

Concevoir et expérimenter des vergers agroforestiers en Agriculture Biologique (VERTiCAL)

Castel L.¹, Plessix S.¹, Gaspari C.², Warlop F.², Fourrié L.³, Montrognon Y.⁴, Ronzon J.²,
Labeyrie B.⁴, Ray T.⁵, Cadet D.⁶, Arlaud C.⁷, Paut R.², Tchamitchian M.⁸, Bouvier J-C.⁹,
Jammes D.¹⁰, Filleron E.¹¹, Sieffert A.¹², Fanguede A.¹²

¹ Chambre d'Agriculture de la Drôme, F-26504 Bourg-lès-Valence

² Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (GRAB), F-84000 Avignon

³ ITAB, l'Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques, F-26320 Saint-Marcel-lès-Valence

⁴ SEFRA/CTIFL,

⁵ Arvalis Institut du Végétal

⁶ Terres Inovia, F-26800 Etoile-sur-Rhône

⁷ Ligue de Protection des Oiseaux Drôme, F-26120 Chabeuil

⁸ INRA Ecodev, F-84914 Avignon cedex 9

⁹ INRA UR 1115 Plantes et Systèmes Horticoles, F-84914 Avignon cedex 9

¹⁰ Bio de Provence

¹¹ Chambre d'Agriculture du Vaucluse, F-84000 Avignon

¹² Association Drômoise d'Agroforesterie, F-26160 Pont-de-Barret

Correspondance : laurie.castel@drome.chambagri.fr ; francois.warlop@grab.fr

Résumé

Le projet VERTiCAL s'est intéressé de 2013 à 2018 à la diversification spatiale et temporelle des systèmes arboricoles comme un levier pertinent de réduction de l'usage des pesticides. Il a abouti à la création de deux systèmes agroforestiers fruitiers (SAF) uniques, « TAB » et « Durette », conduits en Agriculture Biologique et aux caractéristiques technico-économiques complémentaires. Le projet a été le lieu d'innovations en termes de co-conception et a contribué à la mise au point d'un nouvel outil d'évaluation *ex-ante* des SAF « DEXi-AF ». Les premiers résultats d'expérimentation indiquent une réduction de 52% de pesticides dans le système TAB par rapport à un système conventionnel de référence avec des objectifs de rendements atteints, et un usage très faible dans le système Durette. La richesse spécifique des oiseaux est passée en 6 ans de 12 à 24 espèces sur la Durette et de 24 à 35 espèces sur le site TAB. L'aménagement spatial satisfait l'organisation du travail mais ne permet pas de maîtriser intégralement les bio-agresseurs. Les résultats, impactés par deux années de grêle, seront consolidés dans le projet EMPUSA (projet DEPHY EXPE, 2019-2024). Les deux sites sont aujourd'hui supports de formation pour les agriculteurs et les conseillers agricoles souhaitant mettre en place un SAF.

Mots-clés : Agroforesterie, Diversification, Biodiversité, Co-conception, Evaluation multicritères

Abstract: Co-design and experiment of two fruit agroforestry systems grown in organic farming

The VERTiCAL research project focused from 2013 to 2018 on the spatial and temporal diversification of fruit tree systems as a relevant mean for reducing pesticide use. The project resulted in the design and assessment of two fruit agroforestry systems (AFS), called "TAB" and "Durette", managed in organic farming and with specific technical and economic characteristics. The project allowed co-design

experiences and led to the development of a new tool for *ex ante* assessment of AFS. First results show a 52% reduction of pesticides on the TAB system compared to a conventional reference system while reaching yield objectives, and a very low reliance to pesticides on the Durette system. As for biodiversity, specific richness of birds increased from 12 to 24 species on the Durette system, from 24 to 35 on the TAB system. Spatial planning fulfills the working organization, but does not make it possible to fully control pests yet. Results will be consolidated in the continuing EMPUSA project (2019-2025). Both sites are now important demonstration sites for farmers and agricultural advisors interested in implementing AFS.

Keywords: Agroforestry, Diversification, Biodiversity, Co-design, Multi-criteria assessment

Introduction

L'enjeu de réduction de l'usage des produits phytosanitaires en arboriculture est crucial ; les enquêtes de pratiques culturales montrent encore des niveaux d'Indice de Fréquence de Traitement (IFT), en 2015, de 33,1 en pomme et de 20,3 en pêche (Agreste, 2018). L'IFT médian de la pêche dans le réseau DEPHY FERME est de 25 en 2014 (Ecophyto, 2014). Le programme DEPHY Expe Ecophyto a été mis en place pour réduire massivement l'usage des pesticides et tester la viabilité de vergers à bas niveau d'intrants. Un tel programme permet de tester des « niveaux de rupture » de conception forts, de prendre des risques que les agriculteurs ne peuvent pas prendre, quitte à perdre une partie de leur production. L'expertise scientifique collective « Ecophyto R&D » a mis en évidence en 2010 qu'une forte réduction des intrants n'est possible que sur la base d'une re-conception des systèmes de culture (Butault et al. 2010). En effet, les vergers actuels dits « classiques », mono-clonaux, à haute densité, avec des variétés sensibles aux bio-agresseurs, sont peu propices à la réduction forte des intrants (Simon et al., 2011).

Le projet VERTiCAL, lauréat de l'appel à projet DEPHY EXPE 2012-2018, s'inscrit dans une démarche forte de reconception des vergers. En réponse à une demande de la profession agricole, il s'intéresse à la diversification des strates productives et non productives du verger comme levier de réduction du recours aux intrants. Il s'inspire de l'agroforesterie, qui recherche une synergie entre les strates d'arbres et de cultures annuelles. L'agroforesterie est principalement étudiée en systèmes de grandes cultures et d'élevage et en zones tropicales. "L'agroforesterie fruitière" est aujourd'hui peu documentée. Elle est néanmoins en voie de développement chez les maraîchers (Warlop et al., 2017). L'arbre a ici un rôle de complément économique, d'élément paysager et de régulateur climatique.

La diversification des strates et des milieux favoriserait les communautés d'auxiliaires et la régulation des ravageurs des cultures, assurerait un effet "barrière" aux maladies, et augmenterait la productivité du système (Snyder et al., 2006, Michaelides et al., 2018). Ce nouveau type de système multi-strates méritait des travaux de recherche approfondis.

L'objectif du projet VERTiCAL a été de concevoir et d'évaluer les performances, dès 2012, de deux types de systèmes en agroforesterie fruitière, l'un en verger agroforestier associant des pêcheurs et des grandes cultures et orienté vers les circuits longs sur la Plate-forme TAB (ferme expérimentale d'Etoile-sur-Rhône, Drôme), l'autre en verger maraîcher associant des légumes diversifiés et des arbres fruitiers et orienté vers les circuits courts (ferme de la Durette, Avignon, Vaucluse). L'Agriculture Biologique a été choisie comme mode de conduite dans les deux systèmes pour limiter au minimum l'usage des produits phytosanitaires et permettre davantage l'expression des services écosystémiques (Muneret, 2018). La Plate-forme TAB offre les conditions d'essais d'une ferme expérimentale, avec une expertise pointue sur la conduite de nombreuses cultures, le site de la Durette est un observatoire piloté par des agriculteurs en installation, suivi par le GRAB. Concevoir de tels systèmes « complexes » requiert de nouvelles méthodologies et connaissances ; le projet a ainsi exploré et développé différentes méthodes

de co-conception et d'évaluation multi-critères de ces systèmes. Les systèmes ont été mis au champ en 2013 sur la Plate-forme TAB et entre 2014 et 2016 sur la Durette (diversité de fruitiers plus difficiles à trouver).

Cet article présente (i) les étapes de co-conception développées dans le projet, (ii) les outils d'évaluation conçus et (iii) les premiers résultats agronomiques et économiques obtenus dans ces jeunes systèmes. Il propose des pistes de développement pour la suite du projet.

