



**IMPACTS AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX
D'UNE MÉTHODE DE LUTTE PERMETTANT DE RÉDUIRE
FORTEMENT L'USAGE DES PESTICIDES : LES FILETS
ALT'CARPO EN ARBORICULTURE.**

**AGRONOMICAL & ENVIRONMENTAL IMPACTS OF A
PROTECTION METHOD: THE EXCLOSURE NETTING
ALT'CARPO**

Rapport final d'activités

*Yvan Capowiez, INRA, Unité Plantes et systèmes horticoles
Agroparc - Domaine St Paul
84914 AVIGNON Cédex 9*

Date : 13 août 2013

N° de contrat Ministère/ADEME/ONEMA:
Date du contrat : 13 juin 2010 au 13 juin 2013

TABLE DES MATIÈRES

Résumé (en français)	p. 3
Abstract (in English)	p. 4
Synthèse (destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)	p. 5
Contexte général	p. 6
Objectifs généraux du projet	p. 6
Quelques éléments de méthodologie	p. 7
Résultats obtenus	p. 7
Implications pratiques, recommandations, réalisations pratiques	p. 9
Partenariats mis en place, projetés, envisagés	p. 9
Rapport scientifique	p. 14
1. <u>Effets de l'installation des filets Alt'Carpo en verger de pommiers</u> : modification des usages de pesticides et mécanismes d'action	p. 15
1.1. Etat des lieux des pratiques	p. 15
1.2. Contrôle des bioagresseurs	p. 19
1.3. Mécanismes d'action	p. 21
2. <u>Effets agronomiques de l'installation des filets sur verger de pommiers</u>	p. 25
2.1. Modification du microclimat	p. 26
2.2. Effets agrophysiologiques : croissance de l'arbre, rendement et élaboration de la qualité des fruits	p. 28
2.3. Effets des filets sur la régulation naturelle des principaux ravageurs	p. 30
3. <u>Mesures d'impacts environnementaux <i>in situ</i></u>	p. 33
3.1. Mesures de quantité de pesticides dans l'environnement	p. 33
3.2. Impacts environnementaux sur les organismes non-cibles	p. 34
4. <u>Durabilité et efficacité environnementale des filets Alt'Carpo : évaluations <i>ex ante</i> et <i>ex post</i></u>	p. 39
4.1. Evaluation quantitative de l'efficacité environnementale	p. 39
4.2. Mise au point d'un outil d'évaluation <i>ex ante</i> de la durabilité globale des systèmes de culture innovants en arboriculture	p. 40
Liste des références citées	p. 44
Annexe	p. 46
Annexe confidentielle	p. 46
Evaluation quantitative de l'efficacité environnementale	p. 46

En français

RÉSUMÉ

D'invention récente (2005), les filets Altcarpo, une toile insect-proof recouvrant soit chaque rangée (« mono-rang ») soit la parcelle de pommiers (« mono-parcelle »), représentent une des rares alternatives permettant de diminuer les indices de fréquence de traitement en verger de pommiers, une des cultures les plus traitées en France. Le but du présent projet était de valider l'efficacité et d'étudier la durabilité de cette innovation.

Sur le plan agronomique, les résultats de ce projet confirment la grande efficacité des filets de type « mono-rang » contre le carpocapse des pommes, le principal ravageur des pommiers. Cela permet une réduction significative des IFT dans les vergers conduits en Agriculture Biologique (-40%), la réduction, pour les vergers PFI, ne concerne que l'IFT insecticide. En terme de mécanisme d'action, les acquis de ce projet établissent que les filets représentent une double barrière, d'abord physique, en limitant le nombre de carpocapse pouvant atteindre les pommiers et ensuite comportementale, en réduisant significativement le nombre d'accouplements sous les filets. Cependant, dans le cas des filets « mono-parcelle », nous observons que certaines populations de carpocapse parvenaient à s'adapter.

Nos études ont également pu mettre en évidence une modification significative mais limitée du microclimat (+0.7°C et -10% du PAR). Cependant aucune modification significative de la croissance des arbres ou de leur architecture et corrélativement de la qualité des fruits ou du rendement n'a été observée.

Lorsque l'on élargit la focale aux autres ravageurs et maladies ou au cortège d'auxiliaires associés, nos études concluent que la présence de filets peut parfois s'accompagner d'une recrudescence d'attaques de pucerons (cendrés ou lanigères) sans atteindre des niveaux inquiétants. Ces recrudescences peuvent s'expliquer par (i) une réduction de l'usage des insecticides, (ii) une modification du cortège des auxiliaires (les filets limitent la présence des coccinelles et dans certaines conditions des syrphes) ou (iii) éventuellement des effets microclimatiques. On note également que la maille des filets actuels n'est pas efficace contre d'autres lépidoptères comme la tordeuse orientale du pêcher ou la tordeuse de la pelure.

En matière d'impacts environnementaux, les filets, en diminuant les IFT autorisent des abondances supérieures de certaines communautés d'auxiliaires, comme les forficules (en vergers PFI) ou les araignées (quel que soit le mode de protection phytosanitaire). Leur présence augmente également significativement la diversité des araignées de la canopée.

Enfin, des études *ex-ante* ont été rendues possibles grâce au développement de l'outil « DEXI-pomefruit » afin d'évaluer la durabilité et l'efficacité environnementale des filets. Sur ce dernier point, nos résultats indiquent que la durabilité globale des vergers couverts de filets Alt'carpo est bien supérieure aux vergers non couverts. Ceci est notamment due (i) à une meilleure durabilité économique (le surcoût lié à l'investissement pour la mise en place de filets est moins pénalisant que l'augmentation du risque de perte de récolte lorsque les vergers sont non couverts, les filets Alt'carpo sont également des filets para-grêle) et (ii) une meilleure durabilité environnementale liée à un moindre usage des pesticides.

En conclusion, les filets représentent une alternative efficace dans la lutte contre le principal ravageur en verger de pommiers et permettent des réductions sensibles des IFT sans risque majeur concernant le développement d'autres ravageurs ou maladies. En matière de préconisation, nous concluons qu'en l'état des connaissances actuelles, les filets « mono-rang » semblent une solution plus efficace et plus durable que les filets « mono-parcelle ».

Mots clés

Verger, protection des cultures, lutte physique, impact environnemental, biodiversité fonctionnelle, régulation naturelle, durabilité.

In English

ABSTRACT

Recently designed (2005), the Altcarpo netting system, either covering each row ('single-row') or the whole apple orchard ('whole-orchard'), is one of the rare alternative cropping system enabling a decrease in the Frequency Treatment Index (FTI) for apple orchard on which a great number of pesticides are applied. The aim of the present study was to study the efficiency and the sustainability of this new practice.

Regarding agronomical performance, our results confirmed the great efficiency of this netting system against codling moth, especially for the 'single-row' system. The use of netting allows a significant decrease in FTI in orchards under organic management, this decrease is however not significant for orchards under Integrated Pest Management. We studied the mode of action of netting and it was proved that netting acts as a twofold barrier, first as a physical barrier preventing codling moth to reach the trees and then, as a behavioural barrier limiting reproduction under the nets. However, in the case of the 'whole-orchard' netting system, we have observed an adaptation of some populations of codling moth under natural conditions. Climate under the net was significantly but little modified with on average an increase in temperature (+0.7°C) and a decrease in the Photosynthesis Active Radiation (+10%). No significant modification of the tree growth or architecture, neither of fruit quality and orchard yield was observed.

Surveys of pests and natural enemies sometimes showed higher infestations by aphids (rosy apple or woolly apple aphids) in orchards covered by nets. These higher infestation rates can be explained by (i) a lower use of pesticides, (ii) a decrease in abundance of some natural enemies such as coccinellids (and sometimes syrphids) and (iii) possible modifications of micro-climate under the nets. It is noticeable that the nets are not efficient against some other lepidopteran pests such as *Grapholita molesta* and *Adoxophyes orana*. We also showed that orchards covered by nets had a higher abundance of earwigs and a higher species richness of spiders in the canopy, probably related to a reduced use of pesticides.

Ex-ante studies, thanks to the development of the Dexi-pomefruit tool, revealed that the global sustainability of orchards covered by nets was higher than non-covered orchards. This was due to (i) a higher economical sustainability (the cost of the nets was counterbalanced by the fact that nets limited risks of major yield loss, acting as anti-hail nets) and (ii) a higher environmental sustainability related to a reduced use of pesticides.

In conclusion, netting systems represent an efficient way to control codling moth and enables significant reduction of FTI without any major risks for the production. However, we recommend using the 'single-row' version of netting, it is, up to now, more efficient and more sustainable than the 'whole-orchard' version.

KEY WORDS

Orchard, netting system, physical biocontrol, functional biodiversity, environmental sustainability.

SYNTHÈSE

(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

IMPACTS AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX D'UNE MÉTHODE DE LUTTE PERMETTANT DE REDUIRE FORTEMENT L'USAGE DES PESTICIDES : LES FILETS ALT'CARPO EN ARBORICULTURE.

Yvan Capowiez, INRA, Unité Plantes et Systèmes Horticoles

Guilhem Severac, CA84

Jean-Louis Sagnes, CA82

A. Alaphilippe, C. Gros, L. Parisi, S. Simon, INRA UERI Gotheron

Marc Saudreau, INRA PIAF

Pierre Franck, Claire Lavigne, Daniel Plénet, Myriam Siegwart, INRA PSH

Frédérique Angevin, INRA UAR EcoInnov

Christophe Mazzia, Magali Rault, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse

En français

CONTEXTE GÉNÉRAL

Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?

En arboriculture fruitière, la question la plus préoccupante en matière d'environnement et de santé humaine concerne la protection phytosanitaire. En effet, le secteur arboricole constitue 4% en valeur du marché des fongicides et 21% du marché des insecticides alors qu'il ne représente que 1% de la SAU (Codron et al 2003). Suite notamment à un changement dans la perception du risque associé à la consommation de produits agricoles (surtout fruits et légumes) pouvant contenir des résidus de pesticides (Berrie and Cross 2006), des politiques incitatives sont mises en place dans toute l'Europe pour diminuer fortement leur usage. L'engagement des arbres est expérimenté de longue date pour protéger les cultures fruitières contre les insectes, dont les mouches des fruits, les punaises, les lépidoptères ou contre les oiseaux et les chauve-souris (Erez et al 1993, Lawson et al 1994, Lloyd et al 2005). Plus récemment, il a été démontré que les filets para-grêle standard réduisaient très significativement les attaques de carpocapse en vergers de pommiers et augmentaient l'efficacité de la lutte par confusion sexuelle contre cette espèce (Tasin et al 2008).

Elaboré en 2005 par la Chambre d'Agriculture du Vaucluse et le GRAB, puis validé expérimentalement en 2006, le concept initial Alt'Carpo présente l'originalité d'adapter un dispositif de protection physique (filet paragrêle) en enveloppant l'ensemble de la canopée du rang pour assurer une protection contre le carpocapse, et en modifiant à cette fin la taille des mailles. Depuis 2007, le concept se développe dans les vergers du Sud-Est et du Sud-Ouest de la France (Severac et Romet 2007, 2008). L'intérêt que suscite le concept Alt'Carpo est lié à la fois à sa très grande efficacité sur la cible principale des traitements insecticides, à son lien fort avec la stratégie globale de l'exploitation (l'investissement constitue également une assurance contre le risque climatique et les aléas économiques) et par la facilité d'appropriation par les arboriculteurs d'une méthode issue du développement en diffusion libre et bénéficiant de l'appui d'un réseau d'animation. Bien que la protection de cultures fruitières par des filets insect-proof ait déjà été expérimentée dans d'autres conditions, pour gagner en genericité et être capable d'élargir les conséquences de l'usage des filets Alt'Carpo à d'autres bassins de production, ce projet se focalisera sur les mécanismes en jeu et tentera de tester les différentes hypothèses expliquant l'effet des filets.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU PROJET

Remarque préliminaire : l'appellation filets Alt'Carpo ne décrit qu'un type de filets et n'est en rien une marque ou un modèle déposé. L'utilisation de ces filets est donc totalement libre. Il existe 2 types d'installation de filets : mono-rang (où chaque rang est couvert isolément) et mono-parcelle (où la parcelle entière est couverte).

L'objectif de ce projet est d'évaluer les conséquences de l'introduction de cette innovation technique au sein des vergers de producteurs en termes de modification des pratiques de protection phytosanitaire (fréquence de traitement en particulier), tout en identifiant d'éventuels effets 'secondaires' non pris en compte dans les premières phases de conception.

Le projet est structuré en 4 volets répondant aux objectifs suivants :

- Volet 1 : Quels usages pour quelles réductions de l'utilisation de pesticides ? Pour prévenir un contournement, peut-on déterminer les mécanismes d'action vis-à-vis du carpocapse ?
- Volet 2 : Les filets peuvent modifier la croissance des arbres et le microclimat. Quelles sont les possibles conséquences agronomiques à la fois sur la production fruitière et sur la régulation naturelle des bioagresseurs par les auxiliaires ?

Les filets Alt'Carpo en arboriculture

- Volet 3 : La réduction de l'utilisation de pesticides s'accompagne-t-elle d'une réduction concomitante effective des impacts écotoxicologiques ?
- Volet 4 : Au delà de la protection phytosanitaire et des conséquences agronomiques, le bilan global est-il positif ?

QUELQUES ÉLÉMENTS DE MÉTHODOLOGIE (ET ÉVENTUELLES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES)

Le premier volet vise à mesurer les modifications des pratiques de protection dues à l'utilisation de filets Alt'carpo afin de (i) quantifier l'économie potentielle en termes d'utilisation de pesticides et (ii) de vérifier que d'autres ravageurs ne se développent pas en lieu et place du carpocapse. Pour ce faire, des suivis de vergers de producteurs par enquête ont été réalisés en 2010 et 2011, dans deux régions, par les conseillers techniques des Chambres d'Agriculture du Tarn-et-Garonne et du Vaucluse. Ces réseaux de verger comprennent 43 parcelles dans le sud-est, dont 26 avec filets et 80 dans le sud ouest, dont 54 avec filets.

En outre, une étude complémentaire en vergers expérimentaux vise à identifier leurs mécanismes d'action sur les lépidoptères ravageurs dans le but de prévenir l'éventuel contournement de cette méthode de lutte. Les hypothèses de mécanismes testées concernent un possible effet limitant des filets sur les accouplements et/ou la ponte sur pommiers par les femelles accouplées. Pour évaluer chacune de ces hypothèses nous avons conduit des expériences de marquage-recapture et des analyses génétiques d'apparement entre larves afin de suivre la dynamique des femelles carpocapses sous filets et entre zones couvertes et témoins.

L'évaluation des conséquences agronomiques de l'installation des filets concerne en particulier leurs effets sur la croissance de l'arbre, le rendement et l'élaboration de la qualité du fruit, le développement des ravageurs et maladies du pommier, et la régulation naturelle par les auxiliaires. Les actions conduites sont en lien avec deux effets majeurs dus à la présence de filets : (i) la nature des modifications du microclimat de la frondaison des arbres, (ii) l'exclusion de certains groupes d'insectes –dont certains auxiliaires- de la frondaison d'arbres sous filet. Les suivis ont été réalisés dans des vergers expérimentaux sur deux sites en parallèle (Avignon et Valence).

Un bilan environnemental est par ailleurs effectué avec 2 approches : (i) *in situ* : il s'agit de déterminer si la réduction d'usage de pesticides se traduit par une contamination de l'environnement et des impacts écotoxicologiques moindres et si la qualité de la pulvérisation des traitements phytosanitaires est altérée sous filet. Ces impacts ont été étudiés par des suivis de populations de forficules (abondance, diversité, survie) et par l'utilisation de biomarqueurs. Puis (ii) des Analyses de Cycle de Vie et des évaluations *ex ante* permettent d'estimer la durabilité globale de la méthode Alt'Carpo. Pour ce dernier point, un outil d'évaluation multicritère *ex ante* des innovations en arboriculture a été mis au point.

RÉSULTATS OBTENUS

Les principaux résultats seront déclinés volet par volet :

VOLET 1 :

Quelles réductions de l'utilisation de pesticides sont rendues possibles par les filets Alt'Carpo?

Dans le Sud-Est, utilisant très majoritairement la version « mono-rang », le filet Alt'Carpo permet en effet de réduire très significativement les IFT insecticides microbiologiques (type carpovirusine et Bt) de 57 % en AB (4,7 Avec filet vs 11,0 traitements Sans filet) et les insecticides de synthèse et/ou microbiologiques de 70% en mode de production PFI (4,1 Avec filet vs 13,7 traitements Sans filet). Les IFT fongicides ne sont pas significativement modifiés par la présence de filet (13,4 IFT Sans Filet vs 14,8 IFT Avec Filet).

Cependant, dans le Sud-Ouest, région caractérisée par une plus faible pression de carpocapse, le passage à une protection à base de filet Alt'Carpo dans sa version « mono-parcelle » (filet paragrêle avec fermeture latérale par du filet à maille Alt'Carpo) n'a pas induit en 2010 de modifications significatives en termes d'IFT et d'impact environnementaux. Ces résultats s'expliquent en partie par la moindre efficacité du filet « mono-parcelle » qui nécessite des traitements insecticides complémentaires.

Quel est le mécanisme d'action du filet vis-à-vis du carpocapse et doit-on s'attendre à un contournement?

En utilisant des techniques de marquage-recapture ou des outils de biologie moléculaire (degré d'appareillage), nous avons établi que les filets représentent une double barrière, d'abord physique, en limitant le nombre de carpocapse pouvant atteindre les pommiers et comportementale, en réduisant significativement le nombre d'accouplements sous les filets. Il est probable que cette double barrière explique l'efficacité plus forte de la version « mono-rang ». En outre, pour la version « mono-parcelle », nous avons observé que certaines populations de carpocapse parvenaient parfois à s'adapter, ce qui peut laisser augurer un possible contournement.

VOLET 2 :

Existe-t-il des conséquences agronomiques négatives liées à l'usage des filets ?

→ Les modifications microclimatiques liées aux filets sont faibles (+0.7°C et -10% du PAR) et sont du même ordre de grandeur que celles induites par les filets paragrêle.

→ Aucune modification significative de la croissance des arbres n'a pu être mise en évidence. L'architecture de l'arbre est quant à elle plus affectée par les pratiques de taille que par la présence d'un filet « mono-rang ».

→ En ce qui concerne la qualité des fruits, aucun effet négatif n'a été observé. Le rendement du verger n'est pas modifié sous réserve que les filets demandent une taille plus sévère pour limiter le volume des arbres.

