

Rapport scientifique intermédiaire Projet Ecoverger

- 04 août 2017 -



APR 2014 « Résistance et pesticides »

Isabelle GRECHI (UPR HortSys, Cirad)

Thierry MICHELS, Frédéric NORMAND, Laurent PARROT, Alain RATNADASS
(UPR HortSys, Cirad)

Daniélé BEVACQUA, Michel GENARD, Françoise LESCOURRET, M. Mahmoud
MEMMAH, Daniel PLENET, Gilles VERCAMBRE
(UR PSH, INRA)

1 – Rappel des objectifs et de la démarche du projet

L'objectif du projet Ecoverger est 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 est adressée sur deux cas d'étude : le pêcher en région tempérée dans les sud-est de la France et le manguiers en région tropicale à l'île de la Réunion. La proposition cible 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 les cécidomyies des fleurs et les mouches des fruits sur manguiers.

Les stratégies de gestion des bioagresseurs qui sont considérées dans ce projet combinent des méthodes alternatives reposant sur des techniques 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. Il est fait l'hypothèse que les méthodes de contrôle cultural proposées comme méthodes alternatives permettent 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 vis-à-vis des pesticides des vergers, 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, il est 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 permet 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 est structurée en une tâche de coordination (T0) et quatre tâches de recherche (T1 à T4 ; Fig. 1) qui visent 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 biotechniques)
- **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 sont 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).

Les résultats biotechniques et agro-économiques seront synthétisés dans des fiches techniques ou des articles de vulgarisation à destination des producteurs et autres acteurs de la filière. Ces supports de communication permettront un transfert rapide des résultats de recherche vers la profession. Une valorisation scientifique est 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 constituera un outil de dialogue entre les acteurs et les chercheurs et aura vocation à accompagner la réflexion autour de la démarche de co-conception de solutions techniques à destination des producteurs. Les « profils candidats » d'itinéraires techniques seront restitués auprès des acteurs ayant participé à leur co-conception au cours d'un atelier de restitution. Par ailleurs, ces échanges faciliteront la poursuite de la démarche qui appellera à la mise en œuvre opérationnelle des itinéraires techniques candidats qui auront été 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 termes, à l'identification de solutions techniques transférables.

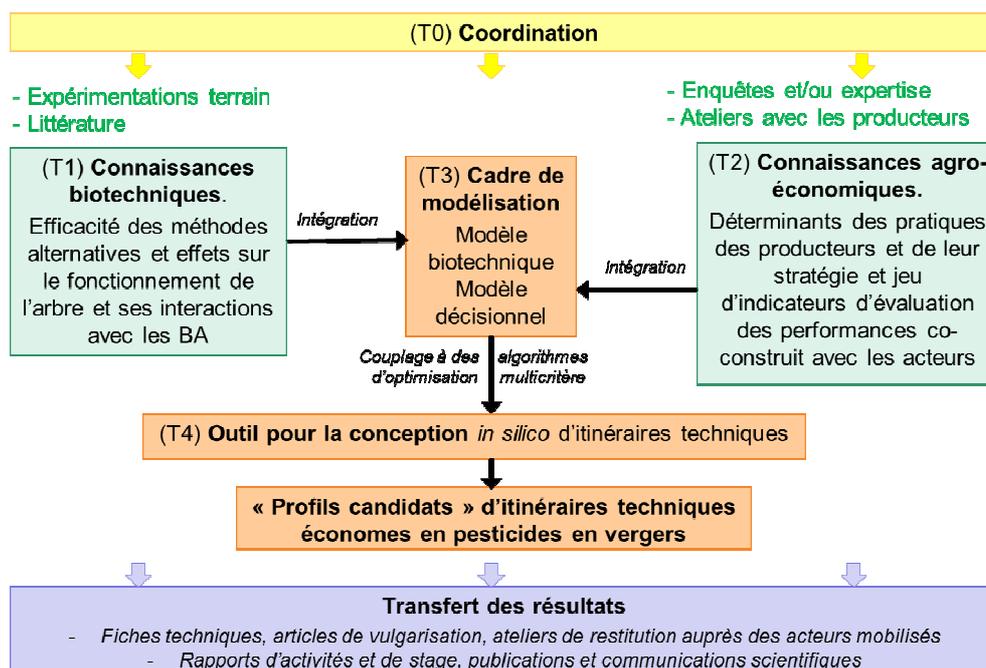


Fig. 1. Représentation schématique de la structure de la proposition, des résultats attendus par tâche et des supports de diffusion et de valorisation de ces résultats.

2 – Description factuelle de la réalisation des actions annoncées

2.1 - Actions prévues par tâche

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

Tâche 1-Fonctionnement biotechnique

Dans le cadre du projet, les pratiques proposées pour gérer les bioagresseurs et leurs dommages mobilisent différents leviers : des actions sur la population initiale (inoculum) 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, par des revues bibliographiques et des expérimentations, vise à acquérir des connaissances et des données sur le fonctionnement biotechnique des systèmes arbre-bioagresseurs-pratiques pour les deux modèles biologiques retenus. Il s'agit notamment d'identifier les principaux

processus en jeu dans le fonctionnement de ces systèmes et d'évaluer l'efficacité à réduire les dommages des bioagresseurs des méthodes alternatives proposées, ainsi que leur(s) effet(s) potentiel(s), désirable(s) ou indésirable(s), sur le fonctionnement de l'arbre et la production. Ces connaissances seront ensuite intégrées dans un cadre de modélisation (cf. Tâche 3).

❖ *Manguier*

➤ *Activité 1 : 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 est 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 de fruits sensibles mais pourrait, à contrario, impacter négativement la qualité des fruits. Afin de bien maîtriser le stade de maturité des fruits à la récolte 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-vis des mouches des fruits.

➔ Dans la continuité d'un essai conduit en 2015/16 dans le cadre des projets COSAQ et ModQual, un nouvel essai a été mis en place en 2016/17 sur trois vergers de mangues Cogshall, un sur la station Bassin Plat du Cirad et deux chez des producteurs. Ces essais visaient à évaluer le risque d'infestation des mangues par les mouches des fruits en fonction de l'état de maturité des fruits, ainsi que 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. Sur chaque site, des fruits présentant un gradient de maturité (de verts à sur-matures) ont été récoltés à trois dates différents. Ils ont fait l'objet d'une notation visuelle du stade de maturité (Fig. 2), de mesures de la fluorescence de la chlorophylle de l'épicarpe et de sa dureté/fermeté par pénétrométrie (TA.XT2, laboratoire de l'UMR QualiSud), et d'une caractérisation de l'état d'infestation par dénombrement et identification des mouches ayant émergé des fruits après incubation. Cette étude a fait l'objet d'un stage de césure.

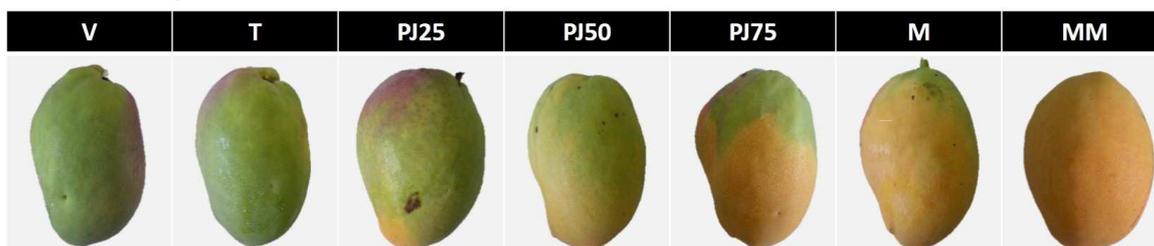


Fig. 2. Les sept stades utilisés pour décrire visuellement la maturité des mangues Cogshall au cours des suivis : vert (V), tournant (T), point jaune 25, 50, 75 (PJ25, PJ50, PJ75), mature (M) et sur-mature (MM)

Sur l'ensemble des campagnes de suivis et des sites, plus de 17000 mouches ont été piégées. Les mouches des fruits *Bactrocera zonata*, *Ceratitis rosa* (ou *Ceratitis quilicii* ?) et *Ceratitis capitata* représentent respectivement 41%, 27% et 7% des mouches piégées. La mouche des légumes *Bactrocera (Zeugodacus) cucurbitae* a aussi été piégée (25% des mouches piégées), surtout en période de post-récolte. Les mangues Cogshall ont majoritairement été infestées par *B. zonata* qui représente 73% 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 T, moins de 2% des mangues ont été infestées, tandis que le taux d'infestation des

mangues était d'environ 5% environ au stade PJ25 et de 10% à plus de 15 % aux stades PJ50 à MM (Fig. 3). Des tests de préférence à l'oviposition par *B. zonata* ont également été conduits en conditions contrôlées au laboratoire (chambres climatiques de l'UMR PVBMT) ont également confirmés une forte préférence de *B. zonata* pour les mangues matures.

