



## ECOVERGER

**Conception d'itinéraires techniques économes en pesticides en vergers guidée par les contraintes et les objectifs des agriculteurs. Une approche par modélisation appliquée au pêcher et au manguier.**

Designing management scenarios with low pesticide inputs for orchards while accounting for farmers' constraints and objectives. A modeling approach applied to peach and mango crops

Programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides  
APR 2014 « Résistances et pesticides : Résister aux bioagresseurs, vaincre les résistances au changement pour réduire les risques »  
Rapport final - Octobre\_2019

CIRAD - UPR HortSys  
Campus International de Baillarguet  
34398 Montpellier Cedex 5

Isabelle GRECHI  
CIRAD – UPR HortSys  
Station Bassin Plat - BP180  
97455 Saint Pierre Cedex  
isabelle.grechi@cirad.fr

Date : 31/10/2019

N° de contrat : XXXXXX

Date du contrat : 26/10/2015

**Action pilotée par le Ministère chargé du développement durable, avec l'appui financier de l'Office national de l'eau et des milieux aquatiques, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du Plan Ecophyto**

## Table des matières

Synthèse .....	4
Contexte général .....	6
Objectifs généraux du projet.....	6
Quelques éléments de méthodologie (et éventuelles difficultés rencontrées) .....	7
Résultats obtenus.....	9
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques, valorisation...	16
Partenariats mis en place, projetés, envisagés .....	18
Pour en savoir plus (quelques références).....	18
Liste des opérations de valorisation issues du contrat (articles de valorisation, participations à des colloques, enseignement et formation, communication, expertises...) .....	20
Résumés .....	26
Résumé court.....	26
Résumé long .....	26
Mots-clés.....	27
Abstract .....	28
Key words .....	29
Rapport scientifique.....	30
Annexe : textes des publications.....	31
Publications scientifiques parues .....	31
Publications scientifiques à paraître .....	31
Publications scientifiques prévues.....	31
Annexe : partie confidentielle.....	33

# SYNTHESE

---

## **Projet ECOVERGER**

**Conception d'itinéraires techniques économes en pesticides en vergers guidée par les contraintes et les objectifs des agriculteurs. Une approche par modélisation appliquée au pêcher et au manguiier.**

**Programme Evaluation et réduction des risques liés à l'utilisation des Pesticides**

**APR 2014 « Résistances et pesticides : Résister aux bioagresseurs, vaincre les résistances au changement pour réduire les risques »**

Responsable scientifique :

**Isabelle GRECHI<sup>1,3</sup>**

Autres partenaires scientifiques bénéficiaires :

**Daniélé BEVACQUA<sup>2</sup>, Julie BORG<sup>2</sup>, Michel GENARD<sup>2</sup>,  
Françoise LESCOURRET<sup>2</sup>, M. Mahmoud MEMAH<sup>2</sup>, Thierry MICHELS<sup>1,3</sup>,  
Frédéric NORMAND<sup>1,3</sup>, Laurent PARROT<sup>1,3</sup>, Daniel PLENET<sup>2</sup>,  
Alain RATNADASS<sup>1,3</sup>, Gilles VERCAMBRE<sup>2</sup>**

**<sup>1</sup> CIRAD - UPR HortSys**

**<sup>2</sup> INRA - UR PSH**

**<sup>3</sup> Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier**

## En français

---

### CONTEXTE GENERAL

L'agriculture d'aujourd'hui est confrontée à un challenge majeur : satisfaire des besoins alimentaires croissants de la société, tout en réduisant les nuisances causées à l'environnement. Les fruits sont des produits de haute qualité nutritionnelle qui constituent une composante importante de l'alimentation et de la santé humaine, et peuvent ainsi contribuer à la sécurité alimentaire dans sa dimension qualitative. Les productions fruitières sont cependant confrontées à de fortes pressions parasites qui peuvent conduire à des pertes de récolte importantes. Ces pertes correspondent à une baisse du rendement et/ou à un déficit de qualité des fruits, et peuvent générer des pertes économiques pour les producteurs. L'essentiel des dommages en arboriculture fruitière sont causés par les bioagresseurs attaquant les fleurs ou les fruits. Même si les producteurs mobilisent de plus en plus de méthodes alternatives aux pesticides, la protection des vergers repose encore beaucoup sur la lutte chimique (utilisée en préventif, en curatif ou en complément des méthodes alternatives). La sécurité sanitaire des produits alimentaires est une autre composante importante de la sécurité alimentaire. La question des impacts négatifs des pesticides sur la santé humaine et les écosystèmes suscite des inquiétudes dans l'opinion publique et constitue une préoccupation désormais inscrite dans les agendas politiques. Ainsi, l'arboriculture fruitière doit faire face à de fortes exigences de la part de la société et des pouvoirs publics pour limiter les impacts de ses modes de production sur la santé humaine et sur l'environnement et améliorer la qualité nutritionnelle, gustative et sanitaire de ses produits. Une redéfinition des pratiques agricoles s'impose pour inventer des systèmes de production de fruits de qualité, plus économes en pesticides et économiquement performants.

Dans ce contexte, la recherche est sollicitée sur sa capacité à opérer cette conversion. En d'autres termes, elle est sollicitée pour répondre à la question scientifique ainsi formulée : *Comment concevoir des systèmes de culture innovants reposant sur une protection des cultures respectueuse de l'environnement (c'est à dire économes en pesticides), capables d'assurer une production suffisante en quantité et en qualité, et potentiellement adoptables par les producteurs ?*

### OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Dans le cadre du projet, cette question de recherche a été abordée sur les systèmes fruitiers. L'objectif était de développer une démarche et des outils d'aide à la co-conception de solutions techniques en vergers, évaluées sur leur capacité à limiter le développement et les dommages des bioagresseurs et à satisfaire aux obligations d'efficacité agronomique, de viabilité économique et de durabilité. La conception assistée par modèle a été retenue comme voie méthodologique privilégiée.

La question de recherche a été déclinée sur deux cas d'étude : le pêcher en région tempérée dans le sud-est de la France et le manguier (variété Cogshall) en région tropicale à l'île de la Réunion. La proposition ciblait plus spécifiquement des bioagresseurs d'importance économique pour ces deux cultures car pouvant induire de fortes pertes de récolte: la pourriture brune (ou moniliose) sur pêcher et la cécidomyie des fleurs et les mouches des fruits sur manguier.

Nous avons fait l'hypothèse que des méthodes de contrôle cultural et de lutte physique permettent, dans certaines conditions d'application : i) d'augmenter la résistance des vergers vis-à-vis des bioagresseurs en réduisant, au moins partiellement, leur développement, leur incidence ou la contamination de la culture; ii) et de diminuer la dépendance des vergers vis-à-vis des pesticides, tout en maintenant un niveau de production suffisant en quantité et en qualité. Les méthodes alternatives proposées dans le projet combinent différents leviers d'actions. Sur manguier, la taille est une pratique candidate pour synchroniser la phénologie des arbres. Synchroniser la floraison des arbres à l'échelle parcellaire ou infra-parcellaire constitue une piste intéressante pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires car cela permettrait de réduire la fenêtre de sensibilité des arbres aux cécidomyies des fleurs et aux mouches des fruits, voire de réduire l'impact des bioagresseurs par un effet de dilution. Une récolte plus précoce des fruits est une autre stratégie d'évitement qui permet de réduire l'exposition de fruits sensibles aux mouches mais qui peut, *a contrario*, impacter négativement la qualité du fruit. Sur pêcher, l'irrigation et l'éclaircissage des fruits sont des pratiques candidates pour réduire la génération des fissures cuticulaires et rendre les fruits plus résistants à la moniliose (stratégie d'atténuation). Enfin, le ramassage des fruits infestés et le paillage du sol sont considérés en vergers de manguiers et de pêchers pour leur action sur les infections primaires (réduction de l'inoculum) et secondaires (réduction de la multiplication des bioagresseurs). Les échelles considérées sont celles du verger et du cycle de production annuel. Ces échelles ont été choisies car les méthodes alternatives ciblées sont des pratiques culturales raisonnées et mises en œuvre annuellement à l'échelle de l'arbre et/ou du verger.

*In fine*, l'ensemble des résultats acquis devront permettre d'identifier des solutions techniques permettant de réduire l'incidence des bioagresseurs tout en maintenant une production en qualité et en quantité suffisante. A terme, la démarche et les outils développés seront mobilisés pour concevoir des « profils candidats » d'itinéraires (ou solutions) techniques économes en pesticides en vergers, dans une perspective à terme d'évaluation *in situ* et de mise en œuvre opérationnelle de ces solutions.