→ En matière de régulation naturelle, la présence de filets peut diminuer l'abondance de certains auxiliaires comme les coccinelles (et les syrphes hors zone méditerranéenne). Cela explique, en partie, que les attaques de pucerons cendrés (*Dysaphis plantaginea*) sont parfois plus importantes sous filets.

VOLET 3

La réduction de l'usage des pesticides sous filets se traduit-elle par des modifications positives pour les communautés non-cibles ?

Des modifications positives dues à la présence des filets Alt'Carpo ont pu être mises en évidence pour deux communautés d'invertébrés, par ailleurs prédateurs importants en verger de pommiers, les forficules et les araignées. Ainsi, les vergers couverts de filets, hébergent des populations de forficules significativement plus abondantes et des communautés d'araignées significativement plus riches.

VOLET 4

Quel est le bilan environnemental global de filets Alt'Carpo ?

L'analyse *ex-ante* de la durabilité globale des filets Alt'Carpo, comme système innovant en arboriculture, a été rendue possible par l'adaptation de l'outil DEXiPM aux vergers de pommiers, puis sa validation avec différents acteurs.

En termes de résultats, la durabilité globale des vergers avec filet Alt'Carpo est supérieure à celle des vergers sans filet. Cela est dû à une meilleure durabilité économique (le surcoût lié à l'investissement pour la mise en place de filets est moins pénalisant que l'augmentation du risque de perte de récolte lorsque les vergers sont non couverts, les filets Alt'carpo servent

également de filets paragrêle) et à une meilleure durabilité environnementale du fait d'un moindre usage des pesticides.

NB : les résultats d'ACV, partiels et non encore validés, sont donnés dans la partie confidentielle de ce rapport.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, RÉALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

Dans les zones de fortes pression du carpocapse (comme le Sud-Est de la France), les filets Alt'Carpo sont actuellement la seule technique permettant de produire des pommes en AB quand la résistance du carpocapse à la carpovirusine est installée.

- Recommandations et limites éventuelles :

Les filets Alt'Carpo de type « mono-rang » assurent une efficacité de protection importante contre le carpocapse. L'analyse à la récolte des attaques et dégâts liés aux autres ravageurs et aux maladies ne met pas en évidence d'effets particuliers des filets. Cependant, il convient de surveiller les populations de tordeuses orientales dans les parcelles couvertes, voire de mettre en place une confusion sexuelle si les dégâts dépassent les seuils de tolérance économiquement acceptables. Nous avons par ailleurs constaté que la présence de filets crée des conditions de milieu différentes, plus propices au développement ou à la présence de certains bioagresseurs mais également de certains auxiliaires.

Les résultats des filets « mono-parcelle » indiquent une efficacité moindre de ceux-ci. Nos résultats sur les mécanismes d'action présagent d'une adaptation potentielle du carpocapse à la méthode de lutte physique « filet mono-parcelle ». La durabilité de cette technique est donc compromise, si elle n'est pas accompagnée d'un suivi complémentaire des populations (notamment capua et tordeuse orientale) et de méthodes de protection complémentaires.

Enfin, notre étude suggère de prévoir l'installation des filets dès la plantation du verger pour conduire et former les jeunes arbres. En effet, selon la conduite en place, la mise sous filets d'un verger adulte peut s'accompagner de pratiques de taille sévères pour limiter le volume des arbres, ce qui est préjudiciable pour le rendement.

De notre évaluation globale de cette technique, il pourrait être intéressant de favoriser l'installation de filets pour les vergers se trouvant à proximité de cours d'eau.

- Réalisations pratiques et valorisation :

Ce programme de recherche a permis l'adaptation de l'outil DEXiPM à un système arboricole, le verger de pommiers. Cet outil sert maintenant de support de recherche dans un projet européen (projet PURE du 6^{ème} PCRD) et est la base d'une extension actuellement en cours à la production fruitière dans le cadre d'un projet EcoPhyto (projet Pour et Sur le Plan EcoPhyto : DEXiFruits).

Le présent projet trouve également une finalité concrète dans la rédaction d'une nouvelle fiche technique 'Filets' pour le Guide EcoPhyto Fruits en cours d'élaboration.

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETÉS, ENVISAGÉS

Un forum de discussion sur Internet a été créé pour favoriser des échanges entre les communautés travaillant sur les filets (française / non française ; légumières et fruitières).

Outre les programmes déjà acceptés et permettant une continuité directe des actions relatives aux filets Alt'Carpo (projet européen PURE et projet PSPE EcoPhyto), d'autres projets ont été soumis ou sont en gestation pour élargir le cadre de la réflexion sur l'utilisation des filets :

Les filets Alt'Carpo en arboriculture

- Un projet ANR sur les filets en horticulture (fruitière en Europe et légumière en Afrique) a été déposé en 2013 avec des partenaires du CIRAD. La focale est mise sur les aspects sociologiques.
- A l'international, suite à des réunions croisées avec des partenaires italiens, nous projetons de répondre en 2014 à un appel à projet sur les aspects agronomiques des filets. Des contacts très avancés ont également été pris avec des collègues Québécois et Autrichiens qui développent la technique des filets Alt'Carpo dans leur pays.
- A l'échelon national et en prise directe avec la profession, une extension des filets au cerisier dans le cadre de la lutte contre la mouche des fruits est actuellement en cours.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES RÉFÉRENCES)

* Réussir Fruits et Légumes n°321 (2012) : Le développement du concept Alt'Carpo est exponentiel.

* L'arboriculture fruitière n°673 (2013) : Alt'Carpo : Surtout efficace en mono-rang.

* Réussir Fruits et Légumes n°328 (2013) : Alt'Carpo élargit son application.

LISTE DES OPÉRATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS À DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	Sauphanor B., G. Severac, et al. (2012). Exclusion netting may alter reproduction of the codling moth (<i>Cydia pomonella</i>) and prevent associated fruit damage to apple orchards. <i>Entomologia Experimentalis et Applicata</i> 145 (2): 134-142.
Publications scientifiques à paraître	Marliac G., Simon S., Fleury A., Alaphilippe A., Dib H., Capowiez Y. (2013) Contrasting effects of codling moth exclusion netting on the natural control of the rosy apple aphid. IOBC Bull. 91:81-85 Alaphilippe A., Angevin F., Buurma J., Caffi T., Capowiez Y., Fortino G., Heijne B., Helsen H., Holb I., Mayus M., Rossi V., Simon S., Strassemeyer J. . (2013) Application of DEXiPM® as a tool to co-design pome fruit systems towards sustainability IOBC Bull. 91:531-535
Publications scientifiques prévues	<ol style="list-style-type: none">1. <u>Simon et al.</u> <i>Effect of codling moth exclusion nets on apple tree growth, yield and fruit quality</i> (soumission manuscrit 2014)2. <u>Simon et al.</u> <i>Rosy apple aphid control as affected by codling moth exclusion netting: a three-year experiment</i> (soumission manuscrit 2014)3. <u>Malagnoux et al.</u> <i>Abundance and diversity of earwigs in apple orchards under different management strategies</i> (soumission manuscrit fin 2013)4. <u>Malagnoux et al.</u> <i>B-esterases characterization and inhibition response to pesticides in the earwig <i>Forficula auricularia</i></i> (soumission septembre 2013)

	<p>5. Capowiez et al. <i>Positive effects of the Alt'carpo netting systems on arboreal spider communities in orchards under organic or IPM protection strategies</i>. (soumission 2014)</p>
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	<ul style="list-style-type: none"> - Congrès Oilb, Turquie (October 7-12,), présentation orale: Marliac, G., Simon, S., Fleury, A., Alaphilippe, A., Dib, H., Capowiez, Y. (2012) Contrasting effects of codling moth exclusion netting on the natural control of the rosy apple aphid, pp. 75-78. In: IOBC, Proceedings of the 8th International Conference on Integrated Fruit Production, Kusadasi, Turkey. - Congrès Oilb, Turquie (octobre 2012) : présentation orale de l'outil DEXiPomme avec manuscrit accepté - Siegwart, M., M. Pierrot, et al. (2012). Adaptation to exclusion netting of the codling moth (<i>Cydia pomonella</i> L.) in apple orchards. IOBC, Working Group "Integrated Plant Protection in Fruit Crops". Kusadasi, Turkey - Congrès Future IPM, Italie, Mars 2013 : présentation par poster de l'outil DEXiPomme
Participations futures à des colloques	
THESES	
Thèses passées	
Thèses en cours	<p>Laure Malagnoux (2010-2014) Gaëlle Marliac (2011-2014)</p>
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	<ul style="list-style-type: none"> - L'arboriculture fruitière n°657 (2011) Ouste Carpo ! : l'heure est à la combinaison des méthodes de lutte. - Phytoma n°645 (2011) Alt'Carpo : résultats en verger. - Réussir Fruits et Légumes n°306 (2011) Les lépidoptères se heurtent à Alt'Carpo. - Réussir Fruits et Légumes n°321 (2012) : Le développement du concept Alt'Carpo est exponentiel. - L'arboriculture fruitière n°673 (2013) Alt'Carpo : Surtout efficace en mono-rang. - Réussir Fruits et Légumes n°328 (2013) : Alt'Carpo élargit son application. -
Articles de valorisation à paraître	<p>Publication dans Phytoma sur les résultats du projet, ainsi que l'arboriculture fruitière (sur les résultats du volet 2)</p>
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	<p>- Interview télévision régionale agricole d'Emilie Romagne (Italie) février 2013 (http://www.youtube.com/watch?v=4a7jIw8fNDc)</p>

	<p>- Reportage dans l'émission de télévision sur France 3 « C'est pas sorcier » 2011 - Site Alt'Carpo : http://www.alt-carpo.com - forum d'échange sur Alt'Carpo http://www.ecohort.agreenium.org/Recherche/Les-filets-anti-insectes</p>
<p>Actions vers les médias prévues</p>	
ENSEIGNEMENT – FORMATION	
<p>Enseignements/formations dispensés</p>	<p>Cours Master2 Agrocampus Ouest Angers 'Gestion des ravageurs dans les agrosystèmes' (S. Simon ; février 2012) dont... « le filet, levier d'action pour contrôler le carpocapse » (13 novembre 2012) Cours Master 1 Agrocampus Ouest Angers sur les méthodes d'évaluation dont DEXiPomme (Alaphilippe ; janvier 2012 et 2013)</p>
<p>Enseignements/formations prévus Rapports de stage</p>	<p>L. Lacour, Mémoire de fin d'études AgroCampus Ouest, 2011. Encadrement Alaphilippe & Angevin. J. Pradal, mémoire de fin d'études ENITA Bordeaux. 2012. Encadrement L. Parisi et C. Gros. H. Brancorsini, Mémoire de fin d'études Université de Bordeaux, 2012 – <i>Dispersal and reproduction estimates in a codling moth population using kinship genetic assessment</i>. Encadrement Pierre Franck CM. Goriaux-Pérais, Mémoire de fin d'études Université Paul Sabatier de Toulouse, 2011 – <i>Impact of Alt'carpo net on reproductive behaviour and dispersal in a codling moth population (Cydia pomonella L.)</i>. Encadrement Pierre Franck M. Pierrot, Stage de Licence 3 Université de Montpellier 2, 2012 – <i>Etude des limites et des effets secondaires des filets Alt'Carpo</i>. Encadrement Myriam Siegwart PA. Prieur, 2011. Mémoire de fin d'études AgroCampus Ouest, ENSAIA Nancy, 2011 - <i>Incidences agronomiques et impacts environnementaux de l'utilisation de filets Alt'Carpo dans les vergers de pommiers</i>. Encadrement Avignon. N. Talvard, stage d'IUT 2012. Utilisation des escargots sentinelles pour évaluer les effets écotoxicologiques d'une méthode alternative en verger de pommiers. Encadrement : C. Mazzia. M. d'Azemar, stage d'IUT, 2012. Effet des filets Alt'Carpo sur les populations de pucerons cendrés (<i>Dysaphis plantaginea</i>) et ses régulateurs naturels. Encadrement Y. Capowiez.</p>
EXPERTISES	

Expertises menées	
Expertises en cours	
Expertises prévues	
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites	Fiche technique 'filets' déposée dans le cadre des ressources techniques pour Ecophyto
méthodologies en cours d'élaboration	Fiche technique 'filets' dans le guide méthodologique Ecophyto Fruits
méthodologies prévues	
COMMUNICATION VERS LA PRODUCTION	
Actions menées	Plus de 17 participations à Séminaire essentiellement en France, mais également Italie et Espagne, pour présenter la techniques des filets Alt'Carpo. Ces présentations sont essentiellement destinées aux conseillers et techniciens, mais également aux scientifiques.
Actions prévues	Séminaire de présentation des résultats par les partenaires et intervenants invités, pour échange avec divers acteurs de la filière (conseillers agricoles, expérimentateurs, enseignants en agriculture...) ; programmée à Gotheron pour l'hiver 2013-2014.
AUTRES	
Dépôt à l'Agence Pour la Protection des programmes	Dépôt de l'outil DexiPM-pomefruit à l'Agence de Protection des Programmes (APP)
Visites des dispositifs expérimentaux...	Visite du dispositif expérimental Gotheron par le groupe arboriculture du projet européen Pure 'Pesticide Use REduction', avec intervention de G. Sévérac, CA84 (juin 2012)

RAPPORT SCIENTIFIQUE

(Environ 30 pages, hors annexes)

IMPACTS AGRONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX D'UNE MÉTHODE DE LUTTE PERMETTANT DE REDUIRE FORTEMENT L'USAGE DES PESTICIDES : LES FILETS ALT'CARPO EN ARBORICULTURE

Yvan Capowiez, INRA, Unité Plantes et systèmes horticoles

Guilhem Severac, CA84

Jean-Louis Sagnes, CA82

A. Alaphilippe, C. Gros, L. Parisi, S. Simon, INRA UERI Gotheron

Marc Saudreau, INRA PIAF

Pierre Franck, Claire Lavigne, Daniel Plénet, Myriam Siegwart, INRA PSH

Frédérique Angevin, INRA UAR EcoInnov

Christophe Mazzia, Magali Rault, UMR 406

Note importante

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

VOLET 1. EFFETS DE L'INSTALLATION DE FILETS ALT'CARPO EN VERGERS DE POMMIERS : MODIFICATION DES USAGES DE PESTICIDES ET MÉCANISMES D'ACTION

La technique alternative Alt'Carpo est une innovation récente dans le contexte de la protection des vergers. L'objectif est d'évaluer les conséquences de l'introduction de cette innovation technique au sein des vergers de producteurs pour (i) quantifier son efficacité dans le contrôle du carpocapse, (ii) identifier d'éventuels effets 'secondaires' non pris en compte dans les premières phases de conception sur le développement des autres bioagresseurs et (iii) mesurer les effets possibles sur les pratiques de protection phytosanitaire (fréquence de traitement en particulier). En outre, une étude complémentaire vise à identifier leurs mécanismes d'action sur les lépidoptères ravageurs dans le but de prévenir un contournement de cette méthode de lutte.

Deux systèmes de filets sont testés :

- le système Alt'Carpo « mono-rang » : chaque rang d'arbre est recouvert d'un filet ayant une maille de type Alt'Carpo : 4 x 4 (2,2 mm x 5,4 mm) (cf Guilhem Séverac, <http://www.alt-carpo.com>)
- le système « mono-parcelle » : ce sont généralement des parcelles équipées de filet paragrêle (maille 2,5 x 3 soit 3 mm x 7,4 mm) sur la partie supérieure horizontale du verger et dont on ferme latéralement l'ensemble des bords du verger par des filets souvent en maille Alt'Carpo.

1.1. Etat des lieux des pratiques de protection

1.1.1. Les réseaux d'observation du Sud-Est et Sud-Ouest

Le réseau Alt'Carpo du Sud-Est

Le réseau du Sud-Est se situe dans les départements de Vaucluse, des Bouches du Rhône et de l'Hérault. Le suivi de ce réseau a été réalisé par un conseiller technique de la Chambre d'Agriculture du Vaucluse, concepteur de l'innovation Alt'Carpo. Le réseau est constitué de 43 vergers commerciaux au total. Il est composé de 26 vergers équipés de filets Alt'Carpo (Avec filet) et de 17 vergers « témoin » sans protection par des filets (Sans filet). L'historique de ce réseau fait qu'il intègre deux modes de production : vergers en Agriculture Biologique (AB) et vergers conduits en Production Fruitière Intégrée (PFI). De ce fait, sur les 26 vergers de la modalité « Avec filet Alt'Carpo », 20 parcelles sont en AB et 6 sont en PFI. Pour les 17 vergers de la modalité « Sans filet » (16 en 2012), l'AB représente 5 (2010), 4 (2011) ou 6 parcelles (2012), alors que le mode de production PFI est utilisé sur 12 (2010), 13 (2011) ou 10 parcelles (2012).

Dans la majorité des parcelles couvertes, il s'agit du système Alt'Carpo « mono-rang » (23 vergers pour 3 seulement en mono-parcelle). Cet échantillonnage est représentatif des installations mises en place dans le Sud-Est. En effet, les producteurs, surtout en AB, préfèrent le système mono-rang qui présente a priori une meilleure efficacité sur le carpocapse des pommes par rapport au système mono-parcelle.

Le dispositif réseau est par contre statistiquement déséquilibré du fait de la prédominance d'un mode de production selon la modalité « Avec ou Sans filet » : ceci peut introduire un co-facteur « mode de production » dans l'analyse des effets du filet avec notamment un effet lié aux variétés, ainsi que des effectifs un peu faibles pour certaines modalités.

Les vergers Alt'Carpo n'ont pas reçu de traitements insecticides complémentaires à cette technique hormis ceux qui ont eu des attaques d'autres ravageurs comme la mineuse cerclée ou ceux utilisant le système « mono-parcelle » et présentant des attaques de carpocapse. Sur les vergers non couverts les recommandations de l'agriculture intégrée ont été appliquées : utilisation de confusion sexuelle accompagnée de traitements phytosanitaires aux périodes à hauts risques (pics de vol).

Le réseau Alt'Carpo du Sud-Ouest

Ce réseau se situe dans le département du Tarn et Garonne (82) et il est suivi par la Chambre d'Agriculture. Il est composé d'une centaine de parcelles, toutes équipées de filet paragrêle, mais mobilisant des techniques de lutte alternatives contre le carpocapse et les lépidoptères : 70 parcelles environ sont équipées de protection Alt'Carpo (AC) et 30 parcelles environ sont en confusion sexuelle (CF : filet paragrêle uniquement et protection par confusion sexuelle & lutte phytosanitaire).