Ces données ont permis d'établir une courbe de réponse entre le risque d'infestation des mangues Cogshall en verger et la fluorescence du fruit, utilisée comme indicateur de maturité des fruits (GLM avec loi d'erreur binomiale ; Fig. 4).

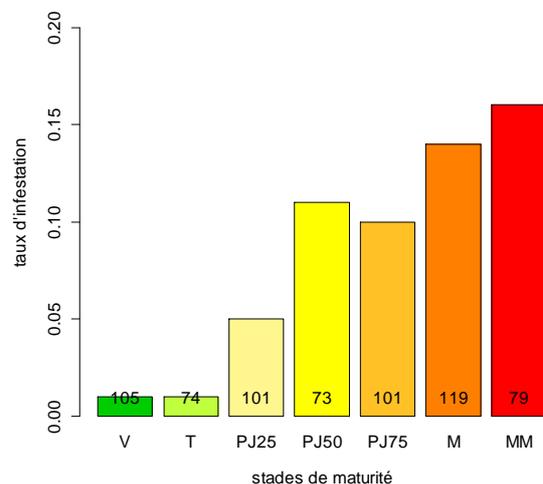


Fig. 3. Taux d'infestation des mangues Cogshall en fonction de leur stade de maturité. Les chiffres correspondent au nombre de fruits échantillonnés par stade sur l'ensemble des sites et sur deux saisons de production

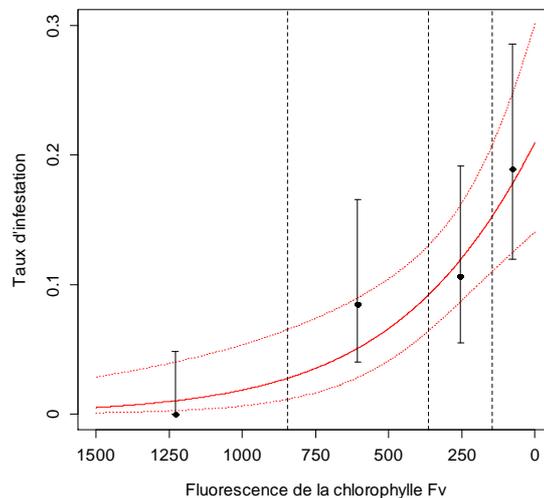


Fig. 4. Taux d'infestation des mangues Cogshall en fonction de la fluorescence Fv du fruit. Trait plein et pointillés rouges : prédiction et IC à 95% ; Points et segments noirs: observations par classe de fluorescence Fv (moyennes \pm IC à 95%).

Le stade point-jaune est un stade optimal de récolte d'un point de vue de la qualité organoleptique (Vincenot and Normad 2009) et facilement repérable par les producteurs (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). 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 point-jaune très précoce. Des observations ponctuelles des stades de maturités des fruits récoltés par les producteurs tendent à indiquer une marge de progrès possible.

Une analyse préliminaire des données de piégeage de 2015/16 n'a pas mis en évidence de relation étroite entre le taux d'infestation des mangues par les mouches des fruits et l'abondance des mouches des fruits dans les vergers, ni entre l'abondance des fruits et l'abondance des mouches des fruits dans les vergers. Ces analyses ont toutefois été faites en considérant l'abondance des mouches cumulée sur toute la période de piégeage. Avant de conclure, il sera nécessaire d'affiner cette analyse en y intégrant les données de 2016/17 et en considérant l'abondance des mouches des fruits dans le verger sur une période d'une quinzaine de jours avant la date de prélèvement des fruits dans les vergers.

➤ *Activité 2 : phénologie de l'arbre*

Le manguié 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 matures pour les mouches des fruits) pendant une longue période. 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 mouches des fruits et aux cécidomyies des fleurs, voire de réduire l'impact des ravageurs par un effet de dilution ou par la réduction du nombre de cycles de multiplication des ravageurs. Des relations étroites et réciproques entre la croissance végétative et la

reproduction du manguier, et entre les composantes architecturales et phénologiques de son développement ont été mises en évidence (Dambreville et al. 2013). La taille est une intervention courante et nécessaire à la conduite des vergers et qui est connue pour affecter la croissance végétative des arbres. Elle a été considérée comme un levier potentiel pour synchroniser la floraison des arbres. A ce jour, il n'existe toutefois pas de caractérisation fine de l'effet de la taille et de ses modalités d'application (intensité et sévérité) sur le développement et la croissance végétative, la floraison et la fructification du manguier pour aider à raisonner la taille en vue de synchroniser la floraison du manguier.

➔ Dans le cadre du projet COSAQ et de la thèse de Séverine Persello, une expérimentation a été mise en place sur la station de Bassin Plat, à la fin de la récolte en janvier 2016, pour évaluer finement la réponse du manguier à la taille pour la variété Cogshall. Cet essai a été reconduit en janvier 2017 pour consolider les résultats sur l'effet immédiat (année n) de la taille et évaluer ses effets retardés (année n+1). A noter que la production de la campagne 2015/16 était faible tandis que celle de 2016/17 était élevée. Par comparaison des résultats des deux années, il sera possible de tester un effet potentiel de la charge en fruits de l'arbre sur sa réponse à la taille. La taille a été caractérisée en termes d'intensité de taille (quantité de matériel végétal retiré par volume de canopée) et de sévérité de taille (distance du point de taille par rapport à l'extrémité d'une branche). La réponse à la taille, en termes de croissance végétative, est étudiée 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 sont ensuite décrites sur les UC échantillonnées qui n'ont pas eu de croissance végétative et les nouvelles UC mises en place suite à la taille. Les suivis sont donc continus tout au long de l'année. La croissance végétative, la floraison et la fructification du manguier sont décrites en termes d'occurrence, d'intensité et de temporalité (Fig. 9), ainsi qu'en termes de morphologie pour les UC. Cette étude fait actuellement l'objet d'un stage de césure.

Une analyse préliminaire des données de la campagne 2016/17 montrent que l'intensité de taille affecte positivement le taux de débourrement des axes taillés (Fig. 5) et non taillés mais n'a pas d'effet sur l'intensité de la croissance végétative (i.e., nombre d'UC émises). A noter qu'aucune croissance végétative n'a été observée sur les arbres non taillés. La sévérité de taille a un effet positif à la fois sur l'occurrence (Fig. 5) et l'intensité de la croissance végétative. Globalement, les axes taillés ont un taux de débourrement et une intensité de croissance végétative significativement supérieure aux axes non taillés.

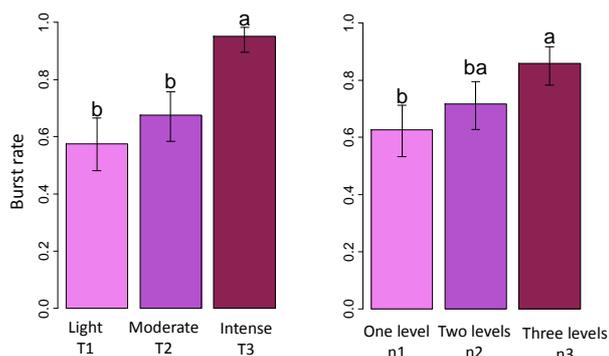
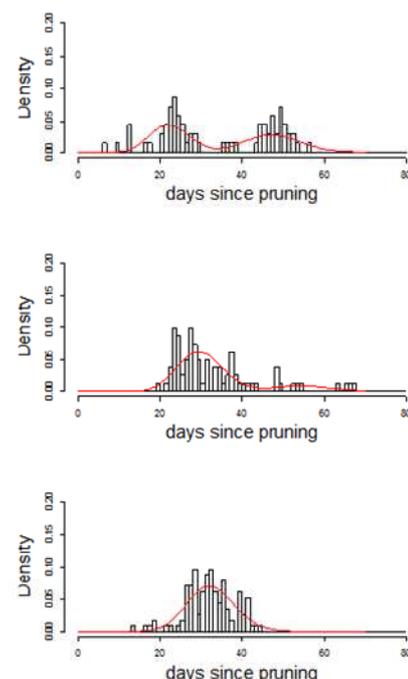