1. Contexte

Le contexte peu diversifié des vergers, avec le maintien et le développement d'un inoculum de pathogènes année après année, rend difficile la gestion des maladies et des ravageurs. La recherche d'un fruit « zéro défaut » notamment en circuits longs amène les producteurs à traiter fréquemment (Pisonnier *et al.*, 2016).

La diversification du verger, notamment celle des espèces végétales, apporterait plus de résilience au système de production. Les mécanismes visés sont multiples. D'après la méta-analyse de Pumarino *et al.* (2015), l'utilisation de pratiques agroforestières réduit généralement les adventices et augmente l'abondance des insectes auxiliaires. En système agroforestier, l'abondance des ravageurs et les dégâts liés aux ravageurs et aux maladies sur plantes sont plus faibles sur plantes pérennes qu'en système non agroforestier. Ce n'est par contre pas le cas sur plantes annuelles. L'effet de l'agroforesterie sur les ravageurs et les maladies ne dépend pas seulement du type de culture : d'autres facteurs interviennent tels que le type de ravageur, le microclimat, et les préférences microclimatiques du ravageur (Schroth *et al.*, 2000). A noter aussi que la plupart des études testant l'impact des pratiques agroforestières sur les bioagresseurs ont été réalisées sur café et maïs, majoritairement en Afrique de l'Est et de l'Ouest, ou encore en Amérique centrale ou du Sud. Un plus large panel de cultures, de régions et de type de systèmes agroforestiers doit être étudié pour compléter les connaissances actuelles (Pumarino *et al.*, 2015). L'effet de l'agroforesterie sur la gestion des bioagresseurs en milieu tempéré est très peu documenté actuellement.

Un effet sur le micro-climat serait également attendu, avec des effets sur la température et l'hygrométrie (Griffiths *et al.*, 1998). La diversification des strates aurait également un effet sur les rendements. Cet aspect est très documenté en système de grandes cultures et bois d'œuvre, avec un gain démontré de plus de 30% de biomasse dans le système de Restinclières (Talbot, 2011), mais n'a pas été travaillé en agroforesterie fruitière.

En verger, l'irrigation impacte l'enracinement des arbres fruitiers et des cultures : elle limiterait le développement racinaire, sans toutefois présumer de l'absence d'échanges au niveau racinaire. L'agroforesterie aurait également un effet certain sur les résultats économiques et la répartition du temps de travail (Paut, 2019). A l'échelle d'une année, la diversification des productions et l'étalement des récoltes influent sur la trésorerie et les résultats économiques, et améliorent la résilience économique du système (capacité à encaisser des aléas climatiques, sanitaires, commerciaux...). L'état des connaissances sur ces niveaux de performances en vergers diversifiés est encore très partiel.

Le projet VERTiCAL a donc l'ambition de contribuer à produire des références technico-économiques et agronomiques en vergers agroforestiers dans deux contextes distincts, l'un en circuits courts et l'autre en circuits longs, l'un en conditions d'expérimentations système et l'autre en conditions d'observatoire piloté par des agriculteurs. Il vise à répondre aux questions suivantes : l'agroforesterie fruitière, ou la diversification des strates, est-elle un levier de réduction des pesticides ? Les systèmes testés en agroforesterie fruitière sont-ils des systèmes à faible recours d'intrants, favorables à la biodiversité et performants sur les plans économique, social et environnemental ?

2. Matériels et méthodes

2.1 Deux contextes d'expérimentation complémentaires, un multi-partenariat

La création du verger agroforestier de la Plate-forme TAB et celle du verger maraîcher de la ferme de la Durette s'inscrivent dans des contextes d'expérimentation complémentaires, tant du point de vue des objectifs agricoles que partenarial (Tableau 1).

Le multi-partenariat développé dans le projet a été le garant de la méthodologie de conception et d'expérimentation mise en œuvre. Le projet s'est doté d'un Comité scientifique pour accompagner les étapes de conception et d'évaluation spécifiques aux systèmes agroforestiers, avec des membres issus de l'INRA, de la SCOP Agroof, du CTIFL, du Cirad, de Supagro Montpellier et de l'ISARA.

Tableau 1 : Contexte de conception des systèmes agroforestiers dans le projet VERTiCAL

	Site de la Plate-forme TAB	Site de la Durette
Lieu	Etoile-sur-Rhône (Drôme) Climat méditerranéen, sol argilo-limoneux drainant et caillouteux, zone rurale	Avignon (Vaucluse) Climat méditerranéen, sol profond argileux Périphérie urbaine
Taille du système	Une parcelle de 3 hectares en agroforesterie	Une ferme de 5 hectares
Date d'implantation	2013	fruitiers : 2014-2016 maraîchage : 2016
Objectifs	Produire des fruits et des grandes cultures en bio, favoriser la biodiversité	Produire des légumes et des fruits bio pour les marchés de proximité et faire vivre 2 à 3 agriculteurs
Pilotage	Chambre d'Agriculture de la Drôme Arvalis, ITAB, Terres Inovia, INRA, CTIFL, LPO 26. Les cultures sont conduites par l'AGFEE et la SEFRA.	GRAB, INRA, Bio de Provence, Chambre d'agriculture du Vaucluse. Les cultures sont conduites par 1 agriculteur en 2016 puis 3 en 2019.
Public ciblé	Arboriculteur avec une diversification grandes cultures	Maraîcher avec une diversification fruitière
Mode de production	AB, mécanisé	AB, mécanisé
Commercialisation	Circuits longs	Circuits courts (paniers)
L'arboriculture dans le système	Revenu principal, les grandes cultures complètent le revenu	Revenu secondaire, le revenu principal de l'exploitation vient du maraîchage
Stratégie de production	Pas de revenu complémentaire hors exploitation, la production doit permettre de tirer un revenu rapidement.	Une montée de la production progressive (revenu complémentaire existant). Un atelier de poules pondeuses est à venir.

2.2 Une co-conception à dire d'experts

Le processus de conception des systèmes a été initié indépendamment sur les deux sites. Trois phases de conception ont été menées entre 2012 et 2014 ; chacune a nécessité 12 à 14 mois. Leur animation a été conduite par un post-doctorant sur la Durette et par l'animatrice sur la Plate-forme TAB.

La méthode de conception utilisée est la conception « à dire d'experts ». Cette démarche suppose que l'intelligence collective et partagée est plus efficace et plus rapide que des démarches individuelles pour concevoir des systèmes et des modes de production innovants (Lançon et al., 2007). Les groupes de conception ont impliqué des techniciens, des agronomes, des chercheurs, des agriculteurs, des acteurs du développement agricole (Figure 1). Six à huit ateliers de conception ont rythmé chaque phase de conception. Ces phases allaient de la présentation des objectifs et contraintes propres à chaque site, à la présentation de scénarii plus ou moins innovants, à des échanges pour écarter certains scénarii et affiner ceux qui étaient retenus pour chaque site. Ces ateliers ont été alimentés par les apports des participants mobilisés pour leurs expertises et compétences complémentaires (comme la maîtrise technique d'une culture ou la gestion d'un bio-agresseur par la biodiversité), mais également par des apports de connaissances issues de la bibliographie ou d'expériences issues de dispositifs en agroforesterie.

Plus précisément, deux méthodes de conception ont été éprouvées : (i) une méthode dite « pas à pas », testée sur la plate-forme TAB, en 2012 ; (ii) une méthode dite « de novo », testée sur la Durette en 2012 et sur la Plate-forme TAB en 2014. La démarche « pas à pas » permet d'organiser une transition progressive grâce à des boucles d'apprentissage alors que la démarche « de novo » développe des systèmes de culture en rupture forte avec l'existant (Meynard, 2012). A partir de la définition d'un cahier des charges de conception, comprenant les objectifs et les contraintes (terrain, matériel, mode de production, mode de commercialisation...), plusieurs prototypes ont été produits. Outils d'animation et de brainstorming, visites et retours d'expériences d'agriculteurs agroforestiers, construction de maquettes en relief, représentations graphiques, logiciels de dessin 3D, modélisation par la méthode ARDI (Etienne, 2012) : une diversité d'outils a été mobilisée et inventée dans le projet pour stimuler l'imagination collective et proposer de nouveaux systèmes (Castel, 2015). Outre les comptes rendus de réunions, chaque phase de conception a fait l'objet d'un rapport présentant la démarche et les prototypes obtenus. Les règles de décision sont actualisées chaque année.