Pour les parcelles « Avec Filet Alt'Carpo », il s'agit dans tous les cas de système mono-parcelle. En effet, la protection contre la grêle au moyen de filets étant quasi généralisée sur la région, le passage au Alt'Carpo a consisté à fermer les bordures des parcelles, avec des filets à maille grêle les premières années puis à maille plus petite plus récemment. Suite aux expérimentations analytiques menées au CEFEL depuis 2007 (2 parcelles avec filet paragrêle, menées pour moitié en AC et pour moitié en CF, en absence de traitement chimique) et aux premières observations réalisées dans la région, la stratégie de protection en parcelle AC a consisté à supprimer la confusion sexuelle et à garder une protection chimique uniquement sur la première génération (G1) du carpocapse. En été, des contrôles réguliers assurés par des agents de la Chambre d'Agriculture permettent de gérer la protection ; en l'absence de dégâts, aucun traitement n'est réalisé en été.

Pour les parcelles « témoin » ne bénéficiant pas d'une protection Alt'Carpo, il s'agit de parcelles avec filet paragrêle mais sans fermeture latérale des bords de la parcelle. La protection anti-carpocapse est assurée sous forme de confusion sexuelle (CF) contre le carpocapse (parfois aussi contre la tordeuse orientale depuis 2012), accompagnée d'une protection chimique correspondant à 1 à 2 traitements sur le pic de la première génération (G1) et 1 traitement sur le pic de la deuxième génération (G2). L'ensemble des variétés et des précocités (Gala à Pink lady) sont représentés dans le réseau et la pression carpocapse est plutôt faible dans l'ensemble.

1.1.2. Les pratiques de protection et leurs impacts potentiels sur l'environnement dans les réseaux du Sud-Est et du Sud-Ouest

Au printemps 2011, des enquêtes ont permis de recueillir les calendriers des traitements phytosanitaires de la campagne 2010 afin de calculer un indicateur de pression phytosanitaire (Indice de Fréquence des Traitements – IFT) selon les différentes familles de produits phytopharmaceutiques et des indicateurs d'impacts environnementaux potentiels (I-PHYarbo). Ceci a fait l'objet d'un stage de fin d'étude (Prieur, 2011). Cet indicateur est issu d'une adaptation de la méthode Indigo (Girardin et Bockstaller, 1997) à l'arboriculture. Le module phytosanitaire permet d'estimer, en utilisant une agrégation par logique floue, les impacts environnementaux potentiels des traitements phytosanitaires. La note I-PHY globale agrège les impacts sur les différentes composantes de l'environnement des calendriers de traitements phytosanitaires appliqués sur chaque verger, alors que I-PHY Environnement regroupe seulement les impacts sur les compartiments « Air, Eau de surface et Eau profonde », tandis que I-PHY Auxiliaire et Faune Utile estime les effets sur la composante biologique du milieu. Pour cette méthode, la note de 10 correspond à l'absence d'impact sur le milieu et une diminution de la note correspond à une augmentation des impacts.

Effets sur l'Indice de Fréquence des Traitements

Dans le Sud-Est (Figure 1), nous observons une réduction très significative (-40 %) de l'IFT total dans les vergers en AB (environ 24 IFT sur le témoin sans filet vs 14 IFT « Avec filet »). En vergers PFI, la réduction de 2,6 IFT est non significative (30,1 IFT sur le témoin vs 27,5 IFT « Avec filet »). Cependant, l'IFT total peut être fortement biaisé par un effet variétal lié à la présence d'une majorité de parcelles en AB ayant des variétés résistantes ou tolérantes à la tavelure avec ses conséquences possibles sur les IFT fongicides. Il faut donc détailler l'effet du filet Alt'Carpo par grandes catégories de produits phytosanitaires. Le filet Alt'Carpo permet en effet de réduire très significativement les IFT insecticides microbiologiques (type carpovirusine et Bt) de 57 % en AB (4,7 Avec filet vs 11,0 traitements Sans filet) et les insecticides de synthèse et/ou microbiologiques de 70% en mode de production PFI (4,1 « Avec filet » vs 13,7 traitements « Sans filet »). Les IFT fongicides ne sont pas significativement modifiés par la présence de filet (13,4 IFT « Sans Filet » vs 14,8 IFT « Avec Filet »), mais on observe une interaction importante entre le mode de production et la modalité filet s'expliquant pour partie par un effet variétal (variétés plus ou moins sensibles ou résistantes à la tavelure).

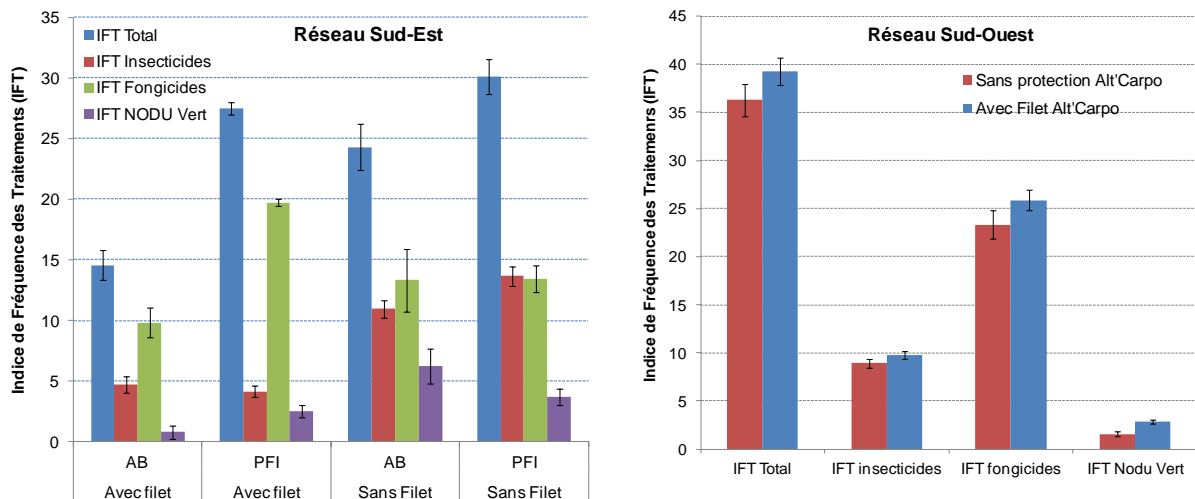


Figure 1 : Effets du filet Alt'Carpo sur les Indices de Fréquence des Traitements (IFT) dans les deux réseaux de vergers de producteurs. Moyenne ± Erreur standard des données 2010.

Dans le Sud-Ouest, l'utilisation de filet Alt'Carpo ne se traduit pas par une modification significative des IFT (Figure 1). On observe même plutôt une légère augmentation (36,3 IFT sur le témoin « sans filet » vs 39,2 « Avec Filet »). Les IFT insecticides sont pratiquement identiques sur les deux modalités (8,9 IFT sur le témoin vs 9,8 « Avec Filet »). Cependant, on observe une différence d'utilisation d'insecticides microbiologiques (IFT NODU Vert de 1,6 sur le témoin vs 2,9 « Avec Filet »). Pour les IFT fongicides, il n'y a pas de différences significatives entre les deux modalités filets. Le faible impact du filet Alt'Carpo sur l'utilisation des produits phytosanitaires peut s'expliquer par i) une efficacité moindre des filets « mono-parcelle » (filet paragrêle avec une fermeture latérale) nécessitant de compléter la protection des filets par des traitements insecticides ciblés sur le carpocapse (économie potentielle de 2 à 3 interventions insecticides seulement par les filets) et ii) des pratiques phytosanitaires pouvant être différentes avant l'installation des filets, les parcelles équipées en Alt'Carpo pouvant être les parcelles, où le risque de dégâts est le plus élevé.

Effets sur l'environnement évalué avec l'indicateur I-PHY Arbo

Dans le Sud-Est, la diminution de la pression phytosanitaire grâce à l'utilisation des filets Alt'Carpo provoque une amélioration significative de la note I-PHY global avec les filets Alt'Carpo (2,5 Sans Filet vs 4,1 Avec Filet) traduisant une diminution des impacts sur le milieu (Figure 2). La présence de filet ne modifie pratiquement pas les notes I-PHY environnement (3,4 Sans Filet vs 3,9 Avec Filet). Par contre, la présence de filet se traduit par une amélioration de la note I-PHY Auxiliaire et Faune utile pouvant s'expliquer par la réduction d'usage des produits phytosanitaires, mais aussi la toxicologie des produits utilisés.

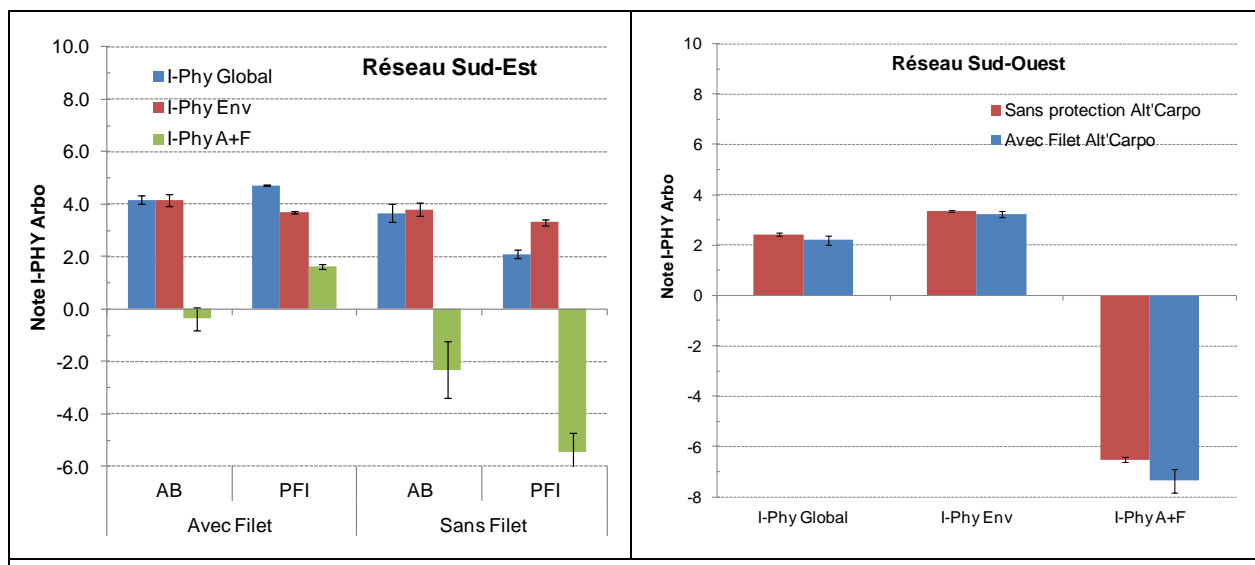


Figure 2 : Evaluation des effets du filet Alt'Carpo sur l'indicateur I-PHY Arbo estimant les impacts potentiels sur l'environnement (Global ; I-PHY Env. : compartiments de l'environnement (air et eaux de surface et profonde ; I-PHY A+F : auxiliaires et faune utile), dans les deux réseaux de vergers de producteurs. Moyenne ± Erreur standard des données 2010. La note +10 correspond à l'absence d'impact sur l'environnement. Les notes négatives du module Auxiliaire + Faune Utile sont liées au paramétrage du logiciel : elles sont à considérer en valeur relative entre les différentes modalités.

Dans le Sud-Ouest, du fait de la faible modification des pratiques en matière d'usage des produits phytopharmaceutiques lors du passage à une protection avec filet Alt'Carpo, les résultats de l'indicateur I-PHY Arbo ne montrent aucune réduction significative des impacts potentiels sur l'environnement et les auxiliaires (Figure 2).

En conclusion de cet état des lieux, l'introduction du filet Alt'Carpo dans le Sud-Est permet une réduction significative des traitements phytosanitaires se traduisant par une réduction des impacts possibles sur certaines composantes de l'environnement, en particulier les auxiliaires. Ces résultats s'expliquent sans doute par l'utilisation des filets Alt'Carpo dans leur version mono-rang dont la très bonne efficacité permet de s'affranchir de toutes les interventions phytosanitaires ciblées contre le carpocapse. D'autant plus que lorsque la pression du bioagresseur est élevée (cas du Sud-Est), la modalité sans filet repose sur une protection mobilisant de nombreuses applications de produits phytosanitaires de synthèse (en mode de production PFI) et/ou microbiologique (carpovirusine en AB et/ou PFI) en complément de la confusion sexuelle.

Dans le Sud-Ouest, région caractérisée par une plus faible pression de carpocapse, le passage à une protection à base de filet Alt'Carpo dans sa version mono-parcelle (filet paragrêle + fermeture latérale par du filet à maille Alt'Carpo) n'a pas induit en 2010 de modifications significatives en termes d'IFT et d'impact environnementaux. Ces résultats s'expliquent en partie par la moins bonne efficacité du filet mono-parcelle qui nécessite des traitements insecticides complémentaires. Le gain potentiel en traitements insecticides anti-carpocapse est donc relativement modeste par rapport à une protection associant confusion et traitements insecticides complémentaires, gain pouvant être annulé pour partie par la nécessité d'appliquer des traitements insecticides ciblant des ravageurs secondaires.

1.2. Contrôle des bio-agresseurs

Les suivis de vergers de producteurs ont été réalisés de 2010 à 2012 dans les deux régions pour caractériser la pression et les dégâts causés par l'ensemble des bio-agresseurs du pommier. Les observations et comptages ont été effectués selon le protocole utilisé dans le cadre de la surveillance biologique du territoire sur 100 pousses et 500 fruits par parcelle. Ces mesures ont été réalisées sur fruits et sur pousses ou feuilles en fin de G1 (mi-juin à début juillet selon les régions) et avant récolte. Elles ont été complétées par des observations supplémentaires (1 à 2 fois) en cours d'été selon les variétés.

1.2.1. Efficacité sur les deux espèces cibles : le carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*) et la tordeuse orientale du pêcher (*Grapholita molesta*)

Les résultats de ces trois années d'étude ont permis d'évaluer l'impact global de la technique Alt'Carpo sur la protection du verger. **Dans le Sud-Est**, le carpocapse présente sous filets un niveau de dégâts acceptable par les producteurs, qui varie de 0,22 à 0,46 % de fruits piqués à la récolte sur les trois années étudiées (Figure 3a). En fréquence, il n'y a que 38,4% des vergers couverts de filets Alt'Carpo avec présence de carpocapse (moyenne sur 3 ans) (Figure 3b).

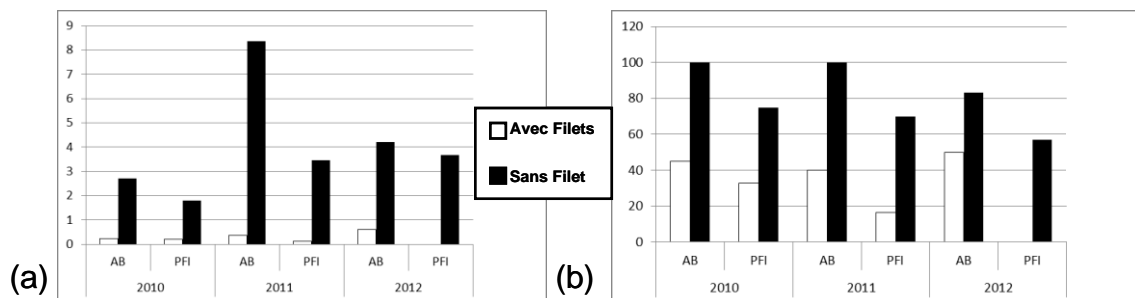


Figure 3 : (a) % de dégât moyen lié à des attaques de carpocapse ou tordeuses orientales à la récolte sur les trois années d'observations et (b) % de parcelles observées présentant des dégâts à la récolte sur les trois années d'observations (effectif = 43 vergers dont 26 couverts de filets).

Dans le Sud-Ouest, les populations de carpocapses n'ont pas dépassé le seuil des 0.5% d'attaques en présence ou absence de filet Alt'Carpo.

Dans les deux régions, les stratégies mises en place pour éviter les dégâts occasionnés par le carpocapse en utilisant les filets Alt'Carpo se sont donc avérées efficaces. Cependant, les filets Alt'Carpo « mono-rang » présentent un niveau d'efficacité élevé et constant contrairement aux « mono-parcelle », qui ont des résultats plus hétérogènes et nécessitent parfois des traitements complémentaires. Ceci est sans doute lié à l'utilisation d'un filet à mailles plus grosses (anti-grêle) dans les « mono-parcelle » sur le dessus permettant une circulation plus facile des lépidoptères.

Par ailleurs, les populations de tordeuses orientales du pêcher sont correctement contrôlées par un système de filet Alt'Carpo « mono-rang » contrairement au système « mono-parcelle » pour lequel une lutte spécifique contre ce ravageur doit être mise en œuvre en sus des filets : confusion sexuelle et/ou traitements.

1.2.2. Impact des filets sur les maladies tavelure et oïdium

La pression tavelure a été inégale sur les 3 années : forte en 2010, moyenne en 2011 avec des repiquages de tavelure secondaire et absence de dégâts en 2012, liée aux conditions climatiques extrêmement sèches défavorables à la conservation du champignon.

Dans le réseau de parcelles du Sud-Est, les vergers conduits en AB sont composés en partie de variétés dites « résistantes » (ex : Juliet) ou peu sensibles à la Tavelure (ex : Akane). Les résultats (Fig. 4) indiquent une efficacité réelle de ce choix variétal comme moyen de protection contre la tavelure. En ciblant l'analyse sur les variétés sensibles (ex : Pink Lady, Gala), on a tendance à avoir moins de Tavelure sur les vergers Alt'Carpo mono-rang, que ce soit en incidence (Fig. 4a) ou en fréquence (Fig. 4b). On peut donc au minimum conclure que les filets « mono-rang » ne favorisent pas le développement de la Tavelure en vergers commerciaux. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour confirmer et expliquer ces résultats.

