

Rapport scientifique du projet Ecoverger

- 31 Octobre 2019 -



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, INRA

³ Univ. Montpellier, CIRAD, Montpellier

Table des matières

1	Rappel des objectifs et de la démarche	1
2	Description de la réalisation des actions annoncées et des réorientations.....	2
2.1	Actions et résultats de recherche par Tâche.....	2
	Tâche 1-Fonctionnement biotechnique	2
	Tâche 2-Déterminants des pratiques & indicateurs	11
	Tâche 3-Modélisation	19
	Tâche 4-Conception.....	28
2.2	Actions d’animation et de coordination interne au projet	34
2.3	Liste des faits marquants et recueil synthétique des réalisations et valorisations	35
3	Liste des références bibliographiques.....	36
	ANNEXE 1: Rappel du calendrier prévisionnel et des livrables prévus dans le projet.....	I
	ANNEXE 2 : Liste des projets cités.....	III

1 Rappel des objectifs et de la démarche

L'objectif du projet Ecoverger était de développer une démarche et des outils d'aide à la co-conception participative d'itinéraires techniques en vergers évalués 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 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 manguiers (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 manguiers.

Les stratégies de gestion des bioagresseurs qui ont été considérées dans ce projet combinent des méthodes culturales (date de récolte, taille, irrigation, éclaircissage des fruits, récoltes sanitaires, paillage du sol) et des méthodes chimiques, ces dernières n'étant utilisées qu'en dernier recours. Nous avons fait l'hypothèse que les méthodes de contrôle cultural proposées comme méthodes alternatives à l'utilisation de pesticides permettraient dans certaines conditions d'application : i) d'augmenter la résistance des vergers vis-à-vis des bioagresseurs en réduisant, au moins partiellement, le développement des bioagresseurs, 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. Dans le cadre de cette proposition, l'itinéraire technique correspond à la combinaison de ces différentes pratiques et il est raisonné aux échelles du verger et du cycle de production annuel. Par ailleurs, nous avons fait l'hypothèse qu'associer les utilisateurs finaux (c'est-à-dire les producteurs) à l'élaboration des innovations techniques et des outils qui permettent de les évaluer et de les concevoir permettrait de gagner en efficacité et en temps dans le processus d'innovation, et de rendre ainsi les acteurs moins résistants aux solutions proposées.

La proposition était structurée en une tâche de coordination (T0) et quatre tâches de recherche (T1 à T4) (Fig. 1) qui visaient à produire :

- **des connaissances et des données biotechniques** sur les effets des techniques culturales alternatives sur les interactions plante-bioagresseurs et leur efficacité à gérer les bioagresseurs (Tâche 1 – Fonctionnement biotechnique)
- **des connaissances et des données agro-économiques** sur les déterminants des pratiques, les stratégies des producteurs, et des jeux d'indicateurs de performances co-construits avec les acteurs (T2 – Déterminants des pratiques et indicateurs)
- **un cadre de modélisation générique pour des cultures fruitières** i) qui représente les processus impliqués dans la régulation des bioagresseurs et l'élaboration du rendement et de la qualité des fruits ainsi que leur pilotage par des pratiques, et ii) qui intègre des règles de décision et des indicateurs de performance co-définis avec les acteurs (T3 – Modélisation)
- **des « profils candidats » d'itinéraires techniques** économes en pesticides en vergers de manguiers et de pêchers conçus *in silico* à partir du cadre de modélisation (T4 – Conception).

Les principaux résultats attendus du projet étaient des connaissances biotechniques et agro-économiques (T1, T2), des méthodes et des outils pour la co-conception avec les acteurs d'itinéraires techniques économes en pesticides en vergers de manguiers et de pêchers, et des itinéraires techniques sous forme de « profils candidats » conçus *in silico* (T3, T4).

Une valorisation des résultats biotechniques et agro-économiques était prévue par la production de fiches techniques ou d'articles de vulgarisation à destination des producteurs et autres acteurs de la filière. Ces supports de communication visent un transfert rapide des résultats de recherche vers la profession. Une valorisation scientifique était également prévue par la publication de certaines des connaissances acquises et du cadre de modélisation dans des revues scientifiques à facteur d'impact et/ou dans des conférences internationales.

Le cadre de modélisation constitue un outil de dialogue entre les acteurs et les chercheurs et a vocation à accompagner la réflexion autour de la démarche de co-conception de solutions techniques à destination des producteurs. Le projet prévoyait une restitution des « profils candidats » d'itinéraires techniques auprès des acteurs ayant participé à leur co-conception au cours d'un atelier. Ces échanges devraient faciliter la poursuite de la démarche qui appellera la mise en œuvre opérationnelle des itinéraires techniques candidats identifiés dans le cadre du projet. Celle-ci sera engagée au terme du projet et passera par une phase d'évaluation *in situ* et de re-conception participative des itinéraires techniques candidats préalablement identifiés pour aboutir, à terme, à l'identification de solutions techniques transférables.

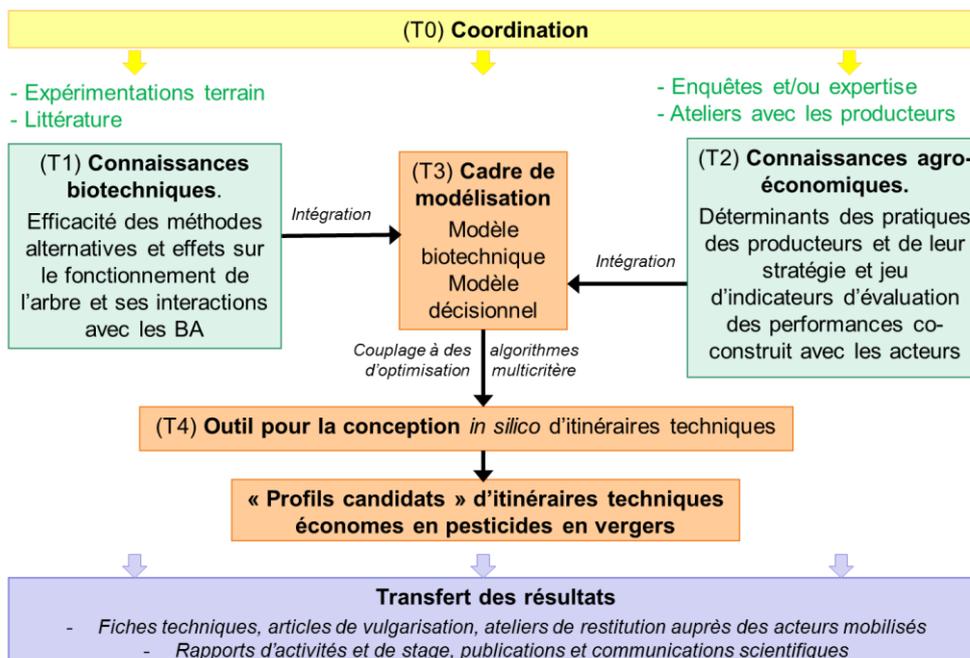


Fig. 1. Représentation schématique de la structure de la proposition, des résultats attendus par tâche et des supports de diffusion et de valorisation de ces résultats.

2 Description de la réalisation des actions annoncées et des réorientations

Le calendrier prévisionnel et les livrables prévus dans le projet sont rappelés en Annexe 1.

2.1 Actions et résultats de recherche par Tâche

Tâche 1-Fonctionnement biotechnique

Les pratiques proposées dans le projet pour gérer les bioagresseurs et leurs dommages mobilisent différents leviers : des actions sur la population initiale (inoculum), des actions visant à rompre le cycle de développement des bioagresseurs, et des stratégies d'évitement ou d'atténuation de la culture. Les actions sur l'inoculum, par exemple en exportant les organes infestés, visent à limiter les sources de contamination des cultures, et ainsi réduire le potentiel de développement des bioagresseurs. Les stratégies d'évitement consistent à éviter la concordance entre la période de sensibilité de la culture et la période de contamination du bioagresseur. Les stratégies d'atténuation visent à augmenter la compétitivité de la culture et à réduire les conditions favorables au développement et à la propagation des bioagresseurs. La Tâche 1 visait à acquérir des connaissances et des données sur le fonctionnement biotechnique des systèmes arbre-bioagresseurs-pratiques pour les deux 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. Ces connaissances ont ensuite été intégrées dans un cadre de modélisation (T3-4).

❖ Manguier

Les connaissances et les données sur le fonctionnement biotechnique des systèmes manguier-mouches des fruits et manguier-cécidomyie des fleurs et la réponse du manguier à la taille ont été acquises par des expérimentations et des analyses réalisées au cours du projet, parfois en articulation avec d'autres projets (COSAQ et ModQual ; cf. Annexe 2).

➤ *Activité 1 : stade de maturité des fruits et infestation par les mouches des fruits*

Un facteur majeur d'infestation des mangues par les mouches des fruits est l'état de maturité du fruit (Rattanapun et al. 2009; Diatta et al. 2013). Il est *a priori* lié à l'évolution de certaines caractéristiques biochimiques et physiques du fruit telles que la couleur, l'odeur ou la fermeté de la peau (Rattanapun et al. 2009; Rossetto et al. 2009; Jayanthi et al. 2012), elles-mêmes impliquées dans la qualité intrinsèque du fruit. Le stade de maturité des fruits à la récolte a été considéré comme un levier potentiel pour réduire les dommages des mouches des fruits. Récolter les fruits à des stades de maturité plus précoces permettrait de réduire l'exposition aux mouches des fruits mais pourrait, *a contrario*, impacter négativement la qualité des fruits. Afin de bien maîtriser le stade de maturité auquel récolter les fruits pour garantir une qualité organoleptique optimale des mangues tout en minimisant les risques d'infestation de celles-ci, il est nécessaire de caractériser finement la relation entre la maturité du fruit et sa sensibilité vis-à-vis des mouches des fruits.

➔ Des essais ont été réalisés en 2015-16 (sur les projets COSAQ et ModQual ; Caillat 2016) et en 2016-17 sur trois vergers de mangues Cogshall, sur la station expérimentale du Cirad et chez des producteurs. Ces essais visaient à évaluer le risque d'infestation des mangues par les mouches des fruits en fonction de leur état de maturité et de la pression de ravageurs. Des suivis hebdomadaires de piégeage (pièges attractifs MacPhail appâtés au *Torula*) ont permis de suivre les dynamiques des populations des différentes espèces de mouches des fruits et d'évaluer la pression relative exercée par ces ravageurs dans chacun des vergers. Les dynamiques d'abondance et de maturité des fruits dans ces vergers ont également fait l'objet d'un suivi hebdomadaire. Un total de 540 fruits présentant un gradient de maturité (des stades verts à sur-matures ; Fig. 2) ont été prélevés dans les vergers. Ces fruits ont fait l'objet d'une notation visuelle du stade de maturité (Fig. 2), de mesures de la fluorescence de la chlorophylle (FMS 2) et de la fermeté (TA.XT2 ; UMR QualiSud) de la peau, et d'une caractérisation de l'état d'infestation par dénombrement et identification des mouches ayant émergé des fruits après incubation.

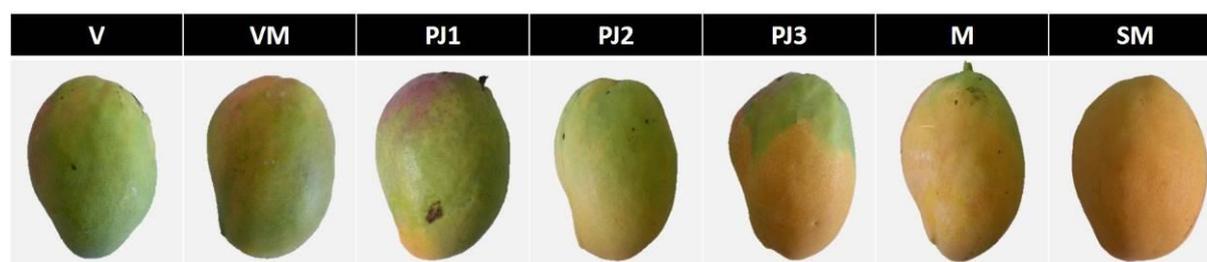


Fig. 2. Les sept stades utilisés pour décrire visuellement la maturité des mangues Cogshall : vert (V), vert-mature (VM), point jaune avec trois niveaux (PJ1, PJ2, PJ3), mature (M) et sur-mature (SM)

Au cours de ces suivis, près de 17000 mouches Tephritidae ont été piégées. Les mouches des fruits *Bactrocera zonata*, *Ceratitis quilicii* (antérieurement confondue avec *Ceratitis rosa*) et *Ceratitis capitata* représentent respectivement 40%, 28% et 6% des mouches piégées. La mouche des légumes *Bactrocera (Zeugodacus) cucurbitae* a aussi été piégée (26% des mouches piégées), surtout après la période de récolte des mangues. Les mangues Cogshall ont majoritairement été infestées par *B. zonata* qui représente 80% et 100% des mouches s'étant développées sur les fruits prélevés en 2015-16 et 2016-17 respectivement. Il a été confirmé que le taux d'infestation des mangues augmente avec leur maturité. Aux stades V et VM, moins de 2% des mangues sont infestées. Le taux d'infestation des mangues est de moins de 4% au stade PJ1, augmente à 10-11% aux stades PJ2 et PJ3 et atteint 14-16% aux stades M et SM (Fig. 3). Des tests de préférence à l'oviposition par *B. zonata*, conduits en conditions contrôlées au laboratoire (3P, IBiSA), ont également confirmé une forte préférence de *B. zonata* pour les mangues au stade M en comparaison à celles aux stades V et PJ (Fig. 5). Le taux d'infestation

des mangues augmente également avec la diminution de la fluorescence de la chlorophylle et de la fermeté de la peau du fruit, ces deux indicateurs diminuant au cours de la maturation du fruit. Ces données ont permis d'établir une courbe de réponse entre le taux d'infestation des mangues Cogshall en verger et la fluorescence du fruit, utilisée comme indicateur non destructif de maturité des fruits (GLMM avec loi d'erreur binomiale ; Fig. 4).

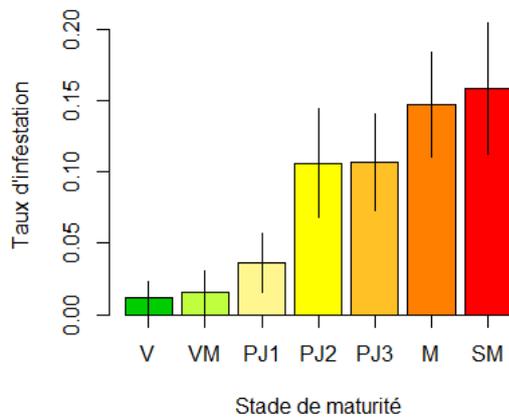


Fig. 3. Taux d'infestation des mangues Cogshall en fonction de leur stade de maturité.

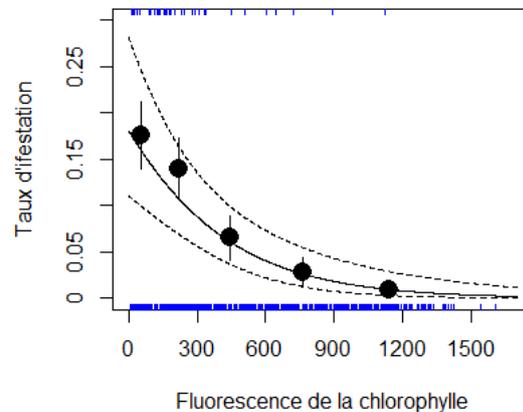


Fig. 4. Taux d'infestation des mangues Cogshall en fonction de la fluorescence de la chlorophylle de la peau du fruit. Trait plein et pointillés : prédiction du GLMM et IC à 95% ; Points et segments: moyenne \pm SE des observations regroupées en cinq classes de même effectif ; Traits bleus : fruits infestés (haut) et non-infestés (bas).

Les suivis de piégeage rendent compte d'une augmentation de l'abondance des mouches des fruits au cours de la saison de production de mangues, avec des abondances variables selon les espèces de mouche, les vergers et les années. Toutefois, les analyses n'ont pas mis en évidence de relation étroite entre le taux d'infestation des mangues par les mouches des fruits et leur abondance dans les vergers, une à trois semaines avant la date de prélèvement des fruits (période correspondant à la durée de développement des stades juvéniles), qu'elle soit exprimée en termes d'abondance absolue (nombre total de captures) ou ramenée à la ressource disponible (nombre de fruits). Ces résultats suggèrent l'existence possible d'un seuil (relativement bas) au-delà duquel la pression de ravageur n'a plus d'effet. En tout état de cause, l'infestation des fruits dépend surtout de leur niveau de maturité et le piégeage alimentaire ne paraît pas adapté comme outil de décision pour déclencher des interventions sur seuil.

Le stade VM (voire le début du stade PJ) est un stade optimal de récolte d'un point de vue de la qualité organoleptique (Vincenot et Normand 2009). Le stade PJ est facilement repérable par les producteurs : il se caractérise par l'apparition d'une décoloration jaune au niveau de l'apex qui s'étend progressivement sur toute la surface du fruit au cours de la maturation (Fig. 2). À l'inverse, le stade VM est difficile à identifier à l'œil nu, mais il est possible de l'identifier par une mesure non destructive et rapide de la fluorescence de la chlorophylle de la peau du fruit. Cette méthode n'est cependant pas encore vulgarisée. Pour minimiser le risque d'infestation des mangues par les mouches des fruits tout en garantissant une qualité organoleptique optimale des mangues, il est donc conseillé de récolter les fruits à un stade VM, ou à défaut PJ très précoce (PJ1). Des observations ponctuelles des stades de maturité des fruits récoltés par les producteurs tendent à indiquer qu'une marge de progrès est possible puisque 65% des fruits étaient récoltés aux stades VM et PJ1 préconisés, tandis que 8% étaient récoltés au stade V et 27% aux stades PJ2 à SM.

Suite à l'introduction involontaire sur l'île puis l'établissement courant 2017 de la mouche orientale des fruits *Bactrocera dorsalis*, le contexte parasitaire a changé. Si entre 2015 et 2017, les populations de Tephritidae s'attaquant à la mangue étaient dominées par *B. zonata*, suivie de *C. quilicii* et *C. capitata*, les mangues étaient exclusivement infestées par *B. dorsalis* en 2018. Des tests de préférence à l'oviposition par *B. dorsalis* ont été conduits en 2018-19 en conditions contrôlées au laboratoire (3P, IBISA). Ils ont montré une forte préférence de *B. dorsalis* pour les mangues aux stades PJ et M en comparaison à celles au stade V, et des niveaux d'infestation 3 à 4 fois plus élevés que ceux observés avec *B. zonata* (Fig. 5). La stratégie visant à récolter les

mangues à un stade de maturité plus précoce est d'autant plus pertinente dans ce contexte, puisque *B. dorsalis* tend à piquer les fruits encore plus tôt et plus intensément que *B. zonata*. Les suivis d'infestation naturelle réalisés de 2015 à 2017 sur trois vergers seront reconduits en 2019-2020 afin de réactualiser la courbe de réponse entre le taux d'infestation des mangues et leur état de maturité dans ce nouveau contexte.

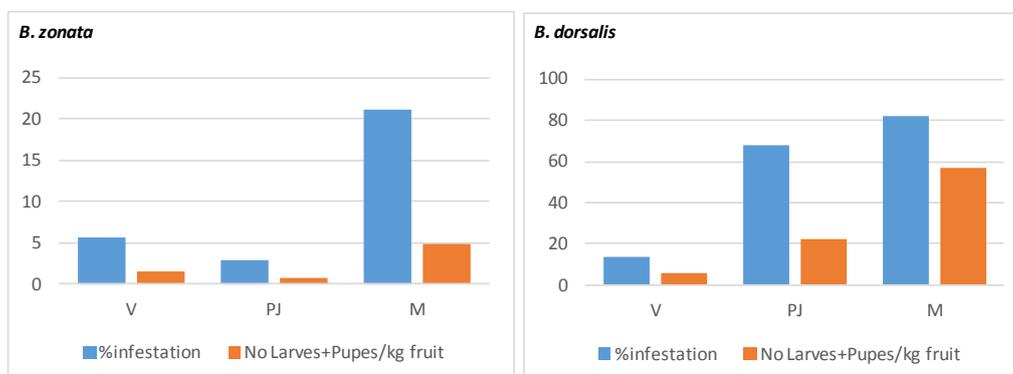


Fig. 5. Infestation de mangues Cogshall de différentes maturités (V : vert ; PJ : point jaune ; M : mure) par *B. zonata* et *B. dorsalis* en conditions d'infestation artificielle avec choix (résultats de 71 et 22 cages respectivement)

➤ *Activité 2 : effet de la taille sur la phénologie de l'arbre*

Le manguier présente des asynchronismes phénologiques inter- et intra-arbres qui contribuent à la présence d'organes sensibles aux ravageurs (inflorescences pour les cécidomyies des fleurs; fruits mures pour les mouches des fruits) pendant une longue période dans un verger. Synchroniser la floraison des arbres à l'échelle parcellaire ou infra-parcellaire constitue une piste intéressante pour réduire l'utilisation des produits phytosanitaires. En effet, la réduction de ces asynchronismes permettrait de réduire la fenêtre de sensibilité des arbres aux ravageurs, voire de réduire leur impact par un effet de dilution ou par la réduction du nombre de leurs cycles de multiplication. Des interactions étroites et réciproques entre la croissance végétative et la reproduction du manguier, dans leurs composantes architecturales et phénologiques, ont été mises en évidence (Dambreville et al. 2013 ; Capelli et al. 2016). La taille est une intervention courante et nécessaire à la conduite des vergers qui est pratiquée juste après récolte. Connue pour affecter la croissance végétative des arbres, elle a donc été considérée comme un levier potentiel pour synchroniser la floraison : l'hypothèse est que selon ses modalités d'application elle peut synchroniser la croissance végétative dans la canopée, ce qui est favorable à la synchronisation de la floraison suivante (Dambreville et al. 2013). A ce jour, il n'existe toutefois pas de caractérisation fine de l'effet de la taille sur la croissance végétative, la floraison et la fructification du manguier pour aider à raisonner cette pratique en vue de synchroniser la floraison du manguier.

