Table des matières

Remerciements 2
Résumé 4
Abstract 6
Chapitre I. Introduction générale 13
1. Produire différemment en arboriculture 13
1.1. Des enjeux sanitaires et phytosanitaires contradictoires 13
1.2. Des alternatives existent mais semblent difficile à mettre en place 14
1.3. Des spécificités de l'arboriculture freinent les transitions vers ces alternatives 15
2. Problématique de l'étude 17
3. Cadre théorique et méthodologique 18
3.1. Les exploitations agricoles, une échelle d'analyse pertinente 18
3.2. Accompagner les producteurs pour encourager les transitions 20
3.3. Prendre en compte la diversité des modes de production 21
4. Contexte de l'étude 23
4.1. La pomme, consommée et consommatrice de temps et d'intrants 23
4.2. Les coopératives partenaires dans le cadre du projet Sustain'Apple 25
5. Démarche de recherche 30
5.1. Chapitre 2 : Evaluer les impacts des pratiques d'utilisation des pesticides à l'échelle de la parcelle 30
5.2. Chapitre 3 : Analyser les processus de décision à l'échelle de l'exploitation agricole 30
5.3. Chapitre 4 : Concevoir un processus d'accompagnement pour aider les producteurs à réfléchir à leur stratégie de gestion et son évolution 31
5.4. Chapitre 5 : Simuler des scénarios de rupture et discuter leurs impacts 32
Chapter II. Evaluating the diversity of apple farmers' pesticide use at the plot level with frequency, toxicity and efficiency indicators. 33
1. Introduction 34
2. Materials and Method 36
2.1. Dataset building 36
2.2. Selection of indicators 37
2.3. Plot classification according to the family of pesticide use 38
3. Results and discussion 40
3.1. A diversity of pesticide use practices within a common context 40

3.2. Health and environmental toxicity 45
3.3. Potential consequences for actions on crop protection 48
4. Conclusion 49
Chapter III. Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level 52
1. Introduction 53
2. Materials and method 54
2.1. Study context 54
2.2. Analyzing protection practices at the AGC level 56
2.3. Analyzing protection strategies at the farm level 57
3. Results 59
3.1. A set of common factors driving decisions 59
3.2. Yet a diversity of pesticide use in the same context 60
3.3. Three main types of protection strategies 61
4. Discussion 67
4.1. Apple protection as viewed by farmers: a range of constraints with few opportunities 67
4.2. Analyzing and formalizing growers' decision-making processes 68
4.3. Towards less pesticide use? 70
5. Conclusion 71
Chapter IV. A simulation tool to support the design of crop management strategies in fruit tree farms. Application to the reduction of pesticide use. 74
1. Introduction 75
2. Design process 76
2.1. Main objectives of the support approach 76
2.2. A co-designed simulation tool 77
2.3. Specific objectives and requirements 77
3. CoHort structure 79
3.1. Main concepts 79
3.2. A spreadsheet structure including three types of variables 81
4. CoHort application 85
4.1. A support approach based on discussions and simulations 85
4.2. Illustration of the approach 86
5. Discussion 96

5.1. A flexible tool adapted to a diversity of farms and scenarios 96
5.2. References and accuracy of results 97
5.3. Transferring support tools from research to technicians 98
5.4. Towards an evolution of the support approach 98
6. Conclusion 99
Chapitre V. Evaluation ex-ante des effets de scénarios de rupture sur les exploitations arboricoles. Cas de l'introduction d'ovins en verger de pommes en France. 102
1. Introduction 102
2. Matériel et Méthode 103
2.1. Définition : scénario de rupture 103
2.2. Règles de conception/évaluation et objectif 104
2.3. Une démarche de conception en sept étapes. 105
3. Résultats 107
3.1. Conception des scénarios (Etapes 1 à 5) 107
3.2. Evaluation et discussion des scénarios (Etapes 6 et 7) 117
4. Discussion 120
4.1. L'introduction d'ovins : trois types d'hypothèses formulées 120
4.2. Les scénarios de rupture : d'autres associations d'espèces 121
4.3. Discussion des résultats des simulations avec des acteurs locaux : points à aborder 122
4.4. Comment intéresser les producteurs pour concevoir et mettre en place des systèmes de rupture ? 122
5. Conclusion 123
Chapitre VI. Discussion générale 125
1. Une démarche combinant plusieurs échelles 125
1.1. Combiner analyse des pratiques et de l'exploitation agricole, pour une meilleure compréhension des processus et des freins aux transitions 125
1.2. L'accompagnement et l'exploration par la simulation : deux processus complémentaires pour aider à la réflexion stratégique 126
2. Produire des pommes sans pesticide, un objectif réaliste ? 127
2.1. Place de la protection dans les préoccupations des producteurs 127
2.2. Les systèmes alternatifs, quels effets sur les performances technico-économiques ? 128
2.3. Les circuits de commercialisation, contrainte ou solution ? 129

2.4. L'agriculture numérique et les nouvelles technologies : l'exploitation agricole de demain ? 130
3. Quels acteurs impliqués dans les processus de transition ? 131
3.1. Le rôle des GMS et des consommateurs : accepter les défauts cosmétiques pour un prix identique et promouvoir les variétés tolérantes/résistantes 132
3.2. Une meilleure répartition du prix à l'échelle de la filière 133
3.3. Le rôle des médias : une meilleure communication sur les pratiques des producteurs 135
3.4. Le rôle des politiques : améliorer la procédure d'homologation des pesticides 136
4. Perspectives de recherche et développement 138
4.1. Evolution de la démarche en interaction avec les techniciens 138
4.2. L'analyse de cycle de vie pour une vision plus globale des impacts environnementaux 138
4.3. Lier les disciplines pour une vision plus systémique 139
Conclusion générale 141
Bibliographie 143
Annexes 155

Tables des Annexes

Annexe 1. Extrait de calendrier de traitement, coopérative PERLIM 155
Annexe 2. Extrait de calendrier de traitements informatisé, coopérative Cofruid'Oc 156
Annexe 3. Guide d'entretien producteurs 157
Annexe 4. Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level 162
Annexe 5. Supplementary Materials of Chapter 4 171
Supplementary Materials 1 171
Supplementary Materials 2 173
Supplementary Materials 3 175
Supplementary Materials 4 177
Supplementary Materials 5 180

Chapitre I. Introduction générale

1. Produire différemment en arboriculture

Le secteur agricole est aujourd'hui confronté à plusieurs enjeux : nourrir une population mondiale croissante et maintenir un niveau de production élevé, produire des denrées alimentaires de qualité pour couvrir les besoins nutritionnels des populations, s'adapter au changement climatique, développer une agriculture durable d'un point de vue économique, environnemental, et social (Lichtfouse *et al.*, 2009; Iglesias *et al.*, 2011; Karunasagar and Karunasagar, 2016). Les systèmes de production doivent donc s'adapter et évoluer (Meynard *et al.*, 2012). L'arboriculture fruitière présente des caractéristiques spécifiques qui compliquent les évolutions de ces systèmes pour répondre à ces enjeux.

1.1.Des enjeux sanitaires et phytosanitaires contradictoires

Dans les étals des Grandes et Moyennes Surfaces (GMS) et dans l'esprit des consommateurs, les fruits doivent correspondre à des critères de calibre, couleur, fermeté, conservation, résistance aux chocs, taux de sucre. Les acheteurs établissent des critères standards à atteindre. Toute trace de symptômes d'attaques de maladies ou d'insectes est proscrite et dévalorisée économiquement (Drogué and DeMaria, 2012). Mais les arbres fruitiers sont sensibles à de nombreuses maladies et insectes : tavelure, oïdium, carpocapse, mouches des fruits par exemple, qui impactent la qualité des fruits et les rendements et dévalorisent économiquement la production (Wilson and Tisdell, 2001). Les producteurs sont donc indirectement encouragés à protéger leur verger contre ces attaques. Les pesticides et plus généralement les intrants de synthèse font partie des solutions technologiques privilégiées pour éviter ces pertes, car montrant des résultats probants (Matson *et al.*, 1997). Ils sont composés de molécules actives, et d'adjuvants formulés synthétiquement par l'industrie phytopharmaceutique. Un pesticide est autorisé pour une culture, un ravageur et une dose donnés. En France, une récente étude Agreste sur quatre espèces fruitières a comptabilisé entre 8 et 35 traitements pesticides par campagne (Tableau 1) (Agreste, 2014a).

La majorité des volumes de fruits est consommée en frais (FranceAgriMer, 2016). Les débats sur les résidus des pesticides sont donc très vifs, car les éventuels résidus peuvent être directement ingérés par les consommateurs (Ticha *et al.*, 2008). Leurs impacts sur la santé et l'environnement ne sont pas neutres : les pesticides de synthèse ont des liens supposés avec des maladies neurologiques (Baldi *et al.*, 2013), ils impactent les organismes aquatiques et terrestres et leurs milieux naturels (eau, sol, air) déstabilisant les écosystèmes (Damalas, 2015). Par

exemple en Bretagne dans les années 1990, les analyses effectuées sur les eaux de rivières ont montré que 90% des échantillons présentaient une teneur en atrazine supérieure à la norme fixée à 0,1 g/l (Schiavon *et al.*, 1995).

En réponse à ces inquiétudes, les acheteurs ont mis en place des cahiers des charges cherchant à limiter au maximum les résidus, à des niveaux souvent plus stricts que la réglementation publique. Certaines matières actives sont interdites, les délais entre le dernier pesticide appliqué et la récolte sont rallongés, le nombre maximal d'utilisation d'un produit réduit (Drogué and DeMaria, 2012). L'objectif est de tendre vers du « zéro résidu », et donc de faire évoluer les systèmes.

1.2.Des alternatives existent mais semblent difficile à mettre en place

En arboriculture, les alternatives aux pesticides sont classées en plusieurs types : (i) le contrôle génétique utilisant des variétés résistantes, (ii) le contrôle cultural jouant sur d'autres pratiques non liées directement à la protection (par exemple la fertilisation, l'irrigation ou la taille), souvent préventives, permettant de diminuer la pression de ravageurs/maladies, (iii) la lutte physique utilisant des barrières physiques contre les agresseurs comme les filets, (iv) la lutte biologique utilisant des organismes vivants comme les auxiliaires, (v) la lutte bio-technique par médiateurs chimiques comme la confusion sexuelle ou comme le piégeage, (vi) la lutte chimique naturelle basée sur des pesticides naturels comme le cuivre et le soufre (Laget *et al.*, 2014).

En France, ces alternatives font l'objet de recherches expérimentales, et sont soutenues politiquement et financièrement grâce au plan Ecophyto. Le plan lancé en 2008, vise à 'réduire progressivement l'utilisation des produits phytosanitaires tout en maintenant une agriculture économiquement performante' (http://agriculture.gouv.fr/le-plan-ecophyto-pour-reduire-lutilisation-des-produits-phytosanitaires-en-france). Il mobilise agriculteurs, chercheurs, techniciens, chambres d'agriculture et instituts techniques. Un réseau de fermes pilotes, les fermes DEPHY, coordonnées dans le cadre du plan Ecophyto permet de tester et mutualiser les 'bonnes pratiques' développées et de créer une base de références.

Un premier bilan du plan a fait état de la difficulté à atteindre les objectifs de réduction des pesticides. Les actions entreprises ciblaient uniquement les producteurs et leurs conseillers, et non la filière. Or, ce sont les filières agricoles entières qui sont organisées pour encourager, développer et promouvoir les pesticides de synthèse (Guichard *et al.*, 2017). Les phénomènes de 'lock-in' sont ainsi créés, où il devient difficile d'emprunter une autre voie (Cowan and

Rapport-Gratuit.com

Gunby, 1996). Les approches développées pour faire évoluer les systèmes peinent à se saisir du caractère systémique de ces enjeux. Mais les freins peuvent aussi être dus aux spécificités de la culture elle-même.

1.3.Des spécificités de l'arboriculture freinent les transitions vers ces alternatives

En arboriculture les alternatives aux pesticides impactent le système initial à plusieurs niveaux. Elles peuvent nécessiter du temps lors de leur installation et mise en œuvre. Or le temps de travail dans les exploitations arboricoles est déjà élevé, freinant la mise en place de nouvelles pratiques chronophages. Une exploitation arboricole nécessite en effet des salariés permanents (ou le chef d'exploitation) et des saisonniers. En France par exemple, 2,4 UTA sont nécessaires en moyenne par exploitation arboricole contre une moyenne nationale de 1,5 UTA (Agreste, 2012). L'itinéraire technique est composé de six chantiers majeurs : taille, éclaircissage, fertilisation, désherbage, protection, récolte. La taille, l'éclaircissage et la récolte sont très chronophages car non mécanisés dans la plupart des cas. En prune par exemple, la récolte et le calibrage peuvent prendre jusqu'à 571 heures/ha (Bigouin *et al.*, 2013).

Les alternatives peuvent aussi impliquer un coût supplémentaire, lié à l'achat d'un éventuel produit, matériel ou équipement et du coût de la main d'œuvre pour le mettre en fonction et l'entretenir. Mais les investissements à la plantation sont déjà conséquents et le retour sur investissement est long, empêchant d'investir régulièrement dans des innovations. Il faut acheter et planter les plants, mettre en place le palissage, fertiliser, protéger contre les maladies et insectes dès les premières feuilles, désherber, parfois arracher la culture précédente. Et la production des premières années est très faible puisqu'il faut en moyenne cinq ans avant d'atteindre une pleine production. Le renouvellement du verger s'effectue ensuite de manière cyclique et régulière pour avoir un verger toujours productif (Simon *et al.*, 2017). De plus, les coûts de production en arboriculture sont élevés, pouvant aller jusqu'à 1,8€/kg pour les cerises (Tableau 1). Les coûts de main d'œuvre sont les plus importants, en moyenne de 9250€/ha, suivis par les charges de structure et les charges directes liées à la consommation d'intrants. Dans tous les cas, les prix de vente sont très proches des coûts de production, laissant une très faible marge pour investir.

Les pratiques alternatives ont aussi des conditions de mises en place spécifiques, qui peuvent s'avérer incompatibles avec la configuration initiale du verger. Les décisions prises dès l'implantation donnent en effet une configuration spécifique à la parcelle, et conditionnent les pratiques qui seront possibles à mettre en place ou non (Penvern *et al.*, 2010). Ces décisions

concernent la densité de plantation, la variété, le type de porte greffe, ainsi que les aménagements comme le type de palissage, et le système d'irrigation.

Les filets mono-rang anti-insectes par exemple, sont utilisés pour empêcher les carpocapses d'attaquer les fruits. L'investissement est de 10 000€/ha en moyenne et ils nécessitent 120 heures/ha pour être installés. Un palissage du verger trop haut ou trop bas peut ne pas convenir. Au cours de la saison, ils doivent être ouverts pour la pollinisation et à chaque passage de machine dans les parcelles, nécessitant du temps de travail supplémentaire de 70 à 100 heures/ha. Enfin, ils peuvent empêcher d'autres insectes auxiliaires de passer à travers les mailles du filet et offrir la possibilité à d'autres ravageurs de se développer (Laget *et al.*, 2014).

Tableau 1. Données économiques et phytosanitaires pour quatre espèces en arboriculture, (Bigouin *et al.*, 2013)*

	Pomme	Pêche	Prune	Cerise
Charge directe (€/ha) [1]	2450	3100	1750	1270
Coût main d'œuvre (€/ha)	7690	9880	12130	7280
Charges de structure (€/ha)	3650	3110	3110	3110
Amortissements (€/ha)	1845	1190	1190	1190
Coût de production (€/kg)	0,3	0,9	1	1,8
Prix (€/kg)	0,2 – 0,5	0,8 – 1,4	0,8 – 1,3	1,8 – 2,6
Nb de traitements	35	19	11	9

[1]Fertilisation, protection, irrigation

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2. Problématique de l'étude

Les arboriculteurs doivent donc produire des fruits parfaits, en gérant la forte sensibilité aux maladies et ravageurs des arbres, mais en limitant l'utilisation de produits phytosanitaires. Des alternatives aux pesticides de synthèse existent, mais peuvent ne pas être compatibles avec la configuration du verger et avoir des conséquences sur les performances économiques ou sur l'organisation du travail de l'exploitation. Or les arboriculteurs se trouvent déjà dans des situations économiques tendues du fait du long retour sur investissement, des coûts à la plantation et des coûts de production élevés, et de la faiblesse des prix de vente de leurs fruits. Ils doivent de plus gérer une culture déjà très chronophage. Pourtant, leur manière de produire doit encore évoluer pour limiter toujours plus le recours aux pesticides de synthèse.

Nous partons de l'hypothèse que comprendre les processus conduisant aux choix des producteurs et évaluer *ex-ante* les possibilités d'évolution et les conséquences de changements techniques sur leurs exploitations est une première étape pour encourager les transitions et les pérenniser. La problématique soulevée par ce contexte est donc la suivante : *Quelle démarche pour évaluer les marges de manœuvre et les effets d'une évolution des stratégies de production sur le fonctionnement et les performances des exploitations arboricoles ?*

Pour tester l'hypothèse avancée et répondre à la problématique posée, notre étude a été construite selon deux phases. La première s'est attachée à comprendre les processus qui régissent la mise en place des stratégies des arboriculteurs et à évaluer leurs effets sur les exploitations agricoles, afin d'identifier les facteurs qui influencent les décisions et donc les transitions vers des changements de pratiques. La deuxième phase vise à concevoir et tester un processus d'accompagnement des producteurs dans leurs réflexions pour faire évoluer leurs stratégies de production. Elle s'appuie sur les connaissances acquises lors de la phase analytique précédente.

L'ensemble de la démarche a été conçu de façon à être générique pour être à même de traiter une diversité de situations en termes de types de cultures horticoles, d'exploitations, de pratiques. Elle a aussi été conçue de sorte à favoriser les interactions avec les acteurs de la production, en l'occurrence les techniciens des coopératives et les producteurs, en termes tant de fournitures de données que de questionnements à traiter et d'évaluation des résultats produits.

3. Cadre théorique et méthodologique

3.1.Les exploitations agricoles, une échelle d'analyse pertinente

La discipline agronomique privilégie généralement l'échelle du système de culture, défini comme un « ensemble de modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique» (Sébillotte, 1990). Cette échelle ne permet pas d'identifier et comprendre les processus qui régissent la mise en place des pratiques, en lien avec la structure de l'exploitation, son fonctionnement, et le contexte socio-économique dans lequel elle évolue. La compréhension de ces processus permet pourtant de mettre en lumière des leviers et freins aux transitions des systèmes vers des pratiques moins dépendantes des pesticides de synthèse, et d'adapter en conséquence les démarches développées pour encourager les transitions et évaluer leurs impacts (Capillon, 1993).

