



Mémoire de Fin d'Etudes

**Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)
Parcours : Qualité des productions spécialisées (QPS)**

Année universitaire 2017-2018

**Effets des pratiques économes en produits phytosanitaires et en intrants
sur l'élaboration de la qualité des fruits et leur sensibilité aux monilioses
en pré et post-récolte dans les vergers de pêche-nectarine**

Par : Khouloud AHMADI

Soutenu à Angers le : 17/09/2018

Maître de stage : Daniel PLENET



Mémoire de Fin d'Etudes

**Master 2 Mention Biologie Végétale (BV)
Parcours : Qualité des productions spécialisées (QPS)**

Année universitaire 2017-2018

**Effets des pratiques économes en produits phytosanitaires et en intrants
sur l'élaboration de la qualité des fruits et leurs sensibilités aux
monilioses en pré et post-récolte dans les vergers de pêche-nectarine**

Par : Khoulood AHMADI

Soutenu à Angers le : 17/09/2018

Maître de stage : Daniel PLENET



ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné(e) Khouloud AHAMDI, déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire.

Signature :

Khouloud AHAMDI

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier Madame Hélène GAUTIER, qui m'avait donnée l'opportunité d'effectuer mon stage au sein de l'unité Plantes et Systèmes de Culture Horticoles (INRA-PSH).

Je remercie également le GIS Fruits d'avoir financ e le stage.

Je tiens à remercier vivement mon maitre de stage, Monsieur Daniel PLENET, pour son accueil, le temps pass e ensemble et le partage de son expertise au quotidien. Aussi je le remercie pour son aide dans la rédaction de ce rapport.

Je voudrais bien évidemment remercier, Monsieur Mickeal DELAIRE, mon tuteur de stage, pour m'avoir guidée et conseillée durant la rédaction de ce rapport.

Merci   Monsieur Michel GENARD, et Monsieur Gilles VERCAMBRE d'avoir répondu à mes questions durant ce stage, Monsieur Mohamed MEMMAH de m'avoir consacr e du temps pour m'apprendre à manipuler le logiciel R.

Plus précisément, je remercie Mathieu GALES, pour son aide et pour sa patience, notamment dans la longue tâche de prise de mesures.

Je remercie également toute l'équipe PSH pour leur accueil, leur esprit d'équipe, et leur bonne ambiance.

Enfin un grand merci à ma famille, pour leur soutien et leur sacrifice qui m'ont permis de réaliser mon projet du master en France.

Merci Imen et Insaf, toujours présentes malgré la grande distance qui nous sépare.

Et surtout, merci Ahref.

Sommaire

Introduction	1
PARTIE 1. : Etat des connaissances et problématique	5
I. Vers des systèmes de culture innovants et durables :.....	5
I.1 La conception des systèmes de culture	5
I.2 La mise en œuvre d'un système de culture	5
I.3 Evaluation multicritères d'un système de culture.....	6
II. Le projet « EcoPêche » : une expérimentation système en vergers de pêcher	7
II.1 Les objectifs d'Ecopêche.....	7
II.2 Les leviers d'actions mobilisés pour diminuer les intrants et les produits phytosanitaires d'un système de culture économe en IFT : projet Ecopêche.....	7
III. Caractéristiques biologique et physiologiques du Pêcher.....	8
III.1 Caractéristique de l'arbre	8
III.2 Structure, développement et maturité du fruit	8
III.3 Ravageurs et maladies du pêcher :.....	9
III.3.1 Les principaux bioagresseurs	9
III.3.2 Le cas des monilioses et les leviers d'action pour les contrôler	10
III.3.3 La qualité des pêches et nectarines	11
PARTIE 2. Matériel et méthodes.....	13
I. Description de l'essai système du site INRA Avignon	13
II. Itinéraires techniques EcoPêche, INRA Avignon2018	13
III. Caractérisation des indicateurs de performances.....	14
III.1. Méthodes d'analyse des indicateurs.....	14
PARTIE 3. Résultats	16
I. Effet des pratiques sur les performances des systèmes	16
I.1. Bilan des pratiques.....	16
I.2 Croissance végétative.....	17
I.2.1 Croissance des arbres	17
I.2.2 Croissance des pousses et nombre des feuilles.....	17
I.2.3 Croissance des fruits	17
I.3 Etat sanitaire des vergers	17
I.4 La tenue des fruits en conservation	19
I.5 Analyse multicritère des performances.....	19
II. Analyse de l'essai factoriel sur l'élaboration de la qualité des fruits et sur la sensibilité aux maladies de conservation	20
II.1 Effets sur l'élaboration de la qualité des fruits	20
II.2 Effets sur la sensibilité des fruits aux maladies de conservation	20
II.2.1 Dégâts Monilia en pré-récolte	20
II.2.2 Dégâts Monilia en post-récolte	21

PARTIE 4. Discussion	22
I. Effet des systèmes économes sur les performances technico-économiques et la qualité des fruits	22
I.1. Effet des systèmes économes sur les performances.....	22
I.2 Effet des systèmes économes sur la qualité des fruits.....	24
II. Effets des facteurs irrigation et charge en fruits sur la qualité des fruits et la sensibilité aux maladies de conservation	24
II.1 Effets sur la qualité des fruits.....	24
II.2 Effets sur la sensibilité aux maladies de conservation.....	26
Conclusion.....	27
Bibliographie.....	28

Liste des Annexes

ANNEXE I	I
ANNEXE II.....	II
ANNEXE III	III
ANNEXE IV.....	IV
ANNEXE V	V

Liste des Tableaux

- Tableau 1** : Les leviers d’actions mobilisés pour diminuer les intrants et les produits phytosanitaires d’un système de culture économe en IFT.....
- Tableau 2** : Les bio-agresseurs communs de pêche, dégâts économiques et les stratégies de protection (Lichou et *al.*, 2001).
- Tableau 3** : Description des systèmes de culture du site d'Avignon : essai avec la variété NECTASWEET[®] Nectarlove (cov).....
- Tableau 4** : Principales interventions sur EcoPêche Inra Domaine Saint Paul en 2018
- Tableau 5** : Différentes modalités expérimentales de l’essai factoriel imbriqué au sein des systèmes de culture... ..
- Tableau 6** : Les indicateurs de performances choisis pour l’analyse et l’évaluation de l’expérimentation.
- Tableau 7** : Variables mesurées pour calculer les indicateurs de performance de l’expérimentation.
- Tableau 8** : Eléments du bilan hydrique sur les différents systèmes de culture du site Inra Avignon pour la période du 1/04/2018 au 31/07/2018. Les pourcentages de réduction d’irrigation sont calculés par rapport à S1-REF.....
- Tableau 9** : Nombre de fruits et poids moyen d’un fruit INRA Avignon 2018 (moyenne ± erreur standard)
- Tableau 10** : Tableau des indicateurs de performances des systèmes de culture Ecopêche, INRA Avignon 2018 campagne 2016) En vert les objectifs atteints et en rouge les objectifs supérieurs au seuil.....

Liste des Figures

- Figure 1:** Les différentes évaluations possibles dans un système de culture (Havard *et al.*, 2017).
- Figure 2:** Variations de volume (V) et de poids frais (FW) durant les différents stades de développement et de maturation des pêches pour deux années successives (2007-2008) (Lombardo *et al.*, 2011)
- Figure 3:** Résumé des principaux stades du cycle de vie de *M. laxa* au verger (Oliveira Lino, 2016).....
- Figure 4:** Les différentes étapes physiologiques entre la synthèse des sucres dans les feuilles comme organe source et son accumulation dans les fruits comme organe puits pour leur croissance et développement. (Apo ; apoplaste, Cyt; cytoplasme, Vac; vacuole) (Yamaki, 2010).
- Figure 5:** les processus métaboliques clés au cours de la première phase du développement du fruit de la pêche (Lombardo *et al.*, 2011).....
- Figure 6:** Plan du dispositif de l'expérimentation EcoPêche du site Inra UR PSH à Avignon.....
- Figure 7:** Bilan des pratiques de protection (IFT) et de fertilisation Ecopêche, INRA Avignon 2018.....
- Figure 8:** Bilan hydrique et quantités d'eau apportées par l'irrigation sur les 3 systèmes (S1 à S3), Inra d'Avignon 2018.
- Figure 9:** Potentiel hydrique des tiges mesuré au midi solaire sur les différentes modalités de l'expérimentation factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018. Le nombre de répétitions (n=3) permet des mesures sur une plage horaire restreinte (2 heures). Les différenciations effectives d'irrigation ont débuté le 20 juin ce qui explique le démarrage des mesures le 27/06 sur les modalités M3 et M4 (irrigation à 50% de Kc.ETP) par rapport aux modalités M1 et M2 (irrigation à 100%). M1 et M3 : 400 fruits/arbre ; M2 et M4 : charge de 200 fruits/arbre
- Figure 10:** Croissances des troncs mesurés entre janvier et fin juillet 2018 sur les 3 systèmes de l'expérimentation et sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018 (n=12 arbres).
- Figure 11:** Cinétiques de croissance diamétrale des fruits sur 3 systèmes de culture de l'expérimentation de l'essai système Inra Avignon 2018.
- Figure 12:** Dégâts observés et présence de bioagresseurs sur les différents systèmes aux dates où les symptômes étaient à leurs maximums, Ecopêche, INRA Avignon 2018.....
- Figure 13:** Pourcentage cumulé de fruits « pourris » pendant 15 jours de conservation à 20°C, Ecopêche, INRA. Fruits prélevés lors de la cueille n° 2 (18 juillet 2018).....
- Figure 14:** Diamètre des fruits à maturité sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018 : résultats présentés par facteur en regroupant les données des différentes modalités du fait de l'absence d'interaction.....
- Figure 15:** Rendement commercialisé (t/ha), Calibre A *et plus*, distribution des calibres, et indice réfractométrique (% Brix) sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018.....
- Figure 16:** Pourcentage de dégâts liés aux Monilioses au verger sur les différentes modalités de l'essai factoriel (100% irrigation vs 50% irrigation ; 400 fruits vs 200 fruits) à la date où les symptômes étaient à leur maximum, Ecopêche, INRA Avignon 2018.
- Figure 17:** Pourcentages de dégâts liés au *Monilia* en conservation, sur les différentes modalités de l'essai factoriel (M1=100% irrigation, 400 fruits ; M2= 100% irrigation, 200 fruits ; M3= 50% irrigation, 400 fruits ; M4= 50% irrigation, 200 fruits). Système S1 (figure de gauche) et Système S2 (figure de droite). Fruits prélevés lors de la 1^{ère} (R1) et 2^{ème} récolte (R2). Ecopêche, INRA Avignon 2018. (60 fruits/modalité).....

Liste des Abréviations

Agreste : Service de la statistique et de la prospective du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

GIS Fruits : Groupement d'Intérêt Scientifique Fruits

IFT : Indice de Fréquence

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

IR : Indice Réfractométrique

PSH : Plantes et Systèmes de Culture Horticoles

SdC : Système de Culture

RGA : Recensement Général Agricole

S1-M1 : Système 1, la modalité à 100% d'irrigation et 400 fruits de charge

S1-M2 : Système 1, la modalité à 100% d'irrigation et 200 fruits de charge

S1-M3 : Système 1, la modalité à 50% d'irrigation et 400 fruits de charge

S1-M4 : Système 1, la modalité à 50% d'irrigation et 200 fruits de charge

S1-REF : Système 1 de Référence

S2-ECO1 : Système 2 Econome en intrants et en produits phytosanitaires 1

S2-M1 : Système 2, la modalité à 100% d'irrigation et 400 fruits de charge

S2-M2 : Système 2, la modalité à 100% d'irrigation et 200 fruits de charge

S2-M3 : Système 2, la modalité à 50% d'irrigation et 400 fruits de charge

S2-M4 : Système 2, la modalité à 50% d'irrigation et 200 fruits de charge

S3-ECO2 : Système 3 Econome en intrants et en produits phytosanitaires 2

Introduction

Les fruits à noyau sont importants dans l'économie agricole de nombreux pays. La production de pêche fait partie des dix plus grandes productions mondiales de fruits (FAO, 2016) avec une production mondiale de pêches et nectarines comprise entre 21,8 millions de tonne (Mt) en 2013 et 25,0 Mt en 2016. La France est le 10^e pays producteur dans le monde et la pêche est le 5^e fruit le plus consommé dans le pays.

La filière pêche-nectarine est dans une situation économique difficile du fait de coûts de production importants liés aux investissements et aux temps de travaux que les niveaux de rémunération des fruits obtenus lors de leurs commercialisations sur des marchés très concurrentiels ont du mal à compenser. Cette forte concurrence avec des pays à faible coût de production du fait d'une main d'œuvre moins chère qu'en France, ainsi que les plans d'arrachage de vergers mis en place pour lutter contre l'extension de certaines maladies (sharka, xanthomonas...) ont conduit à une réduction de 42% de la surface cultivée en pêcher sur la période 2000-2010 (RGA : 24 605 ha en 2000 ; 14 324 ha en 2010, source Agreste), déclin qui se poursuit puisque les surfaces en 2016 étaient de 9 200 ha. La poursuite d'une perte de compétitivité pourrait conduire à des volumes de production insuffisants pour permettre à la filière de maintenir son dispositif de recherche- développement garantissant le progrès technique et ses structures logistiques nécessaires à la gestion de la production. Pour essayer de lutter contre cette perte de compétitivité, les producteurs ont été de plus en plus contraints à rechercher une productivité importante afin de compenser les coûts de la main d'œuvre, tout en obtenant une bonne qualité commerciale comme l'indique la base de données technico-économiques EFI pêche (Plénet et *al.*, 2009). Parallèlement, la filière a été confrontée à une érosion de la consommation des pêches-nectarines en partie liée à l'insatisfaction du consommateur sur la qualité gustative du fruit. Ces dernières années, la filière s'est engagée dans une stratégie visant à proposer des fruits sains et de haute qualité afin que les consommateurs renouvellent leurs actes d'achat.

Mais pour arriver à ces objectifs, il faut trouver des solutions aux différentes contraintes de la production des pêches, les vergers de pêche-nectarine nécessitent un nombre relativement important de traitements phytosanitaires afin de gérer de nombreux ravageurs et maladies. Les Indices de Fréquences de Traitements (IFT) se situaient en moyenne à 17,24 et le 70e percentile était de 21,4 en 2012 pour des modes de production conventionnels (Crétin et Triquenot, 2018) avec d'importantes variations selon les groupes variétaux (variété précoce, de saison ou tardive), les régions, les années climatiques, etc. Dans ce contexte, l'objectif d'une réduction de 50% des IFT comme annoncé par le plan Ecophyto français, apparaît comme véritable défi, d'autant plus que sur cette espèce fruitière le levier d'action lié au contrôle génétique (variétés résistantes ou tolérantes aux bioagresseurs) est actuellement pratiquement inexistant, alors que les maladies, en particulier les maladies de conservation des fruits (monilioses) sont considérés comme le principal frein au développement de systèmes économes en produits phytopharmaceutiques. Ces maladies peuvent générer des pertes de rendement commercialisable comprises entre 10 et 30 %, parfois plus dans des conditions climatiques difficiles, pour des variétés tardives ou des systèmes sans pesticides de synthèse. De plus, la préservation de la rentabilité économique de cette production, dans un contexte très concurrentiel, limite les marges de manœuvre aux niveau des exploitations agricoles quant aux leviers d'action réellement mobilisables, surtout s'ils génèrent des surcouts importants (investissement en matériel, temps de travaux,...) (Cotte et *al.*, 2009).

Pour répondre aux exigences du plan Ecophyto, il est nécessaire de développer des systèmes de culture conciliant performance économique, qualité et efficacité écologique (Plénet et *al.*, 2010). Cela passe par la conception, le test et l'adoption de systèmes de culture innovants permettant de répondre à ces enjeux (Reau et Doré, 2008). Le dispositif DEPHY du plan Ecophyto a été mis en œuvre pour documenter et accompagner cette transition avec comme objectif d'éprouver, de valoriser et de déployer les techniques et systèmes agricoles économes en produits phytopharmaceutiques. Le projet Ecopêche (2013-2018) qui s'inscrit dans le volet EXPE du dispositif DEPHY Ecophyto, vise à « concevoir, évaluer et transférer les bases de systèmes de culture innovants de vergers de pêche-nectarine conciliant une réduction importante des produits phytosanitaires et des intrants, l'obtention de fruits de haute qualité et des performances technico-économiques assurant la durabilité des exploitations agricoles ». A cette fin, des expérimentations « systèmes de culture » ont été implantées dans sept sites en partenariat avec 7 organismes.

Un des dispositifs a été installé sur le domaine expérimental Saint Paul à l'INRA d'Avignon avec une plantation du verger en février 2013. En plus d'apporter des réponses opérationnelles aux objectifs d'Ecophyto, ce dispositif sert de support à certaines questions de recherche développées par l'Unité Plantes et Systèmes de culture horticoles (PSH), en particulier la modélisation du fonctionnement des arbres fruitiers et de l'élaboration de la qualité des fruits sous l'influence des pratiques culturales (comme exemple le modèle QUALITREE, Lescourret *et al.*, 2011).

A ce titre, dans le cadre d'un projet d'une thèse CIFRE (2018-2020) définie en partenariat entre le CTIFL, l'Université d'Avignon et l'INRA PSH, réunis au sein de l'Unité Mixte Technologique IQUAR, il est projeté de coupler au modèle Qualitree, un modèle épidémiologique des monilioses afin de pouvoir prédire, en plus du rendement et de la qualité des fruits, les risques de dégâts liés aux maladies de conservation en fonction des conditions climatiques et des pratiques culturales. Les prédictions « pré-récolte » pourraient servir à orienter les lots commerciaux entre différentes stratégies de gestion de la phase post-récolte (différentes modalités de traitements en post-récolte). Pour développer et paramétrer le modèle complet, une expérimentation factorielle a été incluse à l'expérimentation système EcoPêche en 2018, sur les systèmes qui ont les mêmes paramètres (densité de plantation, architecture de l'arbre...). Elle a pour objectif de tester et confirmer les effets des facteurs charge en fruits et irrigation sur la croissance et l'élaboration de la qualité des fruits et sur leurs impacts sur la sensibilité des fruits aux monilioses.

Mon stage soutenu par le GIS Fruits s'inscrit dans ce contexte. Les questions de recherche étant nombreuses, nous avons recentré les objectifs du stage autour de **deux problématiques**.

- **Evaluer la performance de systèmes de culture économes en produits phytopharmaceutiques** expérimentés sur le site de l'Inra Avignon au cours de la campagne culturale 2018. L'objectif est de répondre à la question « est-ce que les systèmes économes en pesticides, définis comme une combinaison cohérente de différents leviers d'action, permettent d'atteindre les objectifs de multi-performances visés ? ».

- **Analyser l'effet des techniques de gestion de la charge en fruits et de l'irrigation** sur l'élaboration de la qualité des fruits (calibre et teneur en sucres des fruits en particulier), ainsi que sur la sensibilité aux maladies de conservation. L'objectif est de confirmer les hypothèses de l'action de ces techniques et de constituer un jeu de données permettant de paramétrer le modèle qui va être développé suite à ces travaux expérimentaux. Cette analyse repose sur une bonne compréhension des interactions entre les sources et les puits d'assimilats carbonés et du statut hydrique des arbres.

Pour cette étude, nous avons dans un premier temps réalisé une synthèse bibliographique sur la culture du pêcher, la méthodologie des expérimentations systèmes de culture en insistant sur le cas du dispositif EcoPêche de l'Inra Avignon, et l'élaboration de la qualité des fruits en interaction avec certaines pratiques culturales et leur influence sur les relations entre les sources et les puits d'assimilats carbonés et le statut hydrique des arbres.