#### **QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)**

Le raisonnement des pratiques nécessite une vision intégrée et systémique pour laquelle la modélisation offre un cadre méthodologique adapté et complémentaire à l'expérimentation. La conception assistée par modèle a été choisie comme voie méthodologique privilégiée. Par ailleurs, l'implication des utilisateurs finaux dans la démarche de conception a été favorisée autant que possible car elle est susceptible de les rendre moins résistants aux solutions proposées. La démarche était structurée en quatre tâches :

##### Tâche 1-Fonctionnement biotechnique

La Tâche 1 visait à acquérir des connaissances et des données sur le fonctionnement biotechnique des systèmes arbre-bioagresseurs-pratiques pour les modèles biologiques retenus, par des revues bibliographiques et des expérimentations. Il s'agissait notamment d'identifier les principaux processus en jeu dans le fonctionnement de ces systèmes et d'évaluer l'efficacité des méthodes alternatives proposées à réduire les dommages des bioagresseurs, ainsi que leur(s) effet(s) potentiel(s), désirable(s) ou indésirable(s), sur le fonctionnement de l'arbre et la production.

## Tâche 2 - Déterminants des pratiques & indicateurs

La Tâche 2 visait à acquérir des connaissances et des données sur les déterminants des pratiques, les profils de production et les critères d'évaluation des systèmes par des approches participatives mobilisant les producteurs (ou des experts de la filière), ainsi que des expertises existantes. Les attendus étaient des typologies des pratiques et des stratégies des producteurs, ainsi qu'un jeu d'indicateurs co-construit avec les producteurs (ou les experts de la filière) pour mieux appréhender la manière dont ils évaluent les itinéraires techniques. Il s'agissait également d'identifier les règles de gestion et de décision qui guident les choix techniques des producteurs, afin de mieux appréhender les contraintes et les leviers de production, et les freins potentiels à l'adoption des innovations techniques.

## Tâche 3-Modélisation

La Tâche 3 visait à développer un cadre de modélisation sur la base des connaissances acquises dans les précédentes Tâches, pour être ensuite mobilisé pour la conception. La démarche de conception assistée par modèle d'itinéraires techniques en verger, dans un contexte de réduction de la dépendance aux pesticides, nécessite de disposer d'un modèle biotechnique qui représente les processus impliqués dans la régulation des bioagresseurs et l'élaboration du rendement et de la qualité des fruits, et leur pilotage par des pratiques. Le modèle doit aussi prédire des indicateurs de performance permettant d'évaluer les solutions proposées. Ce cadre de modélisation comprendra un modèle de culture (tel que le modèle QualiTree développé sur pêcher) et des modèles d'interaction arbre-bioagresseurs qui lui seront couplés.

## Tâche 4-Conception.

La Tâche 4 visait à évaluer des itinéraires (ou solutions) techniques et concevoir des « profils candidats » d'itinéraires (ou solutions) techniques économes en pesticides en vergers de mangue et de pêche-neктarine. Deux approches sont envisagées. Le cadre de modélisation issu de la Tâche 3 est d'une part utilisé pour évaluer par simulation des scénarios techniques prédéfinis. D'autre part, il est couplé à des algorithmes d'optimisation multicritères, permettant de générer plusieurs scénarios techniques parmi lesquels les « profils candidats » les mieux adaptés à chaque profil de production peuvent être sélectionnés. Ce cadre de modélisation aura vocation à accompagner la réflexion autour de la démarche de conception de solutions techniques à destination des producteurs. Les évaluations des scénarios prédéfinis et les solutions candidates retenues seront ainsi soumises aux acteurs au cours de restitutions.

Les principales difficultés qui ont été rencontrées au cours du projet sont :

- Des aléas climatiques, à l'origine d'une absence de floraison des manguiers sur deux vergers expérimentaux suivis en 2017 ayant compromis les essais et nécessité de les reconduire en 2018.
- L'arrêt de travail à partir de mai 2018 d'un chercheur en charge de la Tâche 2 sur manguiers, impactant l'intégration des résultats de la Tâche 2 dans la démarche de conception.
- Un délai dans le transfert méthodologique prévu dans le cadre de la Tâche 2, qui prévoyait de transposer sur pêcher la démarche mise en œuvre sur manguiers.

- L'interdépendance des différentes Tâches, dont la mise en œuvre dépendait de l'avancement des Tâches précédentes.

## RESULTATS OBTENUS

Les principaux résultats obtenus sont présentés pour chacune des Tâches du projet.

### Tâche 1-Fonctionnement biotechnique

Sur **manguier**, les résultats suivants ont été obtenus à partir d'expérimentations mises en place chez des producteurs de mangues et en stations expérimentales :

- i. L'infestation des mangues en verger, essentiellement par *B. zonata*, augmente avec le stade de maturité des fruits. Le taux d'infestation est inférieur à 4% jusqu'au stade 'point-jaune' précoce, tandis qu'il augmente à 10-11% au stade 'point-jaune' avancé et atteint 14-16% à maturité. Par ailleurs, les résultats tendent à montrer qu'il n'existe pas de relation étroite entre le taux d'infestation des mangues par les mouches des fruits et l'abondance, absolue ou ramenée à la ressource disponible, des mouches des fruits dans les vergers. L'établissement de *B. dorsalis* à la Réunion, courant 2017, a changé ce contexte parasitaire. En 2018, les mangues étaient exclusivement infestées par *B. dorsalis*. Des tests ont montré que *B. dorsalis* tend à piquer les fruits encore plus tôt et plus intensément que *B. zonata*.
- ii. La taille pratiquée après la récolte permet de stimuler et synchroniser la croissance végétative, au niveau des points de taille et à distance dans la canopée. Mais contrairement à notre hypothèse, la synchronisation de la croissance végétative par la taille ne conduirait pas à une synchronisation de la floraison. La réponse florifère à la taille à l'échelle d'une canopée est très complexe et dépend des caractéristiques des unités de croissance terminales et de leurs proportions respectives. Ces résultats ouvrent toutefois de nouvelles pistes de recherche. Puisque la taille stimule le débourrement des bourgeons végétatifs, il serait aussi opportun de tester la taille au tout début de la floraison afin de stimuler et synchroniser le débourrement des bourgeons florifères.
- iii. La couverture du sol par une bâche tissée ou un enherbement spontané haut permet de réduire les populations de cécidomyies des fleurs par 5 et 3, respectivement, par rapport à un sol fauché. Cette réduction intervient dès la première année sur sol bâché. Au bout de deux ans, les populations d'adultes émergeant de larves diapausantes sont également réduites par la couverture du sol. Par ailleurs, la couverture du sol, et notamment la bâche, n'a pas eu *a priori* un quelconque effet indésirable sur la dynamique de floraison, la température ou l'activité biologique du sol.
- iv. Des résultats préliminaires ont mis en évidence un effet de la couverture du sol sur les infestations par les mouches des fruits des jeunes fruits avortés, qui constituent une source de multiplication précoce du ravageur. L'infestation de ces fruits est favorisée par l'enherbement haut tandis qu'elle est réduite sur le sol fauché et quasiment nulle sur le sol bâché.

Sur **pêcher**, une part importante des connaissances et des données ont été préalablement acquises par des expérimentations menées dans le cadre du projet CLIF. Les résultats suivants ont été obtenus à partir de l'analyse de ces données :

- i. La densité de spores de *Monilinia* spp transportées dans l'air et les infections secondaires sont proportionnelles au nombre de fruits infectés dans le verger.
- ii. Les fruits ayant eu une croissance rapide sont plus sensibles à l'infection que ceux ayant eu une croissance lente. La sensibilité à l'infection par la pourriture brune du fruit est liée à sa croissance par une relation logistique.
- iii. En verger, la plus forte incidence de pourriture brune a été observée pour un éclaircissage modéré des arbres. Il est suggéré qu'en l'absence d'éclaircissage, les fruits sont moins sensibles à l'infection car leur taux de croissance est faible. Avec un éclaircissage intense, bien que les fruits soient plus sensibles à l'infection car leur taux de croissance est important, il est suggéré que la probabilité d'infection par contact des fruits est réduite par la faible densité de fruits.
- iv. La pourriture brune est très sensible aux conditions climatiques. La diffusion de la maladie est réduite en l'absence de conditions favorables (i.e., occurrence de précipitations et température comprise entre 22 et 26°C) pendant la période de sensibilité des fruits.

## Tâche 2 - Déterminants des pratiques & indicateurs

Sur **manguier**, les résultats suivants ont été obtenus à partir des enquêtes et ateliers conduits auprès de producteurs de mangues :

- i. Une typologie des exploitations a été établie sur la base d'un panel de 28 exploitations. Elle est composée de quatre types de stratégies d'exploitation nommés : 'les spécialisées', 'les diversifiées pivot mangue', 'les diversifiées mangue secondaire' et 'les agroécologues pluriactifs', caractérisés par (i) le niveau de diversification du système de production, (ii) la place qu'y occupe la composante 'mangue', (iii) la facilité à mobiliser de la main d'œuvre sur cette composante et (iv) l'orientation agro-écologique du système
- ii. Une grille d'évaluation des itinéraires techniques sur verger de mangue a été co-construite à partir d'enquêtes réalisées auprès de 13 producteurs puis d'un atelier de validation organisé avec un collectif restreint de 6 producteurs. Cette grille comprend 56 variables réparties au sein de 22 indicateurs, eux-mêmes répartis entre les trois composantes de la durabilité. Les variables qui font consensus (i.e. citées par plus de 85% des producteurs) sont : la présence d'auxiliaires, la marge brute, le prix de vente au producteur et la qualité du fruit.
- iii. Les règles de gestion et de décision des producteurs combinent à la fois les objectifs économiques de l'agriculteur, ses contraintes personnelles, ainsi que les contraintes de structure de l'exploitation et du marché. Sur la base d'un entretien avec deux producteurs, des freins potentiels à l'adoption d'innovations telles 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 économiques (coût de la bâche et besoin en main-d'œuvre), techniques ou matériels (moyen technique pour identifier facilement le stade vert-mature ou chambre froide pour conserver les fruits), liés à la stratégie de commercialisation des fruits (en partie guidée par la demande du marché en fruits murs et de qualité) ou au contexte environnemental de l'exploitation. Les innovations concernant la synchronisation de la floraison par la taille,

l'enherbement et la récolte prophylactique précoce ont été jugées pertinentes et cohérentes avec leur stratégie.