Fig. 5. Taux de débourrement des axes taillés en fonction de l'intensité de taille (T1 : faible, T2 : moyenne, T3 : forte) et de la sévérité de taille (n1 : 1 étage, n2 : 2 étages, n3 : 3 étages de croissance retirés)

Fig. 6. Distributions des dates de débourrement (en nombre de jours après taille) des axes taillés selon l'intensité de taille (de haut en bas : T1, T2, T3). Trait rouge: ajustement aux données d'un mélange de lois de distribution de Poisson



L'intensité de taille a synchronisé la croissance végétative des axes taillés (2 flushes de croissance pour la faible intensité vs 1 seul flush pour la forte intensité, Fig. 6) et avancé celles des axes non taillés de 10 jours environ (1 seul flush quel que soit l'intensité de taille). La sévérité de taille n'a un effet que si elle est associée à une faible intensité de taille : la date de débourrement, centrée sur un seul flush, est avancée. Une seule vague de floraison a été observée sur les arbres non taillés tandis que deux vagues de floraison ont été observées sur les arbres taillés. Une analyse préliminaire montre que pour les axes non taillés, la première vague de floraison concerne les UC n'ayant pas eu de croissance végétative, tandis que la deuxième vague concerne les nouvelles UC.

L'analyse des données de croissance végétative doit être complétée en y intégrant les données de la campagne 2017/18 qui sont maintenant disponibles. Les données de floraison et de fructification de la campagne 2017/18 sont en cours d'acquisition et les deux jeux de données devront être analysés très finement. Il conviendra d'analyser la réponse à la taille de la floraison non seulement en fonction des modalités de taille mais aussi et surtout en lien avec la croissance végétative, en considérant notamment la nature et la date d'apparition des UC.

➤ *Activité 3 : cécidomyies des fleurs*

L'effet du paillage 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, Armeilhors, 2015a, 2015b). Toutefois, ces précédentes études ne disposent pas de données précises et quantifiées des dégâts avec ou sans paillage, et ne permettent pas d'établir de relation entre abondance de cécidomyies des fleurs et dégâts. D'autre part, les effets potentiels désirables ou indésirables du bâchage 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. Il va permettre d'évaluer sur un même site trois modalités de couverture du sol, à savoir bâchage (tapis de sol tressé) vs enherbement haut vs enherbement ras (Fig. 7), en termes d'effet i) sur l'infestation et les dégâts de cécidomyie, ii) sur la phénologie de la floraison, sur le taux de fructification et le rendement du manguier, iii) ainsi que sur la température et l'humidité du sol, et son activité biologique. Les traitements phytosanitaires se limitent exclusivement à l'application de soufre contre l'oïdium.



Fig. 7. Modalité bâchage (à gauche) et limite entre les modalités enherbement haut et enherbement ras (à droite)

Les suivis portent sur la floraison, la dynamique des cécidomyies des fleurs par piégeage des larves, les dégâts aux inflorescences, la fructification et le rendement, mais aussi sur la

température et l'humidité du sol (avec des Tinytags® data loggers), et l'activité biologique du sol (bait lamina strips). Cette étude fait l'objet d'un stage de fin d'études.

Au 1er relevé des pièges le 18/07/2017, le taux d'arbres ayant commencé à fleurir était de 20% sur la modalité enherbement haut (avec 8 larves/10 pièges), 15% sur la modalité bâchée (8 larves/10 pièges également), contre 10% sur la modalité enherbement ras (avec 2 larves/10 pièges seulement). Des dégâts de cécidomyies ont déjà été constatés sur plusieurs inflorescences dans les vergers. Les résultats complets de cet essai seront disponibles au premier semestre 2018, dès la fin de saison de production des mangues.

Transferts et valorisations (Tâche 1 / Manguier)

- 2 participations à un colloque international:
 - 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 » [poster]. XII International Mango Symposium. 10-16 July 2017, Baise, Chine [ref. 1]
 - Persello et al. (2017). « How different pruning intensities and severities affect vegetative growth processes in Cogshall mango trees » [diaporama]. XII International Mango Symposium. 10-16 July 2017, Baise, Chine. [ref. 2]
- 2 comptes rendus synthétiques d'activité : Preterre et al. (2017). « Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers ». [ref. 3a,b]
 - ↳ Diffusion des résultats de l'étude auprès des deux producteurs ayant hébergé l'essai

Valorisations à paraître / prévues:

- 5 articles scientifiques:
 - « 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 » [Ratnadass et al., soumission à Acta Horticulturae en août 2017]
 - « How different pruning intensities and severities affect vegetative growth processes in Cogshall mango trees » [Persello et al., soumission à Acta Horticulturae en août 2017]
 - Evaluation du niveau d'infestation des mangues par les mouches des fruits en fonction de l'état de maturité des fruits [Grechi et al., soumission prévue en 2018]
 - Effet du paillage et de l'enherbement du sol sur la régulation des cécidomyies des fleurs du manguier - synthèse des résultats de l'essai en cours et des essais antérieurs [Ratnadass et al., soumission prévue en 2018]
 - Effet de l'intensité et de la sévérité de la taille sur la croissance végétative, la floraison et la fructification [Persello et al., soumission prévue en 2018]
- 1 compte rendu synthétique d'activité : Effet du paillage et de l'enherbement du sol sur la régulation des cécidomyies des fleurs du manguier [Brustel et al, décembre 2017]
 - ↳ Diffusion des résultats de l'essai en cours auprès du CPEA de St-Paul
- 3 rapports de stage :
 - Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers [Preterre, septembre 2017]
 - Effet de l'intensité et de la sévérité de la taille sur la croissance végétative, la floraison et la morphologie des UC [Stahl, décembre 2017]
 - Effet de pratiques culturales (taille des arbres, paillage / enherbement du sol) sur la régulation des bioagresseurs de la floraison du manguier [Brustel, mai 2018]

❖ *Pêcher*

Concernant le système pêcher-pourriture brune (ou moniliose), une part importante des connaissances sur le fonctionnement du système qui seront intégrées dans le cadre de

modélisation (cf. Tâche 3) ont été acquises par des revues bibliographiques. Elles ont aussi été complétées par des données expérimentales préalablement collectées 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 implique 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. L'effet de récoltes sanitaires a été considéré 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 : croissance des fruits et infection des fruits par la pourriture brune*

La densité des fissures cuticulaires à la surface des pêches varie 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 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). L'humidité, qui peut être partiellement modifiée par l'irrigation du verger, est un facteur important pour la sporulation et la germination du champignon.

➔ Des mesures de croissance en diamètre et de poids de fruits et des mesures de sensibilité de fruits à l'infection par la pourriture brune au laboratoire, 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.

L'analyse de ces données a montré que la croissance en diamètre des fruits, estimée par une régression linéaire, augmentait avec l'éclaircissage des fruits. 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. 8). 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.

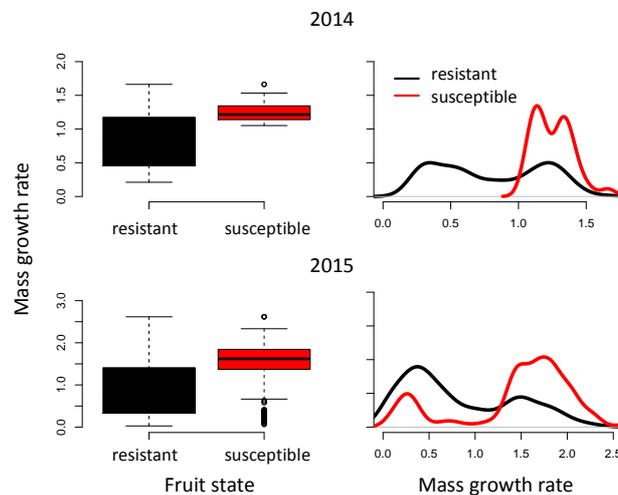


Fig. 8. Taux de croissance des fruits résistants et sensibles à l'infection par la pourriture brune observés en 2014 et 2015

Au champ, des infections par la pourriture brune ont été observées en 2014 mais pas en 2015. L'analyse des données météorologiques suggère que la pourriture brune ne s'est pas 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. Il est fait 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, il est fait l'hypothèse que la probabilité d'infection par contact des fruits était réduite par la faible densité de fruits.