PARTIE 1. : Etat des connaissances et problématique

I. Vers des systèmes de culture innovants et durables :

I.1 La conception des systèmes de culture

Le système de culture (SdC), initialement défini par Sebillotte (1990), peut se définir comme l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur une ou plusieurs parcelles gérées de manière identique au fil des années. Chaque système de culture est caractérisé par la nature des cultures et, le cas échéant, leur ordre de succession, les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures et les éléments structurels associés (matériel végétal, densité de plantation, équipements avec les abris, le palissage, le système d'irrigation...).

La co-conception de systèmes de culture mobilise une démarche reposant sur différentes étapes interdépendantes qui s'insèrent dans un processus itératif. Elle commence par le diagnostic agronomique et environnemental du système de culture initial et du contexte socio-économique de l'exploitation. L'étape de co-conception vise à imaginer et définir différents systèmes alternatifs en tenant compte des contraintes et des moyens dont dispose l'agriculteur (Havard et *al.*, 2017). Certains de ces nouveaux systèmes sont ensuite mis en œuvre de manière opérationnelle pour évaluer leur faisabilité technique, leur capacité à atteindre les résultats techniques et économiques qui leur sont assignés et leur performance globale par rapport aux critères de la durabilité. Enfin, il s'agit d'assurer leur transfert et d'accompagner les producteurs dans la transition vers des systèmes de culture économes en intrants et vers l'agro-écologie (Plénet et Simon, 2015). La démarche va mobiliser différentes compétences et connaissances, ainsi que des méthodologies et des outils variés (Plénet et Simon, 2015).

I.2 La mise en œuvre d'un système de culture

La mise en œuvre des nouveaux SdC peut se faire directement dans les conditions des exploitations agricoles (parcelles de producteurs). Elle permet à l'agriculteur d'adopter à son rythme les innovations qu'il juge les plus adaptées à ses objectifs de production (Mischler et *al.*, 2008). Cependant, pour les SdC innovants, très en rupture par rapport aux SdC actuels et présentant des risques sanitaires ou économiques trop importants pour les producteurs, il est préférable de les tester au préalable dans des stations d'expérimentation. Une méthodologie précise pour ces expérimentations « système de culture » a été progressivement

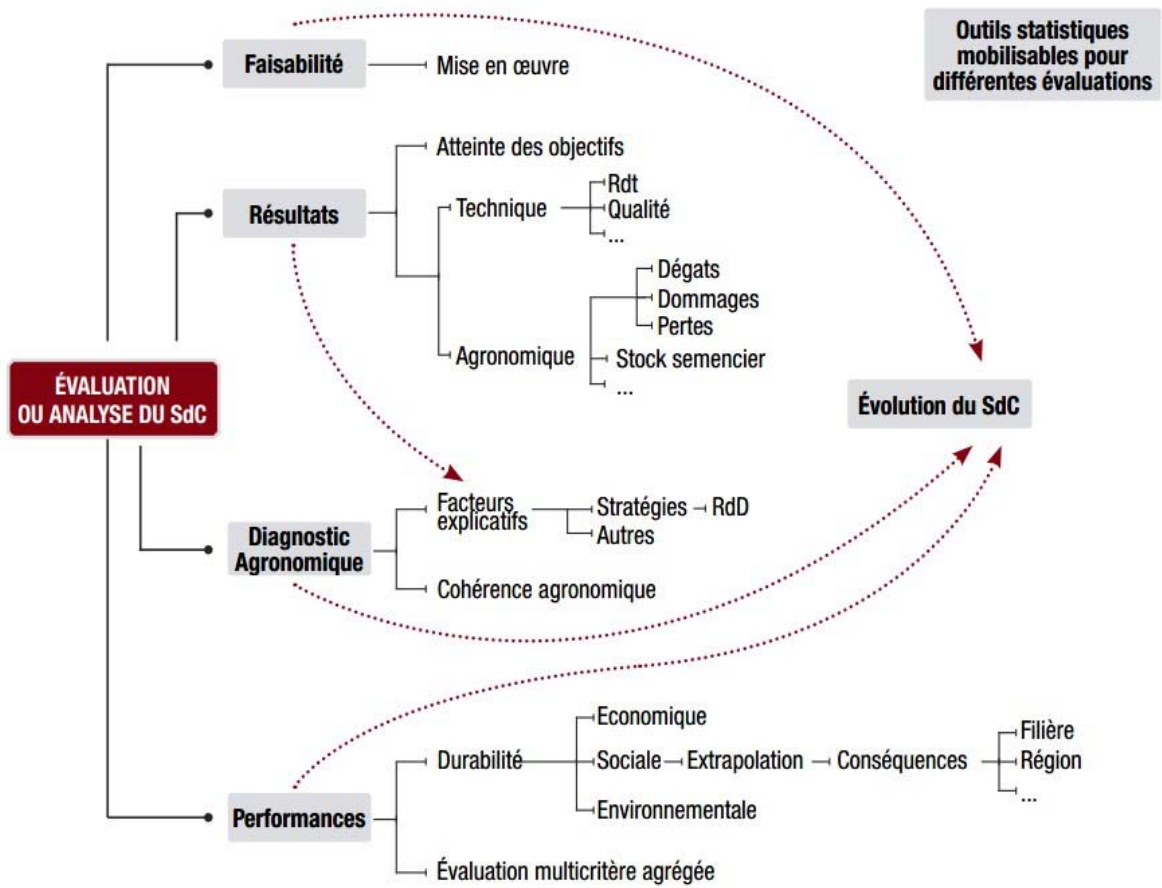


Figure 1: Les différentes évaluations possibles dans un système de culture (Havard et al., 2017).

développée ces vingt dernières années. Un guide de l'expérimentateur « système » synthétise les avancées méthodologiques réalisées dans ce domaine (Harvard et *al.*, 2017).

En effet, cette approche expérimentale se distingue fondamentalement des approches factorielles utilisées plus couramment en agronomie : il ne s'agit pas d'évaluer l'effet d'un facteur mais de tester la combinaison des techniques mises en œuvre, en considérant les interactions entre ces techniques à une échelle annuelle et pluriannuelle et leurs effets sur les différentes composantes de l'agroécosystème (Reau et *al.*, 1996 ; Harvard et *al.*, 2017). La mise en œuvre de toutes les interventions techniques nécessite leur formalisation au préalable sous forme de règles de décision. La succession de règles de décision permet à l'expérimentateur de gérer les opérations et leurs modalités en fonction des conditions du milieu ou de la culture grâce à des indicateurs de pilotage (Plénet et Simon, 2015) : cela représente le protocole de mise en œuvre des systèmes de culture et de leurs itinéraires techniques. Une règle de décision est le lien logique entre des objectifs et les actions à mettre en œuvre dans chacune des situations que l'on peut rencontrer dans un contexte donné. Les règles, dont le formalisme le plus courant est de type « si ..., alors ..., sinon ... » permettent d'adapter les décisions d'intervention au champ, en fonction de l'état du milieu et/ou du peuplement cultivé (Henry et *al.*, 2012).

I.3 Evaluation multicritères d'un système de culture

Le système de culture peut être évalué sur d'autres critères que ceux attendus par le pilote du système ou l'expérimentateur afin de visualiser ses performances de manière plus globale et garantir sa durabilité. Cela passe par une évaluation multicritère (Deytieux et *al.*, 2012). Plusieurs types d'évaluation peuvent être réalisés (Figure 1) :

- **L'évaluation de la faisabilité technique** se fait a posteriori de l'expérimentation en analysant les fréquences auxquelles les pratiques ont pu être mises en œuvre ou non.
- **L'évaluation des résultats techniques et agronomiques** qui consistent à vérifier que les principaux objectifs et attentes assignés au SdC testé ont bien été atteints. Les résultats agronomiques décrivent l'état des parcelles et des cultures (dégâts de bioagresseurs, symptômes de carence...) et les résultats techniques correspondent à ceux de la production comme le rendement et la qualité de la récolte.
- **L'évaluation de la durabilité** peut se faire selon les trois piliers qui la compose : environnemental (pression en produits phytosanitaires par l'enregistrement des Indices de Fréquences de traitement (IFT), les risques de pollution par les nitrates, etc.), économique (chiffre d'affaire, coûts de production, marges brutes, etc.) et

social (temps de travail, pénibilité, pointes de travail par décade, etc.) (Havard et *al.*, 2017 ; Reau et Doré, 2008).

II. Le projet « EcoPêche » : une expérimentation système en vergers de pêcher

II. 1 Les objectifs d'Ecopêche

Le projet Ecopêche a débuté en 2013 dans le cadre du programme EXPE DEPHY Ecophyto. EcoPêche. Il vise, avec une approche partenariale et multisite, à concevoir, évaluer et transférer les bases de systèmes de culture innovants de vergers de pêche-nectarine économes en produits phytosanitaires et en intrants. Ce projet regroupe 7 partenaires : INRA PSH (coordinateur du projet), INRA UERI Gotheron, INRA Bordeaux, CTIFL, Stations régionales d'expérimentation : SEFRA, Sud Expé SERFEL et Sud Expé Sica CENTREX. Les orientations stratégiques des systèmes sont assez identiques sur tous les sites mais les règles de décision tactiques peuvent différer pour intégrer les spécificités et les contraintes locales.

Le projet a pour objectif de concevoir, expérimenter et évaluer des scénarios techniques pouvant concilier performances agronomiques, économiques et environnementales, en particulier en :

- Limitant l'impact environnemental (pollutions, utilisation des ressources, préservation de la biodiversité ...) en réduisant de 50 % l'usage des produits phytosanitaire et limitant l'utilisation des autres intrants, notamment vis-à-vis de l'enjeu eau (meilleure gestion d'irrigation)
- Préservant les marges économiques (maintien de la productivité et/ou maîtrise des coûts de production, du temps de travail...).
- Obtenant des fruits de qualité (sain, qualité gustative, réduction des résidus de pesticides dans les fruits)
- Améliorant la durabilité des systèmes : fertilité des sols, régulations biologiques, séquestration du carbone...

Le second objectif d'Ecopêche est le transfert des connaissances acquises grâce aux expérimentations systèmes vers les acteurs de la filière.

II. 2 Les leviers d'actions mobilisés pour diminuer les intrants et les produits phytosanitaires d'un système de culture économe en IFT : projet Ecopêche

Pour atteindre les objectifs de réduction d'environ 50 % de l'usage des produits phytopharmaceutiques, les nouveaux systèmes de vergers mobilisent un ensemble de

Tableau 1 : Les leviers d’actions mobilisés pour diminuer les intrants et les produits phytosanitaires d’un système de culture économe en IFT.

Levier d’action	Méthodes	Objectifs
Contrôle génétique	<ul style="list-style-type: none"> . Porte greffe adaptatif aux conditions édaphiques du sol et tolérant aux parasites. <p><i>NB : Les variétés du pêcher actuelles sont sensibles aux bioagresseurs (Hilaire et Ruesch, 2012).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> . Tolérances aux maladies.
Système de conduite	<ul style="list-style-type: none"> . La densité de plantation, formes des arbres, système d'irrigation, aménagement du verger. . Gestion annuelle de l’architecture. 	<ul style="list-style-type: none"> . Effet sur la vitesse d’entrée en production, la qualité des fruits, la performance agronomique, et les temps des travaux.
Entretien du sol	<ul style="list-style-type: none"> . Désherbage mécanique, couvert herbacé peu compétitif, technique de paillage,... 	<ul style="list-style-type: none"> . Suppression du désherbage chimique.
Gestion d’irrigation et la fertilisation	<ul style="list-style-type: none"> . Ajustement des apports en eau en fonction des stades de développement de la plante et des fruits selon le Concept d’irrigation régulée (RDI). . Articuler avec la fertilisation azotée. 	<ul style="list-style-type: none"> . Réduction de l’eau d’irrigation, augmentation de la teneur en sucre des fruits, manipulation de la vitesse de croissance, diminution des fissures sur la surface des fruits. . Contrôle du développement des maladies.
Substitution des produits phytosanitaires	<ul style="list-style-type: none"> . Utilisation des produits de biocontrôle et des techniques alternatives, la prophylaxie. <p><i>NB : ces techniques ne remplacent pas complètement la lutte chimique.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> . Réduction des interventions chimiques et donc moins d’impact environnemental.

méthodes alternatives, dont la plupart sont décrites dans le Guide Ecophyto Fruits (Tableau 1) (Laget et *al.*, 2015). Il s'agit notamment de les associer de manière logique et cohérente pour évaluer si cela permet d'atteindre les objectifs fixés. Cette intégration de leviers d'action est synthétisée sous forme d'un schéma décisionnel qui caractérise la stratégie des SdC innovants (Annexe 1).

III. Caractéristiques biologiques et physiologiques du Pêcher

III.1 Caractéristique de l'arbre

Le pêcher (*Prunus Persica* (L.) Batsch) est une espèce d'arbre fruitiers de la famille des Rosacées, la plus importante économiquement des cultures de fruits à noyau (Faust et Timon 1995). Les variétés de pêcher peuvent être classé selon le type de fruit. On distingue : i) les fruits à noyau libre : pêche (duvet) et nectarine (sans duvet) ; ii) les fruits à noyau adhérent : pavia (duvet, utilisée pour l'industrie des fruits au sirop); iii) les brugnons (sans duvet) et les pêches plates (Rieger, 2006).

Les rameaux du pêcher portent deux types de bourgeons, d'où le nom de rameaux mixtes : les bourgeons à bois qui donneront l'année suivante des pousses feuillées, les bourgeons à fleur qui donnent les fleurs puis les fruits. Cet arbre fruitier rentre en production en 3ème feuille et le niveau de production est croissant jusqu'à la 5ème feuille puis décroissant après la 10ème feuille, avec une longévité moyenne de 15-20 ans (Hilaire et Giaque, 2003). La croissance des organes végétatifs commence au mois de mars et s'achève vers la fin Juillet. L'induction florale débute après l'arrêt de croissance des pousses feuillées. La floraison se déroule de fin février à fin mars et dure entre 8 et 15 jours selon la variété. L'intervalle floraison-maturité des fruits varie entre 80 et 180 jours selon les groupes de précocité des variétés (Hilaire et Giaque, 2003).

III.2 Structure, développement et maturité du fruit

Le fruit du pêcher est une drupe de forme arrondie, résultant du développement et de la différenciation des parois de l'ovaire, son épiderme est coloré de rouge par les anthocyanes (Zucconi, 1986). Le fruit est constitué de 80 à 90 % d'eau dans laquelle sont dissous tous les constituants, les sels minéraux, les sucres, qui représentent au moins 8 à 10 % de la masse du fruit frais, majoritairement du saccharose et de pectines (Monet, 1983).

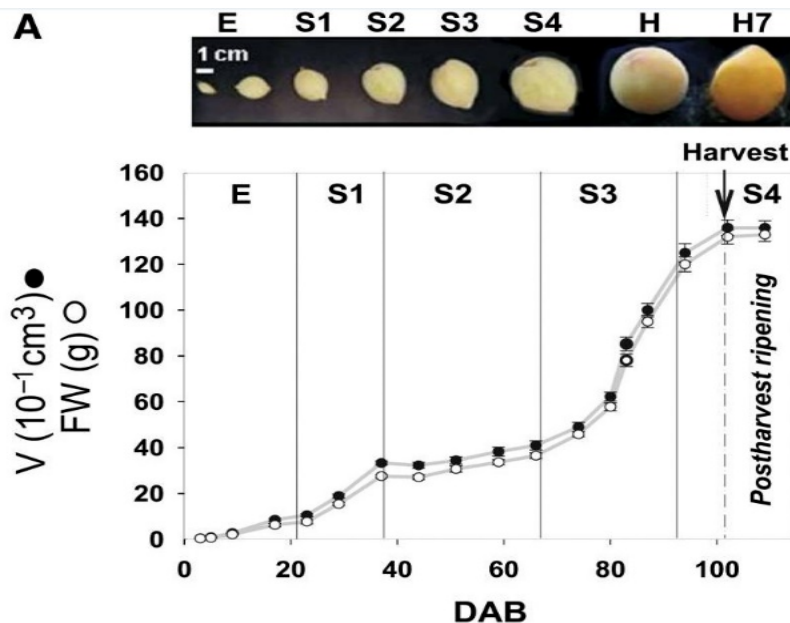


Figure 2: Variations de volume (V) et de poids frais (FW) durant les différents stades de développement et de maturation des pêches pour deux années successives (2007-2008) (Lombardo et al., 2011)

Tableau 2 : Les bio-agresseurs communs de pêche, dégâts économiques et les stratégies de protection (Lichou et al., 2001).

Bio-agresseurs	Période de risque	Dégâts économiques	Stratégies de protection
<i>Monilia</i>	Floraison et à l'approche de maturité des fruits	Décomposition des fruits, problème de conservation	Assainissement, fongicides
<i>Cloque du pêcher</i> <i>Taphrina deformans</i>	Débourrement et allongement des bourgeons	Défoliation, fruits hors-calibre	Fongicides
<i>Oïdium pannosa</i> Woron <i>Podosphaera</i>	De la fin de nouaison à la fin de durcissement du noyau	Défoliation, fruits hors-calibre	Sélection de cultivars, fongicides
<i>Sharka</i> <i>Plum pox virus</i> <i>Puceron vert du pêcher</i> (vecteur de Sharka)		Décoloration vert clair des feuilles, Fruits tachés	Matériels fruitiers indemnes de virus.
<i>Myzus persicae</i> (Sulzer)	Maximum d'infection en mai.	Avortement des fleurs, réduction de calibre des fruits.	Evaluation du risque pour la possibilité des traitements.
<i>Thrips</i> <i>Thysanoptera</i>	Ponte en automne et fin d'hiver, adulte de mai à septembre.	Déformations des fruits avec suintement de gomme et des couleurs	Estimation des risques pour le déclenchement d'un traitement
<i>la Tordeuse Orientale</i> <i>Grapholita molesta</i> Busk	De mars à octobre, des successions des générations	Sur pousse : dessèchement Sur fruits : exsudation gommeuse et blessures	Confusion sexuelle, Traitement chimique
<i>Forficule</i> <i>Forficula auricularia</i> L.	Stade adulte de mai à septembre	Morsures sur fruit peuvent être l'origine de pourritures	Evaluation du risque, lutte chimique

Le développement et la maturation des fruits sont des processus dynamiques qui impliquent une série complexe de changements moléculaires et biochimiques. La courbe de croissance en volume et en masse fraîche du pêcher suit un modèle double-sigmoïde avec quatre périodes distinctes (Figure 2) (Tonutti et *al.*, 1997, El-Sharkawy et *al.*, 2007). La première étape (S1) d'environ 23 à 37 jours après la floraison (DAB), qui est la première phase de croissance exponentielle, est caractérisée par une augmentation rapide de la division cellulaire et de l'allongement. Au cours de la deuxième étape (S2) d'environ 38 à 66 jours après floraison, l'endocarpe durcit pour former le noyau mais avec une faible augmentation de la taille du fruit (Dardick et *al.*, 2010). Dans la troisième étape (S3) d'environ 67 à 94 jours après la floraison, correspondant à la deuxième phase de croissance exponentielle, une augmentation rapide de la taille du fruit a lieu, avec une forte élongation des cellules et une accumulation de métabolites dans les vacuoles. Au stade final (S4) à partir de 94 jours après la floraison, le fruit atteint sa taille finale et entre dans un processus de maturation des fruits. La phase S4 peut être subdivisée en deux phases : S4-1, durant laquelle le fruit arrive à sa pleine taille ; et S4-2, au cours de laquelle le fruit continue à mûrir d'une manière dépendante de l'éthylène, la pêche étant un fruit climactérique (Trainotti et *al.*, 2003). Le stade S4-2 peut également avoir lieu dans un fruit de pêcher détaché de l'arbre et se produit habituellement avant la consommation humaine (Borsani et *al.*, 2009).