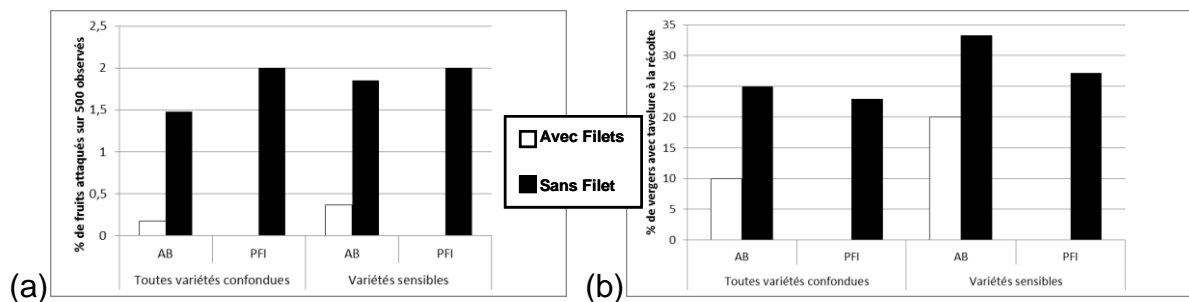


Figure 4 : Effet des filets Alt'carpo sur la tavelure du pommier en fonction des variétés cultivées. Ce graphique a été élaboré sur des notations faites en juillet 2010 dans le réseau du Sud-Est uniquement en raison des faibles pressions parasitaires les autres années d'étude. (a) % de fruits atteints ; (b) % de vergers avec des symptômes de tavelure (effectif = 43 vergers dont 26 couverts de filets).

Dans le réseau du Sud-Ouest, nous n'avons observé aucune différence de comportement entre parcelles « Avec filet » Alt'carpo et parcelles « Sans filet » en 2010 et 2011. En 2012, nous observons une légère tendance en faveur des filets pour les parcelles hors variétés résistantes. En effet, la présence de tavelure sur fruits est moins fréquente sous filet : 16% des parcelles « Avec filet » présentent des symptômes vs 42% « Sans filet ». Cependant, nous considérons qu'il n'y a pas de différence car les niveaux de dégâts sont extrêmement faibles et comparables : 0,1% de dégât moyen.

Pour l'oïdium, nous avons observé en 2010 et 2011 dans le Sud-Est, une fréquence plus importante en parcelle « Avec filet ». Cette différence s'expliquait essentiellement par la présence plus importante, dans le réseau Alt'Carpo, de variétés résistantes à la tavelure. En effet, ces variétés (Ariane ...) sont beaucoup moins traitées contre la tavelure et donc contre l'oïdium. En 2012, nous retrouvons la même tendance moins marquée.

1.2.3. Impact sur d'autres bioagresseurs

Les différents bioagresseurs suivis sur l'ensemble du **réseau Sud-Est** lors de cette étude sont : l'oïdium (*Podosphaera leucotricha*), le puceron cendré (*Dysaphis plantaginea*), le puceron lanigère (*Eriosoma lanigerum*), le puceron vert (*Aphis spp*), l'acarien rouge (*Panonychus ulmi*), la mineuse cerclée (*Leucoptera malifoliella*), la zeuzère (*Zeuzera pyrina*), le pou de San José (*Diaspidiotus perniciosus*) et les maladies de conservation. Les observations de ces bioagresseurs ne montrent pas de différence dans les niveaux de population pour la modalité « Avec filet » sauf pour la mineuse cerclée et la zeuzère. La première est plus présente « Avec filet ». Cela s'explique par une diminution des traitements, néanmoins, ce ravageur secondaire est rarement pénalisant. La seconde est limitée par la présence de filets compte tenu de sa taille importante. Cet effet est surtout visible lors de la dernière année d'observation à cause de la durée du cycle de la zeuzère qui est de deux à trois années. Les protections Alt'Carpo limitent également les attaques de la mouche méditerranéenne. Elles sont aussi très efficaces pour éviter les dégâts d'oiseaux.

Concernant les autres bioagresseurs recherchés (capua, cécidomyie des feuilles, cochenille, feu bactérien...), aucun verger ne présentait de symptômes.

Dans le Sud-Ouest, on observe une augmentation des dégâts de tordeuses de la pelure (capua) et de puceron lanigère : 40% des parcelles « Avec filet » présentent des dégâts de capua sur fruits contre 22% dans la modalité « Sans filet » ; 40% des parcelles « Avec filet » présentent de la fumagine contre 13% « Sans filet » en 2011. Les ravageurs les plus problématiques en 2012 ont été les pucerons, et notamment le puceron lanigère. A la récolte, il est présent sur 50% des parcelles « Avec filet » contre 25% des parcelles « Sans filet ». Cette différence se retrouve également sur les dégâts de fumagine sur fruit (la fumagine se développant à partir du miellat produit par les pucerons). Enfin, l'utilisation de l'insecticide à large spectre d'action qu'est l'Emamectine benzoate en 2012 a limité les niveaux de population de la tordeuse de la pelure. Des essais menés au laboratoire ont cependant montré que ce ravageur était en mesure de passer à travers les mailles du filet avec facilité ce qui rendrait plus difficile son contrôle par cette méthode.

Dans les parcelles expérimentales, les filets Alt'Carpo assurent une efficacité de protection importante contre le carpocapse. L'analyse, à la récolte, des attaques et dégâts liés aux autres ravageurs et aux maladies ne met pas en évidence d'effets particuliers des filets dans ces parcelles.

1.3. Mécanismes d'action des filets et adaptation

Au moins trois hypothèses sont avancées pour expliquer l'effet des filets sur la réduction des attaques de carpocapses. La protection par les filets limite i) les accouplements et/ou ii) la ponte sur les pommiers par les femelles accouplées iii) la libre circulation des individus (=barrière physique). Pour évaluer chacune de ces hypothèses nous avons conduit des expériences comportementales au laboratoire et sur le terrain de marquage-recapture et des analyses génétiques d'appareillage entre larves afin de suivre la dynamique des femelles carpocapses sous filets et entre zones « Avec filet » et « Sans filet ». Les travaux sur le terrain ont été conduits en verger expérimental sur le site C (INRA Avignon) dans les vergers Gala et Granny partiellement protégés par des filets « mono-rang » et conduits sans protection insecticide, puis dans le verger Ariane à moitié couvert par un filet type « mono-parcelle ».

1.3.1 Effet des filets sur la ponte des carpocapses

Les travaux au laboratoire ont mis en évidence la capacité des femelles à pondre à travers les filets lorsque le support de ponte est à proximité immédiate, cependant leur fécondité est réduite d'environ 50 %. Les adultes sont également en mesure de sortir des filets avec une plus grande facilité pour les mâles que pour les femelles. Cette évasion a toujours pour motivation la recherche de nourriture et non du partenaire sexuel. Les femelles gravides sont moins mobiles que les femelles vierges (Sauphanor et al 2012).

Les pressions parasitaires ont été maintenues à des niveaux extrêmement élevés pour tester les limites d'efficacité du système. Tandis que la protection par les filets « mono-rang » induit une réduction des attaques importantes sur les trois années d'étude, avec les filets « mono-parcelle », les niveaux de population atteignent ceux des témoins après la deuxième année de notation (Figure 5).

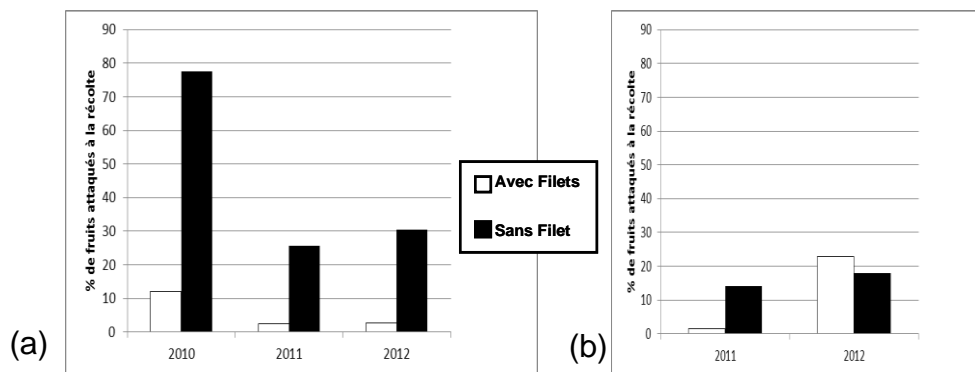


Figure 5 : Efficacité des filets Alt'carpo en conditions extrême de pression parasitaire dans une parcelle expérimentale avec un dispositif « mono-rang » (a) et « mono-parcelle » (b)

1.3.2 Effet des filets sur l'accouplement des carpocapses et des tordeuses orientales

Pour tester l'effet barrière physique, 520 carpocapses mâles marqués avec des fluorochromes de différentes couleurs (rouge sous filet, et vert en dehors) ont été lâchés dans le verger Gala/Ganny avec filets « mono-rang » et recapturés à l'aide de pièges à phéromones et kairomones minidosés TRECE Combo-microlure (0.1 mg de codlemone + 0.1 mg d'ester de poire). Le même protocole a été suivi dans la parcelle Ariane avec filet « mono-parcelle » avec 240 individus. Ces essais ont confirmé l'évasion de carpocapses mâles de la partie « Avec filet » (5 à 47 % des individus recapturés en dehors des filets avaient été lâchés sous les filets (selon la date du lâcher), alors qu'aucun n'essaye d'y pénétrer à la recherche de partenaire sexuel pour les deux systèmes testés.

Des essais comparables ont été menés sur 360 adultes mâles de tordeuse orientale dans la parcelle Ariane avec filet « mono-parcelle ». Le comportement de cet autre lépidoptère ravageur diffère car 19% des individus recapturés en dehors des filets proviennent du compartiment sous filet et 24% des individus recapturés sous filet proviennent de l'extérieur. Ainsi, les entrées et sorties de cet insecte ne semble que très peu perturbées par la présence du filet. Les mailles du filet ne sont pas adaptées à cette tordeuse de petite envergure (inférieure à 16mm contre 16 à 19 pour le carpocapse). Il convient donc de la surveiller dans les parcelles couvertes, voire de mettre en place une confusion sexuelle si les dégâts de la tordeuse orientale dépassent les seuils de tolérance économiquement acceptables.

1.3.3. Analyse de l'apparentement des carpocapses

Des analyses génétiques de l'apparentement entre larves de carpocapse dans les blocs de parcelles « Avec filets » et les blocs « Sans filet » les vergers Gala/Granny et Ariane ont été effectuées dans le cadre de deux stages de Master 2 (H. Brancorsini et CM Goriaux-Pérais).

Ces travaux ont permis de faire des avancées à la fois i) dans la compréhension de la biologie de la reproduction du carpocapse (polygamie et polyandrie) et ii) de préciser le mode d'action des filets sur la dynamique des populations de carpocapses. En outre, ils ont permis d'aider au développement d'un kit de 26 locus microsatellites, lesquels ont été utilisés pour effectuer les analyses d'apparentement (25 locus nucléaires + un locus mitochondrial dont l'hérédité est uniquement maternelle).

Un premier travail a porté sur des assignations de parenté de 162 larves à 48 carpocapses adultes (50% étaient des mâles) lâchés vierges sous la chapelle du verger Ariane. Il met clairement en évidence une importante polygamie et polyandrie (environ 50% des assignations) et une tendance à une plus grande fertilité des mâles polygames.

Un second travail a porté sur des assignations de fraternité entre 275 larves collectées dans le verger Gala/Granny. Ce travail confirme le fait que les filets sont bien une barrière au brassage des populations de carpocapse; les filets renforçant l'hétérogénéité dans la distribution des larves sœurs au sein du verger (significativement plus de larves sœurs sur un même rang « Avec Filet » que sur un rang « Sans Filet », Figure 6). Il révèle toutefois que des accouplements sous filet mono-rang sont possibles même s'ils sont limités. La proportion de larves demi-sœurs par leur mère était significativement plus importante dans les rangs avec filets (67%) que dans les rangs sans filet (20%). Ces résultats suggèrent que le passage par les mailles du filet reste plus facile pour les mâles que pour les femelles et que le filet renforce la polyandrie. Cela met donc en évidence l'effet barrière de ces filets.

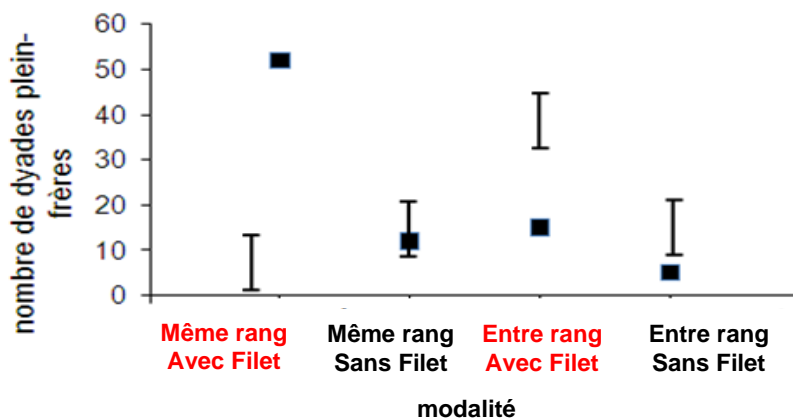


Figure 6 : répartition des dyades de carpocapse plein-frère dans un même rang ou entre rangs « Avec filet » (en rouge) ou « Sans filet » mono-rang. Les carrés indiquent les observations. Les barres indiquent les intervalles de confiance à 95% des attendus sous l'hypothèse d'une répartition homogène des dyades plein-frère dans le verger.

1.3.4. Adaptation du carpocapse à la présence de filet

La découverte du mode d'action de ces filets introduit la question d'une adaptation possible du carpocapse (stage de licence M. Pierrot). Celui-ci pourrait-il modifier son comportement sexuel pour se reproduire sous filet, à savoir en milieu confiné comme c'est le cas pour nos souches d'élevage ? Pour tester cette hypothèse, nous avons travaillé sur deux populations en

situation d'échec de protection : une parcelle avec filet « mono-rang » et l'autre avec filet « mono-parcelle ». La fécondité et le taux de fertilité en milieu confiné (en laboratoire) de ces populations a été mesuré. Ces résultats sont comparés à ceux de deux autres populations sauvages prélevées à proximité dans des vergers sans filet et comparés à ceux de notre souche de référence de laboratoire, bien adaptée aux conditions confinées. Nous observons une amélioration significative de fécondité en milieu confiné pour les individus prélevés sous les filets « mono-parcelle » par rapport aux autres populations sauvages (Tableau 1). Ce phénomène n'est pas observé sous filets « mono-rang ». Cela présage donc d'une adaptation potentielle du carpocapse à la méthode de lutte physique filet « mono-parcelle ». La durabilité de cette technique est donc compromise si elle n'est pas accompagnée d'un suivi complémentaire des populations et de méthodes de protection complémentaires.

		nb couple	Fécondité moyenne
Souche de laboratoire		26	213 ^a
Mono-parcelle	Avec Filet	21	131 ^b
	Sans Filet	21	66 ^c
Mono-rang	Avec Filet	29	66 ^c
	Sans Filet	22	67 ^c

Tableau 1 : Adaptation comportementale du carpocapse des pommes au filet « mono-rang » illustré par une amélioration de la fécondité en milieu confiné de populations sauvages prélevées en situation d'échec de protection (les lettres représentent les différentes classes statistiques significativement différentes avec le test de Tukey $p < 0.05$).

***En conclusion**, les acquis de ce projet établissent que les filets représentent une double barrière, d'abord physique, en limitant le nombre de carpocapse pouvant atteindre les pommiers et comportementale en réduisant significativement le nombre d'accouplements sous les filets. La seconde barrière, vraisemblablement liée à une gêne du vol nuptial, est plus efficace pour la version « mono-rang ». En outre, pour la version « mono-parcelle », nous avons observé que certaines populations de carpocapse parvenaient parfois à s'adapter.*

VOLET 2. EFFETS AGRONOMIQUES DE L'INSTALLATION DE FILETS ALT'CARPO SUR VERGERS DE POMMIERS

Le volet 2 s'intéresse aux conséquences microclimatiques (§2.1) et agronomiques de l'installation des filets, en particulier leurs effets sur la *croissance de l'arbre*, le *rendement et l'élaboration de la qualité du fruit* (§2.2) et la *régulation naturelle par les auxiliaires* de certains ravageurs (§2.3 et 2.4).

La présence de filets peut en effet: (i) modifier le microclimat de la frondaison des arbres, ce qui peut influencer le fonctionnement des arbres et l'élaboration de la qualité des fruits, ainsi qu'impacter l'infection des arbres par des champignons pathogènes (ii) exclure certains groupes d'insectes –dont certains auxiliaires– de la frondaison d'arbres. A contrario, les modifications des pratiques attendues (moindre application d'insecticides avec filets) peuvent favoriser la présence et l'efficacité de ces mêmes auxiliaires.

Les principaux dispositifs expérimentaux supports des travaux de 2010 à 2012 sont :

INRA PSH Avignon (site C)

-En 2010, un dispositif de 2 parcelles juxtaposées plantées avec les variétés Gala ou Granny a été utilisé pour des mesures microclimatiques et agronomiques. Chaque parcelle est constituée de 5 rangs, 4 avec filets « mono-rang » et 1 rang témoin sans filet. Les observations et mesures ont été réalisées soit sur les rangs entiers (dégâts du carpocapse,...) soit sur 8 arbres-répétitions pour les variables agronomiques. L'essai ayant été réalisé sans aucune intervention chimique contre le carpocapse, les résultats agronomiques du témoin (modalité hors filet) ont été fortement affectés par les dégâts du carpocapse.

-En 2011, un verger planté avec Ariane a été divisé en 4 rangs témoin « Sans filet » et 4 rangs adjacents « Avec filets » de type « mono-parcelle » avec une maille Alt'Carpo. Les performances agronomiques ont été évaluées sur 10 arbres pour chaque facteur. Sur le témoin, une protection sur la première génération de carpocapse a été réalisée avec du virus de la granulose, insecticide microbiologique spécifique du carpocapse.

-En 2012, 13 vergers commerciaux conduits en agriculture biologique, 5 « Avec filets » par des filets et 8 « Sans filet », ont été utilisés pour valider, en situation de production, les résultats sur la régulation du puceron cendré issus de parcelles expérimentales.

INRA Gotheron (site D)

Un dispositif en blocs (4 blocs de 2 lignes, l'une « Avec filets » Alt'Carpo « mono-rang », l'autre « Sans filet » servant de témoin) a été mis en place début mai 2010 dans 2 vergers implantés avec les variétés Ariane et Pitchounette (résistantes à la tavelure) pour étudier l'effet des filets sur la croissance et la production de l'arbre (Ariane) et sur la régulation naturelle du puceron cendré par les auxiliaires (Pitchounette). En 2012, un autre verger planté avec la variété Jubilé a été utilisé pour étudier l'effet des filets sur le microclimat des arbres. Les parcelles adjacentes à ces trois parcelles expérimentales ont également été couvertes par des filets afin de limiter l'application de pesticides sur des lignes d'arbres contiguës aux arbres en mesure. La protection contre le carpocapse sur les rangs « Sans filet » a principalement été réalisée avec du virus de la granulose (spécifique du carpocapse).