Transferts et valorisations (Tâche 1 / Pêcher)

Valorisations à paraître / prévues:

- 1 article scientifique: « Controlling stone fruit susceptibility to fungal pathogens by cultural practices: the case of peach, brown rot and fruit thinning ». [Bellingeri et al., soumis à Canadian Journal of Plant Pathology – révision en cours]

Tâche 2-Déterminants des pratiques & indicateurs.

Générer des itinéraires techniques candidats pose la question de leur pertinence vis-à-vis d'un public cible. C'est précisément l'enjeu de cette tâche qui vise à contribuer au couplage de connaissances issues du point de vue des producteurs avec une démarche de conception de systèmes techniques innovants assistée par modèle. Il s'agit donc ici d'identifier les freins au changement au sein des exploitations productrices de fruits. La décision technique relève en partie de facteurs gérés à l'échelle de l'exploitation et répond à des stratégies propres à chaque agriculteur. Ces stratégies dépendent de facteurs internes et externes à l'exploitation et de la manière dont les envisage le producteur. Pouvant s'agir d'exploitations spécialisées ou diversifiées, la place et le rôle de la culture au sein de l'exploitation, les stratégies de commercialisation du producteur, 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 focalisent sur l'obtention de 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*

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

S'agissant en majorité d'exploitations diversifiées, la place, le rôle 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 des déterminants des choix techniques (pour les itinéraires techniques actuels) et des déterminants des changements de pratiques par une approche historique afin de mieux appréhender les conditions de changement des pratiques. Il s'agit 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 31 producteurs de mangues 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, volume de main d'œuvre, matériel, etc), identification des facteurs de production mobilisés (foncier, 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 étude a fait l'objet d'un stage de fin d'étude.

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 'mangue', (iii) la facilité à mobiliser de la main d'œuvre sur cette composante et (iv) l'orientation agroécologique 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 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, habitat pour auxiliaires qui vont tamponner la sévérité de certaines attaques de bioagresseurs, mais le maintien du recours aux traitements. Ces derniers sont 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 complémentarité des calendriers de travaux. Les méthodes de lutttes 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 pendant les périodes de pics de travail, les choix ne se font pas en faveur de cette composante. 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. En effet, l'agrotourisme, quand il est pratiqué, bénéficie de la valeur paysagère du verger de manguiers. 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 manguiers.

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

o *Activité 2 : co-construction des critères/indicateurs d'évaluation*

Cette activité porte sur la construction d'une grille d'évaluation des itinéraires techniques sur verger de manguiers à dire de producteurs et a pour objectif de mieux appréhender la manière dont les producteurs évaluent leur propre itinéraires techniques, et par extension les futurs itinéraires techniques candidats issus du modèle biotechnique en construction.

➔ Ce travail a été réalisé durant le premier semestre 2017, sur la base de deux approches complémentaires. La première a consisté en une première vague d'enquêtes menées sur un effectif limité de 13 exploitations, choisies sur la base de la typologie réalisée en 2016. L'entretien a consisté à mettre le producteur en condition d'évaluation par différentes entrées : par les différentes opérations culturales sur le verger de manguiers, par une discussion autour des changements de pratiques opérées dans le passé, par une critique des pratiques du voisin éventuel, par une critique 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 en 2016 en diffusant le recueil des fiches de synthèse des typologies d'exploitation, 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. Pour ce faire, 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 lors des enquêtes. Les indicateurs ont ensuite été classés au sein d'une des trois composantes de l'agriculture durable (agroécologique, 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 en 2016. L'atelier a permis de corriger le sens donné à certaines variables et écarter celles qui relevaient de cas trop particuliers. Cet atelier a par ailleurs permis de restituer aux producteurs les résultats des travaux en cours ainsi que d'initier un collectif de producteurs à même de travailler au sein du projet autour de la co-conception de systèmes innovants. Cette étude a fait l'objet d'un stage de fin d'étude.

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. Cette grille est actuellement en cours de formalisation. Ces premiers résultats 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 un noyau d'indicateurs (9/22) en dépit d'une diversité d'exploitations enquêtées, calquée sur les résultats de la typologie de 2016.

La taille de l'échantillon enquêté n'a cependant pas permis d'établir une relation entre la part variable de la grille d'indicateurs et les différents types initialement identifiés.

La grille d'indicateurs établie en 2017 se limite dans sa version actuelle à une liste de variables réparties en indicateurs. Après confrontation de ces résultats avec les concepteurs du modèle biotechnique du manguiier, il sera peut-être nécessaire d'aller plus loin dans la formalisation de cette grille en poussant le travail du collectif jusqu'à la définition des seuils pour chaque variable et la pondération globale de la grille. Ce travail se ferait au moyen d'ateliers du même type que celui organisé autour de la validation des indicateurs.

La grille d'indicateurs en cours de formalisation est une voie visant à faciliter l'évaluation ex ante et du point de vue du producteur d'itinéraires techniques candidats. Cette grille cible une évaluation du système de culture manguiier sans forcément le resituer dans le système plus global de l'exploitation. Il est donc intéressant d'aller plus loin dans ce sens en utilisant un modèle de simulation technico-économique comme outil intermédiaire de discussion afin d'identifier les freins à l'adoption d'innovations resituées à l'échelle globale de l'exploitation. Au sein d'un panel restreint d'exploitations représentatives de la diversité existante, l'objectif est donc (i) de cibler les innovations susceptibles de répondre aux objectifs du producteur et (ii) de simuler à l'aide du modèle leur mise en œuvre au sein de l'exploitation et d'analyser avec le producteur les freins ou les points facilitant l'adoption de l'innovation. L'identification par ce moyen de règles de décision propre à chacune des exploitations impliquées est à même d'éclairer l'évaluation ex-ante des futurs itinéraires techniques candidats.

Transferts et valorisations (Tâche 2 / Manguiier)

- o 1 rapport 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 » [ref. 4]
- o 1 compte-rendu synthétique d'activité : Marchetti (2016). « Présentation synthétique des types d'exploitation » [ref. 5]
 - ↳ Recueil de fiches de synthèse reprenant les principales données chiffrées pour décrire chaque type d'exploitation et remis à 13 producteurs ayant participé à l'enquête
- o 1 atelier de restitution/validation de la première version de la grille d'indicateurs d'évaluation [organisé le 31 mai 2017].

Valorisations à paraître / prévues:

- o 1 rapport de stage sur l'analyse des règles de décision des stratégies productives et commerciales des exploitations agricoles dans le cas des producteurs de mangues à La Réunion [Girard, septembre 2017]
- o 1 atelier de formalisation de la grille d'indicateurs (définition des seuils pour chaque variable et pondération globale de la grille) [organisation prévue en 2018]

- 1 article scientifique à portée méthodologique sur la démarche de la Tâche 2 [soumission prévue en 2018]
- 1 article de vulgarisation dans le magazine Mag' Réunion : « Qui produit la mangue à la Réunion ? » [soumis en 2017]
 - ↳ Résumé présentant la démarche de la Tâche 2 mise en œuvre dans le cadre du projet Ecoverger

❖ *Pêcher*

Il était prévu de transposer la démarche mis en œuvre sur manguier au pêcher afin de faire bénéficier aux chercheurs de l'unité PSH de l'expertise acquise par les chercheurs de l'unité HortSys sur manguier. La mise en œuvre opérationnelle de la Tâche 2 prévue en 2017 sur pêcher n'a pas encore débuté et a été reportée en 2018, une fois la démarche pleinement éprouvée sur manguier. Toutefois, une réduction des effectifs dans l'unité PSH, empêchant le chercheur impliqué dans cette activité de s'y investir pleinement, pourrait entraver la mise en œuvre opérationnelle de cette activité.