- iv. Des divergences possibles entre les perceptions des agriculteurs pour certaines techniques, comme par exemple un impact *a priori* négatif du bâchage sur l'activité biologique du sol, et les résultats de la recherche démontre l'importance de la circulation des connaissances entre les acteurs pour la co-construction des innovations techniques.

Sur **pêcher**, une part importante des connaissances et des données ont été préalablement acquises sur un réseau d'expérimentation pluriannuel suivi dans le cadre du projet EcoPêche. Elles ont aussi été complétées par des données d'enquêtes auprès d'experts de la filière pêche-nectarine. Les résultats suivants ont été obtenus à partir de l'analyse de ces données

- i. Les leviers d'action disponibles et en cours d'évaluation au sein du réseau d'expérimentation sur les systèmes alternatifs à l'usage des produits phytopharmaceutiques sont relativement nombreux. Les systèmes sous cahier des charges de l'agriculture biologique (BIO) et les systèmes de culture économes en pesticides (ECO, objectif de réduction de 50% des IFT) utilisent significativement plus de leviers d'action que les systèmes de référence(REF).
- ii. Les principaux leviers d'action mobilisables pour gérer la moniliose, en dehors de la lutte chimique, appartiennent à la catégorie des méthodes culturales et combinent différentes méthodes telles que la prophylaxie pour supprimer les sources d'inoculum primaire (momies, chancres) ou de contaminations secondaires, le pilotage de l'irrigation pour maîtriser les rythmes de croissance des fruits, la conduite des arbres pour favoriser l'aération du verger et des fruits, la gestion de la fertilisation azotée pour maîtriser la vigueur, ou la qualité de l'éclaircissage pour éviter les contacts entre fruits.
- iii. Une typologie des exploitations a été établie sur la base d'un panel de 13 experts de la filière pêche-nectarine. Elle est composée de quatre types de profil de production : 'production fruitière intégrée', 'production raisonnée 1', 'production raisonnée 2' et 'agriculture biologique', caractérisés par (i) les stratégies de l'exploitation et ses critères de production, et (ii) les leviers de gestion de la moniliose et les règles de décision associées. Les critères de production et les leviers de gestion de la moniliose ont été hiérarchisés pour chaque profil de production.

A court terme, la poursuite des activités viseront les améliorations suivantes

- i. Les critères et les leviers, et leurs seuils d'acceptation et leur pondération qui permettent de différencier les profils de production, seront validés lors d'un atelier de restitution des résultats auprès des experts (prévu en décembre en 2019).
- ii. Les freins potentiels à l'adoption de nouvelles pratiques seront abordés lors de d'une réunion de restitution des résultats avec les experts mobilisés et des producteurs.

### Tâche 3-Modélisation

Sur **manguier**, les activités de modélisation ont été menées en appui au projet COSAQ et s'appuient sur les connaissances et données acquises dans le cadre de la Tâche 1. Elles ont permis de développer les modèles suivants :

- i. Un modèle structure-fonction simulant le développement et l'élaboration du rendement du manguier ('V-Mango') a été développé pour la mangue Cogshall, pour des arbres non taillés. Ce modèle permet de simuler et de représenter sous forme de maquettes 3-D le développement végétatif et reproducteur de l'arbre et la croissance des fruits et leur qualité à la récolte. Les effets de la taille sur la croissance végétative ont été intégrés au modèle 'V-Mango'. Pour cela, les lois de probabilité pour les processus élémentaires de la croissance végétative ont été conditionnées par des variables décrivant des traits architecturaux des axes et par la taille, caractérisée par son intensité et sa sévérité. Ce modèle permet d'analyser les effets de la taille sur la croissance végétative, aux niveaux structurel et temporel et à l'échelle plus globale de l'arbre, en simulant des tailles virtuelles sur la structure 3D de l'architecture d'un arbre adulte obtenue par digitalisation.
- ii. Un modèle manguier-mouches des fruits a été développé en couplant une fonction définissant la probabilité d'une mangue d'être infestée en fonction de son état de maturité, à un modèle de croissance et d'élaboration de la qualité des fruits développé à l'échelle de la branche fruitière (qui constitue un sous-modèle du modèle V-Mango). Une relation empirique a été établie pour prédire le degré Brix des mangues à maturité en fonction de leurs teneurs en sucres solubles et en amidon à la récolte. Le degré Brix est un indicateur de qualité facile à mesurer et reconnu dans la filière fruitière. Comme il n'a pas été mis en évidence de relation entre l'infestation des mangues et l'abondance des mouches des fruits dans les vergers (appréciée par piégeage), la pression de mouches n'a pas été intégrée comme facteur explicatif dans ce modèle.
- iii. Un modèle manguier-cécidomyie des fleurs représentant le cycle de développement du ravageur a été développé. La population de cécidomyies des fleurs est structurée en plusieurs catégories d'individus : i) les femelles exogènes au verger, ii) les femelles endogènes au verger qui émergent des larves en diapause et des larves entrées en pupaison, et iii) les larves de dernier stade qui s'éjectent des inflorescences pour s'enfouir dans le sol et entrer en diapause ou en pupaison. Le modèle décrit la dynamique de ces différentes catégories d'individus dans un verger au cours de la floraison, en utilisant les dynamiques de floraison observées en entrée. L'effet de la couverture du sol et de la disponibilité en ressources (ici les inflorescences) sur la dynamique des cécidomyies des fleurs est modélisé en considérant, respectivement, une dépendance du taux de survie des larves qui s'enfouissent dans le sol et des adultes qui en émergent à la couverture du sol, et une réduction de la capacité de reproduction des femelles en situation de compétition vis-à-vis des inflorescences. L'analyse du modèle montre que plusieurs types de solutions, caractérisés par des processus différents (comme la contribution des femelles exogènes à la dynamique du ravageur) peuvent reproduire une même dynamique observée. Par ailleurs, il a permis de modéliser et quantifier un potentiel effet « saisonnalité » qui se traduit par une diminution de la reproduction des femelles en fin de saison, mais ce résultat ouvre des questions sur les processus biologiques réellement en jeu.

A terme, la poursuite des activités de modélisation viseront les améliorations suivantes :

- i. Les effets directs ou indirects (via la croissance végétative) de la taille sur la floraison et la fructification seront intégrés au modèle V-Mango.
- ii. L'effet de la couverture de sol sur l'évolution du stock de larves diapausantes dans le sol sera intégré au modèle manguier-cécidomyie des fleurs pour considérer de façon explicite la dimension pluriannuelle.
- iii. Un modèle de dynamique des inflorescences qui décrit leur développement naturel et la mortalité induite par les cécidomyies des fleurs, a été développé sur une précédente version du modèle manguier-cécidomyie des fleurs. Il sera couplé au modèle actuel et re-calibré.
- iv. Les modèles manguier-ravageurs seront couplés au modèle V-Mango. Pour le modèle manguier-mouches des fruits, qui a été développé à partir d'un sous-modèle du modèle V-Mango, le couplage est en partie réalisé. Le modèle manguier-cécidomyie des fleurs utilisera les dynamiques d'apparition des inflorescences prédites par le modèle V-Mango comme variables d'entrée. Les dégâts (nombre d'inflorescences mortes) prédits par ce modèle seront alors déduits du nombre d'inflorescences prédit par le modèle V-Mango.

Dans l'immédiat, la démarche de conception de solutions techniques sera engagée sur la base des deux modèles manguier-ravageurs non couplés. Le modèle manguier-mouches des fruits peut être utilisé séparément du modèle V-Mango, en définissant les variables d'entrée du modèle (environnement lumineux, nombre de feuilles, nombre de fruits) par tirage aléatoire dans des lois de distribution empiriques. Le modèle manguier-cécidomyies des fleurs sera utilisé en simulant des dynamiques de floraison virtuelles, puisque l'effet de la taille sur la floraison n'a pas encore été intégré au modèle V-Mango.