III.3 Ravageurs et maladies du pêcher :

III.3.1 Les principaux bioagresseurs

Comme tout végétal, le pêcher est attractif pour différents bioagresseurs (Tableau 2). L'arbre est attaqué par de nombreux insectes ravageurs, tel le puceron vert du pêcher *Myzus persicae* (Sulzer) qui est le plus difficile à combattre compte tenu des nombreuses résistances qu'il a accumulées (Bass et *al.*, 2014). Il est un des vecteurs de la Sharka causé par le plum pox virus (PPV), une maladie endémique dans pratiquement tous les pays de l'Europe. La cloque du pêcher est une maladie qui est due au champignon *Taphrina deformans*, et qui se traduit par le ralentissement de la végétation, un affaiblissement et la chute des feuilles et la production des fruits devient restreinte et dépréciée. Le pêcher est aussi très sensible à divers champignons comme *Monilia sp.*, qui affecte la conservation des fruits (Lichou et *al.*, 2001), ainsi qu'à certains ravageurs (Tableau 2).

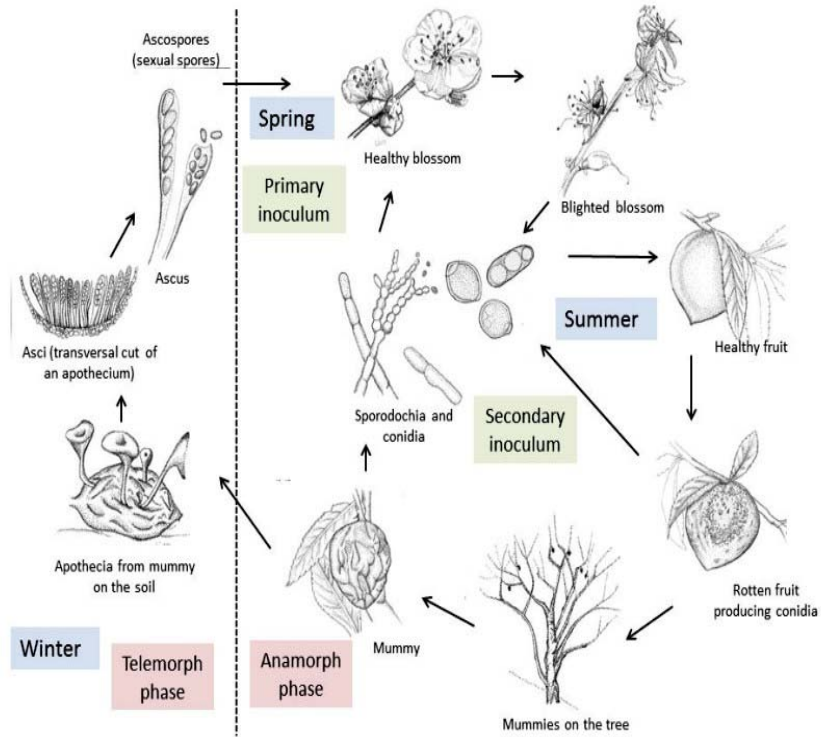


Figure 3: Résumé des principaux stades du cycle de vie de *M. laxa* au verger (Oliveira Lino, 2016)

III.3.2 Le cas des monilioses et les leviers d'action pour les contrôler

Les Monilioses, ou pourriture brune des fruits, sont des maladies cryptogamiques qui affectent les organes reproducteurs (fleurs et fruits) et peuvent causer des dommages en pré et post-récolte (durant la conservation). Les pertes de rendement directes peuvent atteindre à 30 à 40% de la récolte (Lichou et *al.*, 2001). Trois agents sont responsables de la pourriture brune : *Monilinia fructigena* (uniquement sur fruits), *M. laxa* et *M. fructicola* (sur fleurs et fruits). En France, jusqu'à récemment, *M. laxa* était l'espèce la plus présente et causait le plus de dégâts. Cependant *M. fructicola*, apparue en France en 2001, s'est rapidement répandu sur le territoire français. Ces champignons présentent un caractère opportuniste puisqu'ils se développent uniquement par l'intermédiaire de blessures visibles à l'œil nu, voire encore à l'échelle microscopique via les fissures cuticulaires qui sont des voies d'entrée privilégiées des conidies de *M. laxa* (Underhill et Simons, 1993 ; Xu et *al.*, 2001). Les monilioses réalisent leur cycle de vie au verger, alternant une phase de reproduction sexuée et asexuée durant une année (Figure 3). Leur développement très rapide s'explique par la réalisation de leur cycle sexué. Elles peuvent passer l'hiver au verger sous forme de momies. Les fruits sont résistants au moment de la lignification du noyau et sont sensibles le reste du développement.

Pour limiter l'impact des monilioses au verger, les mesures prophylactiques habituelles (élimination des foyers infectieux, ainsi que des fruits pourris) sont insuffisantes. Le principal moyen de contrôler la pourriture brune est l'utilisation de fongicides en pré-récolte (Danner et *al.*, 2008). Cependant, les agents pathogènes sont devenus résistants à certains fongicides (Fan et *al.*, 2010). De plus, dans des conditions très favorables, les fongicides de synthèse ne font que freiner le développement des dégâts occasionnés par les monilioses. A l'heure actuelle, il n'existe aucune méthode alternative ayant des efficacités similaires aux fongicides de synthèse, que ce soit des produits de biocontrôle ou d'autres leviers d'action. Des méthodes combinées, même à effet partiel, sont utilisées pour réduire l'usage des produits phytosanitaires et l'impact des maladies de conservation. Dans le projet Ecopêche, les systèmes de culture se différencient par l'utilisation et la combinaison de ces leviers d'actions en fonction des objectifs de chaque système (Annexe 1). Dans le système de référence, des traitements préventifs sont déclenchés selon des seuils d'acceptabilité et un niveau de risques estimé à partir des conditions climatiques à partir de la période de sensibilité des fruits à partir de 3 à 4 semaines avant la récolte) pouvant générer 2 à 4 traitements fongicides. Pour réduire ces interventions, différents leviers d'action sont combinés dans les systèmes économes.

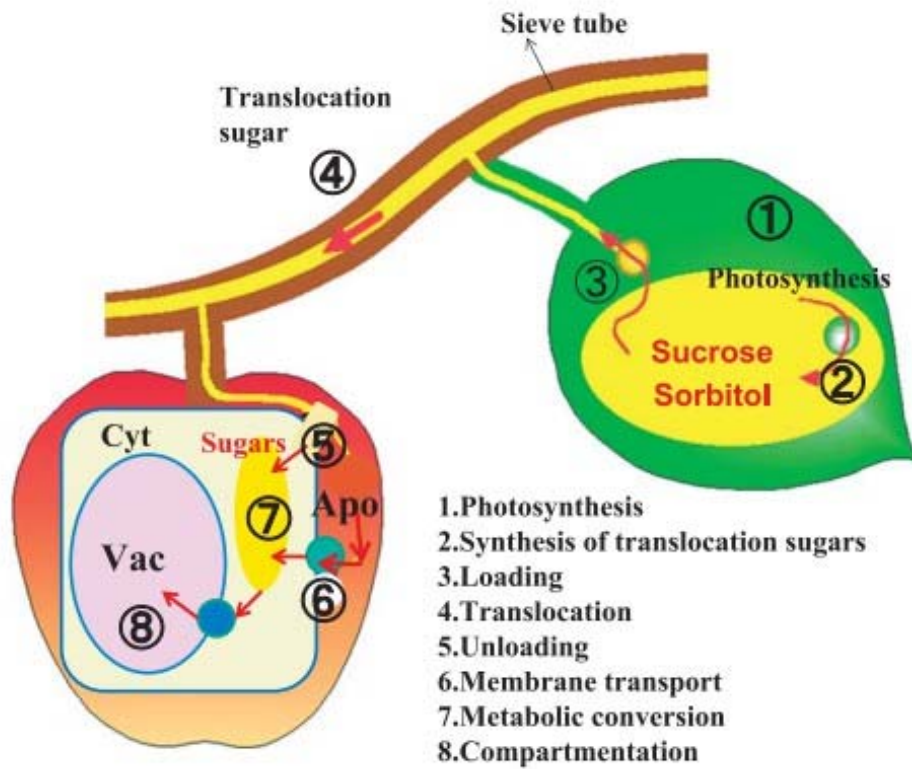


Figure 4: Les différentes étapes physiologiques entre la synthèse des sucres dans les feuilles comme organe source et son accumulation dans les fruits comme organe puit pour leur croissance et développement. (Apo ; apoplaste, Cyt; cytoplasme, Vac; vacuole) (Yamaki, 2010).

Certains leviers visent à renforcer les mesures de prophylaxie au verger (désinfection des outils, enlever les momies, la gestion des fonds de cueille) pour limiter l'inoculum. D'autres leviers visent à ralentir la dispersion des spores en mobilisant des méthodes culturales comme la suppression manuelle des organes contaminés. Certains leviers cherchent à rendre moins favorables les conditions du milieu en jouant sur la gestion de l'architecture et la taille des arbres qui peuvent modifier le microclimat des fruits et donc moduler le développement de l'infection (Bussi et *al.*, 2015).

Aussi, il a été démontré le rôle bénéfique d'une bonne pratique de la gestion de la charge en fruits et de l'irrigation. En effet, un fort éclaircissage ou une irrigation abondante favorisent l'infection par l'augmentation de la vitesse de croissance des fruits, ce qui peut accentuer la formation de fissures cuticulaires, voies d'entrée privilégiées des conidies du champignon (Gibert et *al.*, 2009). La plupart de ces leviers d'action sont mobilisés dans le projet EcoPêche pour essayer de réduire l'usage des fongicides contre les monilioses.

III.3.3 La qualité des pêches et nectarines

La qualité est un concept qui englobe les propriétés sensorielles (apparence, texture, goût et arôme), la valeur nutritive (vitamines, minéraux), les propriétés physico-chimiques et l'innocuité du fruit. Divers travaux montrent qu'il existe une importante variabilité des valeurs de ces critères selon la situation du fruit dans l'arbre, la température, le rayonnement, l'effet saison, et les attaques des bioagresseurs (Monestiez et *al.*, 1989). Les critères de qualité comme la teneur en sucres et l'acidité sont fortement déterminée par les interactions sources – puits qui vont conditionner la croissance des fruits (Gaillard et *al.*, 1976) et les processus métaboliques se déroulant dans les fruits selon leur phase de développement.

L'interaction sources-puits est déterminée par la situation du fruit vis-à-vis des feuilles productrices d'assimilats (sources), le nombre d'organes compétiteurs pour ces assimilats (puits) et la disponibilité d'assimilats (Reynolds, 1989). La production d'assimilats carbonés se déroule essentiellement dans les feuilles grâce à la photosynthèse (Figure 4). Une partie du carbone fixé se retrouve sous forme de saccharose (ou sucrose en anglais) et de sorbitol, ce dernier pouvant représenter plus de la moitié du CO₂ récemment fixé (Escobar Gutiérrez et Gaudillère, 1996). Ces glucides, en particulier le sorbitol et le saccharose, sont les formes privilégiées de transport via le phloème des assimilats carbonés vers les organes puits (tiges, racines, jeunes feuilles et fruits). L'allocation des sucres aux différents organes se fait en fonction de la force des puits que certains auteurs (Warren-Wilson, 1972) définissent comme la taille du puits (poids sec) x activité du puits (taux de croissance relatif).

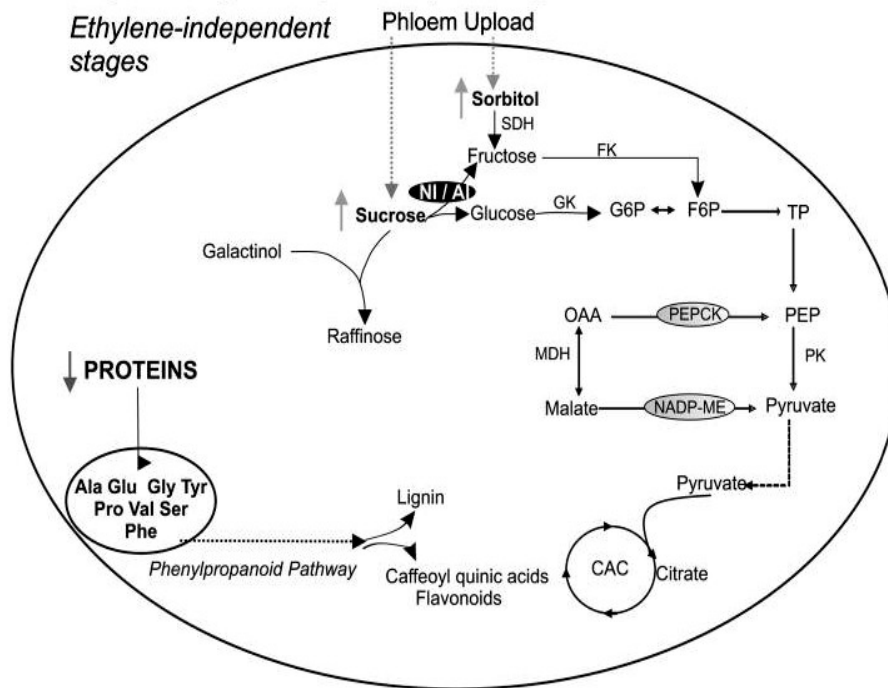


Figure 5: les processus métaboliques clés au cours de la première phase du développement du fruit de la pêche (Lombardo et al., 2011).

Cette force dépend de la taille de l'organe puits, du moment de son initiation par rapport à d'autres puits, de sa localisation et de sa distance par rapport à la source. Elle modifie les capacités concurrentielles du puits par rapport à la croissance, ce qui entraîne une plus forte allocation des assimilats vers les puits les plus forts (Pavel et DeJong, 1993). Donc la force de puits des fruits est fortement déterminée par leur croissance et les processus métaboliques qui s'y déroulent.

Au cours des premières étapes de développement, les fruits accumulent principalement des hexoses en forte concentration (fructose et glucose) suite à l'hydrolyse du saccharose, par l'invertase, ce qui génère une forte pression de turgescence et favorise la croissance cellulaire et la synthèse de l'acide citrique (Lombardo et al., 2011) (Figure 5). Au cours de sa maturation, le fruit accumule principalement du saccharose dans les vacuoles en convertissant le fructose et le glucose en saccharose, ce qui supprime la forte pression de turgescence et protège les parois de la cellule de la dégradation (Yamaki, 2010 ; Lombardo et al., 2011). Ainsi à maturité, le glucide majoritaire dans le fruit est le saccharose, suivi par le glucose et le fructose, le sorbitol représentant moins de 10 % des glucides solubles (Escobar Gutiérrez et Gaudillère, 1996). Comme le saccharose a un pouvoir sucrant élevé en termes de goût, son accumulation est un facteur important pour la qualité gustative du fruit (Yamaki, 2010). Génard et al., (1991) ont montré, dans un modèle d'élaboration de la qualité du fruit, la relation entre la vitesse de croissance et la qualité. Les fruits qui ont une vitesse de croissance élevée et tardive durant la deuxième phase de croissance (après le durcissement du noyau) sont plus sucrés, moins acides et ont une fermeté plus faible. Ainsi, une vitesse de croissance élevée pourrait favoriser une évolution physiologique plus rapide marquée par une accélération de la perte de fermeté, une respiration plus précoce que pour les autres fruits avec pour conséquence une émission précoce de l'éthylène, ce qui favoriserait l'accumulation du saccharose et de l'acide malique, et la diminution de l'acide lactique (Souty et al., 1999). Une autre hypothèse serait que la production d'hormones pendant la deuxième phase notamment d'auxine qui est contenue en fortes concentrations dans la pulpe de la pêche, pourrait promouvoir la production d'éthylène (Miller et al., 1987) ce qui favoriserait l'action positive sur la maturation des fruits et ainsi sur leur qualité gustative. D'autres facteurs peuvent affecter la qualité des fruits tels que la disponibilité en eau d'irrigation. Une irrigation fortement déficitaire par rapport à la demande peut nuire au rendement, mais une irrigation légèrement déficitaire pourrait améliorer certains attributs de qualité tel que la fermeté, la concentration en sucres solubles et le rapport sucre/acide (Behboudian et al., 2011).

La réduction d'entrée d'eau dans le fruit limite le phénomène de dilution des sucres et autres composés d'intérêt, ce qui favorise les critères de qualité cités (Génard et al., 2010).



Figure 6: Plan du dispositif de l'expérimentation EcoPêche du site Inra UR PSH à Avignon.

Tableau 3 : Description des systèmes de culture du site d'Avignon : essai avec la variété NECTASWEET[®] Nectarlove (cov).

INRA PSH	Systèmes		
ESSAI 1 Nectarlove	S1 : REFérence (Raisonné)	S2 : ECOnome 1 Forme en volume	S3 : ECOnome 2 Forme haie fruitière
Variété Porte-greffe	Nectarlove GF 677	Nectarlove GF 677	Nectarlove GF 677
Forme arbres	Double Y	Double Y aéré	Simple Y oblique
Densité (arbres/ha)	571	571	909
Système irrigation	Micro-aspersion	Goutte à goutte enterré et/ou de surface	Goutte à goutte enterré et/ou de surface
Entretien sol du rang	Désherbage chimique rang	Paillage textile	Paillage textile

Tableau 4 : Principales interventions sur EcoPêche Inra Domaine Saint Paul en 2018

Technique	Description	Objectifs
Conduite des arbres	Taille d'hiver	Maintien de la forme fruitière des arbres et
	Taille en vert	sélection des rameaux fructifères
	Attachage charpentière	
Eclaircissage	400 à 450 fruits/arbre (300 à 350 fruits sur S3)	Rendement de 40 à 45 tonnes/ha sur la variété Nectarlove dans sa 6 ^{ème} année
entretien	Broyage bois de taille	Zéro herbicide sur les systèmes économes.
	Entretien inter-rang	Broyage enherbement dans inter-rang
protection	Produits phytosanitaires Leviers d'action Gestion de l'irrigation	Réduction de 50 % des produits phytopharmaceutiques de synthèse sur les systèmes économes si la prise de risque n'est pas inconsidérée
Irrigation et fertilisation	Gestion de l'irrigation et de la fertilisation selon les objectifs visés	Accompagner la croissance des arbres et des fruits, mais en mettant en œuvre des méthodes (Outils d'Aide à la Décision – OAD) permettant un pilotage précis des apports afin d'augmenter l'efficacité des intrants. Analyser l'effet de l'irrigation sur la sensibilité des fruits aux Monilioses

PARTIE 2. Matériel et méthodes

I. Description de l'essai système du site INRA Avignon

L'expérimentation EcoPêche du site Inra UR PSH à Avignon est en 6^{ième} feuille de production (année de plantation 2013). Le dispositif est constitué de 3 systèmes de culture plantés avec la variété nectarine blanche commerciale NECTASWEET® Nectarlove (cov) (Figure 6). Un système de référence (S1-REF) est conduit selon les recommandations régionales qui suivent le cahier des charges de l'agriculture raisonnée. Deux autres systèmes S2 (S2-ECO1) et S3 (S3-ECO2) sont des systèmes économes en produits phytosanitaires avec une réduction visée de -50 % d'IFT (hors produits de biocontrôle) par rapport au système de référence. Le système économe S3 se distingue par rapport aux autres systèmes par sa forme fruitière et une densité de plantation plus élevée (Tableau 3). Chaque bloc ou système est composé de 6 rangs de 10 arbres (S1 et S2) ou 16 arbres (S3). La conduite est homogène sur le bloc (règles de décision appliquées à l'ensemble du bloc). Le pilotage de l'irrigation est géré par bilan hydrique couplé à des mesures d'humidité du sol ou des capteurs pepista® sur les arbres.

