption des leviers de gestion des BA alternatifs aux pesticides :

- La substitution de traitements phytosanitaires par les leviers de gestion alternatifs est généralement plus coûteuse (surcoûts liés à un investissement dans du matériel ou à une augmentation du temps de conduite du verger) ;
- Pour les indicateurs d'évaluation (cas de la mangue), il y a un fort consensus sur les indicateurs de rendement commercialisable (77%), revenu (92%), perception du consommateur vis-à-vis de la qualité visuelle du fruit (92%) et des pratiques éco-responsables (69%), présence d'auxiliaires (85%), et pénibilité (77%) – mais les indicateurs relatifs d'une part à la pollution environnementale liée aux traitements phytosanitaires (50%) et d'autre part à la qualité gustative des fruits (8-38%) ont finalement moins d'importance du point de vue des producteurs. Ceci peut se traduire par une faible motivation à mobiliser des pratiques éco-responsables s'il n'y a pas d'obligation ou de retours sur investissement ;
- Sur la base d'un entretien préliminaire avec deux producteurs de mangue de profils différents, des freins potentiels à l'adoption de leviers alternatifs tels que la couverture du sol par une bâche et la récolte des fruits à un stade de maturité précoce, ont été identifiés. Ces freins peuvent être de différente nature :
 - Economiques (Ex : coût de la bâche et de la main-d'œuvre) ;
 - Techniques ou matériels (Ex : besoin de moyen technique pour identifier facilement le stade vert-mature ou de chambre froide pour conserver les fruits s'ils sont récoltés à des stades de maturité précoce) ;
 - Liés à la stratégie de commercialisation des fruits de l'exploitation (Ex : demande du marché en fruits murs ou en fruits de qualité) ;
 - Liés à des facteurs qualitatifs tels que la pénibilité du travail (Ex : manipulation des bâches).

Il faudrait toutefois poursuivre la démarche de co-conception pour avoir davantage de retours de la part des producteurs sur les leviers de gestion des BA proposés, et ainsi dégager une vision des producteurs qui soit plus complète.

Par ailleurs, nous avons parfois encore peu de recul sur les conditions d'efficacité de certains leviers (les leviers sont-ils efficaces dans toutes les conditions pédoclimatiques ou seulement certaines ?), ce qui peut freiner leur appropriation par les producteurs. D'autre part, pour certains leviers comme l'irrigation, il serait nécessaire d'établir des règles de décision pour leur mise en œuvre opérationnelle sur le terrain (quelle intensité de la réduction, à quel moment, pendant combien de temps ?).

- Recommandations auprès des gestionnaires publics pour faciliter l'adoption des leviers de gestion des BA alternatifs aux pesticides

L'ensemble de ces résultats donnent des indications sur les règles de gestion et de décision des producteurs qui combinent à la fois leurs objectifs économiques, leurs contraintes personnelles, ainsi que les contraintes de structure de l'exploitation et du marché. Ils permettent alors d'identifier des voies qui pourraient potentiellement favoriser l'adoption des leviers de gestion des BA alternatifs aux pesticides par les producteurs :

- Instruments techniques et formations : mobilisation de la recherche et des instituts techniques dans l'organisation de formations techniques ou le développement d'outils pour mieux accompagner l'appropriation et l'utilisation des leviers de gestion des BA (Ex. outils basés sur la fluorescence ou NIRS pour aider à mieux identifier les stades de maturité des fruits) ;
- Instruments économiques et politiques publiques : proposer des aides pouvant inciter à lever certaines contraintes, avec par exemple des subventions pour l'investissement dans du matériel (Ex. bâches) ou l'adoption de pratiques éco-responsables, et sanctionner des pratiques non autorisées dans le cadre de l'évolution réglementaire des usages phytosanitaires ;
- Marché et commercialisation : inciter à une meilleure visibilité et valorisation marchande de la qualité sanitaire – labels « zéro pesticides », cahier des charges HVE – et/ou gustative des produits, à l'instar de certains cahiers des charges fixant par exemple un degré Brix minimal ou du cahier des charges Agriculture Biologique. Une telle valorisation est nécessaire pour compenser les surcoûts de production de certains leviers de gestion des BA alternatifs aux pesticides et les rendre ainsi plus « compétitifs » par rapport aux itinéraires de référence.

Références bibliographiques :

Lescourret F., Moitrier N., Valsesia P., Génard M. (2011). QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. *Trees-Struct. Funct.* 25: 519–530.

Pissonnier S. (2017). Comprendre et accompagner l'évolution des stratégies de conduite des vergers dans les exploitations arboricoles. Application à la protection phytosanitaire de la pomme en France. Montpellier : Montpellier SupAgro, 182 p. Thèse de doctorat : Ecologie fonctionnelle et sciences agronomiques : Montpellier SupAgro.