Comprendre les processus décisionnaires au sein de l'exploitation agricole, et les facteurs qui les influencent

D'un point de vue scientifique, l'exploitation agricole a fait l'objet de multiples définitions. Toutes s'accordent sur sa dimension systémique, composée de plusieurs entités reliées entre elles, représentées dans la Figure 1 (Osty, 1978). On définit la structure de l'exploitation comme l'ensemble des ressources en terre, main d'œuvre, équipement, capital. Pour assurer le fonctionnement de l'exploitation, les producteurs prennent un ensemble de décisions pour réaliser leurs objectifs à travers le choix des activités et l'affectation des ressources aux différentes activités agricoles (Capillon, 1993). Le modèle d'action permet de fournir un cadre d'analyse de ces décisions encadrées par un objectif, inscrites dans un programme prévisionnel et appliquées via un corps de règles de décisions (Sébillotte and Soler, 1990). Il aide les agronomes à comprendre le fonctionnement de l'exploitation agricole et la manière dont les décisions sont prises par les producteurs (Aubry *et al.*, 1998). Ces décisions peuvent être classées en trois niveaux.

Les décisions opérationnelles sont prises au jour le jour sur des aspects très techniques. Elles se traduisent directement en actions concrètes réalisées sur la parcelle, de type « aujourd'hui je sème/je traite/je désherbe ». Les décisions tactiques encadrent les pratiques à moyen terme (une année ou deux) par exemple via les rotations mises en places. Les décisions stratégiques donnent les grands axes d'évolution des exploitations sur du plus long terme, par exemple via les investissements qui sont réalisés (Hémidy *et al.*, 1993). Ces trois niveaux de décisions se

combinent pour donner une cohérence globale entre les objectifs des producteurs, la structure de l'exploitation, son fonctionnement et ses performances.

Les décisions sont déterminées par différents facteurs, importants à considérer dans les démarches visant à comprendre les processus décisionnaires (Figure 1). Ils peuvent être classés en quatre catégories : (i) le contexte socioéconomique : la réglementation publique et les critères demandés par les acheteurs encouragent les producteurs à mettre en place des pratiques qui permettront de les respecter. Ces cahiers des charges peuvent figer les pratiques dans un cadre rigide, ou au contraire inciter les producteurs à les faire évoluer (Probst *et al.*, 2012; Codron *et al.*, 2014). Les stratégies commerciales des exploitations et des acheteurs avec lesquels elles interagissent sont donc déterminants. L'accès au conseil technique, aux connaissances et aux intrants conditionnent aussi les pratiques mises en place (Yang *et al.*, 2014). (ii) La structure et le fonctionnement de l'exploitation : les ressources en main d'œuvre, foncier, capital et équipement, et la manière dont elles sont allouées aux différentes activités et cultures déterminent de nombreuses pratiques (Dogliotti *et al.*, 2006; Pardo *et al.*, 2010; Navarrete *et al.*, 2014). Par exemple en culture pérenne comme la vigne, la plantation ou l'épamprage sont des opérations très consommatrices en temps et peuvent être difficile à mettre en place s'il n'y a pas de main d'œuvre disponible sur un temps restreint. (iii) Les conditions pédoclimatiques déterminent les niveaux de pression de maladies et ravageurs, la qualité du sol et les ressources en eau, et sont en lien direct avec l'intensité des pratiques en particulier avec l'utilisation d'intrants (Damalas and Koutroubas, 2014).

Analyser les effets des pratiques qui découlent des décisions

L'ensemble de ces décisions aboutit à l'itinéraire technique, définit comme une « combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée» (Sébillotte, 1974). Les pratiques mises en place à travers l'itinéraire technique aboutissent à des impacts et performances.

Les impacts peuvent être classés en trois catégories (Figure 1). La première regroupe les impacts sur l'environnement : ressources en eau, air ou sols (pollution), ou sur les différents organismes terrestres ou aquatiques qui appartiennent aux agro-écosystèmes. La deuxième catégorie regroupe les impacts sur la santé des producteurs, de la main d'œuvre agricole, et des consommateurs. Ces deux premiers types sont calculés à différentes échelles : locales, régionales ou nationales (Devillers *et al.*, 2005; Sabiha *et al.*, 2016). Ils peuvent être directement mesurés par des expérimentations, ou estimés via l'utilisation d'indicateurs (Reus *et al.*, 2002). La troisième catégorie d'impact porte sur l'organisation du travail. La mise en place d'une

nouvelle pratique affecte l'organisation temporelle, spatiale et quantitative du travail et peut transformer la gestion de l'exploitation, nécessitant ou non plus de main d'œuvre, ayant ou non des compétences spécifiques (Hostiou *et al.*, 2015).

Enfin, les performances économiques qui découlent aussi des pratiques sont fondamentales pour le producteur car elles conditionnent la pérennité de ses activités (Giannakis and Bruggeman, 2015), et doivent donc être prises en compte.

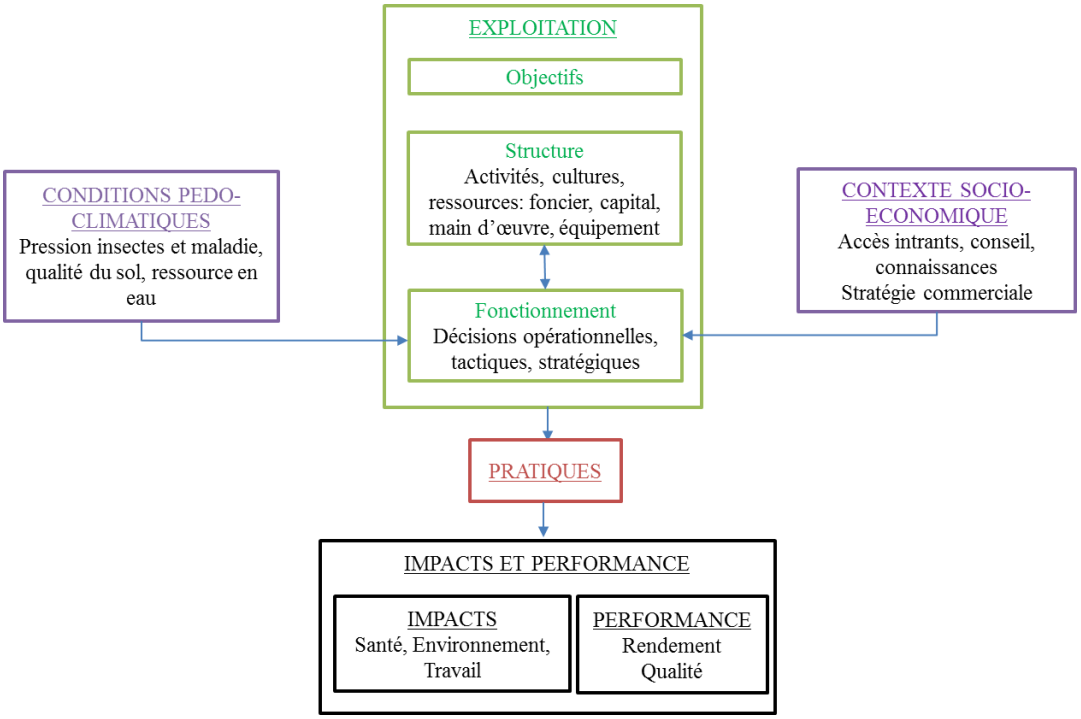


Figure 1. Cadre d'analyse pour comprendre et évaluer les pratiques, les stratégies des exploitations agricoles et leurs déterminants.

→ Influence

3.2.Accompagner les producteurs pour encourager les transitions

Pour encourager les producteurs à mettre en place des innovations et à faire évoluer leurs systèmes de production, plusieurs méthodes existent. (Le Gal *et al.*, 2011) ont réalisé une étude bibliographique de 80 articles sur les méthodes développées par la recherche pour aider les producteurs à concevoir des systèmes innovants. Deux grands types de catégories apparaissent : d'une part, les démarches de conception de systèmes innovants basés sur des méthodes de prototypage et modélisation, d'autre part, les démarches d'appui à la conception basées sur des méthodes participatives, avec ou sans modélisation à destination des producteurs ou services de conseil.

Les méthodes ‘top-down’ consistant à concevoir en conditions contrôlées des solutions techniques et à les transférer aux producteurs présentent des limites. Elles ne permettent pas de prendre en compte la diversité et la spécificité des exploitations agricoles et des schémas décisionnels, ni de bénéficier de la connaissance et des compétences de différents types d’acteurs locaux (producteurs, techniciens, centres expérimentaux et techniques) (Berthet *et al.*, 2015). Le taux d’adoption des techniques peut alors être très faible si les options proposées sont inadaptées aux contextes d’action des producteurs.

Les approches participatives d’appui à la conception permettent d’intégrer les objectifs et les problématiques des acteurs concernés dès le début du processus. Leurs compétences et leurs savoirs permettent de bénéficier de connaissances empiriques et scientifiques (Meynard *et al.*, 2012). Ces approches prennent en compte la diversité des situations, et permettent de faciliter le transfert d’un éventuel outil ou d’une démarche (Dogliotti *et al.*, 2014; Vall *et al.*, 2016). Elles paraissent particulièrement adaptées au cas de la diminution de l’usage des pesticides de synthèse, qui concerne des filières agricoles entières et nécessite donc une vision systémique, qui peut être conférée par l’inclusion de différents acteurs dans les processus de conception de nouveaux systèmes moins dépendants des pesticides de synthèse.

Ces méthodes participatives peuvent prendre différentes formes : jeux de plateau (Martin *et al.*, 2011), ateliers (Hatchuel *et al.*, 2009), modélisation/simulation (Barreteau *et al.*, 2003), incluant ou non des phases d’expérimentations (Le Bellec *et al.*, 2012). La modélisation/simulation présente deux principaux avantages : elle permet de représenter de manière simplifiée le système à modéliser, et de gagner du temps par rapport aux expérimentations sur le terrain (Martin *et al.*, 2012). Elle sera donc privilégiée dans cette thèse.

3.3.Prendre en compte la diversité des modes de production

Un mode de production désigne la manière dont les ressources sont organisées et utilisées pour fournir un produit ou un service. Il répond à des règles spécifiques, généralement définies au sein d’un cahier des charges. Divers travaux montrent que les modes de production fruitière mobilisent différents niveaux d’utilisation des pesticides et des techniques alternatives, que les transitions vers des systèmes moins dépendants des pesticides ne partent pas du même point, et que les impacts peuvent être variés (Penrose *et al.*, 1996; Penvern *et al.*, 2010; Marliac *et al.*, 2015). La diversité est donc importante à prendre en compte dans la démarche.

Cinq principaux modes de production peuvent être définis mobilisant plus ou moins les pesticides de synthèse : biodynamique, biologique, intégrée, conventionnel, séparé en deux

sous-groupes : raisonné et intensif. Le mode de production raisonné a été défini pour se démarquer de l'intensif. Le mode de production 'conventionnel' est actuellement le plus répandu en Europe (Blouet *et al.*, 2003). Tous ces modes de production doivent au moins respecter la règlementation publique, et sont régis par des cahiers des charges publics et/ou privés qui explicitent les pratiques autorisées ou interdites. Des labels sont délivrés pour certifier le respect des règles spécifiques aux modes non conventionnels. Le mode « biodynamique » fait référence à des principes développés au début du 20ème siècle, et consiste à cultiver selon les mouvements planétaires et lunaires, en s'adaptant aux processus biologiques du sol et de l'environnement, en utilisant seulement des produits naturels dont la liste est plus stricte que l'agriculture biologique (http://www.demeter.fr/biodynamie/). Il est régi notamment par le label « Demeter » qui rédige les cahiers des charges et délivre les certifications. Le mode de production biologique proscrit l'utilisation des intrants de synthèse (pesticides, fertilisants par exemple), et autorise les intrants naturels comme le cuivre et le soufre (http://agriculture.gouv.fr/lagriculture-biologique-1). Le mode de production intégré encourage l'utilisation des ressources naturelles et des mécanismes de régulations à la place des intrants de synthèse, ainsi que les pratiques préventives. Ces règles ont été formalisées par un collectif d'experts appartenant à l'International Organisation for Biological and Integrated Control (Boller *et al.*, 2004). Le mode raisonné est basé sur l'optimisation du résultat économique en maîtrisant les quantités d'intrants utilisées. Les grands axes de ce mode de production portent sur l'accès à l'information et le suivi pour adapter au mieux les pratiques qui doivent prendre en compte les besoins de la plante ou des animaux, les réelles pressions et la disponibilité des ressources (Blouet *et al.*, 2003). Enfin, l'agriculture intensive ne possède pas de définition officielle. Il s'agit d'un type d'agriculture souvent dénoncé par les médias et la société, et associé à un mode de production productiviste et basé sur l'utilisation massive d'intrants de synthèse néanmoins autorisés par la réglementation publique. Les frontières entre ces différents modes de production peuvent parfois être floues, s'empruntant mutuellement techniques, concepts et méthodes.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4. Contexte de l'étude

4.1.La pomme, consommée et consommatrice de temps et d'intrants

La pomme est fortement consommée au niveau mondial, et fait partie des cultures arboricoles fruitières les plus traitée en pesticides. Elle présente donc un intérêt particulier à être étudiée.

Marché mondial et national

La pomme est le deuxième fruit le plus consommé dans le monde après la banane avec une production de 71 million de tonnes en 2014 (Lubello, 2015). Elle se produit dans les pays du Nord et du Sud en climat tempéré. Les prix sont très fluctuants au sein d'une même campagne et d'une campagne à l'autre. Par exemple la variété Golden subit des variations fortes : 0,90 à 1,30 €/kg au marché de Rungis en novembre 2016 (https://www.rnm.franceagrimer.fr/prix). Ces variations sont dues à la concurrence internationale mais aussi aux catégories définies par des critères de qualité cosmétique (FranceAgriMer, 2016).

La production française a atteint un volume de 1,6 million de tonnes en 2015-2016, et se trouve au 3ème rang européen après la Pologne et l'Italie, et au 8ème rang mondial après la Chine, les Etats-Unis, la Turquie, l'Inde et la Russie. La production de pomme en France est localisée majoritairement dans trois régions : Centre-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest. Les principales variétés cultivées dans ces régions sont la Golden et la Gala, et les rendements moyens diffèrent : respectivement 47, 41 et 51 t/ha (Lubello, 2015).

Itinéraire technique

Les opérations les plus consommatrices en main d'œuvre sont la récolte, la taille, et l'éclaircissage, car aucune de ces pratiques n'est couramment mécanisée en frais (Tableau 2) (Bigouin *et al.*, 2013). Du fait de cette forte consommation de main d'œuvre, les coûts de production en France sont élevés, de l'ordre de 0,3€/kg, avec un SMIC horaire à 9,76 €/h hors charges.

Tableau 2. Itinéraire technique de la culture de pomme conventionnelle et temps de travaux pour chaque étape.

Pratique et objectif	Tps de travaux (h)[1]
Taille : gérer la pousse et éviter une trop lourde charge en fruit	120
Eclaircissage : gérer la charge en fruit en détruisant une partie des fleurs et/ou des petits fruits, par pulvérisation d'un produit à base d'hormones. Cela permet d'éviter la variable de fruits d'une année sur l'autre	60
Protection : lutte contre maladies et ravageurs	30
Désherbage chimique : lutte contre les adventices	5
Fertilisation : apporter des nutriments pour le bon fonctionnement de l'arbre	6
Récolte	367

[1]Les temps de travaux dépendent de la quantité produite. Les chiffres sont donnés pour un hectare produisant 65 tonnes.

Organisation de la filière

60% des volumes de pommes nationaux sont commercialisés via le système coopératif. Les circuits courts représentent 6% des volumes (Agreste, 2014b). Les coopératives récupèrent les fruits des producteurs et assurent leur agréage, leur conditionnement et leur commercialisation auprès des acheteurs comme les grandes surfaces, les exportateurs, le commerce de gros ou de détail. Elles assurent aussi un conseil technique avec des techniciens qui proposent un suivi régulier des producteurs pour les aider à prendre des décisions d'ordre opérationnel sur leur atelier de production de pomme, mais rarement à l'échelle de l'exploitation agricole entière. Les coopératives travaillent en collaboration avec des stations expérimentales locales, régionales ou nationales comme celles du Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes (CTIFL), qui réalisent des expérimentations en lien direct avec les problématiques de terrain. Les producteurs sont fédérés au sein de l'Association Nationale des Producteurs de Pommes et de Poires, qui veille à sauvegarder les intérêts de la filière, à promouvoir les fruits, à encourager la mise en place de pratiques alternatives avec la Charte Vergers Ecoresponsables (marquant l'engagement des producteurs pour mettre en place des pratiques alternatives aux pesticides et favoriser la biodiversité), à suivre les marchés nationaux et internationaux.

Une consommation en pesticides de synthèse élevée et décriée

La pomme est très sensible à de nombreux ravageurs et maladies comme la tavelure, le carpocapse et les pucerons pour les plus communs (Simon *et al.*, 2011). La récolte peut être

Rapport-Gratuit.com

tardive selon les variétés (décembre-janvier), imposant une protection sur une période longue. La pomme est la culture la plus traitée parmi les cultures arboricoles fruitières : 35 traitements par an en moyenne. Le nombre de traitements varie selon les régions et les variétés : de 17 traitements en Ile-de-France à 50 en Poitou-Charentes (Agreste, 2014a). Ce fruit est régulièrement pris à partie médiatiquement (Figures 2 et 3). La filière a des difficultés à réagir et se pose des questions sur son évolution.

Figure 2. Campagne Biocoop, 2014 Figure 3. Reportage Envoyé Spécial, France 2, 2015

4.2.Les coopératives partenaires dans le cadre du projet Sustain'Apple

Le projet Sustain'Apple

La thèse se déroule dans le cadre du projet Sustain'Apple qui vise à identifier et évaluer les solutions organisationnelles et institutionnelles à même de maintenir et renforcer la durabilité de la filière pomme. Le projet s'intéresse à la manière dont les entreprises gèrent le risque sanitaire et phytosanitaire avec leurs fournisseurs et leurs clients à tous les niveaux de la filière : circuits de production et d'expédition, circuits courts et consommateurs, intermédiaires du commerce international. Les solutions institutionnelles visent à faire face aux barrières tarifaires mises en place par des pays émergents. Les mécanismes publics/privés sont analysés pour élaborer des protocoles utiles à la négociation. Pour évaluer les impacts de ces solutions, la perception des consommateurs du risque sanitaire et phytosanitaire est étudiée, ainsi que l'influence des protocoles sur les volumes exportés et les impacts environnementaux comparés entre les différents circuits et dans différents pays.

Sustain'Apple regroupe des partenaires scientifiques et techniques : l'INRA, le CIRAD, l'IRSTEA, mais aussi le CTIFL, l'Association Nationale des Producteurs de Pommes, Carrefour, et des coopératives.

Dans le cadre de ce projet, la thèse s'intéresse au maillon de la production à travers une prise en compte des exploitations agricoles dans deux régions : le Sud-Est autour de la coopérative Cofruid'Oc proche de Montpellier, et le Centre-Ouest autour du groupement commercial PERLIM proche de Limoges.

La production de pommes autour de Limoges, un contexte à problématiques multiples

Dans la région comprise entre Brive-La-Gaillarde et Limoges (Figure 4), les filières agricoles s'appuient sur des Signes Officiels de Qualité : Indications Géographiques Protégées (IGP), Label Rouge, Appellation d'Origine Protégée. Les filières phares bénéficiant de ces étiquettes sont la filière bovine (Limousine), les noix du Périgord, et les pommes Golden®. Ces différentes filières attirent les producteurs qui espèrent obtenir un prix plus avantageux car les produits se démarquent sur le marché. En conséquence, 67% des exploitations ont une production de bovins viande (Agreste, 2015). Il n'est donc pas rare de rencontrer des producteurs-éleveurs diversifiés.