En 2018, un essai factoriel a été intégré au sein des 2 systèmes S1-REF et S2-ECO1 de l'essai système visant à tester l'influence de techniques agissant sur la maîtrise des monilioses et l'élaboration de la qualité des fruits : facteur protection (IFT à 2 niveaux) x facteur irrigation (à 2 niveaux) x facteur charge en fruits (2 niveaux) (Tableau 5). Le système S3-ECO2 n'est pas inclus dans l'essai factoriel car il introduirait un autre facteur (densité des arbres). A noter que les modalités S1-M1 et S2-M1 correspondent aux stratégies de base définies pour chacun des systèmes dans « l'expérimentation système ».

Tableau 5 : Différentes modalités expérimentales de l'essai factoriel imbriqué au sein des systèmes de culture.

	Fact. Protection	Fact. Charges en Fruits	Fact. Irrigation	
			100 % kc.ETP	50% kc.ETP
Système S1-REF	IFT = 24	400 FR	S1-M1 12 arbres (mesures sur 6 arbres)	S1-M3 6 arbres
		200 FR	S1- M2 6 arbres	S1-M4 6 arbres
Système S2-Eco1	IFT = 12	400 FR	S2-M1 12 arbres (mesures sur 6 arbres)	S2-M3 6 arbres
		200 FR	S2- M2 6 arbres	S2-M4 6 arbres

II. Itinéraires techniques EcoPêche, INRA Avignon2018

Les systèmes de culture sont différenciés par les combinaisons de méthodes culturales pour atteindre les objectifs de l'expérimentation fixés pour l'année 2018 (Tableau 4). Sur les

Tableau 6 : Les indicateurs de performances choisis pour l'analyse et l'évaluation de l'expérimentation.

	Indicateurs de performances choisis	Unités	Abréviations
Indicateurs des pratiques : pression environnementale	IFT chimique	IFT/ha	IFT ch.
	IFT chimique par tonnes commercialisables	IFT/t com	IFT/tcom
	Quantité eau irrigation	m ³ /ha	Eau Irr
	Apport N minéral	kg/ha	N min
	Apport P ₂ O ₅	kg/ha	P ₂ O ₅
	Apport K ₂ O	kg/ha	K ₂ O
Indicateurs agronomiques	Rendement commercialisable en frais	t/ha	Rdt Com
	Pertes	t/ha	Pertes
Indicateurs de qualité	%Brix – IR	% Brix	IR
	% de calibre <i>A et plus</i>	%	% <i>A et plus</i>
Indicateurs sociotechniques	Heures totales	h/ha	h.HR
	Heures hors récolte	h/ha	h.tot
Indicateurs économiques	Chiffre d'affaire bord verger	€/ha	PB
	Charge de production	€/ha	Charges
	Marge Partielle	€/ha	Marge

Tableau 7 : Variables mesurées pour calculer les indicateurs de performance de l'expérimentation.

Indicateurs de performance		Individus suivis	Variables mesurées	Fréquence des mesures
Dynamique de croissance	Croissance végétative	6 pousses/arbre	Longueur des pousses (cm) Nombre de feuilles (Nb)	Mesures tous les 15 jours, jusqu'à la récolte
	Croissance des fruits	6 fruits/arbres	Diamètre des fruits (cm)	Mesures tous les 7 jours, jusqu'à la récolte
	Croissance des arbres	Circonférence des troncs	Section des troncs (cm ²)	Mesures fin février (reprise de la croissance); fin juillet (fin récolte)
Statut hydrique et azoté	Statut hydrique	Dendromètres sur 5 arbres par système	Croissance journalière des charpentières Amplitude de Contraction Diurne (ACD) (µm)	Suivi des variations micromorphométriques une à plusieurs fois par semaine
Suivi des ravageurs et des maladies	Bioagresseurs	30 arbres/système	Notation de l'intensité des dégâts par bioagresseur	Observations au verger tous les 7 jours
	Suivi Monilia en post récolte	128 fruits par système de calibre A et 2A 60 fruits /modalité au sein de l'essai factoriel	pourcentage de fruits pourris	Sur les cueilles 1 et 2, observation des fruits mis en conservation, à 20°C et 80% d'humidité relative, une fois par jour pendant 20 jours après la récolte.
Rendement et qualité		6 Fruits/ arbres de chaque modalité	Masse de fruits commercialisable en frais (kg/arbre), répartition en calibre, poids moyen des fruits (g), taux de sucre (% Brix) par calibre	A chaque cueille

systèmes économes, des stratégies de protection combinant méthodes alternatives (ANNEXE II) et produits phytosanitaires (ANNEXE III) en lien avec la pression des bioagresseurs sont réalisées.

Du fait des objectifs complémentaires liés à l'expérimentation factorielle visant à créer un fort gradient dans le développement des monilioses, les différences de stratégies de protection fongicide anti-monilioses ont été accentuées (impasse complète sur S2-Eco1) par rapport à S1-REF (3 traitements fongicides). Sur l'essai factoriel, les différenciations des modalités charges en fruits (400 fruits vs 200 fruits) et du facteur Irrigation ont débuté le 22 mai 2018 (ANNEXE IV). Cependant, les conditions climatiques de 2018 (précipitations importantes jusqu'au 12 juin) font que la différenciation hydrique n'a été effective qu'à partir du 20 juin.

III. Caractérisation des indicateurs de performances

Afin d'évaluer la performance et la durabilité de chacun des systèmes et évaluer les objectifs globaux de l'expérimentation, un certain nombre de variables sont mesurées pour calculer différents indicateurs qui ont été sélectionnés en fonction des objectifs de l'essai système et de l'essai factoriel. Ils sont regroupés en différentes familles (Tableau 6).

Depuis 2014, la plupart des mesures des indicateurs de performances sont réalisées en routine sur 12 arbres par système. Cette année, des mesures supplémentaires sont ajoutées suite à l'installation de l'essai factoriel au sein des 2 systèmes S1-REF et S2-Eco1 (Tableau 7).

III.1. Méthodes d'analyse des indicateurs

Dans le cadre d'une expérimentation « système de culture », l'absence d'une véritable répétition spatiale de chacun des systèmes (plusieurs blocs d'un même système) rend délicat la comparaison statistique de l'effet « système » du fait d'une possibilité de confusion d'effets avec un effet lié au sol ou à d'autres conditions du milieu. L'objectif n'est donc pas de tester si les différences observées entre systèmes sont significatives, mais d'évaluer si les règles de décision appliquées permettent d'atteindre les résultats visés. Toutefois, la répétition des mesures au sein d'un même système permet d'évaluer la variabilité intra-système pour un certain nombre d'indicateurs de performance. Les confrontations entre les variabilités intra et inter-système ont pour objectif d'évaluer si les écarts observés sont plutôt liés à un effet aléatoire ou à un effet systèmes ou aux modalités factorielles afin de pondérer l'interprétation des résultats. Ces tests ont été réalisés par des analyses de variance (ANOVA) à un facteur

(système), ou trois facteurs (modalités), et par le test de Kruskal-Wallis (analyse des fréquences de dégâts) en utilisant le logiciel R.

Dans la cadre de l'analyse des résultats de l'essai factoriel (3 facteurs ayant 2 niveaux conduisant à 8 modalités expérimentales), les ANOVA avaient pour objectif d'identifier les interactions entre les modalités. En l'absence d'interaction, nous avons regroupé les données pour analyser l'effet des facteurs « système » (niveau de protection fongicide), « Irrigation » et « Charge en fruits » ce qui permet d'augmenter la puissance des tests et une visualisation plus synthétique des résultats.

Le suivi bioagresseurs a été réalisé par une échelle de notation des dégâts par bioagresseur et le calcul d'un indice moyen par verger par bioagresseur : note d'intensité des dégâts par le nombre d'arbre ayant ces dégâts pondéré par le nombre d'arbre suivi. Les notes élevées (>2) sont le signe de dégâts importants et d'un grand nombre d'arbre touchés.

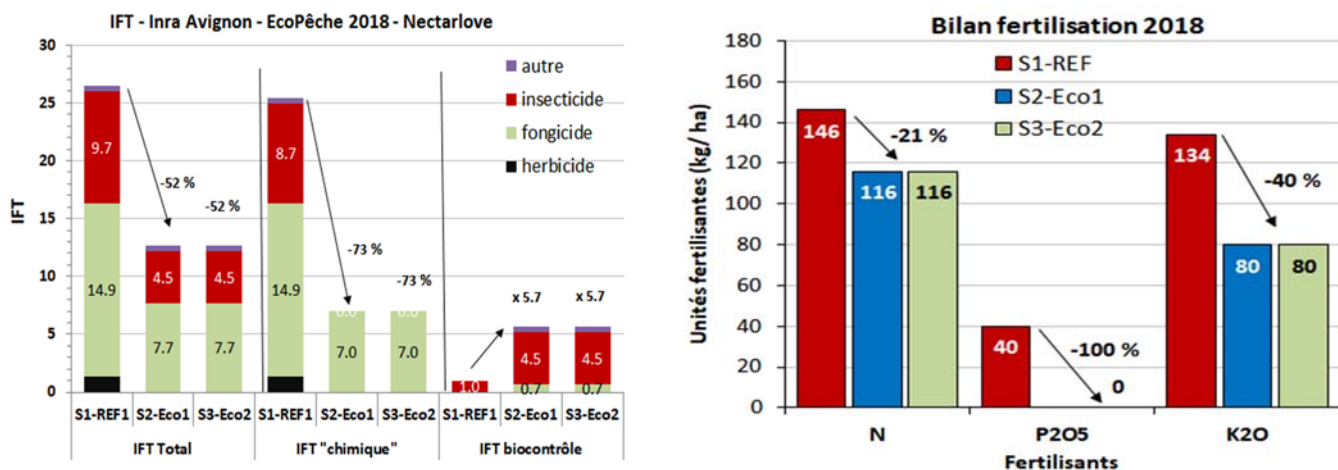


Figure 7: Bilan des pratiques de protection (IFT) et de fertilisation Ecopêche, INRA Avignon 2018.

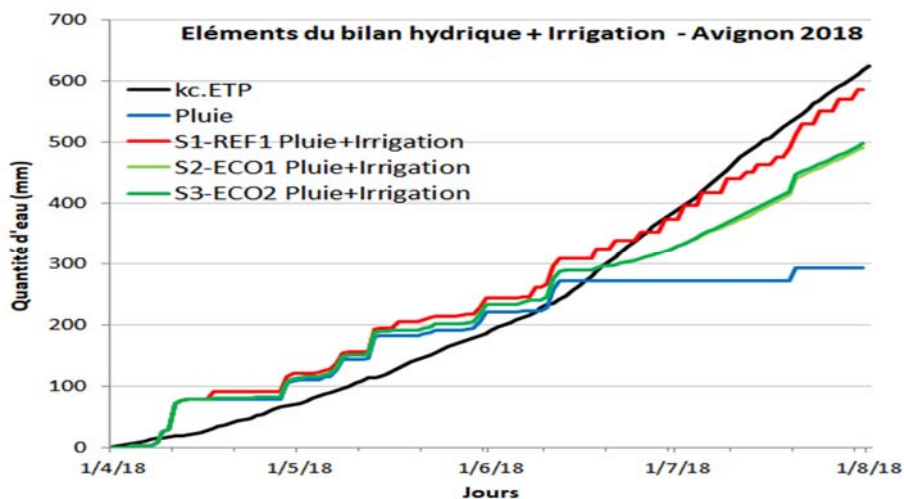


Figure 8: Bilan hydrique et quantités d'eau apportées par l'irrigation sur les 3 systèmes (S1 à S3), Inra d'Avignon 2018.

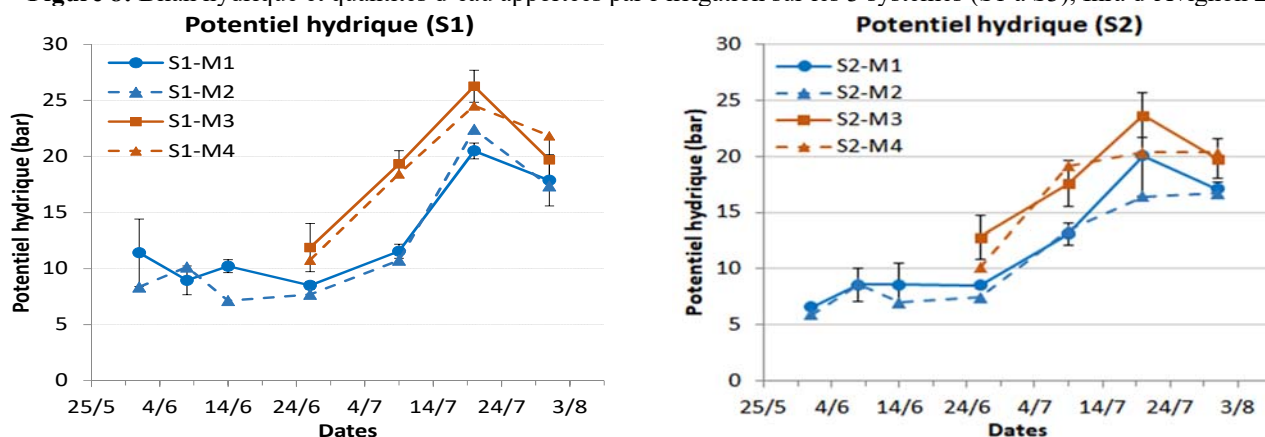


Figure 9: Potentiel hydrique des tiges mesuré au midi solaire sur les différentes modalités de l'expérimentation factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018. Le nombre de répétitions (n=3) permet des mesures sur une plage horaire restreinte (2 heures). Les différenciations effectives d'irrigation ont débuté le 20 juin ce qui explique le démarrage des mesures le 27/06 sur les modalités M3 et M4 (irrigation à 50% de Kc.ETP) par rapport aux modalités M1 et M2 (irrigation à 100%). M1 et M3 : 400 fruits/arbre ; M2 et M4 : charge de 200 fruits/arbre

PARTIE 3. Résultats

Dans un premier temps, nous présenterons les résultats observés sur l'essai système de culture, puis ceux de l'essai factoriel. Cependant, du fait de l'imbrication des dispositifs, certains résultats seront présentés de manière commune.

I. Effet des pratiques sur les performances des systèmes

I.1. Bilan des pratiques

Les objectifs de réduction des intrants sur les systèmes économes ont été largement atteints pour l'année 2018 avec -52 % des produits phytosanitaires (objectifs de 50 %) (ANNEXE 5). Si on considère les IFT hors produits de biocontrôle (« chimiques »), la diminution est de 72.5 % sur S2-ECO1 et S3-ECO2 (Figure 7). Les systèmes économes se caractérisent par -21 % des apports en azote (N, objectifs de -10 % à -20 %), -100 % des apports en phosphate (P₂O₅), et -40% des apports en potassium (K₂O) (Figure 8). Cette réduction est basée sur l'hypothèse d'une meilleure efficacité d'utilisation des engrais apportés par fertigation.

Tableau 8 : Eléments du bilan hydrique sur les différents systèmes de culture du site Inra Avignon pour la période du 1/04/2018 au 31/07/2018. Les pourcentages de réduction d'irrigation sont calculés par rapport à S1-REF.

Système	ETP	Kc.ETP	Pluie	P- Kc.ETP	Irrigation (mm)	% réduction vs S1-REF
S1-REF					291.5	
S2-ECO1	619.8	617.7	293.5	-324.2	198.0	-32
S3-ECO2					204.0	-30

Les apports d'eau d'irrigation couvrent le déficit calculé par le bilan hydrique Kc.ETP (ANNEXE 4). Sur les systèmes économes, les quantités d'irrigation ont été réduites de 32 % sur S2-ECO1 et 30 % sur S3-ECO2 (objectifs de -10 % à -20 %) (Figure 8, Tableau 8). Les mesures du potentiel hydrique des tiges confortent les stratégies d'irrigation (Figure 9). Il n'y a pas de différences marquées entre les systèmes S1-REF et S2-ECO1. Sur les modalités de l'essai factoriel, le potentiel hydrique reste faible jusqu'à la date de la différenciation par l'irrigation des modalités irriguées vs non irriguées. Par contre, l'effet charge en fruits (400 fruits vs 200 fruits) n'impacte pas les potentiels hydriques des tiges.

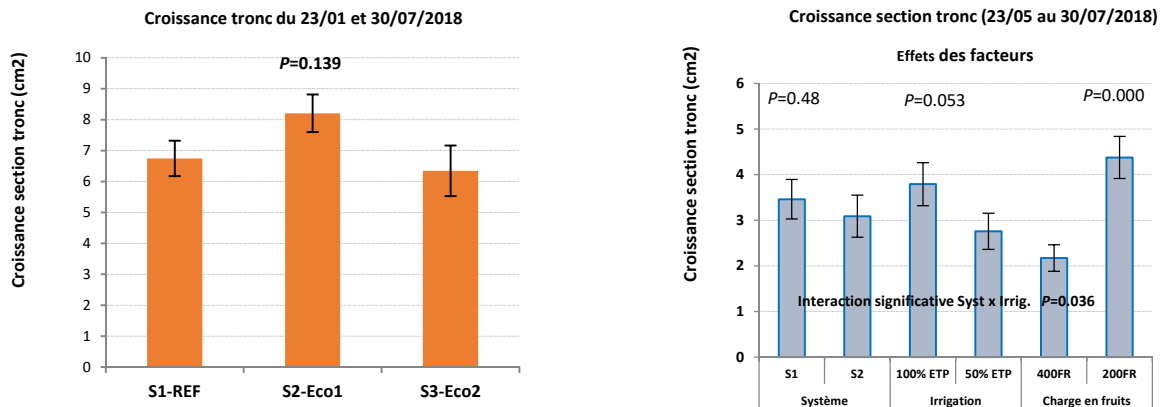


Figure 10: Croissances des troncs mesurés entre janvier et fin juillet 2018 sur les 3 systèmes de l'expérimentation et sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018 (n=12 arbres).

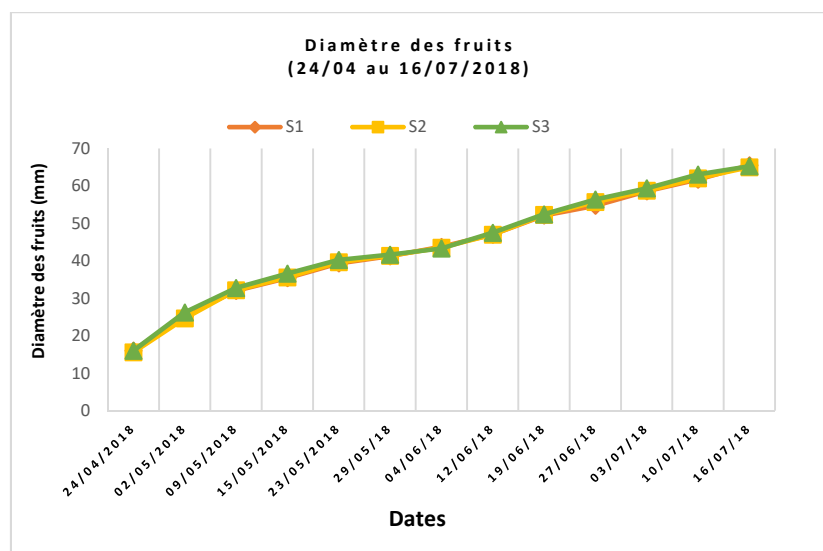


Figure 11: Cinétiques de croissance diamétrale des fruits sur 3 systèmes de culture de l'expérimentation de l'essai système Inra Avignon 2018.