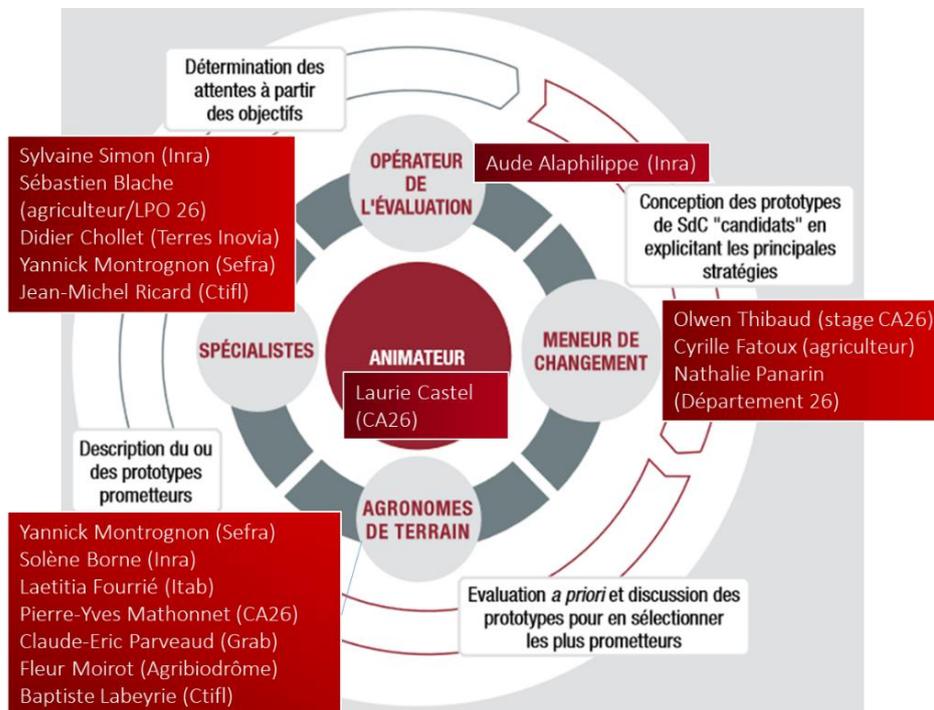


Figure 1 : Composition du groupe de co-conception sur la Plate-forme TAB en 2014. D'après une adaptation du schéma d'Havard et al. (2017) publié dans le Guide de l'expérimentateur "système".

2.3 Évaluation des performances et paramètres mesurés

Il n'existe, pour l'heure, aucun outil (type DEXi-PM ou MASC®) d'évaluation de la durabilité globale des systèmes agroforestiers. C'est donc au travers de quelques indicateurs calculés à l'échelle du système que sont analysées les performances économiques, sociales et environnementales des systèmes :

- Consommation d'intrants : IFT (calculé dans ces systèmes diversifiés en considérant la surface concernée par chaque culture), consommation d'azote, d'énergie et d'eau (/ha/an) ;
- Viabilité économique : marge nette (après rémunération, coûts de production (/ha/an) ;
- Acceptabilité sociale : temps de travail/ha/an et répartition annuelle, charge mentale¹ ;
- Impact sur la biodiversité : diversité et abondance de bio-indicateurs, oiseaux, carabes, papillons ;
- Impact sur la fertilité du sol : taux de matière organique, teneurs en éléments minéraux, biomasse microbienne.

En l'absence de références pour des systèmes agroforestiers tempérés, les résultats sont interprétés par rapport aux objectifs établis au démarrage de l'expérimentation pour les indicateurs technico-économiques, et par rapport à un état initial pour les indicateurs agronomiques et environnementaux. Le mode d'acquisition et d'analyse des données est adapté à chaque site.

Les dégâts phytosanitaires sont évalués à dire d'experts sur les deux sites par les agriculteurs et techniciens avec attribution d'une note de satisfaction pour chaque culture, et sur la base de comptages pour les bio-agresseurs les plus problématiques. Un verger de pêcheur témoin bio est utilisé sur la Plate-forme TAB pour interpréter les niveaux d'attaque en milieu agroforestier. En termes de production, c'est le rendement commercialisé qui est enregistré pour chacune des 40 productions de la Durette, avec un pourcentage de perte évalué par les producteurs. Sur la Plate-forme TAB, la production brute et commercialisée de pêche est mesurée sur 12 zones références, celle des cultures annuelles à la parcelle, avec distinction des zones de bordure et de cœur de parcelle.

Sur la Durette, des outils partagés entre les producteurs et les chercheurs ont été créés : un outil de saisie du temps de travail, un calendrier de culture, l'assolement, les apports en fertilisants et les traitements phytosanitaires réalisés. Les outils Dia'terre et Dialecte® permettent de construire un diagnostic agro-environnemental annuel sur la ferme. L'outil Systerre® est utilisé sur la Plate-forme TAB pour dégager des indicateurs technico-économiques. Les interventions et les résultats par culture saisis, les résultats sont ensuite extrapolés à l'échelle d'une ferme-type de 22,5 hectares, échelle estimée par les experts comme pertinente pour un système mixte pêcheurs-grandes cultures.

Le suivi des oiseaux nicheurs est réalisé deux fois par an (avril/mai) au moyen du protocole STOC (Suivi Temporel des Oiseaux Communs)² sur la Durette, il se fait sur la base d'un quadrat répété 5 à 6 fois par an de février à mai sur la Plate-forme TAB. Arthropodes du sol, pollinisateurs sauvages, flore et vers de terre sont également suivis.

En complément, la réussite (niveau de satisfaction) et la faisabilité (mise en œuvre et évolution des règles de décision) de ces nouveaux systèmes sont appréciées sur la base d'entretiens trimestriels et annuels avec les agriculteurs et le chef de culture. Ces entretiens permettent d'observer le schéma décisionnel appliqué, de repérer les modifications d'itinéraires techniques par rapport au prévisionnel et d'en déduire des zones de tensions dans l'organisation du travail. Ceci contribue à consolider le jeu de règles de décision, actualisé chaque année.

¹ Méthode qualitative utilisée en sociologie pour caractériser la pénibilité du travail et le stress associé

² <https://crbpo.mnhn.fr/spip.php?article41>

3. Résultats

3.1 Un prototype d'outil d'évaluation ex-ante des prototypes

Les performances économiques, environnementales et sociales des prototypes ont été évaluées avant leur implantation, à l'aide d'outils de simulation type Excel®, Systerre®, Ardi, Dialecte® et Planete®. Un travail de bibliographie a été mené en 2013 pour évaluer la durabilité globale des systèmes conçus dans le projet, afin de proposer des améliorations. Les outils existants n'étant pas adaptés à des systèmes diversifiés comme les systèmes agroforestiers, ce travail a abouti à la création d'un outil d'aide à la conception DEXi-VERTiCAL, qui évalue *ex ante* (avant implantation) la durabilité du système (Bernard, 2014). Cet outil a ensuite été amélioré par l'INRA sous le nom de DEXi-AF (Alaphilippe, 2016), testé dans le cadre du projet VERTiCAL sur les deux sites pilotes (Figure 2) et chez des producteurs, comme outil d'aide à la conception entre un conseiller et un agriculteur en réflexion autour de la mise en place d'un système agroforestier. L'outil est actuellement au stade de prototype, et n'a pas encore fait l'objet d'une phase de consolidation et développement.