La culture de la Golden s'est développée dans les années 50 et la surface s'est progressivement agrandie. Les parcelles entre 300 et 500m d'altitude, les baisses de températures importantes la nuit et un été chaud, permettent d'obtenir des pommes Golden de qualité, avec une face rosée et un taux de sucre élevé. Pour valoriser le terroir et la qualité, l'AOP Golden a été créée en 2004. Elle est gérée par un Syndicat qui défend le produit, et harmonise une partie des recommandations techniques sur la culture (Association Pomme du Limousin, 2010). Les producteurs ont donc accès à des informations techniques complètes, mais uniquement sur cette variété. En 2013, la région cultivait 2000 hectares de pommes, pour un total de 284 exploitations et 100 millions de tonnes récoltées, soit 6% du volume national.

86% des volumes de pommes sont commercialisés en Organisation de Producteurs (OP), respectant des cahiers des charges privés. Il s'agit du plus haut pourcentage national, la moyenne étant de 60% (Agreste, 2014b). Il y a très peu de producteurs indépendants. Trois structures commerciales se partagent le marché de la Golden : PERLIM, LIMDOR et la SICA Meylim.

La moyenne annuelle des précipitations dans la région autour de Limoges est de 1020 mm pour 2016. Les précipitations sont concentrées en hiver et au printemps (http://www.meteofrance.com/climat/france/limousin/regi74/normales). La combinaison d'un climat humide au printemps et d'une unique variété sensible sur un territoire important favorise le développement des maladies. Le Limousin atteint une moyenne de 38 traitements, supérieur

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

à la moyenne nationale de 35. De plus, la région a subi de nombreux aléas climatiques, causant parfois des pertes de récolte de plus de 80%. Les quantités et la qualité produites sont donc très variables d'une année sur l'autre. Du fait de ces résultats faibles et variables, la surface plantée est en baisse depuis 2012.

De nombreuses pressions sur les pratiques de protection s'exercent. Le reportage Envoyé Spécial (http://www.francetvinfo.fr/replay-magazine/france-2/envoye-special/video-peut-on-encore-manger-des-pommes_841549.html), et plus récemment Cash Investigation (http://www.francetvinfo.fr/replay-magazine/france-2/cash-investigation/cash-investigation-du-mardi-2-fevrier-2016_1286821.html) ont été tournés en partie dans la région. L'association Allassac ONGF (Oeuvrons pour la Nature et les Générations Futures) conduit de nombreuses actions vindicatives, et plusieurs actes de vandalisme sont rapportés comme l'arrachage de jeunes pieds sur plusieurs hectares (http://vegetable.fr/2014/05/28/vandalisme-un-verger-totalement-tronconne-en-limousin/). L'utilisation des pesticides est un sujet de tension élevée dans la région.

La zone entre Limoges et Brive-La-Gaillarde est donc un terrain d'étude intéressant pour la problématique car : (i) une unique variété y est cultivée sur près de 2000 hectares favorisant le développement de maladies, (ii) le climat humide au printemps favorise la tavelure, (iii) les aléas climatiques sont nombreux et mettent en péril la durabilité économique des exploitations, (iv) les tensions entre citoyens et producteurs sont très élevées.

La région de Montpellier

Dans la région de Montpellier (ex-Languedoc-Roussillon), la pomme couvre 1600 hectares soit 236 exploitations (Agreste, 2014c). La production a atteint 85 000 de tonnes en 2014. La production fluctue d'une année sur l'autre du fait des aléas climatiques, mais reste globalement stable depuis 2010, autour de 80 000 tonnes. De multiples variétés sont cultivées dans la région : Granny, Golden, Pink Lady®, Reine des Reinettes. La Pink Lady® apporte un avantage économique intéressant pour les producteurs qui la cultivent car elle est vendue plus cher en moyenne : 0,8€/kg soit presque le triple du prix d'une pomme standard. La marque Pink Lady® gère les surfaces plantées en délivrant des autorisations lui permettant de garder un équilibre offre/demande à son avantage.

83% des volumes sont commercialisés en OP, le deuxième plus haut pourcentage national (Agreste, 2014b). La pomme a été développée dans la région suite au gel qui a décimé les vignes en 1956. Le développement de l'irrigation à la même époque, avec l'installation du canal du

Bas-Rhône a aussi encouragé le développement de la culture. Mais la viticulture couvre encore 61% des surfaces en Languedoc-Roussillon et certaines exploitations cultivent les deux.

Le climat dans la zone de Montpellier est chaud et sec, les précipitations atteignent une moyenne annuelle de 630 mm, concentrée en automne lors des épisodes cévenols. L'été est donc sec (http://www.meteofrance.com/climat/france/languedoc-roussillon/regi91/normales). Ce climat favorise les insectes plutôt que les maladies.

Deux coopératives produisent plus de 50% de la production totale autour de Montpellier : Cofruid'Oc et la SICA de Mauguio, avec plus de 20 000 tonnes chacune. Elles favorisent une communication de proximité avec les consommateurs en créant des lieux de vente sur les sites des coopératives.

Ce contexte de production est intéressant à étudier de par la diversité variétale, le climat sec imposant des contraintes d'irrigation et des attaques d'insectes importantes, la communication positive développée autour de la problématique phytosanitaire et l'importance de la proximité avec le consommateur.

Les deux contextes du Centre-Ouest et du Sud-Est sont intéressants à comparer car ils présentent des caractéristiques climatiques, variétales et de pressions de maladies contrastées. Les stratégies de protection mises en œuvre par les producteurs dans ces deux zones sont-elles contrastées et dépendent-elles des mêmes déterminants ?

Les deux coopératives partenaires du projet de recherche Sustain'apple

Le groupement commercial PERLIM a produit 60 000 tonnes de pommes en 2013, avec une surface en verger de 1500 hectares et 150 producteurs. Les producteurs ont une surface moyenne de 9 hectares mais les profils sont très variés. Des exploitations peuvent posséder jusqu'à 120 hectares de pommes. Les exploitations sont spécialisées en Golden Delicious®. Elles peuvent se diversifier en produisant des pommes biologiques de la variété Opal®. Le service technique est assuré par quatre techniciens dont un est impliqué étroitement dans le programme Dephy-EcoPhyto.

La coopérative Cofruid'Oc regroupe 49 producteurs sur une surface de 400 hectares. Elle crée de nombreuses marques commerciales pour mieux valoriser des variétés spécifiques : « Tasty Granny », « Chantecler Gourmande ». Sur le marché français, Cofruid'Oc travaille avec les GMS et est le fournisseur exclusif de Mac Donald's. Deux techniciens appuient les producteurs.

Figure 4. Carte de localisation des deux terrains en France.

5. Démarche de recherche

La première phase analytique (Phase I) portant sur les processus de gestion et leurs impacts, et l'identification des freins aux transitions est traitée au sein des chapitres 2 et 3 du mémoire. La deuxième phase (Phase II) sur la mise en place d'un processus d'accompagnement est traitée au sein des chapitres 4 et 5. Chaque chapitre répond à une question précise (Figure 5) sous la forme d'un article scientifique soumis (chapitre 2), publié (chapitre 3), accepté (chapitre 4) et à finaliser (chapitre 5).

5.1. Chapitre 2 : Evaluer les impacts des pratiques d'utilisation des pesticides à l'échelle de la parcelle

L'étude part de l'analyse des pratiques d'utilisation des pesticides dans une perspective d'appréhension de leur diversité et d'évaluation de leurs impacts sur la production des vergers et sur l'environnement.

Q1 : Quels sont les pratiques d'utilisation des pesticides et leurs impacts à l'échelle de la parcelle ?

Répondre à cette première question permet de constituer un socle de connaissances techniques sur les pratiques d'utilisation des pesticides, leur diversité et leurs impacts. L'analyse est basée sur une base de données contenant les calendriers de traitements de 557 parcelles d'une même région, une même variété (Golden Delicious®) sur une année donnée (Annexe 1). Une typologie des combinaisons de pratiques a été réalisée à partir d'une analyse multivariée. Pour évaluer les impacts de ces pratiques et mettre en lumière leur diversité, plusieurs indicateurs sur la fréquence de traitements, la toxicité et l'efficience des traitements ont été utilisés, et leurs corrélations analysées. Les résultats ont été discutés avec les techniciens de la coopérative concernée pour réfléchir à de possibles actions à mener en conséquence. L'article tiré de cette analyse a été soumis à la revue *Journal of Cleaner Production* (en révision à ce stade).

5.2. Chapitre 3 : Analyser les processus de décision à l'échelle de l'exploitation agricole

Suite à cette première question, nous sommes passés de la parcelle à l'exploitation agricole pour comprendre les facteurs qui influencent les décisions à l'origine de la diversité des pratiques observées, en dépassant les seules pratiques d'utilisation des pesticides pour nous intéresser à l'intégralité des pratiques de protection.

Q2 : Quelle est la diversité des stratégies de protection mises en place à l'échelle exploitation agricole et quels sont les facteurs déterminant les choix réalisés ?

L'analyse vise à formaliser les stratégies de protection en fonction des objectifs des producteurs, de leur schéma décisionnel, et des facteurs qui les influencent. Les stratégies de protection sont ensuite reliées aux performances qui en découlent via les pratiques mises en place. L'étude est basée sur 35 entretiens semi-directifs réalisés avec des producteurs de pomme sur les deux terrains d'étude. Une typologie de stratégies de protection en fonction des objectifs des producteurs et des caractéristiques de leur exploitation a été construite. Cinq types ont été mis en évidence, mettant en place des pratiques de protection spécifiques. L'article tiré de cette analyse a été publié dans la revue *Crop Protection*.

5.3. Chapitre 4 : Concevoir un processus d'accompagnement pour aider les producteurs à réfléchir à leur stratégie de gestion et son évolution

Les résultats des deux premières parties fournissent les connaissances nécessaires pour dépasser la seule analyse de l'existant en concevant un processus d'accompagnement intégrant l'intégralité de l'itinéraire technique dans la réflexion et basé sur un outil de simulation développé dans le cadre de l'étude. Ce processus doit permettre d'évaluer les marges de manœuvre d'une exploitation souhaitant faire évoluer sa stratégie de production en mesurant les impacts potentiels de tels changements.

Q3 : Quel processus pour aider les producteurs à évaluer les conséquences de changements de stratégies de production ?

Pour répondre à cette question, l'outil de simulation CoHort a été créé avec l'idée de fournir à terme un produit opérationnel qui permettra à un technicien d'accompagner les producteurs dans leurs réflexions. L'objectif est d'intégrer à la fois le niveau parcelle pour une description suffisamment fine des pratiques, et le niveau exploitation agricole pour prendre en compte leurs contraintes et atouts et intégrer les éléments mobilisées dans les processus de décisions et formalisés au chapitre 3. Ce chapitre explique les différentes étapes du processus d'accompagnement mis en place, basé sur la co-conception de l'outil et l'identification de scénarios à simuler. La structure de l'outil est présentée et son fonctionnement illustré avec deux exemples de producteurs de pommes du Limousin souhaitant faire évoluer leur stratégie. L'article tiré de ce travail a été accepté par la revue *Computer and Electronics in Agriculture* (en cours d'édition à ce stade).

5.4.Chapitre 5 : Simuler des scénarios de rupture et discuter leurs impacts

Le chapitre 4 a permis de développer un processus d'accompagnement basé sur l'utilisation d'un outil de simulation. Les premiers tests effectués ont permis de créer avec les producteurs et techniciens des scénarios du domaine de la transition « incrémentale ». Pour élargir le champ de la réflexion, nous avons souhaité concevoir, simuler et discuter des scénarios de rupture. Ces scénarios permettent d'envisager de nouvelles combinaisons de pratiques qui modifient en profondeur le fonctionnement de l'exploitation.

Q4 : Quels sont les impacts potentiels de scénarios de rupture sur les exploitations arboricoles fruitières ?

Ce chapitre présente la façon dont la méthode développée au chapitre 4 a été adaptée pour concevoir des scénarios de rupture et évaluer leurs impacts sur les exploitations. L'adaptation de la méthode a consisté à s'extraire pour partie des contraintes actuelles et perceptions du futur des producteurs en les excluant du processus de conception, tout en mobilisant des connaissances expertes issues d'autres acteurs et en les appliquant à un cas réel d'exploitation. L'exemple choisi introduit un atelier ovin dans un verger existant pour assurer le désherbage, la fertilisation et agir sur certains bio-agresseurs. Ce chapitre se présente sous la forme d'un draft d'un futur article qui fera l'objet après quelques compléments d'une soumission à la revue *Agricultural Systems.*

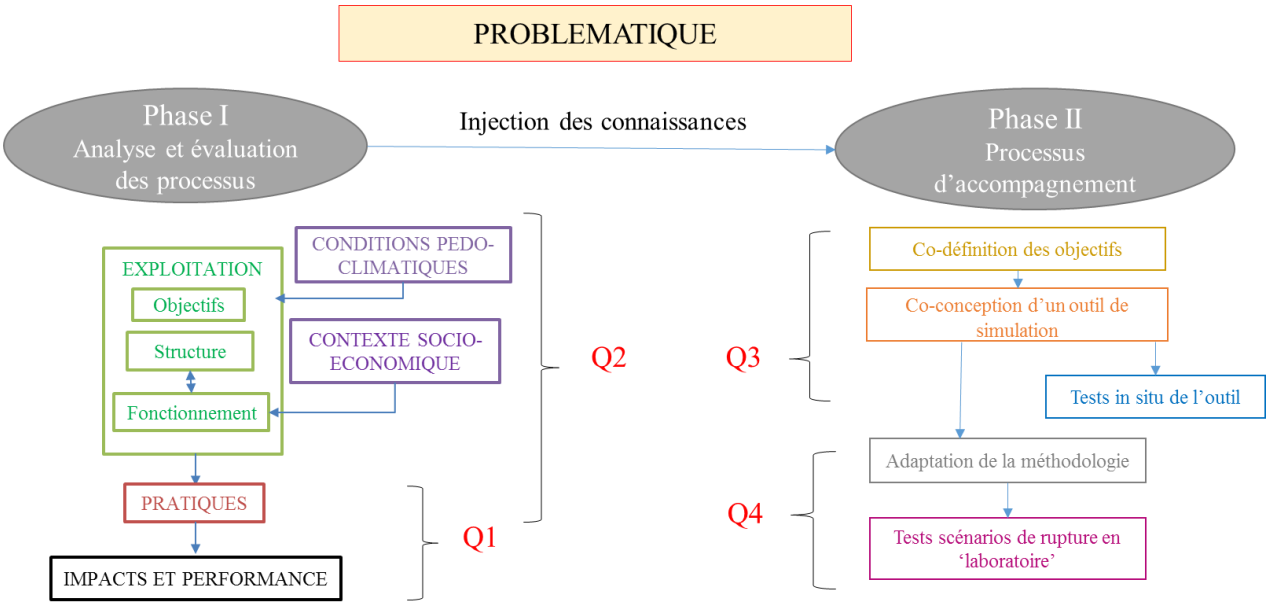


Figure 5. Schéma de la démarche établie pour répondre à la problématique

Chapter II. Evaluating the diversity of apple farmers' pesticide use at the plot level with frequency, toxicity and efficiency indicators.

Cet article a été soumis à la revue *Journal of Cleaner Production*, en révision depuis le 14 août 2017.

Solène Pissonnier[1,2,*], Anne-Sarah Briand[3], Philippe Roux[4], Pierre-Yves Le Gal[1]

[1]CIRAD, UMR Innovation, F-34398 Montpellier, France

[2]INRA, UR 1115 PSH, Plantes et Systèmes de Culture Horticoles, F-84000, Avignon, France

[3]IFSTTAR, Université Paris-Est, COSYS-GRETTIA, 14-20 Boulevard Newton, F-77447 Marne-la-Vallée, France

[4]IRSTEA, UMR ITAP, ELSA research group, 361 rue Jean-François Breton, F-34196 Montpellier, France

*Corresponding author

Email addresses: solene.pissonnier@wanadoo.fr, philippe.roux@irstea.fr, pierre-yves.le_gal@cirad.fr, anne-sarah.briand@ifsttar.fr

Abstract

Spray records contain information that can be used to evaluate how farmers use pesticides before supporting them in evolving towards alternative practices. Based on a dataset including the spray records for one year of 105 apple farmers in centre west France, all growing Golden Delicious®, this paper analyzes the diversity of pesticide use and evaluates the potential impacts on human health and the environment. The methodology combines (i) a multivariate analysis to group the plots according to the different families of pesticides used, (ii) the calculation of three types of indicators to assess pesticide use on: frequency (Treatment Frequency Index), toxicity with two USEtox® indicators (CTUh, CTUe) to assess human and environmental toxicity impacts, and efficiency with calculations of previous indicators per ton, (iii) a discussion with farmers and technicians about potential consequences for actions on crop protection.

We show that despite sharing a similar climatic and marketing context, the growers studied implement diverse pesticide practices. These practices can be grouped into four clusters named according to their main profile: 'Balanced', 'Anti-scab', 'Anti-insect' and 'Natural'. The TFI is not linked to the type of pesticides used since three of the clusters show similar averages.

Our results also indicate that health toxicity depends on spray frequency while environmental toxicity depends on spray frequency and the types of pesticides used.
Cluster ranking is modified when the efficiency of treatments (per ton of apple produced), is taken into account; the 'Anti-scab' cluster, with the lowest frequency and toxicity, shows the lowest efficiency.
Within each cluster, the diversity of pesticide use, the performance of the frequency, health and environment toxicity, and efficiency indicators vary. These four dimensions together with knowledge regarding growers' decision-making processes, need to be considered to better describe and understand pesticide use practices and adapt advice at the plot level.

Key words: TFI; USEtox®; France; Spray records

1. Introduction

Synthetic pesticides contain highly diverse active molecules that have negative impacts on human health and the environment (Damalas and Eleftherohorinos, 2011). In most countries, pesticide use is restricted by public regulations that farmers must respect to sell their production. In Europe, farmers are legally required to record all inputs applied on their crops to ensure traceability and detect potential problems or fraud. These 'spray records' contain the following information: (i) pre-harvest intervals, (ii) applied doses, (iii) number applications per pesticide, (iv) re-entry intervals between two applications, (v) names of the pesticides used. Public authorities verify the records by checking whether the information provided complies with regulations and by examining pesticide residues on the fruit. Private buyers can also use this information to check compliance with their own specifications, for instance when they forbid additional pesticides or when they increase pre-harvest intervals. These data can be accessed by technicians providing support to farmers in their daily crop management decision-making and in their search for solutions to reach their objectives (Pissonnier *et al.*, 2016). Technicians generally use spray records to monitor and evaluate farmers' use of synthetic pesticides. These evaluations are the first step in a process aiming to stimulate new dynamics that would lead to reduced pesticide use (Meynard *et al.*, 2012).