Sur **pêcher**, les activités de modélisation menées dans le projet ont permis de développer les modèles suivants :

- i. Un modèle épidémiologique a été développé pour le système pêche-pourriture brune. La population de fruits est structurée en trois catégories de fruits, les fruits 'Susceptible', 'Exposed' et 'Infected'. Il s'agit d'une variante du modèle SEI classiquement utilisé en épidémiologie mais pour laquelle l'état d'infection des fruits est considéré comme irréversible. L'évolution des fruits entre les classes 'Susceptible' et 'Exposed' est modélisée comme une fonction de la masse du fruit, qui représente la dynamique d'évolution de la sensibilité des fruits à la pourriture brune. Le modèle ainsi développé permet d'identifier les mécanismes prépondérants dans le développement de la maladie et les pertes de récolte. Il a ainsi été montré que la récolte et la destruction des fruits infectés pendant la période de croissance et de maturation des fruits, les récoltes sanitaires en hiver, et le contrôle de la charge en fruits des arbres pouvaient contrôler l'incidence de la pourriture brune, en association avec ou à la place de fongicides.
- ii. Le modèle épidémiologique a été complété en intégrant l'effet de variables climatiques (notamment via un effet des événements pluvieux sur le taux d'infection des fruits et de la température sur le taux de mortalité des spores). L'intégration de ces variables climatiques dans le modèle permet de mieux prédire la progression de la pourriture brune dans le verger. Un tel modèle

peut être utilisé pour étudier l'effet du changement climatique sur le l'incidence de la maladie et la production.

- iii. Le modèle épidémiologique a été couplé au modèle QualiTree, modèle écophysologique qui intègre l'effet de pratiques culturales sur la croissance individuelle des fruits et l'élaboration de leur qualité. Le modèle couplé QualiTree-moniliose permet de prédire le rendement réalisé en réponse aux pratiques, en prenant en compte leur effet sur le fonctionnement de l'arbre et les dégâts de la maladie. Les courbes de croissances (ou de surface des fissures cuticulaires) des fruits prédites par le modèle QualiTree sont utilisées comme entrées du modèle épidémiologique qui indique alors les pertes en rendement associées aux fruits simulés. La dynamique d'évolution de la charge en fruit (associés à la chute des fruits infectés) et son impact potentiel sur la croissance des fruits est également prise en compte.
- iv. Un modèle complémentaire est actuellement développé pour considérer de façon explicite la dimension pluriannuelle de la croissance végétative et de la production en fruits, afin d'évaluer les conséquences à long terme des pratiques culturales mises en place pour gérer la pourriture brune.

#### Tâche 4-Conception.

Le retard dans l'avancement de la Tâche 3 pour le manguier et la Tâche 2 pour le pêcher a quelque peu impacté la finalisation de la tâche 4.

Sur **manguier**, la démarche mise en œuvre a consisté à tester par simulation les performances « d'innovations techniques » (i.e. des pratiques proposées comme alternatives à l'utilisation de pesticides pour contrôler les ravageurs), sous deux angles : i) biophysique et à l'échelle du verger avec les modèles manguier-ravageurs, et ii) agro-économique et à l'échelle de l'exploitation agricole avec le modèle CoHort (Pissonnier et al. 2019). CoHort est un outil de simulation pour les exploitations fruitières qui évalue les impacts d'un ensemble de pratiques sur les performances économiques, les performances phytosanitaires et l'organisation du travail.

- i. Les résultats des simulations montrent que globalement la synchronisation de la floraison, associée ou non à une couverture de sol, est efficace pour réduire le nombre de larves de cécidomyies dans le verger. Cet effet est cependant plus faible quand les femelles exogènes contribuent fortement à la dynamique du ravageur.
- ii. Les résultats de simulation montrent qu'en récoltant les fruits à un stade de maturité plus précoce, le risque d'infestation des mangues est fortement réduit, tandis que leur qualité est peu impactée. En récoltant un fruit 20 jours avant son abscission, la probabilité d'infestation est en moyenne réduite de 82% tandis que la masse fraîche et le degré Brix ne sont réduits que de 5% en moyenne, par rapport à un fruit qui a mûri sur l'arbre jusqu'à son abscission.
- iii. Les premiers résultats des simulations d'innovations techniques testées sur une exploitation agricole de type « diversifiée pivot mangue », suggèrent, compte tenu de nos connaissances actuelles, de meilleures performances économiques pour la taille visant à synchroniser la floraison et la récolte des fruits à un stade de maturité plus précoce, tandis que le bâchage n'apparaît pas rentable. La substitution de traitements phytosanitaires par les innovations

est cependant coûteuse en main d'œuvre. Quelque soit l'innovation considérée, elle entraîne une augmentation des temps de conduite du verger.

- iv. Les performances simulées par les modèles permettent de renforcer ou lever certains freins potentiels, préalablement identifiés par les producteurs enquêtés (cf. T2). Par exemple, le frein économique est renforcé pour le bâchage, tandis que le frein lié à la stratégie de commercialisation de fruits de qualité est en partie levée pour la récolte à un stade de maturité plus précoce. Enfin, l'ensemble des performances qui ont été simulées pour la taille visant à synchroniser la floraison renforcent l'intérêt de cette innovation.

A terme, les performances des innovations techniques simulées par les modèles biotechniques (qu'il s'agisse des modèles manguier-ravageurs couplés ou non au modèle V-Mango) et le modèle de simulation CoHort, seront restituées auprès des acteurs de la filière et serviront de support de discussion. L'ergonomie du tableur CoHort permet de l'utiliser de façon interactive avec les acteurs, contrairement aux modèles biotechniques (interfaces peu ergonomiques et temps de calcul parfois longs). Il est envisagé d'utiliser une application web interactive (par exemple R-Shiny) pour visualiser de façon simple et ludique les résultats des simulations.

Sur **pêcher**, la démarche mise en œuvre a combiné deux approches : i) la simulation de scénarios techniques prédéfinis à partir du modèle couplé QualiTree-moniliose ; et ii) l'optimisation de scénarios techniques via le couplage du modèle QualiTree-moniliose à un algorithme d'optimisation multicritère.

- i. Les résultats de simulation de scénarios prédéfinis, résultant de la combinaison de différents niveaux de charges en fruits et de régimes d'irrigation, montrent la nature antagoniste des critères performances considérées (masse fraîche, caractère sucré et rendement). Ils suggèrent qu'un stress hydrique modéré en fin de croissance des fruits et une charge modérée permettent de contrôler la maladie, et d'atteindre des revenus par arbre (en unité monétaire) similaires à ceux obtenus en l'absence de maladie.
- ii. Le modèle QualiTree a été couplé à un algorithme d'optimisation multicritère. Des premiers tests visant à optimiser des pratiques sur la base de deux critères (rendement et calibre) ont été réalisés avec succès, faisant ainsi preuve de concept pour valider l'outil et la démarche. A terme, l'outil prendra en compte cinq critères d'évaluation de la production, hiérarchisés selon les stratégies de production, et quatre leviers de gestion de la pourriture. Il permettra alors de générer de nombreux scénarios techniques, parmi lesquels il sera possible de sélectionner les « profils candidats » de scénarios les mieux adaptés à chaque profil.

A terme, il reste à définir certaines valeurs de paramètres pour rendre compte des leviers relatifs à la suppression des fruits pourris avant récolte et à l'application de fongicides, et à mieux prendre en compte les règles de décisions régissant certains leviers (par exemple pour l'application de fongicides ou l'irrigation, qui dépendent de la pression de la maladie et des conditions climatiques). Lorsque les « profils candidats » issus de l'optimisation seront obtenus, une réunion sera planifiée avec les experts de la filière enquêtés pour leur restituer les résultats et discuter des sorties de l'optimisation. Les enquêtés étant majoritairement des personnes de terrain, la restitution dans des réseaux de producteurs sera facilitée.

## IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

### • Implications pratiques :

Sur la base des résultats expérimentaux et des résultats de simulation, il a été montré que :

- La couverture du sol (avec une bâche tissée ou un enherbement haut), permet de réduire les populations de cécidomyies des fleurs et leurs dommages sur les inflorescences du manguiers, sans avoir *a priori* un quelconque effet indésirable sur la floraison du manguiers ou l'activité biologique du sol. La réduction des populations intervient dès la 1ère année sur sol bâché.
- La synchronisation de la floraison permettrait *a priori* de réduire les populations de cécidomyies des fleurs. Les modalités de taille permettant cette synchronisation reste cependant à définir.
- Récolter les mangues à un stade 'vert-mature' ou 'point-jaune' très précoce permet de minimiser le risque d'infestation des mangues Cogshall par les mouches des fruits (essentiellement par *B. zonata*), tout en garantissant une qualité organoleptique des fruits. Cette stratégie est d'autant plus pertinente avec l'établissement récent à la Réunion de *B. dorsalis* qui tend à piquer les fruits encore plus tôt et plus intensément que *B. zonata*.
- La destruction des jeunes fruits en état d'abscission, qui sont très sensibles aux infestations par les mouches des fruits et constituent une source de multiplication précoce du ravageur, peut être facilitée par le fauchage ou la couverture du sol avec une bâche tissée. La bâche tissée à un effet négatif sur la multiplication des mouches sur ces fruits, tandis que l'enherbement haut à un effet positif.
- Les récoltes sanitaires des pêches infectées pendant la période de croissance et de maturation des fruits, les récoltes sanitaires des fruits momifiés et chancres en hiver, un stress hydrique modéré en fin de croissance des fruits et une charge en fruit modérée permettent de contrôler l'incidence de la pourriture brune, en association avec ou à la place de fongicides.