Tableau 9 : Nombre de fruits et poids moyen d'un fruit INRA Avignon 2018 (moyenne ± erreur standard)

	Densité de plantation	Nb de fruits par arbre	Nb de fruits récoltés /ha	Poids moyen d'un fruit (g)	% de calibre A et plus
S1-REF	571	513 ± 25	274 461	163.6 ± 3.9	79.1 ± 3.3
S2-ECO1	571	460 ± 32	247 576	176.7 ± 5.9	83.7 ± 4.0
S3-ECO2	909	350 ± 17	305 879	178.8 ± 6.2	86.8 ± 20.7

I.2 Croissance végétative

I.2.1 Croissance des arbres

La croissance des sections de tronc est un indicateur qui intègre l'ensemble des processus de croissance à l'échelle de l'arbre. Les croissances de sections des troncs entre janvier et fin juillet 2018 ne sont pas significativement différentes ($P=0.13$) entre S1-REF1, S2-ECO1 et S3-ECO2 (Figure 10). Dans l'essai factoriel, seulement les modalités charge (200 fruits vs 400 fruits) semblent impacter significativement ($P<0.001$) la croissance du tronc avec une meilleure croissance à une charge plus faible.

I.2.2 Croissance des pousses et nombre des feuilles

Pour la croissance en longueur des pousses et le nombre des feuilles, il n'y a pas de différence significative entre les 3 systèmes ($P>0.05$) pour toutes les dates de mesures : du 25 avril 2018 au 4 juillet 2018 (résultats non présentés). Ceci conforte les résultats observés sur la croissance des troncs.

I.2.3 Croissance des fruits

Les cinétiques de croissance en diamètre des fruits sont similaires sur les 3 systèmes pour l'ensemble de la période (24 avril au 16 juillet 2018) (Figure 11). La croissance des fruits est un indicateur très sensible à l'impact des pratiques, en particulier à l'alimentation hydrique chez le pêcher. La réduction de l'eau d'irrigation (-30 %) dans les systèmes économes ne semble donc pas avoir d'effet sur la croissance des fruits. Toutefois, il faut intégrer un effet possible lié à la charge des fruits par arbre pour analyser la croissance des fruits. La charge en fruits visée était de 400 à 450 fruits/arbre sur les systèmes à densité de plantation de 571 arbres/ha et 350 fruits/arbre sur le système à densité de plantation de 909 arbres/ha. Au final, elle était atteinte pour S2-ECO1 (460 fruits/arbre) et S3-ECO2 (350 fruits/arbre), mais la charge est un peu plus élevée pour S1-REF (513 fruits/arbre), ce qui explique la différence observée à la récolte entre les systèmes économes et le système de référence en terme de poids moyen du fruit et de son plus faible pourcentage de calibre A et plus (Tableau 9). Ainsi, la charge en fruits plus faible sur S2 peut introduire une légère confusion d'effet avec l'effet « économie d'intrants » lors des comparaisons avec le système S1-REF.

I.3 Etat sanitaire des vergers

Globalement, les dégâts observés sur le système S1-REF sont faibles traduisant un bon contrôle des bioagresseurs par la stratégie de protection, essentiellement à base de produits phytosanitaires (Figure 12). Les dégâts d'oïdium sont absents sur feuilles et sur fruits

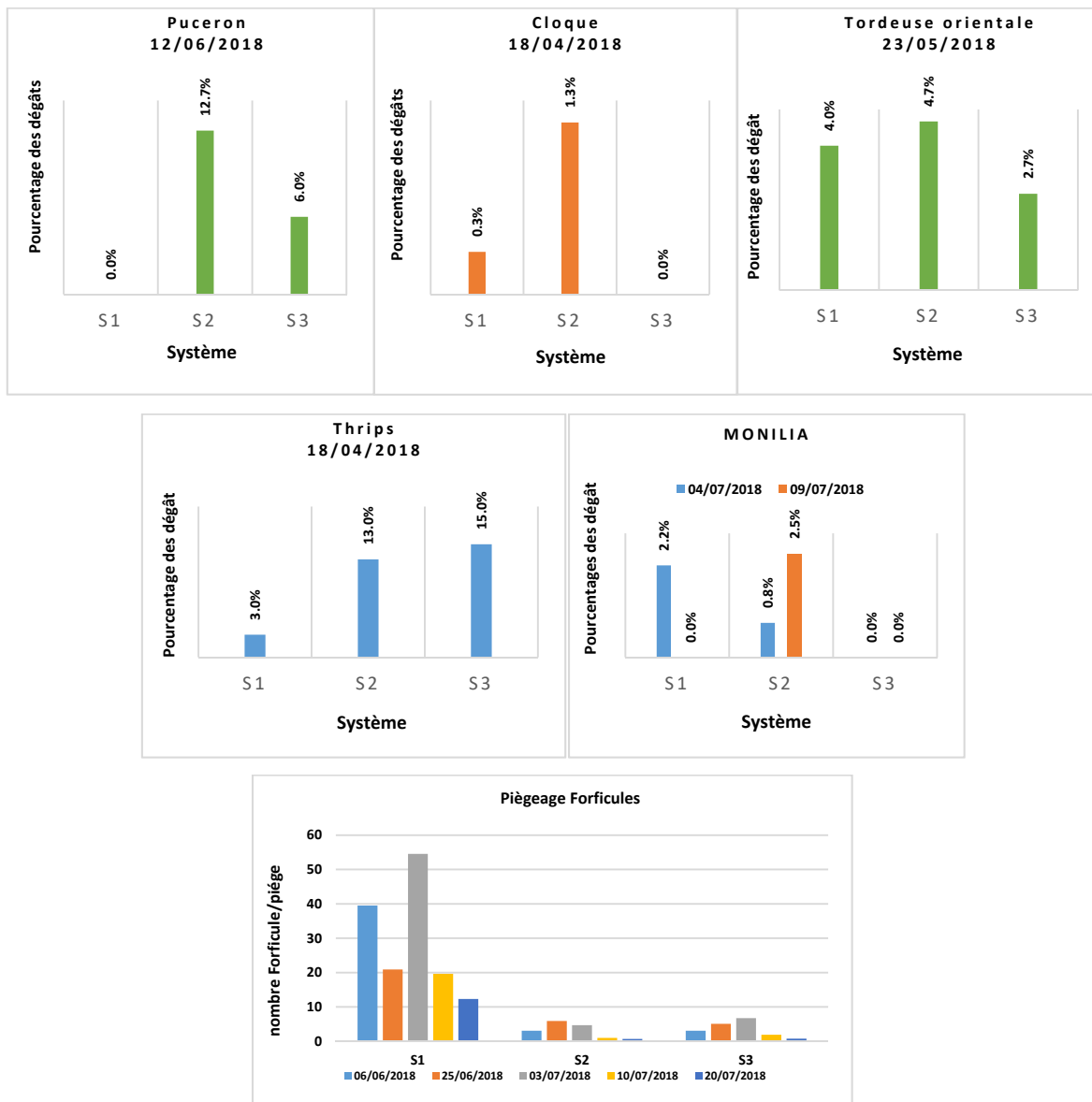


Figure 12: Dégâts observés et présence de bioagresseurs sur les différents systèmes aux dates où les symptômes étaient à leurs maximums, Ecopêche, INRA Avignon 2018.

(0%, résultats non présentés). A noter cependant, des dégâts sur pousse occasionnés par la tordeuse orientale un peu élevés lié sans doute à une pose de la confusion sexuelle et une intervention sur la 2^{ème} génération un peu trop tardives. De même, on observe encore une forte population de forficules sur S1 avant la récolte malgré la pose cette année de glu sur le tronc (barrière physique) et un traitement insecticide complémentaire 10 jours avant récolte. Ceci s'explique sans doute par le maintien d'une forte population hivernante lié aux attaques des années précédentes sur ce système.

L'intensité des dégâts est légèrement plus élevée pour les deux autres systèmes économes due à la forte diminution de la protection chimique. La maîtrise de la cloque, de l'oïdium et de la tordeuse orientale est satisfaisante (même niveau que pour S1). Par contre, l'absence d'utilisation d'insecticides chimiques contre les pucerons (utilisation seulement d'un produit de biocontrôle au stade hivernant) a permis le développement d'une forte attaque de puceron farineux (*Hyalopterus amygdali*) à partir du 09 mai 2018, essentiellement sur les 2 systèmes économes, avec un maximum d'attaque le 16 juin 2018 (Figure12). L'attaque a été progressivement régulée par une intervention manuelle (suppression des rameaux ayant les foyers les plus importants), par la présence des auxiliaires et le départ des pucerons ailés dans la deuxième quinzaine de juin. L'absence de protection insecticide contre le thrips a aussi occasionné plus de dégâts que sur S1-REF.

A noter que les pourcentages de fruits touchés par les monilioses au verger durant les 15 jours qui précèdent les récoltes sont très faibles sur tous les systèmes. Les dégâts ne sont apparus le 4/07/2018 que sur S1-REF et S2-ECO1, avec un pourcentage plus élevé sur S1-REF (Figure 12). Par la suite, ce pourcentage a diminué grâce aux traitements fongicides anti-monilioses (programme de protection avec 3 traitements fongicides anti-monilia sur S1-REF). Par contre sur S2-ECO1, le pourcentage de dégâts a légèrement progressé du fait de l'absence totale de traitements fongicides. Sur S3-ECO2, on observe très peu de dégâts malgré une seule intervention fongicide. Dans les conditions climatiques de l'année 2018 assez favorables aux monilioses (printemps très pluvieux jusqu'à mi-juin), les résultats observés sur les systèmes économes semblent démontrer une réelle efficacité de la combinaison des méthodes culturales alternatives (prophylaxie, pilotage de l'irrigation, mode d'apport d'eau d'irrigation) pour contrôler les monilioses au moins dans la phase pré-récolte.

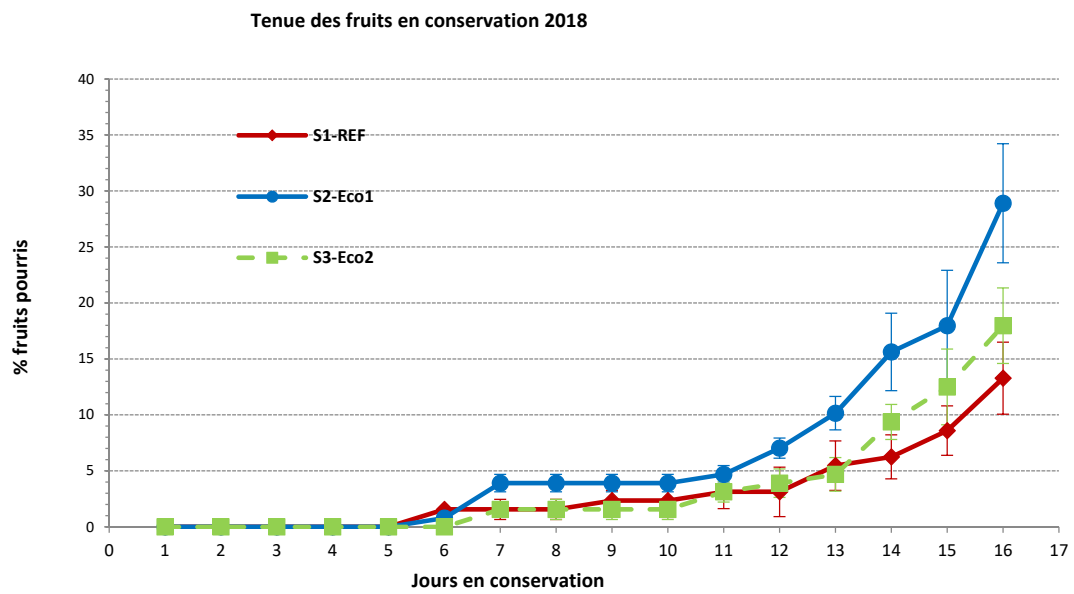


Figure 13: Pourcentage cumulé de fruits « pourris » pendant 15 jours de conservation à 20°C, Ecopêche, INRA.
Fruits prélevés lors de la cueille n° 2 (18 juillet 2018)

I.4 La tenue des fruits en conservation

La figure 13 montre que la tenue des fruits a été excellente pendant les 5 premiers jours. A partir de 6ème jour les dégâts commencent à apparaître (1.6 % de fruits pourris sur S1-REF et 0.8 % sur S2 et 0 % sur S3). Après 10 jours de conservation (durée souvent considérée comme limite pour une pêche dans les circuits de distribution avant sa commercialisation), les dégâts sont faibles (S1-REF=2.3 % ; S2-ECO1=3.9 % ; S3-ECO2=1.6 %) et les différences non significatives (test du Khi2, P=0.49). Après 14 jours, les différences entre les proportions de dégâts selon les systèmes deviennent significatives (test du Khi2, P=0.043) avec 6.3 % de fruits pourris sur S1-REF, 15.6 % sur S2-ECO1 et 9.4 % sur S3-ECO2. Ces différences s'accroissent le 16ième jour. Il faut donc attendre 12 à 14 jours de conservation pour que la tenue des fruits en conservation se différencie vraiment entre les systèmes. Les méthodes culturales alternatives utilisées sur les systèmes économes permettent donc de compenser partiellement le faible niveau de protection fongicide par comparaison au système S1-REF.

I.5 Analyse multicritère des performances

Tous les indicateurs choisis pour évaluer les performances des deux systèmes économes confirment que les objectifs de l'expérimentation sont atteints voire dépassés (Tableau 10). Les différences de performances observées en 2018 entre le système de référence et le système S2-ECO1 sont attribuables essentiellement aux pertes de récolte plus importantes sur le verger de référence malgré une protection chimique plus importante. Cependant, du fait d'une charge en fruits plus importante sur S1-REF, les rendements commercialisés sont similaires entre S1-REF (37.0 t/ha) et S2-ECO1 (36.3 t/ha). Le S3-ECO2 montre les meilleurs résultats de performances agronomiques et technico-économiques (Tableau 10). En revanche, une augmentation du temps de travail de +18 % sur S3-ECO2 par rapport à S1-REF est due essentiellement à l'augmentation de la production (+28%) et donc au temps de récolte. Le système S3-ECO2 conduit aussi à une augmentation des coûts de production de + 13 %.

Les deux systèmes économes favorisent un indice réfractométrique plus élevé, signe d'une meilleure qualité des fruits, avec des pourcentages importants de calibres A et plus. Globalement, la réduction des intrants (produits phytosanitaires, eau d'irrigation et fertilisants) sur les systèmes économes et le maintien des performances agronomiques voire leur augmentation conduisent à une augmentation de l'efficacité de l'utilisation des intrants et à des résultats économiques supérieurs (marge partielle) par rapport au système S1-REF.

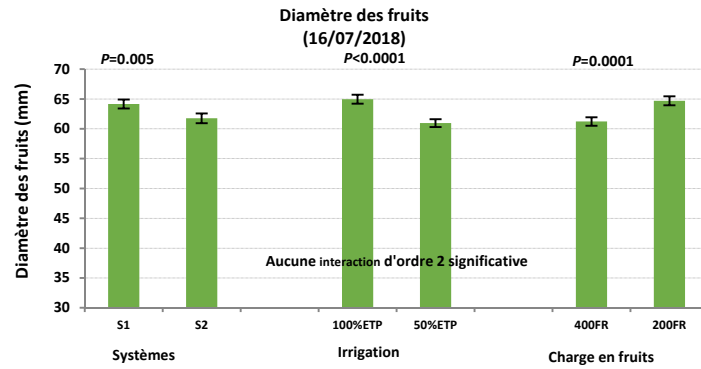


Figure 14: Diamètre des fruits à maturité sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018 : résultats présentés par facteur en regroupant les données des différentes modalités du fait de l'absence d'interaction.

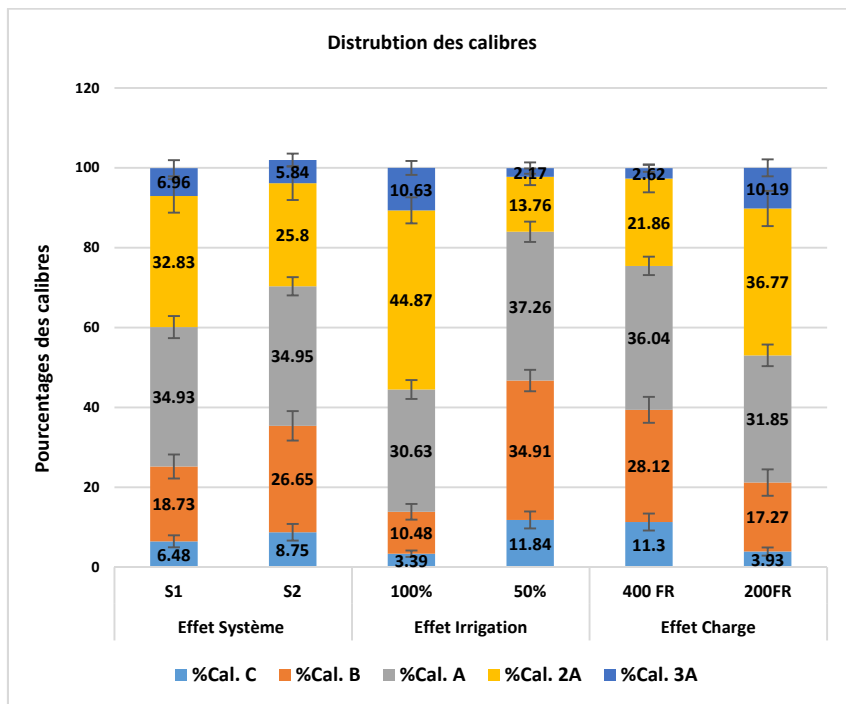
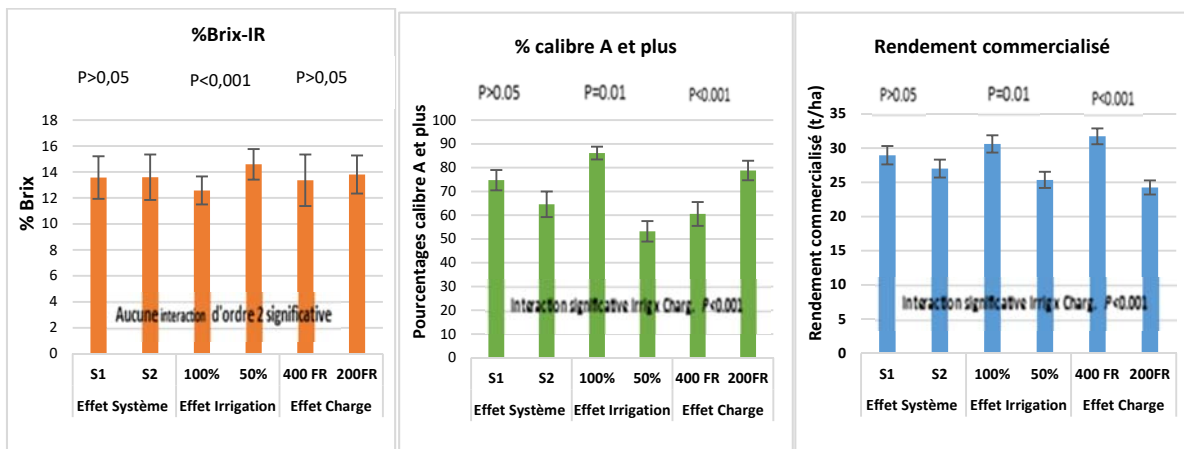


Figure 15: Rendement commercialisé (t/ha), Calibre A et plus, distribution des calibres, et indice réfractométrique (% Brix) sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué dans les systèmes de culture (S1-REF et S2-Eco1) de l'essai système Inra Avignon 2018.