➔ Cette activité a été conduite dans le cadre d'une thèse (sur projet COSAQ ; Persello 2018) à laquelle le projet est venu en appui pour la réalisation de certains suivis et analyses. Afin de caractériser les effets de la taille sur la croissance végétative, la floraison et la fructification du manguier (variété Cogshall), un essai a été mis en place sur la station expérimentale du Cirad à la fin de la récolte en janvier 2016, et a été répété les deux années suivantes. La taille a été caractérisée en termes d'intensité de taille à l'échelle de l'arbre entier (quantité de matériel végétal retiré par unité de volume de canopée) et de sévérité de taille à l'échelle de l'axe taillé (distance du point de taille par rapport à l'extrémité d'une branche). L'intensité de taille la plus forte qui a été testée sur ce dispositif correspond à une taille d'agriculteur. La réponse à la taille, en termes de croissance végétative, a été décrite localement au niveau du point de taille, et à distance dans la canopée au niveau d'unités de croissance (UC) non taillées. La floraison et la fructification ont ensuite été décrites sur les UC échantillonnées qui n'ont pas eu de croissance végétative et sur les nouvelles UC mises en place suite à la taille. La croissance végétative, la floraison et la fructification ont été décrites en termes d'occurrence, d'intensité (nombre de nouvelles UC ou d'inflorescences apparues) et de dynamique/temporalité. La morphologie des UC apparues après la taille a également été décrite. La floraison a été quasiment inexistante sur les manguiers au cours de l'année 2017, et seules deux années de données sont disponibles pour étudier les effets de la taille sur la reproduction.

Les résultats ont montré que la croissance végétative est affectée dans ses dimensions structurelle (occurrence, intensité) et temporelle (dynamique) par des facteurs globaux à l'échelle de l'arbre (intensité de la taille), et par des facteurs locaux au niveau du point de taille (sévérité de taille, diamètre de l'axe au niveau du point de taille, proximité des UC non taillées à des UC taillées). La croissance végétative est stimulée par la taille. De façon plus précise, la probabilité de débourrement et le nombre d'UC filles produites augmente de façon significative avec l'intensité de taille et la sévérité de taille sur les UC taillées (Fig. 6). Sur les UC non taillées, la probabilité de débourrement augmente avec l'intensité de taille de l'arbre, mais pas le nombre d'UC filles produites. De plus, la probabilité de débourrement des UC non taillées augmente avec leur proximité à des UC taillées.

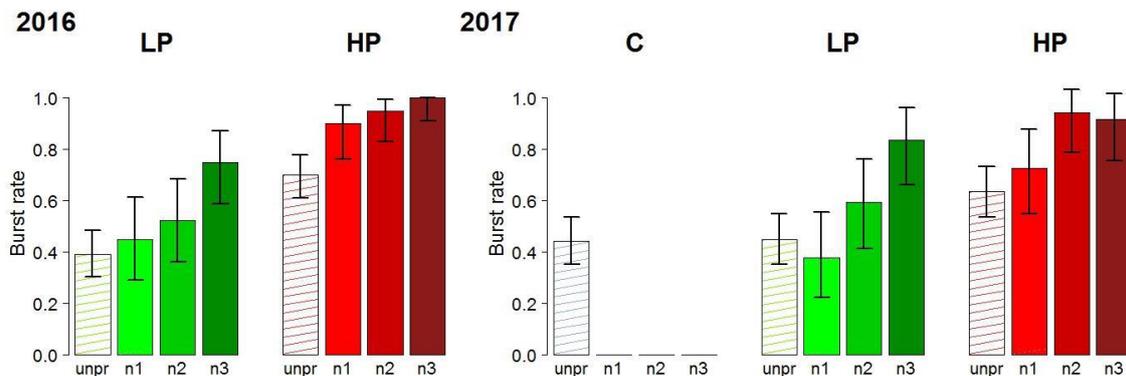


Fig. 6. Probabilité de débourrement des UC taillées (n1, n2, n3) et non taillées (unpr) en fonction de l'intensité de taille (C : arbres témoins non taillés ; LP : arbres peu taillés ; HP : arbres intensément taillés) au cours de deux années successives en 2016 et 2017. (Source : Persello et al. 2019)

Au niveau temporel, le débourrement des nouvelles UC tend à être plus synchrone et plus précoce sur les arbres intensément taillés. Selon les années, cette synchronicité et cette précocité se sont traduites soit par une seule vague de débourrement sur les arbres intensément taillés, par rapport aux deux vagues observées sur les arbres peu taillés ou non taillés (Fig. 7), soit par deux vagues de débourrement quelle que soit l'intensité de taille, mais avec une première vague plus importante et précoce sur les arbres intensément taillés.

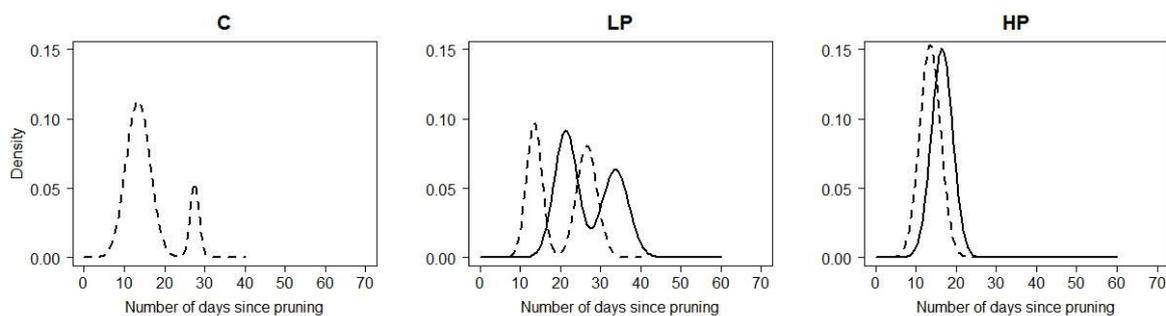


Fig. 7. Distributions des dates de débourrement (en nombre de jours après taille) des nouvelles UC sur des UC taillées (trait plein) et non taillées (trait pointillé) selon l'intensité de taille (C : arbres témoins non taillés ; LP : arbres peu taillés ; HP : arbres intensément taillés) en 2017. Ces distributions correspondent à un ajustement aux données d'un mélange de lois Gaussiennes. (Source : Persello et al. 2019)

La floraison a été suivie sur cinq populations d'UC terminales (donc susceptibles de fleurir) différant par leur âge (apparues après ou avant la taille) et leur origine (UC taillées ou non taillées). La probabilité de floraison et le nombre d'inflorescences produites dépendent de la population d'UC et de l'intensité et la sévérité de taille. Par exemple, la probabilité de floraison des UC produites sur les UC taillées augmente avec l'intensité de taille, et diminue avec la sévérité de taille. Au niveau temporel, la dynamique de floraison varie pour les différentes populations d'UC et est affectée par l'intensité et la sévérité de taille. Une partie des UC terminales apparues après la taille, sur des UC taillées ou non taillées, fleurit tardivement et provoque une seconde vague de floraison sur les arbres taillés, sans que l'on ait pu mettre en évidence des caractéristiques propres à ces UC. Il n'a pas été montré de relation entre la date de débourrement des UC apparues après la taille et leur date de floraison. Il en résulte que la réponse florifère à la taille à l'échelle d'une canopée est très complexe et dépend des

caractéristiques des UC terminales et de leurs proportions respectives. Sur les arbres témoins non taillés, composés d'une population d'UC relativement homogène (UC non taillées apparues avant la taille), une seule vague de floraison a été observée.

Les probabilités de fructification sont peu affectées par l'intensité et la sévérité de taille, ou par la population d'UC. Cependant, la probabilité de fructification a tendance à être supérieure pour les UC apparues sur les UC non taillées par rapport à celles apparues sur les UC taillées. La différence est significative sur les arbres les plus intensément taillés.

Ces résultats montrent la complexité de la réponse, végétative et reproductrice, du manguier à la taille, justifiant l'intégration des effets de cette pratique dans un modèle (voir Tâche 3, activité 1). Nos résultats montrent que la taille avant la croissance végétative permet de synchroniser la croissance végétative. Mais contrairement à notre hypothèse, la synchronisation de la croissance végétative par la taille ne conduirait pas à une synchronisation de la floraison sur les arbres taillés. S'il est bien confirmé que certaines UC terminales apparues après la taille peuvent fleurir en deux vagues sans qu'aucun facteur explicatif ne soit identifié, il ne sera pas possible d'envisager la taille pratiquée après la récolte comme un levier potentiel pour synchroniser la floraison, même en identifiant des modalités de taille qui permettraient de stimuler la mise en place d'une population d'UC terminales homogène dans la canopée. Par contre, 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. Il reste plusieurs données à analyser pour confirmer ou infirmer certains résultats de cette expérimentation et les formaliser complètement, afin de proposer des recommandations et d'affiner le modèle intégrant les effets de la taille.

➤ *Activité 3 : couverture du sol et dynamique des cécidomyies des fleurs*

Le paillage (ou couverture du sol) a été considéré comme un levier potentiel de gestion de la cécidomyie des fleurs du manguier. En effet, vu qu'une partie du cycle de développement de l'insecte (celui de larve de dernier stade et de pupa) se déroule dans le sol, on s'attend à ce que le paillage réduise, par effet de barrière physique et par facilitation de l'action des prédateurs, l'enfouissement des larves dans le sol et l'émergence des adultes dans le verger, comme le suggèrent des résultats antérieurs (Amouroux 2013, Armefflor 2015a, 2015b). Toutefois, ces précédentes études soit ne disposent pas de données quantifiées sans paillage, soit concernent la variété José. D'autre part, les effets potentiels désirables ou indésirables du paillage sur le fonctionnement de l'arbre et l'activité biologique du sol, via une possible modification du microclimat du sol, ne sont pas connus.

➔ Un essai a été mis en place au Centre de Production et d'Expérimentation Agricole (CPEA) de l'EPLEFPA de St-Paul en mai 2017, sur deux vergers d'environ 150 arbres de la variété Cogshall. En 2018, cet essai a été reconduit sur un seul des deux vergers du CPEA, ainsi que sur un verger de producteur (sur projet COSAQ ; Briandy 2019). Il visait à évaluer sur un même verger trois modalités de couverture du sol, en termes d'effets i) sur l'infestation et les dégâts de cécidomyies des fleurs, ii) sur la floraison, sur la fructification et le rendement du manguier, iii) ainsi que sur la température et l'humidité du sol, et son activité biologique. Les trois modalités consistaient en un sol couvert d'une bâche (ou bâchage), un sol enherbé (ou enherbement haut) et un sol fauché (ou enherbement ras) (Fig. 8). La bâche utilisée est un tapis de sol tissé synthétique (100% polypropylène) qui est perméable à l'air et à l'eau.



Fig. 8. Modalités de couverture du sol : sol couvert d'une bâche (à gauche), sol enherbé (au milieu) et sol fauché (à droite)

Les traitements phytosanitaires se sont limités exclusivement à l'application hebdomadaire de soufre contre l'oïdium en 2017, tandis que trois applications de Lambda-cyhalothrine (Karaté Zéon®) s'y sont ajoutées en 2018.

Des suivis hebdomadaires ont permis d'évaluer la dynamique de floraison, la dynamique des populations de cécidomyies des fleurs par piégeage des larves et les dégâts aux inflorescences dans chacune des trois modalités de couverture de sol. Des suivis de la fructification et du rendement, de la température et de l'humidité du sol (avec des Tinytags® data loggers), et de l'activité biologique du sol (bait lamina strips) ont également été réalisés. Enfin, en 2019, un suivi de l'émergence des adultes de cécidomyies issues de larves diapausantes a été effectué sur le verger du CPEA suivi en 2017 et 2018.

Au bout de deux saisons de mise en œuvre des modalités de couverture du sol, les populations de cécidomyies des fleurs étaient divisées par 5 sur le sol couvert d'une bâche et par 3 sur le sol enherbé, par rapport à un sol fauché (Fig. 9). La réduction des populations de cécidomyies est intervenue dès la première année sur sol bâché. Par ailleurs, les populations d'adultes émergeant de larves diapausantes étaient divisées par 14 sur le sol couvert d'une bâche et par 8,4 sur le sol enherbé, par rapport au sol fauché (Fig. 10). Ces résultats confirment l'efficacité d'une couverture de sol (enherbement ou bâche tissée) à interrompre le cycle de développement des cécidomyies des fleurs dans sa phase tellurique.

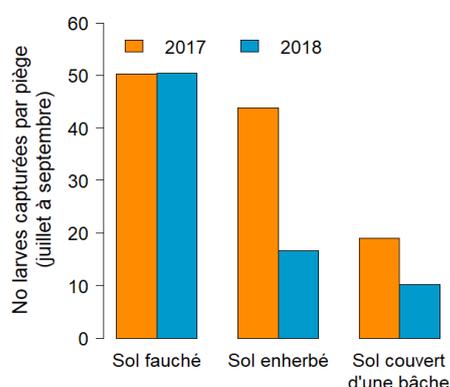


Fig. 9. Nombre total de larves capturées par piège au cours des floraisons 2017 et 2018 selon les modalités de couverture du sol appliquées en 2017 et 2018

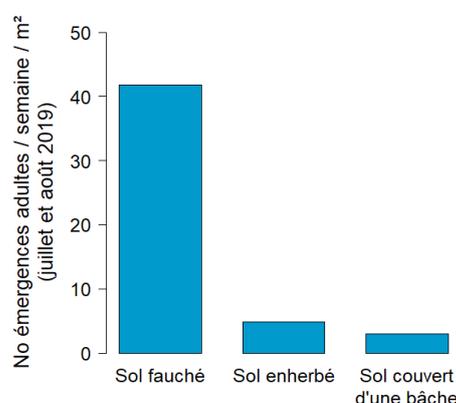


Fig. 10. Nombre d'adultes issus de larves diapausantes émergeant du sol au cours de la floraison 2019 selon les modalités de couverture du sol appliquées en 2017 et 2018.

Le dessèchement des inflorescences (dû essentiellement à la cécidomyie des fleurs) a été significativement inférieur sur le sol enherbé et sur le sol bâché par rapport au sol fauché, et les rendements (en nombre de fruits par arbre) ont été en moyenne multipliés par 4,9 sur le sol enherbé et 2,1 sur le sol bâché, par rapport au sol fauché sur les deux vergers suivis en 2017. En 2018, seul le taux de fructification des UC florifères a été observé. Il a été supérieur, mais pas de façon significative, sur le sol bâché par rapport aux deux autres modalités.

Le taux de floraison des manguiers a été significativement supérieur (multiplié par 1,4) sur le sol enherbé par rapport au sol fauché ou au sol bâché (verger du CPEA suivi en 2017 et 2018). Ce résultat pourrait en partie expliquer les rendements plus élevés des manguiers observés sur le sol enherbé en 2017. Par contre le taux de floraison des manguiers a été supérieur, mais pas de façon significative, sur le sol bâché par rapport au sol enherbé sur le verger de producteur en 2018 (la modalité sol fauché n'a pas été appliquée). Par ailleurs, les différentes modalités de couverture du sol n'ont pas eu d'effet significatif sur la dynamique de floraison, sur la température ou sur l'activité biologique du sol, écartant *a priori* un quelconque effet indésirable de la couverture du sol et notamment de la bâche. Des résultats préliminaires ont cependant 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 (119,2 mouches/kg de fruit) tandis qu'elle est réduite sur le sol fauché (43,1 mouches /kg fruit) et quasiment nulle sur le sol bâché (1 mouches /kg fruit).

- 2 articles scientifiques :
 - Persello et al. (2019). Nature abhors a vacuum: Deciphering the vegetative reaction of the mango tree to pruning. *European Journal of Agronomy* 104: 85-96
 - Ratnadass et al. (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
- 3 participations à des colloques internationaux :
 - Persello et al. (2017). How different pruning intensities and severities affect vegetative growth processes in Cogshall mango trees. XII International Mango Symposium. 10-16 July 2017, Baise, Chine
 - Ratnadass et al. (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. XII International Mango Symposium. 10-16 July 2017, Baise, Chine
 - Ratnadass et al. (2019). Plant organ hardness as a factor of crop resistance to insect pests. 2nd annual ESA International Branch Virtual Symposium. 8-10 April 2019, USA.
- 3 comptes rendus d'activité pour la restitution des résultats aux partenaires (producteurs et CPEA) ayant hébergés les essais :
 - Brustel et al. (2017). Effet de différentes modalités de couverture du sol sur la cécidomyie des fleurs du manguier, la phénologie de l'arbre, et sur l'infestation par les mouches des fruits des mangues précocement tombées au sol
 - Préterre et al. (2017a,b). Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers
- 3 fiches/posters à vocation de transfert et vulgarisation :
 - Grechi et al. (2019). Quels leviers pour maîtriser les mouches des fruits et leurs dégâts sur mangue ?
 - Ratnadass et al. (2019a). Quels leviers pour maîtriser les cécidomyies des fleurs et leurs dégâts sur manguier ?
 - Ratnadass et al. (2019b). Un dispositif de recherche et de formation sur les options agroécologiques de régulation de la cécidomyie des fleurs du manguier
- 3 rapports de stage :
 - Préterre (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 / FacForPro
 - Stahl (2017). Effet de la taille sur la croissance végétative et la floraison du manguier Cogshall. Mémoire d'année de césure, Montpellier SupAgro
 - Brustel (2018). Evaluation de l'effet de pratiques culturales (paillage / enherbement du sol / récolte prophylactique précoce) en vergers de manguiers sur la régulation de bioagresseurs de la floraison et de la fructification : les cas de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits. Mémoire de fin d'étude, Ecole d'ingénieurs de Purpan

Valorisations à paraître / prévues :

- 3 articles scientifiques :
 - Grechi et al. Relating mango infestation by fruit flies with fruit maturity: a step to improve the management of fly damages with harvest timing
 - Persello et al. How pruning intensities and severities affect mango flowering and fruiting in Cogshall mango trees?
 - Ratnadass et al. Effect of soil mulching on mango blossom gall midge dynamics and damages to mango inflorescences
- 1 rapport de stage :
 - 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

❖ Pêcher

Une part importante des connaissances et des données sur le fonctionnement biotechnique du système pêcher-pourriture brune (ou moniliose) ont été acquises par des revues bibliographiques. Elles ont aussi été complétées par des données expérimentales collectées préalablement dans le projet CLIF puis analysées dans le cadre du projet Ecoverger.

➤ *Activité 1 : inoculum et dynamique de la pourriture brune*

La pourriture brune (ou moniliose) est une maladie polycyclique des fruits à noyau qui est causée par l'agent pathogène *Monilinia laxa*. L'infection des fruits par la moniliose provoque des pertes de récolte directes au champ ou indirectes en affectant la durée de conservation des fruits en post-récolte. L'infection des fruits par les conidies de *M. laxa* survient au niveau de blessures ou des fissures cuticulaires. La densité de l'inoculum et des fissures cuticulaires à la surface du fruit joue un rôle majeur dans cette infection fongique (Gibert et al. 2009). Les spores transportées par le vent depuis d'autres sites sont une source d'infection primaire et impliquent des processus de colonisation passive. Les fruits infectés laissés sur le verger pendant l'hiver (« momies ») ou au cours de la saison de production sont une autre source d'infection, primaire et secondaire respectivement, du verger. Les récoltes sanitaires ont été considérées comme un levier potentiel de gestion de la pourriture brune car l'élimination des organes infectés permettrait de réduire les sources de contamination des fruits et le potentiel de développement de la maladie.