As field measurements and experiments are time-consuming and very expensive, several indicator-based methods have been developed and used to indirectly assess the impacts of pesticides on health and the environment (Reus *et al.*, 2002). Indeed, indicators supply information which is not directly accessible, and are useful to evaluate a process and support decision-making (Mitchell, 1996). The users targeted and the scales considered depend on the

type of decisions involved. For instance, the plot/farm scale is considered to determine the right time to spray pesticides, the regional scale to better manage water pollution, and the national scale to better regulate pesticide use. Three types of indicators have been designed for the assessment of pesticide use (Deytieux *et al.*, 2016). The first type focuses on the quantity and frequency of applications, such as the Treatment Frequency Index (TFI). The number of applications and application rates are easy to calculate but products are considered to be equivalent in terms of toxicity and ecotoxicity. The second type has been adapted from ERA (Environmental Risk Assessment) and focuses on the toxicity of the pesticides, such as load indexes or Environmental Impact Quotient (EIQ). These indicators estimate the impacts of pesticide use on three compartments (water, soil, air) and on different targets (farmers and workers, aquatic organisms, beneficiaries, bees) (Devillers *et al.*, 2005). The third type of indicators includes Toxicity Indicators developed for Life Cycle Analysis (LCA). These aim to compile and assess the inputs, outputs, and potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle (Hellweg and Milà i Canals, 2014), e.g., eutrophication, resource depletion, water deprivation. In contrast with ERA indicators, they are not site-specific and are then easier to use on a large set of plots. Toxicity and frequency indicators are rarely combined together, or with indicators of plot performance (e.g., yield or profit per hectare), although this combination could provide additional information useful to support reduced pesticide use (Mghirbi *et al.*, 2015).

This study aims to evaluate the diversity of the pesticide practices implemented by apple farmers and the potential impacts on human health and the environment. We do so by combining the calculation of a frequency indicator,

LCA toxicity indicators and a performance indicator (yields). We apply our approach to a database containing the 2014 spray records of 105 French apple farmers (Figure 1). Pesticides are commonly used in the apple

sector to avoid fruit damage and to maximize premium fruit yields, which are the most profitable (Drogué and DeMaria, 2012). After describing our methodology, the diversity of farmers' pesticide practices is highlighted. The potential impacts of these practices on health and the environment are then analyzed and discussed.

Figure 1: Picture of the apple plots studied.

2. Materials and Method

2.1.Dataset building

The 2014 spray records of 105 apple farmers belonging to a cooperative located in the Limousin region of centre west France were collected under a participatory research project (see Annexe 1). The records covered a total of 557 plots. The cooperative is specialized in marketing Golden Delicious® apples. This variety is well adapted to the soil quality, topography and nocturnal temperature drop of the region, and benefits from a protected designation of origin (PDO) quality label. Herbicides, thinning products, and growth regulators were excluded as they involve a different set of decision rules (Pissonnier *et al.*, 2016). Young orchards under four years old also were excluded since they are sprayed less or sprayed differently. The spray records were stored in Excel® and double-checked.

The structure of the dataset was based on five principles: (i) the analytical unit was the plot level in order to evaluate the diversity of pesticide use between plots. Within a single farm, different practices may be implemented depending on the plot production mode (organic or conventional), marketing strategy, pest and disease pressures, and weather conditions (Pissonnier *et al.*, 2016); (ii) the indicators used to describe and evaluate the set of practices per plot were selected in order to be reused and discussed by technicians and (iii) to combine information about toxicity, frequency and quantity; (iv) indicator averages were calculated without taking into account plot area (arithmetic mean); and (v) the diversity of practices was structured based on different clusters resulting from a multivariate statistical analysis.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

2.2.Selection of indicators

The Treatment Frequency Index (TFI, Eq1) was the first indicator selected. It was developed in the 1980s in Denmark to provide public agencies a means to evaluate the intensity of pesticide use in agriculture which was not based solely on the quantity of pesticides sold (Brunet, 2008). The TFI offered several advantages since it is very easy to calculate, the score of different pesticides can be summed up, it takes into account both the quantity and number of pesticides applied, it can be calculated at the plot scale, and the farmers and technicians involved in the study were already familiar with it. It also provides a way to consider spray dates based on their frequency: in a same season context, a high frequency means a shorter interval between two sprayings.

Toxicity was assessed based on USEtox®, a model dedicated to LCA (available at http://www.usetox.org/). USEtox® is used to characterize the human and ecotoxicological impacts of chemicals (Rosenbaum et al, 2008). It is the method recommended by the European Commission for LCA. It is not site-specific and has been widely used for the assessment of pesticide use in agricultural LCAs (Van Zelm *et al.*, 2014). USEtox® uses two kinds of indicators: the Comparative Toxic Unit for human toxicity impacts (CTUh) expresses the estimated increase in morbidity in the total human population per unit of mass of the chemical emitted. CTUh takes into account both toxicity related to ingestion exposure and inhalation exposure. The Comparative Toxic Unit for aquatic ecotoxicity impacts (CTUe) expresses the estimated Potentially Affected Fraction of species (PAF) integrated over time and the volume of the freshwater compartment, per unit of mass of the chemical emitted. Usetox® Updated version v2.0 was used for this study (characterization factor for soil emissions).

CTUe and CTUh per hectare and per spraying were calculated by (i) calculating the quantity of active molecules in each pesticide spraying, (ii) multiplying this quantity by the dose applied per hectare (Eq2). Natural pesticides based on natural active compounds like copper and sulfur were excluded, and some synthetic active compounds were not characterized due to a lack of data, for instance when the dose for which the active molecule is lethal for terrestrial/aquatic organisms was not known for all molecules. For the synthetic pesticides in the data base, 64% were characterized using CTUh, and 82% using CTUe. The scores of each pesticide applied on the plot were added to calculate the CTUh and CTUe per plot (Eq3). Equations are given for CTUh but the same calculations were carried out for CTUe (see list below).

Yield was selected as the performance indicator since yield data was provided by the cooperative for every recorded plot. TFI, CTUh and CTUe per plot were then divided by the corresponding yield (ton/ha) in order to estimate spray efficiency at the plot level: TFI/t, CTUh/t, CTUe/t.

The correlations between total TFI and CTUh(e) per plot were calculated by creating two TFI restricted to the pesticides for which a characterization factor of respectively human health (TFI_h) and environmental (TFI_e) impacts were available.

2.3.Plot classification according to the family of pesticide use

Since many different commercial pesticides were used, a decision was taken to regroup them into nine families to provide a relevant but simplified description of the diversity of pesticide use based on the main pests and diseases targeted: (i) Conservation: fungicides to fight against fungus diseases that develop during storage, (ii) Other-fung: fungicides fighting powdery mildew and fire blight, (iii) Scab-contacts: fungicides sprayed against scab that act directly by contact on the spores (preventive and short-term curation), (iv) Scab-SBI: long-term curative fungicides sprayed against scab after an infection, (v) Scab-other: fungicides against scab other than contacts or SBI, preventive or curative, (vi) Multi-ins: insecticides with several targets, including insecticides against mites, (vii) Aphid: insecticides against aphids, (viii) Lepid: insecticides against codling moth or other members of the Lepidopteran family like leafrollers, and (ix) Natural: all pesticides that are not synthetic and sprayed against either fungi (copper, sulfur) or insects (viruses, bacteria, oils).

The TFI per family, as well as the contribution of each family to the total TFI, were calculated on each plot (Eq4) to compare plots on a same basis, define which families are the most sprayed, and identify the range of family combinations within the dataset. The toxicity of each pesticide family was also calculated to identify the most toxic families used, through the calculation of CTUe and CTUh indicators (Eq5).

The plots then were regrouped in homogeneous clusters according to the family combinations identified in order to organize the diversity of practices. A hierarchical agglomerative clustering (HAC) was applied to the data with R software by using the Hclust package (Murtagh, 1985). The aim was to identify clusters of plots on which similar proportions of pesticide families were used. Using a HAC allows one to obtain a hierarchical representation of this proportional relationship, especially by looking at the dendrogram. The HAC clusters the different plots using the distance that separate the proportion of pesticide families of each plot. In the

beginning, each plot belongs to its own cluster. The two closest clusters are then merged and considered as a new cluster using a linkage criterion. In this newly formed cluster, the new proportion of pesticide families (TFI in %) is calculated by calculating the average between the plots merged. This step is repeated until all of the plots are part of a single cluster. In this paper, the Euclidean distance and the Ward linkage criterion, which maximizes the decrease in variance for the clusters that are being merged (Murtagh and Legendre, 2014), were used.

For each indicator (CTUh, CTUe, total TFI, TFI per family, yield, CTUh/t, CTUe/t, TFI/t), the variance equality between the clusters was tested. If the variance equality was respected, an ANOVA was performed to check if the differences between the averages of the clusters were significant. If the variance equality was not respected, a Kruskall Wallis (KW) test was performed instead of the ANOVA. This test enables one to check whether the clusters have different characteristics for each indicator.

List of equations:

Eq1 TFI per plot $\mathrm{TFI}_j = \sum_{i=1}^{n}\left(AD_i^j \div RD_i\right)$

Eq2 CTUh per hectare for each spraying $Htox_i = \sum_{a=1}^{n} CF\_Htox_a \times P_a^i \times AD_i$

Eq3 CTUh per hectare for each plot $Htox_j = \sum_{i=1}^{n} Htox_i^j$

Eq4 %TFI_family per plot $\%TFI_f^j = 100 \times \sum_{i=1}^{n} TFI_i^f \div TFI_j$

Eq5 %CTUh_family per plot $\%Htox_f^j = 100 \times \sum_{i=1}^{n} Htox_i^f \div Htox_j$

List of indexes:

i: individual pesticide application; j: plot; a: active compound; f: pesticide family

List of variables:

AD_i^j : applied dose/ha of pesticide *i* on plot *j*

RD_i ; authorized dose/ha of pesticide *i*

CF_Htox_a : characterization Factor of Human toxicity of the active compound a /kg

P_a^i : proportion of active compound *a* in the pesticide *i* (%)

TFI_i^f : individual pesticide application of the pesticide *i* belonging to family *f*

$Htox_i^f$: human toxicity of pesticide *i* belonging to family *f*

3. Results and discussion

3.1.A diversity of pesticide use practices within a common context

The average TFI per plot on the whole dataset is slightly higher than the national French average (Agreste, 2014a) (respectively 38 and 35) since the high pressure of pests and diseases in the region studied requires many sprayings. Despite a similar climatic and marketing context, 24% of the plots show a TFI higher than 45, while 7% of plots show a TFI lower than 25 (Figure 2). Yields and TFI/t are also highly variable with a coefficient of variation accounting respectively for 48% and 131% (Table1). However, the link between yields and TFI is weak (coefficient of correlation $r^2 = 0.21$, Figure 3). Indeed, plots with a high TFI do not automatically produce more apples, a result also found in arable crops (Lechenet *et al.*, 2014). This variability may result from a large diversity of farmers' practices, a phenomenon observed in apple and other productions (Halberg, 1999) and usually linked to a diversity of pesticide use (Giuliano *et al.*, 2016). However, as TFI calculations only take into account the frequency and dose of applications, similar values may hide differences of pesticide use.

Based on the dendrogram, four clusters were selected for the practice analysis. These clusters show a range of common characteristics: (i) Anti-scab sprayings represent the majority of the pesticides used since scab is the main fungus disease in the area: between 60 and 74% of total TFI and at least 50% for Scab-contacts products in every cluster (Table 1); (ii) the percentage of Other-fung is always under 4% since the fungicides sprayed against scab have a secondary action on other fungus diseases; (iii) the percentages of Aphids, Lepid and Multi-ins are under 6% since pests are not the main issue; and (iv) the percentage of conservation pesticides is always under 5%. Only a few (zero to three) conservation pesticides are allowed by public regulations to respect pre-harvest intervals. The number of conservation sprayings mainly depends on the quantity of rain before harvest.

Each cluster has its own specificities combined with this common core of practices (Table1). The most frequent cluster, called 'Balanced' (34% of the dataset), shows TFI rates per family and TFI/t close to the average TFI rates on the whole dataset. Its fungicide strategy relies mostly on Scab-contacts, which represent 84% of the synthetic fungicides used. These products avoid using too many long-term curative fungicides like Scab-SBI (Didelot *et al.*, 2016). However, they are sustainable only if active compounds are alternated to avoid the development of fungus resistance. In this respect, 'Balanced' achieves a balance between the use of the different families (natural and synthetic).

The ‘Anti-scab’ cluster has the lowest overall TFI (30). The TFI of Natural, Aphid and Conservation families are lower compared to the global average TFI of these families with respectively 75%, 36% and 44% reduction. However, it has the lowest yield and lowest efficiency (highest TFI/t), although differences between the TFI/t of the clusters are not significant. These results are due to a high number of plots that were not harvested. The orchard may not be a priority for the growers, leading to less time to spray and lower economic results. Anti-scab treatments rely largely on synthetic fungicides, especially Scab-contacts (61%, the highest percentage), and little on natural pesticides such as copper and sulphur. Scab-other and Scab-SBI are also the highest relative scores among the four clusters. The use of long-term Scab-SBI is a riskier strategy because the treatment is applied after the infection has already occurred and the fungicide is not always successful. Moreover, under the law, a maximum of three Scab-SBI sprayings is allowed.

Well represented in the dataset (30%), the ‘Anti-insect’ cluster shows the highest average TFI (41) with the lowest coefficient of variation. It has the second highest yield and a TFI/t lower than 1. This high TFI combines the highest use of Scab-SBI and Other-fung (although the difference in values is not statistically significant) with the lowest Scab-contacts rate between the four clusters. Reducing the use of Scab-contacts thus results in a reinforced strategy based on long-term curative fungicides and other fungicides since secondary diseases develop when scab fungicides are lowered (Trapman and Philion, 2015). Insects are a bigger problem than in other clusters, with insecticides accounting for the highest proportion of all clusters: 18% of the total TFI. The TFI of Lepid and Mult-ins are significantly higher. These high values may be due to the existence of previous generations of pests and/or diseases that have settled in the orchard and are now difficult to manage (Wilson and Tisdell, 2001).

By combining one of the lowest Scab-contacts and Scab-SBI rates with one of the highest Other-scab and Natural pesticides rates, the ‘Natural’ cluster include growers implementing strategies based on fungicide diversification balancing the use of various synthetic and natural products. This substitution process of synthetic pesticides with natural ones (Hill and MacRae, 1996) did not decrease their total TFI, the average of which is close to the total one but with a large intra-cluster variability. This diversity of TFI may result from various pest and disease pressures on each plot. ‘Natural’ growers managed to reach the lowest TFI/t thanks to their high yield.

In general a decrease in Scab-contacts can lead to an increase in the use of Scab-other, Scab-SBI or Other-fung fungicides. Growers have to find a balance in order to reach their targeted

yields and quality. Scab is a disease which is difficult to manage in a context where there is a single susceptible variety on a large area with a wet climate in spring. Sprays against scab cannot be replaced or reduced under a certain point, which depends on the grower's own threshold, perception and objectives (Hashemi and Damalas, 2010) and market demand regarding cosmetic aspects of fruits. Natural sprays also enter in the balance as they can be a substitute for synthetic anti-scab pesticides or insecticides. However, as shown by the comparison between 'Anti-scab' and 'Natural', the use of natural sprays does not automatically decrease the use of synthetic pesticides. This may be due to: (i) the difficulty to manage natural sprays as some of them, such as Cydia pomonella granulosis virus, require specific conditions regarding wind and temperature, (ii) the growers' lack of knowledge regarding the right use of natural sprays (Chantre and Cardona, 2014), and (iii) the lower efficacy of these products, which may require synthetic pesticides to be sprayed in compensation (Wilson and Tisdell, 2001). However, these results are linked to a given year (2014). The plots may not be distributed the same way if the dataset of a different year is used as the adjustments made by growers may depend on climatic or economic events, and finding a balance between pests, beneficials and pesticides takes time. This stability of classification with regard to protection strategies interpreted from the collection of data on annual practices is clearly a limitation of this kind of statistical methodology (Eckert *et al.*, 2000).

Calculating the TFI per cluster shows that (i) a given TFI can correspond to different clusters and then to different pesticide practices (Figure 4), and (ii) a high variability of TFI within each cluster remains, the same kind of pesticide use practices can lead to different TFI, which was also demonstrated in vineyards (Mghirbi *et al.*, 2015). Such results would be difficult to explain without investigating the ways growers manage their orchards individually. Investigating farm management and structure could also help to provide explanations for this intra-variability by identifying the characteristics of the farms that influence the decision-making process (Pissonnier *et al.*, 2016). These findings show that the TFI is not sufficient to describe pesticide use practices. The diversity of pesticide use behind the TFI values must be considered in order to better adapt advice for growers. Using the TFI/t made it possible to assess the efficiency of protection practices and to show, based on the 'Anti-scab' case, that reducing sprayings may lead to higher pesticide use to produce one ton of apples.

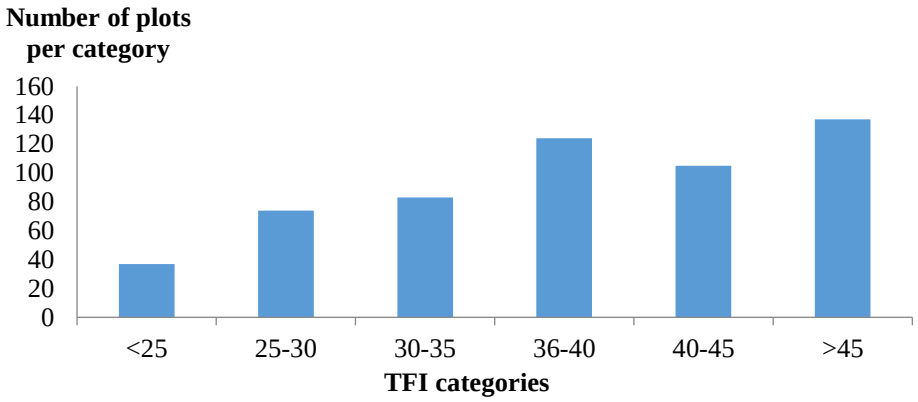


Figure 2. Repartition of the plots in six classes according to their TFI value

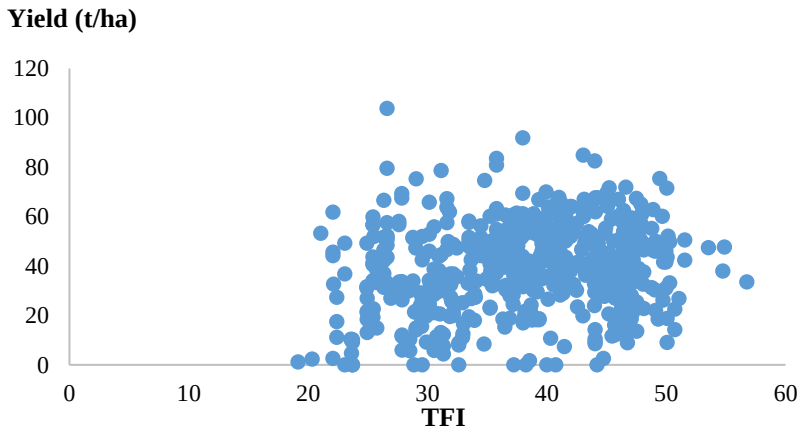


Figure 3. Yield of each plot according to its TFI.