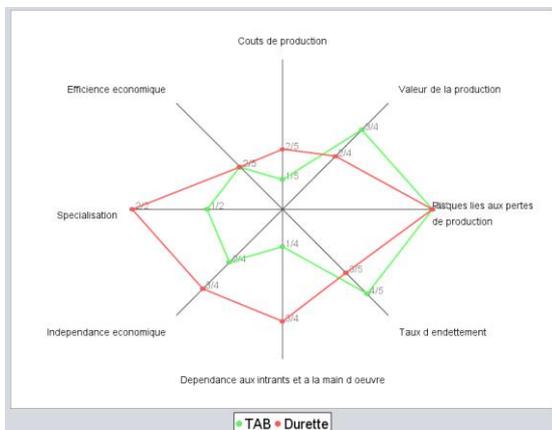


Figure 2 : Exemple de sortie de l'outil DEXi-AF: évaluation ex-ante des systèmes TAB et Durette

3.2 De nouveaux systèmes multi-productions et multi-innovations

Les objectifs et les contraintes assignés à chaque site ont abouti à la mise en expérimentation de deux systèmes agroforestiers. La Figure 3 présente les deux dispositifs expérimentaux implantés au champ.



Figure 3 : Les deux dispositifs expérimentaux implantés sur le terrain. A gauche, la Plate-forme TAB : Alternance de mini-vergers piétons de 3 rangs de pêchers de 20m de large (37% de la SAU) avec des planches de grandes cultures de 18m (41%) et des zones pour la biodiversité (22%). Surface totale : 3,04ha. A droite, la Durette : des planches de maraîchage sont délimitées par des doubles rangs d'arbres fruitiers. Surface totale : 5ha.

Le Tableau 2 présente les caractéristiques des systèmes et le niveau de mobilisation de leviers de réduction de l'usage des produits phytosanitaires retenus, de 0 (levier non mobilisé) à 3 (levier fortement mobilisé). Le niveau de diversification intra-parcellaire des systèmes est un compromis entre intensification de la biodiversité et organisation du travail.

Tableau 2 : Mobilisation des leviers de réduction des produits phytosanitaires dans les systèmes ; (Notes de 0 - levier non mobilisé à 3 - levier fortement mobilisé) *.

	TAB Pêcher - Soja - Maïs S - Féverole H - Colza - Blé tendre	Durette Légumes, fruits et poules	Observations
Adapter les objectifs de production et de commercialisation	2	3	Le mode de production AB permet de valoriser la prise de risque phytosanitaire. Le choix du circuit long (TAB) amène à une prise de risque moyenne. La vente de paniers (Durette) permet de valoriser 100% des récoltes.
Favoriser la prédation des ravageurs par la biodiversité	3	3	Types d'aménagements conçus : Haies diversifiées autour et dans la parcelle, nichoirs à oiseaux et chiroptères, abris pour belettes et reptiles, mare, maintien d'une flore spontanée diversifiée.
Diversifier les productions et répartir les risques de perte	2	3	Le niveau de diversification joue sur la stabilité du système. TAB : 6 espèces cultivées. Durette : 40 espèces cultivées de légumes et d'arbres fruitiers, l'arboriculture est un atelier secondaire.
Choisir un matériel végétal tolérant aux bio-agresseurs	1	3	TAB : les variétés choisies répondent à la demande du marché, certaines peuvent être sensibles aux bio-agresseurs (variété de pêche : Ivorystar®) Durette : variétés tolérantes aux maladies, porte-greffes vigoureux.
Pratiquer une rotation longue des cultures	3	3	Alternance des familles cultivées et intégration de légumineuses dans les rotations pluriannuelles.
Gérer mécaniquement les adventices	3	3	- Sur le rang des arbres : butteuse-débutteuse, brosses mécaniques (TAB), système sandwich, plantes couvre-sols, bandes fleuries (Durette). - Dans les cultures : Labour, faux semis, désherbage mécanique : Herse étrille, bineuse (TAB), occultation, choix variétaux, désherbage mécanique/manuel (Durette)
Prioriser les interventions phytosanitaires et adapter les seuils d'intervention	2	2	Dans le cas où la production fruitière est l'atelier principal (TAB), les traitements sont appliqués lorsque le risque de perte de récolte est présent ; a contrario, lorsque l'atelier est secondaire (Durette), le niveau d'intervention est faible.

* d'autres pratiques agronomiques sont mises en œuvre mais ne sont pas détaillées ici : lutte biologique par confusion sexuelle, lâchers de trichogrammes, associations de variétés dans une parcelle...

A l'échelle du système, la gestion des adventices reste un des principaux enjeux en Agriculture Biologique, toutes filières confondues. C'est pourquoi un système de culture en planches a été choisi pour faciliter les interventions mécaniques, la largeur des planches cultivées étant un multiple de la largeur des outils disponibles sur la ferme. Les haies ont un rôle de délimitation, de brise-vent et d'accueil des auxiliaires de culture, elles sont donc positionnées en bordure de production et certaines

pénètrent au cœur des parcelles ; en tout point des parcelles une haie se situe à moins de 50m pour faciliter la prédation par les arthropodes.

A l'échelle de l'atelier fruitier, le mélange des espèces et des variétés de fruitiers sur un même rang a été étudié puis écarté au regard des contraintes de pilotage de l'irrigation pour chaque espèce fruitière, et pour une meilleure rationalisation des travaux (récoltes). Par ailleurs, le nombre de rangs d'arbres fruitiers est stratégique pour faciliter les interventions. Sur la Plate-forme TAB, il a été retenu de mettre en place des mini-vergers piétons de 3 rangs de pêcheurs, optimisant les déplacements dans la parcelle, tant des outils – pulvérisateur, girobroyeur, que des équipes de travail – taille, récolte. Sur la Durette, c'est un double rang qui a été sélectionné pour permettre l'accès auprès des arbres, la mécanisation, ou le passage de bandes de volailles.

Concernant les cultures, c'est essentiellement à l'échelle de la rotation que se joue la diversification. Sur la Plate-forme TAB, la rotation soja - maïs semence - féverole d'hiver - colza - blé tendre a été pensée pour être autonome en intrants et concurrencer les adventices. Le mélange d'espèces ou de variétés intra-parcellaire n'a pas été retenu comme levier, ni pour les arbres fruitiers ni pour les grandes cultures, par manque d'éléments fondés sur l'intérêt de ces mélanges par rapport à la dispersion des maladies et des ravageurs. Le colza est la seule culture associée avec un mélange de plantes compagnes (Lentille 50% / Fenugrec 40% / Trèfle blanc 10% à 15 kg/ha), pour faciliter son enracinement et lui apporter de l'azote. Les associations de cultures sont fréquemment pratiquées en maraîchage sur la Durette.

3.3 Recours aux pesticides et maîtrise des bio-agresseurs

L'objectif de réduction des pesticides fixé au démarrage de l'essai est atteint sur les deux sites ; il correspond à 52% de réduction de l'IFT par rapport à un système conventionnel de référence sur la Plate-forme TAB et à 80% sur la Durette³ (Figure 4). L'IFT du système agroforestier de la TAB (composé de 47% de pêcheurs et 53% de grandes cultures) est de 6,16 en moyenne sur 4 années de production fruitière. Sur la Durette, il est de 0,94 en moyenne sur les 3 années de production (2016-2018). Les IFT sont principalement composés de produits de biocontrôle (soufre, huile, argile, confusion sexuelle...), à hauteur de 68,2% et de 61,4 % respectivement sur TAB et Durette.