➔ Afin de réduire le gap actuel entre les modèles pêcher et manguier sur ce volet du projet, une solution envisagée serait de proposer un stage sur cette activité qui serait co-encadré par les chercheurs de l'unité HortSys. Les attendus du stage seraient bien entendus réduits en comparaison à ceux des deux stages réalisés sur manguier. Un stage de césure pourrait être envisagé pour que les enquêtes puissent être faites à une période où les producteurs sont plus disponibles. A noter que la phase d'enquête pourrait potentiellement être réduite par la mobilisation de données et connaissances issues du projet EXPE EcoPêche (réseau DEPHY Ecophyto) et un collectif plus restreint de producteurs pourrait être ciblé. Il pourrait d'ailleurs être envisagé de mobiliser des producteurs du GRCETA de Basse Durance qui sont déjà sensibilisés aux activités de recherche puisque cette association d'arboriculteurs est partenaire du projet RegPuc (APR 2014 PESTICIDES-Ecophyto). Les activités des Tâches 1 et 3 étant bien avancées, il serait par ailleurs plus facile de cibler l'évaluation des innovations proposées pour la gestion de la pourriture brune lors des enquêtes.

📄 Transferts et valorisations (Tâche 2 / Pêcher)

Valorisations à paraître / prévues:

- 1 rapport de stage sur l'analyse des profils de production et la co-construction d'indicateurs d'évaluation dans le cas des producteurs de pêches dans le sud-est de la France [juin ou septembre 2018]

Tâche 3-Modélisation

Afin de mettre en œuvre une démarche de conception d'itinéraires techniques assistée par modèle, il est nécessaire : i) de développer 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 ; ii) et de le coupler à un modèle décisionnel qui intègre des règles de gestion (i.e., ensemble d'options de gestions fixes et/ou de règles de choix flexibles qui déclenchent l'application de ces règles en fonction de l'état du système) et des indicateurs de performances. Le modèle QualiTree (Lescourret et al. 2011), modèle écophysio-logique de culture développé sur pêcher, a été retenu comme cadre générique pour le modèle biotechnique des deux cultures fruitières. Le développement informatique d'un cadre de modélisation générique pour des cultures fruitières fait partie des attendus de la Tâche 3. Il s'appuiera sur les connaissances et les données acquises dans les Tâches 1 et 2 du projet. Il permettra d'analyser et de quantifier par simulation les pertes de production occasionnées par les bioagresseurs selon les conditions d'application des techniques culturales ciblées dans le projet, tout en considérant les compromis entre rendement, qualité des fruits et qualité environnementale.

❖ *Manguier*

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

Le développement du modèle biotechnique pour le manguier prévoit le développement d'un modèle de culture par l'adaptation du modèle QualiTree au manguier (« QualiTree-mango ») et son couplage à un module de phénologie et de développement végétatif et reproducteur du manguier (« Virtual Mango »). Pour cela il est possible de s'appuyer sur un modèle de croissance et d'élaboration de la qualité des fruits qui a été développé sur manguier à l'échelle de la branche fruitière (Léchaudel et al. 2005, 2007) et récemment complété par un modèle de maturation (Nordey 2014). La modélisation du développement végétatif et reproducteur du manguier et de la croissance des organes (UC et inflorescences) a été engagée dans le cadre du projet COSAQ. Ces différents modèles doivent être finalisés et couplés dans un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue.

➔ Des travaux sur la modélisation ont été conduits en parallèle au projet Ecoverger dans le cadre du projet COSAQ et en collaboration étroite avec Frédéric Boudon, chercheur à l'UMR AGAP & INRIA Virtual Plants. Un modèle global (« Virtual Mango »), comprenant un modèle de développement architectural (Fig. 9) et des modèles de développement des UC et des inflorescences, a été 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). Ce dernier modèle réalise un bilan de carbone (prenant en compte les relations sources-puits) et hydrique pour simuler la croissance des fruits. Un travail informatique a été réalisé pour faire communiquer ces modèles écrits dans des langages différents. Une première version d'un modèle structure-fonction est désormais disponible pour la mangue Cogshall pour des arbres non taillés et sera prochainement décrite par une publication scientifique. Ce modèle permet de simuler le développement végétatif et reproducteur de l'arbre et la croissance des fruits et leur qualité à la récolte (Fig. 10 ; Boudon et al 2016).

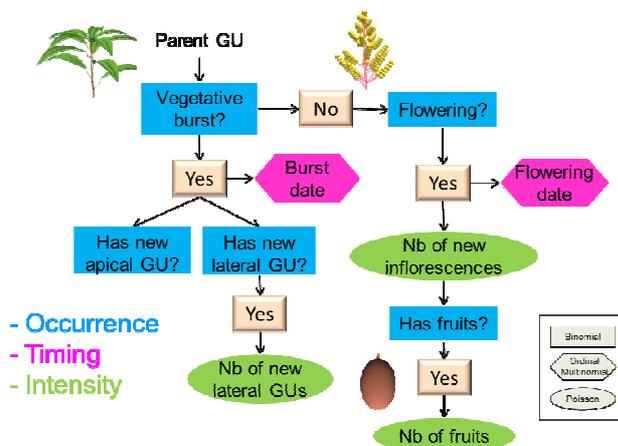


Fig. 9. Représentation schématique de la décomposition en processus stochastiques élémentaires (occurrence, intensité et temporalité) de la croissance végétative, de la floraison et de fructification, simulées par l'application de GLM successifs.

Les GLM suivent des lois de distribution d'erreurs de type binomiale, multinomiale ordinaire ou de Poisson selon le processus considéré.

Les GLM prennent en compte l'effet de facteurs architecturaux.



Fig. 10. Exemple de simulation du développement végétatif et reproducteur d'un arbre et de sa représentation sous forme de maquettes 3-D

Le modèle de croissance du fruit qui considère le fonctionnement de la branche fruitière indépendamment du reste de l'arbre est une version simplifiée du modèle QualiTree, ce dernier étant composé d'un ensemble de branches fruitières pouvant échanger du carbone

entre elles et avec le reste de l'arbre. Dans le cadre du projet COSAQ, une modification de ce modèle a été engagée de façon conceptuelle et informatique pour permettre la prise en compte des flux de carbone à l'échelle de l'arbre entier. Des données ont été acquises en 2016/17 et permettront d'entamer la calibration et l'évaluation du modèle étendu à l'échelle de l'arbre si cela se justifie, c'est-à-dire s'il est démontré que les branches fruitières ne sont pas autonomes vis-à-vis du carbone (Grechi et al 2017).

Les tables de probabilités utilisées pour simuler l'occurrence, l'intensité et la temporalité de la croissance végétative, de la floraison et de la fructification et qui tiennent actuellement compte de facteurs architecturaux (Fig. 9), devront être révisées afin de prendre également en compte les effets de la taille. Dans le cadre du projet Ecoverger et de la thèse de Séverine Persello financée sur le projet COSAQ, ces tables de probabilités seront extraites des données acquises en 2016 et 2017 pour l'étude expérimentale de la réponse du manguier à la taille menée (cf. Tâche 1).

Un arbre adulte a été entièrement digitalisé juste après la récolte et avant la croissance végétative, et des mesures d'interception lumineuse ont été réalisées en parallèle. Les données ainsi acquises permettent d'avoir une maquette 3D de l'architecture d'un arbre adulte. Ces données serviront notamment à valider un modèle d'interception lumineuse, à évaluer qualitativement le modèle de croissance du fruit étendu à l'échelle de l'arbre et à caractériser plus finement la réponse du manguier à différentes modalités de taille par simulations virtuelles.

- *Activité 2 : développement de modèles de bioagresseurs (cécidomyies des fleurs et des mouches des fruits) et couplage au modèle de culture*

Le développement d'un modèle biotechnique pour le manguier prévoit le développement de modèles de bioagresseurs pour les cécidomyies des fleurs et les mouches des fruits, ainsi que leur couplage au modèle de culture par l'intégration des interactions arbre-bioagresseurs. Un modèle stochastique et mécaniste a été développé sur cécidomyie des fleurs (Amouroux 2013). Il décrit i) la répartition spatio-temporelle des femelles qui arrivent dans le verger puis se déplacent au sein du verger en lien avec l'abondance, la phénologie et la distribution des inflorescences, ii) les pontes des femelles et le développement larvaire, iii) ainsi que l'efficacité d'interception des larves par piégeage. Toutefois il ne représente pas les infestations secondaires suite à l'émergence d'adultes dans le verger et ne prédit pas le niveau des dégâts sur les inflorescences. Dans le cadre des projets ModQual et COSAQ, un modèle d'interaction entre les mouches des fruits et les mangues, définissant la probabilité d'une mangue d'être infestée en fonction de son état de maturité, avait été développé et couplé au modèle de croissance et d'élaboration de la qualité des fruits (Grechi et al 2015). Il s'agit cependant d'une première version développée sur la base d'un jeu de données préliminaire. Par ailleurs aucun modèle de dynamique des mouches des fruits n'existe à l'échelle du verger.