➔ Des données sur la densité de spores de *Monilinia* spp transportées dans l'air, qui constituent une source d'inoculum pour la maladie, et de l'état d'infection des fruits ont été collectées dans un verger de pêcher en 2014 et 2015, du début de croissance des fruits en avril jusqu'à la récolte en juillet.

L'analyse des séries temporelles de densité d'inoculum a montré que la densité d'inoculum était fortement corrélée avec la densité de fruits infectés dans le verger. Ce résultat suggère que l'inoculum secondaire, qui est produit par les fruits infectés au cours de la saison de croissance des fruits, était beaucoup plus abondant que l'inoculum primaire, qui est produit par sporulation sur les brindilles et fruits momifiés de la saison précédente. D'un point de vue épidémiologique, ces résultats ont justifié de faire l'hypothèse que les infections secondaires étaient proportionnelles au nombre de fruits infectés.

➤ *Activité 2 : conditions climatiques, croissance des fruits et infection par la pourriture brune*

La densité des fissures cuticulaires à la surface des pêches augmente avec l'intensité de la croissance du fruit (Gibert et al. 2007). Des pratiques culturales affectant la croissance des fruits, telles que l'irrigation et l'éclaircissage des fruits, ont donc été considérées comme des leviers potentiels de gestion de la pourriture brune car elles permettent, selon leurs conditions d'application, de réduire la densité de fissures cuticulaires. Par ailleurs, des corrélations entre les conditions climatiques pendant la saison de croissance des fruits et l'incidence de la maladie en post-récolte ont été identifiées dans des études expérimentales (Villarino et al. 2012). Les variables climatiques ont donc été considérées comme un autre facteur pouvant influencer le développement de la maladie.

➔ Des mesures au champ de croissance de fruits et des mesures au laboratoire de sensibilité de fruits à l'infection par la pourriture brune, par observation de l'état d'infection des fruits après six jours de mise en contact avec des suspensions de conidies, ont été réalisées en 2014 et 2015 sur 633 et 917 fruits, respectivement. Afin de disposer de fruits présentant des courbes de croissance différentes, les fruits suivis ont été échantillonnés sur des arbres soumis à des traitements d'éclaircissage différents visant à faire varier leur charge en fruits. La souche M13 de *M. laxa* a été utilisée pour tester en laboratoire la sensibilité des fruits à l'infection. L'effet des conditions climatiques sur la diffusion de la pourriture brune a également été analysé. Pour cela, et en s'appuyant sur plusieurs études précisant les conditions favorables à la reproduction des conidies (Xu et al. 2001, Gell et al. 2008; Holb 2008), le nombre de jours où les conditions étaient favorables à l'infection a été calculé comme ceux avec des précipitations et une température moyenne comprise entre 22 et 26°C, puis mis en relation avec les infections observées au champ.

Au laboratoire, il a été montré qu'en présence d'inoculum sous forme de suspension de conidies de *M. laxa*, les fruits ayant une croissance rapide étaient plus sensibles à l'infection que ceux ayant eu une croissance lente (Fig. 11). Une courbe de réponse de type logistique entre la probabilité d'un fruit d'être sensible à l'infection par la pourriture brune et le diamètre du fruit a été établie à partir des données observées en laboratoire.

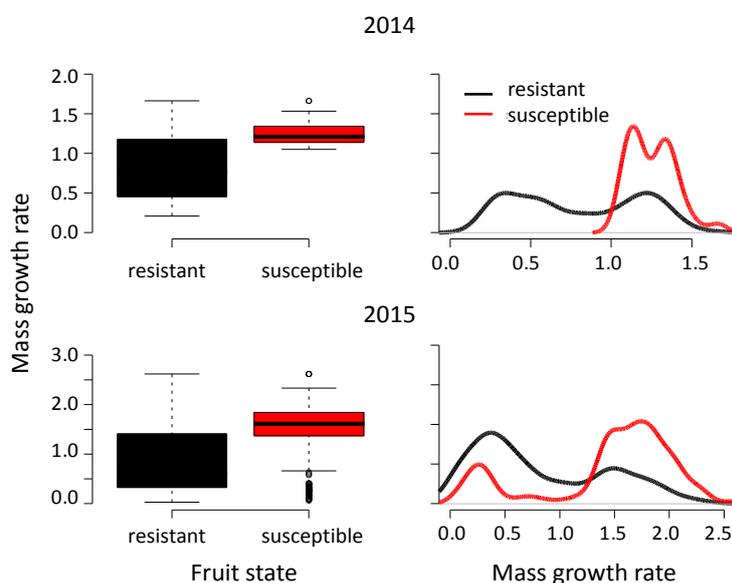


Fig. 11. Taux de croissance des fruits résistants et sensibles à l'infection par la pourriture brune observés en 2014 et 2015

Au champ, des infections par la pourriture brune ont été observées en 2014 mais peu en 2015. L'analyse des données météorologiques suggère que la pourriture brune s'est moins diffusée en 2015 du fait de l'absence de conditions climatiques favorables (considérées comme le nombre de jours avec des précipitations et une température comprise entre 22 et 26°C) pendant la période de sensibilité des fruits. En 2014, les arbres soumis à un éclaircissage modéré ont eu la plus forte incidence de pourriture brune. Nous faisons l'hypothèse qu'en l'absence d'éclaircissage les fruits étaient moins sensibles à l'infection car leur taux de croissance était plus faible. Par contre pour un éclaircissage intense, bien que les fruits aient eu un taux de croissance plus important et étaient plus sensibles à l'infection, nous faisons l'hypothèse que la probabilité d'infection par contact des fruits était réduite par la faible densité de fruits.

Transferts et valorisations (T1 / Pêcher)

o 1 article scientifique :

- Bellingeri et al. (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.

Tâche 2-Déterminants des pratiques & indicateurs

Générer des itinéraires techniques candidats pose la question de leur pertinence vis-à-vis d'un producteur. Un enjeu important est alors de coupler des connaissances issues du point de vue de la recherche avec le point de vue des producteurs dans le cadre d'une démarche de conception de systèmes techniques innovants. Il s'agissait ici d'identifier les freins au changement au sein des exploitations. La décision technique relève en partie de facteurs gérés à l'échelle de l'exploitation et répond à des stratégies propres à chaque producteur. Ces stratégies dépendent de facteurs internes (par exemple la structure et l'organisation de l'exploitation) et externes à l'exploitation (par exemple les modes de commercialisation). La place de la culture au sein de l'exploitation (exploitation spécialisée ou diversifiée), les stratégies de commercialisation du producteur et ses propres finalités sont autant de facteurs pesant sur les choix de pratiques et sur les possibilités de les faire évoluer. Les attendus de cette tâche étaient des typologies des pratiques et des stratégies des producteurs, ainsi qu'un jeu d'indicateurs co-construit avec les producteurs pour évaluer les performances de leurs systèmes techniques.

❖ Manguier

Les connaissances et les données sur le fonctionnement agro-économique des systèmes techniques en verger de mangue ont été acquises par des enquêtes et des analyses réalisées exclusivement au cours du projet Ecoverger.

➤ *Activité 1 : analyse des pratiques et des profils de production*

S'agissant en majorité d'exploitations diversifiées (dans le sens où la mangue n'est pas la seule production réalisée), la place de la mangue et les stratégies de commercialisation au sein de l'exploitation sont censées influencer sur les choix des pratiques et sur les possibilités de les faire évoluer. La typologie des pratiques doit être établie sous l'angle de vue du cadre de contraintes et des déterminants, à la fois des choix techniques pour les itinéraires techniques actuels et des changements de pratiques par une approche historique, afin de mieux appréhender les conditions de changement des pratiques. Il s'agissait d'identifier des profils stratégiques de producteurs basés sur leurs propres objectifs, les contraintes techniques ou socio-économiques de production, et les freins potentiels à l'adoption des innovations techniques proposées.

➔ En 2016, les travaux ont porté sur la caractérisation de la diversité des modes de conduite du verger de mangue et l'analyse de la place qu'occupe cette composante au sein des exploitations. Ce travail a été réalisé au travers d'enquêtes menées auprès d'un panel de 28 producteurs de mangue répartis sur les différentes zones de production à La Réunion, de Saint-Paul à Saint-Pierre. Le guide d'enquête comprenait différentes entrées : compréhension des dynamiques historiques de l'exploitation, description de la structure de l'exploitation et de ses différentes composantes (surfaces, cultures, etc.), identification des facteurs de production mobilisés (foncier, volume de main d'œuvre, matériel, etc.), analyse du calendrier de travaux de l'exploitation, caractérisation technique de la conduite du verger de manguiers, calcul du coût de production de la mangue et estimation de sa part dans le revenu global de l'exploitation. A ce stade, les données recueillies, outre leur informatisation, ont fait l'objet d'un traitement manuel visant une classification des exploitations enquêtées.

Cette démarche a permis de définir une typologie des exploitations composée de 4 types de stratégie d'exploitation, chacun caractérisé par (i) le niveau de diversification du système de production, (ii) la place qu'y occupe la composante 'verger de mangue', (iii) la facilité à mobiliser de la main d'œuvre sur cette composante et (iv) l'orientation agro-écologique du système. L'analyse a par ailleurs permis de montrer une cohérence entre la stratégie identifiée et les pratiques des producteurs, traduites par des indicateurs d'impact (IFT insecticide, IFT fongicide, IFT homologué AB) et des indicateurs agro-économiques (temps de travaux, coûts de production).

- Le type A nommé '**Les spécialisées**' regroupe des exploitations spécialisées dans la mangue qui affichent une forte expérience dans cette culture. Elles sont généralement impliquées dans les réseaux socio-techniques (OP, projet de recherche/développement) et de ce fait sont souvent engagées dans une démarche de réduction des intrants chimiques. Cette transition est favorisée par l'absence de réelles contraintes de main d'œuvre et la priorité donnée à cette culture ; mais elle est freinée par la nécessité de sécuriser le revenu issu d'un système de production peu diversifié. Les pratiques relevées au sein de ces exploitations sont cohérentes avec ces caractéristiques : on y observe notamment un enherbement du verger (visant à fournir un habitat pour les auxiliaires), et le maintien du recours aux traitements. Ces derniers sont toutefois réalisés sur la base d'observations de seuils de nuisibilité. S'ils sont efficaces, les produits homologués en AB sont privilégiés.
- Le type B nommé '**Les diversifiées pivot mangue**' regroupe des exploitations affichant une diversification spécifique et variétale du système de production. La mangue apporte en moyenne 65% du revenu agricole. Au sein de ces exploitations, la diversification rend parfois difficile la coordination des calendriers de travaux. Les méthodes de luttes alternatives contre les bioagresseurs y sont recherchées. Cependant, le temps passé à observer le verger est réduit, conduisant à une diminution des seuils d'intervention. L'importance de la mangue au sein du système conduit aussi le producteur à sécuriser son rendement en multipliant certains traitements. Cette tendance conduit par conséquent à une augmentation des quantités utilisées d'intrants de synthèse.

- Le type C nommé '**Les diversifiées mangue secondaire**' affichent des systèmes de production diversifiés où la mangue n'apporte qu'environ 30% des revenus agricoles et occupe moins de 20% de la SAU. Les exploitations concernées restent généralement en marge des réseaux socio-techniques existants et cumulent un manque de connaissances théoriques et pratiques sur les moyens de lutte alternatifs. La mangue n'y est pas la culture prioritaire, et les choix ne se font pas en faveur de cette composante pendant les périodes de pics de travail. Il en résulte des pratiques minimisant le temps passé à observer le verger au détriment de stratégies de traitements chimiques préventifs. Les moyens prophylactiques tels que les récoltes sanitaires n'étant pas forcément respectés pour des raisons de disponibilité de la main d'œuvre, ces exploitations accusent des pertes importantes au moment de la récolte. Cette tendance ne fait qu'entretenir le moindre intérêt affiché par le producteur pour la mangue.
- Le type D '**Les agroécologues pluriactifs**' regroupent quelques rares exploitations affichant une vision très en rupture de la production agricole. Le verger de mangue fournit environ 20% du revenu agricole de l'exploitation. Il intègre un ensemble diversifié de productions ou d'activités. L'agrotourisme, quand il est pratiqué, bénéficie de la valeur paysagère du verger de manguier. Ce dernier y est conduit en AB. Le choix de cultures intègre la recherche d'interactions entre les différentes composantes du système. La conduite du verger, comme du reste des productions, est essentiellement basée sur la recherche d'équilibres écosystémiques à l'échelle du parcellaire. La qualification en AB et son cahier des charges constitue le minimum requis pour ces exploitations qui limitent volontairement leurs interventions. La diversification des espèces et des activités qui est partie intégrante de la démarche, entraîne parfois une contrainte de main d'œuvre par recouvrement des pics de travail. Ces périodes conduisent à faire des choix qui ne sont pas toujours en faveur du verger de manguier.

Ce travail d'analyse souligne l'importance de la compréhension du fonctionnement de l'exploitation et de la place qu'y occupe la mangue sur la conduite du verger et sur les marges de manœuvre dont disposent *a priori* les producteurs pour faire évoluer leurs pratiques.

➤ *Activité 2 : co-construction des critères et indicateurs d'évaluation*

Cette activité portait sur la construction d'une grille d'évaluation des itinéraires techniques en verger de manguiers à dire de producteurs. Elle avait pour objectif de mieux appréhender la manière dont les producteurs évaluent leur propre itinéraires techniques, et par extension les futurs itinéraires techniques candidats conçus *in silico* à partir du cadre de modélisation (T3-4).

➔ Ce travail a été réalisé en 2017 au cours de deux phases. La première phase a consisté en une première vague d'enquêtes menées sur un effectif limité de 13 exploitations, choisies sur la base de la typologie précédemment établie. L'entretien a consisté à mettre le producteur en condition d'évaluation par différentes entrées : par une discussion autour des différentes opérations culturales sur le verger de manguier et des changements de pratiques opérées dans le passé, et par une critique des pratiques du voisinage et/ou d'innovations dont le producteur a entendu parler. L'entretien traitait de la manière dont le producteur évalue chacune de ces pratiques, afin de relever dans son discours les variables qu'il mobilise pour cela. Cette phase d'entretien a permis de recenser un ensemble de variables mobilisées par les 13 exploitants enquêtés. L'enquêteur a par ailleurs profité du retour au sein de ces 13 exploitations pour présenter de manière individuelle la typologie établie et faire valider la place qu'y occupe le producteur. La seconde phase a consisté à organiser un atelier de validation des variables ainsi obtenues. A préalable, les variables recensées ont été organisées au sein d'indicateurs en fonction de la thématique concernée et du sens donné à la variable par les producteurs. Les indicateurs ont ensuite été classés au sein d'une des trois composantes de l'agriculture durable (agro-environnementale, sociale ou économique). Présentée de cette manière, la grille a été proposée lors de l'atelier à un collectif de 6 producteurs issu du groupe enquêté. L'atelier a permis de corriger le sens donné à certaines variables et écarter celles qui relevaient de cas trop particuliers. Ces différents ateliers ont par ailleurs permis d'initier un collectif de producteurs à même de travailler autour de la co-conception de systèmes innovants.

Cette démarche de co-construction de la grille d'évaluation a permis de recenser 56 variables mobilisées de manière plus ou moins explicite. En tenant compte de leur nature, elles ont été

réparties au sein de 22 indicateurs, eux-mêmes répartis entre les trois composantes de la durabilité. Les analyses ont montré :

- le nombre important de paramètres pris en compte par les producteurs pour évaluer leur système de culture, couvrant les trois piliers de la durabilité,
- un relatif consensus obtenu sur quelques variables (présence d'auxiliaires, marge brute, prix de vente au producteur, qualité du fruit), citées par plus de 85% des producteurs.

La grille d'indicateurs se limite dans sa version actuelle à une liste de variables réparties en indicateurs. Pour aller plus loin, il serait intéressant de pondérer ces indicateurs pour chacun des quatre types d'exploitation. Un travail exploratoire de pondération des indicateurs a été réalisé au cours d'un atelier avec un collectif restreint de 6 producteurs, mais il nécessiterait d'être reconduit avec un collectif élargi représentatif des différentes typologies d'exploitation.

➤ *Activité 3 : règles de gestion et règles de décision des producteurs*

Cette activité visait à identifier les règles de gestion et de décision qui guident le choix technique des producteurs, et les liens qui existent entre les choix techniques, les stratégies de production et les déterminants de ces stratégies. Ces connaissances ont permis de mieux appréhender les contraintes et les leviers techniques ou socio-économiques de production et les freins potentiels à l'adoption des innovations techniques proposées.

➔ Dans un premier temps, une analyse globale des données recueillies lors des enquêtes et des ateliers précédents a permis d'identifier des règles de gestion de nature agronomiques et économiques. Par exemple, sous l'angle économique, la qualité des produits est influencée par des cahiers des charges. Les cahiers des charges, ainsi que les pouvoirs de négociation commerciale des producteurs, influencent les prix d'achat au producteur et les modes de production. Par exemple, une exploitation qui est en mesure d'obtenir des situations de monopole ou de quasi-monopole à des périodes particulières (par exemple grâce à des mises en marché précoces ou à des volumes vendus importants) pourra influencer sur les prix du marché. D'autres indicateurs, cette fois-ci agronomiques, influencent la qualité commerciale des produits et interviennent en lien avec le contexte naturel dans lequel évoluent les exploitations agricoles. Le contexte naturel diffère selon la position géographique des exploitations. Il peut par exemple influencer sur les conditions pédoclimatiques ou sur le cortège de bioagresseurs et d'auxiliaires présents, et donc *in fine* sur les conditions de production. La présence d'auxiliaires, la marge brute et le prix de vente et la qualité du fruit sont ainsi des variables d'évaluation consensuelles.

Dans un second temps, un entretien détaillé a été réalisé avec deux producteurs à la tête d'exploitations agricoles au fonctionnement différent (types B et D). Plusieurs pratiques visant à la gestion des ravageurs du manguier (qui seront dénommées « innovations » techniques) leurs ont été présentées. Il s'agit de la synchronisation de la floraison par la taille, de la couverture du sol par une bâche ou l'enherbement, de la récolte des fruits à un stade de maturité précoce (vert-mature ou début point-jaune), et de la récolte prophylactique précoce (dès le début de la croissance ces fruits). Le positionnement des producteurs face à ces innovations a permis d'identifier des freins potentiels à l'adoption de certaines innovations.

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. La récolte prophylactique des fruits en saison de production est d'ailleurs déjà pratiquée, et l'intérêt de favoriser la présence d'auxiliaire par l'enherbement est déjà bien reconnu. Différents freins potentiels interviennent pour les autres innovations. Ces freins peuvent être de plusieurs niveaux : économiques, techniques ou matériels, et liés à la stratégie de commercialisation ou encore au contexte environnemental de l'exploitation. L'absence de chambre froide pour conserver les fruits ou de moyen technique pour identifier facilement le stade de maturité vert-mature, couplé à une stratégie de commercialisation de fruits murs et de qualité en partie guidée par la demande du marché et des consommateurs, ont par exemple été identifiés comme des freins pour l'innovation consistant à récolter les fruits à un stade de maturité plus précoce. Concernant le bâchage du sol, les freins qui ont été identifiés par un des deux producteurs sont son coût (plus cher et plus coûteux en main-d'œuvre que des traitements insecticides) et sa spécificité vis-à-vis de la cécidomyie des fleurs, qui dans le contexte particulier de son exploitation ne constitue pas une contrainte biotique majeure. Pour le deuxième producteur, le frein identifié pour le bâchage était un impact négatif sur l'activité biologique du sol. Or les

résultats de la recherche (cf. T1, activité 3) ont montré que la bêche n'a pas d'effet négatif sur l'activité biologique du sol. Cette divergence possible entre les interprétations des agriculteurs pour certaines techniques et les résultats de la recherche démontre l'importance de la circulation des connaissances entre les acteurs pour la co-construction des innovations techniques.

La compréhension de la structure des exploitations ainsi que les réactions des producteurs face aux techniques innovantes présentées nous ont permis de construire et d'affiner les règles qui amènent aux choix techniques de l'agriculteur. Il a ainsi été montré que 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.

Transferts et valorisations (T2 / Manguier)

- 1 compte-rendu d'activité pour la restitution des résultats aux producteurs enquêtés :
 - Marchetti (2016). Présentation synthétique des types d'exploitation
- 2 rapports de stage :
 - Marchetti (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
 - Girard (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
- 1 rapport d'étude :
 - Parrot et al. (2019). Projet Ecoverger - Déterminants des pratiques & indicateurs d'évaluation des systèmes techniques en verger de manguiers
- 2 ateliers de formalisation de la grille d'indicateurs d'évaluation des performances du système technique manguier avec un collectif de 6 producteurs : restitution / validation de la grille d'indicateurs et pondération des indicateurs de la grille (en 2017 et 2018).
- 1 article de vulgarisation : « Qui produit la mangue à la Réunion ? », magazine Mag' Réunion

Valorisations à paraître / prévues:

- 1 article scientifique à portée méthodologique sur la démarche de la Tâche 2.