2.1. Modifications du microclimat induites par les filets Alt'Carpo

L'objectif de cette action a été de mesurer le microclimat de la frondaison d'arbres avec et sans filets, et d'évaluer l'impact d'éventuelles modifications de ce microclimat sur les infections de tavelure, principale maladie fongique du pommier.

Des mesures directes ont été réalisées dans la frondaison d'arbres avec et sans filets pour évaluer l'effet des filets sur des paramètres fortement impliqués dans le fonctionnement de l'arbre tels que le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), la température de l'air, l'hygrométrie, l'intensité et la direction du vent. La durée d'humectation des feuilles, qui conditionne le développement de la tavelure *Venturia inaequalis* (principale maladie fongique du pommier) complète cet ensemble de mesures.

Les suivis d'humidité relative et de température réalisés à Avignon en 2010, ne montrent pas d'effet des filets sur l'humidité relative pour les jours où les mesures ont été effectuées. Pour la température de l'air, une augmentation de 0,7°C par jour est provoquée par la présence de filet mono-rang. En 2011, des mesures réalisées au laboratoire montrent que l'absorption par un filet Alt'Carpo (maille 4x4) du PAR est de 10 %. Les mesures réalisées sur 64 jours (Figure 7) dans un verger sous filet Alt'Carpo mono-parcelle indiquent une interception moyenne de 14,1 % du PAR. Cette plus forte valeur sur le terrain est liée à une absorption différenciée selon l'azimuth du soleil, avec une absorption supérieure le matin et le soir (jusqu'à 25%) et une absorption minimale au midi solaire (11 %). La valeur moyenne obtenue et un maximum de 15,8 % en milieu de journée confirment les observations de l'année 2010 et les données bibliographiques.

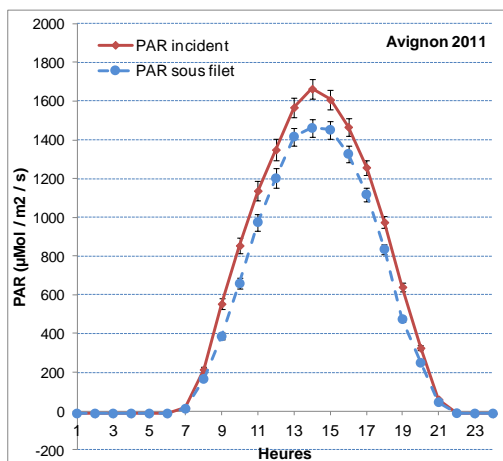


Figure 7 : Quantité de rayonnement photosynthétique actif (PAR en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) sans filet (PAR incident) ou avec filet mono-parcelle selon les différentes heures de la journée. Moyennes horaires calculées à partir de 3 à 6 répétitions de capteurs par modalité avec des enregistrements toutes les 10 mn pour la période du 8 juin au 10 août 2011 à Avignon.

En 2012, les mesures réalisées à l'INRA de Gotheron ont étudié la relation entre microclimat de l'arbre et développement de la tavelure, pour des arbres avec et sans filets (rapport de stage de Master2 : Pradal, 2012). Plusieurs arbres ont été instrumentés (Figure 8) et un inoculum de tavelure a été apporté sur la parcelle pour homogénéiser le niveau d'inoculum primaire et pouvoir observer des symptômes de la maladie. La température est en moyenne plus faible de 0,1°C sous filets (différence significative). L'humidité relative supérieure ou égale à 90% est significativement plus élevée sous les filets pendant la période de mesure (Figure 9). La durée d'humectation foliaire n'est pas affectée significativement.

Les filets Alt'Carpo en arboriculture



Figure 8 : Filet mono-rang sur parcelle Jubilé (Gotheron) et exemples de sondes installées dans le rang

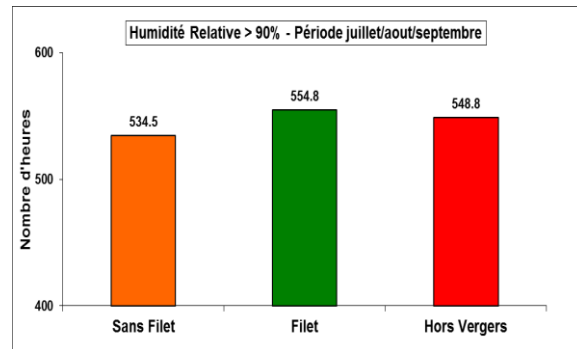


Figure 9 : Effet des filets – Nombre d’heures où l’hygrométrie a été supérieure à 90% (parcelle Jubilé, Gotheron, 2012)

Les mesures microclimatiques réalisées avec et sans filets et introduites dans un modèle de calcul des contaminations de tavelure (logiciel CimMet) indiquent que pour l’année climatique d’étude, la présence de filets ne s’accompagne pas, globalement, de modifications du nombre ni de l’intensité des épisodes contaminants de tavelure par rapport au témoin non couvert (un seul épisode différent sur 27 enregistrés). Les suivis biologiques (contrôles en verger de l’incidence et de la sévérité de symptômes de tavelure sur feuilles et fruits) montrent toutefois une plus forte infestation sur les feuilles des arbres sous filets le 23/05/12, sans différence significative sur feuilles ou fruits aux autres dates de contrôle en cours de saison, mais avec la même tendance globale (plus de maladie sous filets) (Figure 10).

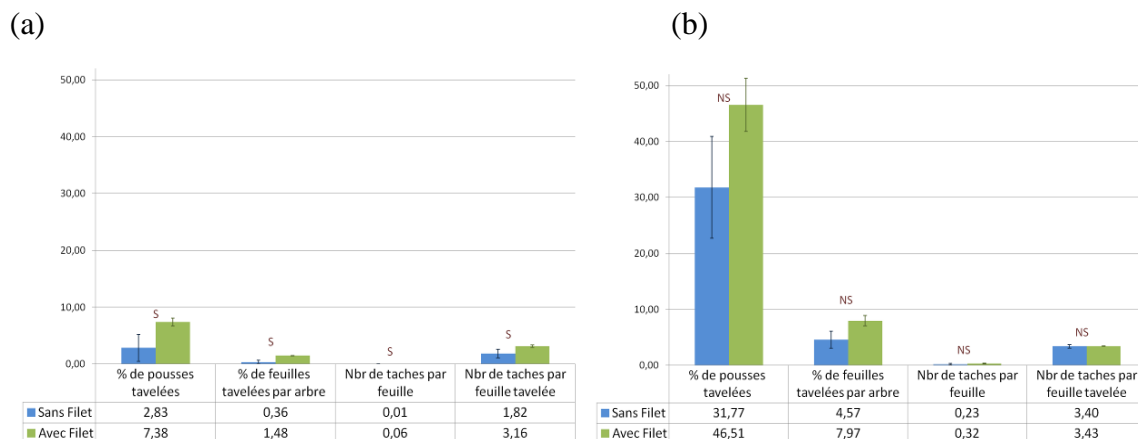


Figure 10: Pourcentage de pousses et de feuilles tavelées, nombre de taches par feuille et par feuille tavelée pour les modalités sans filet (bleu) et avec filet (vert) : (a) le 23/05/2012 ; (b) le 02/07/2012 (parcelle Jubilé, Gotheron, 2012). S : différence significative ; NS : pas de différence significative (analyse de variance après transformation de données).

L’analyse des épisodes contaminants par le logiciel CimMet à partir des données climatiques permet d’identifier un seul risque important (moyen) en période primaire pour différencier les situations avec et sans présence de filets au vu de l’année climatique et des pratiques d’utilisation des filets (ouverture lors de la pollinisation). Ce seul épisode a induit une différence significative lors de la notation du 23/05/2012. Ce résultat a été obtenu pour une seule année d’étude, en parcelle expérimentale non traitée par des fongicides actifs sur la tavelure ; il est donc difficile de le rapprocher des résultats issus de vergers commerciaux pour lesquels l’incidence de la tavelure est identique ou moindre sous filets. Il y aurait donc à

investiguer les questions suivantes pour statuer sur ce point : en quoi le filet peut-il modifier certains épisodes contaminants, notamment lorsqu'il y a des reprises d'humectation entrecoupées de périodes sèches ? L'augmentation de l'hygrométrie sous filets favorise-t-elle la production de conidies (à l'origine des contaminations secondaires) de *V. inaequalis* ? Le filet peut-il optimiser la protection fongique (moindre dégradation par UV) ?

Nos résultats indiquent une diminution du rayonnement sous filets, ce qui est également rapporté par de nombreux auteurs pour des filets de type paragrêle (Solomakhin & Blanke, 2010). La variation de rayonnement relevée dans la littérature est par ailleurs du même ordre de grandeur que celle mesurée dans nos vergers, avec 12% (Iglesias & Alegre, 2006) et 18% (Amarante et al., 2011). Pour les mesures de température et d'hygrométrie, les résultats 2012 (Gotheron) sont plus en accord avec la littérature qu'avec les mesures d'Avignon de 2010. Ceci peut être toutefois mis en relation avec (i) la répétabilité des mesures en termes d'environnement (forme d'arbre, hétérogénéité du microclimat au sein de la frondaison, type de filet et d'installation du filet) et (ii) la précision des capteurs (0,5°C et 5% hygrométrie en 2012).

2.2. Effets agrophysiologiques des filets : croissance de l'arbre, rendement et élaboration de la qualité du fruit

L'objectif des expérimentations a été d'étudier l'effet des filets sur la croissance de l'arbre et son architecture, la croissance des fruits, le rendement et la qualité des fruits.

2.2.1. Croissance et rendement

Des mesures de la dynamique de croissance de rameaux (mai-juillet ; par modalité : 8 arbres x 10 rameaux) et de fruits (juin-récolte ; par modalité : 10 fruits), du rendement et de la qualité des fruits à la récolte ont été réalisées en 2010, 2011 et 2012 à Avignon et Gotheron. Il ressort les principaux points suivants :

- il n'y a pas d'effet des filets sur la croissance des rameaux (accroissement en longueur ou nombre de feuilles) et des fruits (accroissement du diamètre) quels que soient l'année ou le site (ANOVA, $P > 0.05$) ;
- une moindre coloration des fruits (Ariane) est notée sous filets mono-rang pour une même date de récolte (Gotheron 2010 : $\chi^2 = 43,52$, $P = 0.0000$; 4 classes de coloration); il est bien sûr possible d'obtenir une même coloration moyenne en décalant la date de récolte des arbres sous filets de quelques jours par rapport au témoin, décalage pouvant être lié à un rayonnement moindre sous filets (Gptheron 2011 et 2012) ;
- lorsque la modalité filet n'influence pas la charge en fruits par arbre (en 2010 et 2011 à Gotheron ; 2011 et 2012 à Avignon), le rendement (poids par arbre) et le poids moyen des fruits sont similaires avec et sans filet (pas de différence significative ; ANOVA, $P > 0.05$) ;
- dans ces conditions, la qualité des fruits, mesurée par la teneur en sucre (indice réfractométrique - IR) et l'acidité totale, ne présente pas de différence significative avec et sans filets.

En revanche, en 2012 à Gotheron, le rendement est plus faible sous filets, pour un volume d'arbre moindre (ANOVA, $F = 36.47$, $P = 0.0009$; 8 arbres par modalité : la mise sous filets d'un verger adulte s'est en fait accompagnée de pratiques de taille plus sévères pour contenir les arbres sous filets. Ceci suggère de prévoir l'installation de filets dès la plantation pour conduire et former les jeunes arbres. De même, en 2010 à Avignon, on observe des résultats

agronomiques différents selon les modalités avec et sans filets, qui s'expliquent par l'effet du filet sur la maîtrise du carpocapse (fort pourcentage de fruits infestés et tombés en 2010 sur le témoin sans filet) induisant des différences de charge en fruits à la récolte et donc des performances agronomiques différentes.

2.2.2. Qualité des fruits

Des analyses des concentrations en différents acides et sucres ont été réalisées en 2010 sur Granny et en 2011 et 2012 sur Ariane à Avignon (Tableau 2). Globalement sur les 3 années, les modifications de la composition de la pulpe des fruits en présence de filets sont faibles. En particulier, les totaux des 4 principaux sucres solubles (glucose, fructose, saccharose, sorbitol) ou des 3 principaux acides (citrique, malique, quinique) de la pomme ne sont pas significativement influencés par les filets. Seule la concentration de la pulpe en saccharose paraît la plus sensible aux effets du filet puisqu'on observe des différences significatives les trois années, mais le sens des variations n'est pas constant (diminution de la teneur en saccharose en 2010 et augmentation en 2011 et 2012 en présence du filet).

Tableau 2. Effets du filet Alt'Carpo sur la composition biochimique (en g /100 g de matière sèche) de la pulpe des pommes à maturité (récolte) dans les expérimentations conduites à Avignon. Valeurs moyennes par modalité, F test et P (probabilité avec ns : différences non significatives ; * : significatives $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$).

	Granny 2010				Ariane 2011				Ariane 2012			
	Hors Filet	Avec Filet	F	P	Hors Filet	Avec Filet	F	P	Hors Filet	Avec Filet	F	P
% MS pulpe (%)	12.65	11.81	5.60	*	16.20	16.64	2.32	ns	16.92	16.59	0.57	ns
Indice Réfract. %	10.15	9.57	7.40	**	14.31	14.63	1.82	ns	14.32	13.96	1.33	ns
Amidon	8.37	9.09	0.67	ns	0.63	1.23	1.93	ns	1.84	2.34	0.95	ns
Glucose	11.09	12.72	7.06	*	6.68	7.04	1.43	ns	7.05	5.07	14.27	***
Fructose	24.27	24.13	0.06	ns	28.75	28.66	0.03	ns	32.57	30.92	1.97	ns
Saccharose	7.78	5.67	22.79	** *	16.57	17.67	4.45	*	15.13	17.92	6.45	*
Sorbitol	0.82	0.68	5.62	*	5.73	5.81	0.02	ns	5.69	5.84	0.06	ns
Tot. Sucres	43.96	43.19	0.43	ns	57.73	59.18	1.50	ns	60.44	59.75	0.14	ns
Ac. Citrique	0.12	0.14	3.20	ns	0.10	0.10	1.75	ns	0.12	0.12	0.01	ns
Ac. Malique	5.42	5.10	1.34	ns	3.49	3.40	0.34	ns	3.90	4.37	5.18	*
Ac. Quinique	3.43	3.46	0.09	ns	7.46	7.67	1.60	ns	7.78	7.76	0.01	ns
Tot. Acides	8.97	8.69	0.73	ns	11.05	11.18	0.29	ns	11.81	12.25	1.09	ns

Globalement, ces résultats confirment certaines données de la littérature sur l'effet des filets paragrêles sur la qualité des fruits : les filets de couleur claire ou cristal ont généralement un faible impact sur la qualité des fruits mesurée par l'indice réfractométrique ou l'acidité titrable (Crété *et al.*, 2001 ; Iglesias & Alegre, 2006 ; Amarante *et al.*, 2011) ou sur la composition en

différents sucres et acides (Jakopic *et al.*, 2007).

2.2.3. Architecture de l'arbre

Une description de l'architecture de 4 arbres entiers par modalité (avec et sans filets) en 2010 et 2011 à Gotheron a permis d'étudier les proportions et la répartition dans l'arbre des différents types de rameaux : court/long ; fructifère/végétatif. L'analyse portant sur les 2 années indique qu'il y a une plus grande proportion de rameaux longs sous filets et que l'ordre de ramification des rameaux de l'arbre est plus élevé hors filets (Figure 11) : ceci atteste de modifications architecturales dues aux filets (proportion de rameaux longs) et renforce par ailleurs l'hypothèse de pratiques de taille différentes entre arbres avec filets et sans filets (moindre ordre de ramification sous filets).

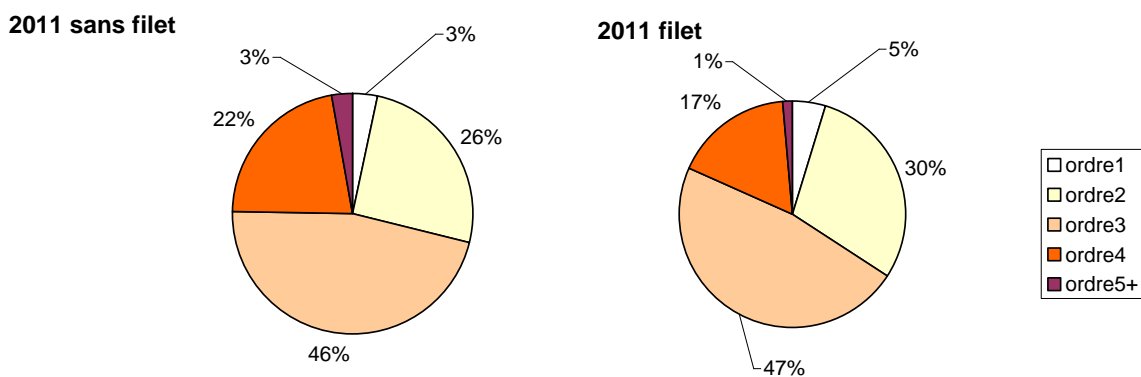


Figure 11. Proportions de rameaux dans les différents ordres de ramification (échantillon 4 arbres entiers, Gotheron, 2011). Un rameau d'ordre 1 s'insère directement sur l'axe de la branche, un rameau d'ordre 2 s'insère sur un rameau d'ordre 1, etc. Une branche s'insère directement sur le tronc de l'arbre. Test $\chi^2=56.02$, $P<0.001$; 4 arbres par modalité).

2.3. Effet des filets sur la régulation naturelle des principaux ravageurs du pommier

L'objectif a été d'étudier l'effet des filets sur un autre ravageur-clé du pommier, le puceron cendré, et son niveau de régulation par les auxiliaires.

2.3.1. Effet des filets sur les auxiliaires prédateurs et parasitoïdes

La régulation du puceron cendré a été étudiée à Gotheron de 2010 à 2012 par suivi hebdomadaire de colonies (40 à 50 rameaux infestés marqués par modalité) et observation directe de l'abondance et de la dynamique temporelle des auxiliaires (syrphes, coccinelles et forficules principalement). A Avignon en 2012, les suivis ont été réalisés sur 40 arbres par verger commercial : le nombre de colonies de puceron cendré par arbre et les auxiliaires présents dans 5 rameaux infestés par arbre ont été recensés.