### • Recommandations et limites éventuelles :

Certaines limites aux résultats présentés peuvent être mentionnées :

- Les résultats de simulation du modèle CoHort reposent sur les effets attendus des innovations qui ont été définis par les chercheurs, sur la base de leurs connaissances actuelles acquises par les expérimentations ou les simulations. Ces résultats restent des prévisions, qui seront réactualisés au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles connaissances.
- Les enquêtes auprès des producteurs de pêche ont montré une diversité de pratiques de gestion de la moniliose en agriculture biologique, qui n'est pas totalement représentée dans la typologie. Par ailleurs, la typologie obtenue en considérant la gestion de la moniliose pourrait changer si les stratégies de gestion d'autres bioagresseurs (cloque, pucerons...) étaient considérées.
- Le couplage du modèle QualiTree à l'algorithme d'optimisation permet de prendre en compte la majorité des leviers de gestion de la pourriture brune

identifiés. Cependant, les leviers « aération de l'arbre » et « gestion de la nutrition azotée » ne peuvent être pris en compte pour le moment.

- Les outils *in silico* qui ont été produits sont aux services des scientifiques et sont difficilement transférables aux professionnels de la filière. Comme ils ne disposent pas d'interfaces ergonomiques et que les temps de calcul sont parfois longs, ils sont peu interactifs. Par ailleurs, leur utilisation requiert des compétences de base en programmation. Des applications web interactives et ludiques pour visualiser les résultats de simulations, préalablement réalisées à partir de ces outils, pourraient être plus appropriées.

- **Réalisations pratiques et valorisation :**

Réalisations pratiques :

- Des modèles biotechniques manguier-mouches des fruits, manguier-cécidomyie des fleurs et pêche-pourriture brune,
- Un cadre de modélisation pour la conception de « profils candidats » d'itinéraires techniques en vergers de pêche-nectarine, combinant quatre leviers de gestion de la pourriture brune et évalués sur la base de cinq critères de performance, hiérarchisés selon les profils de production
- 1 page web dédiée au projet permettant de diffuser l'ensemble des livrables: <http://cosaq.cirad.fr/projets/ecoverger>

Actions de formation et enseignement :

- 12 étudiants, en écoles d'ingénieurs ou en Master 2, encadrés lors de stages de césure ou de fin d'étude
- 12h de TP dispensés en BTS 'Gestion & Protection de la Nature' en EPLEFPA
- 2 documents pédagogiques (1 fiche et 1 vidéo) utilisés pour l'école-chercheurs « *L'agroécologie à la croisée des disciplines scientifiques* » organisée par le Cirad et Montpellier SupAgro à la Réunion en 2016

Interactions avec les acteurs de la filière :

- Essais mis en place chez deux producteurs de mangue et au CPEA de l'EPLEFPA de St-Paul ;
- Enquêtes réalisées auprès de 13 à 28 producteurs de mangues, et 13 experts de la filière pêche-nectarine ;
- Ateliers de restitution/validation de résultats avec un collectif de 6 producteurs

Valorisations académiques, pour la diffusion des résultats auprès de la communauté scientifique et des chercheurs :

- 5 publications scientifiques (plus 2 publications à paraître)
- 11 communications scientifiques à des congrès internationaux
- 1 communication à un congrès national
- 1 rapport d'étude

Valorisations non académiques, pour la diffusion des résultats auprès des producteurs, des acteurs de la filière et du grand public :

- 5 comptes rendus d'activité pour la restitution des résultats auprès des acteurs (producteurs de mangue, CPEA, experts de la filière pêche-nectarine) impliqués dans les expérimentations ou les enquêtes
- 3 fiches/posters de vulgarisation des résultats de recherche, dont 2 ont été présentés à la journée de célébration des 30 ans d'expérimentation de l'Exploitation agricole EPLEFPA Forma'Terra, le 4 octobre 2019;
- 1 article de vulgarisation dans le magazine Mag' Réunion : « Qui produit la mangue à la Réunion ? »

### **PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES**

Plusieurs partenariats et collaborations ont été mis en place au cours du projet :

- Réseaux d'acteurs : un réseau de producteurs de mangue et un réseau d'experts de la filière pêche-nectarine
- Etablissement d'enseignement : EPLEFPA de Saint-Paul
- Instituts techniques et centres d'expérimentation : Centre de Production et d'Expérimentation Agricole (CPEA) de l'EPLEFPA de Saint-Paul ; Armefflor (Centre d'Expérimentation de l'Océan Indien)
- Bureau d'étude : Le bureau d'étude de Gally
- Organismes et plateformes de recherche nationaux : INRA, UR Génétique et Amélioration des Fruits et Légumes (GAFL) ; INRA, UR Biostatistiques et processus spatiaux (BioSP) ; CIRAD, UMR Amélioration génétique et adaptation des plantes méditerranéennes et tropicales (AGAP) ; CIRAD, UMR Démarche intégrée pour l'obtention d'aliments de qualité (QualiSud) ; Pôle de Protection des Plantes (3P, IBiSA)
- Organismes de recherche et d'enseignement internationaux : Istituto Zooprofilattico Sperimentale della Lombardia e dell'Emilia Romagna (IZSLER), Italie ; University of Parma (UNIPR), Italie ; Politecnico di Milano, Italie

Plusieurs missions des chercheurs membres du consortium du projet ou de chercheurs partenaires ont permis de renforcer ces collaborations. La plupart de ces collaborations ont fait l'objet de valorisations académiques et non académiques en co-autorat.

### **POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES RÉFÉRENCES)**

- Bellingeri M., Quilot-Turion B., Oliveira Lino L., Bevacqua D. (2018). The Crop Load Affects Brown Rot Progression in Fruit Orchards: High Fruit Densities Facilitate Fruit Exposure to Spores but Reduce the Infection Rate by Decreasing Fruit Growth and Cuticle Cracking. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5 :170.
- Bevacqua D., Quilot-Turion B., Bolzoni L. (2018). A Model for Temporal Dynamics of Brown Rot Spreading in Fruit Orchards. *Phytopathology*, 108: 595-601.
- Bevacqua D., Génard M., Lescourret F., Martinetti D., Vercambre G., Valsesia P., Mirás-Avalos J.M. (2019). Coupling epidemiological and tree growth models to control fungal diseases spread in fruit orchards. *Scientific Reports*, 9: 8519.
- Grechi I., Caillat A., Préterre A-L., Brunet-Lecomte C., Ratnadass A. (2019). Quels leviers pour maîtriser les mouches des fruits et leurs dégâts sur mangue ? Cirad. 1p.

- Marchetti M. (2016). Analyse systémique des exploitations productrices de mangues à La Réunion : identification des déterminants influençant les choix techniques et les changements de pratiques des producteurs pour la co-conception d'itinéraires techniques innovants apportant une alternative aux pesticides – Présentation synthétique des types d'exploitation. Cirad. 8p.
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. (2019). Nature abhors a vacuum: Deciphering the vegetative reaction of the mango tree to pruning. *European Journal of Agronomy*, 104: 85-96.
- Ratnadass A., Brustel L., Briandy A., Billot T., Grechi I. (2019). Quels leviers pour maîtriser les cécidomyies des fleurs et leurs dégâts sur manguier ? Cirad. 1p.