➔ Les connaissances et les données sur l'effet du paillage et de l'enherbement du sol sur la régulation des cécidomyies des fleurs du manguier et de leurs dégâts sur inflorescence, acquises dans la cadre de l'activité 3 de la Tâche 1, seront utilisées pour la modélisation. Ces données seront utilisées pour intégrer les dégâts des cécidomyies des fleurs au modèle actuel, ainsi que l'effet des différentes modalités de couverture du sol sur l'émergence des adultes et l'infestation secondaire du verger par les multiplications locales du ravageur. Enfin, il s'agira de coupler le modèle de dynamique des cécidomyies de fleurs au modèle de culture du manguier. Les dynamiques d'apparition des inflorescences prédites par le modèle de culture seront utilisées comme variables d'entrées du modèle de cécidomyies de fleurs. Les dégâts sur inflorescences prédits par le modèle de cécidomyies de fleurs seront intégrés au modèle de culture pour prédire le rendement.

Les données acquises dans le cadre de l'activité 1 de la Tâche 1 ont été utilisées pour améliorer la calibration de la relation entre la probabilité d'une mangue d'être infestée et son état de maturité, apprécié par le paramètre de fluorescence Fv du fruit (Fig. 4). La relation qui existe entre ce paramètre de fluorescence et la teneur en éthylène du fruit, qui est

l'indicateur de maturité utilisé dans le modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue, permet de faire le lien entre les données expérimentales et le modèle. Sa calibration sera également améliorée par l'acquisition de données plus complètes et précises entre décembre 2017 et janvier 2018. Par ailleurs, si les analyses approfondies prévues dans la cadre de l'activité 1 de la Tâche 1 mettent en évidence une relation étroite entre le taux d'infestation des mangues par les mouches des fruits et l'abondance des mouches des fruits dans les vergers (appréciée par piégeage), l'effet de l'abondance de mouches sur ce risque d'infestation devra être inclus dans la relation.

Les données et les connaissances actuellement disponibles ne permettront vraisemblablement pas de développer un modèle de dynamique des mouches des fruits d'ici la fin du projet. L'abondance des mouches des fruits, si elle s'avère être un facteur important pour prédire le risque d'infestation des mangues par les mouches des fruits (cf. supra), sera considérée comme une variable d'entrée du modèle biotechnique.

- *Activité 3 : développement d'un modèle décisionnel*

Selon la démarche envisagée, le modèle biotechnique doit être couplé à un modèle décisionnel qui intègre des règles de décision pour les pratiques considérées dans le modèle biotechnique et les indicateurs de performances co-construits avec les acteurs. Ainsi les résultats d'une simulation sont à la fois les performances simulées et les choix techniques induits par l'itinéraire technique simulé.

➔ Le couplage d'un modèle décisionnel au modèle biotechnique s'appuiera sur les résultats acquis dans la Tâche 2. En particulier il intégrera les règles de décisions des producteurs préalablement identifiées dans la Tâche 2, ainsi que la formalisation de la grille d'indicateurs ayant conduit à la définition des seuils pour chaque variable et à la pondération globale de la grille.

Transferts et valorisations (Tâche 3 / Manguier)

Le modèle de culture du manguier a été développé dans le cadre du projet COSAQ et ne fait pas l'objet de valorisation au titre du projet Ecoverger. Toutefois il sera utilisé dans le cadre du projet Ecoverger pour développer le modèle biotechnique plante-bioagresseur-pratiques qui, à contrario, fera l'objet d'une valorisation au titre du projet Ecoverger.

Valorisations à paraître / prévus:

- 1 communication ou article scientifique sur le modèle biotechnique [soumission prévue début 2019]

❖ *Pêcher*

- *Activité 1 : modèle de dynamique de la sensibilité des fruits à la pourriture brune et 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. Les deux premiers modèles existent déjà, le troisième sera 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 SIR (Susceptible-Infected-Recovered) (Gilligan 2008) a été retenu comme cadre conceptuel de modélisation. Toutefois une adaptation aux spécificités de la pourriture brune est nécessaire.

➔ Dans le cadre du projet, l'approche basée sur les modèles compartimentaux qui sont largement utilisés en épidémiologie a été adaptée pour rendre compte des particularités de la maladie considérée. Le modèle qui a été adapté à la pourriture brune consiste en trois classes épidémiologiques et 8 paramètres (Fig. 11). La population de fruits a été structurée en trois catégories de fruits, les fruits Résistants, Sensibles et Infectés, sur lequel la maladie

se développe. Il s'agit d'une variante du modèle SIR classique pour laquelle l'état d'infection des fruits est considéré comme irréversible. L'évolution des fruits entre les classes 'Résistant' et 'Sensible' a été modélisée comme une fonction $g(t)$ de la surface de microfissures cuticulaires du fruit, elle-même modélisée comme une fonction de la trajectoire de croissance du fruit. Cette fonction représente la dynamique d'évolution de la sensibilité des fruits à la pourriture brune. Une expression originale du taux de reproduction de base a également été déterminée pour rendre compte explicitement du fait que la période de latence ne varie pas de façon périodique au cours du temps.

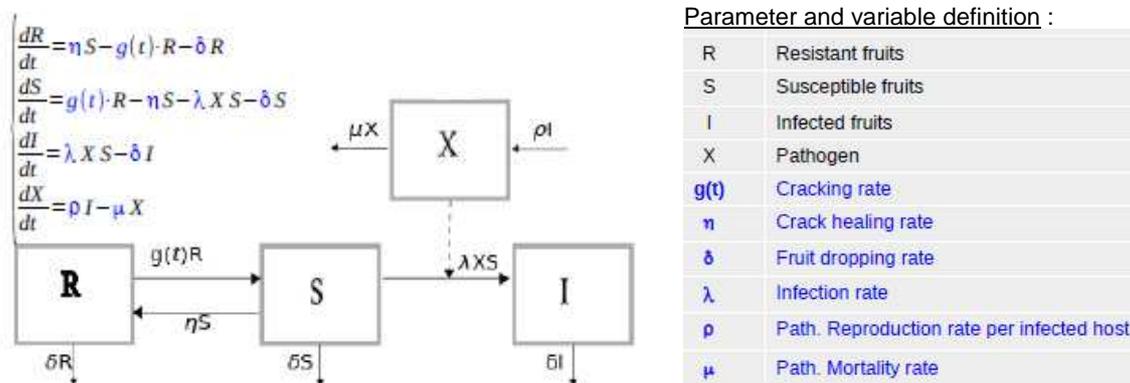


Fig. 11. Représentation schématique du modèle épidémiologique fruit-pourriture brune sur pêcher

Les conditions initiales du système et les paramètres du modèle ont été estimés à partir des données collectées sur une expérimentation menées dans le cadre du projet CLIF (cf. Tâche 1). Dans cette expérimentation les pêchers n'ont pas reçu de traitement fongicide et les conditions environnementales avaient permis le développement de la pourriture brune. Les trajectoires de progression de la maladie prédites par le modèle ont été comparées aux observations. Le taux de reproduction de base indique que les conditions environnementales étaient extrêmement favorables au développement de la maladie et que le modèle est capable de reproduire de façon satisfaisante la dynamique d'abondance des fruits dans chacun des trois compartiments épidémiologiques.

Le modèle permet par ailleurs d'identifier les mécanismes prépondérants dans le développement de la maladie et les pertes de récolte. Une analyse de sensibilité a été réalisée pour évaluer la sensibilité du rendement aux paramètres du modèle. L'effet des récoltes sanitaires (i.e., la destruction des brindilles et des fruits momifiés des saisons précédentes pendant l'hiver visant à éliminer les sources d'inoculum primaire du verger) et de l'éclaircissage (i.e., le contrôle de la charge en fruit de l'arbre visant à modifier la densité de fruits et la croissance individuelle des fruits) sur le développement de la maladie et sur le rendement a été évalué par simulation (Fig. 12).