L'infestation par le puceron cendré est plus élevée sous filets par rapport au témoin sans filets en 2012 à Gotheron (ANOVA, différence significative les 16, 22 et 29 mai, $P<0.05$; Figure 12a), confirmant les résultats des deux années précédentes. Une tendance similaire est observée en vergers commerciaux à Avignon en 2012 avec une forte variabilité au sein de chaque groupe de vergers (avec/sans filets) (ANOVA, $P> 0.05$; Figure 12b). Début juin à Gotheron, les filets affectent également la migration du puceron : à cette date, les formes ailées sont 5 fois plus nombreuses sous filets par rapport au témoin hors filets, probablement

en rapport avec une migration retardée (données non présentées).

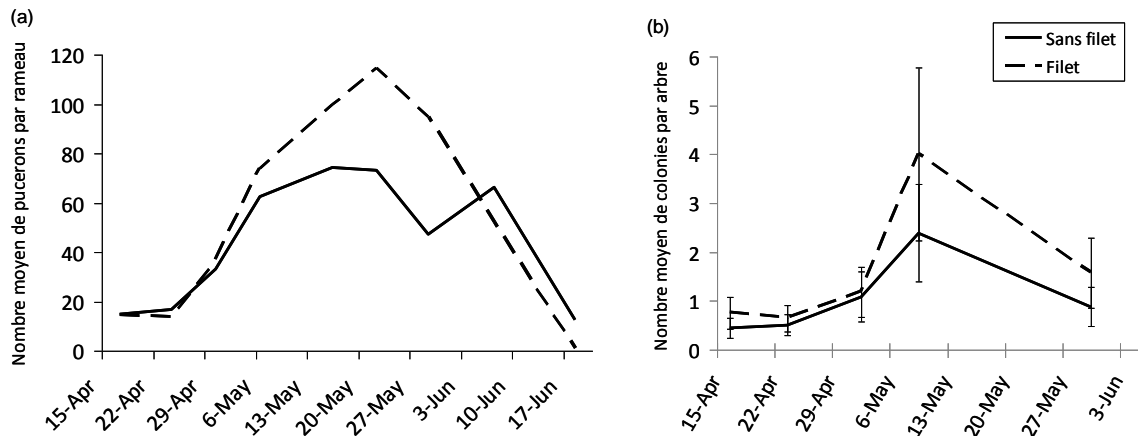


Figure 12. Infestation par le puceron cendré: (a) verger expérimental, Gotheron, 2012 ; (b) vergers commerciaux, Avignon, 2012

Pour les 2 sites d'étude, l'arrivée séquentielle de syrphes puis de coccinelles est relevée, comme décrit dans d'autres études (Miñarro *et al.*, 2005 ; Dib *et al.*, 2010a). Globalement, les auxiliaires ont une arrivée plus tardive sous filet à Gotheron et certains auxiliaires tels les coccinelles sont moins abondants sous filets, quels que soient le site et l'année d'étude. La distribution des effectifs d'auxiliaires cumulé sur la saison par groupe fonctionnel diffère ainsi entre modalité avec et sans filet ($\chi^2 = 41.14$, $P=0.0000$; 40 rameaux par 9 dates). La présence de filets a un effet d'exclusion pour ces prédateurs de taille supérieure à la maille des filets (Figure 13). Les syrphes, présents à Avignon à la période de floraison (certaines espèces peuvent hiverner à l'état adulte dans le Sud-Est) lorsque les filets sont ouverts pour permettre la pollinisation, ne sont pas ou peu pénalisés par la présence de filets. A Gotheron, leur présence dans les foyers de pucerons sous filets est retardée par rapport au témoin : il est possible que les syrphes immigrent sur ce site plus septentrional, ce qui décale leur période de présence par rapport à la période d'ouverture des filets.



Figure 13. Exclusion de coccinelle *Coccinella septempunctata* par le filet Alt'Carpo mono-rang

Ces résultats pluriannuels et multisites divergent en partie de ceux de Dib *et al.* (2010b), très probablement en rapport avec une variabilité importante entre vergers (variété, protection et autres pratiques), sites et années d'étude (climat, présence auxiliaires).



Figure 14. Cages d'émergence des parasitoïdes de puceron cendré. Un rameau infesté dont l'effectif de puceron est estimé par classe est introduit dans chaque tube en PVC qui constitue

Les filets Alt'Carpo en arboriculture

la cage. Les parasitoïdes émergeant sont attirés par la lumière et sont piégés dans le tube en verre au sommet de la cage où ils sont récupérés.

Les parasitoïdes émergeant de rameaux infestés mis en cages d'émergence (Figure 14) sont peu diversifiés : *Ephedrus* sp. prédomine les deux années d'étude, 2010 (87,7% des émergences) et 2012 (94,7% des émergences). S'il n'y a pas de différence significative en 2010 ($P = 0,1554$), une plus forte abondance de parasitoïdes émergés par nombre de puceron est relevée « Avec filets » en 2012 (ANOVA covar nombre de pucerons, $F = 10,77$; $P=0.003$; 14 rameaux mis en émergence par modalité); la proportion de rameaux avec des pucerons parasités (suivi des rameaux marqués infestés, cf supra) est également plus élevée sous filets à la date du 07/06/2012 par rapport au témoin sans filet (ANOVA, $F = 40,16$; $P = 0.0007$)

Les niveaux de parasitisme des larves de carpocapse diapausantes piégées dans des bandes-pièges ont été mesurés en 2010 et 2012 à Avignon (proportion de larves de moins de 50 mg). Les taux de parasitisme varient entre 1% et 24% selon les années et les vergers. Ces taux de parasitisme, quoique moindres avec filets mono-rang, semblent avant tout dépendre du nombre de larves hôtes présentes (Figure 15). Seul deux parasitoïdes ont été observés à la fois dans les rangs avec filets et les rangs sans filet : le braconide *Ascogaster quadridentata* et le chalcidien *Perilampus tristis*.

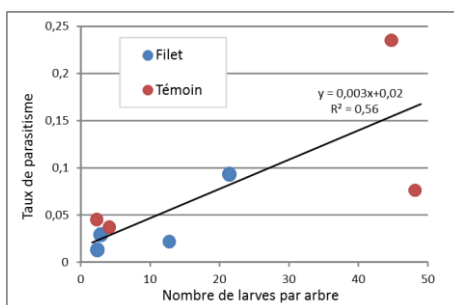


Figure 15. Relation entre le taux de parasitisme et le nombre de larves diapausantes de carpocapse

La variabilité des taux de parasitisme mesurés pour plusieurs organismes hôtes (puceron cendré, carpocapse) et des divergences de résultats entre années nous indiquent que la réponse au filet des parasitoïdes est encore à investiguer.

2.4.2. Evaluation directe du niveau de prédation par exposition d'œufs sentinelle du carpocapse

Le niveau de prédation avec et sans filet a été estimé en exposant 40 ooplaques de 10 à 15 œufs par modalité pendant une courte période (3 jours, pour éviter l'éclosion des larves au verger) du 19 au 22 juillet 2012. Le nombre d'œufs disparus ainsi que le type de prédation (œufs disparu, vidé ou broyé) ont été comptabilisés.



Figure 16. Ooplaque d'œufs de carpocapse sentinelle exposée à la prédation. On distingue (traits rouges) des œufs prédatés dont il reste l'enveloppe.

La prédation, mesurée par le pourcentage d'œufs disparus / œufs exposés (Figures 16 et 17), est deux fois plus élevée avec filets par rapport au témoin (ANOVA, $F=10,30$; $P=0.0184$). Par ailleurs (données non présentées), le type de prédation est différent : il y a proportionnellement moins d'œufs vidés et plus d'œufs prédatés sous filets ($\chi^2=9.94$; $P=0.069$; avec 3 patterns de prédation : disparu, vidé, broyé).

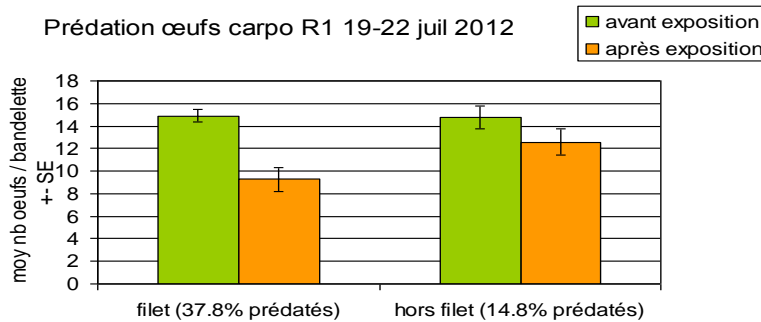


Figure 17. Nombre moyen d'œufs sentinelle prédatés avec et sans filet (Gotheron, 2012)

En conclusion, les 3 années de suivi ont permis d'établir que les filets affectent le développement du puceron cendré, plus abondant sous filet, et dont la migration est parfois plus tardive. Ces différences s'expliquent en partie par des niveaux de prédation différents en début d'infestation, avec effet d'exclusion des filets pour certains auxiliaires. La modification du microclimat (humidité relative plus élevée, favorable au développement du puceron) est également une hypothèse explicative. En revanche, plus tard en saison (juin, juillet), un cortège d'auxiliaires probablement différent mais fonctionnel est installé sous filets, comme l'attestent le taux de parasitisme du puceron cendré en fin d'infestation ou les suivis de taux de prédation de proies sentinelle. La présence de filets crée donc des conditions de milieu différentes, plus propices au développement ou à la présence de certains bioagresseurs mais également de certains auxiliaires ; notre étude constitue donc une première étude pluriannuelle et multisite de ces modifications biotiques induites par la présence de filet de type Alt'Carpo.

VOLET 3. MESURES D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL IN SITU

3.1. Mesures des quantités de pesticides dans l'environnement

3.1.1. Qualité de la pulvérisation sous filets

La qualité de la pulvérisation a été mesurée en juin 2010 sur Ariane à Gotheron (site D, filets mono-rang) par exposition de papiers hydrosensibles installés dans la végétation et sur le tronc des arbres à différentes hauteurs et orientations par rapport à l'axe du rang (notation du résultat en classes intégrant la couverture du papier et la finesse des gouttelettes ; 8 points de mesure à 3 hauteurs par face d'arbre x 2 faces/arbre (Est/Ouest) x 6 arbres par modalité étudiée x 2 modalités (avec/sans filet) ; pulvérisateur arboricole tracté usuel, traitement à l'eau). Il n'y a pas de différence de qualité de la pulvérisation avec filets par rapport aux arbres témoin non couverts : la qualité de la pulvérisation n'est donc pas affectée par la présence de filets quelle que soit la situation des papiers hydrosensibles dans l'arbre (ANOVA 2 facteurs étudiés (filet ; position dans l'arbre), $P > 0,05$). Dans nos conditions d'expérimentation, il n'a pas été possible de tester de manière satisfaisante si les filets mono-

rang constituant un écran pouvant intercepter une partie des produits de protection pulvérisés sur les rangs adjacents.

3.1.2. Mesures de résidus sur fruits

En 2011, des mesures de résidus sur fruits (pour chaque analyse: 30 fruits par modalité) ont réalisées à la récolte sur le site D (INRA de Gotheron). Aucun des pesticides dosés ne dépassait les LMR que ce soit dans les modalités avec et sans filet, ce qui oblitère toute comparaison. Ces mesures n'ont pas été réitérées en 2012.

3.2. Impacts environnementaux sur les organismes non-cibles

L'enjeu est d'estimer si les baisses d'IFT constatées suite à l'utilisation des filets Alt'carpo ont eu des répercussions mesurables sur certaines communautés biologiques. C'est donc sur le réseau de vergers du Sud-Est que s'est concentré l'essentiel des recherches, puisque c'est dans ce réseau que furent constatées les différences significatives d'IFT. Cette approche fut menée sur 2 fronts : d'abord à l'échelle de quelques communautés d'auxiliaires (3.2.1), puis à l'échelle des individus en utilisant des biomarqueurs sur des organismes soit indigènes soit transplantés (3.2.2).

3.2.1. Abondance et diversité des forficules et des araignées dans les vergers (bioindication)

L'abondance et la diversité des forficules ont été suivies mensuellement entre juin et septembre dans 50 vergers commerciaux (incluant le réseau de parcelles Sud-Est (site A)) à l'aide d'abris en carton ondulé fixé sur les troncs de 20 arbres par verger en 2011 et 2012.

L'abondance et la diversité des araignées ont été estimées à l'automne 2011 et 2012 par la méthode des bandes pièges posées sur le tronc de 30 arbres par verger dans un sous-échantillon du réseau de parcelles Sud-Est (26 vergers dont 16 couvertes de filets).

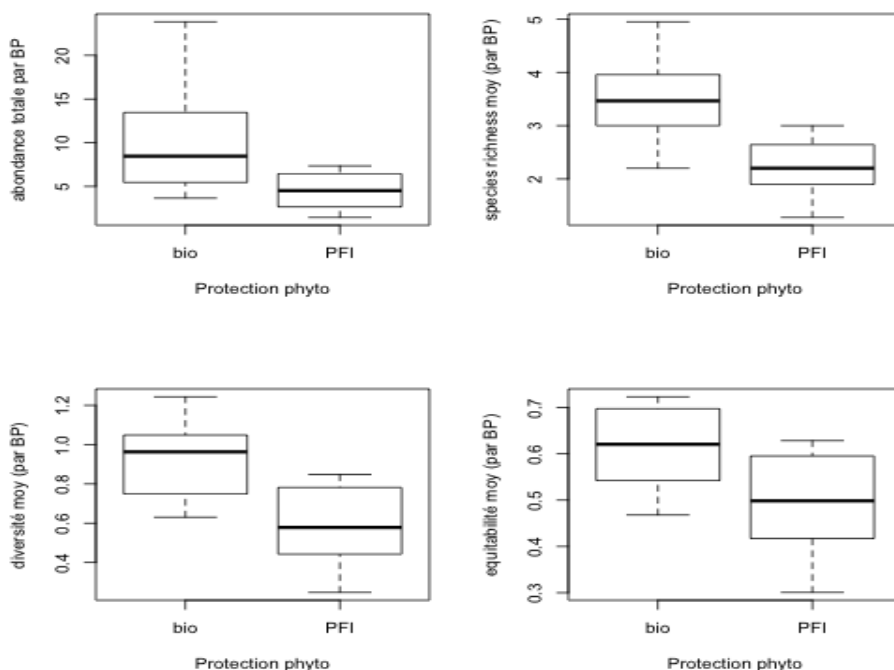


Figure 18 : Boxplots (médianes et quantiles) des 4 caractéristiques des communautés d'araignées échantillonnées dans les vergers du réseau Sud-Est à l'automne 2011 et 2012 (30 bandes pièges (BP) posées par verger) en réponse à la protection phytosanitaire des vergers (AB vs PFI).

Chez les forficules présents dans les arbres, la diversité est limitée à 2 espèces, le forficule commun (*Forficula auricularia*) et une seconde espèce plus petite en taille (*F. pubescens*). Certains vergers (principalement en PFI mais également parfois en AB) ont des abondances de forficules nulles tout au long de l'année. Nous avons donc utilisé des 'glm' (modèles linéaires généralisés) avec des fonctions de lien de type 'quasi-poisson' pour étudier l'effet des filets (présence vs absence) et le type de protection phytosanitaire (AB vs PFI) sur les abondances des 2 espèces de forficules. Les résultats marquants de cette étude sont : (i) il y a significativement ($P < 0,01$) plus de forficules des 2 espèces dans les vergers en AB que dans ceux en PFI ; (ii) les filets ont un effet significatif ($P < 0,05$) et positif sur l'abondance des forficules uniquement dans les vergers PFI. Ces résultats indiquent que les forficules sont particulièrement sensibles aux insecticides de synthèse. L'ensemble de ces résultats sert de base à un article actuellement en cours d'écriture (Malagnoux et al.) avec une soumission prévue fin 2013.

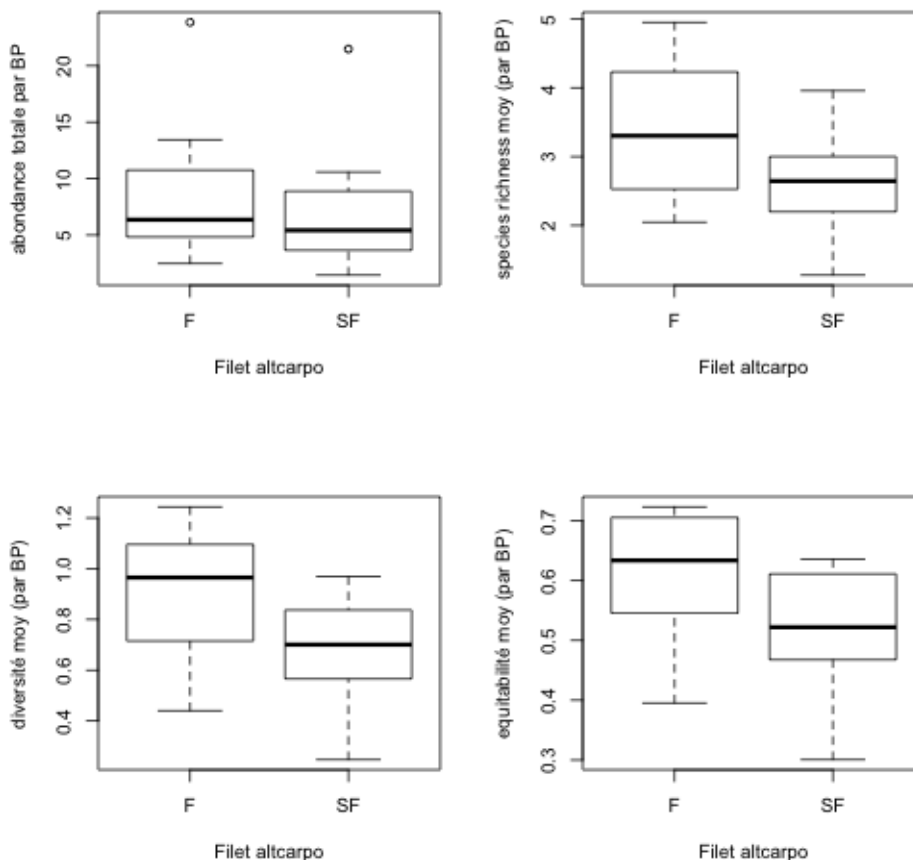


Figure 19 : Boxplots (médianes et quantiles) des 4 caractéristiques des communautés d'araignées échantillonnées dans les vergers du réseau Sud-Est à l'automne 2011 et 2012 (30 bandes pièges posées par verger) en réponse aux filets Alt'Carpo (présence (F) vs absence(SF)).