L'ensemble des valorisations du projet sont accessibles à l'adresse suivante :

<http://cosaq.cirad.fr/projets/ecoverger>

**LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)**

**PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES**

Publications scientifiques parues :

- Bellingeri M., Quilot-Turion B., Oliveira Lino L., Bevacqua D. (2018). The Crop Load Affects Brown Rot Progression in Fruit Orchards: High Fruit Densities Facilitate Fruit Exposure to Spores but Reduce the Infection Rate by Decreasing Fruit Growth and Cuticle Cracking. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5 :170. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00170>
- Bevacqua D., Quilot-Turion B., Bolzoni L. (2018). A Model for Temporal Dynamics of Brown Rot Spreading in Fruit Orchards. *Phytopathology*, 108: 595-601. <https://doi.org/10.1094/PHTO-07-17-0250-R>
- Bevacqua D., Génard M., Lescourret F., Martinetti D., Vercambre G., Valsesia P., Mirás-Avalos J.M. (2019). Coupling epidemiological and tree growth models to control fungal diseases spread in fruit orchards. *Scientific Reports*, 9: 8519. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44898-6>
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. (2019). Nature abhors a vacuum: Deciphering the vegetative reaction of the mango tree to pruning. *European Journal of Agronomy*, 104: 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.007>
- Ratnadass A., Grechi I., Graindorge R., Caillat A., Préterre A.L., Normand F. (2019). Effects of some cultural practices on mango inflorescence and fruit pest infestation and damage in Reunion Island: recent progress, on-going studies and future steps. *Acta Horticulturae*, 1244: 159-166. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1244.24>

Publications scientifiques à paraître :

- Grechi I., Saint Crieg L., Ratnadass A., Normand F., Soria C., Brustel L., Amouroux P, Boudon F. The mango tree - blossom gall midge system: toward *in-silico* assessment of management practices. *Acta Horticulturae* (accepté)
- Boudon F., Persello S., Jestin A., Briand A-S., Grechi I., Fernique P., Guédon Y., Léchaudel M., Lauri P-E., Normand N. V-Mango: A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. *Annals of Botany* (révision en cours)

Publications scientifiques prévues :

- Bevacqua D., Vanalli C., Casagrandi R., Gatto M. Climate change and the spread of brown-rot disease in peach orchards: insights from epidemiological model
- Grechi I., Caillat A., Préterre A-L., Ratnadass A. Relating mango infestation by fruit flies with fruit maturity: a step to improve the management of fly damages with harvest timing
- Grechi I., Reyné B., Saint-Crieg L., Memah M.M., Ratnadass A., Normand F., Boudon F.. The mango tree – blossom gall midge system: *in-silico* assessment of its functioning and management
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. How pruning intensities and severities affect mango flowering and fruiting in Cogshall mango trees?
- Ratnadass A., Brustel L., Briandy A., Grechi I. Effect of sol mulching on mango blossom gall midge dynamics and damages to mango inflorescences
- Salvagno P., Melia P., Bevacqua D. Consequences of agronomic practices on

peach cultivars within an annual and multiannual perspective: a simulation study

- Vanalli C., Gatto M., Casagrandi R., Bevacqua D. Climate change and the areal distribution of peach cultivation in France
- Article à portée méthodologique sur le couplage des démarches des Tâches 2 et 4 pour la conception d'itinéraires techniques assistée par modèle en verger de pêcher-nectarine
- Article à portée méthodologique sur la démarche de la Tâche 2 en verger de mangue

#### COLLOQUES

Participations passées à des colloques :

- Bevacqua D., Génard M., Turion-Quilot B., Oliveira Lino L., Mercier V., Lescourret F. (2016a). A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in fruit orchards. HortiModel2016: V International Symposium on Models for Plant Growth, Environment Control and Farming Management in Protected Cultivation. 19-22 September 2016, Avignon, France
- Bevacqua D., Génard M., Turion-Quilot B., Oliveira Lino L., Mercier V., Lescourret F., Bolzoni L. (2016b). A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in stone fruit orchards [poster]. Plant Biology Europe EPSO/FESPB 2016 Congress. 26-30 June 2016, Prague, Czech Republic
- Bevacqua D., Quilot-Turion B., Bolzoni L. (2017). A model for temporal dynamics of brown rot spreading in fruit orchards. XXVII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia, 12-15 September 2017, Napoli, Italy
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. (2017). How different pruning intensities and severities affect vegetative growth processes in "Cogshall" mango trees. XII International Mango Symposium, 10-16 July 2017, Baise, China.
- Ratnadass A., Grechi I., Caillat A., Préterre A.-L., Normand F., Graindorge R. (2017). Effects of some cultural practices on mango inflorescence and fruit pest infestation and damage in Reunion Island: recent progress, on-going studies and future steps [poster]. XII International Mango Symposium, 10-16 July 2017, Baise, Chine.
- Bevacqua D., Quilot-Turion B., Bolzoni L. (2018a). A model for temporal dynamics of brown rot spreading in fruit orchards. International conference: Models in Population Dynamics, Ecology and Evolution. 9-13 April, Leicester, UK
- Bevacqua D., Vanalli C., Casagrandi R., Gatto M. (2018b). Climate effects on the spread of brown rot disease: insights from an epidemiological model. XXVIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia, 12-14 September, Cagliari, Italy
- Grechi I., Saint Crieg L., Soria C., Ratnadass A., Normand F., Amouroux P., Boudon F. (2018). Assessment of mango tree - blossom gall midge management solutions from *in-silico* experiments: overview of an on-going modeling approach [poster]. 30th International Horticultural congress (IHC2018). 12-16 August 2018, Istanbul, Turkey.
- Borg J., Kerdraon M., Plénet D. (2019). Évaluation d'itinéraires techniques pour la gestion de la moniliose en verger de pêcher-nectarine. Séminaire de l'UMT Si-Bio, 21 juin 2019, Avignon, France
- Grechi I., Reyné B., Saint-Crieg L., Memah M.M., Ratnadass A., Normand F.,

Boudon F. (2019). The mango tree – blossom gall midge system: *in-silico* assessment of its functioning and management. The international society for the ecological modelling - Global Conference 2019. 1-5 October 2019, Salzburg, Austria.

- Ratnadass A., Caillat A., Chantereau J., Chillet M., Fliedel G., Grechi I. (2019). Plant organ hardness as a factor of crop resistance to insect pests [poster]. 2nd annual ESA International Branch Virtual Symposium. 8-10 April 2019, USA
- Vanalli C., Bevacqua B., Casagrandi R., Gatto M. (2019). Climate change and the spread of brown-rot disease in peach orchards: insights from an epidemiological model. EEF: Ecology across borders. Embedding ecology in sustainable development goals. 29 July-2 August, Lisbon, Portugal

Participations futures à des colloques : -

#### THÈSES

Thèses passées : -

Thèses en cours : -

#### ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION

Articles de valorisation parus :

- Qui produit la mangue à la Réunion ? Magazine Mag'Reunion

Articles de valorisation à paraître : -

Articles de valorisation prévus :

- Des itinéraires techniques innovants pour gérer la moniliose en verger de pêcher-nectarine

#### AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS

Actions vers les médias (interviews...) effectuées : -

Actions vers les médias prévues : -

#### ENSEIGNEMENT - FORMATION

Enseignements/formations dispensés :

- Documents pédagogiques pour l'école-chercheurs « *L'agroécologie à la croisée des disciplines scientifiques* » organisée par le Cirad et Montpellier SupAgro à laquelle le projet Ecoverger a servi de support d'étude:
  - Fiche : « Présentation du terrain Mangues »
  - Vidéo : « La mangue, la culture de compromis »
- TP dispensés en BTS GPN1 (Gestion & Protection de la Nature) à l'EPLEFPA de St-Paul :
  - 6h en 2017 (2h en salle et 4h sur terrain : suivis techniques de piège à cécidomyies, de dynamique de floraison et d'activité biologique du sol)
  - 6h en 2018 (4h en salle et 2h sur terrain : suivi techniques de piège à cécidomyies)

Enseignements/formations prévus : -

#### EXPERTISES

Expertises menées : -

Expertises en cours : -

Expertises prévues : -

#### METHODOLOGIES (GUIDES...)

Méthodologies produites : -

Méthodologies en cours d'élaboration : -

Méthodologies prévues :

-

**AUTRES : ATELIERS AVEC LES ACTEURS**

Atelier menés :

- Ateliers de formalisation de la grille d'indicateurs d'évaluation des performances du système de culture manguiers avec un collectif de 6 producteurs (restitution/ validation de la grille d'indicateurs et pondération des indicateurs de la grille)

Atelier prévus :

- Atelier de formalisation de la grille d'indicateurs d'évaluation des itinéraires techniques en verger de pêche-nectarine avec un collectif d'experts de la filière (restitution/validation des variables pondérées et de leurs valeurs seuils) – planifié le 06/12/2019
- Atelier de restitution des « profils candidats » d'itinéraires techniques obtenus en vergers de pêche-nectarine
- Atelier de restitution des performances biophysiques et technico-économiques d'innovations techniques en verger de mangue

**AUTRES : COMPTES RENDUS D'ACTIVITE A DESTINATION DES PRODUCTEURS**

Comptes rendus produits :

- Marchetti M. (2016). Analyse systémique des exploitations productrices de mangues à La Réunion : identification des déterminants influençant les choix techniques et les changements de pratiques des producteurs pour la co-conception d'itinéraires techniques innovants apportant une alternative aux pesticides – Présentation synthétique des types d'exploitation. 8p.
- Brustel L., Soria C., Wilt M., Ratnadass A. (2017). Compte rendu d'étude de l'effet de différentes modalités de couverture du sol sur la cécidomyie des fleurs du manguiers, la phénologie de l'arbre, et sur l'infestation par les mouches des fruits des mangues précocement tombées au sol. 9p
- Preterre A.L., Grechi I., Ratnadass A. (2017a). Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers – site 2. 8p.
- Preterre A.L., Grechi I., Ratnadass A. (2017b). Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers – site 3. 8p.
- Kerdraon M. (2019). Compte rendu de l'analyse des résultats d'enquête et de de classification : identification des profils de production. 4p+Annexe

Comptes rendus prévus :