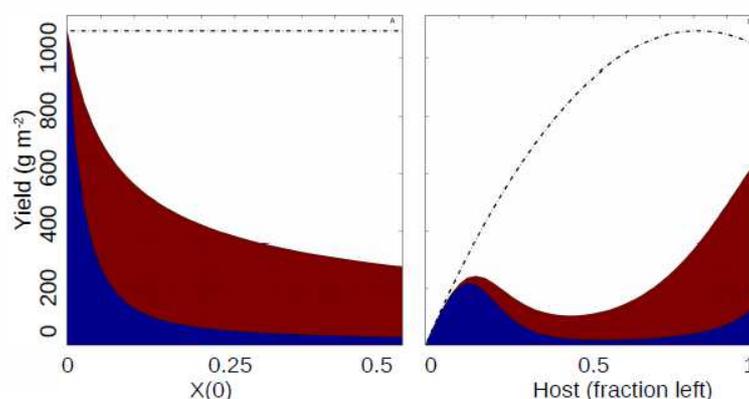


Fig. 12. Effet des récoltes sanitaires (via la modification de la densité de l'inoculum initial, $X(0)$) et de l'éclaircissage, correspondant à la proportion de fruits laissés sur l'arbre (fraction left of Host), sur le rendement composé des fruits résistants (bleu) et des fruits sensibles (rouge).

La ligne en pointillé représente le rendement potentiel en l'absence de maladie et la zone blanche (entre la ligne pointillée et la zone rouge) représente les pertes en rendement dues à la pourriture brune.

Pour ce faire, les pratiques ont été simulées en modifiant l'état initial du système (modification de l'inoculum du pathogène et du nombre initial de fruits). Il a ainsi été montré que la récolte et la destruction des fruits infectés pendant la période de croissance et de maturation des fruits, les récoltes sanitaires en hiver, et le contrôle de la charge en fruits des arbres pouvaient contrôler l'incidence de la pourriture brune, en association avec ou à la place de fongicides.

Les résultats et les connaissances acquises dans les Tâches 1 et 3 ont par ailleurs indiqué que les conditions environnementales étaient susceptibles de jouer un rôle important dans le développement de la pourriture brune. Dès lors, il est envisagé de considérer l'effet de la température de l'air et de l'humidité sur la progression de la pourriture brune dans le verger.

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

Les courbes de croissance des fruits utilisées comme entrée du modèle épidémiologique ont été directement reconstruites à partir des poids des fruits observés. Une prochaine étape vise à coupler (ou a minima faire communiquer) le modèle QualiTree et le modèle épidémiologique.

➔ Le modèle QualiTree intègre déjà l'effet de pratiques culturales, et en particulier l'effet de l'éclaircissage, sur la croissance individuelle des fruits et l'élaboration de leur qualité. Il est ainsi capable de générer les courbes de croissance individuelle des fruits au sein d'un arbre en réponse à différentes pratiques. Ces courbes pourront alors être utilisées comme entrées du modèle épidémiologique. Le modèle épidémiologique indiquera alors les pertes en rendement associées aux fruits simulés, exprimées en nombre de fruits infectés. Ces pertes seront déduites du rendement potentiel prédit par le modèle QualiTree pour prédire le rendement réalisé en réponse aux pratiques testées par simulation.

Transferts et valorisations (Tâche 3 / Pêcher)

- 2 communications à des colloques internationaux:
 - Bevacqua et al. (2016). « A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in stone fruits orchard ». V International Symposium on Models for Plant Growth, Environment Control and Farming Management in Protected Cultivation. 19-22 September 2016, Avignon, France [ref. 6]
 - Bevacqua et al. (2016). « A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in stone fruits orchard ». Plant Biology Europe EPSO/FESPB. 26-30 June 2016, Prague, Czech Republic [ref. 7]

Valorisations à paraître / prévues:

- 1 article scientifique : « A model for temporal dynamics of brown rot spreading in stone fruit orchards ». [Bevacqua et al., soumis à Phytopathology - révision en cours]
- 2 communications à des colloques internationaux:
 - Bevacqua et al. « A model for temporal dynamics of brown rot spreading in fruit orchards ». The international society for the ecological modelling. Global Conference. 17-21 September 2017, Jeju, Southern Korea [communication acceptée]
 - Bevacqua et al. « An epidemiological model for brown rot build up in stone fruit orchards ». XXVII Congresso Società Italiana Ecologia. 12-15 September 2017, Napoli, Italy [communication acceptée]

Tâche 4-Conception.

Les attendus de cette tâche sont d'ordres méthodologiques et appliqués. D'un point de vue appliqué, elle vise à développer un outil de dialogue entre acteurs et 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 (i.e. satisfaisant des compromis entre les indicateurs de performance définis selon les conditions,

les objectifs et les contraintes spécifiques aux producteurs). Un autre attendu et challenge d'ordre méthodologique de cette tâche est le développement d'algorithmes d'optimisation multicritères efficaces et adaptés aux besoins du projet.

➔ Le cadre de modélisation issue de la Tâche 3 sera couplé à des algorithmes d'optimisation multicritères ce qui permettra d'identifier, par exploration de l'espace de décision, les itinéraires techniques (sub-)optimaux en regard de contraintes et d'objectifs fixés, et co-définis avec les producteurs dans le cadre de la Tâche 2. Une contrainte de cette tâche est qu'elle est dépendante de l'avancement des tâches précédentes pour sa mise en œuvre puisqu'elle nécessite de disposer d'un cadre de modélisation.

La Tâche 4 sera engagée d'ici la fin de l'année 2017 sur le modèle pêcher, pour lequel un cadre de modélisation relativement finalisé est d'ores et déjà disponible. Il s'agira d'identifier les modalités d'application pour les pratiques culturales ciblées dans le projet (ou indirectement la valeur des paramètres ou variables initiales du modèle qu'elles affectent) qui permettent d'atteindre les objectifs fixés ou un compromis entre ces objectifs. Ceci permettra de définir des « profils candidats » d'itinéraires techniques. La démarche et les résultats seront révisés au fur et à mesure de l'intégration des résultats de la Tâche 2 dans le modèle biotechnique et décisionnel.

Cette même démarche est envisagée sur manguier mais elle ne pourra pas être engagée avant le second semestre 2018 puisque le cadre de modélisation n'est pas encore disponible.

Il a été envisagée que les solutions candidates obtenues soient restituées auprès des acteurs ayant participé à leur co-conception dans le cadre d'un atelier. Sur manguier, il sera possible de s'appuyer sur le réseau de producteurs déjà constitué dans le cadre de la Tâche 2 et ayant déjà participé à la co-conception de la grille d'indicateurs de performance. Sur pêcher, la réalisation de cette restitution dépendra de la capacité à mobiliser un réseau d'acteur dans le cadre de la Tâche 2 qui va être engagée cette année.

Transferts et valorisations (Tâche 4)

Valorisations à paraître / prévus:

- 1 atelier de restitution des « profils candidats » d'itinéraires techniques obtenus *in silico* [prévu fin 2018 ou début 2019]

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 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 leurs compétences respectives et a fait l'objet de plusieurs présentations :

- Présentation générale des projets Ecoverger et RegPuc
- Présentation de la Tâche 1 : activités sur manguier à HortSys et sur pêcher à PSH
- Présentation de la Tâche 2 : démarche développée à HortSys
- Présentation de la Tâche 3 : modèles et activités de modélisation sur manguier à HortSys et sur pêcher à PSH
- Présentation de la Tâche 4 : démarche et outils développés à PSH (présentation reportée au 15 mars 2016)
- Discussion générale

Réunion annuelle n°2

La réunion de mi-parcours du projet 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 du projet pour chacun des deux modèles biologiques et a fait l'objet de plusieurs présentations:

- Présentation synthétique de l'ensemble des activités et résultats acquis en 2016 et perspectives 2017
- Focus sur la Tâche 2 (« Les exploitations productrices de mangues à La Réunion - les pratiques et leurs déterminants »)
- Focus sur la Tâche 3 (« Modèle épidémiologique plante-moniliose »)
- Discussion générale

Cette réunion a aussi été l'occasion d'aborder plusieurs points divers tels que le partage des approches entre les modèles biologiques (cas de la Tâche 2), l'articulation entre les Tâches, les interactions et synergies avec le projet RegPuc sur Pêcher, la stratégie de diffusion des livrables, la planification des missions d'appui, etc