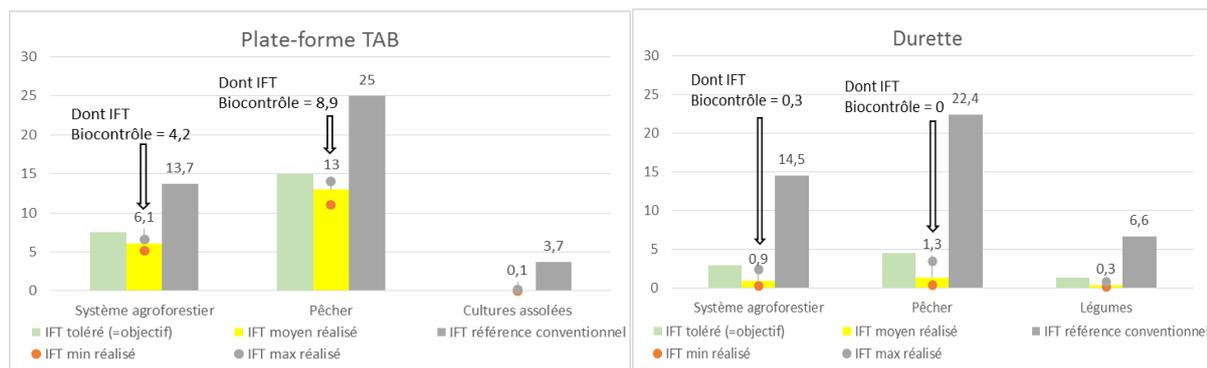


Figure 4 : Indices de fréquence de traitement dans les systèmes agroforestiers de la Plate-forme TAB (à gauche) calculé de 2015 à 2018 (pêches en production) du 1^{er} janvier au 31 décembre et de la Durette (à droite) calculé en 2016 et 2017.

³ L'IFT de référence conventionnel a été calculé à partir de plusieurs sources : <http://agreste.agriculture.gouv.fr> <http://idele.fr> , <http://arboriculture.ecophytopic.fr>

Sur la Plate-forme TAB, l'IFT_{pêche} est de 12,98 en moyenne sur les années de production fruitière, les grandes cultures demandent quant à elles très peu de traitements. La tendance est inverse sur la Durette où l'IFT_{pêche} moyen sur les 2 années de production (1,3) pèse moins sur l'IFT du système.

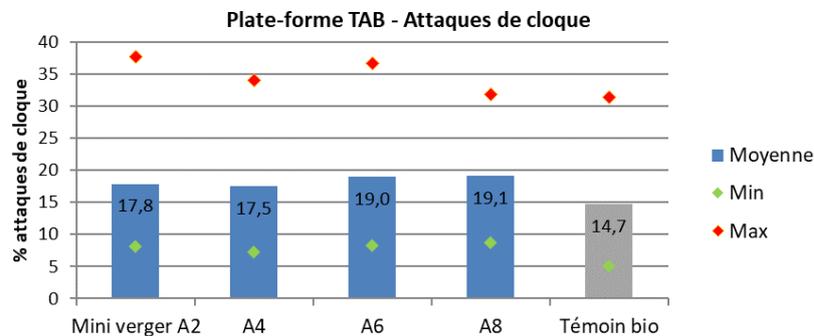


Figure 5 : Infestation de la cloque dans l'essai agroforestier de la Plate-forme TAB entre 2014 et 2018 pour chaque bloc de 3 lignes de péchers (A2, A4, A6, A8, voir fig. 3) et pour le témoin.

Toutes productions confondues, le principal enjeu est la maîtrise des maladies. Le suivi de la cloque du pêcher entre 2013 et 2018 sur la Plate-forme TAB ne montre pas de réduction significative de la maladie dans le système agroforestier (Figure 5). La forte sensibilité à la cloque de la variété de pêche Ivorystar® a été révélée au cours de l'expérimentation, impliquant des traitements fongicides préventifs incontournables, principaux composants de l'IFT. Dans le cas des grandes cultures, les observations (sans analyse statistique) semblent indiquer des dégâts de maladies plus faibles pour le colza (oïdium) et la féverole d'hiver (rouille) en situation agroforestière que dans des parcelles hors agroforesterie sur le site.

La maîtrise des ravageurs est satisfaisante. Les ravageurs souvent problématiques en conventionnel comme le puceron vert du pêcher ou le puceron noir du blé sont ici bien gérés. Sur la Plate-forme TAB, on observe des ravageurs dits « secondaires » comme les forficules qui sont la cause de 4,8% de la perte de pêches (années de récolte 2015 et 2017), soit 0,87 t/ha.

3.4 Rendements commercialisables

Sur la Plate-forme TAB, les objectifs de rendements sont atteints et dépassés pour 4 des 6 cultures suivies. Le rendement pêche est satisfaisant avec un rendement moyen de 15,85 t/ha sur les 2 années de récolte (Figure 6). Les aléas climatiques fragilisent néanmoins considérablement la production, avec 2 années (sur 4 de production) de grêle (en 4^{ème} et 6^{ème} feuille) sans récolte ou avec très peu de fruits récoltés et une perte estimée de la production de 30% pour la féverole d'hiver.

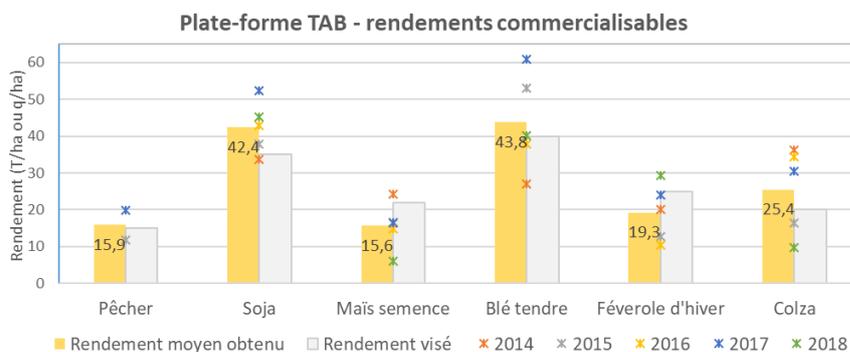


Figure 6 : Rendements commercialisables (t/ha en fruits et q/ha en grandes cultures) obtenus dans le système agroforestier de la Plate-forme TAB. Deux années de grêle ont eu lieu en 2016 et 2018.

Le rendement n'est pas un indicateur de performance déterminant pour le système de la Durette, organisé en vente directe. A titre indicatif, le rendement commercialisé en pêche est de 2,8 t/ha en 3^{ème} feuille et de 3,1 t/ha en 4^{ème} feuille, ce qui correspond à un mode de production extensif et un atelier fruitier secondaire par rapport au maraîchage, dont le réalisé s'approche du prévisionnel (Figure 7).

3.5 Résultats économiques

Le système agroforestier de la Plate-forme TAB dégage une marge nette positive 4 années sur 5, de 5500€/ha en moyenne sur les 5 années de 2014 à 2018 (voir Figure 7). Les deux accidents de grêle en 2016 et 2018 font chuter la marge nette. La marge nette reste positive en 2018, elle inclut en effet une petite récolte et une assurance récolte de 8900€/ha, pour prendre en compte le risque climatique et l'intégrer dans les règles de décision du système. La valorisation des grandes cultures permet de limiter les pertes économiques pendant les années sans pêche, sans toutefois les compenser.

Le collectif de producteurs de la Durette a envisagé une montée en puissance progressive afin de pouvoir prendre en main ce modèle très diversifié. Le chiffre d'affaire annuel réalisé est proche du prévisionnel. En 2018, la baisse du chiffre d'affaire est liée à un coup de gel qui a affecté la production des cerisiers, et au choix de retirer toutes les fleurs des pommiers qui entraînent en production pour éviter de favoriser une trop forte pression de carpocapse. Cette absence de production n'a pas eu de grand effet négatif sur l'ensemble du chiffre d'affaire, l'arboriculture étant secondaire.