-

**AUTRES : SUPPORTS A VOCATION DE TRANSFERT ET VULGARISATION**

Supports (page web et posters/fiches)

produits :

- 1 page web dédiée au projet : <http://cosaq.cirad.fr/projets/ecoverger>
- Grechi I., Caillat A., Préterre A-L., Brunet-Lecomte C., Ratnadass A. (2019). Quels leviers pour maîtriser les mouches des fruits et leurs dégâts sur mangue ?
- Ratnadass A., Brustel L., Briandy A., Billot T., Grechi I. (2019a). Quels leviers pour maîtriser les cécidomyies des fleurs et leurs dégâts sur manguiers ?
- Ratnadass A., Amouroux P., Billot T., Briandy A., Brustel L., Grechi I., Normand F., Payet R-M., Reyné B., Saint Criq L., Soria C., Auré A., Wilt M. (2019b). Un dispositif de recherche et de formation sur les options agroécologiques de régulation de la cécidomyie des fleurs du manguiers

Supports prévues :

- 2 applications web interactives (avec R-Shiny) pour la restitution en ateliers des résultats de simulation des modèles manguier-mouches des fruits et manguier-cécidomyie des fleurs

**AUTRES : RAPPORTS DE STAGE ET RAPPORTS D'ETUDE**

Rapports produits :

- Marchetti M. (2016). Analyse systémique des exploitations productrices de mangues à La Réunion : Identification des déterminants influençant les choix techniques et les changements de pratiques des producteurs pour la co-conception d'itinéraires techniques innovants apportant une alternative aux pesticides. Mémoire de fin d'étude, ISTOM, 79p+Annexes
- Girard G. (2017). Comprendre les déterminants de la décision technique pour mieux accompagner l'innovation : le cas des producteurs de mangues réunionnais. Mémoire de fin d'étude, UniLaSalle, 71p+Annexes
- Preterre A.-L. (2017). Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, de l'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers et évaluation de la relation entre l'infestation des mangues et leur état de maturité. Mémoire d'année de césure, AgroParisTech, affiliation FacForPro, 38p+Annexes
- Stahl A. (2017). Effet de la taille sur la croissance végétative et la floraison du manguier Cogshall. Mémoire d'année de césure, Montpellier SupAgro, 29p.
- Brustel L. (2018) Evaluation de l'effet de pratiques culturales (paillage / enherbement du sol / récolte prophylactique précoce) en vergers de manguiers (*Mangifera indica* L.) sur la régulation de bioagresseurs de la floraison et de la fructification : les cas de la cécidomyie des fleurs (*Procontarinia mangiferae*) et des mouches des fruits (Diptera : Tephitidae). Mémoire de fin d'étude, Ecole d'ingénieurs de Purpan, 95p+Annexes
- Girard J. (2018). Développement d'un outil pour co-concevoir des itinéraires techniques économes en pesticides en vergers. Mémoire de Master 2, Université Grenoble Alpes, 29p+Annexes
- Saint Criq L. (2018). Modélisation du système manguier-cécidomyie des fleurs pour une évaluation de modes de gestion du ravageur et de ses dégâts. Mémoire de Master 2, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 60p+Annexes
- Vanalli C. (2018). Climate change and the spread of brown rot disease in peach orchards: insights from an epidemiological model. Mémoire de M2, Politecnico di Milano. 109p.
- Bostal C. (2019). Développement d'une démarche d'analyses statistiques de données d'un réseau pluriannuel d'expérimentations systèmes de culture en vergers de pêcheurs. Mémoire de fin d'étude, ISPED - Université de Bordeaux, 40p+Annexes
- Parrot L., Michels T., Brulard N. (2019). Projet Ecoverger – Déterminants des pratiques & indicateurs d'évaluation des systèmes techniques en vergers de manguiers. Cirad. 22p.
- Reyné B. (2019). Modélisation du système manguier-cécidomyie des fleurs pour une évaluation de modes de gestion du ravageur et de ses dégâts. Mémoire de Master 2, Faculté des Sciences de Montpellier, 44p+Annexes
- Salvagno P. (2019). Growth and nutrient partitioning in deciduous trees : a modelling framework linking seasonal and inter-annual dynamics. Mémoire de M2, Politecnico di Milano. 63p.

Rapports prévus :

- Brunet-Lecomte. Evaluation du potentiel de leviers de gestion culturaux dans la lutte contre la mouche des fruits *Bactrocera dorsalis* (Hendel) sur manguier. Mémoire de fin d'étude, ISTOM.
- Parrot et al. Projet Ecoverger – Analyse des performances agro-économiques d'alternatives techniques potentielles à l'utilisation de pesticides en vergers de manguiers (révision en cours)

# RESUMES

En français

---

## RESUME COURT

Une démarche couplant expérimentations, enquêtes et modélisation, a permis d'évaluer et concevoir des solutions techniques visant à réduire le développement et les dommages de bioagresseurs, tout en maintenant une production en quantité et en qualité, en vergers de mangue et pêche-nectarine. Les résultats sont des connaissances sur les effets de leviers de gestion des bioagresseurs et une démarche et des outils d'aide à l'évaluation et à la conception de solutions techniques.

## RESUME LONG

### Contexte

L'arboriculture fruitière est confrontée à de fortes exigences de la part de la société et des pouvoirs publics pour limiter ses impacts sur l'environnement et la santé humaine, et améliorer la qualité nutritionnelle et gustative de ses produits. Même si les producteurs mobilisent de plus en plus des méthodes alternatives, la protection des vergers repose encore largement sur la lutte chimique. Une redéfinition des pratiques agricoles s'impose pour inventer des systèmes de production de fruits de qualité, plus économes en pesticides et économiquement viables.

### Objectifs

L'objectif du projet est de développer une démarche et des outils d'aide à la conception d'itinéraires (ou solutions) techniques en vergers, évaluées sur leur capacité à limiter le développement et les dommages des bioagresseurs et à satisfaire aux obligations d'efficacité agronomique, de viabilité économique et de durabilité. Des méthodes de contrôle cultural et de lutte physique capables d'augmenter la résistance des vergers vis-à-vis des bioagresseurs sont recherchées comme alternatives aux pesticides. La démarche est éprouvée sur trois pathosystèmes fruitiers d'importance économique: manguier-mouches des fruits et manguier-cécidomyie des fleurs à La Réunion, et pêche-pourriture brune dans le sud-est de la métropole.

### Méthodologie

Le raisonnement des pratiques nécessite une vision intégrée et systémique pour laquelle la modélisation offre un cadre méthodologique adapté et complémentaire à l'expérimentation. Par ailleurs, l'implication des utilisateurs finaux dans la démarche de conception est favorisée car elle est susceptible de les rendre moins résistants aux solutions proposées. La démarche est structurée en quatre tâches :

- T1. Acquisition de connaissances et de données sur le fonctionnement biotechnique des systèmes arbre-bioagresseurs-pratiques par des revues bibliographiques et des expérimentations,
- T2. Acquisition de connaissances et de données agro-économiques sur les déterminants des pratiques, les profils de production et les critères d'évaluation des systèmes par des approches participatives mobilisant les producteurs,
- T3. Développement d'un cadre de modélisation sur la base des connaissances acquises dans les Tâches précédentes,
- T4. Evaluation et conception d'itinéraires (ou solutions) techniques sous forme de « profils candidats » de solutions économes en pesticides, à partir du cadre de modélisation.

La proposition ne prévoit pas l'évaluation *in situ* des « profils candidats » d'itinéraires techniques qui auront été identifiés.

### **Principaux résultats obtenus**

- Une évaluation expérimentale des effets de leviers techniques sur le développement et les dommages de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits sur manguier, et de la pourriture brune sur pêcher
- Une typologie des stratégies d'exploitation et une grille d'évaluation des itinéraires techniques en vergers de mangue et de pêche, co-définies avec les acteurs
- Des modèles biotechniques pour les systèmes manguier-mouches des fruits, manguier-cécidomyie des fleurs et pêche-pourriture brune, permettant de tester l'effet de pratiques sur l'incidence des bioagresseurs et la production en fruits
- Un cadre de modélisation pour la conception de « profils candidats » d'itinéraires (ou solutions) techniques en vergers de pêche-nectarine, combinant quatre leviers de gestion de la pourriture brune et évalués sur la base de cinq critères de performance, hiérarchisés selon les profils de production

### **Sorties opérationnelles pour décideurs, applications éventuelles**

- La couverture du sol (avec une bâche tissée ou un enherbement haut) permet de réduire les populations de cécidomyies des fleurs et leurs dommages sur les inflorescences du manguier, sans avoir *a priori* un quelconque effet indésirable sur la floraison du manguier ou l'activité biologique du sol.
- La synchronisation de la floraison permettrait *a priori* de réduire les populations de cécidomyies des fleurs. Les modalités de taille permettant cette synchronisation reste cependant à définir.
- Récolter les mangues à un stade vert-mature ou point-jaune très précoce permet de minimiser le risque d'infestation des mangues par les mouches des fruits, sans impacter leur qualité.
- La récolte des pêches infectées pendant la période de croissance et de maturation des fruits, les récoltes sanitaires en hiver, un stress hydrique modéré en fin de croissance des fruits et une charge en fruits modérée permettent de contrôler l'incidence de la pourriture brune, en association avec ou à la place de fongicides
- La destruction des jeunes fruits en état d'abscission, qui sont très sensibles aux infestations par les mouches des fruits et constituent une source de multiplication précoce du ravageur, peut être facilitée par le fauchage ou la couverture du sol avec une bâche, qui a un effet négatif sur la multiplication des mouches sur ces fruits.