❖ Pêcher

Une part importante des connaissances et des données sur le fonctionnement agro-économique des systèmes techniques en verger de pêche-nectarine ont été préalablement acquises dans le cadre du projet EcoPêche. Elles ont aussi été complétées par des données d'enquêtes et des analyses complémentaires réalisées au cours du projet Ecoverger.

➤ *Activité 1 : analyse des pratiques et des profils de production*

Les choix des pratiques et les possibilités de les faire évoluer sont *a priori* influencés par les contraintes de production (dont la gestion de la moniliose, une maladie particulièrement difficile à maîtriser) et les stratégies de commercialisation au sein de l'exploitation. Le rôle de la culture au sein de l'exploitation a été considéré comme peu influant s'agissant en majorité d'exploitations spécialisées. Il s'agissait d'identifier des profils stratégiques de producteurs représentatifs de la filière, basés sur le contexte de production, les objectifs, les pratiques et les contraintes techniques ou socio-économiques des producteurs.

➔ Deux approches complémentaires ont été utilisées pour documenter cette tâche: (i) le recensement des leviers d'action disponibles et en cours d'évaluation au sein d'un réseau d'expérimentation pluriannuel sur les systèmes alternatifs à l'usage des produits phytopharmaceutiques (données issues du projet EcoPêche ; Plénet et al. 2019), comprenant 19 systèmes de culture expérimentaux répartis sur 7 sites et suivis de 2016 à 2018 ; et (ii) la caractérisation des stratégies de production par une enquête réalisée auprès de 13 experts de la filière pêche-nectarine. Ces experts sont des spécialistes de la conduite et de la protection des arbres qui assurent un rôle de conseil auprès des arboriculteurs, et sont répartis sur les trois zones de production majeures en France (Drôme-Ardèche, Sud-Est et Pyrénées Orientales).

Dans un premier temps, le recensement des leviers d'action introduits par les experts du projet EcoPêche lors de la phase de conception (conception *de novo*) ou lors du processus de conception incrémental (conception pas à pas) pour ajuster les itinéraires techniques suite au retour d'expérience des années antérieures, a permis d'identifier les possibilités techniques pour concevoir et gérer des systèmes visant à réduire l'utilisation des pesticides.

Les leviers d'action identifiés lors de la conception et progressivement mis en place dans les systèmes sous cahier des charges de l'agriculture biologique (BIO), dans les systèmes de culture économes en pesticides (ECO, objectif de réduction de 50% des IFT) et dans les systèmes de référence (REF), reproduisant les pratiques des producteurs en vergers de pêche-nectarine, sont relativement nombreux (Fig. 12). A noter que certains leviers systématiquement utilisés ou absents du réseau EcoPêche ne sont pas représentés dans la figure 12. Il s'agit en particulier des leviers « confusion sexuelle contre la tordeuse orientale du pêcher » et « taille en vert » qui sont toujours utilisés, tandis que le lâcher inoculatif, le lâcher inondatif, le contrôle génétique pour lutter contre les ravageurs et les filets anti-insectes ne sont jamais utilisés car ces méthodes n'étaient pas expérimentalement validées au moment de la plantation des vergers du réseau EcoPêche.

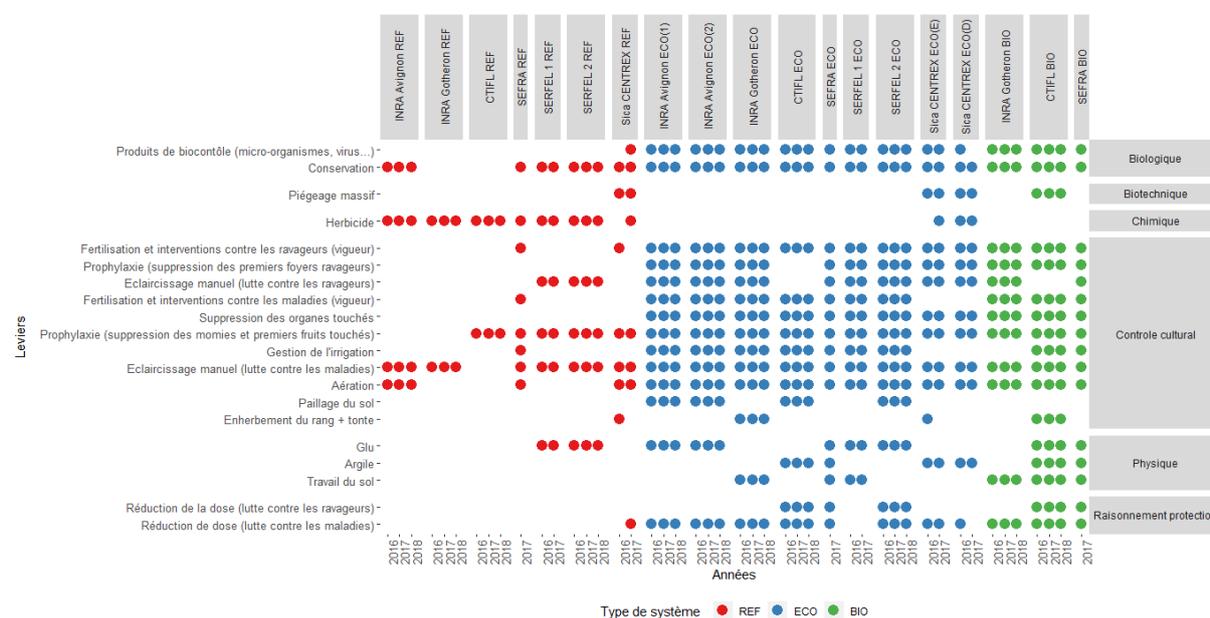


Fig. 12. Leviers d'action pour contrôler les bioagresseurs, classés par grandes catégories de mode d'action, mis en œuvre en 2016-2018 dans les systèmes de culture du réseau d'expérimentation « système » du projet EcoPêche répartis sur 7 sites expérimentaux dans le bassin de production. En rouge, les systèmes de « Référence » (REF) qui reproduisent les pratiques de producteurs ; en bleu, les systèmes économes en pesticides (ECO) ; en vert, les systèmes en agriculture biologique (BIO).

L'analyse des données issues de ce réseau a montré que les systèmes ECO (13,7 leviers en moyenne sur 3 ans) et BIO (14,7 leviers) utilisent significativement plus de leviers d'action que les systèmes REF (4,7 leviers en moyenne), et en particulier les leviers biologique, physique et de contrôle cultural ainsi que le raisonnement de la protection (piégeage pour suivre les populations de bioagresseurs et déclenchement des interventions sur seuils) intégrant plus d'observations et de prises de risque.

Les principaux leviers d'action mobilisables pour gérer plus spécifiquement la moniliose, en dehors de la lutte chimique, appartiennent à la catégorie des méthodes culturales et combinent différentes méthodes telles que la prophylaxie en supprimant les sources d'inoculum primaire (momies, chancre) 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 des arbres, ou la qualité de l'éclaircissage pour éviter les contacts entre fruits. L'efficacité de ces combinaisons est cependant sous l'influence des conditions du milieu, en particulier les épisodes pluvieux dans les 3 semaines qui précèdent la maturité, de la pression en moniliose existant autour du verger, et sans doute aussi de l'intensité et de la qualité dans la mise en œuvre de ces différentes pratiques.

Dans un deuxième temps, l'enquête auprès des 13 experts de la filière pêche-nectarine a permis d'apprécier les leviers qui étaient actuellement préconisés et/ou réellement mis en œuvre dans les vergers de producteurs, en ciblant notamment les leviers techniques pour gérer les maladies de conservation, et de caractériser les modes de conduite en verger. Cette démarche d'enquête menée auprès d'experts¹ de la filière répartis sur les trois zones de production majeures en France permet d'avoir une vision globale des stratégies de production à l'échelle d'une région sans avoir à mettre en œuvre un lourd dispositif d'enquêtes chez un grand nombre de producteurs. Le guide d'entretien semi-directif a recensé les critères de production (visuels, gustatifs, quantitatifs), les débouchés, les contraintes de production, les stratégies de gestion de la moniliose (leviers et seuils d'intervention) et leur importance relative. Les données recueillies ont ensuite fait l'objet d'une classification via une analyse factorielle multiple suivie d'une classification ascendante hiérarchique (stage hors projet ; Kerdraon 2019). Cette analyse a permis d'identifier 4 types de stratégie d'exploitation, chacune caractérisée par (i) les objectifs de rendement et la charge en fruits visée, (ii) les critères visuels, (iii) l'utilisation ou non d'un levier de gestion de la moniliose, et (iv) pour certains leviers, la stratégie d'utilisation de ce levier (par exemple, nombre d'applications fongicides). Certaines variables, comme les débouchés ou les critères gustatifs, étaient trop diversifiées ou au contraire trop homogènes pour être utilisées.

- Groupe 1 '**production fruitière intégrée (ou conventionnelle)**' (**PFI**) : les charges en fruits sont élevées (600 fruits/arbre) et les potentiels de rendement sont variables et parfois très élevés (jusqu'à 80 t/ha). La moniliose est gérée par l'application systématique de produits phytosanitaires et par la suppression des fruits pourris avant la récolte. Moins de 20% des pertes sont dues à la moniliose.
- Groupe 2 '**production raisonnée 1**' (**PR1**) : les charges en fruits et les potentiels de rendements sont plus faibles que le Groupe 1. On retrouve l'utilisation de produits phytosanitaires mais de façon plus modérée, ainsi que de nombreux autres leviers de gestion comme la réduction des intrants (eau et azote) pour éviter la formation de fissures cuticulaires sur les fruits. Les pertes dues à la moniliose sont élevées (jusqu'à 75%).
- Groupe 3 '**production raisonnée 2**' (**PR2**) : la charge en fruits et les potentiels de rendements sont plus faibles que les Groupes 1 et 2, mais les pertes dues à la moniliose sont équivalentes au Groupe 1. L'objectif est de diminuer l'utilisation de produits phytosanitaires (0-3 applications contre 3-4 pour le Groupe 1) et les quantités d'azote (-20 U par rapport au Groupe 1) et d'eau apportées, surtout avant la récolte.
- Groupe 4 '**agriculture biologique**' (**AB**) : ce profil, représenté par seulement un individu, n'utilise pas de produits phytosanitaires. On constate un faible niveau de production et peu de leviers mobilisés. Les pertes dues à la moniliose peuvent s'élever jusqu'à 50%.

Les leviers d'action mentionnés par les enquêtés sont identiques à ceux reportés dans EcoPêche. Par la suite, il serait intéressant d'étudier les stratégies de combinaisons de ces différents leviers, qui peuvent varier en fonction des conditions climatiques mais aussi en fonction des profils de production. Par ailleurs, les freins potentiels à l'adoption de nouvelles pratiques seront plutôt abordés lors d'une réunion de restitution des résultats avec les experts mobilisés et des producteurs.

➤ *Activité 2 : co-construction des critères et indicateurs d'évaluation*

Cette activité portait sur la définition de variables d'évaluation des itinéraires techniques en verger de pêche-nectarine, et par extension des futurs itinéraires techniques candidats issus des résultats du travail d'optimisation de la Tâche 4.

➔ Le précédent travail d'enquête a également permis de définir les variables d'évaluation, qui font aussi parti des variables ayant servi à la typologie. On dénombre 21 variables structurantes, comprenant : i) 14 variables décrivant 3 groupes d'indicateurs relatifs aux stratégies de l'exploitation, ses critères de production et ses pratiques ; et ii) 7 variables relatives aux leviers de gestion de la moniliose et aux règles de décision associées. Ces variables sont listées dans le Tableau 1. Des valeurs seuils pour chaque variable quantitative ont été fixées (valeurs

¹ *Méthode des opinions d'experts (Evrard et al. 1993)*

minimales et maximales observées), et les critères de production et les leviers de gestion de la moniliose ont été hiérarchisés pour chaque profil de production, à partir des dires des experts enquêtés et des connaissances de la filière des chercheurs de l'unité PSH. Tous ces critères, leviers, seuils et pondérations seront validés lors d'un atelier de restitution auprès des experts.

Tableau 1. Variables structurantes avec leurs modalités pour les variables qualitatives, leurs valeurs seuils pour les variables quantitatives et leur importance par profil de production.

Groupes d'indicateurs	Variables	Modalités	Seuils	Hiérarchisation			
				PFI	PR1	PR2	AB
Stratégie	Débouchés	Vente directe Circuit long Circuit court	-	-	-	-	-
	Critères de récolte	Moniliose et météo Calibre Coloration du fruit Organisation du travail Prix de vente	-	-	-	-	-
Critère de production	Rendement (en t/h)	-	[15,80]	1	1	1	1
	Part de calibre A-2A (en %)	-	[0,100]	1	1	1	3
	Aspect visuel	Catégorie Extra Catégorie 1 Catégorie 2	-	1	1	1	3
	Fermeté moyenne (en kg/cm ²)	-	[3,6]	2	3	4	4
	Pertes de fruits à la récolte, tous défauts confondus (en %)	-	[0,100]	3	3	3	2
	Pertes de fruits à la récolte, dues à la moniliose (en %)	-	[0,100]	4	2	3	2
Pratiques	Charge en fruit (en nombre de fruits/arbre)	-	[200,600]	-	-	-	-
	Durée de l'irrigation (en mois)	-	[4,7]	-	-	-	-
	Nombre de périodes d'irrigation	-	[2,3]	-	-	-	-
	Quantité d'eau apportée (en % ETP)	-	[60,90]	-	-	-	-
	Dose d'azote total (en unité)	-	[100,150]	-	-	-	-
	Fractionnement de la fertilisation (en nombre de passages)	-	[2,4]	-	-	-	-
Leviers de gestion de la moniliose	Nombre de leviers	-	[1,5]	-	-	-	-
	Tolérance variétale	oui/non	-	1	1	1	1
	Irrigation	oui/non	-	4	3	2	2
	Fertilisation	oui/non	-	4	3	2	2
	Aération de l'arbre	oui/non	-	1	1	1	1
	Suppression des momies	oui/non	-	3	2	4	2
	Protection phytosanitaire (en nombre d'applications)	-	[1,4]	2	3	3	-

PFI « production fruitière intégrée », PR 1 « production raisonnée 1 », PR 2 « production raisonnée 2 et AB « agriculture biologique »

Transferts et valorisations (T2 / Pêcher)

- 1 compte-rendu synthétique d'activité :
 - Kerdraon (2019). Compte rendu de l'analyse des résultats d'enquête et de la classification : identification des profils de production
- 1 rapport de stage :
 - Bostal (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

Valorisations à paraître / prévues :

- 1 atelier de formalisation de la grille d'indicateurs d'évaluation des itinéraires techniques en verger de pêche-nectarine : restitution/validation des variables pondérées et de leurs les valeurs seuils avec les experts (planifié le 06/12/2019)

Tâche 3-Modélisation

La conception assistée par modèle d'itinéraires techniques en vergers, dans un contexte de réduction de la dépendance aux pesticides, nécessite de disposer d'un modèle biotechnique arbre-bioagresseurs-pratiques 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, et auquel sont intégrés des règles de décision pour certaines pratiques et des indicateurs de performances. Le modèle QualiTree (Lescourret et al. 2011), modèle écophysiological de culture qui a été développé sur pêcher et simule les effets de pratiques de cultures sur la variabilité inter-arbre de la qualité des fruits, avait été retenu comme cadre générique pour le modèle biotechnique des deux cultures fruitières. Les attendus de cette Tâche étaient le développement d'un cadre de modélisation pour des cultures fruitières, s'appuyant sur les connaissances et les données acquises dans la Tâche 1, et qui soit mobilisable dans le cadre de la Tâche 4 pour la conception d'itinéraires techniques en vergers.

❖ Manguier

- *Activité 1 : développement d'un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue : V-Mango*

Cette activité visait le développement d'un modèle de culture pour le manguier (variété Cogshall) qui soit capable de simuler la croissance végétative et la floraison qui lui succède, la croissance des fruits et leur qualité, ainsi que l'effet de pratiques de culture (en particulier la taille) sur ces processus. Un modèle de croissance et d'élaboration de la qualité des fruits (Léchaudel et al. 2005, 2007) récemment complété par un modèle de maturation (Nordey 2014) existe déjà sur la mangue. Il constitue une version simplifiée à l'échelle de la branche fruitière du modèle QualiTree (modèle à l'échelle de l'arbre entier). Il ne permet cependant pas de prédire le développement architectural et la phénologie du manguier. Il s'agissait donc de développer un modèle de développement végétatif et reproducteur pour cet arbre, et de le coupler au modèle de croissance et d'élaboration de la qualité des fruits existant. Cette activité a été menée en appui au projet COSAQ et à une thèse (sur projet COSAQ ; Persello 2018), en collaboration étroite avec Frédéric Boudon, chercheur du Cirad dans l'UMR AGAP.

➔ Un modèle décrivant le développement architectural du manguier (Fig. 13), la croissance et le développement phénologique des UC et des inflorescences, et la fructification a été construit (Boudon et al. 2016 ; Boudon et al. 2017 ; Persello et al. 2018), puis étendu en y intégrant le modèle de croissance et d'élaboration de la qualité de la mangue défini à l'échelle de la branche fruitière (Léchaudel et al. 2005, 2007). Une première version d'un modèle structure-fonction (FSPM) simulant le développement et l'élaboration du rendement du manguier ('V-Mango') est désormais disponible pour la mangue Cogshall pour des arbres non taillés. Elle est décrite dans une publication scientifique en cours de révision. 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 (Fig. 14).

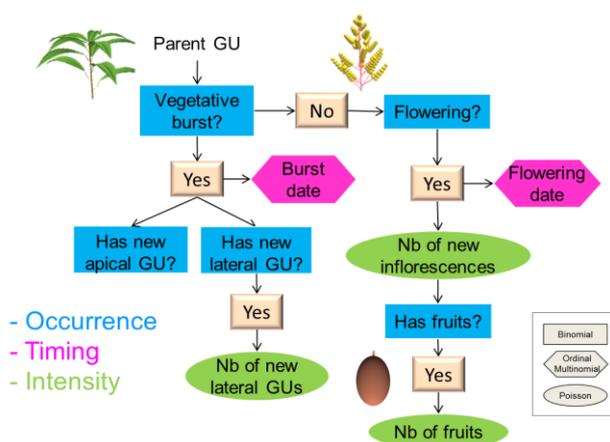


Fig. 13. Représentation schématique de la décomposition en processus stochastiques élémentaires (occurrence, intensité et temporalité) de la croissance végétative, de la floraison et de fructification, simulées par des tirages aléatoires dans des lois statistiques dont les paramètres sont conditionnés par des facteurs architecturaux affectant ces processus élémentaires.

Les lois statistiques sont de distribution binomiale, multinomiale ordinaire ou de Poisson selon le processus considéré.



Fig. 14. Exemple de simulation par le modèle V-Mango du développement végétatif et reproducteur d'un jeune manguiers et de sa représentation sous forme de maquettes 3-D

Des révisions de ce modèle sont encore en cours, en particulier avec l'intégration d'un modèle d'interception lumineuse et d'un modèle de mortalité des feuilles et des axes (Boudon et al. 2019), ce qui permettra une meilleure spatialisation de l'environnement lumineux et des feuilles au sein de la canopée, et des simulations plus précises. Par ailleurs, le fonctionnement de la branche fructifère dans le modèle V-Mango est considéré indépendamment du reste de l'arbre puisque les flux de carbone à l'échelle de l'arbre entier ne sont pas pris en compte. Même si la suggestion d'une autonomie partielle des branches fructifères vis-à-vis du carbone chez le manguiers (Grechi et Normand 2019) tend à justifier cette simplification, des investigations complémentaires sont à envisager pour statuer sur cette simplification.

Dans la version préliminaire du modèle V-Mango, les lois de probabilités utilisées pour simuler l'occurrence, l'intensité et la temporalité de la croissance végétative, de la floraison et de la fructification tiennent compte uniquement de facteurs architecturaux. Pour intégrer les effets de la taille au modèle 'V-Mango', les lois de probabilité pour les processus élémentaires de la croissance végétative ont été révisées : elles sont désormais conditionnées par des variables décrivant des traits architecturaux des axes, et par la taille caractérisée par son intensité à l'échelle de l'arbre et sa sévérité à l'échelle de l'axe (Persello 2018). Ces lois ont été définies pour des axes taillés et des axes non taillés, à partir des données expérimentales acquises en 2016 et 2017 (cf. T1, activité 2). Ce modèle a ensuite été utilisé pour analyser les effets de la taille sur la croissance végétative, aux niveaux structurel et temporel, à l'échelle plus globale de l'arbre. Pour cela, des tailles virtuelles ont été simulées sur la structure 3D de l'architecture d'un arbre adulte (Fig. 15). L'architecture de cet arbre a été obtenue par digitalisation.