Tableau 10 : Tableau des indicateurs de performances des systèmes de culture Ecopêche, INRA Avignon 2018 campagne 2016) En vert les objectifs atteints et en rouge les objectifs supérieurs au seuil.

	Indicateurs des pratiques : pression environnementale						Indicateurs agronomiques		Indicateurs de qualité		Indicateurs sociotechniques		Indicateurs économiques		
	IFT ch.	IFT/t com	N min	P2O5	K2O	Eau Irr	Rdt Com.	Pertes	% A et plus	%Brix -IR	h. HR	h. tot	PB	Charges	Marges
S1-REF	25.47	0.69	146	40	134	2915	37.0	17	79.1	11.7	557	1047	41407	15491	25 915
S2-ECO1	07.0-73%	0.19-72%	116-21%	0-100%	80-40%	1980-32%	36.3-2%	15.6-8%	83.7+6%	12.9+10%	566+1%	1037-1%	42181+2%	14838-4%	27343+6%
S3-ECO2	07.0-73%	0.15-78%	116-21%	0-100%	80-40%	2040-30%	47.3+28%	12.4-27%	86.8+10%	12.7+8%	647+16%	1240+18%	55603+34%	17533+13%	38070+47%

II. Analyse de l'essai factoriel sur l'élaboration de la qualité des fruits et sur la sensibilité aux maladies de conservation

II.1 Effets sur l'élaboration de la qualité des fruits

Les différenciations des différentes modalités irrigation (50% et 100 % d'irrigation par rapport à Kc.ETP) et charge en fruits (200 fruits et 400 fruits) réalisée à partir du 22 mai 2018 ont impacté significativement le diamètre des fruits (Figure 14). Les arbres à 200 fruits ont des fruits plus gros (+6%) que les arbres à 400 fruits ($P < 0.0001$). L'irrigation à 100% favorise une meilleure croissance des fruits par rapport à une irrigation à 50% ($P = 0.001$). La modalité à 100% d'irrigation et la forte charge en fruits favorisent significativement ($P < 0.05$) le rendement commercialisable (Figure 15). En revanche, une forte irrigation et une charge faible augmentent le pourcentage de fruits ayant un calibre A et plus. Par contre, seule la modalité irrigation impacte significativement l'indice réfractométrique (Figure 15), les fruits les moins irrigués (50%) ayant un IR plus élevé.

II.2 Effets sur la sensibilité des fruits aux maladies de conservation

II.2.1 Dégâts Monilia en pré-récolte

Au verger, les dégâts liés aux monilioses ne sont apparus que sur les arbres à 100% irrigation et avec une charge de 200 fruits/arbre. La modalité avec une protection fongicide élevée (S1) a un pourcentage de dégâts plus élevé que le système non traité S2 (Figure 16), sans doute lié à une confusion d'effets provoquée par l'approche « système ». Les niveaux de dégâts observés en pré-récolte restent cependant très faibles.

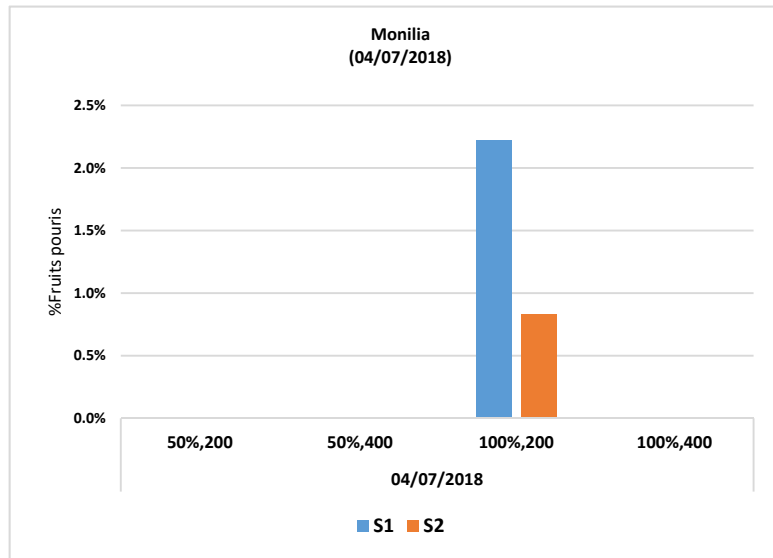


Figure 16: Pourcentage de dégâts liés aux Monilioses au verger sur les différentes modalités de l'essai factoriel (100% irrigation vs 50% irrigation ; 400 fruits vs 200 fruits) à la date où les symptômes étaient à leur maximum, Ecopêche, INRA Avignon 2018.

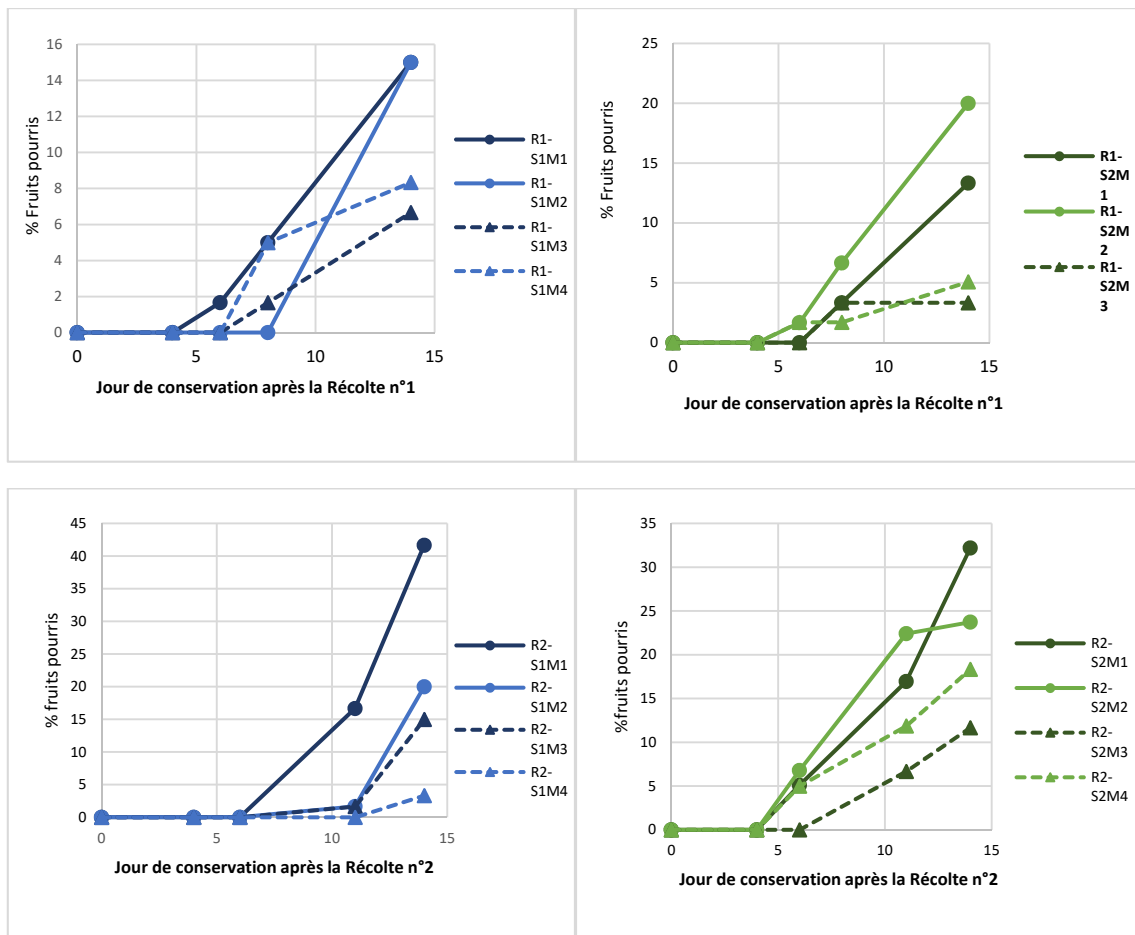


Figure 17: Pourcentages de dégâts liés au Monilia en conservation, sur les différentes modalités de l'essai factoriel (M1=100% irrigation, 400 fruits ; M2= 100% irrigation, 200 fruits ; M3= 50% irrigation, 400 fruits ; M4= 50% irrigation, 200 fruits). Système S1 (figure de gauche) et Système S2 (figure de droite). Fruits prélevés lors de la 1^{ère} (R1) et 2^{ème} récolte (R2). Ecopêche, INRA Avignon 2018. (60 fruits/modalité).

II.2.2 Dégâts Monilia en post-récolte

Pendant le test de conservation des fruits, on observe sur le système S1 une apparition des premiers dégâts de pourriture après le 6ème jour de conservation (date R1) et après le 10ème jour de conservation (date R2). Sur S2, l'observation des premiers fruits infectés est légèrement plus précoce (4ème jour de conservation aux 2 dates). L'intensité des dégâts est assez similaire sur les deux stratégies de protection S1 et S2, même si le pourcentage de dégâts semble progresser plus rapidement sur la stratégie S2 caractérisée par l'absence de protection fongicide. La différenciation des modalités Irrigation et Charge devient plus perceptible après 11 jours de conservation. Globalement, il ressort que les modalités les plus irriguées (100% Irrigation soit M1 et M2) ont les pourcentages de fruits pourris les plus élevées pour les 2 dates de récolte par rapport aux modalités peu irriguées (50 % irrigation soit M3 et M4). L'effet charge en fruits est moins distincte et moins stable : par exemple, la modalité conduisant à de plus gros fruits (charge de 200 fruits) est dans certains cas plus affectée par les pourritures (R1 S2M2) et dans d'autres cas les pourcentages de pourriture sont moindre que sur la charge 400 fruits/arbre (R1 et R2 S1M2). Ces résultats de l'effet charge ne permettent pas de vérifier l'hypothèse que les fruits les plus gros pourraient être plus sensibles aux infections occasionnées par les monilioses.

PARTIE 4. Discussion

I. Effet des systèmes économes sur les performances technico-économiques et la qualité des fruits

I.1. Effet des systèmes économes sur les performances

La stratégie de réduction d'intrants et de gestion des systèmes économes n'a pas engendré de différence significative sur la croissance végétative des arbres par rapport au système référent. Par contre, la réduction des produits phytosanitaires a causé une augmentation en pression des bio-agresseurs sur les systèmes économes par rapport au système de référence, sauf pour les monilioses et les forficules. En effet, le nombre de forficules était plus élevé sur S1-REF. Ceci peut s'expliquer par une population initiale beaucoup plus élevée sur ce système du fait des attaques observées les années précédentes. Pour diminuer l'impact de ce bioagresseur, une application de glu (barrière physique) a été réalisée sur S1-REF en même temps que sur les systèmes économes, complétée par une intervention insecticide (DECIS Protech) sur S1-REF. Cet insecticide à base de, deltaméthrine est une des deux matières actives autorisées dans les traitements contre cet insecte (HILAIRE, et al 2016). Son manque d'efficacité pourrait résider dans la sélection de populations résistantes ce qui compromet l'utilisation du produit en question (Brück et *al.*, 2009). La forte présence de forficules dans les arbres du S1-REF explique sans doute en partie une plus forte présence de dégâts liés aux monilioses. Les forficules provoquent des morsures sur les fruits qui favoriseront le développement de la moniliose (Lichou et *al.*, 2001). De même, la faible efficacité de la Glu (pourtant très efficace sur S2-ECO1 et S3-ECO2) pourrait s'expliquer par l'application tardive (4 juin) alors que les forficules étaient déjà installés dans la frondaison. Un piégeage massif aurait peut-être dû être réalisé en complément de la glu au lieu du traitement insecticide.

Sur les deux systèmes économes, l'application de la Glu a donné des résultats satisfaisants, sans doute en raison d'un niveau de population initial très inférieur à celui de S1-REF. Toutefois, cette méthode alternative est assez chronophage et nécessite une main d'œuvre importante. Ceci explique l'absence d'utilisation jusqu'à présent en vergers conventionnels.

Les dégâts liés aux monilioses au verger sont apparus uniquement sur S2-ECO1. Ceci confirme les résultats de Bussi et *al.*, 2015, qui montrent que la modulation du microclimat des fruits grâce à l'architecture et la taille des arbres favorise une augmentation de la résistance des plantes aux monilioses. Cependant si on ne considère que les fruits non blessés,

les pertes exclusivement liées aux monilioses sont assez modérées en 2018, alors que les conditions climatiques étaient plutôt favorables au développement de cette maladie (printemps très pluvieux jusqu'au 12 juin). Le temps chaud et sec de mi-juin à mi-juillet a sans doute freiné le développement d'une forte épidémie. En conservation, les pourcentages des fruits pourris confirment une moindre sensibilité des fruits de S1-REF grâce aux traitements anti-moniliose qui ont déjà diminué le pourcentage des dégâts apparus en pré-récolte. Les pourcentages les plus importants de pertes ont été observés sur S2-ECO1 en raison de l'absence complète de traitement fongicide anti-monilia.

Pour la tordeuse orientale du pêcher, la confusion sexuelle avait assuré une très bonne maîtrise de la 1^{ère} génération (G1), ainsi que sur la G2 et la G3 l'année précédente. Cette année 2018, les dégâts dus à la tordeuse sont légèrement plus importants. Ceci pourrait s'expliquer par un retard dans la date de l'application des diffuseurs par rapport à la période d'accouplement, les diffuseurs devant être posés avant le début de vol des papillons de la première génération, c'est-à-dire vers fin mars-début avril (Lichou et *al.*, 2001).

S3-ECO2 montre les meilleurs résultats de performances agronomiques et technico-économiques. Ils s'expliquent essentiellement par la plus forte densité de plantation du verger. En effet, cette caractéristique permet d'acquérir rapidement un meilleur niveau de production, mais risque de devenir négative en cas d'un vieillissement prématuré des vergers (Loreti et Massai, 2002). Par ailleurs, la production peut devenir irrégulière avec une forte diminution de production dans les parties basses de l'arbre (Blanc et *al.*, 2003). En revanche, le système S3-ECO2 a conduit à une augmentation des coûts de production liée à une augmentation du temps de travail en relation avec l'éclaircissage et le temps de récolte, ainsi qu'à l'utilisation de méthodes alternatives (application manuelle de glu, prophylaxie visant à supprimer des foyers de pucerons). De plus, la densité de plantation élevée augmente le temps de taille à cause de la croissance végétative qui est plus importante dans les vergers à haute densité (Loreti et Massai, 2002 ; Blanc et *al.*, 2003). Ces résultats économiques montrent que les performances de S3-ECO2 sont pour l'instant plus avantageuses que sur les autres systèmes. Mais, en vue d'une possible diminution de productivité et d'une augmentation de charges de main d'œuvre, cette tendance pourrait s'inverser dans les prochaines années. En outre, les calculs économiques actuels ne prennent pas en compte les coûts d'amortissement liés à la plantation qui sont supérieurs dans un système à haute densité (DeJong et *al.*, 1994).

I.2 Effet des systèmes économes sur la qualité des fruits

Malgré l'augmentation de la productivité des systèmes économes, l'indice réfractométrique garde un très bon niveau, signe d'une excellente qualité des fruits. Le pilotage de l'irrigation sur les systèmes économes a permis d'augmenter légèrement la qualité liée au caractère sucré des fruits caractérisé par l'indice réfractométrique. Une réduction de l'irrigation perturbe l'équilibre de l'entrée/sortie de l'eau dans les fruits. En effet, cela réduit l'entrée d'eau, ce qui peut diminuer le poids frais des fruits et concentrer les composés solubles, et par la suite limiter le phénomène de dilution des sucres (Génard et *al.*, 2010). Ceci justifie le caractère plus sucré des fruits. Cependant, d'après nos résultats, la réduction d'eau d'irrigation n'a pas impacté la croissance des fruits et leurs poids frais. Selon Goday et Pagés (2004), les plantes conservent leur potentiel hydrique intracellulaire dans de légères conditions de sécheresse grâce à un ajustement osmotique dû à l'accumulation de sucre sans altérer les fonctions des protéines et la croissance des fruits.

Nos résultats montrent que les systèmes économes ont des pourcentages de fruits de gros calibres plus élevés que le système de référence, à cause de la bonne gestion de la charge en fruit. Morandi et *al.*, (2008) ont montré qu'une charge en fruits plus faible augmente simultanément le poids frais des fruits et la teneur en sucre. La taille des fruits peut être aussi influencée par le stress hydrique pendant la croissance des fruits (Mercier et *al.*, 2009). Ceci confirme que la charge en fruits et l'irrigation sont deux facteurs majeurs de la détermination de la qualité de fruits. Un compromis entre les deux facteurs est nécessaire pour avoir à la fois un fruit gros et sucré.

II. Effets des facteurs irrigation et charge en fruits sur la qualité des fruits et la sensibilité aux maladies de conservation

II.1 Effets sur la qualité des fruits

La réduction à 50% d'eau d'irrigation a impacté négativement la croissance des fruits, et par la suite le pourcentage des calibres A et plus et le rendement commercialisé. La croissance du fruit résulte essentiellement des importations d'eau et d'assimilats par les flux xylémiens et phloémiens et des pertes d'eau par transpiration (Wu et *al.*, 2003). Les flux d'eau et d'assimilats sont contrôlés par des gradients de potentiels hydriques. Les études montrent qu'un stress hydrique induit des modifications des relations hydriques se traduisant par une diminution du potentiel hydrique et du potentiel osmotique. Cela conduit, selon Tardieu et *al.*, 2011, à une diminution de l'expansion tissulaire et de l'accumulation de biomasse, et à une réduction du

nombre des cellules des fruits. En situation de déficit hydrique, il y a également une limitation du carbone assimilé en raison de la fermeture stomatique. Génard et *al.*, (2008) ont montré que la croissance des fruits, plus spécifiquement l'accumulation de biomasse, était directement liée à l'assimilation de CO₂.

La croissance des pêches augmente avec le nombre de feuilles par fruit (Souty et *al.*, 1999), ce qui justifie les meilleurs résultats en croissance et en calibre des fruits à faible charge (200 fruits/arbres) par rapport aux arbres portant 400 fruits. L'éclaircissage favorise donc une meilleure disponibilité en assimilats carbonés en augmentant la surface de feuilles par fruit et la photosynthèse. Des travaux ont montré un effet positif de la charge en fruits sur la photosynthèse foliaire chez de nombreuses espèces fruitières, comme la pomme (Palmer, 1992), le raisin (Naor et *al.*, 1995), la pêche (Ben Mimoun et *al.*, 1996) et la mangue (Urban et *al.*, 2002). Cet effet est attribué à la régulation de la photosynthèse par la force de puits, associée à l'accumulation des assimilats carbonés dans la feuille (Foyer, 1988).