En ce qui concerne les communautés d'araignées, la diversité spécifique est bien plus forte et surtout, les abondances ne sont jamais nulles. Cependant, en automne, peu d'araignées sont au stade adulte et nous avons donc du limiter nos déterminations au niveau du genre. Des analyses multivariées (AFC suivies d'analyse inter-classe) ont montré que les 2 facteurs étudiés (le type de protection phytosanitaire et la présence de filets) exerçaient une influence significative sur la structure des communautés ($P < 0,05$). A titre d'exemple, nous avons pu

observer que les vergers « Avec filets » hébergeaient plus d'araignées Salticidae du genre *Heliophanus* que les vergers « Sans filet ». Par souci de lisibilité, nous ne présentons ici que les résultats synthétiques sur les abondances moyennes, la richesse spécifique et 2 indices classiques, la diversité de Shannon (H) et l'équitabilité de Piélou (J).

En ce qui concerne d'abord l'effet du mode de protection phytosanitaire, nous mettons en évidence que les vergers en AB sont caractérisés par une abondance ($P=0,02$), une richesse spécifique ($P=0,004$) et une diversité ($P=0,015$) significativement plus élevée (Figure 18).

Si maintenant nous nous focalisons sur l'effet de la présence de filets, nous constatons que les vergers couverts présentent une richesse spécifique significativement plus élevée ($P=0,042$) et ont tendance à héberger des communautés plus diversifiées ($P=0,057$) (Figure 19).

L'analyse de ces résultats sera poursuivie en vue de préparer une publication scientifique (Capowiez et al.) en 2014.

Conclusion :

L'étude de l'abondance et de la diversité de 2 communautés non-cibles des pesticides (forficules et araignées) montrent que les effets majeurs sont d'abord dus au mode de protection phytosanitaire (vergers en AB vs vergers PFI) ce qui montrent qu'au delà des IFT (semblables en AB et PFI), la nature des pesticides appliqués joue un rôle majeur dans les impacts (les vergers en AB utilisent un plus grand nombre d'insecticides microbiologiques réputés n'avoir que des impacts limités sur les organismes non cibles). Cependant, les filets Alt'Carpo ont eu également quelques effets significatifs : (i) ils augmentent l'abondance des forficules dans les vergers PFI et (ii) ils augmentent la richesse spécifique des araignées dans les vergers (qu'ils soient AB ou PFI). A priori, ces effets seraient du à la réduction de l'usage des insecticides lorsque le verger est couvert de filets Alt'Carpo, cependant on ne peut exclure des effets additionnels comme la modification du microclimat sous les filets ou, indirectement, les modifications de la communautés d'auxiliaires d'autres types (coccinelles par exemple).

3.2.2. Utilisation de biomarqueurs liés à l'exposition aux pesticides

En complément de l'approche précédente, nous avons mesuré des activités enzymatiques soit chez des organismes naturellement présents dans les vergers (le forficule *F. auricularia*) soit chez des organismes transplantés à cet effet (l'escargot *Xeropicta derbentina*), ce qui permet de s'affranchir de certains facteurs de confusion dans la réponse des biomarqueurs.



Figure 20: « Cage » contenant des escargots de l'espèce *X. derbentina* provenant d'une friche naturelle et transplantés ainsi au sein dans le feuillage des vergers suivis.

En ce qui concerne les forficules, l'étude a nécessité le développement de protocoles d'extraction chez les forficules, sur individus adultes (mâles ou femelles) et sur 2 stades larvaires L3 et L4. Les B-estérases, acétylcholinestérase (AChE) et carboxylestérase (CbE), ont été localisées dans les différentes parties du forficule adulte (tête, thorax, abdomen) et leurs caractéristiques cinétiques déterminées. Les résultats montrent une forte localisation de l'acétylcholinestérase dans la tête. Ce résultat est en accord avec la localisation de cette enzyme chez différents insectes et son rôle important au niveau du système nerveux central. Les carboxylestérases sont présentes dans les différentes parties du corps (tête, thorax et abdomen), mais sont préférentiellement concentrées dans l'abdomen. Des inhibitions *in vitro* ont été réalisées pour évaluer la sensibilité des différents biomarqueurs vis à vis de pesticides organophosphorés et carbamates. L'inhibition des B-estérases (AChE et CbE) est dépendante de la concentration d'organophosphorés et de carbamates. Chez la femelle, les CbE apparaissent moins sensibles que l'AChE, quelque soit la famille de pesticide. Chez le male, les CbE sont plus sensibles aux organophosphorés que les AChE. Ce résultat est en faveur d'un rôle protecteur des CbE vis à vis de l'AChE. Ces résultats méthodologiques font l'objet d'une publication scientifique actuellement soumise (Malagnoux et al., soumis).

L'étude de ces biomarqueurs a ensuite été réalisée sur des forficules prélevés à 3 dates (juin, août et septembre) en 2011 et 2012 dans les vergers du réseau Sud-Est. La troisième date correspond à une période sans traitement phytosanitaire. Pour chacune des dates, les résultats ont été analysés en utilisant des analyse de variance à 2 facteurs hiérarchisés (facteur principal = mode de protection phytosanitaire et facteur subordonné = le verger).

Globalement, les variations les plus fortes ont été observées entre dates, ce qui signifie que les niveaux basaux de ces biomarqueurs sont difficiles à définir chez les forficules. Pour certaines dates (par exemple juin 2011), nous avons pu détecter des tendance concernant l'AChE, qui semble plus faible dans les vergers PFI ($P=0,08$). Ce fut également parfois le cas pour les CbE (ayant tendance à être plus faibles en verger PFI en août 2012). Néanmoins, nous n'avons jamais observé de différence significative entre les forficules prélevés dans les vergers Avec Filets Alt'Carpo et ceux prélevés dans les vergers Sans Filet.

Face à ces niveaux de variabilité élevés, l'usage de sentinelles transplantées peut être une solution. Dans chacun des 26 vergers du réseau Sud-Est (ainsi que dans 3 vergers abandonnés), nous avons positionné 2 cages contenant chacune 25 escargots installées dans 2 rangées non contiguës à une hauteur d'environ 1,50 m (Figure 20). La période d'exposition est de mai à juillet, période au cours de laquelle les traitements phytosanitaires sont les plus nombreux. Les cages ont été positionnées le 20/05/2011 et des observations/prélèvements ont été effectués environ toutes les 3 semaines (8/06/11, 29/06/11 et 19/07/11). Pour chacune de ces dates, pour chaque cage, nous avons noté le nombre d'escargots morts (présence d'une coquille vide), le nombre d'escargots actifs (n'ayant pas été retrouvé dans le bas de la cage) et prélevé 8 escargots pour des études biochimiques. En ce qui concerne, l'«activité» des escargots, il faut savoir que le comportement naturel de ces escargots habitués à la sécheresse et aux fortes températures est de grimper sur les supports (grillage, piquets) afin de limiter leur température corporelle.

Les observations (nombre d'escargots morts ou actifs) ont été analysés par des tests non paramétriques (test de Mann-Whitney) pour quantifier l'effet soit du mode de protection phytosanitaire soit des filets. En ce qui concerne la mortalité, elle s'échelonne de 1,6% à 8,3%. Cette mortalité est très faible dans les vergers abandonnés et en AB (1,6%) et la plus élevée dans les vergers PFI (8,3%). Par rapport à la présence ou absence de filet pour une même modalité, on remarque que, dans le cas des vergers PFI, cette mortalité est nettement

plus importante dans ceux Sans filet (7,3% contre 1,6%), alors que dans les vergers en AB il n'y a quasiment pas de différences. En ce qui concerne le taux d'escargots actifs, nous n'avons pas observé d'effet du mode de protection phytosanitaire. Par contre, les filets ont eu un effet significatif à la seconde date (avec 70% des escargots actifs sous filet contre environ 50% dans les vergers Sans filet).

A propos des marqueurs enzymatiques, nous n'avons pas observé de différence significative pour les AChE, mais nous avons pu mettre en évidence des valeurs de CbE (i) significativement plus faibles dans les vergers PFI par rapport aux vergers en AB ($P < 0,05$) et (ii) significativement plus faibles dans les vergers Avec filets par rapport aux vergers Sans filet ($P < 0,05$) après un mois d'exposition (Figure 21).

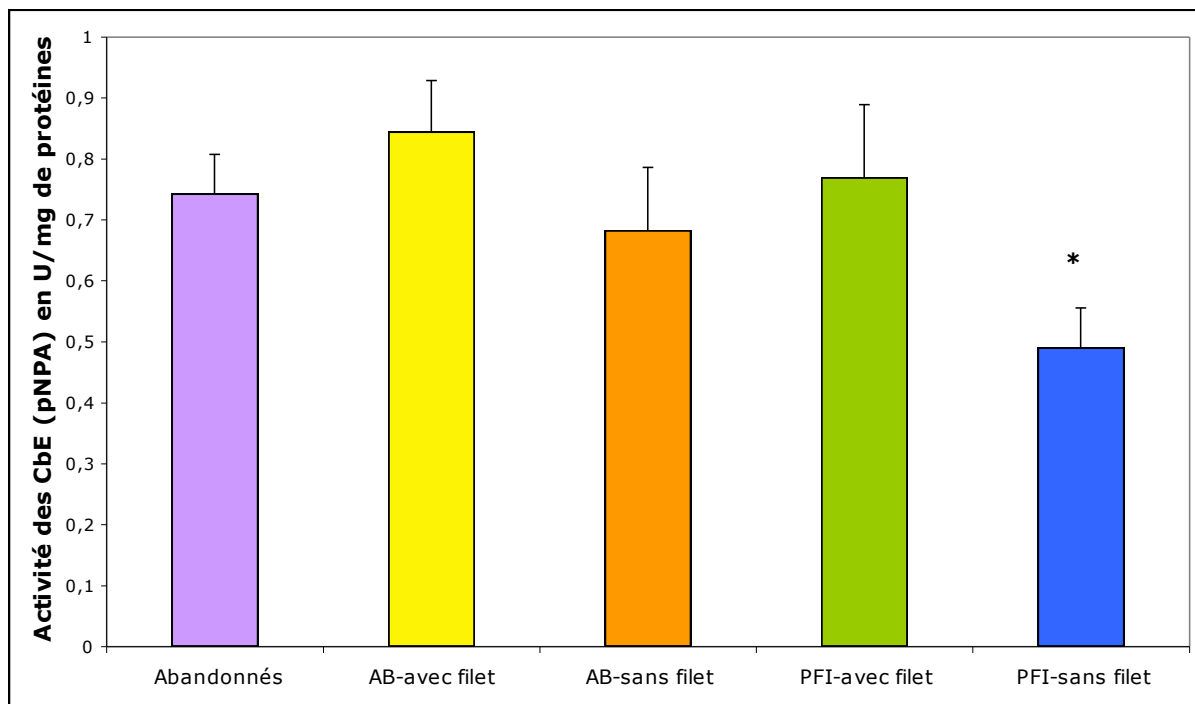


Figure 21 : Activités spécifiques (moyenne + erreur standard) tissulaires des carboxylestérases (p-NPA) dans les escargots *X. derbentina* exposés encagés dans des vergers abandonnés (barre violette), des vergers en AB couverts de filets Alt'Carpo (barre jaune), des vergers en AB non couverts (barre orange), des vergers PFI couverts de filets Alt'Carpo (barre verte) et des vergers PFI non couverts (barre bleu) après 1 mois d'exposition.

Conclusion :

Globalement, les résultats basés sur les marqueurs enzymatiques furent décevants : (i) aucune différence significative n'a pu être mise en évidence pour le forficules (même entre vergers AB et vergers PFI) et (ii) en utilisant des organismes transplantés (*X. derbentina*), nous avons pu déceler quelques différences significatives pour les CbE. Les problèmes que nous avons rencontrés sont liés à une forte variabilité (entre individus et entre dates). Il est probable que des facteurs de confusion (état physiologique des organismes, facteurs climatiques) ont joué un rôle important. Au delà de possibles différences entre organismes, il semble que l'approche basée sur l'utilisation d'organismes sentinelles, en permettant de choisir une population initiale la plus homogène possible, donne des réponses moins variables et donc plus facilement interprétables.

VOLET 4. DURABILITÉ ET EFFICIENCE ENVIRONNEMENTALE DES FILETS ALT'CARPO : ÉVALUATIONS *EX ANTE* ET *EX POST*

Dans le projet, il était prévu que l'évaluation globale de la durabilité de systèmes utilisant la méthode des filets Alt'Carpo soit effectuée :

- D'une part, par une **évaluation quantitative de l'efficacité environnementale** de la technique Alt'Carpo réalisée par Analyse de Cycle de Vie (ACV) ;
- D'autres part, par une **estimation de la durabilité globale de différents scénarios de protection des vergers** grâce à la mise au point d'un outil d'évaluation multicritère *ex ante* des innovations en arboriculture.

4.1. Evaluation quantitative de l'efficacité environnementale

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) permet une évaluation quantitative des impacts sur l'environnement d'un système incluant l'ensemble des activités liées à un produit ou à un service, comme par exemple la production de pommes de table depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement des déchets et ce, tout au long de son cycle de vie. Le calcul des impacts prend en compte les impacts liés à la production et l'utilisation de tous les intrants : produits phytosanitaires, fertilisation, machines... (hors main d'œuvre), utilisés pour produire des pommes. Le but recherché par ce type d'analyse est de quantifier tous les impacts associés au système de production afin de l'améliorer pour réduire la pression sur les ressources et sur l'environnement.

L'évaluation environnementale par ACV de la technique Alt'Carpo a consisté à évaluer l'impact de la technique par rapport à une protection PFI contre le carpocapse, incluant l'application d'insecticides et la pose de confuseurs. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur les caractéristiques des vergers en PFI du réseau Sud Est avec et sans filet (voir Volet 1). Un inventaire des filets a été réalisé sur la base des équipements nécessaires pour la couverture d'1 ha de verger constitué de 22 rangées d'arbre de 100 m de long équipé d'un filet type mono-rang, maille 5,5 x 2,2 mm, considérant une entreprise espagnole comme fournisseur du filet.

Ne disposant d'aucune information détaillée sur les procédés industriels liés à la production de tels filets, des extrapolations ont été faites, en se basant sur la base de données d'inventaires ACV EcoInvent. Les données d'inventaire étant incomplètes et les résultats ne bénéficiant d'aucune validation par des experts ACV, les calculs effectués avec le logiciel SimaPro sont présentés en Annexe confidentielle.

4.2. Mise au point d'un outil d'évaluation *ex ante* de la durabilité globale de systèmes de culture innovants en arboriculture.

Au-delà de l'impact environnemental de cette technique, il est nécessaire de réaliser une analyse de durabilité globale des systèmes de culture intégrant ces filets de manière à pouvoir déterminer globalement les atouts ou les freins à l'adoption de cette innovation et ce, en réalisant notamment des comparaisons avec les systèmes existants.

Dans le cas d'une innovation technique, cette évaluation peut être réalisée *ex ante* et de façon qualitative grâce à des modèles d'analyse multicritère, comme ceux basés sur la technologie Dex (Bohanec, 2003) et développés grâce à l'outil d'aide à la décision DEXi (Bohanec, 2013). Parmi ceux-ci, l'outil DEXiPM[®] (Pelzer *et al.*, 2012) permet l'évaluation de la

durabilité de systèmes de culture innovants visant à la réduction de l'usage de pesticides en grandes cultures. Cet outil propose une structuration hiérarchique, sous forme d'un arbre de décision, des trois composantes classiques de la durabilité (sociale, économique et environnementale) en intégrant différentes échelles spatio-temporelles et différents contextes. L'arbre décompose ces piliers en une série de critères plus faciles à renseigner. Il permet de réaliser une agrégation progressive des critères en leur affectant un poids pour aboutir à un classement global et qualitatif du système évalué. Dans ce projet, DEXiPM[®] a été adapté aux systèmes de vergers de pommiers.

4.2.1 Développement de l'outil DEXiPM-pomefruit

Ce travail a été réalisé avec l'aide d'un comité d'experts pour pouvoir discuter des critères à considérer pour décomposer la problématique de la durabilité en arboriculture mais aussi de leur mode d'évaluation. Le choix, la hiérarchisation, les règles d'agrégation (et la pondération) de ces critères ont été établis principalement par les experts impliqués dans le projet ALT'CARPO.

Partant de la structure de l'arbre de décision 'grandes cultures', l'adaptation au cas de l'arboriculture a essentiellement porté sur le choix des critères d'évaluation spécifiques à la filière pour les différents volets de la durabilité et leur pondération. La modification de l'arbre s'est faite de manière progressive, au fil des entretiens avec les experts. Chaque volet de la structure de base de DEXiPM[®] a été exploré en partant du haut de l'arbre pour vérifier l'intérêt de chaque critère agrégé et s'assurer que les critères d'entrée étaient adéquats par rapport au contexte de l'arboriculture. Par la suite, un travail complémentaire a été nécessaire pour déterminer les classes qualitatives décrivant les critères (niveau : *faible, moyen, élevé, par exemple*) et les fonctions d'utilité¹ à l'aide des discussions menées avec les experts et des résultats des systèmes de culture « tests ».

La première version du modèle (le détail de la structure est présentée en Annexe confidentielle) a été présentée en 2012 à la conférence du groupe de travail Production fruitière intégrée de l'Organisation Internationale de Lutte Biologique (OILB) en Turquie (Alaphilippe *et al.*, 2013).

4.2.2 Évaluation de DEXiPM-pomefruit et amélioration du modèle

La phase de validation a été effectuée lors de tests avec des partenaires du développement (conseillers et groupes d'agriculteurs au travers des partenariats des projets ALT'CARPO et du groupe de travail 'Verger Durable'), ainsi qu'avec des partenaires de la recherche, bénéficiant ici de collaborations au sein du projet européen PURE² (WorkPackage5).

Bien que la structure de l'arbre de DEXiPM-pomefruit soit complexe, le principe de décomposition du problème de la durabilité en critères d'entrée plus simples, avec un souci d'exhaustivité, facilite l'appréhension du problème et l'établissement de consensus entre les acteurs sur la vision de cette problématique complexe. Cependant, cette complexité impacte la sensibilité du modèle pour la discrimination des systèmes. En effet, lorsque la structure de l'arbre est trop compliquée, les critères d'entrée ont un faible impact sur les critères supérieurs de l'arbre. À des fins d'amélioration, comme cela a été effectué pour le modèle 'grandes cultures' (Pelzer *et al.*, 2010), une analyse de la sensibilité a été entreprise. Deux approches ont été utilisées :

¹ Dans l'OAD DEXi, l'agrégation des critères est basée sur des règles de décision, appelées fonction d'utilité, du type : si la valeur pour le critère A est « *faible* » et celle pour le critère B est « *moyenne* » alors la valeur pour le critère agrégé est « *faible* ». Ces règles sont résumées dans le logiciel par des tables de contingence qui peuvent être remplies par les experts. Elles permettent d'assigner des pondérations aux critères.