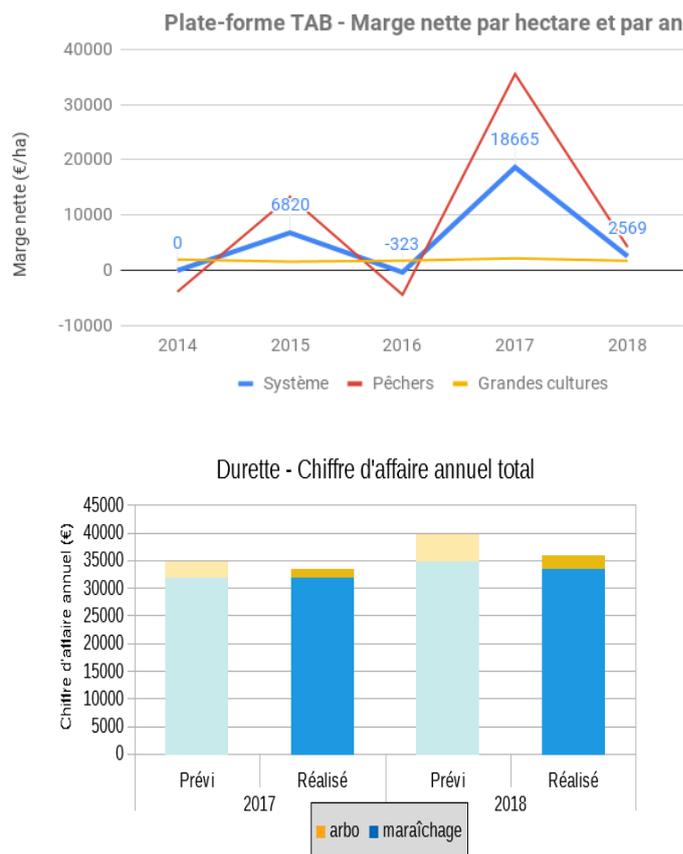


Figure 7: Résultats économiques. En haut : évolution de la marge nette par hectare et par an dans le système agroforestier de la Plate-forme TAB de 2014 à 2018, calculée à l'échelle d'une ferme type de 22,5 hectares, 47% de pêchers, 53% de grandes cultures NB : La marge nette inclut la rémunération des salariés mais n'inclut pas la rémunération de l'exploitant. En bas : comparaison des chiffres d'affaire prévisionnel et réalisés sur la Durette en 2017 et 2018.

3.6 Temps de travail

Le temps de travail du système de la Plate-forme TAB est en moyenne de 281 h/ha/an pour les années de production (2015 et 2017) et de 850 h/ha/an sur la Durette. La part de l'atelier fruitier est inversée dans les deux systèmes. Sur la Plate-forme TAB, les pêcheurs contribuent à hauteur de 604 h/ha/an, soit 99% du temps de travail total passé dans le système, la répartition du temps de travail sur l'année ne différant pas d'un verger classique, tandis que sur la Durette l'atelier arboricole ne mobilise que 15% du temps de travail global.

La répartition du temps de travail est plutôt constante sur la Durette, avec toutefois un pic de travail de mai à juillet. Sur la Plate-forme TAB, a contrario, les chantiers de récolte des pêches et des grandes cultures sont concomitants (Figure 8). Le système peut être géré par 1 UTH familial sur 22,5 hectares (taille de l'exploitation-type extrapolée) et le rémunérer (sauf en 2016) avec un recours à la main-d'œuvre saisonnière (jusqu'à 17 ETP sur les jours de récolte en juillet) indispensable.

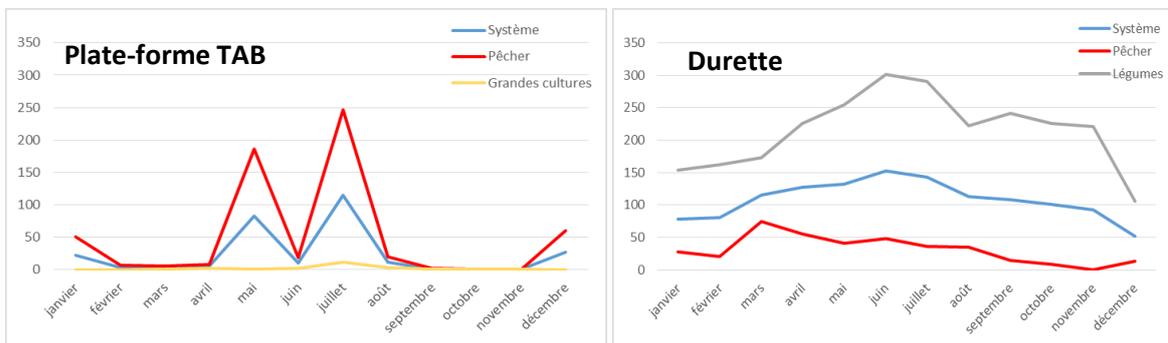


Figure 8 : Répartition du temps de travail sur l'année. A gauche : Plate-forme TAB, moyenne des deux années de production 2015 et 2017 (hors années de grêle). A droite : Durette, moyenne des deux années de production 2017 et 2018.

3.7 Evolution de la biodiversité

La Figure 9 montre que le nombre d'espèces d'oiseaux nicheurs relevées augmente sur les deux sites ; il se stabilise autour de 31 espèces et de 24 espèces par an respectivement sur TAB et Durette. Sur la Plate-forme TAB, la richesse cumulée a augmenté de 45%, passant de 24 à 35 espèces entre 2011 et 2016, ce qui traduit la venue de nouvelles espèces chaque année. Cette stabilisation permettra de réduire la fréquence de suivi dans les années suivantes. L'abondance moyenne est de 82 individus sur la TAB, elle a augmenté de 40%, elle est de 70 individus sur la Durette. Malgré des variations inter-annuelles, la diversification favorise la présence des oiseaux sur les deux sites.

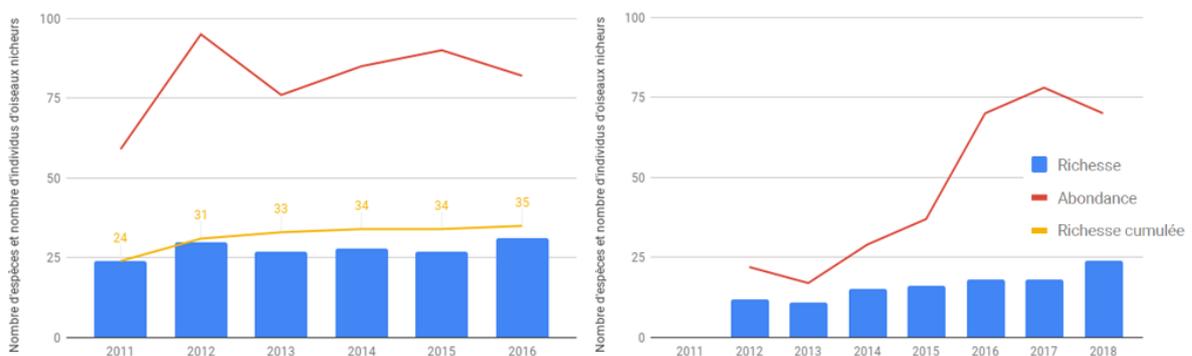


Figure 9 : Evolution en richesse (nombre d'espèces) et abondance (effectifs) des oiseaux nicheurs de 2011 à 2018

4. Premiers enseignements

Les systèmes testés mettent en œuvre plusieurs leviers destinés à réduire l'usage des pesticides, dont le premier est la diversification. Ces leviers sont discutés à l'aune de leur efficacité dans le paragraphe suivant, même si les résultats, encore partiels du fait de deux années de grêle sur la Plate-forme TAB et d'une implantation progressive sur la Durette, devront être confortés dans les années à venir.

4.1 Diversifier les espèces, un levier de gestion partiel des bio-agresseurs

La diversification temporelle de la rotation, associée à des moyens de désherbage mécanique complémentaires, assure une excellente gestion des adventices sur les deux sites. Sur la plateforme TAB, le modèle de rotation qui consiste en la succession de 2 cultures de printemps binées puis de 3 cultures d'hiver semées en plein permet une excellente maîtrise des graminées et dicotylédones. Certaines associations de plantes ont montré aussi tout leur intérêt pour la gestion des adventices au cours de l'expérimentation, comme l'association du colza avec un mélange de légumineuses, qui permet de se passer totalement de désherbage mécanique.