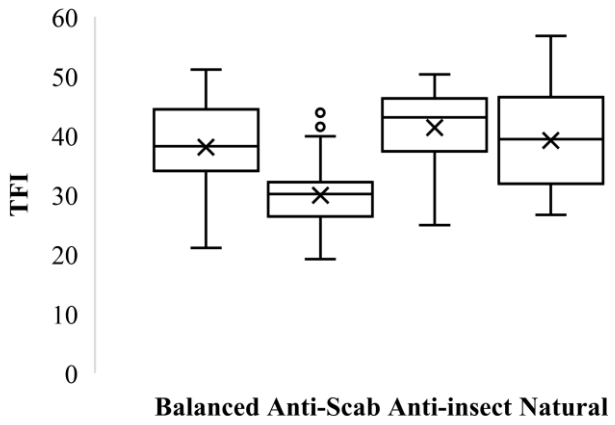


Figure 4. Inter and intra-TFI variability per cluster.

Caption: Min, max, average (line) and median (cross) values are represented. The box height depends on the

value distribution between the 25th and 75th percentile. Dots are outlier values

Table 1. Total TFI, yield and TFI/t, and proportion of the different families of pesticides used in each cluster of practices

Cluster	Number of plots	Total TFI	Yield (t/ha)	TFI/t	Aphid	Conser-vation	Lepid	Multi-ins	Other-fung	Scab-contacts	Scab-other	Scab-SBI	Natural
'Balanced'	191	38 a	39.6 a	0.96 a	2.2 a	1.8 a	1.8 a	1.4 a	1.0 a	22.1 a	1.8 a	1.4 a	4.4 a
		(21%)	(50%)	(123%)	[6] a	[5] a	[5] a	[4] a	[3] a	[57] a	[5] a	[4] a	[11] a
'Anti-scab'	89	30 b	26.4 c	1.14 a	1.4 b	0.9 b	1.7 a	1.6 a	1.0 a	18.3 b	1.9 a	1.8 b	1.2 b
		(18%)	(73%)	(182%)	[5] b	[3] b	[6] b	[5] b	[3] a	**[61]** b	[7] b	[6] b	[4] b
'Anti-insect'	166	41 c	42.1 a	0.97 a	2.6 a	1.6 a	2.3 b	2.6 b	1.8 b	20.6 b	2.2 a	2.3 c	5.3 c
		(15%)	(36%)	(52%)	**[6]** a	[4] c	**[6]** b	**[6]** c	[4] a	[50] c	[5] a	[6] b	[13] c
'Natural'	111	39 a	42.9 a	0.91 a	2.3 a	1.7 a	1.2 c	2.1 c	0.7 a	19.6 b	2.8 b	1.3 a	7.4 d
		(20%)	(38%)	(52%)	[6] a	[5] a	[3] c	[5] b	[2] a	[50] c	[7] b	[3] c	**[19]** d
Total	557	38	38.9	0.98	2.2	1.6	1.8	1.9	1.2	20.5	2.1	1.7	4.8
		(21%)	(48%)	(131%)	[6]	[4]	[5]	[5]	[3]	[55]	[6]	[5]	[12]

Caption: Different letters indicate values which are significantly different between clusters. Red letters are for absolute values, green for percentages. Figures in parentheses (X) are coefficients of variation, figures in brackets [X] are the percentages of the total TFI.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.2.Health and environmental toxicity

3.2.1 A diversity of links between TFI and toxicity indicators

CTUh and CTUe per plot are poorly correlated in the dataset (coefficient of correlation: 0.25). Since molecules toxic for health are not systematically environmentally toxic and vice-versa, the two indicators must be studied separately. The correlation coefficients between TFI_h and CTUh and between TFI_e and CTUe are respectively 0.85 and 0.50, illustrating the direct effect of increasing sprayings on toxicity (Figures 5 and 6). However, this effect depends on the kind of pesticide used as indicated by the difference between health and environment coefficients. Indeed, the most used Scab-contacts pesticide (Delan, active compound Dithianon), which represents 28% of the total sprayings, is also the most health toxic one (Figures 7 and 8), which is a main concern for farm workers who spray it at high frequency.

After removing this pesticide from the dataset, the correlation coefficient between TFI_h and CTUh (0.75) remains higher than the environmental one. New indicators were then calculated to understand this difference. For each plot, CTUh and CTUe were divided respectively by their TFI_e and TFI_h to calculate the average toxicity (Av_CTUh(e)) of the pesticides sprayed. The coefficients of correlation between CTUh(e) and Av_hCTUh(e) are respectively 0.55 and 0.84. This difference suggests that the environmental toxicity per plot is not only due to the number of sprayings but also to the toxicity of the sprayed products, while health toxicity depends more on the frequency and quantity of pesticides sprayed.

However, some active compounds used in the pesticides are not characterized because the experiments required to evaluate them are expensive. There is also a lack of knowledge on the 'cocktail effect': the impact of the combination of different active compounds, how they can merge and affect the environment and health (Rizzati *et al.*, 2016).

3.2.2 Toxicities per pesticide family and cluster

This diversity of pesticide toxicity between health and environment leads to differences of h(e) toxicity ranking at cluster (Table 2). Scab-contacts reaches the highest score for both CTUe and CTUh.

The 'Anti-scab' cluster has both the lowest CTUe and CTUh thanks to its low TFI. The 'Natural' cluster has the same scores but 'Anti-scab' shows a higher toxicity to produce one ton of apples due to its lower yield. 'Natural' uses less toxic pesticides in all the families, especially

for Scab-contacts, while its natural products are excluded from the toxicity calculations. The 'Balanced' and 'Anti-insect' clusters have similar results with the highest h(e) toxicity due to use of highly health and environmental toxic Scab-contacts fungicides. However, they reach lower CTUe/t than 'Anti-scab'.

The health toxicity variability between and within the four clusters is fairly low, since its scores are mainly driven by the Scab-contacts family, which is both the most sprayed and h-toxic family. The environmental toxicity variability is higher between and within the four clusters because of the larger diversity of toxicity between the numerous evaluated active compounds, including the Scab-contacts family (Figure 2 and 3).

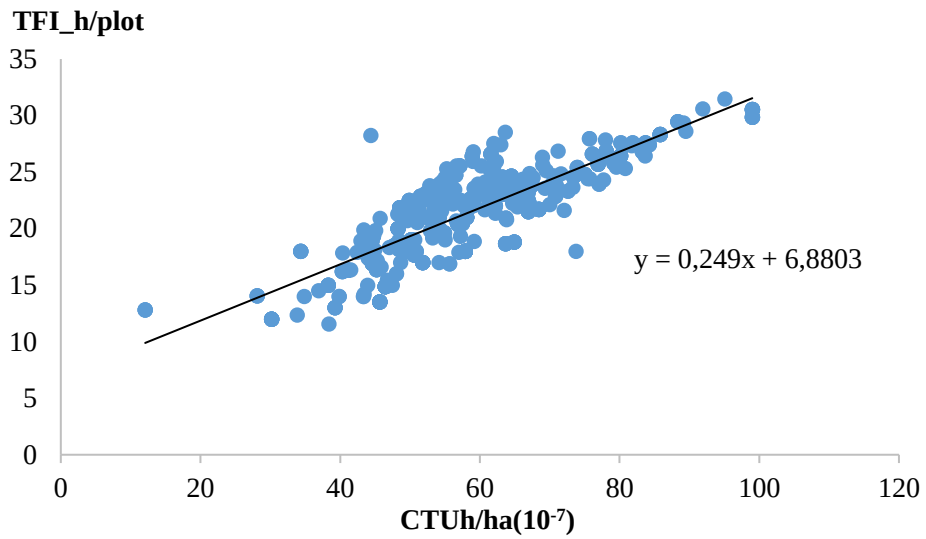


Figure 5. Reduced TFI according to the average health toxicity per hectare of each plot

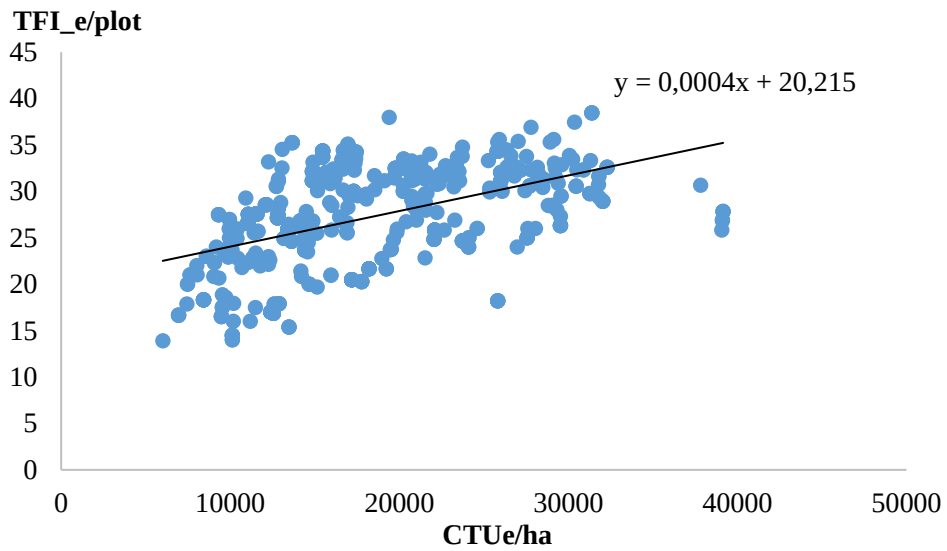


Figure 6. Reduced TFI according to the average environmental toxicity per hectare of each plot

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

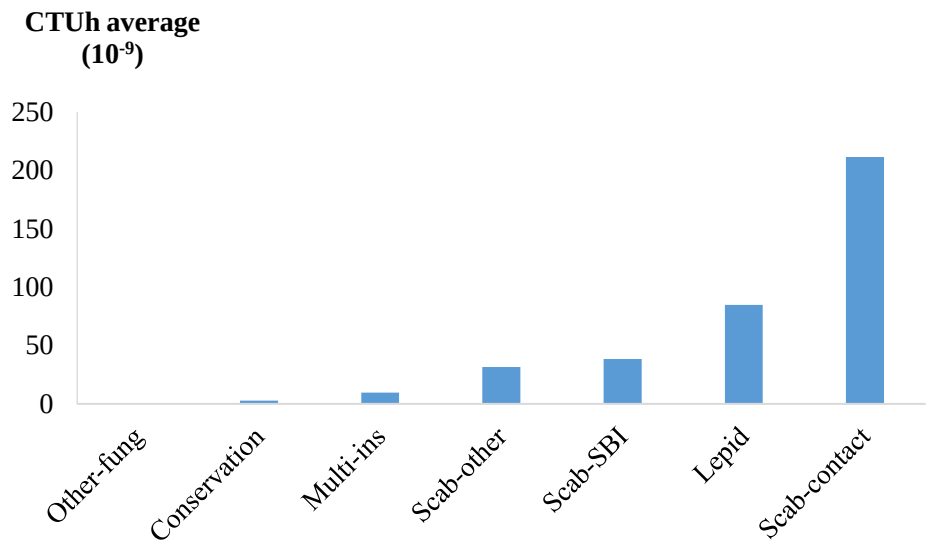


Figure 7. Average health toxicity per pesticide family (no data for Aphids)

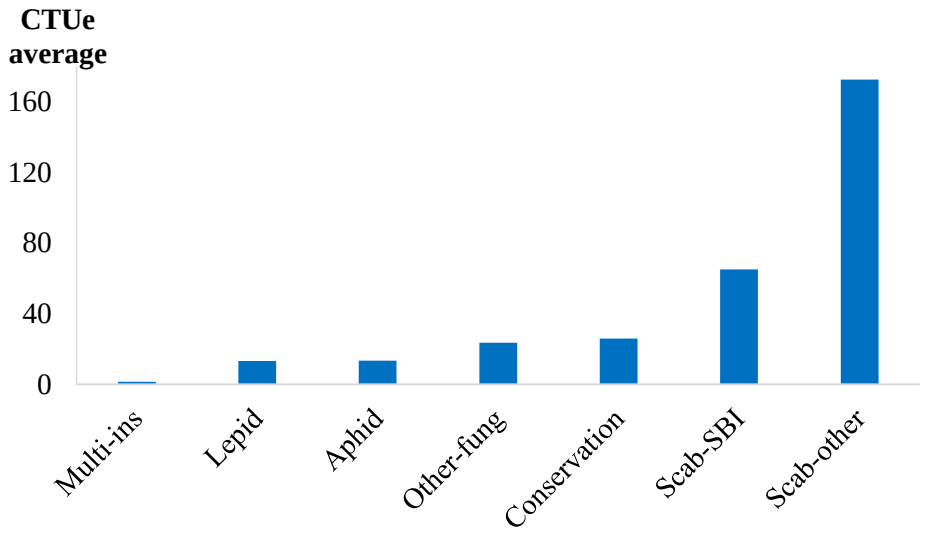


Figure 8. Average environmental toxicity per pesticide family (Scab-contacts excluded, reaching 3,155 CTUe/ha)

Table 2. Average environmental (CTUe) and health (CTUh) toxicity per cluster (Total and Scab-Contacts)[1]

Cluster	Total average				Scab-contacts average	
	CTUh (10^{-6})	CTUh/t (10^{-6})	CTUe (10^{3})	CTUe/t (10^{3})	CTUh (10^{-6})	CTUe (10^{3})
'Balanced'	6.3 a (26%)	0.16 a (133%)	19.0 a (36%)	0.48 a (131%)	6.1	18.6
'Anti-scab'	5.2 b (26%)	0.20 a (178%)	15.7 b (35%)	0.59 a (176%)	5.5	16.3
'Anti-insect'	5.9 c (18%)	0.14 a (58%)	20.6 a (34%)	0.49 a (58%)	5.8	20.3
'Natural'	5.4 b (21%)	0.13 a (54%)	16.4 b (45%)	0.38 b (62%)	5.5	16.1

Caption: Different letters mean values significantly different between the clusters, figures in brackets are Coefficient of variation

3.3.Potential consequences for actions on crop protection

The two cooperative technicians and the grower who attended the presentation of the study results provided feedback that made it possible to identify some potential actions that could improve crop protection at the plot level based on a broader use of the spray datasets. Firstly, the data could be more systematically and regularly processed, up to a daily basis, in order to better identify and monitor, on one hand, the pests and diseases linked to the more frequent and/or toxic pesticide families, and, on the other hand, the use and the efficiency of natural sprays which represent an alternative to synthetic compounds. Up to now, growers' declarations have provided the basis of such monitoring, but in the future, digitalized tools such as pest captors could complement or replace growers' records (Mohanraj *et al*, 2016).

This monitoring will support the selection of adapted alternatives to the most used and impacting pesticide families. However, it could be quite time consuming for technicians who already have their hands full with their daily tasks. Digitalizing data collection and capture by using specific smartphone applications that growers could use directly from their plots should facilitate the process. Such applications are already available on the market. Similarly, data analysis could be automatized at least for the main outputs requested by technicians. In this

respect, a detailed analysis of both growers' and technicians' demands would be useful to frame the set of requests to be programmed. Such a recording and processing chain will allow the provision of technical support at various levels from single plots to groups of plots and farms following similar trends.

However, tailoring advice to plot and farm specificities should require technicians to connect operational decisions such as the choice of a product with more strategic concerns regarding a grower's decision-making processes to adapt crop protection advice to the grower's specific objectives, strategy and resources (Pissonnier *et al*., 2016). This evolution may require specific training since changing advisory practices and methods can be challenging and depends on how the advisory system is organized in terms of funding, governance, quality of human resources and advisory methods (Faure *et al.*, 2011).

However, improving the quality of advice will not be enough to encourage growers to shift towards alternative solutions to pesticide use due to some of the constraints which they have to face. In the case of apple production, this 'path dependence' combines: (i) the absence of sufficiently efficient natural products for some diseases like scab, (ii) the technical and economic difficulties involved in moving towards more agro-ecological protection strategies (Pissonnier et al., 2016), (iii) customers' and supermarkets' requirements for perfect looking fruits with no symptoms of pests and diseases and able to be stored in cold rooms, and (iv) growers' perceptions of pesticide toxicity. Increasing growers' knowledge about pesticide toxicity may be one solution (Khan *et al.*, 2015). The development of decision-support tools to evaluate the potential toxicities of pesticides and protection practices are needed (Mghirbi *et al.*, 2015), based for instance on the use of smartphones. This will require that the toxicity scores of authorized pesticides are all known.

4. Conclusion

The analysis of the spraying practices of growers in an apple cooperative over one year showed that: (i) there is a diversity of practices of pesticide use within a common context that can be organized into a limited number of clusters; (ii) the TFI is not linked to the type of pesticides used, and reducing the TFI partly reduces health and to a lesser extent environmental toxicity per plot; (iii) toxicity is strongly linked to Scab-contacts pesticides; (iv) calculating each indicator per ton of apples produced provides an estimation of spray efficiency which may modify plot and cluster ranking. These results showed that there is a need to better understand

the decision processes leading to the observed practices to provide more tailored support to growers.

Specific characteristics of pesticide use could be identified for each cluster, but with the exception of the smallest ('Anti-scab'), each cluster remains highly variable in terms of total TFI, yields, and health and environmental toxicities, while similar values could be found in different clusters. Indeed, each plot shows a given combination of families of pesticides used, TFI, yield, and toxicity. This result suggests that all four of these dimensions need to be taken into account to fully describe the practices and their consequences and to adapt the advice given per plot. In this respect, more information on alternative practices already implemented in a plot but not recorded may be needed, e.g., pest-exclusion nets, prophylaxis, or mating disruption against codling moths. This would allow technicians, researchers and public authorities to have a more complete view of the protection practices implemented on each plot and farm. Finally, this study also demonstrates the feasibility of the implementation of LCA toxicity indicators for a broad analysis of hundreds of agricultural plots. The development of tools for farmers facilitating the use of such indicators could greatly enhance the environmental relevance of the assessment compared to TFI.

Acknowledgements

The authors would like to thank the apple cooperative which agreed to provide their 2014 dataset of spray records. They thank Grace Delobel for correcting their written English. This work was funded by the French Agence Nationale de la Recherche under the ALID/Sustain'apple project ANR-13-ALID-004.

De l'échelle parcelle à l'échelle exploitation agricole

Le second chapitre a mis en évidence une diversité de pratiques, classée en quatre groupes ayant des profils d'utilisation de pesticides différents. Les indicateurs utilisés pour décrire les impacts potentiels de ces groupes ont montré qu'ils possèdent chacun une intra-variabilité forte concernant la fréquence, l'efficience et la toxicité. Les techniciens des coopératives ont ainsi pu proposer d'adapter leur mode de conseil grâce à ces nouvelles connaissances. Mais dans cette étude aucune information sur les exploitations agricoles n'était disponible.