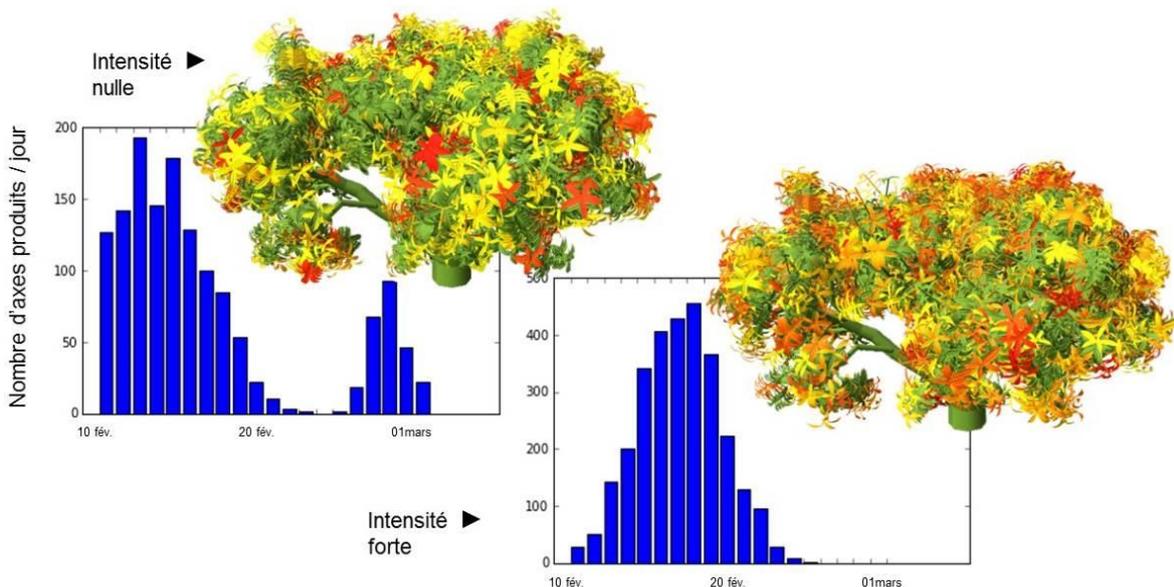


Fig. 15. Effet de la taille sur la croissance végétative du manguiers : exemple de simulation à partir du modèle V-Mango sur la maquette 3-D d'un arbre adulte non taillé et intensément taillé. Les axes colorés sont ceux développés après la taille : plus la couleur tend vers le rouge, plus l'axe s'est développé tardivement

Les simulations ont montré que le nombre d'axes et la surface foliaire retirés au moment de la taille sont largement compensés par la stimulation de la croissance végétative juste après la

taille. Le modèle reproduit bien l'effet de la taille sur la dynamique de débourrement végétatif qui a été observé expérimentalement, avec une synchronisation de la croissance végétative en une seule vague sur les arbres intensément taillés (vs. deux vagues sur les arbres non taillés).

Du fait du retard dans l'avancement de la Tâche 1 concernant l'acquisition puis l'analyse des données de floraison (lié à l'absence de floraison en 2017), il n'a pas encore été possible de rendre compte dans le modèle des effets directs ou indirects (via la croissance végétative) de la taille sur la floraison et la fructification.

➤ **Activité 2 : développement de modèles manguiers-ravageurs : cas de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits**

Cette activité prévoyait le développement de modèles manguiers-ravageurs pour la cécidomyie des fleurs et les mouches des fruits, en considérant les interactions des deux ravageurs avec les inflorescences et les fruits, respectivement. Un modèle a été développé sur la cécidomyie des fleurs pour décrire la colonisation d'un verger par des femelles exogènes (Amouroux 2013). Il ne décrit cependant pas le cycle de développement du ravageur et ne permet donc pas de rendre compte de l'effet de la couverture du sol sur l'infestation du verger. Ce modèle n'étant pas adapté aux objectifs du projet, un modèle original a été développé. Une fonction définissant la probabilité d'une mangue d'être infestée en fonction de son état de maturité avait été établie sur la base d'un jeu de données préliminaire et couplée au modèle de croissance et d'élaboration de la qualité des fruits, constituant ainsi une première version du modèle manguiers-mouches des fruits (Grechi et al. 2015). Ce modèle permettait de prédire la qualité du fruit à la récolte. Toutefois, il n'était pas complet par rapports aux objectifs du projet car 1) la qualité d'une mangue à la récolte ne correspond pas à sa qualité à maturité, en particulier si celle-ci est récoltée avant maturité et continue à mûrir pendant sa conservation, et 2) la dynamique des mouches des fruits à l'échelle du verger n'était pas prise en compte. Cette première version du modèle nécessitait donc d'être consolidée avec des données plus complètes, et d'intégrer la dynamique des mouches des fruits et un indicateur de qualité des fruits à maturité.

➔ **Cécidomyie des fleurs.** Le modèle manguiers-cécidomyie des fleurs a été développé à partir des données expérimentales acquises sur le verger du CPEA en 2017, qui était structuré en trois sous-parcelles correspondant aux trois modalités de couverture de sol appliquées (sol bâché, enherbé et fauché ; cf. T1, activité 3). Il décrit la dynamique du ravageur dans chaque sous-parcelle du verger au cours de la floraison, en utilisant les dynamiques de floraison observées (i.e., les dates de débourrement des inflorescences) comme entrées du modèle. Ce modèle est basé sur une représentation du cycle de développement du ravageur (Fig. 16).

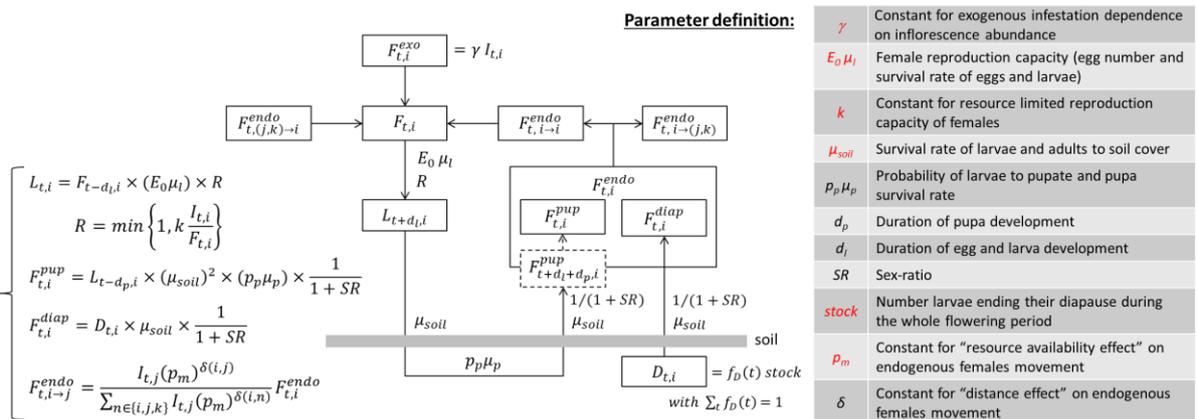


Fig.16. Schéma conceptuel du modèle manguiers-cécidomyie des fleurs. Les variables correspondent aux inflorescences (I), aux larves de dernier stade (L), aux larves qui terminent leur diapause (D), aux femelles exogènes (F^{exo}) et aux femelles endogènes (F^{endo}) qui émergent des larves entrées en pupation (F^{pup}) ou des larves en diapause (F^{diap}). Les indices des variables indiquent la date et la sous-parcelle (e.g. $F_{t,i}$ est le nombre de femelles à la date t dans la sous-parcelle i). Les traits en pointillés marquent une rupture dans le temps. Les paramètres notés en noir sont issus de la littérature, tandis que ceux en rouge ont été calibrés.

La population de cécidomyies des fleurs est structurée en plusieurs groupes : i) les femelles exogènes au verger, ii) les femelles endogènes au verger qui émergent des larves en diapause depuis plus d'un an, iii) les femelles endogènes au verger qui émergent des larves entrées en

pupaison lors de la floraison en cours (représentant l'infestation du verger par la multiplication locale du ravageur), iv) et les larves de dernier stade qui s'éjectent des inflorescences pour s'enfouir dans le sol et entrer en diapause ou en pupaison. Les femelles endogènes qui émergent dans une sous-parcelle peuvent y rester ou se déplacer dans les sous-parcelles voisines. L'effet de la couverture du sol sur la dynamique des cécidomyies des fleurs est pris en compte par le paramètre μ_{soil} qui traduit le taux de survie des larves qui s'enfouissent dans le sol, et des adultes qui en émergent. La valeur de ce paramètre dépend de la modalité de couverture de sol (μ_{soil} a été fixée à 0 pour le sol bâché et a été calibré pour les deux autres modalités). Le modèle tient également compte de l'effet de la ressource (ici les inflorescences) sur la dynamique des cécidomyies des fleurs, en considérant une réduction de la capacité de reproduction des femelles en situation de compétition vis-à-vis des inflorescences (R ; Fig.16).

Une analyse de sensibilité du modèle a montré que les dynamiques de larves étaient sensibles aux paramètres relatifs au taux de survie des cécidomyies à la couverture du sol (μ_{soil}), à la capacité de reproduction des femelles ($E_0 \mu_i$) et à la pression de femelles exogènes (γ).

Les paramètres du modèle ont été estimés avec un algorithme d'optimisation multicritère qui permet d'identifier un ensemble de solutions (ou jeux de paramètres) proches du front de Pareto, i.e., de l'ensemble des solutions offrant les meilleurs compromis pour les trois sous-parcelles en termes de qualité de prédiction des dynamiques de larves. L'exploration de ces solutions a montré que plusieurs types de solutions, caractérisés par des processus différents (comme la contribution des femelles exogènes), pouvait reproduire une même dynamique observée (Fig.17). Quelles que soient les solutions retenues, ce modèle initial (M1) permet de simuler la présence plus précoce de larves sur la sous-parcelle fauchée et le plus faible nombre de larves sur la sous-parcelle bâchée. Cependant le double pic caractérisant la dynamique des larves sur la sous-parcelle fauchée et la forte décroissance du nombre de larves en fin de saison sont moins bien captés.

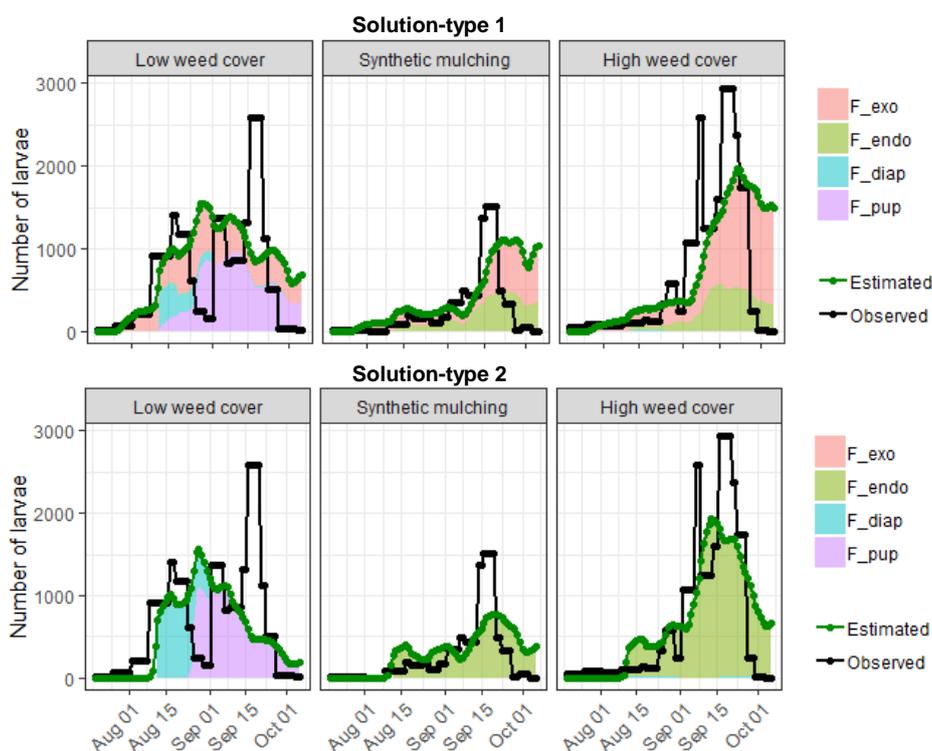


Fig.17. Dynamiques des larves observées et simulées dans les trois sous-parcelles pour deux solutions-types du modèle initial M1. Les larves simulées sont décomposées selon la provenance des femelles dont elles sont issues

Afin de mieux rendre compte des dynamiques observées, le modèle initial M1 a ensuite été utilisé pour tester des hypothèses sur des processus pouvant affecter les dynamiques des cécidomyies des fleurs. Deux processus potentiels ont ainsi été identifiés : i) un effet du stade phénologique des inflorescences sur leur attractivité, avec une attractivité restreinte aux premiers stades phénologiques (modèle M2), et ii) un effet « saisonnalité » qui se traduit dans le modèle

par une diminution de la reproduction des femelles en fin de saison (modèle M3 ; Fig.18). Cet effet « saisonnalité » ouvre toutefois des questions sur les processus réellement en jeu.

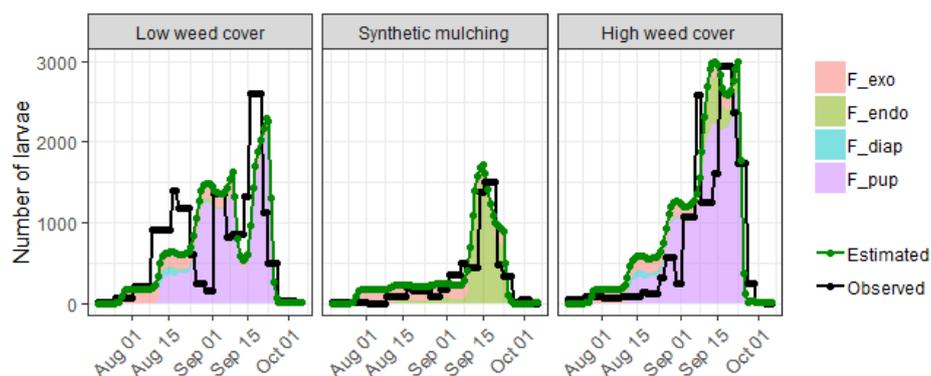


Fig.18. Dynamiques des larves observées et simulées dans les trois sous-parcelles pour la solution-type 1 du modèle M3 incluant un effet « saisonnalité ». Les larves simulées sont décomposées selon la provenance des femelles dont elles sont issues.

A court terme, ce modèle sera complété pour intégrer les effets de la couverture de sol sur l'évolution du stock de larves diapausantes dans le sol (cf. T1, activité 3), puis testé sur les données collectées en 2018 après deux années de traitements. Cette évaluation pourrait aider à identifier des solutions plus probables parmi les solution-types obtenues. Par ailleurs, un modèle qui représente la dynamique des inflorescences (structurées par âge), en considérant leur développement naturel et la mortalité induite par les cécidomyies des fleurs, avait été couplé et calibré sur une précédente version du modèle de dynamique des cécidomyies des fleurs. Ce modèle de dégât sera couplé et re-calibré sur la nouvelle version du modèle de dynamique des cécidomyies des fleurs.

Mouches des fruits. Les données acquises dans la Tâche 1 ont été utilisées pour consolider la calibration de la courbe de réponse entre le taux d'infestation des mangues Cogshall en verger et la fluorescence de la chlorophylle du fruit, utilisée comme indicateur non destructif de maturité des fruits (Fig. 4). Par ailleurs, une relation empirique a été établie pour prédire la qualité des mangues à maturité en fonction de leurs caractéristiques à la récolte. Le degré Brix a été choisi comme indicateur de qualité car il est facile à mesurer et reconnu dans la filière fruitière. Le degré Brix d'un fruit à maturité est prédit en fonction de ses teneurs en sucres solubles et en amidon à la récolte par une relation linéaire. Cette relation a été établie à partir de données expérimentales collectées de 2001 à 2006 sur la mangue Cogshall. A terme, elle sera remplacée par un modèle mécaniste d'évolution des sucres dans la mangue au cours de sa maturation en post-récolte, qui est actuellement développé dans le cadre d'une thèse (Drouillard et al. 2019).

Les analyses expérimentales réalisées dans la Tâche 1 n'ont pas mis en évidence de relation étroite entre le taux d'infestation des mangues par les mouches des fruits et l'abondance des mouches dans les vergers (appréciée par piégeage), montrant que l'infestation des mangues dépend surtout de leur état de maturité. Il n'a donc pas été jugé nécessaire d'intégrer la pression de mouches comme facteur explicatif dans le modèle mangue-mouches des fruits.

➤ *Activité 3: couplage des modèles manguiers-ravageurs ou modèle de culture V-Mango*

Cette Tâche prévoyait le couplage des modèles manguiers-ravageurs au modèle V-Mango, afin de prédire l'effet de pratiques sur la production de fruits, en termes de quantité et de qualité, en prenant en compte leurs effets sur le potentiel de production et les dégâts des ravageurs.

➔ Compte tenu du retard dans le développement du modèle V-Mango, le couplage des modèles manguiers-ravageurs au modèle V-Mango n'a pas encore été réalisé. Le modèle manguiers-mouches des fruits a toutefois été développé à partir du modèle de croissance et d'élaboration de la qualité de la mangue, qui est un sous-modèle du modèle V-Mango. Ce couplage pourra donc facilement être fait à très court terme. Le modèle manguiers-cécidomyie des fleurs utilise des dynamiques de floraison comme entrée. A terme, les dynamiques d'apparition des inflorescences prédites par le modèle V-Mango seront utilisées comme variables d'entrée du modèle de dynamique des cécidomyies des fleurs. Les dégâts prédits par ce modèle, exprimés

en nombre d'inflorescences mortes, seront alors déduits du nombre d'inflorescences prédit par le modèle V-Mango. Ce couplage requiert un travail informatique.

Dans l'immédiat, des réorientations ont été faites pour engager la démarche de conception de solutions techniques 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 l'environnement lumineux, le nombre de feuilles et de fruits d'une branche fruitière par tirage aléatoire dans des lois de distribution empiriques. Le couplage du modèle manguier-cécidomyies des fleurs au modèle V-Mango n'est par ailleurs pas utile pour l'instant, étant donné que l'effet de la taille sur la floraison n'a pas encore été intégré au modèle V-Mango.

▣ Transferts et valorisations (T3 / Manguier)

- 2 communications à congrès internationaux :
 - Grechi et al. (2018). Assessment of mango tree - blossom gall midge management solutions from in-silico experiments: overview of an on-going modeling approach. 30th International Horticultural Congress (IHC2018). 12-16 August 2018, Istanbul, Turkey.
 - Grechi et al. (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.
- 2 rapports de stage :
 - 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
 - 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

Valorisations à paraître / prévues :

- 3 articles scientifiques :
 - Boudon et al. V-Mango : A functional-structural model of mango tree growth, development and fruit production (Annals of Botany, en revision)
 - Grechi et al. The mango tree - blossom gall midge system: toward in-silico assessment of management practices. Acta Horticulturae (accepté)
 - Grechi et al. The mango tree – blossom gall midge system: *in-silico* assessment of its functioning and management

❖ Pêcher

➤ *Activité 1 : modèle épidémiologique fruit-pourriture brune*

Le lien entre la culture et le bioagresseur fait intervenir trois modèles représentant (i) la génération des fissures cuticulaires sur les fruits (Gibert et al. 2010), (ii) la contamination des fruits par la moniliose (Gibert et al. 2009) et (iii) l'épidémie de la maladie, l'ensemble sous le contrôle de techniques culturales et de variables climatiques. Les deux premiers modèles existent déjà, le troisième était à développer dans le cadre du projet. A notre connaissance, il n'existe pas de modèle épidémiologique pour *Monilinia* spp. Le cadre générique des modèles compartimentaux de type SEI (Susceptible-Exposed-Infected) (Gilligan 2008), largement utilisés en épidémiologie, a été retenu comme cadre conceptuel de modélisation. Toutefois une adaptation aux spécificités de la pourriture brune était nécessaire.

➔ Le modèle d'épidémiologie de la pourriture brune consiste en trois classes épidémiologiques et 8 paramètres (Fig. 19). La population de fruits a été structurée en trois catégories de fruits : i) les fruits sur lesquels le pathogène est absent ('Susceptible'), ii) les fruits sur lesquels le pathogène est présent mais sans développement de la maladie ('Exposed') et iii) les fruits infectés sur lesquels la maladie se développe ('Infected'). Il s'agit d'une variante du modèle SEI classique pour laquelle l'état d'infection des fruits est considéré comme irréversible. L'évolution des fruits entre les classes 'Susceptible' et 'Exposed' a été modélisée comme une fonction de la masse du fruit, qui représente la dynamique d'évolution de la sensibilité des fruits à la pourriture

brune. La croissance des fruits est une entrée du modèle épidémiologique qui peut rendre compte empiriquement de l'effet de pratiques.