Parmi les différentes modalités de l'essai factoriel, seulement la modalité irrigation a impacté significativement la teneur en sucre. L'indice réfractométrique (% Brix) est plus fort à 50% d'irrigation. Le déficit hydrique a un effet négatif sur la teneur en eau dans la pulpe diminuant ainsi la dilution des sucres dans le fruit. Il provoque aussi la diminution de la concentration de saccharose (Plénet et *al.*, 2010). Cette diminution est partiellement compensée par l'augmentation des autres sucres simples, surtout le fructose, ayant un pouvoir sucrant supérieur (Fischer et *al.*, 2012).

Deux hypothèses sont proposées pour expliquer cette diminution de saccharose. La première hypothèse suggère que les plantes stressées par l'eau retardent le transport du saccharose, produit par les organes sources, en raison d'une augmentation de la viscosité de la solution transférée (Zwieniecki et *al.*, 2004). Les variations du potentiel de pression du xylème ont un effet marqué sur les taux de mouvement des glucides dans le phloème (Boersma et *al.*, 1991). Ceci provoque l'hydrolyse du saccharose stocké dans la vacuole de la cellule du fruit, en favorisant la présence des sucres simples à valeur plus sucrée. La deuxième hypothèse propose que la faible croissance des fruits moins irrigués affecte la force des puits, qui dépend de la taille du fruit, et par la suite affecte l'allocation des sucres des sources vers le fruit.

Contrairement aux données de la littérature, l'effet charge en fruits n'a pas influencé la concentration en sucres solubles dans les fruits dans notre essai. Sur le pêcher (Morandi et *al.*, 2008) ou sur le pommier (Link, 2000), une charge en fruits plus faible a augmenté

simultanément le poids frais des fruits et la teneur en sucre, en réduisant la compétition pour le carbone lors des interactions sources – puits. Nos résultats peuvent peut-être s’expliquer par l’insuffisance de la différenciation entre les deux niveaux de charge choisis et/ou une différenciation un peu trop tardive (22 mai) ne permettant pas l’expression de l’effet charge sur la teneur en sucres solubles.

II.2 Effets sur la sensibilité aux maladies de conservation

Nos résultats montrent qu’une forte irrigation et une faible charge en fruit favorisent l’apparition de dégâts liés aux monilioses en pré-récolte. Ces deux facteurs favorisent fortement sur la croissance des fruits et cela peut engendrer l’apparition de microfissures à la surface des fruits, voie d’entrée des monilioses (Gibert et *al.*, 2009). Il est désormais bien connu dans la littérature qu’un fort éclaircissage des arbres et une irrigation abondante sont des conditions très favorables au développement de l’infection (Gibert et *al.*, 2007 ; Mercier et *al.*, 2009). En effet, ils entraînent une augmentation de la pression interne du fruit par le flux d’eau, et par la suite, la limite élastique maximale de la cuticule pourrait ainsi être dépassée. Ceci provoque l’expansion de la surface du fruit et l’apparition des microfissures. De plus, la densité des fissures cuticulaires s’est avérée positivement liée au poids frais des fruits (Gibert et *al.*, 2009).

En conservation, nos résultats confirment les résultats de Gibert et al 2007, sur l’efficacité de la gestion hydrique sur le développement des maladies de conservation. Dans notre cas, l’effet irrigation sur le pourcentage de fruits infectés est nettement plus important que l’effet de charge, ce qui peut être dû à l’insuffisance de la différenciation en nombre de fruits dans ce facteur. La date d’apparition des premières pourritures liées aux monilioses semble dépendre du niveau de protection fongicide des fruits. Grâce aux traitements anti-monilioses, le système S1 s’avère plus d’efficace en retardant l’apparition de pourriture lors de la conservation et en réduisant le pourcentage de fruits infectés. Cependant, les différences en intensité ne sont pas très marquées entre les deux systèmes alors que 3 interventions fongicides ont été utilisées sur S1 par comparaison à 0 fongicide sur S2. Ceci semble confirmer l’intérêt de combiner différentes méthodes alternatives pour réduire la sensibilité des fruits aux monilioses (Mercier et *al.*, 2009 ; Bussi et *al.*, 2015) et ainsi permettre une réduction d’usage des fongicides.

Conclusion

L'expérimentation système du projet Ecopêche, Inra Avignon, permet de distinguer des grandes tendances en termes d'évolution des performances sur les systèmes innovants et de mettre en avant des classes de pratiques associées à certaines performances. Aussi, elle a permis de rentrer dans les détails de la conception des systèmes et de comprendre finement les relations entre les performances et l'état général du verger. Le suivi de l'essai a mis en avant l'importance de l'utilisation des leviers alternatifs dans la gestion des bioagresseurs. La combinaison de pratiques (réduction des pesticides et des quantités d'eau apportées au verger) a réduit significativement les pertes et à améliorer la qualité des fruits. L'analyse met également en avant l'importance du choix de la structure initiale et de la forme fruitière du verger. Le système Econome planté à haute densité et selon une forme fruitière simple à gérer présente pour l'instant les meilleurs résultats avec moins de pertes dues au monilia. L'objectif principal de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires a largement atteint la barre symbolique des 50 % d'IFT comme défini dans le plan Ecophyto. Les résultats économiques sont également stables et positifs sur plusieurs années de l'essai, associées à une réduction des intrants grâce à une meilleure gestion de l'irrigation et la fertilisation. Par contre, l'évaluation des systèmes de culture pérenne doit être réalisée sur des durées de temps longues (dizaine d'années) pour intégrer la période d'installation du verger et dans l'idée, au minimum 5 à 6 années de pleine production (Simon *et al.*, 2012 ; Plénet et Simon, 2015).

Dans la suite du projet, Il serait intéressant de voir si le dispositif Ecopêche pourrait évoluer vers l'évaluation de services ou d'aspects agro-écologiques. Les systèmes seraient alors évalués en fonction de leurs services globaux à travers des variables indicatrices de services ou de fonctions écosystémiques (séquestration du carbone, biodiversité, fertilité des sols...) et non seulement en terme de production.

Les résultats de l'essai factoriel viennent de confirmer les effets positifs des facteurs charge en fruits et irrigation sur la croissance et l'élaboration de la qualité des fruits et sur leurs impacts sur la sensibilité des fruits aux monilioses en pré et en post-récolte. Il paraît en effet intéressant d'utiliser la synergie d'effet liée à l'irrigation sur l'augmentation de la qualité des fruits et la réduction de la sensibilité aux monilioses, tout en essayant de ne pas basculer sur ses effets négatifs (perte de rendement, de calibres et de la valeur marchande des fruits), ce qui implique un pilotage précis visant à rechercher ces compromis. De même, malgré une certaine hétérogénéité des effets de la charge en fruits, il ressort qu'une bonne maîtrise de la gestion du nombre de fruits par arbre est indispensable pour trouver le bon compromis entre le poids moyen des fruits, leur qualité et leur susceptibilité aux infections par les monilioses, leur valeur marchande et le rendement commercialisable.

Bibliographie

- Bass, C., Puinean, A. M., Zimmer, C. T., Denholm, I., Field, L. M., Foster, S. P., Gutbrod, O., Nauen, R., Slater, R., Williamson, M. S. (2014). The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51, 41-51.
- Blanc, P., Arregui, M., Belluau, E. (2003). Les formes de conduite du pêcher : 15 ans d'expérimentation à la SERFEL. SERFEL, Saint Gilles, France.
- Behboudian, M.H., Marsal, J., Girona, J. and Lopez, G. (2011). Quality and yield responses of deciduous fruit to reduced irrigation. *Hort. Rev.* 38:149-189
- Ben Mimoun, M., Longuenesse, J. J. and Génard, M. (1996). Pmax as related to leaf fruit ratio and fruit assimilate demand in peach. *Journal of Horticultural Science* 71, 767- 775.
- Boersma L, Lindstrom FT, Childs SW. (1991). Model for steady state coupled transport in xylem and phloem. *Agronomy Journal*. 83:401–408.
- Borsani J, Budde CO, Porrini L, Lauxmann MA, Lombardo VA, Murray R, Andreo CS, Drincovich MF, Lara MV. (2009). Carbon metabolism of peach fruit after harvest: changes in enzymes involved in organic acid and sugar level modifications. *J Exp Bot* 60: 1823–1837
- Brück, E., Elbert, A., Fischer, R., Krueger, S., Kuhnhold, Gutbrod, n. A. M., Nauen, R., Niebes, J.-F., Reckmann, U., Schnorbach, H.-J., Steffens, R. and van Waetermuelen, X. (2009). Movento®, an innovative ambimobile insecticide for sucking insect pest control in agriculture: Biological profile and field performance. *Crop Protection*, 28, 838–844
- Bussi C., Plénet D., Merlin F., Guillermin A., Mercier V. (2015). Limiting brown rot incidence in peach with tree training and pruning. *Fruits* 70(5): 303-309.
- Cotte V., Seni G., Hilaire C. (2009). Pour connaître les attentes des consommateurs : la cartographie externe des préférences. Application à la pêche dans le cadre du projet ISAFRUIT. *Infos-CTIFL* 253, 19-23.
- Crétin L., Triquenot A. (2018). Apports de produits phytopharmaceutiques en arboriculture : nombre de traitements et indicateur de fréquence de traitements. Campagnes agricoles 2015 et 2012. *Agreste Les Dossiers*, SSP Bureau des statistiques végétales et animales, Ministère Agriculture, n° 43, août 2018, 27 p.
- Danner, M. A., Sasso, S. A. Z., Medeiros, J. G. S., Marchese, J. A., & Mazaro, S. M. (2008). Indução de resistência à podridão-parda em pêssegos pelo uso de eliciadores em pós-colheita. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(7), 793-799.
- Dardick, C. D., Callahan, A. M., Chiozzotto, R., Schaffer, R. J., Piagnani, M. C., & Scorza, R. (2010). Stone formation in peach fruit exhibits spatial coordination of the lignin and flavonoid pathways and similarity to *Arabidopsis* dehiscence. *BMC Biology*, 8(1), 13.
- De Oliveira Lino L. (2016). Etude de la variabilité génétique de la sensibilité à la pourriture brune au cours du développement du fruit chez la pêche en lien avec l'évolution des caractéristiques physiques et biochimiques du fruit. Doctorat : Sciences agronomiques, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.
- DeJong, T.M., Day, K.R., Doyle, J.F., Johnson, R.S. (1994). The Kearney Agricultural Center Perpendicular "V" (KAC-V) orchard system for peaches and nectarines. *Horttechnology* 4, 362–367.
- Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J.-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M.-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L. (2012). Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle, *Innovations agronomiques* n°20. 49-78, Colloque RMT Systèmes de cultures innovantes du 21 octobre 2011.
- El-Sharkawy I, Kim WS, El-Kereamy A, Jayasankar S, Svircev AM, Brown DCW. (2007). Isolation and characterization of four ethylene signal transduction elements in plums (*Prunus salicina* L.). *J Exp Bot* 58: 3631–3643.
- Escobar-Gutiérrez AJ, Gaudillère J.P. (1996). Distribution, métabolisme et rôle du sorbitol chez les plantes supérieures. *Synthèse*. Agronomie, EDP Sciences, pp.281-296.
- Fan, J.-Y., Guo, L.-Y., Xu, J.-P., Luo, Y., & Michailides, T. J. (2010). Genetic Diversity of Populations of *Monilinia fructicola* (Fungi, Ascomycota, Helotiales) from China. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 57(2), 206-212.
- FAOSTAT (2016). Database of food and agriculture organization of the United Nations.
- Faust M, Timon B. (1995). Origin and dissemination of peach. *Hortic Rev.*, 17: 331-379.
- Fischer G, Almanza M, Pedro J, Ramirez F. (2012). Source-sink relationships in fruit species: A review. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(2), 238-253.
- Foyer, C. H. (1988). Feedback inhibition of photosynthesis through source-sink regulation in leaves. *Plant Physiology* 26, 483-492.
- Gaillard JP, Cassin J, Arias N, Ciccoli H. (1976). Contribution à l'étude de l'échantillonnage des agrumes. I- Monographie de la récolte d'un clémentinier. *Fruits* 31, 31-59.
- Génard M. (1992). Influence du nombre de feuilles et de la répartition des fruits sur la production et la qualité des pêches. *Canadian Journal of Plant Science* 72: 517-525.
- Génard M., Bruchou C., Souty M. (1991). Variabilité de la croissance et de la qualité chez la pêche (*Prunus persica* L Batsch) et liaison entre croissance et qualité. *Agronomie*, EDP Sciences, 11 (10),829-845.

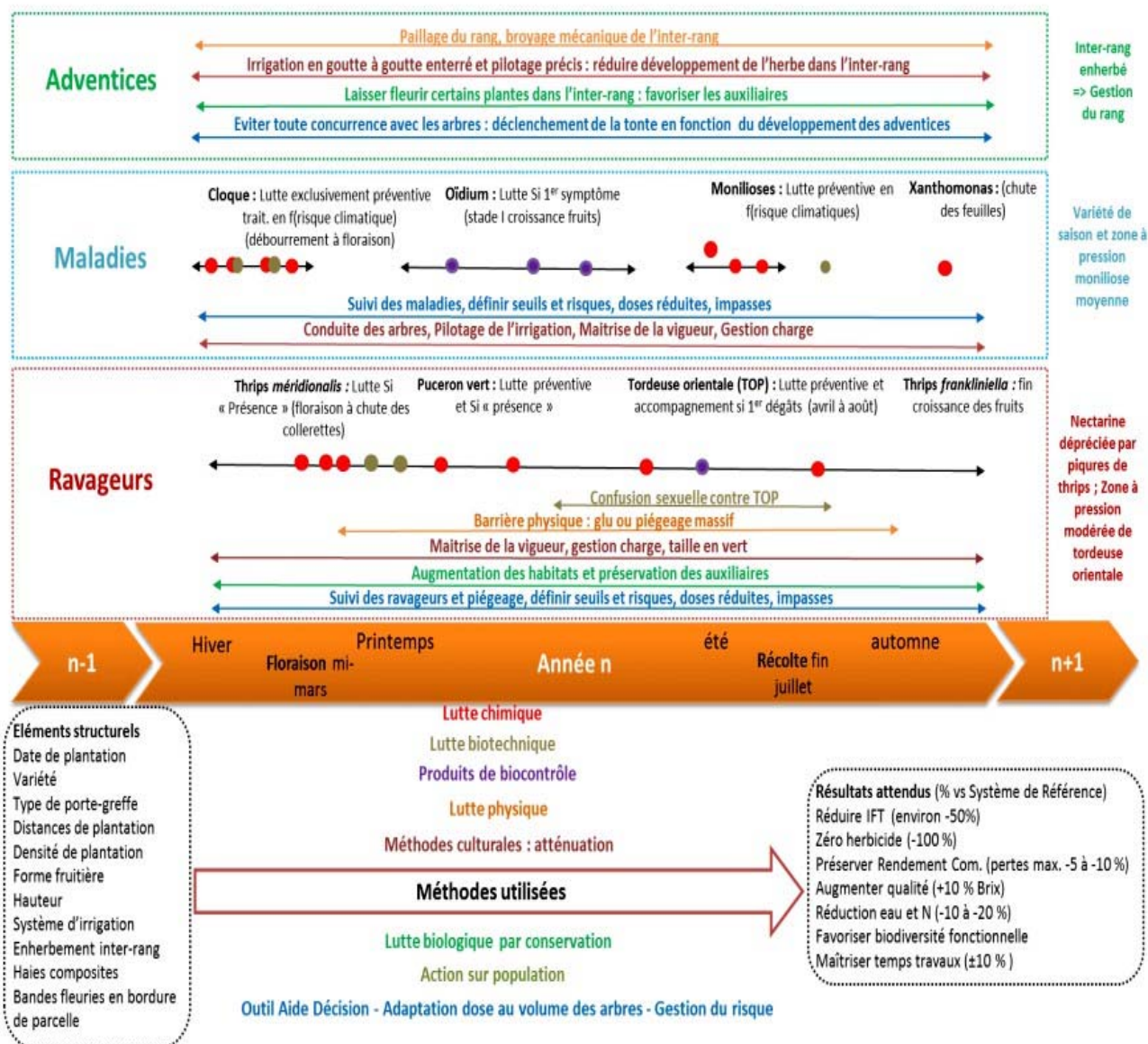
- . Génard M, Robin C, Gautier H, Massot C, Bénard C, Larbat R, Bertin N, Le Bot J, Adamowicz S, Bourgaud F. (2010). Elaboration de la qualité du fruit : composition en métabolites primaires et secondaires. *Innovations Agronomiques* 47-57.
- . Génard, M., Dauzat, J., Frank, N., Lescourret, F., Moitrier, N., Vaast, P., Vercambre, G., 2008. Carbon allocation in fruit trees: from theory to modelling. *Trees* 22, 269-282.
- . Gibert C., Chadœuf 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 Pathology* 58(6): 1021-1031.
- . Gibert C, Chadœuf J, Vercambre G, Génard M, Lescourret F, (2007). Cuticular cracking on nectarine fruit surface: spatial distribution and development in relation to irrigation and thinning. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 132, 583-91.
- . Goday, A. and M. Pagés. (2004). Proteínas de respuesta al estrés hídrico. 791-831. In: Reigosa, M., N. Pedrol, and A. Sánchez (eds.). *La ecofisiología vegetal. Una ciencia de síntesis*. Editorial Thomson, Madrid.
- . Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.M., Plénet D., Picault S., Faloya V. (2017). Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation "système" pour les cultures assolées et pérennes, GIS PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique, 172.
- . Henry A., Toupet A.L., Deytieux V., Reau R. (2012). Recueil et analyse critique des règles de décision pour la protection des cultures, Préfiguration du dispositif DECI Ecophyto, 490 p.
- . Hilaire C., Giauque P. (2003). *Le pêcher*. Eds. CTIFL, 281.
- . Hilaire C., Ruesch J. (2012). Conception et développement d'un système innovant de production intégrée en vue de l'amélioration des performances environnementales et économiques : espèce modèle pêcher. *Innovations Agronomiques* 25, 231-241.
- . Hilaire C, Ruesch J, Grall Y, Cellier M. (2016). *Le forficule : un insecte auxiliaire et ravageur*" Infos-CTIFL Num 318, 48-52.
- . Laget E., Guadagnini M., Plénet D., Simon S., Assié G., Billote B., Borioli P., Bourguin B., Fratantuono M., Guérin A., Hucbourg B., Lemarquand A., Loquet B., Mercadal M., Parveaud C.-E., Ramade L., Rames M.-H., Ricaud V., Rousselou C., Sagnes J.-L., Zavagli F (2015). Guide pour la conception de systèmes de 55 productions fruitières économes en produits phytopharmaceutiques. GIS Fruits - Ministère de l'Agriculture, Paris, 264 p.
- . 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*, 25(3), 519-530.
- . Lichou, J., Mandrin, J.-F., Breniaux, D., (2001). Protection intégrée des fruits à noyau. Eds CTIFL, Paris, 271 p.
- . Link H. 2000. Significance of flower and fruit thinning on fruit quality. *Journal of Plant Growth Regulation* 31, 17-26.
- . Lombardo, V. A., Osorio, S., Borsani, J., Lauxmann, M. A., Bustamante, C. A., Budde, C. O. Drincovich, M. F. (2011). Metabolic Profiling during Peach Fruit Development and Ripening Reveals the Metabolic Networks That Underpin Each Developmental Stage. *Plant Physiology*, 157(4), 1696-1710.
- . Loreti, F. and Massai, R. (2002). The high-density peach planting system: present status and perspectives. *Acta Horti* 592 : 377-390.
- . Mercier V., Bussi C., Lescourret F., Génard M. (2009). Effects of different irrigation regimes applied during the final stage of rapid growth on an early maturing peach cultivar. *Irrigation Science* 27(4): 297-306.
- . Miller, A. N., Walsh, C. S., & Cohen, J. D. (1987). Measurement of Indole-3-Acetic Acid in Peach Fruits (*Prunus persica* L. Batsch cv Redhaven) during Development. *Plant Physiology*, 84(2), 491-494.
- . Mischler P., Hocdé H., Triomphe B., Omon B. (2008). Conception de systèmes de culture et de production avec des agriculteurs : partager les connaissances et les compétences pour innover. In : *Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer*. Reau R. (ed.), Doré T. (ed.). Dijon : Educagri éd., 71-89.
- . Monestiez P, Habib R, Audergon JM. (1989). Estimation de la covariance et du covariogramme pour une fonction aléatoire à support arborescent : application à l'étude des arbres fruitiers. In: *Geostatistics (M Armstrong, eds)* Kluwer Acad Publ, 1, 39-56.
- . Monet R. (1983). *Le pêcher : génétique et physiologie*. INRA Eds, 129.
- . Morandi B, Grappadelli LC, Rieger M, Lo Bianco R. (2008). Carbohydrate availability affects growth and metabolism in peach fruit. *Physiologia Plantarum* 133, 229-241.
- . Naor, A., Klein, I. Doron, I. (1995). Stem water potential and apple size. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120, 577-582.
- . Palmer, J. W. (1992). Effects of varying crop load on photosynthesis, dry matter production and partitioning of Crispin/M.27 apple trees. *Tree Physiology* 11, 19-33.
- . Pavel E.W., DeJong TM. (1993). Source- and sink-limited growth periods of developing peach fruits indicated by relative growth rate analysis. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 118: 820-824.
- . Plénet D., Giauque P., Navarro E., Millan M., Hilaire C., Hostalnou E., Lyoussoufi A., Samie J.-F., 2009. Using on-field data to develop the EFI information system to characterise agronomic productivity and labour efficiency in peach (*Prunus persica* L. Batsch) orchards in France. *Agricultural Systems* 100, 1-10.
- . Plénet D., Simon S. (2015). Une démarche de conception et d'évaluation de systèmes de culture pour des vergers plus durables. *Sciences Eaux & Territoires* 2015/1 (Numéro 16), 58-63.