### **Recommandations**

- Des divergences possibles entre les perceptions des agriculteurs pour certaines pratiques et les résultats de la recherche démontrent l'importance de la circulation des connaissances entre les acteurs pour co-construire des innovations techniques.

### **MOTS-CLÉS**

Cécidomyie des fleurs ; Conception ; Indicateurs de performance ; Manguier ; Modèle plante-bioagresseur ; Pêcher ; Pourriture brune ; Pratiques culturales ; Mouches des fruits ; Typologie des stratégies d'exploitation

## In English

---

### ABSTRACT

#### Context

Fruit production is facing increasing requirements from the society and public authority to reduce the negative impact of their production systems on the environment and human health and improve fruit quality. Even if the use of methods of crop protection alternative to pesticides is increasing, chemical methods still remain widely used by fruit growers. New management systems are required to reduce the use of pesticides while maintaining fruit yield and quality.

#### Objectives

The project aimed at developing an approach and tools helpful for the design of orchard management solutions able to reduce pest development and damages while satisfying agronomical efficiency, economic viability and sustainability. Cultural and physical methods able to increase orchard resistance to pests are investigated as alternative methods to pesticides. The methodological approach is applied to three pathosystems of economic importance: the mango-blossom gall midge and mango-fruit flies systems in Reunion Island and the peach-brown rot system in mainland France.

#### Methodology

Addressing crop-pest management issues require an integrated and systemic approach, for which modelling is relevant and complementary to an experimental approach. In addition, stakeholders have to be involved in the process as the co-design of management solutions can improve their future adoption by fruit growers. The approach is divided into four main tasks:

T1. Acquisition of knowledge and data on the crop-pest functioning as affected by management practices, based on literature reviews and experiments

T2. Acquisition of knowledge and data on the current production systems, management rules and indicators for system evaluation, based on participative methods involving fruit growers and stakeholders

T3. Development of a modelling framework based on previously acquired knowledge and data

T4. Evaluation and design of low pesticide-input management solutions, using the modelling framework

*In situ* evaluation of the obtained management solutions was not included in the project.

#### Main results

- Experimental assessment of the effects of management practices alternative to pesticides on the development and damages of mango gall midge and fruit flies on mango crop and brown rot on peach crop
- A typology of production systems and a set of indicators for the evaluation of management systems in mango and peach orchards, co-defined with stakeholders
- Crop-pest models for mango-blossom gall midge, mango-fruit flies and peach-brown rot systems, that can be used for simulation-based assessment of the effect of management practices on pest damages and fruit production

- A modelling framework for model-based design of management solutions in peach orchards, combining four management levers for brown rot control and evaluated based on five performance indicators ranked according to fruit grower profiles.

### **Applications for public policies**

- Soil mulching (with synthetic ground cover or high weed cover) can reduce mango gall midge populations and their damages on mango inflorescences, without a *priori* negative impact on mango flowering or biological activity in the soil.
- Synchronization of mango flowering is a potential lever to reduce mango gall midge populations. However, pruning modalities to synchronize mango flowering have to be defined.
- Harvesting mango fruits at the green-mature or early yellow-point stages can reduce fruit infestation by fruit flies without reducing fruit quality.
- Sanitation practices, by removing infested fruits during winter and during fruit growth and maturation, moderate water stress and moderate fruit load can reduce brown rot incidence, with or without fungicide use.
- Sanitation practices by removing young mango fruits falling by abscission and that are highly sensitive to fruit fly infestation, could reduce early multiplication of the pest. Removal of these fruits can be facilitated by mowing or soil cover with a synthetic ground cover, on which fruit fly multiplication is impaired.

### **Recommendations**

- Divergence between fruit grower's perception on the effects of some management practices and research results can exist, underlining the importance of sharing knowledge between all stakeholders for the co-design of management solutions.

### **KEY WORDS**

Blossom gall midge ; Design ; Performance indicators ; Mango ; Crop-pest models ; Peach ; Brown rot ; Cultural practices; Fruit fly ; Typology

# RAPPORT SCIENTIFIQUE

« APR2014\_RI\_Ecoverger\_Rapport Scientifique.pdf »

*Fichier joint au rapport*

## ANNEXE : TEXTES DES PUBLICATIONS

Les textes des publications scientifiques parues sont joints au rapport au format pdf.

Des restrictions en termes de droits de reproduction sont applicables sur ces publications, dont le texte ne peut pas être mis en libre accès sur internet. Certains, sous licence CC-BY, sont libres d'accès.

### PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

- Bellingeri M., Quilot-Turion B., Oliveira Lino L., Bevacqua D. (2018). The Crop Load Affects Brown Rot Progression in Fruit Orchards: High Fruit Densities Facilitate Fruit Exposure to Spores but Reduce the Infection Rate by Decreasing Fruit Growth and Cuticle Cracking. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 5 :170. <https://doi.org/10.3389/fevo.2017.00170>  
Creative Commons Attribution License (CC BY)
- Bevacqua D., Quilot-Turion B., Bolzoni L. (2018). A Model for Temporal Dynamics of Brown Rot Spreading in Fruit Orchards. *Phytopathology*, 108: 595-601. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-17-0250-R>
- Bevacqua D., Génard M., Lescourret F., Martinetti D., Vercambre G., Valsesia P., Mirás-Avalos J.M. (2019). Coupling epidemiological and tree growth models to control fungal diseases spread in fruit orchards. *Scientific Reports*, 9: 8519. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44898-6>  
Creative Commons Attribution License (CC BY)
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. (2019). Nature abhors a vacuum: Deciphering the vegetative reaction of the mango tree to pruning. *European Journal of Agronomy*, 104: 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.007>
- Ratnadass A., Grechi I., Graindorge R., Caillat A., Préterre A.L., Normand F. (2019). Effects of some cultural practices on mango inflorescence and fruit pest infestation and damage in Reunion Island: recent progress, on-going studies and future steps. *Acta Horticulturae*, 1244: 159-166. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1244.24>

### PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES A PARAÎTRE

- Grechi I., Saint Crieg L., Ratnadass A., Normand F., Soria C., Brustel L., Amouroux P, Boudon F. The mango tree - blossom gall midge system: toward in-silico assessment of management practices. *Acta Horticulturae* (accepté)
- Boudon F., Persello S., Jestin A., Briand A-S., Grechi I., Fernique P., Guédon Y., Léchaudel M., Lauri P-E., Normand N. V-Mango: A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production. *Annals of Botany* (révision en cours)

### PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PREVUES

- Bevacqua D., Vanalli C., Casagrandi R., Gatto M. Climate change and the spread of brown-rot disease in peach orchards: insights from epidemiological model
- Grechi I., Caillat A., Préterre A-L., Ratnadass A. Relating mango infestation by fruit flies with fruit maturity: a step to improve the management of fly damages with harvest timing

- Grechi I., Reyné B., Saint-Criq L., Memah M.M., Ratnadass A., Normand F., Boudon F.. The mango tree – blossom gall midge system: in-silico assessment of its functioning and management
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. How pruning intensities and severities affect mango flowering and fruiting in Cogshall mango trees?
- Ratnadass A., Brustel L., Briandy A., Grechi I. Effect of soil mulching on mango blossom gall midge dynamics and damages to mango inflorescences
- Salvagno P., Melia P., Bevacqua D. Consequences of agronomic practices on peach cultivars within an annual and multiannual perspective: a simulation study
- Vanalli C., Gatto M., Casagrandi R., Bevacqua D. Climate change and the areal distribution of peach cultivation in France
- Article à portée méthodologique sur le couplage des démarches des Tâches 2 et 4 pour la conception d'itinéraires techniques assistée par modèle en verger de pêcher-nectarine
- Article à portée méthodologique sur la démarche de la Tâche 2 en verger de mangue

## **ANNEXE : PARTIE CONFIDENTIELLE**

Deux rapports de stage revêtent un caractère confidentiel, à la demande des partenaires impliqués dans le co-encadrement des stages. Cette confidentialité sera levée dès la valorisation des résultats sous forme d'articles scientifiques.

Les deux rapports à caractère confidentiel sont :

- Vanalli C. (2018). Climate change and the spread of brown rot disease in peach orchards: insights from an epidemiological model. Mémoire de M2, Politecnico di Milano. 109p
- Salvagno P. (2019). Growth and nutrient partitioning in deciduous trees : a modelling framework linking seasonal and inter-annual dynamics. Mémoire de M2, Politecnico di Milano. 63p.