Il est nécessaire de prendre en compte l'exploitation agricole, sa structure, son fonctionnement et son contexte socio-économique pour comprendre les déterminants de cette diversité des pratiques et les logiques qui les sous-tendent. Le troisième chapitre présente l'analyse conduite sur la façon dont les producteurs conçoivent et mettent en œuvre leurs stratégies de protection à l'échelle de leur exploitation agricole.

Chapter III. Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level

Ce chapitre a été publié dans la revue Crop Protection. DOI 10.1016/j.cropro.2016.06.007, (Annexe 4)

Solène Pissonnier [1,2,*], Claire Lavigne [2], Jean-François Toubon [2], Pierre-Yves Le Gal [1]

[1] CIRAD-ES - TA C-85/15, 73 rue Jean-François Breton, 34398 Montpellier cedex 5 - France

[2] INRA, UR 1115 PSH, Plantes et Systèmes de culture Horticoles, F-84000 Avignon, France

[*]Corresponding author

Email addresses: solene.pissonnier@cirad.fr, claire.lavigne@avignon.inra.fr, jean-francois.toubon@avignon.inra.fr, pierre-yves.le_gal@cirad.fr

Abstract

While protecting their crops, apple growers must also satisfy the requirements of their buyers regarding pesticide residues and fruit characteristics. Based on an analysis of farm pesticide application schedules and semi-structured interviews of 35 apple growers in two areas of France, this study described how growers designed and implemented their apple protection strategies, and identified the factors which helped and/or prevented them from using less pesticide. Different combinations of economic and environmental concerns led to three main protection strategies. Growers implementing the bio-ecological strategy (S1) had high environmental concerns, used no synthetic pesticides, and compensated their lower yields with high selling prices. Growers implementing the combined strategy (S2) had moderate environmental concerns. They planted scab-resistant varieties and sprayed natural products, while diversifying their outlets and cultivars to compensate for low selling prices. The low risk strategy (S3) was implemented by growers from cooperatives with low environmental concerns who aimed for high yields and visual quality by using mainly synthetic pesticides. S2 and S3 growers were constrained by low selling prices and by the increased workload and economic risks represented by alternative methods. Extending the range of alternatives to pesticides and implementing innovative advice methodologies could be levers to reduce pesticide use.

Key-words: Pesticide, Fruit, Farm, Typology, France

1. Introduction

Pests and diseases affect fruit crop yields and quality, and consequently the economic results of growers (Cooper and Dobson, 2007). The application of synthetic pesticides is one means to control these threats. However, the impact of pesticide residues on the environment and on the health of living organisms are major concerns (Simon *et al.*, 2011; Ghimire and Woodward, 2013). Apples are among the crops most treated with pesticides (Drogué and DeMaria, 2012). They are susceptible to many harmful pests and diseases including aphids, codling moths and apple scab, which can both reduce yield and damage the cosmetic quality of fruit. Retailers, supermarkets and consumers are increasingly demanding regarding the appearance of apples and, backed up by public regulations, the absence of pesticide residues, both on national and export markets (Aubertot *et al*, 2005). These two criteria are included in contract specifications which apple growers and their first buyers must fulfill.

Most studies on apple protection have been conducted at the plot level. While some studies focused on the effects of a given technique on yield, fruit quality, and/or insect populations (Wyss and Daniel, 2004; Bogo *et al.*, 2012), others sought to compare the performance of various protection management options with regard to these variables (Singh *et al*., 2009; Simon *et al.*, 2011). Some studies were carried out at the orchard level, defined as the set of apple plots on a farm. They analyzed, for instance, the factors facilitating or impeding a transition to more sustainable practices (Goldberger *et al*., 2013), or evaluated protection practices based on multicriteria environmental methods (Mouron *et al*., 2012). By only focusing on apple orchards, these studies provided a partial view of the processes that led a grower to select and implement a protection strategy. To obtain a more comprehensive understanding of these processes, the investigation must be extended to the farm level. This is where growers allocate their resources (land, labor force, equipment and capital) to various tasks and activities according to their natural and economic environment to reach their specific objectives (Aubry *et al.*, 1998; Le Gal *et al.*, 2010). This farm level understanding is needed to provide tailored support to growers to reduce their pesticide use and respect increasingly strict environmental restrictions. Such analyses have been carried out on vegetable crops (Navarrete and Bail, 2007; Probst *et al.*, 2012; Huat *et al.*, 2014) regarding crop management and changes in pesticide use. However, few studies have investigated fruit growers' protection strategies.

This study aimed to establish how apple growers designed and implemented their crop protection strategies at the farm level by (i) analyzing the set of common factors driving decisions, (ii) explaining the diversity of pesticide use in the same context through the analysis

of growers' practices, (iii) characterizing three protection strategies and the factors that framed growers' production decision-making process. It was based on quantitative and qualitative surveys of 35 French apple farms in two areas which sold their production either to Apple Grower Cooperatives (AGCs) or directly by themselves.

2. Materials and method

2.1. Study context

The study was carried out in two areas, one in south-east France (SEF) around Montpellier and one in center-west France (CWF) around Limoges. These two areas had similar apple areas, production volumes, and numbers of farms, but they differed in terms of climate and the main varieties cultivated (Table 1). Golden Delicious was the main cultivar in CWF. A diversity of cultivars was found in SEF, but Cripps Pink and Rosy Glow were popular among growers. They were marketed as Pink Lady® apples, a trademark managed by a growers association which limits the areas planted to maintain a balance between supply and demand. This denomination will be used in the paper when referring to the two corresponding cultivars. Granny Smith apples were also popular in SEF as their physiology is adapted to the hot and dry climate (early flowering) and young trees reach a high productivity sooner than in other regions.

Apple Grower Cooperatives (AGC) were the main marketing channels in the two study areas (Table 1). Owned by growers who shared their social capital, they aimed to gather and facilitate the sale of their agricultural products and the supply of their agricultural inputs. They could also provide technical advice. Their marketing department interacted with buyers, mainly national and international supermarket chains. The buyers each had their own specifications for the fruit. The AGCs' technical departments incorporated all of these various specifications into a set of recommendations provided to their growers. Usually plots were selected by the AGCs only for very specific requirements like Organic or Baby Food certifications. Both the buyers and the AGCs verified that growers were following these recommendations and were respecting public regulations. The AGCs had to be able to trace fruits from a plot to the buyer and to conduct residue analysis for each grower. Some growers sold their fruits themselves through various channels such as street markets, specialized stores, wholesale markets, or directly on the farm. They could access technical advice through extension services provided by private technicians, public services or grower associations. All of the advisors operating in a given area met once a year to write a crop protection guide which was made available to every grower.

Rapport-Gratuit.com

SEF orchards were more susceptible to insects due to a warm and dry Mediterranean climate in which rainfall is concentrated during the autumn. CWF orchards were more susceptible to fungal diseases like scab because the climate was wetter throughout the year. Synthetic pesticides and alternative practices were used in both areas to control pests and diseases (Table 2). Since 1989, mating disruption has been the most widespread alternative practice as the hormone dispensers are easy to handle and the technique is efficient (Kutinkova *et al.*, 2009). French legislation required growers to manually or digitally record every pesticide application (date, dose and plot) in an annual application schedule (AS), which could be controlled for fraud.

Table 1. Climatic and production context of the two areas studied.

	SEF	CWF
Mean annual rainfall[1] (mm/year)	880	1,030
Mean annual temperature[1] (°C)	16.4	12.4
Production[3](t)	79,500	76,300
% of national production[3]	4.6	4.4
Number of apple farms[2]	236	284
Apple surface area[3] (ha)	1,621	1,975
% of production sold in an AGC[2]	83	86

[1](www.meteociel.fr); [2](Agreste, 2014c); [3](FranceAgriMer, 2014)

Table 2. Range of alternative practices available to apple growers against pests and diseases.

	Natural pesticides	Biological	Physical
Pest	Clay, essential oils, talc, bacteria and viruses	Insect trap plant, release of pest enemies, mating disruption, hedgerows	Traps, insect-proof net, elimination of damaged fruits
Diseases	Copper, sulphur, minerals, herbal teas, essential oils, talc	Yeast, fungus	Elimination of damaged fruits, litter grinding

(Adapted from (Laget *et al.*, 2014))

2.2.Analyzing protection practices at the AGC level

One AGC near Montpellier (AGC-M) in SEF and one near Limoges (AGC-L) in CWF were selected to collaborate with the research team. AGC-L regrouped 118 farms and sold 78% of the total apple volume produced in the CWF area, mainly Golden Delicious (Table 3). AGC-M regrouped 28 farms and sold 29% of the total volume of the SEF area. It worked with a larger range of cultivars, with Pink Lady® and Granny Smith cultivars representing 87% of the total AGC-M volume and 66% of the plots (Table 3). They both provided the 2013 application schedules (AS) of all of their growers (see Annexe 1 and Annexe 2 for examples).

Both sets of AS were analyzed to evaluate the diversity of protection practices implemented within the same climatic, varietal and selling context. To do so, the Treatment Frequency Index (TFI) was used (Eq1). This indicator was created in the 1980s in Denmark to assess the intensity of pesticide use and the reliance of apple growers on pesticides. It can be easily calculated from AS and takes into account not only the number of treatments but also the quantity applied. It also renders it possible to both aggregate and separate different types of products (Brunet *et al*., 2008). This indicator has already been used in several studies to compare different orchard production systems (Marliac *et al*., 2015; Simon *et al*, 2011; Laget *et al*., 2014).

Only sprays to control pests and diseases were considered since the use of herbicides and thinning products was driven by specific decision rules and represented a minor part of the pesticide applications (13% in CWF and 9% in SEF) (Agreste, 2014a). Plots under three years old were excluded since they were sprayed differently due to their smaller fruit production and higher susceptibility to insects and diseases. The analysis was conducted for three cultivars separately to explore the relationship between protection practices and cultivars. It included the two main cultivars in AGC-M, i.e., Granny Smith and Pink Lady®, and the main cultivar in AGC-L, i.e., Golden Delicious (Table 3).

$$\mathrm{TFI[protection]}_j = \sum_{i=1}^{n}(AD_i \div RD_i) \qquad \text{(Eq1)}$$

With:

i = individual pesticide application,

AD_i = applied dose/ha,

RD_i = authorized dose/ha.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Table 3. Number of plots per cultivars grown in each AGC

	AGC-M	AGC-L
Pink Lady®	100	-
Granny Smith	72	5
Golden Delicious	21	711
Gala	27	1
Chantecler	3	10
Braeburn	1	6
Reine des reinettes	16	-
Sainte Germaine	-	3
Others	21	32
Total	**261**	**736**

2.3.Analyzing protection strategies at the farm level

Ten growers from AGC-M and 13 growers from AGC-L were then surveyed to understand the decision-making processes that led to a given protection strategy (see Annexe 3 for the interview guide). These growers were selected to cover the diversity of the AS sets in each AGC. Six independent growers who sold their products themselves, referred to as 'self-sellers', were added to the sample in each area. The objective was to increase the potential diversity of crop protection strategies in relation with selling strategies. A total of 35 farms thus were surveyed from November 2014 to June 2015.

Based on similar studies (Navarrete and Le Bail, 2007), the semi-structured survey was designed to collect information on (i) the characteristics of each farm in terms of land use and labor, (ii) the farm's natural and socio-economic environment, (iii) the grower's protection practices and marketing strategies, and (iv) the factors driving the grower's decision-making processes (Table 4). The AGC growers' AS were collected and analyzed before the interviews to focus the discussion on the qualitative information required to understand the growers' decision-making processes and to define the factors influencing them.

Protection practices of the growers surveyed were analyzed at the orchard scale (Table 5). Since a farm orchard corresponds to its total apple area, orchard TFI ($TFI[Protection]_{orchard}$) was estimated by the weighted mean of every plot TFI ($TFI[Protection]_{plot}$ as calculated with Eq. 1) according to the corresponding plot area (Eq.2). Orchard TFI was also calculated per type of

product (Table 5) to better describe protection practices according to the kind of product used (synthetic or natural). All of the cultivars of the 35 growers were considered in the analysis.

The effects of a given protection strategy on farm economic performance were evaluated by calculating average apple yield per farm, production costs per kg, gross margin of the apple production and number of hours worked to produce one ton of apples. Yields were estimated based on AGC tonnage records for AGC growers and grower's estimation for independent growers. Apple-linked expenses included inputs (fertilization, irrigation, protection, others), depreciation of machinery and buildings (except selling facilities), labor (nets, thinning, pruning, protection, harvest, observation, soil working, other) and marketing (time, packaging, storage). Standard values produced by extension services and the AGCs were used when data regarding the time and money spent on orchards lacked on some farms. These values were specific to each area and each production mode (organic or not). Plantation costs were not included. An inductive approach (Guillaume *et al*., 2016) enabled a comparison of individual protection strategies and the regrouping of similar ones, in terms of objectives and practices, into a typology of strategies by taking into account diversity while simplifying it (Moreno-Pérez *et al.*, 2011).

Table 4. Items included in the survey questionnaire and their corresponding knowledge objectives.

Item	Knowledge objective
Grower's agricultural and apple production objectives	To assess the place of apple production within the farm
Farm history, structure and management	To define characteristics, factors and events influencing orchard protection management
Marketing strategy	To evaluate how buyers influenced orchard protection management
Protection practices	To identify factors influencing both daily and tactical decision-making processes
Farm performance regarding apple production	To evaluate the effects of orchard protection on farm performance (yield, returns)
Future of the farm and the orchard	To evaluate the possible evolution of protection practices

Table 5. Variables characterizing the practices per strategy at the orchard scale of the growers surveyed.

Variable	Grower's position
Percentage of surface covered with scab resistant/tolerant cultivars	Efforts made to decrease the number of sprayings by using agronomic levers
TFI[Protection]$_{orchard}$*	Efforts to decrease pesticide use by voluntarily committing to stricter specifications (organic agriculture, biodynamic farming or baby food), or by implementing their own restriction rules
Coefficient of variation of the TFI[protection]$_{plot}$ within the same farm	Spraying adapted to the circumstances of each plot
Number of alternative methods	Efforts made to substitute pesticides with the following practices: mating disruption, nesting box, management of auxiliaries through grass cover, hedgerow
Percentage of TFI[NODU]$_{2013}$ and TFI[copper and sulphur] in TFI[protection]$_{orchard}$	Efforts to substitute synthetic pesticides with natural ones. "NODU vert 2013" is a list of natural products published by the French government and updated every year.
Percentage of TFI[captan, mancozeb, dithianon] in the TFI[protection] $_{orchard}$	Reliance on synthetic molecules to control scab with the most common fungicides

*Weighted average of plot TFI according to the area of each plot within the farm

3. Results

3.1.A set of common factors driving decisions

The interviews showed that growers' protection decisions were shaped by government regulations, the specifications of private operators, climate conditions and biological events. Public regulations included items such as the list of authorized products, pre-harvest intervals and the maximum number of applications of a given product. Growers farming organically on all or part of their apple area were subject to specific public regulations, particularly in terms of authorized products. Private specifications applied to every grower selling the same product to the same buyer (supermarkets, exporters), either directly or through the AGC. These

specifications could include requirements which were not directly linked to protection practices, such as GLOBALGAP (www.globalgap.org/), and protection-focused requirements that were stricter than public regulations, such as (i) banning some legally authorized products, (ii) reducing applications of a given product during a season, or (iii) forbidding any pesticide use 30 days before harvest. All of the growers interviewed had signed contracts which included private specifications, with GLOBALGAP being the most common one.

At the plot level, growers facing identical local conditions followed similar spraying rules. Decisions to spray on a given day were usually carried out based on climate conditions and biological events. For instance, protection products which were leached by rainfall exceeding 20 mm were re-applied to renew protection. Growers, the AGCs and the extension services used models for scab spore hatching to decide when to apply fungicides. The vegetative stage of a plot at the beginning of the season (mid or late March) triggered preventive applications against fungal diseases to protect the first young leaves exposed to humidity and cold. Growers also had to alternate active compounds to avoid the development of pathogen resistance. In the case of scab, they set an application plan alternating the three main compounds (dithianon, mancozeb, captan) for each plot over the season, while organic farmers used only copper-based products, eventually mixed with sulphur. Plots which had been contaminated were noted to be monitored the following season.

3.2.Yet a diversity of pesticide use in the same context

Despite this common framework, both AGC sets of AS showed a large diversity of pesticide use (Table 6). The $TFI[protection]_{plot}$ average was quite high in both cases, with a higher value in AGC-L because of the wetter climate and the predominance of a scab-susceptible cultivar. Fungicides against scab represented 47% of the applications sprayed in AGC-L compared to 20% in AGC-M. In both cases, however, the dispersion of $TFI[protection]_{plot}$ around the average was quite large, with coefficients of variation ranging between 21% and 27%. This variability was not linked to the cultivar in AGC-M, where the most represented cultivars (Pink Lady® and Granny Smith) showed similar average values as they were susceptible to the same pests and diseases and were harvested at the same time. However, Pink Lady® showed a higher maximum than Granny Smith (respectively 59 and 46) because of its higher susceptibility.

The variability observed in relation to the same cultivar within a single area was due to how each grower designed and implemented his or her protection strategy. For instance, while a minority of growers sprayed all of their plots uniformly in order to simplify the task, a majority

selected pesticide applications according to the pest/disease pressure on each plot (Table 6). A typology of protection strategies was designed to obtain a more comprehensive but synthetic view of the diversity encountered in the sample of growers interviewed.

Table 6. Variation of TFI[protection]$_{plot}$ per main cultivar in the two AGC (source: set of AS per AGC).

		AGC-M		AGC-L
	All plots	Pink Lady	Granny Smith	Golden Delicious
Number of farms	28	26	21	118
Number of plots	254	100	72	711
TFI[protection]$_{plot}$ mean	30.1	32.5	32.3	37.8
TFI[protection]$_{plot}$ max	59.2	59.2	46.6	62.0
TFI[protection]$_{plot}$ min	12.5	15.6	18.0	17.6
Standard deviation	8.2	8.7	8.0	8.4
Coefficient of variation (%)	27	27	25	21
Proportion of growers spraying their whole orchard uniformly (%)*	10	15	24	14

*with more than one plot.

3.3.Three main types of protection strategies

The growers interviewed designed their protection strategies by combining two kinds of concerns that were both used to build the typology: their expectations in terms of income from apple production, and their expected environmental impacts (Figure 1). Three combinations of these concerns were found in the sample, corresponding to three main types of strategies: S1, S2 and S3. Growers implementing the same type of strategy shared similar expectations regarding their income and their environmental impacts. As the S3 strategy gathered 19 growers, it was divided into four sub-strategies according to specific farm characteristics and growers' concerns (Table 7). The consistency of each type is analyzed below regarding the growers' specific objectives, protection-related practices (Table 8), farm characteristics and performance (Table 9).

3.3.1. S1: Bio-ecological strategy

The 'bio-ecological' strategy (S1) gathered 6 growers, all independent, who had a very specific and consistent production system. Deeply concerned about their environmental impact, they aimed to reach a balance between pest control and environmental conservation. They did so by: (i) using only natural pesticides such as copper, sulphur, herbal teas, and biological agents like viruses or bacteria, (ii) implementing alternative methods, planting scab-resistant cultivars, developing orchard biodiversity (through hedgerows and cover crops). They managed to drastically reduce their $TFI[protection]_{orchard}$ to an average of 11, the lowest of the sample.