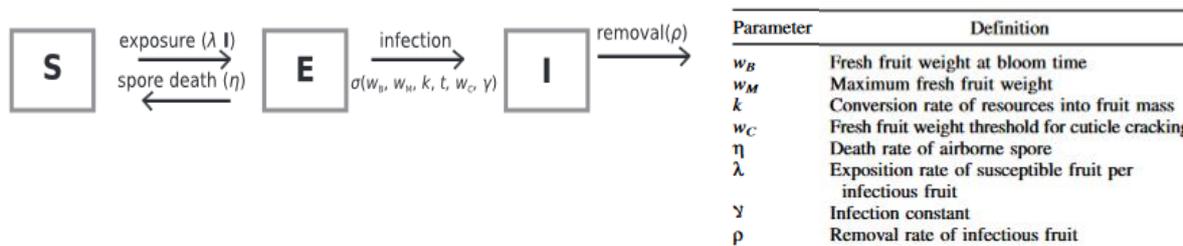


Fig. 19. Représentation schématisée du modèle épidémiologique fruit-pourriture brune sur pêcher. La population de fruits est structurée en trois catégories de fruits : S ('Susceptible'), E ('Exposed') et I ('Infected'). (Source : Bevacqua et al. 2018)

Les conditions initiales du système et les paramètres du modèle ont été estimés à partir des données expérimentales collectées en 2014 dans le cadre du projet CLIF (cf. T1). Dans cette expérimentation les pêchers n'ont pas reçu de traitement fongicide et les conditions environnementales étaient favorables au développement de la pourriture brune. Les trajectoires de progression de la maladie prédites par le modèle ont été comparées aux observations, montrant que le modèle était capable de reproduire de façon satisfaisante la dynamique d'abondance des fruits dans chacun des trois compartiments épidémiologiques. Une analyse de sensibilité du rendement aux paramètres du modèle a permis d'identifier les mécanismes prépondérants dans le développement de la maladie et les pertes de récolte. L'effet des récoltes sanitaires en hiver (visant à éliminer les sources d'inoculum primaire du verger par la destruction des brindilles et fruits momifiés des saisons précédentes) et de la gestion de la charge en fruits de l'arbre par éclaircissage (visant à modifier la densité et la croissance individuelle des fruits), sur le développement de la maladie et le rendement a été évalué par simulation. Pour ce faire, l'état initial du système (proportion de fruits exposés et infectés, nombre total de fruits et masse fraîche maximale du fruit) a été modifié. 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 (Fig. 20A), et la gestion de la charge en fruits des arbres (Fig. 20B) pouvaient contrôler l'incidence de la pourriture brune, en association avec ou à la place de fongicides. Une faible charge en fruits limite le développement de la maladie (forte proportion de fruits 'Susceptible') mais aussi le rendement potentiel de l'arbre. A l'inverse, une forte charge augmente le rendement potentiel (composé de petits fruits) mais également les pertes de rendement dues à la maladie, le développement de la maladie étant favorisée par la proximité des fruits.

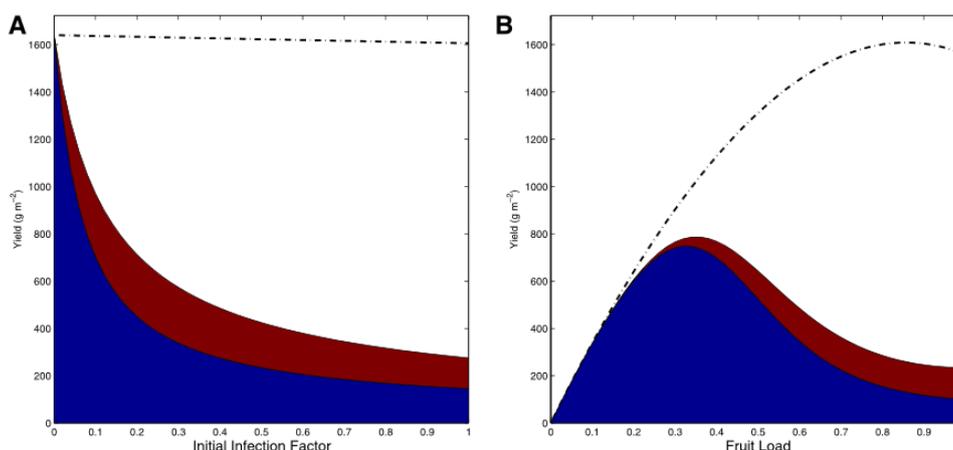


Fig. 20. Sensibilité du rendement, composé de fruits 'Susceptible' (S, Bleu) et 'Exposed' (E, Rouge) à l'infection initiale (A) et à la charge en fruits (B). La ligne en pointillé indique le rendement dans l'impossibilité de la propagation de la maladie (c.-à-d. que l'incidence de la maladie ne progresse pas par rapport à son niveau initial) et la zone blanche sous la ligne pointillée indique la perte de rendement due à la pourriture brune. (Source : Bevacqua et al. 2018)

Le modèle épidémiologique a ensuite été testé sur les données de 2015. Pour cette année, où les conditions environnementales étaient défavorables au développement de la pourriture brune, la proportion de fruits infectés a été surestimée. L'effet de variables climatiques susceptibles de

jouer un rôle important dans le développement de la maladie a donc récemment été intégré dans le modèle, notamment via un taux d'infection des fruits nul en l'absence d'événements pluvieux et une augmentation du taux de mortalité des spores avec la température. L'intégration de ces variables climatiques dans le modèle a permis de rendre compte des différentes trajectoires de la maladie observées en 2014 et 2015 (Fig. 21). Ce modèle permet de mieux prédire la progression de la pourriture brune dans le verger et peut être utilisé pour étudier l'effet du changement climatique sur le l'incidence de la maladie et la production.

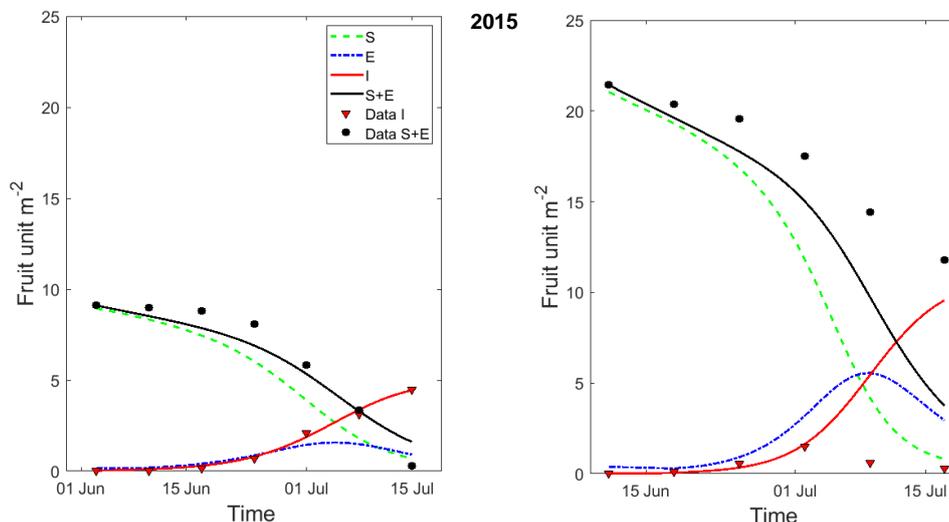


Fig. 21. Dynamiques des fruits 'Susceptible' (S), 'Exposed' (E), 'Infected' (I) et asymptotiques (S+E) en 2014 et 2015. Les lignes représentent les simulations et les symboles représentent les observations.

➤ *Activité 2 : couplage du modèle épidémiologique fruit-pourriture brune au modèle QualiTree*

Cette activité visait à coupler le modèle QualiTree et le modèle épidémiologique, afin que les trajectoires empiriques des fruits utilisées en entrée du modèle épidémiologique soient générées de façon mécaniste par le modèle QualiTree. Ce couplage avait pour finalité de disposer d'un modèle capable de simuler l'effet de pratiques de culture sur la production de fruits, en termes de quantité et de qualité, en prenant en compte leur effet sur le potentiel de production et les dégâts occasionnés par la maladie, et qui soit mobilisable dans le cadre de la Tâche 4.

➔ Le modèle QualiTree intègre l'effet de pratiques culturales, et en particulier l'effet de l'éclaircissage et de l'irrigation (stress hydrique), sur la croissance individuelle des fruits et l'élaboration de leur qualité (calibre, teneur en matière sèche, teneur en sucres, etc.). Il est ainsi capable de générer les courbes de croissance individuelle des fruits au sein d'un arbre en réponse à différentes pratiques. Dans un premier temps, ces courbes ont été utilisées comme entrées du modèle épidémiologique. Le modèle épidémiologique indique alors les pertes en rendement associées aux fruits simulés, exprimées en nombre de fruits infectés. Ces pertes sont ensuite déduites du rendement potentiel prédit par le modèle QualiTree, ce qui permet de prédire le rendement réalisé en réponse aux pratiques testées par simulation, en prenant en compte leur effet sur le fonctionnement de l'arbre et les dégâts de la maladie. Cette première approche de couplages des modèles ne permet cependant pas au modèle QualiTree de prendre en compte 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.

Dans un second temps, le modèle couplé QualiTree-moniliose a donc été enrichi par la prise en compte de l'évolution de la charge en fruits liée à la chute des fruits infectés. La courbe de croissance des fruits en entrée du modèle épidémiologique a été remplacée par la courbe d'évolution de la surface de fissures cuticulaires (qui est simulée par le modèle QualiTree), et le modèle épidémiologique a été modifié et re-calibré. Cette amélioration n'a pas notablement impacté les prédictions du modèle, du moins pour les scénarios prédéfinis qui ont été testés. Les microfissures sont toutefois un proxy reflétant mieux la contamination par la moniliose que la masse du fruit, même si une corrélation forte a été observée entre les deux pour un certain nombre de simulations, et le modèle couplé QualiTree-moniliose est ainsi plus réaliste.

➤ *Activité 3 : impact des pratiques sur les performances pluriannuelles de l'arbre*

Les effets des pratiques de culture sur les performances de l'arbre en termes de production ont été évalués sur l'année de production en cours. S'agissant d'une culture pérenne, il paraissait toutefois important de considérer les effets des pratiques sur ses performances pluriannuelles.

➔ Une étude complémentaire a été engagée pour évaluer les effets de l'éclaircissage et de l'irrigation (pratiques utilisées comme leviers pour contrôler la pourriture brune et ses dégâts) sur les performances de l'arbre, en présence ou en l'absence de la maladie. La dimension pluriannuelle n'étant pas considérée dans le modèle QualiTree, cette étude repose sur le développement d'un modèle simple et original qui permettra de répondre à cette question spécifique.

📖 *Transferts et valorisations (T3 / Pêcher)*

- 2 articles scientifiques :
 - Bevacqua et al. (2018). A Model for Temporal Dynamics of Brown Rot Spreading in Fruit Orchards. *Phytopathology*, 108: 595-601.
 - Bevacqua et al. (2019). Coupling epidemiological and tree growth models to control fungal diseases spread in fruit orchards. *Scientific Reports*, 9: 8519
- 6 communications à des colloques internationaux :
 - Bevacqua et al. (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 et al. (2016b). A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in stone fruits orchard. *Plant Biology Europe EPSO/FESPB 2016 Congress*. 26-30 June 2016, Prague, Czech Republic
 - Bevacqua et al. (2017). A model for temporal dynamics of brown rot spreading in stone fruit orchards. *XXVII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia (SitE)*: 12-15 September, Napoli, Italy
 - Bevacqua et al. (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 et al. (2018b). Climate effects on the spread of brown rot disease: insights from an epidemiological model. *XXVIII Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia (SitE)*. 12-14 September, Cagliari, Italy
 - Vanalli et al. (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
- 3 rapports de stage :
 - Girard (2018). Développement d'un outil pour co-concevoir des itinéraires techniques économes en pesticides en vergers. *Mémoire de Master 2, Université Grenoble Alpes*
 - Salvagno (2019). Growth and nutrient partitioning in deciduous trees : a modelling framework linking seasonal and inter-annual dynamics. *Mémoire de M2, Politecnico di Milano*
 - Vanalli (2018). Climate change and the spread of brown rot disease in peach orchards: insights from an epidemiological model. *Mémoire de M2, Politecnico di Milano*

Valorisations à paraître / prévues :

- 3 articles scientifiques :
 - Bevacqua et al. Climate change and the spread of brown-rot disease in peach orchards: insights from epidemiological model
 - Salvagno et al. Consequences of agronomic practices on peach cultivars within an annual and multiannual perspective: a simulation study
 - Vanalli et al. Climate change and the areal distribution of peach cultivation in France

Tâche 4-Conception

Les attendus de cette tâche étaient d'ordre méthodologique et appliqué. D'un point de vue appliqué, elle visait à développer un outil de dialogue entre les acteurs et les chercheurs mobilisable pour co-concevoir des itinéraires techniques économes en pesticides en vergers, et à le mettre en œuvre pour définir des « profils candidats » d'itinéraires techniques. Plus précisément, il s'agissait d'identifier les modalités d'application pour les leviers techniques ciblés dans le projet (ou indirectement la valeur des paramètres ou variables initiales du modèle qu'ils affectent) satisfaisant des compromis entre les indicateurs de performance définis selon les objectifs et les contraintes spécifiques aux producteurs. Un autre attendu et défi d'ordre méthodologique de cette Tâche était le développement d'outils et de méthodes efficaces et adaptés aux objectifs et aux besoins du projet. Une contrainte forte de cette Tâche était que sa mise en œuvre dépendait de l'avancement des Tâches précédentes, puisqu'elle nécessitait de disposer d'un cadre de modélisation (T3) et de règles de décision et d'indicateurs de performance co-définis avec les acteurs (T2). Le retard dans l'avancement de certaines Tâches a toutefois impacté la mise en œuvre formelle de cette démarche visant à identifier et partager avec les acteurs des « profils candidats » d'itinéraires techniques. Quelques réorientations ont été faites pour pouvoir atteindre au moins partiellement les objectifs fixés.

❖ Manguier

Le cadre de modélisation (i.e., les modèles manguier-ravageurs couplés au modèle V-Mango) n'était pas encore opérationnel pour être mobilisé dans une démarche de conception assistée par modèle, telle qu'initialement prévue dans le projet (c'est-à-dire le couplage de ce cadre de modélisation à des algorithmes d'optimisation multicritères permettant d'identifier, par exploration de l'espace de décision, les « profils candidats » d'itinéraires techniques sub-optimaux en regard de contraintes et d'objectifs co-définis avec les producteurs). Des réorientations ont été faites concernant la démarche, qui a désormais consisté à tester plusieurs pratiques proposées comme des alternatives potentielles à l'utilisation de pesticides pour contrôler les cécidomyies des fleurs et les mouches des fruits, sur la base des modèles manguier-ravageurs développés dans le cadre de la Tâche 3 et du modèle CoHort (Pissonnier et al. 2019). Chaque exploitation est considérée comme une combinaison de ressources limitées, allouées à une série d'activités programmées par un agriculteur en fonction de ses objectifs et de sa stratégie de production. Afin d'atteindre ces objectifs, l'agriculteur met en œuvre différentes pratiques qui aboutissent à des performances économiques et phytosanitaires ainsi qu'à une organisation du travail correspondante (Pissonnier et al. 2017; Pissonnier, et al. 2019). CoHort est un outil de simulation qui évalue pour les exploitations fruitières les impacts d'un ensemble de pratiques sur ces différentes performances.

➔ La démarche mise en œuvre vise à tester par simulation les performances « d'innovations techniques » (i.e ; des pratiques proposées comme des alternatives potentielles 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 ; ii) agro-économique et à l'échelle de l'exploitation agricole avec le modèle CoHort. Ces deux évaluations sont complémentaires. L'ensemble de ces performances et leur restitution auprès des producteurs est à même de préciser plus finement les freins ou les points facilitant l'adoption de l'innovation, préalablement identifiés dans la Tâche 2.

Dans un premier temps le modèle manguier-cécidomyie des fleurs a été utilisé pour tester l'effet d'une couverture de sol combinée à une synchronisation de la floraison sur le contrôle des populations du ravageur dans le verger. Les simulations ont été réalisées pour le verger utilisé pour la calibration du modèle, en conservant la même configuration en trois sous-parcelles correspondant à un sol fauché, un sol bâché et un sol enherbé (cf. T1, activité 3). Deux dynamiques de floraison virtuelles ont été comparées : une dynamique synchrone avec une seule vague de floraison et une dynamique étalée avec deux vagues de floraison, chacune d'entre elles étant appliquées sur les trois sous-parcelles. Les simulations ont été réalisées avec les trois modèles M1-3 décrits dans la Tâche 3 (activité 2). 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 et l'infestation des inflorescences (Tableau 2). Les effets de cette synchronisation sur la réduction des infestations sont cependant plus faibles quand les femelles exogènes contribuent fortement

à la dynamique du ravageur. Ces résultats nous confortent quant à l'intérêt de poursuivre nos recherches visant à identifier des modalités de taille qui permettraient de synchroniser la floraison.

Tableau 2. Réduction (en %) du nombre total de larves, simulé sur une période de 80 jours, par la synchronisation de la floraison, selon la modalité de couverture du sol (sol fauché, bâché ou enherbé), et le modèle et la solution-type utilisés pour les simulations.

	Modèles et solutions-types	Réduction du nombre simulé de larves		
		Sol fauché	Sol bâché	Sol enherbé
	M1-S1 : modèle initial (pression exogène : + ; survie au sol enherbé : -)	-3%	-1%	+1%
	M1-S2 : modèle initial (pression exogène : - ; survie au sol enherbé : -)	-63%	-64%	-64%
	M2-S1 : modèle avec effet « stade d'attractivité » (pression exogène : + ; survie au sol enherbé : -)	-28%	-9%	-2%
	M2-S2 : modèle avec effet « stade d'attractivité » (pression exogène : - ; survie au sol enherbé : -)	-74%	-71%	-67%
	M3-S1 : modèle avec effet « saisonnalité » (pression exogène : ± ; survie au sol enherbé : +)	-38%	-14%	-36%
	M3-S2 : modèle avec effet « saisonnalité » (pression exogène : ± ; survie au sol enherbé : ±)	-53%	-22%	-34%

La figure représente les deux dynamiques de floraison qui sont comparées par simulation (bleu : floraison synchrone ; rouge : floraison étalée ; N=7000). Pour chaque simulation, la dynamique de floraison simulée est la même sur les trois sous-parcelles. Les simulations sont réalisées avec le modèle initial (M1), le modèle initial auquel a été introduit un effet «stade d'attractivité » (M2 ; l'attractivité des inflorescences est restreinte à leurs premiers stades phénologiques) et un effet « saisonnalité » (M3 ; la reproduction des femelles est réduite en fin de saison). Pour chaque modèle, deux solutions-types (S1 et S2) sont considérées. Toutes les solutions-types sont caractérisées par un taux de survie élevé à la modalité de sol fauché, et se distinguent par une pression de femelles exogènes et un taux de survie à la modalité de sol enherbé qui peuvent être forts (+), intermédiaires (±) ou faibles (-).

Le modèle manguier-mouches des fruits a été utilisé pour tester l'effet du stade de maturité des fruits à la récolte sur leur risque d'infestation par les mouches des fruits et leur qualité, caractérisée par la masse fraîche du fruit à la récolte et son degré Brix à maturité (Fig.22).