La diversification des strates végétales impacte de façon contrastée les ravageurs. Les ravageurs primaires type pucerons ou tordeuses sont contrôlés. On peut faire l'hypothèse d'une régulation naturelle de ces ravageurs par les auxiliaires des cultures. Une expérimentation complémentaire sur le site de la Plate-forme TAB a révélé un service de 'régulation' de leurres de chenilles par les oiseaux⁴. Toutefois, on observe des dégâts sur fruits et sur les arbres par des ravageurs secondaires qui bénéficieraient de la proximité des bandes enherbées et des cultures, et peut-être de l'humidité accrue du système (Mouen et al., 2012), hypothèses à confirmer. Ce taux de dégâts exclut la mise en place d'autres leviers de gestion des adventices tels que l'enherbement intégral du rang d'arbres fruitiers.

La diversification ne semble pas *a priori* jouer un rôle déterminant dans la limitation des maladies sur les arbres fruitiers. Dans le cas où les variétés sont sensibles aux maladies, l'aménagement agroforestier pourrait même réduire l'efficacité des traitements en bordures. Dans le cas des grandes cultures, l'hypothèse selon laquelle les maladies seraient mieux maîtrisées en système agroforestier sera testée dans le prochain dispositif expérimental développé dans le projet DEPHY EXPE EMPUSA (2019-2024), avec la mise en place d'une rotation de grandes cultures témoin.

4.2 Choisir des variétés tolérantes pour un système à très bas intrants

Ces résultats contrastés permettent de formuler l'hypothèse que la diversification comme levier de contrôle des bio-agresseurs ne peut avoir d'intérêt que dans un système avec une absence quasi-totale de traitements. Or, dans le cadre du projet, une plus grande réduction de l'usage des pesticides (au-delà des 52% déjà atteints) n'est pas envisageable à l'heure actuelle sans compromettre les résultats de production des variétés sensibles. La réduction des pesticides implique le choix d'un matériel végétal plus tolérant aux bio-agresseurs, alors que la disponibilité variétale et la connaissance de leur comportement en AB sont encore faibles en arboriculture et en grandes cultures. Les travaux menés en parallèle du projet autour du comportement variétal de la pêche en bio et la diversité des variétés d'arbres fruitiers testée sur la Durette permettront d'enrichir cette connaissance, inexistante au démarrage du projet.

La diversification au cœur d'un verger agroforestier devrait donc aussi se traduire dans la diversité de variétés d'une même espèce cultivées dans une même parcelle.

⁴ Ces résultats n'ont pas été présentés dans l'article mais sont disponibles auprès de l'équipe projet

4.3 Diversifier pour stabiliser les revenus face aux aléas climatiques

Les résultats analysés ne concernent que la Plate-forme TAB ici. Les résultats agronomiques (rendements et qualité) sont satisfaisants mais montrent une grande variabilité dans la réussite ou l'échec des cultures. En effet, les conditions climatiques favorables aux productions fruitières ne sont pas les mêmes que pour les grandes cultures ; un été chaud et humide sera favorable au soja et au maïs mais très défavorable aux pêches avec une augmentation des maladies de conservation. La diversification gagne en intérêt dans le cas des années avec des épisodes climatiques type grêle ; grâce à l'étalement des récoltes dans l'année, certaines cultures d'automne-hiver ont déjà pu être récoltées (blé, colza) avant la grêle et assurer une base de revenu.

L'impact économique de la diversification sur la Plate-forme TAB est positif puisqu'il permet de dégager 4 années sur 5 des marges nettes positives malgré les aléas climatiques. Les gains des grandes cultures compensent partiellement les pertes de récolte des pêches, car l'atelier arboricole reste l'atelier principal. Pour améliorer encore la stabilisation des revenus face aux aléas climatiques, une condition serait donc que les ateliers arboricoles et cultures annuelles soient équilibrés au prorata de leurs coûts de production. Cependant, les événements comme la grêle impactent sur plusieurs années la production car ils affectent la production de bois de l'année ; ces observations seront donc à vérifier dans les années futures d'expérimentation.

4.4 Diversifier la commercialisation : agriculture biologique et circuits courts

L'effet économique positif de la diversification est ici vérifié dans un contexte de production où les prix de vente sont rémunérateurs, avec un prix de vente de la pêche moyen de 2,20€/kg en Agriculture Biologique contre 1€/kg en conventionnel (prix AOP). Les marges nettes positives ne pourraient être atteintes pour un système en agriculture conventionnelle. Le mode de production en Agriculture Biologique, au-delà des conditions bas-intrants qu'il offre, assure une valorisation des efforts de réduction de l'usage des pesticides. Cette tendance devra être confirmée dans les années futures.

Le choix de circuits de commercialisation courts et en Agriculture Biologique sur le site de la Durette permet une valorisation des récoltes meilleure et plus stable. A titre indicatif, le prix de vente de la pêche est de 4,60€/kg, avec une valorisation de l'intégralité de la récolte, sans condition de calibre et de qualité visuelle.

Le choix du mode de commercialisation est donc un levier clé pour la conception de système de culture innovants très bas intrants. L'expérience de co-conception du premier système de culture agroforestier en circuits longs de la Plate-forme TAB (cf. Tableau 2) a amené ensuite à une deuxième phase de conception « *de novo* » en 2014, pour laquelle la contrainte de « vente en circuits longs » a été enlevée, afin d'autoriser une baisse importante de l'usage des pesticides et l'intégration de nouvelles cultures à forte valorisation⁵. Cependant, le choix des circuits longs a bien piloté le système de la TAB sur la période en question (Tableau 2), le système conçu « *de novo* » en 2014 n'ayant pas été mis en place.

Conclusions et perspectives

Le projet VERTiCAL a permis de développer une expertise collective multi-filières unique dans la co-conception et l'évaluation de vergers agroforestiers. La méthode de conception « *de novo* », qui consiste à concevoir un nouveau système tout en faisant abstraction des contraintes de filières et de matériel, est apparue comme la plus appropriée pour concevoir des systèmes agroforestiers en rupture. La réussite de la co-conception repose sur la composition du groupe de travail, qui doit impérativement faire participer des agriculteurs, techniciens et chercheurs, des personnes impliquées dans le projet et

⁵ Les prototypes conçus, non décrits dans cet article sont disponibles auprès de l'équipe projet

extérieures, ainsi que sur l'animation et la palette des outils d'animation, de simulation et d'évaluation créés spécifiquement pour le projet.

Cette expérience de co-conception a été un apprentissage long et collectif. Elle a abouti à la mise en essai pour la première fois de deux systèmes agroforestiers fruitiers sur les sites expérimentaux de la Plate-forme TAB et de la Durette, qui sont aujourd'hui supports de formation pour les agriculteurs et les conseillers techniques en demande sur ces nouveaux systèmes agroforestiers. Les résultats, à consolider dans les années à venir, annoncent des systèmes prometteurs, bas-intrants et performants économiquement, répondant aux objectifs du programme DEPHY EXPE Ecophyto.

La diversification des espèces est le principal levier testé dans ces deux dispositifs. Son plus grand intérêt réside dans la possibilité de stabiliser les revenus face aux aléas climatiques, qui pourraient s'intensifier au vu du changement climatique. La diversification est donc un levier qu'il est pertinent de déployer dans de futurs systèmes innovants très bas intrants, mais elle n'est pas le seul levier à mettre en œuvre pour réduire les pesticides. Elle doit s'accompagner d'autres leviers non moins importants : le choix de variétés tolérantes aux bioagresseurs, le choix d'une diversité de circuits de commercialisation à forte valeur ajoutée ainsi que le choix du mode de production en Agriculture Biologique semblent incontournables pour atteindre des résultats économiques satisfaisants.