However, these sets of practices could have a negative impact on both fruit yields (only 17.5 t/ha in average) and appearance. To compensate for their low yields, they developed marketing strategies allowing them to sell their entire production at very good prices by combining (i) fruit processing of damaged apples, (ii) direct sales to consumers or retailers, including the sale of small graded apples, and (iii) subscribing to organic certification or biodynamic labels to gain consumer trust. Moreover, they planted several apple cultivars (9 per farm on average) and developed other productions (fruits, vegetables, animal breeding) to meet consumers' demand and extend their harvest periods.

Apple surfaces were limited to 5.6 ha on average, in order to keep land for other productions and to cope with the high workload (46 h/ton of apple) linked jointly to protection practices, direct sales and information collection. This workload was shouldered entirely by the family to reduce expenses. This combination of low yield, high selling price and high workload led to the highest average gross margin per kg in the sample (0.85€/kg of apple), but to low gross margin per hour worked (18€/h). However, these results were over-estimated compared to the AGC growers since the depreciation cost of sales and storage buildings, which may have been up to €100,000 per farm, were excluded from expenses, while this cost was borne by AGC growers through the fees they paid their cooperatives. However, S1 growers did not appear to be very susceptible to yield variation, since their initial yield would have to decrease by 43% before they met with a negative margin.

3.3.2. S2: Combined strategy

The 'combined' strategy (S2) gathered 10 growers, some belonging to a cooperative, others independent. They showed a moderate environmental concern by searching for a balance between pests and auxiliaries, limiting the use of synthetic pesticides and implementing alternative methods, while securing a minimum income by diversifying their sale outlets. This diversification could take several forms: growing niche scab-resistant cultivars, developing an

organic production activity separated from their conventional activities, or dividing their farm into two legal entities and dedicating one to direct sales. They partly replaced synthetic pesticides with natural ones, such as copper and sulphur. They applied as many alternative methods as possible (at least 3) to the whole orchard but kept a large proportion of non-tolerant cultivars. They adjusted their pesticide applications to the specific situation of each plot, leading to the highest coefficient of variation of $TFI[protection]_{plot}$ in the sample (14%).

With 18 ha under apple cultivation on average, most of these farms preferred to belong to an AGC or sell to big retailers due to their high production volumes. All S2 growers had to follow the specifications imposed by their buyers and accept a rather low selling price (0.35€/kg). However, by diversifying their cultivars, selling the apples either through their AGC or by themselves, they could increase this price to 0.50€/kg, which improved their margin per kg. They could then take more risks regarding protection practices, although their margins were more sensitive than S1 to a yield decrease. Belonging to an AGC was also a way to reduce their workload in terms of marketing, while the employment of one to three permanent workers allowed some of them to adopt labor-demanding practices such as hail or insect-proof nets.

3.3.3. *S3: Risk limitation strategy*

The 'risk limitation' strategy (S3) grouped 19 growers, of which only three were independent. These growers mainly aimed to secure a high income by maximizing their yield for a given level of expense. Their actions to reduce their environmental impact were limited to respecting the legal and private specifications required by their buyers, and could include alternative methods to pesticides such as codling moth mating disruption. Four sub-strategies were created since the practices and characteristics of the farms in this category were highly diverse. S3A, S3B and S3C growers chose to rely mainly on synthetic pesticides and a limited use of natural products with a $TFI[NODU]_{orchard}$ and $TFI[sulphur\ and\ copper]_{orchard}$ always below 7% and 3% of $TFI[protection]_{orchard}$. They systematically sprayed their entire orchard and their proportion of scab-resistant cultivars was generally low, except for S3B, which was more diversified due to the existence of direct sale farms in this group.

Most of the AGC-L growers interviewed implemented a S3A strategy. They suffered from the recurrent weather events in their region (CWF) which led to low yields and higher investments (hail nets), and low selling prices linked to the Golden Delicious variety (0.30€/kg on average). Consequently, their margin was close to zero and depended highly on the yield and cosmetic quality of their fruits. They relied on synthetic fungicides which represented more than 50% of their sprays. Their workload was not particularly high although they cultivated 12 ha of apple

orchard on average. Most of the work was carried out by family members, which affected their capacity to move towards alternative techniques requiring more observation, handling and monitoring. Changing their practices in the short term would have been too risky for the economic sustainability of their farms.

The six S3B growers planted apple orchards on a small part of their cultivated area (21%) to earn extra income. They were involved in other activities which they aimed to develop such as direct sales, animal breeding and plant breeding/nursery. None were willing to spend more time and money or take risks to develop alternative practices on their orchard. Their objective was to maximize the income they could earn from their orchard without investing too much in it. Their selling prices, margin and hours spent in the orchard were variable as the growers were either self-sellers or belong to an AGC. The self-sellers reached margins of around 1.40€/kg thanks to high selling prices. They grew 8 cultivars on average, mixing common ones such as Golden Delicious and Granny Smith with rustic ones such as Sainte Germaine and Reine des Reinettes. AGC growers' margins remained very poor (around 0.03€/kg on average) and they all grew only one cultivar (Pink Lady® or Golden Delicious). Despite the better selling price of Pink Lady®, its grower had a low margin due to a scab infection, showing the sensitivity of this cultivar to scab attacks.

S3C growers cultivated large apple orchards (30 ha on average) based on a production model combining high yields, low gross margins per kg and a large workforce (4 permanent workers on average and up to 50 seasonal workers during the harvest). Two of these growers were in the Limousin region and only grew Golden Delicious apples. The other grower had six classic cultivars (Pink Lady®, Gala, Granny Smith, Golden Delicious, Reine des reinettes, Braeburn). They aimed to reduce their production costs and to make all tasks (pruning, thinning, spraying, harvesting) cost-effective and easy to manage. Applying a systematic plan of pesticide use on the whole orchard constituted a central piece of this strategy, which led to the lowest time spent to produce one ton of fruit in the sample (12h/t). Growers needed to sell their large apple volumes to an AGC, where they often occupied a high position (president, AGC founder). Their sound knowledge and technical skills, based on their close relationships with AGC advisors and on their own growers network, led to high yields and a good selling price for AGC growers (0.38€/kg). They were not reluctant to implement alternative practices that they combined (more than replaced) with the use of synthetic pesticides. Their margin per kg was low (0.14€/kg on average) due to their high equipment and labor costs but higher than other AGC growers thanks to their good results.

S3D strategy gathered three growers from SEF with 2 ha of apple orchard on average. Their entire farms were designed to avoid specific equipment or workers. To valorize this small area, the growers planted the high-value cultivar Pink Lady®, sold through AGC-M at 0.60€/kg. Consequently, their gross margin was the highest of the AGC farmers, both per kg and per hour, since their workload was similar to S2 and other S3 strategies. Moreover these margins showed the lowest susceptibility to yield variation. This profitable context, based on a variety harvested late and highly sensitive to scab and powdery mildew, did not encourage growers to decrease their pesticide use, although the low scab pressure allowed them to use copper and sulphur without taking too many risks. However, they did not implement many alternative practices as small areas are not adapted to having mating disruption or hedgerows.

Based on these observations, the selection and implementation of an orchard protection strategy by growers resulted from diversified and complex combinations of common external factors (public regulations and buyers' private specifications), climatic factors linked to pest and disease pressure, farm circumstances (especially orientation of activities, surface areas and labor resources) and a grower's personal concerns about his or her environmental impacts and economic objectives (Figure 1). However, the efficiency of a given strategy applied to a specific farm estimated with the $TFI[Protection]_{orchard}$ /ton of apple produced, could be very variable (Figure 2). Comparing the mean $TFI[Protection]_{orchard}$ /t per strategy showed that protection efficiency was not related to the practices implemented (Table 9). The most efficient strategies were indeed those representing the two extremes of pesticide use, S1 and S3C. S1 was efficient because the use of pesticide was low although yield was low; S3C was efficient because yield was high although the use of pesticide was high.

Table 7. Distribution of growers by marketing channel and protection strategy.

	S1	S2	S3A	S3B	S3C	S3D
Total growers	6	10	7	6	3	3
AGC-M	0	5	0	1	1	3
AGC-L	0	2	7	2	2	0
Independent	6	3	0	3	0	0

Table 8. Protection practices according to the grower's strategy.

	S1	S2	S3A	S3B	S3C	S3D
% of surface covered by tolerant/resistant cultivars	87.9	11.7	5.0	27.5	5.7	0.0
Self-restriction of pesticide use	Yes	Yes	No	No	No	No
Coefficient of variation of TFI[protection]$_{plot}$ between plots (%)	-*	14	5	7	3	4
Number of alternative methods	3	3 - 4	3	0 - 4	3	0 - 1
TFI[Protection]$_{orchard}$	10.8	34.8	37.3	33.4	36.7	35.2
TFI[Protection]$_{orchard}$ coefficient of variation (%)	57	19	17	35	28	32
TFI[NODU]/ TFI[Protection]$_{orchard}$ (%)	30	10	2	4	7	7
TFI[captan, mancozeb, dithianon]/ TFI[Protection]$_{orchard}$ (%)	0	31	51	40	42	31
TFI [sulphur and copper]/ TFI[Protection]$_{orchard}$ (%)	18	7	0	3	1	9

*missing data at plot scale

Table 9. Farm characteristics, socio-economic context and performance by protection strategy.

	S1	S2	S3A	S3B	S3C	S3D
Apple surface (ha)	5.6	18.0	12.2	3.6	29.7	2.2
Nb of cultivars	9	5	2.6	1 – 11	2.7	1
% of apple orchard/total surface	30	6 - 100	8 - 100	21	92	93
Nb of permanent workers	0.0*	1.9	0.6	0.2	4.0	0.0
Nb of hours worked (h/t)**	46	15	16	21	12	15
Selling price (€/kg)	1.3	0.5	0.3	0.3 - 1.9	0.4	0.6
Technical network	Multi-source	Multi-source	AGC	AGC/guide book	Own network + AGC	AGC
Estimated yield (t/ha)	17.5	41.5	43.0	38.9	61.5	61.9
TFI[Protection]$_{orchard}$ /t	0.5	0.8	0.8	1.3	0.6	0.9
% decrease of the yield leading to no-margin	43	25	2	39	43	39
Gross Margin (€/kg)	0.85	0.02	0.01	0.03 - 1.40	0.14	0.30
Gross Margin per hour worked (€/h)	18.4	1.3	0.6	2.9 – 47.7	11.7	20.0

*except one farm with one worker **for the total work force (family, permanent employees, hired labor)

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

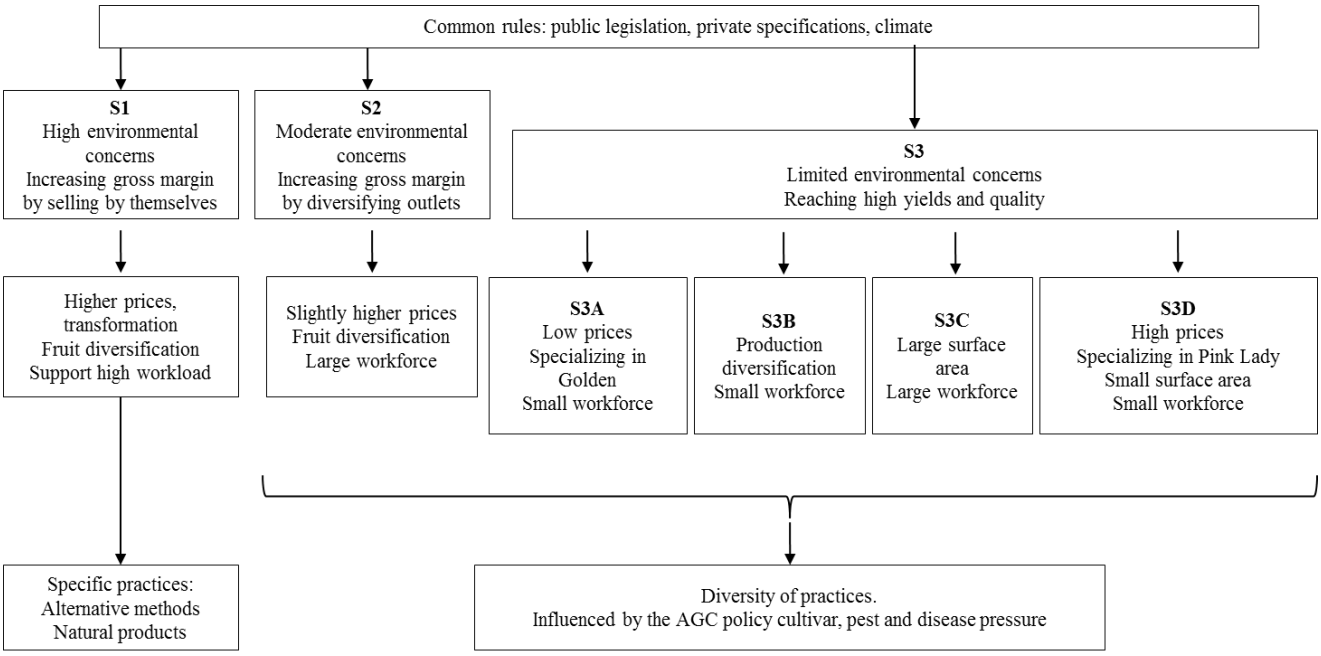


Figure 1. Characterization of the three protection strategies and four sub-strategies identified in the 35 apple farms surveyed.

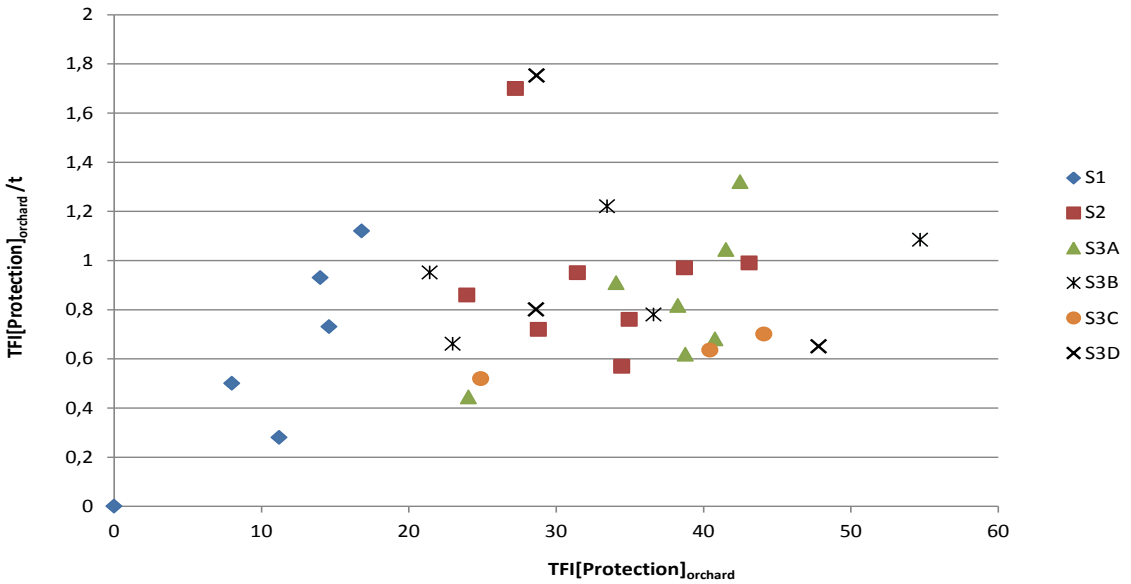


Figure 2. Variation of the pesticide application efficiency (TFI[Protection]$_{orchard}$ /ton of apple produced) according to the mean total application (TFI[Protection]$_{orchard}$) per farm and per protection strategy (n=35).

4. Discussion

4.1.Apple protection as viewed by farmers: a range of constraints with few opportunities

This study showed that protection strategies were designed and implemented by apple growers based on consistent combinations of objectives in terms of income and environmental impacts and a range of generic drivers including: (i) the grower's marketing strategy which conditioned

the specifications s/he would have to respect and the selling prices s/he could expect from buyers, (ii) the time s/he was willing to spend on the orchard according to his or her work force, (iii) the cultivated surface area, and (iv) the production system (diversification *vs* specialization). Based on these combinations, six types of strategy were identified on a rather small sample. This diversity of protection strategies within a common context was also observed by Marliac *et al*. (2015), who identified four types of protection strategies within a sample of 24 organic apple growers in south-east France. However, given the number of interacting drivers involved, each farm studied appeared to be a unique case where these processes took specific values. Such a result was already observed regarding work organization in dairy farms (Hostiou *et al.*, 2015).

The "bio-ecological" growers managed to decrease their pesticide use to a low level. However, they balanced their low yields, related to the agronomic risks they took, with a better valorization of their fruits through short food chains while increasing their workload. This production and marketing model is frequently found in organic agriculture (Reganold and Wachter, 2016). It did not seem, however, appropriate for every apple grower due to both individual farm circumstances and the structure of the apple sector in France, where 90% of apple volumes were managed by supermarkets and exporters (Agreste, 2014b). These apple buyers looked for a standardized fruit with no pesticide residue and no cosmetic defaults that was available at a low price to fulfill their consumers' requirements. These low purchase prices led to the low gross margins of the AGC growers and encouraged a limited-risk strategy based on pesticide use.

For AGC growers, most of the alternative methods to pesticides seemed risky, especially because these methods were not suitable for all farms and they impacted yield, quality and expenses (Wilson and Tisdell, 2001). For instance, rain-proof tarps can prevent scab spores from hatching but up to 210 hours/ha are needed to install and handle the nets and their costs are high (Laget *et al*., 2014). Thus a contradiction emerges between consumers' requirements, as channeled by supermarkets and exporters, and growers' capacity to meet these requirements without pesticide use.

4.2.Analyzing and formalizing growers' decision-making processes

The farm-scale approach used in this study and the inductive analysis based on both application schedules and semi-structured interviews allowed protection practices to be linked with a farm's socio-economic context, farm structure, and the grower's management processes. This

methodology required a considerable investment of time to collect both quantitative and qualitative data and to understand the grower's decision-making processes on each farm. Combined with financial and time constraints, these elements justified the reduced sample size, which is frequently observed in such studies (Sattler and Nagel, 2010; Bernard *et al*., 2011; Guillaume *et al*., 2016). This small size was balanced by the diversity of the farms selected, independent of their weight in the total farm population concerned by the study. This diversity enriched the comparative analysis between farms and allowed a more generic explanatory model of the processes studied to be built (Eisenhardt and Graebner, 2007). This model included growers' general objectives in terms of economic and environmental concerns, which also were found in others production systems (Aubry *et al*., 1998), and generic factors influencing farmers' decision-making processes (Navarrete *et al.*, 2014). Further similar studies conducted in other fruit production areas could contribute to validate and enrich this typology.

Apple growers' daily practices were analyzed during a specific year. They obviously depended on the climatic conditions of the year, which impacted pest and disease pressures. However, both the strategic decision-making processes driving these practices and the factors influencing them remain constant on a mid-term horizon. The TFI resulting from a given strategy thus may vary depending on annual climatic conditions. However, these conditions do not have an effect on the implementation of alternative practices requiring strategic choices such as insect-proof nets.