² <http://www.pure-ipm.eu/>

- Simulations de Monte Carlo : cette approche est basée sur la création aléatoire de combinaisons de valeurs d'entrée (systèmes de production et contextes). L'analyse des profils de performances est faite pour tous les critères agrégés, permettant de vérifier la pertinence des choix de classe pour chaque critère.
- Probabilités conditionnelles : cette méthode consiste à calculer un indice de sensibilité, qui représente la sensibilité de chaque critère agrégé à ses critères sous-jacents.

Cette analyse de sensibilité sera finie en fin d'été 2013 et permettra d'améliorer le modèle DEXiPM-pomefruit en fournissant des recommandations sur le nombre de critères et manière de les décrire.

4.2.3. Évaluation de la durabilité globale des systèmes utilisant des filets Alt'Carpo

Les tests de cette première version de l'outil ont été réalisés grâce aux données des vergers du réseau sud-est de Guilhem Séverac (CA 84). Deux systèmes de culture en protection fruitière intégrée (PFI) ont ainsi été comparés l'un avec utilisation de filets Alt'Carpo et l'autre sans. Seules les différences constatées entre ces systèmes seront discutées.

La note de **durabilité globale** du système de culture en PFI avec filet est « très élevée » alors que le système de culture sans ce dispositif est jugé « moyen-haut » (Figure 22). La durabilité sociale est « très élevée » dans les deux systèmes de production. Cependant, des différences apparaissent dans les résultats finaux de la durabilité économique et environnementale. Dans les deux cas, le résultat est meilleur pour le système de culture avec filet d'une à deux classes.

L'analyse plus fine des résultats des critères dans chaque pilier de la durabilité permet de déterminer où se situent réellement les impacts de l'innovation ou/et les faiblesses du système PFI sans filet.

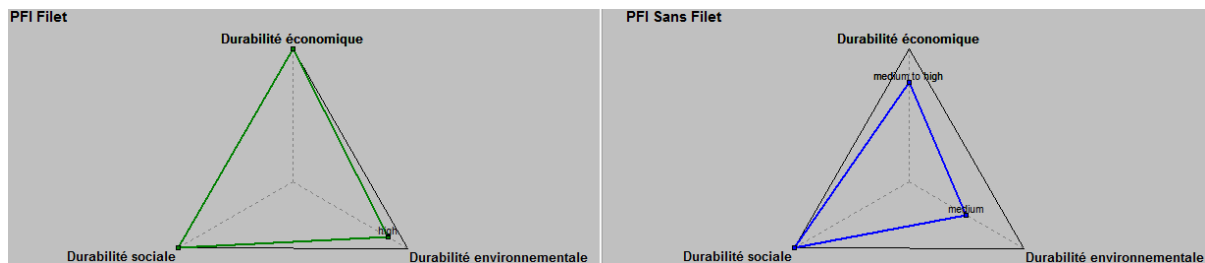


Figure 22. Résultat de l'évaluation de la durabilité globale de deux systèmes vergers avec et sans filet.

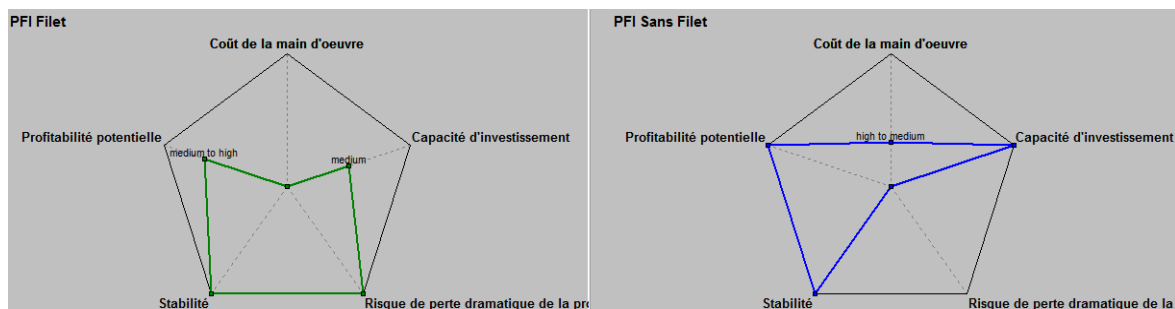


Figure 23. Résultat de l'évaluation de la durabilité économique de systèmes vergers avec et sans filet

La figure 23 détaille les évaluations des critères agrégés composant la **branche économique**. Si la stabilité économique est identique pour les deux systèmes comparés, la capacité d'investissement est plus faible pour le système « Avec filet » car c'est un dispositif technique onéreux à l'achat. De même, la profitabilité potentielle est moins élevée avec ce système car les besoins en main d'œuvre sont plus élevés. Cependant, les filets permettent de se prémunir du risque de perte dramatique de rendement³ contrairement à un système « Sans filet ». Ce critère étant agrégé à un niveau élevé dans l'arbre, cette variable joue sensiblement sur le résultat final. Globalement, la durabilité économique est plus faible dans le système sans filet. Si la note d'évaluation de la **durabilité sociale** est identique pour les deux systèmes, il existe tout de même quelques différences pour certains critères, qui, au final, se compensent (Figure 24). Ainsi, les filets permettent de réduire le risque pour la santé de l'arboriculteur (moins de pesticides utilisés) mais ils engendrent une perturbation du travail physique en obligeant les employés à travailler une fois dans l'année avec un filet à moitié soulevé. Toutefois, le maintien du filet pendant la durée de l'opération augmente les besoins en main-d'œuvre, contribuant un peu plus à l'emploi.

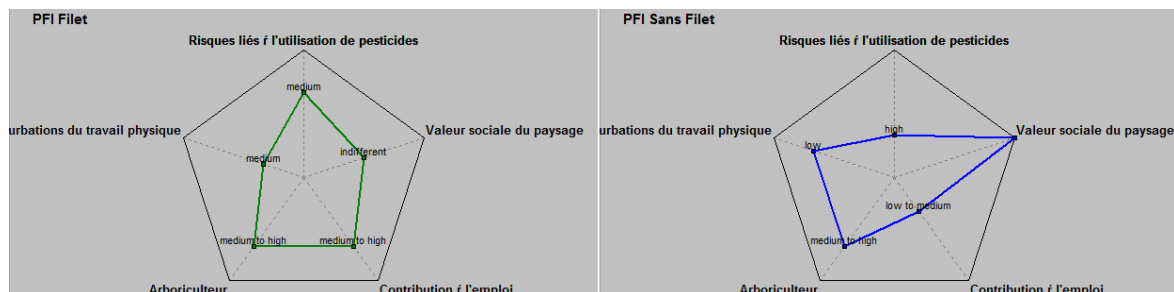


Figure 24. Résultat de l'évaluation de la durabilité sociale de systèmes de vergers avec et sans filet

Enfin, la plus grande différence entre les deux systèmes de verger PFI avec et sans filet se situe au niveau de la **durabilité environnementale** (Figure 25)⁴. La diminution des traitements phytosanitaires réduit la pression sur les auxiliaires, contribuant ainsi à une biodiversité fonctionnelle aérienne plus élevée. Il en est de même au niveau de l'impact sur les compartiments eau, air et sol. Cependant, l'utilisation de filets n'influence pas la consommation des ressources, qui reste faible, notamment parce que l'utilisation des machines est peu conséquente et celle des fertilisants moyenne. Par ailleurs, sur la région d'étude, il n'existe pas de restriction en eau et la pression foncière est relativement forte.

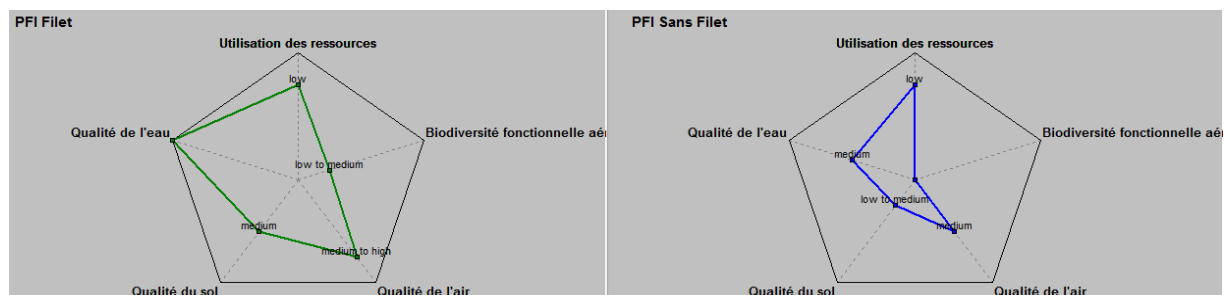


Figure 25. Résultat de l'évaluation de la durabilité environnementale des deux systèmes vergers

d) Autres utilisations potentielles de l'outil

Les sorties de ce type d'outil peuvent être utilisées comme « un tableau de bord » (Figure 26) pour mettre en évidence les impacts et les différences entre les systèmes (Pelzer *et*

³ Ce que ferait aussi un filet para-grêle classique

⁴ Pour des détails, voir la structure de cette branche en annexe confidentielle

Les filets Alt'Carpo en arboriculture

al., 2012). Cette disposition offre un aperçu de tous les aspects de la durabilité pour un système et pas seulement de ceux liés à la diminution de l'utilisation des pesticides. Cela permet de réaliser un diagnostic en identifiant les points forts et les points faibles afin d'améliorer les systèmes.

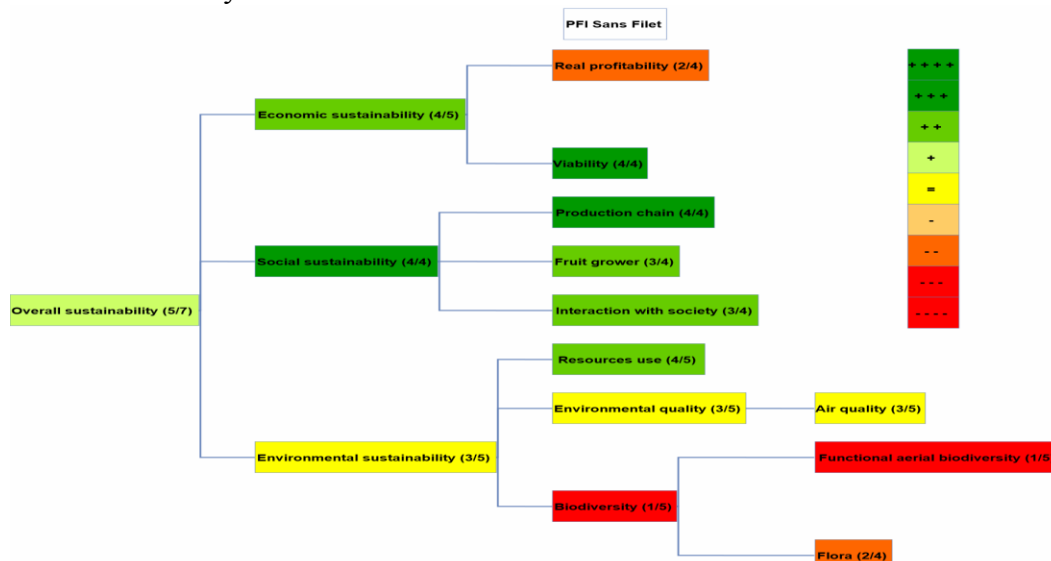


Figure 26 : Représentation des résultats d'évaluation du système verger PFI sans filet sous forme de tableau de bord

Ces sorties peuvent être utilisées pour comprendre le classement final des systèmes de culture les uns par rapport aux autres. Elles peuvent aussi être un support de discussion avec les arboriculteurs sur leur système actuel, les voies d'amélioration et les leviers techniques, qu'ils peuvent mettre en œuvre sur leur exploitation. Dans le cas des grandes cultures, ces sorties ont aussi servi à l'animation de groupes d'agriculteurs lors de l'introduction d'une innovation (Par ex : projet ANR PEPITES).

***Au final**, la création de cet outil et son utilisation avec différents cas « test » a permis d'évaluer la durabilité des filets Alt'Carpo et de décrire les avantages de cette innovation par rapport à un même système de culture non pourvu de ce dispositif. Les résultats obtenus pour l'innovation Alt'Carpo sont cohérents et s'expliquent assez facilement.*

Après l'évaluation à dire d'experts de l'outil et aux résultats encourageants des premières évaluations, DEXipomefruit a fait l'objet d'un dépôt à l'Agence de Protection des Programmes⁵.

Suite à des demandes provenant de partenaires du développement agricole, un projet a été construit et déposé à l'appel à projets « Pour et Sur le Plan Ecophyto »⁶. Il a pour objectif de préparer puis de transférer une version opérationnelle de DEXiPM-pomefruit qui pourrait, entre autres, être utilisée pour évaluer les systèmes testés dans les réseaux arboricoles DEPHY FERMES d'ECOPHYTO.

⁵ Dépôt du 30 janvier 2013 sous le n°: IDDN.FR.001.070018.000.R.P.2013.000.30100

⁶ Projet accepté, financement ONEMA pour 2ans à partir de juillet 2013 ; Co-financement GIS fruit pour la réalisation d'une interface conviviale

Listes des références citées

- Amarante, C.V.T., Steffens, C.A., Argenta, L.C. (2011). Yield and fruit quality of 'Gala' and 'Fuji' apple trees protected by white anti-hail net. *Scientia Horticulturae* 129, 79-85.
- Bohanec, M. (2003). Decision support, in: Mladenica D., Lavraè N., Bohanec M., Moyle S. (Eds.), *Data mining and decision support: Integration and collaboration*, Kluwer Academic Publishers, pp. 23-35.
- Bohanec, M. (2013). DEXi: Program for Multi-Attribute Decision Making, User's Manual, Version 4.00. IJS Report DP-11340, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, 64p.
- Codron, J.M., Habib, R., Jacquet, F., Sauphanor, B. (2003). Bilan et perspectives environnementales de la filière arboriculture fruitière, pp. 31-67. In : Dron Eds. *Agriculture, territoire, environnement dans les politiques européennes*. Dossier de l'environnement de l'INRA 23, INRA Paris.
- Crété, X., Regnard, J.L., Ferre, G., Tronel, C. (2001). Filets paragrêle : effets secondaires et conséquences sur la conduite du verger. *L'Arboriculture Fruitière* 553, 51-55.
- Dib, H., Simon, S., Sauphanor, B., Capowiez, Y. (2010a). The role of natural enemies on the population dynamics of the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea* Passerini (Hemiptera: Aphididae) in organic apple orchards in south-eastern France. *Biol. Control* 55, 97-109.
- Dib, H., Sauphanor, B., Capowiez, Y. (2010b). Effect of codling moth exclusion nets on the rosy apple aphid, *Dysaphis plantaginea*, and its control by natural enemies. *Crop Prot.* 29, 1502-1513.
- Erez, A., Wysoki, M., Yablowitz, Z., Korchinski, R. (1993). High density planting for protected cultivation of fruit crops: net to protect against insects. *ISHS Acta Horticulturae* 349: V International Symposium on Orchard and Plantation Systems.
- Girardin, P., Bockstaller, C. (1997). Les indicateurs agro-écologiques, outils pour évaluer des systèmes de culture. *Oléagineux. Corps gras Lipides* 4, 418-426.
- Iglesias, I., Alegre, S. (2006). The effect of anti-hail nets on fruit protection, radiation, temperature, quality and profitability of 'Mondial Gala' apples. *Journal of Applied Horticulture* 8(2), 91-100.
- Jakopic, J., Veberic, R., Stampar, F. (2007). The effect of reflective foil and hail nets on the lighting, color and anthocyanins of 'Fuji' apple. *Scientia Horticulturae* 115, 40-46.
- Lawson, D.S., Reissing, W.H., Nyrop, J.P., Brown, S.K. (1994). Management of arthropods on columnar apple trees using exclusionary cages. *Crop protection* 13, 346-356.
- Lloyd, A., Hamacek, E., George, A., Nissen, R., Waite, G. (2005). Evaluation of exclusion netting for insect pest control and fruit quality enhancement in tree crops. *Proceedings of the International Symposium on Harnessing the Potential of Horticulture in the Asian-Pacific Region Book Series: Acta Horticulturae* 694, 253-258
- Pelzer, E., Bockstaller, C., Messéan, A. (2010). ENDURE Deliverable DR2.28 - Report on sensitivity of DEXiPM, 20p.
- Pelzer, E., Fortino, G., Bockstaller, C., Angevin, F., Lamine, C., Moonen, C., Vasileiadis, V., Guérin, D., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A. (2012). Assessing innovative cropping systems with DEXiPM, a qualitative multi-criteria assessment tool derived from DEXi. *Ecological Indicators* 18, 171-182.
- Miñarro, M., Hemptinne, J.L., Dapena, E. (2005). Colonization of apple orchards by predators of *Dysaphis plantaginea*: sequential arrival, response to prey abundance and consequences for biological control. *BioControl* 50, 403-414.
- Pradal, J. (2012) Influence des filets Alt-carpo sur le microclimat et les épidémies de tavelure du pommier ; relations entre conduite du pommier, microclimat et épidémies de tavelure. Mémoire fin d'Etudes Ingénieur de Bordeaux Sciences Agro, 83 p.
- Sauphanor, B., Severac, G. et al. (2012). "Exclusion netting may alter reproduction of the codling moth (*Cydia pomonella*) and prevent associated fruit damage to apple orchards." *Entomologia Experimentalis Et Applicata* 145(2): 134-142.
- Severac, G., Romet, L. (2007). Alt'carpo, contre le carpocapse, travailler AVEC filet : Une innovation majeure pour la protection du pommier face au carpocapse *Cydia pomonella*. *Phytoma* 601, 10-14.
- Severac, G., Romet, L. (2008). Alt'Carpo, une alternative efficace. *Phytoma* 612, 16-20.
- Solomakhin, A., Blanke, M. (2010). The microclimate under coloured hailnets affects leaf and fruit temperature, leaf anatomy, vegetative and reproductive growth as well as fruit colouration in apple. *Annals of Applied Biology* 156(1), 121-136.
- Tasin, M., Demaria, D., Ryne, C., Cesano, A., Galliano, A., Anfora, G., Ioriatti, C., Alma, A. (2008). Effect of anti-hail nets on *Cydia pomonella* behavior in apple orchards 129. *Entomol exp et applic*, 129, 32-36.