Du point de vue des bio-agresseurs, la diversification apparaît comme un levier de contrôle des adventices mais ne satisfait pas intégralement le contrôle des maladies et des ravageurs dans les conditions d'expérimentation actuelles, notamment lorsque des traitements phytosanitaires sont encore appliqués régulièrement. Le projet ne permet pas de dire, pour l'heure, si la diversification apporte ou non les bénéfices escomptés de régulation des bioagresseurs, car le jeu de données est encore trop faible. Cela amène donc à poursuivre l'acquisition des données, voire à repenser les itinéraires techniques pratiqués (notamment les traitements).

La limite du projet réside dans la difficulté à généraliser les résultats obtenus, qui sont inféodés aux conditions pédo-climatiques et à l'organisation des filières intimement liés aux contextes des deux sites expérimentaux. C'est pourquoi la suite de ces travaux dans le projet DEPHY EXPE EMPUSA (2019-2024) consistera, en complément de la consolidation des résultats technico-économiques, à la compréhension des services de production et de régulation naturelle rendus par la biodiversité, avec un dispositif affiné de suivi des rendements, des bio-agresseurs et des auxiliaires, pour mieux documenter l'effet de la diversification sur les performances du système.

Remerciements

Les partenaires du projet remercient le Ministère de l'Agriculture et l'Agence Française de la Biodiversité (AFB) pour le soutien financier alloué, et tout particulièrement Marie Rougier, Emeric Emonet et Baptiste Labeyrie, membres actifs de la CAN Ecophyto. Nous remercions les membres du comité scientifique et leurs conseils précieux : Jean-Marc Meynard, Raymond Reau, Nathalie Lamanda, Raphaël Métral, Sylvaine Simon, Aude Alaphilippe, Fabien Liagre, Camille Béral, Joséphine Peigné, Jean-Michel Ricard, ainsi qu'Amélie Carrière et Lionel Jouy pour leur appui dans l'analyse. Nous remercions chaleureusement les stagiaires qui ont contribué à la conception et à l'acquisition des données sur les deux sites.

Références bibliographiques

- Agreste, 2018. Apports de produits phytopharmaceutiques en arboriculture : nombre de traitements et indicateur de fréquence de traitements. Campagnes agricoles 2015 et 2012. Les Dossiers n° 43, 1-27
- Alaphilippe A., 2017. Dexi-AF: adaptation, analyse de sensibilité et tests de l'outil Dexi-AF pour la co-conception assistée de projets agroforestiers. Dans RMT AgroforesterieS –Actes de la journée «Croisons les regards #2», 13

- Bernard H., 2014. Construction d'un outil d'évaluation multicritère de durabilité en ex ante adapté aux systèmes agroforestiers associant arbres fruitiers et cultures assolées conduits en AB
- Butault J.P., Dedryver C.A., Gary C., Guichard L., Jacquet F., Meynard J.M., Nicot P., Pitrat M., Reau R., Sauphanor B., Savini I., Volay T., 2010. ECOPHYTO R&D : quelles voies pour réduire l'usage des pesticides. Rapport de synthèse. 91 p.
- Castel L., Ronzon J., 2015. Concevoir et expérimenter l'agroforesterie fruitière. Alter'Agri n°131, 12-18
- Ecophyto, 2014. Synthèse des résultats arbo 2014. En ligne sur : http://arboriculture.ecophytopic.fr/sites/default/files/actualites_doc/201411_Synthese_Resultats_DEPHY_arbo.pdf
- Etienne M., 2012. [La modélisation d'accompagnement : une forme particulière de géoprospective](#), L'espace géographique 2012/2 (Tome 41), p. 128 - 137
- Griffiths J., Phillips D.S., Compton S.G., Wright C., Incoll L.D., 1998. Responses of slug numbers and slug damage to crops in a silvoarable agroforestry landscape. *Journal of Applied Ecology* 35, 252-260
- Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.M., Petit M.S., Plenet D., Picault S., Faloya V., 2017. Guide de l'expérimentateur "système" - Concevoir, conduire et valoriser une expérimentation système pour les cultures assolées et pérennes. 172p
- Hooks C.R.R., Johnson M.W., 2003. Impact of agricultural diversification on the insect community of cruciferous crops. *Crop Prot.* 22, 223-238.
- Jose S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems* 76, 1–10.
- Lancon J., Wery J., Rapidel B., Angokaye M., Gérardaux E., Gaborel C., 2007. An improved methodology for integrated crop management systems. *Agronomy for Sustainable development* 27 (2), 101-110
- Letourneau D.K., Ambrecht I., Rivera B.S., Lerma J.M., Carmona E.J., Daza M.C., Escobar S., Galindo V., Gutiérrez C., López S.D., Mejía J.L., Rangel A.M.A., Rangel J.H., Rivera L., Saavedra C.A., Torres A.M., Trujillo A.R., 2011. Does plant diversity benefit agroecosystems? A synthetic review. *Ecological Applications* 21, 9–21.
- Meynard J.M., Dedieu B., Bos A.P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Darnhofer I., Gibbon D., Dedieu B. (Eds) *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*. Springer, Dordrecht
- Michaelides G., Sfenthourakis S., Pitsillou M., Seraphides N., 2018. Functional response and multiple predator effects of two generalist predators preying on *Tuta absoluta* eggs: Multiple predator responses on South American tomato pinworm. *Pest Management Science* 74, 332–339.
- Mouen Bedimo J.A., Dufour B.P., Cilas C., Avelino J., 2012. Effets des arbres d'ombrage sur les bioagresseurs de *Coffea Arabica*. *Cah Agric* 21 : 89-97. doi : 10.1684/agr.2012.0550
- Muneret L., Mitchell M., Seufert V., Aviron S., Djoudi E.A., Pétilon J., Plantegenest M., Thiéry D., Rusch A., 2018. Evidence that organic farming promotes pest control, *Nature Sustainability*, 1, 361–368, doi [10.1038/s41893-018-0102-4](https://doi.org/10.1038/s41893-018-0102-4)
- Paut R., Sabatier R., Tchamitchian M., 2019. Reducing risk through crop diversification: An application of portfolio theory to diversified horticultural systems, *Agricultural Systems*, 168, 123-130
- Pissonnier S., Lavigne C., Toubon J.-F., Le Gal P.-Y., 2016. Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level. *Crop Protection* 88, 109-117
- Pumariño L., Weldesemayat Sileshi G., Gripenberg S., Kaartinen R., Barrios E., Nyawira Muchane M., Midega C., Jonsson M., 2015. Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. *Basic and Applied Ecology*, Volume 16, Issue 7, 573-582.
- Sauvant D., Dijkstra J., Meryens D., 1995. Optimisation of ruminal digestion : a modelling approach. In: Journet M., Grenet E., Farce M.-H., Theriez M., Demarquilly C. (Eds.), *Recent developments in the Nutrition of Herbivores*. Proceedings of IVth International Symposium on the Nutrition of herbivores, INRA Editions, Paris, p. 143-165

Schroth G., Krauss U., Gasparotto L., Duarte Aguilar J.A., Vohland K., 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforestry Systems*. 50, 3, 199–241

Simon S., Brun L., Guinaudeau J., Sauphanor B., 2011. Pesticide use in current and innovative apple orchard systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31: 541-555.

Snyder W.E., Snyder G.B., Finke D.L., Straub C.S., 2006. Predator biodiversity strengthens herbivore suppression. *Ecology Letters* 9, 789–796.

Talbot G., 2011. L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales : une clef pour en comprendre la productivité ? *Ecosystèmes*. Université Montpellier II.

Warlop F., Corroyer N., Denis A., Conseil M., Fourrié L., Duha G., Buchmann C., Lafont A., Servan G., 2017. Associer légumes et arbres fruitiers en agroforesterie. Report from the SMART project 40p.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).