- . Plénet D, Simon S, Vercambre G, Lescourret F. (2010). Systèmes de culture en arboriculture fruitière et qualité des fruits. *Innovations Agronomiques* 9, 85-105.
- . Reau R., Meynard J.M., Robert D., Gitton C. (1996). Des essais factoriels aux essais “conduite de culture”. In : *Expérimenter sur les conduites de cultures: un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Ministère de l'agriculture, Acta, Comité potentialités, 52-62.
- . Reau R. et Doré T. (2008). Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? *Educagri éditions*, 175.
- . Reynolds AG. (1989). Riesling grapes respond to cluster thinning and shoot density manipulation. *J Am Soc Hortic Sci* 114, 364-368.
- . Rieger, M. (2006). *Introduction to fruit crops*. New York: Food Products Press.
- . Sebillotte M. (1990). « Systèmes de culture, un concept opératoire pour l'agronome » in COMBE L., PICARD D. (eds), *Les systèmes de culture*, Paris, INRA, coll. p. 165-196.
- . Simon S., Alaphilippe A., Brun L., Gros C. (2012). Performances agronomiques et environnementales en verger de pommiers : 8 années d'expérimentation système. In *Journées Techniques Légumes & Cultures Pérennes Biologiques*, (11-12-2012 / 13-12-2012) Avignon (FRA).
- . Souty, M., Génard, M., Reich, M. et Albagnac, G. (1999). Influence de la fourniture en assimilats sur la maturation et la qualité de la pêche (*Prunus persica* L. 'Suncrest'). *Can. J. Plant Sci.* 79: 259–268.
- . Szódi, S. and Z. Rozsnay (2008). Susceptibility of sour cherry cultivars to isolates of *Monilia laxa* (Ehrenbergh) Saccardo et Voglino. *International Journal of Horticultural Science* 14((1-2)): 83-87.
- . Tardieu F., Granier C., Muller B. (2011). Water deficit and growth. Co-ordinating processes without an orchestrator *Curr. Opin. Plant Biol.* 14 283–28910.
- . Tonutti P, Bonghi C, Ruperti B, Tornielli GB, Ramina A. (1997). Ethylene evolution and 1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase gene expression during early development and ripening of peach fruit. *J Am Soc Hortic Sci* 122: 642–647.
- . Trainotti L, Zanin D, Casadoro G. (2003). A cell wall-oriented genomic approach reveals a new and unexpected complexity of the softening in peaches. *J Exp Bot* 54: 1821–1832.
- . Underhill S.J.R., and Simons D.H. (1993). Lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp desiccation and the importance of postharvest micro-cracking. *Scientia Horticulturae* 54: 287-294.
- . Urban, L., Bertheuil, F. and Léchaudel, M. (2002). A coupled photosynthesis and stomatal conductance model for mango leaves. *Acta Horticulturae* 584, 81-88.
- . Warren Wilson J. (1972). Control of crop processes In: Rees AR, Cockshull KE, Hand DW, Hurd RG, eds. *Crop processes in controlled environments*. London: Academic Press, 7-30.
- . Wu BH, Génard M, Kervella J, Li SH, Laurent R. (2003). Relationship between skin speckle, soluble solids content and transpiration rate in nectarines. *European Journal of Horticultural Science* 68, 83-85.
- . Xu X.-M., Robinson J.D., Berrie A.M., and Harris D.C. (2001). Spatio-temporal dynamics of brown rot (*Monilinia fructigena*) on apple and pear. *Plant Pathology* 50: 569-578.
- . Yamaki, S. (2010). *Metabolism and Accumulation of Sugars Translocated to Fruit and Their Regulation* (Vol. 79).
- . Zwieniecki, Maciej A, Peter J. Melcher, Taylor S. Feild And N. Michele Holbrook. (2004) A potential role for xylem–phloem interactions in the hydraulic architecture of trees: effects of phloem girdling on xylem hydraulic conductance. *Tree Physiology* 24, 911–917.

PARTIE ANNEXES

ANNEXE I

Schéma décisionnel d'un système de culture économe en produits phytosanitaires Ecopêche 2018, Inra Avignon (source Plénet D., EXPE Ecophyto)



ANNEXE II

Leviers d'action utilisables en pêche-nectarine pour contrôler les bioagresseurs et note d'intensité d'utilisation (de 1 à 4) Ecopêche 2018, Inra Avignon : (0 : absence d'utilisation ; 1 : levier utilisé dans le système mais avec une intensité correspondant aux bonnes pratiques ; 2 : levier utilisé mais avec une intensité plus importante mais dont l'efficacité ne permet cependant pas de garantir une réduction d'usage de la lutte chimique ; 3 : levier utilisé avec une intensité et/ou une efficacité permettant soit de se substituer à la lutte chimique soit de réduire la lutte chimique venant en complément)

Catégories de Cibles	Type de levier d'action	Nom et code	S1-REF	S2-Eco1	S3-Eco2
Adventices	Physique	A_Mécanique (travail du sol)	0	0	0
		A_Paillage du sol	0	3	3
	Compétition	A_Enherbement du rang + tonte	0	0	0
	Chimique	A_Herbicide	3	0	0
Maladies	Contrôle génétique	M_Contrôle génétique_Variété_PG	1	1	1
	Méthodes culturales	M_Méthodes culturales_Action population (suppression organes touchés)	0	1	2
		M_Méthodes culturales_Action population_Prophylaxie (suppression Momies, 1er fruits touchés)	1	2	2
		M_Méthodes culturales_Atténuation_Conduite arbres (aération)	1	1	2
		M_Méthodes culturales_Atténuation_Conduite arbres (Vigueur) par ferti + interventions	1	2	2
		M_Méthodes culturales_Atténuation_Conduite arbres (Eclaircissage manuel)	1	1	2
		M_Méthodes culturales_Atténuation_Conduite arbres (Taille en vert / égourmandage)	1	1	1
		M_Méthodes culturales_Atténuation_Gestion irrigation RDI	1	3	3
	Produits de biocontrôle	M_Produits de biocontrôle	0	3	3
	Efficience	M_Efficience_Réduction dose SA	2	2	2
M_Efficience_OAD + Raisonnement + prise de risque		1	3	3	
Ravageurs	Contrôle génétique	R_Contrôle génétique_Variété_PG	1	1	1
	Physique	R_Lutte physique_Filets	0	0	0
		R_Lutte physique_Argile	0	0	0
		R_Lutte physique_Glu	3	3	3
	Lutte biotechnique	R_Lutte Biotechnique_Confusion	3	3	3
		R_Lutte Biotechnique_Piégeage Massif	0	0	0
		R_Lutte Biotechnique_Piégeage Massif	0	0	0
	Lutte biologique	R_Lutte Biologique_par Conservation	1	2	2
		R_Lutte Biologique_par lacher inoculatif	0	0	0
		R_Lutte Biologique_par lacher inondatif	0	0	0
		R_Lutte biologique_par Produits de biocontrôle (micro-organismes Bt, virus...)	0	3	3
	Méthodes culturales	R_Méthodes culturales_Action population_Prophylaxie (suppression premiers foyers ravageurs)	1	1	1
		R_Méthodes culturales_Atténuation_Conduite arbres (Vigueur) par ferti + interventions	1	2	2
		R_Méthodes culturales_Atténuation_Conduite arbres (Eclaircissage manuel) : forficules, TOP	1	1	2
	Produits de biocontrôle	R_Produits de biocontrôle (autres que Biologique...)	0	2	2
	Efficience	R_Efficience_Réduction dose SA	0	0	0
R_Efficience_OAD + Raisonnement + prise de risque		1	3	3	
Nombre de note avec un niveau correspondant à :					
	0		13	9	9
	1		14	8	4
	2		1	6	10
	3		3	8	8

ANNEXE III

Produits phytopharmaceutiques utilisés sur les différents systèmes du dispositif Inra Avignon pour la campagne Ecopêche 2018. (Quantités de produits appliqués en L ou kg/ha).

Catégories Produits	cible 1	date	Produit Commercial	Substance active	S1	S2	S3
herbicide	Adventices	27/04/2018	GLYCUT	glyphosate 360 g/L	2.31		
		12/06/2018	CHARDOL 600	2,4 D (sels d'amines)	0.64		
			GLYCUT	glyphosate 360 g/L	2.4		
		30/08/2018	BASTA F1	Glufosinate d'ammonium	2		
fongicide	Cloque(s)	29/01/2018	BOUILLIE BORDELAISE RSR DISPERS	Cuivre du sulfate de cuivre	12.5	12.5	12.5
		09/02/2018	NORDOX 75 WG	Cuivre de l'oxyde cuivreux	3.3		
		23/02/2018	ORDOVAL	Thirame	2.5	2.5	2.5
		07/03/2018	SYLLIT	Dodine		2.25	2.25
			ORDOVAL	Thirame	2.5		
		26/03/2018	SIGMA DG	captane	3		
			ORDOVAL	Thirame		2.5	2.5
	Oidium(s)	19/04/2018	NIMROD	Bupirimate	0.6		
		18/05/2018	CITROTHIOL DG	Soufre mouillable		5	5
			NIMROD	Bupirimate	0.6		
	Tavelure(s)	20/06/2018	SIGMA DG	captane	1.8	1.8	
	Monilioses	28/06/2018	LUNA Experience	Tébuconazole + fluopyram	0.5		
		05/07/2018	LUNA Experience	Tébuconazole + fluopyram			0.5
			SIGNUM	Pyraclostrobin + Boscalid	0.75		
		13/07/2018	KRUGA	Fenbuconazole	2		
	Bacterioses	15/10/2018	BOUILLIE BORDELAISE RSR DISPERS	Cuivre du sulfate de cuivre	6.25	6.25	6.25
	insecticide	Chenilles foreuses des fruits	17/04/2018	RAK 5	(vide)	500	500
18/05/2018			PROCLAIM	Emamectine benzoate	2		
08/06/2018			CORAGEN	chlorantraniliprole	0.175		
			DELFIN	Bacillus thuringiensis var. kurstaki SA-11		1	1
05/07/2018			DECIS protech	Deltaméthrine	0.83		
		DELFIN	Bacillus thuringiensis var. kurstaki SA-11		1	1	
Pucerons		23/02/2018	TEPPEKI	Fonicamide	0.14		
		19/04/2018	MOVENTO	Spirotetramat	1.5		
Stad. Hivern. Ravageurs		23/02/2018	EUPHYTANE GOLD	huile de vaseline		20	20
Thrips		26/03/2018	KLARTAN	Taufluvallinate	0.6		
Autre (moll)	Glu	04/06/2018	RAMPASTOP	Glu	9	9	14
	Limaces et escargots	09/05/2018	IRONMAX PRO	Phosphate ferrique		3.5	3.5
			METAREX INO	Métaldéhyde 4%	2.5		

ANNEXE IV

Éléments du bilan hydrique sur les différentes modalités de l'essai factoriel imbriqué à l'essai systèmes de culture du site Inra Avignon. Période allant du 22 mai 2018 (début de l'essai) au 31/07/2018 (fin de l'essai factoriel).

Modalités	Obj. hydrique	ETP	Kc.ETP	Pluie	Réserve eau sol	déficit hydrique	Irrigation	déficit après irrigation	en % de la demande
S1-M1 et S1-M2	100% Kc.ETP	430	471	108	80	-283	268	-14	97%
S1-M3 et S1-M4	50% Kc.ETP	430	471	108	80	-283	76	-206	56%
S2-M1 et S2-M2	100% Kc.ETP	430	471	108	80	-283	189	-93	80%
S2-M3 et S2-M4	50% Kc.ETP	430	471	108	80	-283	55	-228	52%

Méthode de calcul du bilan hydrique Le raisonnement des apports d'eau est basé sur le calcul du bilan hydrique à partir des informations suivantes :

Quantité d'eau à apporter par irrigation $j = Kc_j * ETP_j + Drainage_j - (Pluie_j + RU_{j-1})$

- la pluviométrie (P en mm)
- l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est calculée à partir de données météorologiques comme la vitesse du vent, le rayonnement, etc. La formule la plus utilisée est celle de Penman. Grâce aux réseaux de stations météorologiques, il est maintenant possible de connaître la demande climatique journalière (ETP, exprimée en mm). Par définition, cette demande climatique correspond à celle d'un gazon bien alimenté en eau.
- un coefficient cultural (kc) qui permet de calculer les besoins réels maximaux (ETRM ou $ETM = kc * ETP$) de la culture à chaque période de son cycle végétatif.
- des capacités de réserve en eau du sol définies par la réserve utile (RU, en mm). La réserve utile correspond à la fraction de la quantité d'eau comprise entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. Sur le plan pratique, cette réserve utile est généralement estimée en fonction de la texture du sol et en tenant compte de la profondeur du sol prospectée par les racines (Gautier, 1974 ; Peyremorte, 1980).

ANNEXE V

Indice de Fréquence des Traitements (IFT) selon les catégories de produits et les types d'IFT sur les 3 systèmes de culture à l'Inra Avignon pour la campagne 2018.

Les méthodes de calcul font références à la dose minimale homologuée sur l'espèce (ancienne méthode de calcul). L'IFT usage correspond à la dose de référence pour l'espèce et la cible. Le symbole * signifie que l'IFT de biocontrôle a été multiplié par rapport au système de référence.

Type d'IFT	Systèmes	herbicide	fongicide	insecticide	autre	Total	% vs REF
IFT Total	S1-REF1	1.39	14.92	9.66	0.50	26.47	
	S2-Eco1		7.67	4.50	0.50	12.67	-52.1
	S3-Eco2		7.67	4.50	0.50	12.67	-52.1
IFT "chimique"	S1-REF1	1.39	14.92	8.66	0.50	25.47	
	S2-Eco1		7.00	0.00	0.00	7.00	-72.5
	S3-Eco2		7.00	0.00	0.00	7.00	-72.5
IFT biocontrôle	S1-REF1	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	
	S2-Eco1		0.67	4.50	0.50	5.67	* 5.7
	S3-Eco2		0.67	4.50	0.50	5.67	* 5.7
IFT Usage total	S1-REF1	1.39	11.50	7.00	0.50	20.39	
	S2-Eco1		6.17	4.00	0.50	10.67	-47.7
	S3-Eco2		6.17	4.00	0.50	10.67	-47.7



UNIVERSITÉ DE NANTES

Diplôme : Master
 Mention : Biologie Végétale (BV)
 Parcours : Qualité des Productions Spécialisées

Auteur : Khoulood AHMADI
 Date de naissance* : 09/06/1989

Organisme d'accueil : INARA PACA Avignon
 Adresse : INRA - UR 1115 PSH (Plantes et Systèmes de culture Horticoles), 228 route de l'aérodrome, CS40509
 Domaine Saint Paul - Site Agroparc
 84914 Avignon Cedex 9

Nb pages : 30 Annexe(s) : 5

Année de soutenance : 2018

Maître de stage : Daniel PLENET

Titre français : Effet des pratiques économes en produits phytosanitaires et en intrants sur l'élaboration de la qualité des fruits et leur sensibilité aux monilioses en pré et post-récolte dans les vergers de pêche-nectarine

Titre anglais : The effect of low-inputs practices on the fruits' development, on their quality, and on their susceptibility to brown rot during pre- and post-harvest in peach orchards

Résumé :

L'expérimentation système conduit à l'Inra d'Avignon dans le cadre du projet Ecopêche a pour objectif d'évaluer l'évolution des performances de systèmes de culture innovants caractérisés par un faible usage des produits phytosanitaires et une réduction des intrants en vergers de pêche-nectarine. Pour atteindre ces objectifs, des stratégies basées sur la combinaison cohérente des choix structurels réalisés lors de la plantation des vergers et d'itinéraire techniques mobilisant un ensemble de méthodes alternatives aux pesticides ont été définies puis formalisées en règle de gestion pour piloter l'expérimentation système implantée en 2013. L'analyse des performances de l'expérimentation montre que les systèmes économes sont supérieurs au système de référence sur des ensembles d'indicateurs de performances agronomiques, techniques et économiques. Ainsi, les combinaisons de pratiques innovantes ont conduit à l'amélioration de la qualité des fruits et à réduire sa sensibilité aux Monilioses.

Abstract:

The cropping system experiment conducted at INRA Avignon in the context of the Ecopêche project aims to evaluate the evolution of the performance of innovative cropping systems characterized by a low use of phytosanitary products and a reduction of irrigation and fertilizers in peach-nectarine orchards. To achieve these objectives, strategies based on the coherent combination of the structural choices made during the planting of the orchards and technical itineraries mobilizing a set of alternative methods to the pesticides were defined and then formalized as a management rules to drive the experimental system. The analysis of the performance of the experiment shows that the economics systems are better than the reference system on sets of agronomic, technical and economic performance indicators. Thus, the combinations of innovative practices led to the improvement of fruit quality and reduced brown rot's susceptibility.

Mots-clés : Ecopêche, Expérimentation système, Indicateurs de performances, Moniliose, Irrigation, Qualité de fruits

Key Words: Ecopêche, Cropping system experimentation, Performance indicators, Irrigation, Fruit quality, Brown rot