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

- Affectation d'Alain Ratnadass à la Réunion en septembre 2015. Alain Ratnadass est un chercheur en entomologie du Cirad (UPR HortSys). Il a été intégré au consortium du projet et intervient sur l'activité 3 de la Tâche 1 sur 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 & INRIA Virtual Plants). Pendant son séjour il a largement contribué au développement du modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue qui sera utilisé dans le cadre du projet Ecoverger.
- Mission Montpellier-Réunion de Laurent Parrot (du 23 au 27 mai 2016) pour le co-encadrement d'un stage au titre de la Tâche 2
- 5 stages de fin d'étude ou de césure (réalisés ou en cours) dont 2 financés à 100% sur Ecoverger et 3 avec co-financement Ecoverger/COSAQ
- Diffusion du projet Ecoverger auprès de scientifiques et d'acteurs du monde agricole réunionnais via l'école-chercheurs « *L'agroécologie à la croisée des disciplines scientifiques* » organisée par le Cirad et Montpellier SupAgro dans le cadre du projet PARMI du 28 novembre au 2 décembre 2016 à la Réunion. L'objectif de cette école-chercheurs était d'aider les chercheurs à comprendre les différentes acceptations de l'agroécologie ainsi que les déplacements disciplinaires induits par ce concept. Elle s'est appuyée sur des expériences de terrain très diversifiées de l'île de la Réunion dont un portant sur le système mangue. Le projet Ecoverger a été présenté comme cas d'étude au titre du terrain 'Mangue'. Cette diffusion a été formalisée à travers deux supports :
 - 1 fiche de présentation du terrain Mangues [ref. 8].
 - 1 vidéo de présentation du terrain Mangues (« *La mangue la culture de compromis* ») [ref. 9]
- Constitution d'un collectif restreint de 6 producteurs de mangue à même de travailler au sein du projet autour de la conception de systèmes innovants
- 1 page web de présentation du projet avec diffusion des livrables : <http://cosaq.cirad.fr/projets/ecoverger>
- 4 articles scientifiques soumis, 6 participations à des congrès internationaux (réalisées ou acceptées), 1 rapport de stage, 2 comptes rendus synthétiques d'activités à destination des producteurs, 1 atelier de restitution auprès de producteurs

Liste détaillée des documents à vocation de transfert ou valorisation scientifique :

- [ref.1] Ratnadass A., Grechi I., Caillat A., Preterre A.-L., Normand F., Graindorge R. (2017) Effects of some cultural practices on mango inflorescence and fruit pest infestation and damage in Reunion island: recent progress, on-going studies and future steps. XII International Mango Symposium, 10-16 July 2017, Baise, Chine.
- [ref.2] Preterre A.-L., Grechi I., Ratnadass A. (2017) Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers – site 2. Cirad, 8p. [a]
Preterre A.-L., Grechi I., Ratnadass A. (2017) Evaluation des dynamiques des mouches des fruits, d'abondance/maturation des mangues et des niveaux d'infestation des fruits en vergers de manguiers – site 3. Cirad, 8p. [b]
- [ref.3] Persello S., Grechi I., Boudon F., Normand F. (2017). How different pruning intensities and severities affect vegetative growth processes in “Cogshall” mango trees. XII International Mango Symposium, 10-16 July 2017, Baise, Chine.
- [ref.4] Marchetti M. (2016). Analyse systémique des exploitations productrices de mangues à La Réunion : identification des déterminants influençant les choix techniques et les changements de pratiques des producteurs pour la co-conception d'itinéraires techniques innovants apportant une alternative aux pesticides - Mémoire de Master 2, ISTOM/CIRAD Réunion: 98 p.
- [ref.5] Marchetti M. (2016). Analyse systémique des exploitations productrices de mangues à La Réunion : identification des déterminants influençant les choix techniques et les changements de pratiques des producteurs pour la co-conception d'itinéraires techniques innovants apportant une alternative aux pesticides – Présentation synthétique des types d'exploitation - Mémoire de Master 2, ISTOM/CIRAD Réunion: 7 p.
- [ref.6] Bevacqua D., Génard M., Turion-Quilot B., Oliveira Lino L., Mercier V., Lescourret F. (2016). A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in stone fruits orchard. V International Symposium on Models for Plant Growth, Environment Control and Farming Management in Protected Cultivation. 19-22 September 2016, Avignon, France
- [ref.7] Bevacqua D., Génard M., Turion-Quilot B., Oliveira Lino L., Mercier V., Lescourret F., Bolzoni L. (2016). A compartmental epidemiological model for brown rot spreading in stone fruits orchard. Plant Biology Europe EPSO/FESPB. 26-30 June 2016, Prague, Czech Republic

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.
- Armeflhor (2015a). COMPTE RENDU D'ESSAI. Efficacité du bâchage du sol au niveau du rang contre la cécidomyie des fleurs du manguier. CEMAN_0415. 25p
- Armeflhor (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.
- 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 papaya fruits on the egg-laying preference of *Bactrocera invadens* (Tephritidae: Diptera). Fruits 68: 507-516.
- 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. (2017). Effect of source-sink relationships from the branch to the tree scale on mango fruit size and quality at harvest. XII International Mango Symposium. 10-16 July 2017, Baise, Chine.
- 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 September-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.
- 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.
- 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.
- 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 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 EXPE EcoPêche (réseau DEPHY 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).

Tableau 1 : Liste des livrables par tâche

T0 - Coordination	
1	Réunion annuelle 1 : lancement du projet
2	Réunion annuelle 2 : évaluation critique des résultats acquis et réajustement des activités si besoin
3	Rapport intermédiaire sur l'avancement du projet
4	Réunion annuelle 3 : évaluation critique des résultats acquis et réajustement des activités si besoin
5	Rapport final sur le déroulement et les résultats du projet
T1 – Fonctionnement biotechnique	
1	Revue bibliographique sur manguier (a) et pêcher (b)
2	Rapport sur la relation mangue-mouche des fruits en lien avec l'état de maturité du fruit et la date de récolte
3	Rapport sur l'effet de pratiques (irrigation et taille) sur la phénologie du manguier
4	Rapport sur l'effet de pratiques (paillage) sur la dynamique et les dégâts des cécidomyies des fleurs
5	Rapport sur l'effet de pratiques (irrigation et taille) sur la croissance des fruits sur pêcher
6	Rapport sur l'effet de pratiques (récolte des fruits infestés) sur l'inoculum et la dynamique de la moniliose
7	Rapport sur la relation pêche-moniliose sous l'effet de pratiques
8	Fiches techniques et/ou articles de vulgarisation sur manguier (a) et sur pêcher (b)
9	Publication scientifique sur manguier (a) et sur pêcher (b)
T2 – Déterminants des pratiques & indicateurs	
1	Typologie des pratiques sur manguier (a) et pêcher (b)
2	Typologie des profils stratégiques des producteurs sur manguier (a) et pêcher (b)
3	Jeu d'indicateurs d'évaluation des performances des itinéraires techniques sur manguier (a) et pêcher (b)
4	Fiches techniques et/ou articles de vulgarisation sur manguier (a) et sur pêcher (b)
5	Publication scientifique sur manguier (a) et sur pêcher (b)
T3 – Modélisation	
1	Modèle QualiTree-mango (modèle QualiTree adapté au manguier) : version préliminaire
2	Modèle Virtual Mango de développement végétatif et reproducteur du manguier : version préliminaire
3	Modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue : couplage des deux versions préliminaires
4	Modèles de dynamique des bioagresseurs (cécidomyies des fleurs et mouches des fruits) sur manguier
5	Modèle de dynamique de la sensibilité des fruits à la moniliose sur pêcher
6	Modèle épidémiologique fruit-moniliose sur pêcher
7	Modèle décisionnel sur manguier (a) et sur pêcher (b)
8	Publication scientifique sur le modèle biotechnique sur manguier (a) et sur pêcher (b)
T4 – Conception	
1	Adaptation et/ou développement des algorithmes d'optimisation multicritère intégrant le domaine de décision et les indicateurs de performances spécifiques au manguier (a) et au pêcher (b)
2	Mise à l'épreuve du cadre de modélisation pour la conception d'itinéraires techniques candidats en vergers de manguier (a) et de pêcher (b)
3	Atelier de restitution des profils candidats d'itinéraires techniques obtenus sur manguier (a) et pêcher (b)