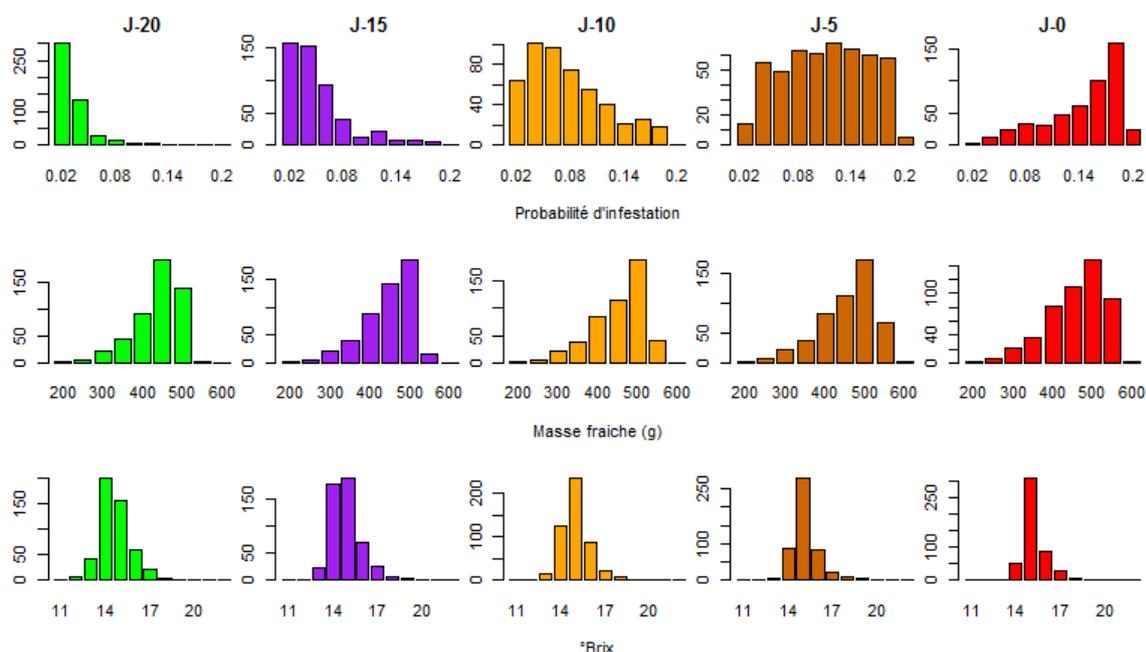


Fig.22. Distribution de la probabilité d'infestation par les mouches des fruits, de la masse fraîche à la récolte et du degré Brix à maturité de 500 fruits suivant leur date de récolte (J). La date de récolte est exprimée en jours avant la date de chute naturelle du fruit. Ainsi, les fruits récoltés à J-20 sont à un stade de maturité moins avancé que ceux récoltés à J-0.

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. Par exemple, la probabilité d'infestation d'un fruit récolté 20 jours avant sa chute naturelle (J-20), qui correspond à un fruit atteignant le stade vert-mature, est en moyenne réduite de 82% par rapport à un fruit mûr laissé sur l'arbre jusqu'à son abscission (J-0), tandis que la masse fraîche et le degré Brix ne sont réduits que de 5% en moyenne.

Dans un deuxième temps, quatre innovations potentielles (dénommées 'bâchage long', 'bâchage court', 'taille' et 'récolte') ont été testées par simulation avec le modèle CoHort, certaines sous deux hypothèses (H1 ou H2) :

- 'Bâchage long' (sous H1 ou H2) : couverture du sol par une bâche pendant la floraison et le début de croissance des fruits, ciblant la gestion de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits ;
- 'Bâchage court' (sous H1 ou H2) : couverture du sol uniquement pendant la floraison, ciblant la gestion de la cécidomyie des fleurs ;
- 'Taille' : taille des arbres visant à synchroniser la floraison puis la récolte, ciblant la gestion de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits ;
- 'Récolte' (sous H1 ou H2) : récolte ciblée des fruits à un stade de maturité précoce (vert-mature ou début point-jaune), ciblant la gestion des mouches des fruits.

Pour les innovations 'bâchage court' et 'bâchage long', les hypothèses H1 et H2 portent sur la bâche utilisée et sur son prix initial d'achat qui est considéré deux fois plus faible sous H1. Pour l'innovation 'récolte', les hypothèses H1 et H2 portent sur l'efficacité de l'innovation vis-à-vis de la gestion des mouches des fruits qui est considérée plus élevée sous H1.

Ces innovations ont été testées sous forme de scénarios, c'est-à-dire que leurs effets ont été considérés par la modification d'un certain nombre de paramètres. Par exemple le bâchage nécessite d'augmenter à 160 heures par hectare le temps de la main-d'œuvre nécessaire pour poser puis retirer la bâche. De même, la taille est supposée réduire de 40% les traitements insecticides et fongicides appliqués à la floraison et les traitements insecticides appliqués pendant la récolte, en réduisant de 40% la durée de ces deux stades phénologiques. Ces effets attendus des innovations ont été définis par les chercheurs, en s'appuyant en partie sur les résultats acquis dans les précédentes Tâches 1 et 3. Ils peuvent être réactualisés au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles connaissances.

Une exploitation agricole diversifiée dont la mangue est une culture pivot (type B) a été retenue comme exemple pour réaliser les simulations. Le système de culture en cours et les éléments socio-économiques de cette exploitation ont été préalablement caractérisés par des enquêtes menées auprès de l'exploitant dans le cadre de la Tâche 2. Nous présentons ci-après les résultats obtenus sur cette exploitation agricole.

Les performances phytosanitaires de l'exploitation pour la situation initiale (c'est-à-dire sans l'introduction d'innovation technique) et les performances attendus, à dire de chercheur, pour chaque innovation sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. IFT et piégeage par phéromone sur un verger de mangue Cogshall d'une exploitation agricole diversifiée dont la mangue est la culture pivot : valeurs observées pour la situation initiale et valeurs attendues pour les situations incluant une innovation technique.

Produits	Situation initiale	Bâchage court (H1 & H2)	Bâchage long (H1 & H2)	Taille	Récolte (H1)	Récolte (H2)
IFT total	9,2	8,0	6,8	5,9	6,2	8,0
IFT insecticide	6	4,8	3,6	4	3	4,8
IFT fongicide	3,2	3,2	3,2	1,9	3,2	3,2
Piégeage par phéromone	1	1	1	0,6	0	1

Le calcul de l'IFT tient compte du nombre de traitements et du % de la dose homologuée utilisé.

Sources : données auteurs.

Les résultats économiques portent sur l'évolution du chiffre d'affaire, des coûts d'exploitation, et des marges liés à l'introduction d'une innovation technique. Ces résultats sont rapportés par

rapport à la situation initiale de l'exploitation, c'est-à-dire qui n'inclue pas l'innovation testée (Tableau 4).

Tableau 4. Impact des innovations techniques sur les performances économiques et le temps de travail dans le cas de la mangue Cogshall sur une exploitation agricole diversifiée dont la mangue est la culture pivot (modèle Cohort®). Les valeurs sont en % de variation par rapport à la situation initiale qui n'inclue pas l'innovation testée

		Bâchage Court (H1)	Bâchage Court (H2)	Bâchage Long (H1)	Bâchage Long (H2)	Taille	Récolte (H1)	Récolte (H2)
Performances économiques								
Chiffre d'affaire /ha	Rendement x prix	0%	0%	0%	0%	0%	2%	2%
Coût produit /ha	Nb trait. x dose x Coût	-17%	-17%	-18%	-18%	-32%	-23%	-1%
Charges variables /ha		154%	308%	192%	384%	0%	0%	0%
Coûts conduite /ha	MO + Produits + Matériel + Charges variables *	6%	26%	10%	35%	-28%	-20%	-1%
Marge brute /ha	Chiffre d'affaire - cout conduite	-1%	-3%	-1%	-4%	3%	4%	2%
Organisation du travail								
Nb d'heures /ha		59%	59%	58%	58%	13%	13%	14%

*sur le cas particulier de l'exploitation simulée, les coûts liés à l'utilisation du matériel sont nuls (matériels amortis) ainsi que les coûts de main-d'œuvre (main d'œuvre familiale et non rémunérée)

Les résultats des simulations montrent que les meilleures marges brutes, à l'échelle du parcellaire de mangue de l'exploitation, sont obtenues avec la taille visant à synchroniser la floraison (+3%) et la récolte des fruits à un stade de maturité plus précoce (+4% en hypothèse H1) (Tableau 4). La taille et la récolte des fruits à un stade de maturité plus précoce permettraient de réduire respectivement de 32% et 23% les coûts en produits phytosanitaires. Il est à noter cependant que ces résultats dépendent des hypothèses initiales. En effet, l'hypothèse H2 pour la récolte des fruits à un stade de maturité plus précoce, qui correspond à une réduction de 50% des traitements insecticides ciblés sur mouches des fruits, n'entraîne qu'une baisse de 1% des coûts en produits phytosanitaires. En revanche, les différentes options de bâchage synthétique ne sont pas rentables compte tenu des connaissances actuelles sur son coût d'acquisition et de mise en œuvre, et sur sa durée de vie (pour calculer l'amortissement). La substitution de traitements phytosanitaires par les innovations techniques testées est coûteuse en main d'œuvre. Quelque soit l'innovation considérée, elle entraîne une augmentation des temps de conduite du verger (Tableau 4). Le modèle CoHort fournit par ailleurs les besoins mensuels en main d'œuvre sur le parcellaire de mangue et sur l'ensemble de l'exploitation agricole, en regard de la main d'œuvre disponible. Ceci permet de savoir si l'introduction des innovations dans le système mangue conduit à des situations de conflits avec les autres activités de l'exploitation agricole pour les ressources humaines.

La démarche et les modèles qui ont été proposés permettent de simuler les performances biophysiques et agro-économiques d'innovation techniques, et de renseigner des indicateurs qui font consensus parmi le panel de producteurs enquêtés (i.e., le revenu, et indirectement la pression des bioagresseurs et la vision du consommateur en termes de qualité du fruit). L'ensemble des performances simulées par les modèles permet de renforcer ou lever certains freins potentiels, préalablement identifiés par les producteurs enquêtés (cf. T2, activité 3). Par exemple, les freins liés au coût du bâchage sont renforcés par les résultats de simulation négatifs pour les performances économiques de cette innovation. Au contraire, la simulation de faibles pertes de qualité des fruits par une récolte à un stade de maturité plus précoce lève en partie certains freins liés à la stratégie de commercialisation de fruits de qualité. Enfin, les performances économiques positives 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 producteurs. Pour les modèles biotechniques, ils ne peuvent pas être utilisés de façon interactive (interfaces peu ergonomiques et temps de calcul parfois longs). Une option est de réaliser des simulations au préalable, puis lors des restitutions, d'utiliser une application web interactive (par exemple avec R-Shiny ; Chang et al. 2018) pour visualiser de façon simple et ludique les résultats des simulations.

Transferts et valorisations (Tâche 4 / Manguier)

- 1 communication (Grechi et al. 2019) et 1 rapport de stage (Reyné 2019) communs à T3

Valorisations à paraître / prévues:

- 1 rapport d'étude :
 - Parrot et al. Projet Ecoverger – Analyse des performances agro-économiques d'alternatives techniques potentielles à l'utilisation de pesticides en vergers de manguiers (en révision)
- 2 applications web interactives (avec R-Shiny) pour la restitution en atelier des résultats de simulation des modèles manguier-mouches des fruits et manguier-cécidomyie des fleurs
- 1 atelier de restitution des performances biophysiques et agro-économiques d'innovations techniques en verger de manguier

❖ Pêcher

Le cadre de modélisation développé dans la Tâche 3 était opérationnel pour être mobilisé dans une démarche de conception assistée par modèle. Le retard dans l'avancement de la Tâche 2 a toutefois impacté la mise en œuvre formelle de cette démarche visant à identifier et partager avec les acteurs des « profils candidats » d'itinéraires techniques. La démarche et les outils ont malgré tout été éprouvés par des tests préliminaires, constituant en soit une preuve de concept.

➔ La démarche mise en œuvre pour concevoir des « profils candidats » d'itinéraires techniques combine deux approches : i) la simulation de scénarios techniques prédéfinis à partir du modèle couplé QualiTree-moniliose et ; ii) l'optimisation de scénarios via le couplage du modèle QualiTree-moniliose à un algorithme d'optimisation multicritère. Les pratiques qui ont été considérées sont l'éclaircissage et la stratégie d'irrigation, respectivement considérées dans le modèle via la charge en fruits et le potentiel hydrique au collet.

Le travail a nécessité au préalable de définir dans le modèle :

- l'architecture de l'arbre et sa phénologie : les propriétés de la variété Suncrest ont été utilisées car elle présente des caractéristiques proches des variétés cultivées dans le bassin de production (forme d'arbre en gobelet et variété de saison),
- les conditions climatiques : les données de la station météorologique d'Avignon pour l'année 2017 ont été utilisées, campagne durant laquelle la pression de la moniliose était considérée comme « normale ».

Dans un premier temps, un total de 54 scénarios prédéfinis résultant de la combinaison de 3 niveaux de charges en fruits et 18 régimes d'irrigation différents (Miras-Avalos et al. 2011) ont été simulés. Les performances considérées sont la masse fraîche et le caractère sucré d'un fruit moyen et le rendement par arbre. Le caractère sucré est un indice qui tient compte des concentrations respectives des différents sucres dans le fruit. Ces scénarios ont été évalués par une analyse multicritère en identifiant le front de Pareto, i.e., l'ensemble des solutions permettant les meilleurs compromis entre ces trois critères qu'on cherche à maximiser. Ils ont aussi été classés sur la base d'une « unité monétaire » par arbre, i.e., un critère unique qui provient de l'agrégation des trois précédents critères.

Sur l'ensemble des 54 scénarios simulés, le rendement varie entre 4-58 (4-75) kg par arbre en présence (absence) de la moniliose, et la masse fraîche et l'indice du caractère sucré d'un fruit moyen varient entre 57–208 g et 5–13%, respectivement (Fig. 23). Le front de Pareto est

composé d'une multitude de scénarios, traduisant la nature antagoniste de ces critères. Les résultats suggèrent par ailleurs 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.

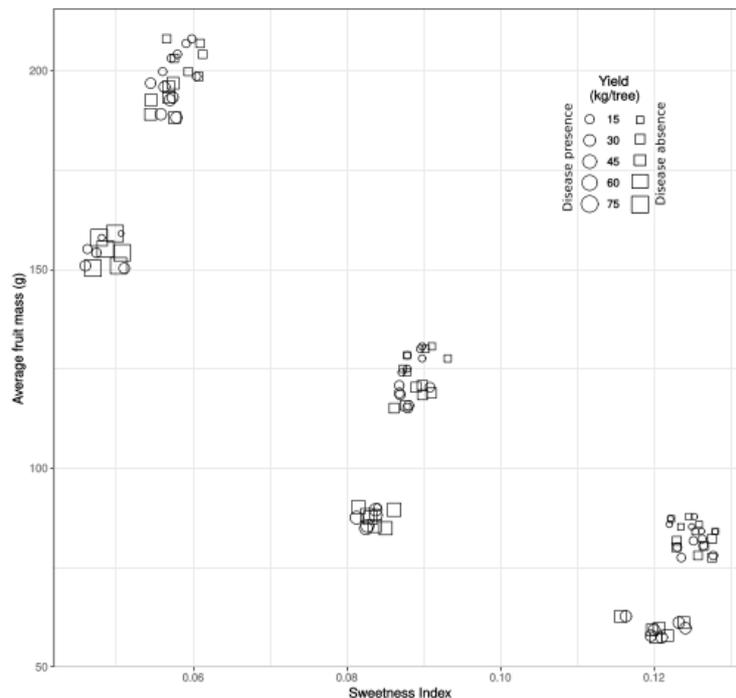


Fig. 23. Performances des 54 scénarios considérés, en présence et en absence de maladie, en termes de masse fraîche et caractère sucré d'un fruit moyen et de rendement. Une fonction a été utilisée pour séparer les points se superposant et ainsi faciliter la visualisation. (Source : Bevacqua et al. 2019)

Dans un deuxième temps le modèle couplé QualiTree-moniliose a été couplé avec un algorithme d'optimisation multicritère. La démarche de conception a ensuite été éprouvée dans le cadre d'une optimisation préliminaire (pour la conception de scénarios d'irrigation avec deux objectifs à optimiser), faisant ainsi preuve de concept pour valider que la démarche était opérationnelle.

Pour aller plus loin dans l'exploration et la conception de scénarios techniques, nous travaillons actuellement sur la prise en compte de quatre critères d'évaluation et quatre leviers de gestion de la moniliose, parmi ceux identifiés suite aux enquêtes menées dans le cadre de la Tâche 2 (Tableau 1), à savoir :

- pour les critères d'évaluation : rendement, part de calibres A-2A, perte de fruits et part de pertes dues à la moniliose.
- pour les leviers : charge en fruits, stratégie de protection phytosanitaire (traduite ici par le nombre de traitements), ramassage des fruits pourris à la récolte et irrigation (caractérisée par la durée, l'intensité, et la réduction avant récolte).

Pour l'instant, le modèle n'est pas capable de prendre en compte les critères de fermeté et l'aspect visuel, ainsi que les leviers aération de l'arbre et gestion de la nutrition azotée. Des développements supplémentaires du modèle seraient nécessaires pour cela. Par ailleurs, pour que le modèle soit représentatif de la réalité, il s'agira de faire varier les conditions climatiques selon la zone de production considérée et de préciser les conditions d'utilisation de certains leviers (par exemple par des règles de décision pour l'application de fongicides ou l'irrigation, en fonction de la pression de la maladie et des conditions climatiques).

A court terme, la démarche et les outils développés dans la Tâche 4 seront utilisés pour (i) simuler de nouvelles pratiques susceptibles de répondre aux objectifs du producteur, et (ii) discuter avec les experts et les producteurs des freins ou des points pouvant faciliter le changement de pratiques. La démarche utilisant les algorithmes d'optimisation multicritère permet de générer une multitude de scénarios techniques, parmi lesquels les « profils

candidats » d'itinéraires techniques seront sélectionnés. Les profils de productions obtenus dans la Tâche 2, ainsi que la pondération des critères de production et des leviers de gestion vont permettre de sélectionner et proposer les scénarios les mieux adaptés à chaque profil. Une réunion sera ensuite planifiée, au cours de l'hiver, avec le réseau d'acteurs enquêtés dans le cadre de la Tâche 2, pour rendre compte des résultats obtenus et discuter des sorties de l'optimisation. Les enquêtés étant majoritairement des personnes en contact avec les producteurs (en particulier un conseiller du GRCETA Basse-Durance et des responsables de stations expérimentales), la restitution auprès de réseaux de producteurs en sera facilitée.

Transferts et valorisations (T4 / Pêcher)

- 1 publication (Bevacqua et al. 2019) et 1 rapport de stage (Girard 2018) communs à T3
- 1 participation à un colloque national :
 - 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

Valorisations à paraître / prévues :

- 1 article scientifique 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
- 1 article de vulgarisation sur des propositions d'itinéraire techniques innovants pour gérer la moniliose en verger de pêcher-nectarine
- 1 atelier de restitution auprès des acteurs (experts enquêtés et producteurs) des « profils candidats » d'itinéraires techniques obtenus en verger de pêcher-nectarine

2.2 Actions d'animation et de coordination interne au projet

Réunion annuelle n°1

La réunion de lancement du projet a été organisée le 28 janvier 2016. Elle a rassemblé 8 chercheurs des unités PSH et HortSys sur les 10 chercheurs partenaires du projet. Deux membres invités ont également participé à la réunion : Alain Ratnadass (UPR HortSys) qui a officiellement rejoint le consortium du projet et Marie-Odile Jordan (UR PSH), en tant que responsable scientifique du projet RegPuc (APR 2014-PESTICIDES-Ecophyto). La réunion avait pour objectif de faire un point sur les activités prévues par les partenaires et sur leurs compétences respectives.

Réunion annuelle n°2

Cette première réunion intermédiaire a été organisée le 10 avril 2017. Elle a rassemblé 10 chercheurs des unités PSH et HortSys sur les 11 chercheurs partenaires du projet. Deux membres invités ont également participé à la réunion : Marie-Odile Jordan (UR PSH) et Aurore Drevet (GRCETA de Basse Durance), en tant que responsable scientifique et partenaire du projet RegPuc (APR 2014-PESTICIDES-Ecophyto). La réunion avait pour objectif de faire un point sur l'état d'avancement des activités pour chacun des deux modèles biologiques : activités et résultats acquis en 2016 et perspectives 2017.

Réunion annuelle n°3

Cette deuxième réunion intermédiaire a été organisée le 1^{er} février 2019. Elle a rassemblé 10 chercheurs des unités PSH et HortSys sur les 11 chercheurs partenaires du projet. Deux membres invités ont également participé à la réunion : Julie Borg (UR PSH) qui a officiellement rejoint le consortium du projet et Marie-Odile Jordan (UR PSH), en tant que responsable scientifique et partenaire du projet RegPuc (APR 2014-PESTICIDES-Ecophyto). La réunion avait pour objectif de faire un point sur l'état d'avancement des activités pour chacun des deux modèles biologiques et discuter des éventuelles réorientations à envisager.

Réunion annuelle n°4

Une réunion finale de restitution des résultats du projet est prévue au 1^{er} semestre 2020, entre les partenaires scientifiques du projet. Elle sera ouverte aux partenaires du projet RegPuc et aux autres partenaires scientifiques ayant participé au projet.

2.3 Liste des faits marquants et recueil synthétique des réalisations et valorisations

Liste des faits marquants

- Affectation d'Alain Ratnadass à la Réunion en septembre 2015. Alain Ratnadass est un chercheur en entomologie du Cirad (UPR HortSys). Il a intégré le consortium du projet et a principalement contribué aux Activités 1 et 3 de la Tâche 1 (modèle manguier).
- Affectation de Frédéric Boudon à la Réunion de septembre 2016 à août 2017 dans le cadre du projet COSAQ. Frédéric Boudon est un chercheur informaticien du Cirad (UMR AGAP). Il a fortement contribué aux Activités 1 et 2 de la Tâche 3 (modèle manguier).
- Remise du rapport intermédiaire le 4 août 2017
- Recrutement de Julie Borg à l'INRA dans l'UR PSH le 17 septembre 2018 en qualité d'IR. Julie Borg a intégré le consortium du projet et a principalement contribué à la Tâche 2, et en partie à la Tâche 4 (modèle pêcher).
- Participation de 3 chercheurs du projet au séminaire intermédiaire 'Appels à projets PSPE2 & Pesticides 2014' qui s'est tenu les 14 et 15 décembre 2017 à Paris.
- Validation de la demande de prolongation du projet par le CSO R&I en avril 2018 et formalisation d'un avenant à la convention prolongeant le projet de 12 mois
- Arrêt de travail de Thierry Michels à partir de mai 2018. Thierry Michels intervenait sur la Tâche 2 (modèle manguier)

Recueil synthétique des réalisations et valorisations produites

- 10 missions d'appuis de partenaires scientifiques, membres du consortium du projet ou hors projet, qui ont permis de fortes interactions et collaborations entre les chercheurs² :
 - 1 mission de Laurent Parrot à La Réunion en mai 2016 pour le co-encadrement d'un stage au titre de T2-manguier
 - 2 missions de Frédéric Boudon à La Réunion en mars 2018 et avril 2019 pour le co-encadrement de stages et le développement du modèle V-Mango au titre de T3-manguier
 - 1 mission de Françoise Lescourret à La Réunion en mai 2018 pour un appui méthodologique (faisabilité de l'adaptation du modèle QualiTree au manguier) au titre de T3-manguier
 - 1 mission de Mohamed Memah à La Réunion en juin 2019 pour un appui méthodologique (calibration du modèle manguier-cécidomyie des fleurs) au titre de T3 et T4-manguier
 - 2 missions de Daniele Bevacqua en Italie en décembre 2018 et avril 2019 pour le co-encadrement de stages et la rédaction d'articles avec des partenaires de l'Ecole Polytechnique de Milan au titre de T3-pêcher
 - 3 missions d'Isabelle Grechi à Montpellier en juillet 2018, mars 2019 et août 2019 pour le co-encadrement de stages au titre de T3-manguier
- Valorisations scientifiques :
 - 7 publications scientifiques (dont 2 à paraître) ; 12 participations à des congrès internationaux ; 1 rapport d'étude.
- Enseignement et formation :
 - 12 stagiaires encadrés (stages de fin d'étude ou d'année de césure)² ;
 - 12h de TP dispensés en BTS 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 du 28 novembre au 2 décembre 2016 à la Réunion
- Transfert et vulgarisation des résultats de recherche :
 - 1 article de valorisation-vulgarisation ;
 - 3 fiches/posters, présentés à la journée de célébration des 30 ans d'expérimentation de l'Exploitation agricole EPLEFPA Forma'Terra, le 4 octobre 2019;

² actions entièrement financées ou co-financées sur le projet Ecoverger

- 5 comptes rendus d'activité pour la restitution des résultats auprès des acteurs impliqués dans les expérimentations ou les enquêtes ;
- 1 page web dédiée au projet : <http://cosaq.cirad.fr/projets/ecoverger>
- o Interactions avec les acteurs :
 - essais mis en place chez 2 producteurs de mangues et au CPEA de l'EPLEFPA St-Paul ;
 - enquêtes auprès de 13 à 28 producteurs de mangue et 13 experts de la filière pêche-nectarine ;
 - ateliers de restitution et validation de résultats auprès de 6 producteurs de mangue.

Recueil synthétique des réalisations et valorisations prévues

- o Valorisations : 9 publications scientifiques ; 1 article de valorisation-vulgarisation ; 1 rapport d'étude
- o Interactions avec les acteurs : 2 applications web interactives pour la restitution en ateliers des résultats de simulation ; 1 atelier de restitution et validation de résultats auprès de 13 experts de la filière pêche-nectarine ; 2 ateliers de restitution finale des résultats du projet auprès des acteurs (filiale mangue et filiale pêche-nectarine)

3 Liste des références bibliographiques

- Amouroux P. (2013) Bio-écologie et dynamique des populations de la cécidomyie des fleurs (*Procontarinia mangiferae*), un ravageur inféodé au manguier (*Mangifera indica*), en vue de développer une protection intégrée. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 187p.
- Armefflor (2015a). COMPTE RENDU D'ESSAI. Efficacité du bâchage du sol au niveau du rang contre la cécidomyie des fleurs du manguier. CEMAN_0415. 25p
- Armefflor (2015b). COMPTE RENDU D'ESSAI. Efficacité du bâchage du sol au niveau du rang contre la cécidomyie des fleurs du manguier. CEMAN_0515. 25p.
- Boudon F., Persello S., Jestin A., Briand A-S., Fernique P., Guédon Y., Léchaudel M., Grechi I., Normand F. (2016). An FSPM approach for modeling fruit yield and quality in mango trees. FSPMA 2016. 7-11 November, 2016, Qingdao, China.
- Boudon F., Jestin A., Fernique P., Lauri P-E., Dambreville A., Guédon Y., Normand F. (2017). The role of structural and temporal factors in the architectural development of the mango tree: evidences from simulation. Acta Hort. 1160: 83-90.
- Boudon F. Persello S., Grechi I., Marquier A., Soria C., Fournier C., Léchaudel M., Normand F. (2019). Assessing the role of ageing and light availability in leaf mortality in the mango tree. 30th International Horticultural congress. 12-16 August 2018, Istanbul, Turkey
- Briandy A. (2019). Confirmation du potentiel de leviers cultureux pour la régulation des populations et dégâts de ravageurs de la floraison et de la fructification du manguier à La Réunion : Cas de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits. Mémoire de fin d'étude, Ecole d'ingénieurs de Purpan, 85p+Annexes
- Caillat A. (2016). Evaluation du niveau d'infestation des mangues par les mouches des fruits en fonction de leur état de maturité. Mémoire d'année de césure, Bordeaux Sciences Agro, 25p+Annexes
- Capelli M., Lauri P-É, Normand F. (2016). Deciphering the costs of reproduction in mango – Vegetative growth matters. Front. Plant Sci. 7:1531
- Chang W., Cheng J., Allaire JJ, Xie Y., McPherson J. (2018). shiny: Web Application Framework for R. R package version 1.1.0. <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>
- Dambreville A., Lauri P-E., Trottier C., Guédon Y., Normand F. (2013) Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. J. Exp. Bot. 64: 2467-2480.
- Diatta P., Rey J-Y., Vayssières J-F., Diarra K., Coly E.V., Léchaudel M., Grechi I., Ndiaye S., Ndiaye O. (2013) Effect of phenology of citrus, mangoes and papayas fruits on the egg-laying preference of *Bactrocera invadens* (Tephritidae: Diptera). Fruits 68: 507-516.
- Drouillard A., Grechi I., Lechaudel M., Laridon Y., Génard M. (2019). A process-based model to predict the evolution and final concentration of sugars in mangoes. VI International Symposium on Applications of Modelling as an Innovative Technology in the Horticultural Supply Chain - Model-IT 2019. 2019/06/09-12, Molfetta, Italy

- Gell I., De Cal A., Torres R., Usall J., Melgarejo P. (2008). Relationship between the incidence of latent infections caused by *Monilinia* spp. and the incidence of brown rot of peach fruit: Factors affecting latent infection. *Eur. J. Plant Pathol.* 121:487–498.
- Gibert C., Chadoeuf J., Vercambre G., Génard M., Lescourret F. (2007). Cuticular cracking on nectarine fruit surface: spatial distribution and development in relation to irrigation and thinning. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 132: 583–591.
- Gibert C., Chadoeuf J., Nicot P., Vercambre G., Génard M., Lescourret F. (2009) Modelling the effect of cuticular crack surface area and inoculum density on the probability of nectarine fruit infection by *Monilinia laxa*. *Plant Pathol* 58: 1021–1031.
- Gibert C., Génard M., Vercambre G., Lescourret F. (2010) Quantification and modelling of the stomatal, cuticular and crack components of peach fruit surface conductance. *Funct Plant Biol* 37: 264–274
- Gilligan C. (2008). Sustainable agriculture and plant diseases: an epidemiological perspective. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 363:741–59
- Grechi I., Normand F. (2019). Effect of source-sink relationships from the branch to the tree scale on mango fruit size and quality at harvest. *Acta Hort.* 1244: 93-100
- Grechi I., Léchaudel M., Diatta P., Diarra K. (2015). Effect of fruit maturity on mango infestation by fruit flies: from experimental analysis to modeling. XI International Mango Symposium. 28 Spetember-02 October 2015, Darwin, Australia
- Holb I. J. (2008). Monitoring conidial density of *Monilinia fructigena* in the air in relation to brown rot development in integrated and organic apple orchards. *Eur. J. Plant Pathol.* 120:397–408
- Jayanthi P. D., Woodcock C. M., Caulfield J., Birkett M. A., Bruce T.J. (2012) Isolation and Identification of Host Cues from Mango, *Mangifera indica*, That Attract Gravid Female Oriental Fruit fly, *Bactrocera dorsalis*. *J. Chem. Ecol.* 38: 361-369.
- Kerdraon M. (2019). De la conception à l'évaluation de systèmes de culture économes en intrants et produits phytosanitaires en vergers pêche-nectarine : focus sur la Monilia. Mémoire de fin d'étude, ESA Angers Loire, 66p+Annexes.
- Léchaudel M., Génard M., Lescourret F., Urban L., Jannoyer M. (2005). Modeling effects of weather and source-sink relationships on mango fruit growth. *Tree Physiol* 25:583-597.
- Léchaudel M., Vercambre G., Lescourret F., Normand F., Génard M. (2007). An analysis of elastic and plastic fruit growth of mango in response to various assimilate supplies. *Tree Physiol.* 27: 219-230.
- 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.
- Mirás-Avalos J. M., Egea G., Nicolás E., Génard M., Vercambre G., Moitrier N., Valsesia P., González-Real M. M., Bussi C., et Lescourret F. (2011) QualiTree, a Virtual Fruit Tree to Study the Management of Fruit Quality. II. Parameterisation for Peach, Analysis of Growth-Related Processes and Agronomic Scenarios. *Trees* 25(5): 785- 99.
- Nordey T. (2014). Analyse expérimentale et modélisation de l'hétérogénéité de la qualité et de la maturité des mangues. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 180p+Annexes.
- Persello S. (2018). Réponse du manguier (*Mangifera indica* L.) à la taille: caractérisation et intégration dans un modèle structure-fonction des effets de la taille sur la croissance végétative et la reproduction. Thèse de Doctorat. France: Université de Montpellier, 174p+Annexes
- Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. (2018). Architectural factors affect fruit set in mango: evidence and modelling. 30th International Horticultural congress. 12-16 August 2018, Istanbul, Turkey
- Pissonnier, S., Dufils, A., Le Gal, P.-Y. (2019). A methodology for redesigning agroecological radical production systems at the farm level. *Agric. Syst.* 173 : 161-171.
- Pissonnier, S., Lavigne, C., Le Gal, P.-Y. (2017). A simulation tool to support the design of crop management strategies in fruit tree farms. Application to the reduction of pesticide use. *Computers and Electronics in Agriculture* 142: 260-272.
- Plénet D., Hilaire C., Blanc P., Borg J., Borne S., Bussi C., Gallia V., Greil M.-L., Guiraud M., Hostalnou E., Labeyrie B., Mercier V., Millan M., Montrognon Y., Monty D., C. M., Pinet C., Ruesch J. (2019). EcoPêche - Conception et évaluation multi-site de vergers de pêche – nectarine économes en produits phytopharmaceutiques et en intrants. *Innovations Agronomiques* 76 : 291-310
- Rattanapun W., Amornsak W., Clarke A. R. (2009). *Bactrocera dorsalis* preference for and performance on two mango varieties at three stages of ripeness. *Entomol. Exp. Appl.* 131: 243-253.

- Rossetto C. J., Bortoletto N., Carvalho C. R. L., de Castro J. V., Walder J. M. M., Nogueira N. L., Arthur V., Lopes L. A. (2009) Mango Resistance to Fruit Flies. I Varietal Selection and Mechanisms of Resistance. VIII International Mango Symposium. S. A. Oosthuysse. Leuven 1, Int. Soc. Horticultural Science 820: 575-580.
- Villarino, M., Melgarejo, P., Usall, J., Segarra, J., Lamarca, N., Cal, A. (2012). Secondary inoculum dynamics of *Monilinia* spp. and relationship to the incidence of postharvest brown rot in peaches and the weather conditions during the growing season. Eur. J. Plant Pathol. 133:585–598
- Vincenot D., Normand F. (eds) (2009) Guide de production intégrée de mangues à La Réunion. CIRAD et Chambre d'Agriculture de la Réunion, Saint-Pierre, Ile de la Réunion, 122p.
- Xu X., Guerin L., Robinson J. (2001). Effects of temperature and relative humidity on conidial germination and viability, colonization and sporulation of *Monilinia fructigena*. Plant Pathol. 50:561–568.

Liste jalons et des livrables prévus et état de réalisation :

T0 - Coordination	
1	Réunion annuelle 1 : lancement du projet
2	Réunion annuelle 2 : évaluation critique des résultats acquis et réajustement des activités
3	Rapport intermédiaire sur l'avancement du projet
4	Réunion annuelle 3 : évaluation critique des résultats acquis et réajustement des activités
5	Réunion annuelle 4 : restitution des résultats du projet
6	Rapport final sur le déroulement et les résultats du projet
T1 – Fonctionnement biotechnique	
1	Revue bibliographique pour établir les protocoles expérimentaux et/ou collecter les données disponibles sur manguiers (m) et pêcher (p)
2	Rapport sur la relation mangue-mouche des fruits en lien avec l'état de maturité du fruit à la récolte
3	Rapport sur l'effet de pratiques (taille) sur la phénologie du manguiers
4	Rapport sur l'effet de pratiques (paillage et récolte prophylactique précoce) sur la régulation de la cécidomyie des fleurs et des mouches des fruits
5	Analyse de l'effet de pratiques (récolte des fruits infestés) sur l'inoculum et la dynamique de la moniliose
6	Analyse de l'effet de pratiques (éclaircissage) sur la croissance des fruits et leur infection par la moniliose sur pêcher
7	Fiches techniques et/ou articles de vulgarisation sur les activités menées sur manguiers (m) et pêcher (p)
7m ₁	Mouches des fruits : relation entre l'état de maturité des fruits et le risque d'infestation (fiche)
7m ₂	Cécidomyie des fleurs : effet du paillage sur la régulation du ravageur et de ses dégâts (fiche)
7p ₁	Moniliose: leviers de gestion potentiels
8	Publication(s) et/ou communication(s) scientifique(s) sur les activités menées sur manguiers (m) et pêcher (p)
8m ₁	Mouches des fruits & cécidomyies des fleurs: effet de pratiques culturales sur la régulation des ravageurs et de leurs dégâts (communication à congrès)
8m ₂	Phénologie de l'arbre: effet de la taille sur la croissance végétative du manguiers (communication à congrès)
8m ₃	Phénologie de l'arbre: effet de la taille sur la croissance végétative du manguiers (article scientifique)
8m ₄	Mouches des fruits : relation entre l'état de maturité des fruits et le risque d'infestation (article scientifique)
8m ₅	Cécidomyie des fleurs : effet du paillage sur la régulation du ravageur et de ses dégâts (article scientifique)
8m ₆	Phénologie de l'arbre: effet de la taille sur la floraison du manguiers (article scientifique)
8p ₁	Croissance des fruits et infection : effet de pratiques culturales sur la sensibilité des fruits au pathogène (article scientifique)
T2 – Déterminants des pratiques & indicateurs	
1	Rapport sur la typologie des pratiques et les profils stratégiques des producteurs de mangue
2	Rapport sur la co-construction d'indicateurs d'évaluation des performances des itinéraires techniques en verger de manguiers
3	Formalisation d'une grille d'indicateurs en verger de manguiers (m) et de pêcher (p)
4	Identification de règles de décision par simulation de l'impact de pratiques sur le fonctionnement global de l'exploitation via le modèle Co-Hort
5	Formalisation des contraintes et opportunités associées aux pratiques considérées en verger de pêcher
6	Fiches techniques et/ou articles de vulgarisation sur manguiers (m) et pêcher (p)
6m ₁	Analyse de pratiques et profils de production: typologie des exploitations productrices de mangues à La Réunion (fiche)
6p ₁	Les pratiques comme leviers de gestion de la moniliose: contraintes, opportunité et performances (fiche)
7	Publication(s) et/ou communication(s) scientifique(s) sur manguiers (m) et sur pêcher (p)
7m ₁	Description de la démarche de la tâche 2 éprouvée sur manguiers (article scientifique à portée méthodologique)
T3 – Modélisation	
1	Modèle de croissance des fruits sur manguiers (adaptation du modèle QualiTree, sous une forme simplifiée, au manguiers)
2	Modèle Virtual Mango_V0: modèle de développement végétatif et reproducteur du manguiers (version préliminaire)
3	Modèle Virtual Mango_V1 : modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue (couplage du modèle de croissance des fruits à Virtual Mango)
4	Modèle Virtual Mango_V2 : intégration de l'effet de la taille sur le développement végétatif et reproducteur du manguiers
5	Modèle Virtual Mango_V3: couplage de modules bioagresseurs (cécidomyies des fleurs et mouches des fruits)
6	Rapport sur la modélisation du système manguiers-cécidomyie des fleurs et l'évaluation de modes de gestion du ravageur par expérimentations virtuelles
7	Modèle décisionnel sur manguiers : intégration des règles de décisions et des indicateurs d'évaluation au modèle Virtual Mango
8	Modèle épidémiologique fruit-moniliose sur pêcher_V0 (version préliminaire)
9	Modèle épidémiologique fruit-moniliose sur pêcher_V1: mise à jour de certains processus
10	Modèle épidémiologique fruit-moniliose_V2: intégration de l'effet de variables climatiques
11	Rapport sur la modélisation de l'effet de variables climatiques sur l'incidence de la moniliose
12	Rapport sur la modélisation des effets des pratiques de gestion de la moniliose sur les réponses pluriannuelles du pêcher
13	Intégration du modèle épidémiologique comme module élémentaire au modèle QualiTree
14	Rapport sur le couplage du modèle épidémiologique au modèle QualiTree sur pêcher
15	Publication(s) et/ou communication(s) scientifique(s) sur manguiers (m) et sur pêcher (p)
15m ₁	Modèle biotechnique : évaluation de scénarios de gestion des cécidomyies des fleurs par expérimentations virtuelles (communication à congrès)
15m ₂	Modèle biotechnique : présentation du modèle plante-bioagresseurs-pratiques (article scientifique)
15p ₁	Modèle épidémiologique : modèle épidémiologique fruit-pourriture brune en verger de pêcher_V0 (communication à congrès)
15p ₂	Modèle épidémiologique : modèle épidémiologique fruit-pourriture brune en verger de pêcher_V0 (communication à congrès)
15p ₃	Modèle épidémiologique : modèle épidémiologique fruit-pourriture brune en verger de pêcher_V1 (communication à congrès)
15p ₄	Modèle épidémiologique : modèle épidémiologique fruit-pourriture brune en verger de pêcher_V1 (article scientifique)
15p ₅	Modèle épidémiologique : modèle épidémiologique fruit-pourriture brune en verger de pêcher_V2 (communication à congrès)
T4 – Conception	
1	Développement des algorithmes d'optimisation multicritère intégrant le domaine de décision et les indicateurs spécifiques au manguiers (m) et au pêcher (p)
2	Mise à l'épreuve du cadre de modélisation pour la conception d'itinéraires techniques candidats en vergers de manguiers (m) et de pêcher (p)
3	Rapport ou CR sur la conception assistée par modèle de scénarios techniques en verger de pêcher
4	Atelier de restitution des profils candidats d'itinéraires techniques obtenus sur manguiers (m) et pêcher (p)

ANNEXE 2 : Liste des projets cités

- **Projet ModQual:** Modeling quality losses caused by pests on temperate and tropical perennial fruit crops: a generic framework for theoretical and applied issues (2013-2015).
- **Projet COSAQ:** Co-conception de systèmes agro-alimentaires de qualité (2014-2020).
- **Projet EcoPêche** (réseau DEPHY EXPE Ecophyto): Conception et évaluation multi-site de vergers de pêche–nectarine économes en produits phytosanitaires et en intrants (2013-2018).
- **Projet CLIF:** Climate change Impact on Fungal pathosystems: estimating disease variation using models and indicators, designing adaptation strategies and mitigating several key knowledge gaps (2014-2016).
- **Projet RegPuc:** Quelles stratégies d'irrigation et de fertilisation pour réguler les populations de puceron vert en verger de pêchers ? (2015-2019)
- **Projet Interfaces :** The interfaces between agricultural raw material and processing, a key point for bridging variability of raw materials and versatility of processing for innovative food systems (2017-2020)