The typology of crop protection strategies based on this model was a means to understand this diversity. It could be used to adjust advisors' support to groups of farmers or to orientate technical research on topics relevant to some types of strategy (Rebuffel *et al.*, 2015). It nonetheless remains a simplified picture of reality focused on the topic addressed (Rusinamhodzi *et al.*, 2016). This picture could be improved by considering all of the practices at the orchard scale (fertilization, thinning, pruning) as well as the farm scale in a more holistic approach to crop protection. As shown by the S3B strategy, orchard practices indeed interact with other production practices. Such an extended approach should be required to study farm transition from synthetic, chemicals-based to biodiversity-based agriculture (Duru *et al.*, 2015). Moreover, growers' decision-making processes involve additional factors beyond the technical and management considerations studied here. Growers' attitudes and preferences play a part in the implementation of a given protection strategy. For instance, Hashemi and Damalas (2010) have shown that the amount of pesticide used by growers was influenced by their perception of pesticide efficacy. Hunt (2009) showed that growers' practices were influenced by the way they interpret their relationship with their orchard through their senses (sight, touch, hearing, taste

and smell). Socio-demographic factors can also influence growers' practices. Wilson and Tisdell (2001) showed that growers in developing countries could be less inclined to decrease their pesticide use because of their lack of knowledge regarding the health effects of pesticide use and the existence of alternative practices.

4.3.Towards less pesticide use?

Several levers that could be used to support growers to shift towards more sustainable practices can be suggested. Amongst the technical alternatives to be developed in the near future, full or partial scab resistant cultivars sprayed only when infection levels are high should allow decreasing fungicide use (Didelot *et al.*, 2016). Acceptance of these new cultivars has to be accompanied by a strong marketing strategy. Alternative practices and efforts also have to be developed at a landscape scale to insure their efficiency since diseases, pests and biological controls ignore the boundaries of plots and farms. However, managing crop protection at such a scale may be quite complex since it requires co-ordination between growers and probably other stakeholders that can only be reached if effective social and policy tools are established (Brewer and Goodell, 2012).

Supporting growers in (re)designing their protection strategies at the farm level requires an evolution in the kind of advice delivered. At present, advisors provide mainly tactical and operational advice aiding growers to best time their spraying interventions to avoid infections. This is useful in reducing pesticide use by improving application efficiency. However, this kind of advice is not enough to support an evolution towards alternative practices which would impact several farm components such as work organization or diversification (Pardo *et al.*, 2010). Strategic advice is required which takes into account the whole farming system and identifies the barriers preventing growers from innovating (Le Gal *et al.*, 2011). Such advice can also take into account risk management processes when growers' risk perceptions regarding alternative methods prevent them from changing their practices (Mitchell and Hutchison, 2009). Modeling tools at the farm level can then be used to evaluate *ex-ante* the consequences of an innovative scenario on farm functioning and performance (Le Gal *et al.*, 2013; Dogliotti *et al.*, 2014). This approach can be jointly conducted by researchers, advisors and growers in the framework of co-innovation or participatory research processes, which better meet the stakeholders' requirements and address specific issues (Faure *et al*, 2014).

Growers could be encouraged to take more agronomic risks if their economic impacts are reduced. Increasing apples prices or implementing financial incentives with adapted

educational programs (Brewer *et al.*, 2004) are ways to increase growers' margins. Commercial brands such as Pink Lady® have efficient marketing strategies leading to higher prices, but they do not systematically include environmental objectives. Marette *et al.* (2012) showed that consumer willingness to pay for environmentally friendly products increased if precise information about pesticide use was given. Although pesticide issues are frequently addressed by the media, the presentations are often one sided, and fail to address the underlying causes of pesticide use: a demand for perfect looking fruit at low prices.

5. Conclusion

To conclude, pesticide use is an increasing concern worldwide due to its impacts on the environment and human health. Alternative methods to pesticides are available but they have to be integrated into the protection strategies designed and implemented by farmers based on their environmental and economic objectives and their farming resources, especially land, labor and capital. In the apple sector, marketing strategies are a key element behind protection choices since they frame the selection of cultivars, the specifications growers have to fulfill, and the prices they can get from their buyers. Although each farm is a specific case, the diversity of protection practices encountered in a small sample set within a similar climatic and regulatory context could be organized into a few types showing consistent sets of pesticide practices.

Pesticide use is generally reduced under pressure from public regulations and apple buyers. However, it will be difficult to reduce the current use levels due to fruit quality standards and low market prices. Indeed, alternative methods are more risky than pesticides in terms of yield losses and lead "bio-ecological" growers to directly sell their production to obtain good prices and reasonable incomes. Given the diversity of constraints and opportunities at the farm level, coupled with consumers' conflicting demands, innovative advice methodologies are needed to support growers in (re)designing their crop protection strategies according to their own environmental and economic objectives and evolving market requirements. With that in mind, the next step of this study will consist of designing a calculation tool able to simulate the impact of a given protection strategy on farm management and performance by taking into account the specificities of each farm. This tool will be used to provide strategic advice to growers by *ex-ante* evaluating a range of both protection and cultivar options according to their impacts on the farm in terms of TFI, workload and economic returns.

Acknowledgments

The authors are very grateful to the apple growers and the apple cooperatives who agreed to provide the rich set of information collected on their protection practices. They thank Grace Delobel for editing the paper in English. This work was funded by the French Agence Nationale de la Recherche under the ALID/Sustain'apple project ANR-13-ALID-004.

Des processus analytiques de compréhension aux processus d'accompagnement

Les deux chapitres précédents ont permis de mettre en évidence la diversité des pratiques d'utilisation des pesticides et de leurs impacts, et de les relier avec les caractéristiques des exploitations, en lien avec leur structure, leur fonctionnement et leur contexte socio-économique. Une typologie des stratégies de protection a pu être définie, montrant l'importance de l'influence de critères comme la stratégie commerciale sur les décisions. Ces deux chapitres ont mis en évidence les faibles marges de manœuvre des producteurs pour faire évoluer leurs stratégies vers des alternatives aux pesticides, mais aussi le manque d'outils pour les aider à évaluer les conséquences d'un changement de stratégie.

Suite à ce constat, nous avons développé et testé un processus d'accompagnement basé sur un outil de simulation pour évaluer les impacts d'une évolution de la stratégie des producteurs sur leur exploitation. La structure de l'outil a été basée sur les connaissances acquises lors des deux premières phases aux échelles de la parcelle et de l'exploitation agricole. Il a été conçu de manière à pouvoir être transféré à terme aux techniciens en charge du conseil aux producteurs, et testé sur quelques cas d'exploitations relevant des deux coopératives partenaires de l'étude.

Chapter IV. A simulation tool to support the design of crop management strategies in fruit tree farms. Application to the reduction of pesticide use.

Ce chapitre a été soumis, et accepté par la revue Computer and Electronics in Agriculture, et est en cours d'édition.

Solène Pissonnier[1,2,*], Claire Lavigne[2], Pierre-Yves Le Gal[1]

[1] CIRAD-ES - TA C-85/15, 73 rue Jean-François Breton, 34398 Montpellier cedex 5 - France

[2] INRA, UR 1115 PSH, Plantes et Systèmes de culture Horticoles, F-84000 Avignon, France

*Corresponding author

Email addresses: solene.pissonnier@cirad.fr, claire.lavigne@inra.fr, pierre-yves.le_gal@cirad.fr

Abstract

Strategic decisions condition the orientation and associated agricultural practices of farms for many years, especially in fruit production where trees are planted for ten to fifteen years. However, this type of decision is rarely addressed in decision support approaches. An approach was developed to support strategic thinking in fruit tree farms through the use of a simulation tool called CoHort and built in Excel®. CoHort evaluates the impacts of a given set of practices on the economic performances (gross and net margins), labour organization and phytosanitary performances (Treatment Frequency Index) of fruit tree farms. It has been built with cooperatives technicians and used with apple farmers in a participatory process to integrate the needs and objectives of the farmers and technicians. The approach alternates between simulations with the tool and discussions with the farmer. It is illustrated for two apple farmers in France aiming to reduce their pesticide use. The first farmer wanted to convert five hectares out of eight to organic production. Simulations showed that the raw margin was increased by 259%, the Treatment Frequency Index was reduced of 26%, but the labour demand was 9% higher. The second farmer wanted to replace 1.5 hectares out of 15ha with a new scab-resistant cultivar. Results showed that the average TFI at the farm scale was decreased by 17%, the labour demand was similar, and the raw margin increased by 5%. Based on simulation outputs apple farmers could estimate the possible impacts of their projects to their farm. The tool flexibility allows using it with different farm structures and projects.

Key words: Discussion support; Spreadsheet tool; Crop protection; Farm; Scenario

Rapport-Gratuit.com

1. Introduction

Crop management can be thought of at different levels of a farm (Le Gal *et al.*, 2010): (i) at a strategic level, regarding multi-annual orientations, investments and sizing of farm enterprises, (ii) at a tactical level, regarding the annual or seasonal planning of activities to be conducted, and (iii) at an operational level on a daily basis, leading to the agricultural practices performed by the farmer at the plot scale. The levels are interrelated to ensure the consistent functioning of the farm. In permanent crops such as fruit trees, results of decisions can take several years to manifest, so they need to be considered carefully. The first set of strategic decisions is made at planting, when the farmer chooses the cultivars. At the beginning of each year, farmers plan their specific tactical intervention, which enables them to manage their input stocks and to size their work force and equipment based on the resources available on the farm (Penvern *et al.*, 2010). Farmers then make their operational daily decisions according to their plan and the daily events they might face, such as pest/disease development, rainfall or wind.

Changing practices may imply strategic decisions, which can affect farm performance for several years and therefore must be thought out and evaluated before implementation. For example, investing in a scab-resistant cultivar or pest-exclusion nets have consequences on farm performances and work organization that are difficult to assess. Such evaluation requires new approaches to support farmers in considering these different options at different farm management levels. Simulation tools are known to provide such *ex ante* evaluations based on exploratory scenarios at the farm level (Le Gal *et al.*, 2011; Sempore *et al.*, 2015). These tools have several advantages: (i) providing quantitative information on the potential impacts of innovative practices on farm performances by simplifying the systems modelled, (ii) saving time compared to field experiments as the planting and growing phases over several years can be skipped, (iii) and avoiding costly trials and error processes (Martin *et al.*, 2012).

Some production models have been developed in the fresh fruit industry (Soto-Silva *et al.*, 2016). They usually address one main issue, such as the optimization of harvest dates to reach optimal quality (González-Araya *et al.*, 2015) or the characterization of the best management of resources (equipment and labour) and tasks (practices) to reach the highest fruit quality and quantity (Bohle *et al.*, 2010). Since these research models often imply complex programming, mainly through optimization, they are not easily transferred and used by technicians who advise farmers. In the French fruit sector, a large range of decision support tools exists to assist farmers in managing orchard (list available at https://iris.angers.inra.fr/BDDOADFruitsnCo/). But they rarely address strategic decisions at the farm level. To fill this gap, we have designed a support

approach based on a simulation tool called CoHort for aiding farmers in their strategic reflections by evaluating the effects of different sets of crop management strategies on work organization, phytosanitary and economic performance at the farm scale.

CoHort was developed and tested in the French apple sector, where 60% of the farmers are organized into cooperatives (Agreste, 2014b). These cooperatives are in charge of the marketing and selling of the fruits and employ technicians who support farmers in managing technical aspects according to the specifications of their buyers (exporters, supermarkets, retailers). They provide information and advices to farmers who combine this knowledge with their own experience. Technicians play then a big part in the daily decisions of farmers, but rarely in strategic support.

The apple sector is an interesting case to develop a strategic support approach. Apple farmers are limited in their solutions to change their practices, particularly regarding crop protection, since they are challenged with growing perfect-looking fruits with no disease symptoms or insects (Pissonnier *et al.*, 2016). Moreover, apple prices are very low, approximately 0.3€/kg, and the production costs are usually close to the selling prices, as the crop is labour consuming. Since alternative practices to pesticides have uncertain effects on crop yield and quality, farmers need to evaluate *ex ante* the possible consequences of implementing alternative practices on their farm performance and management.

This paper presents the approach developed first by explaining the design process of CoHort and then by describing the software structure and operation. Two applications are then presented for two different apple farms which aim at reducing their pesticide use. The values and limits of the approach and the tool are then discussed.

2. Design process

2.1.Main objectives of the support approach

The support approach using CoHort aims to enhance farmers' reflections regarding their strategic projects by quantifying the potential consequences on farm performance of systemic changes in their production systems, such as the introduction of new equipment or a reorientation of activities. To do so, a technician or researcher works with individual farmers in a face-to-face process to design scenarios. The initial configuration of the farm is represented first, then alternative configurations are developed (Le Gal *et al*, 2013). Each scenario is then simulated with CoHort, its outputs are compared with the initial and other alternative scenarios,

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

and the set of results feeds the discussions with the farmer regarding the feasibility and value of each scenario to fulfil his/her intentions of change. The objective is not to help the farmer to make a day-to-day decision, such as the choice of a pesticide to fight a disease, but to provide him/her a set of information that will help in preparing a mid-term strategic decision that often involves factors other than the ones included in the simulation tool (Le Gal *et al.*, 2011).

In this support framework, CoHort aims to explore how a given farm may evolve rather than precisely predict the consequences of strategic changes, an objective which would be difficult to achieve for decisions involving numerous and uncertain elements. In this respect, trends between scenarios are more important than absolute values of simulation outputs. The nature of the input data depends on the type of knowledge being integrated into the scenarios and does not need to be very accurate. The calculations are based on basic arithmetical operations rather than complex equations representing mechanistic processes.

2.2.A co-designed simulation tool

CoHort was built with a co-design process, including the participation of technicians of two apple farmer cooperatives, one near Montpellier (South-East France) and one near Limoges (Centre-West France), and two researchers. Participatory research has several advantages, such as the following: (i) integrating from the very beginning the objectives and knowledge of all the stakeholders, i.e: researchers, technicians and growers in this case (Vall *et al.*, 2016); (ii) taking into account different kinds of knowledge, scientific from researchers and know-how from growers and technicians (Meynard *et al.*, 2012); (iii) improving communication between stakeholders (Berthet *et al.*, 2015); (iv) taking into account the diversity of objectives and existing situations (Dogliotti *et al.*, 2014); (v) and facilitating the transfer of the co-designed tool afterwards (Faure *et al.*, 2014). For the CoHort tool, technicians and researchers co-intervened at different steps: definition of the general objective of the tool, definition of the tool specifications, choice and definition of the concepts mobilized.

2.3.Specific objectives and requirements

One meeting per cooperative was first organized with its technician to agree on the general objective of the tool: simulating the impact of a given set of crop management practices on the work organization, economic performance (gross and net margin) and phytosanitary performance estimated with the treatment frequency index (TFI; see equation in Annexe 5, Suppl.Mat.1) of the farm (Brunet, 2008).

Then two to three meetings at different stages of the tool design were organized separately with each technician to adapt the structure of the tool to their expectations and needs for its ultimate use by the technicians. The design process was framed to achieve ten objectives defined with technicians and based on both the technicians' needs to integrate the farm level in their advice with a flexible and quick to use tool, and the need to cover the diversity of farms, strategies and practices highlighted in a previous study conducted with the same cooperatives (Pissonnier *et al*, 2016):

(i) to take into account the farm characteristics, resources and constraints regarding equipment, labour, areas and activities;

(ii) to be generic enough to be used across diverse farms and diverse objectives of farmers;

(iii) to represent a diversity of strategies, for instance regarding crop protection from a pesticide shift to a complete different system, including new cultivars or heavy equipment;

(iv) to model a whole farm or only a part of it;

(v) to be adaptable to the level of information and data available on the farm, e.g., if the user wants to indicate each pesticide used or only the pesticide categories;

(vi) to include only simple equations that link the different figures together, without complicated programming;

(vii) to let the user choose his/her own measurement units, as long as the user is consistent throughout the whole process;

(viii) to enable focusing on a given period of the year for users to test without the need to fill in all the data throughout the year;

(ix) to balance monthly the farm labour supply with the work demand due to new sets of practices (farmers could then evaluate the need to increase their labour resources); and

(x) to enable the possibility to repeat scenarios year after year to assess the annual evolution of the economic performances when planting a new variety.

3. CoHort structure

3.1.Main concepts

In this study, each farm is considered a combination of limited resources (land, equipment, capital and manpower) allocated to a range of activities selected by farmers according to the objectives and production strategy of the farmers. To achieve these objectives, the farmers implement different practices on their crops, which lead to various economic and phytosanitary performances and work organization (Figure 1). Practices are considered the techniques implemented on the fruit tree crop that lead to labour-, input (e.g. type of pesticide, thinning product or fertilizer, with its quantity used)- and/or equipment consumption. This consumption leads to variable and/or fixed costs.

The qualitative objectives of farmers are not modelled *per se* in the tool but are discussed rather during the support process between the farmer and the tool user (a researcher or a technician, for instance). The farm resources, crops, activities and practices are modelled according to the following system. Activities are divided into farming and non-farming ones. Farming activities include the crops grown/livestock bred by the farmer to generate revenue after their sale. Non-farming activities do not produce any direct agricultural goods but are time consuming, such as the involvement in the cooperative management or farm-gate sales. Both types of activities are taken into account by CoHort to calculate the balance between labour supply and demand at the whole farm level. The “farming activities” can be divided into two categories: the “modelled crops” and “un-modelled farming activities”. The “un-modelled farming activities”, which include some of the crops and the whole livestock, are taken into account only for the labour they require. The practices of the “modelled crops” are described precisely. These practices can be divided into different Blocks. Each Block is defined by its specific crop, variety, area, fruit selling prices, set of practices and corresponding yield. Fruit quality is integrated in simulations by capturing (i) the proportion of yield corresponding to each quality category (for instance according to size) and (ii) the selling price of each category.

A management strategy is described in each Block by the set of practices carried out by the farmer to reach a certain quality and quantity of fruits, considering the specifications of the buyers the farmer must follow and his/her own environmental objectives (Pissonnier *et al.*, 2016). This includes different kinds of practices regarding protection, fertilization, pruning and thinning, that the farmer can choose according to his/her strategy and the equipment, labour and

money resources consumed. For instance the range of available practices for controlling pest and diseases can vary from chemical to biotechnical control (Laget *et al.*, 2014) (Table 1).

Table 1: Protection practices

Type of practices	Practices
Chemical control	Spraying synthetic pesticides, such as pyrethroids, against insects
Natural sprays control	Spraying 'natural pesticides' made of mineral or natural molecules or organisms such as copper or sulphur
Biocontrol	Using natural predators against pests, such as lady bugs against aphids
Biocontrol conservation	Indirectly enhancing the development of natural predators through the environment (attracting cover crops, for example)
Physical control	Using physical barriers such as pest-exclusion nets
Genetic control	Planting cultivars (e.g., Ariane®) that are resistant to scab, a fungus disease that is the biggest threat in temperate climate regions
Cultural control	Action through irrigation, pruning, thinning or fertilization in a way that enhances the tolerance of the tree
Bio-technical control	Based on chemical interactions that exist between pests, such as mating disruption

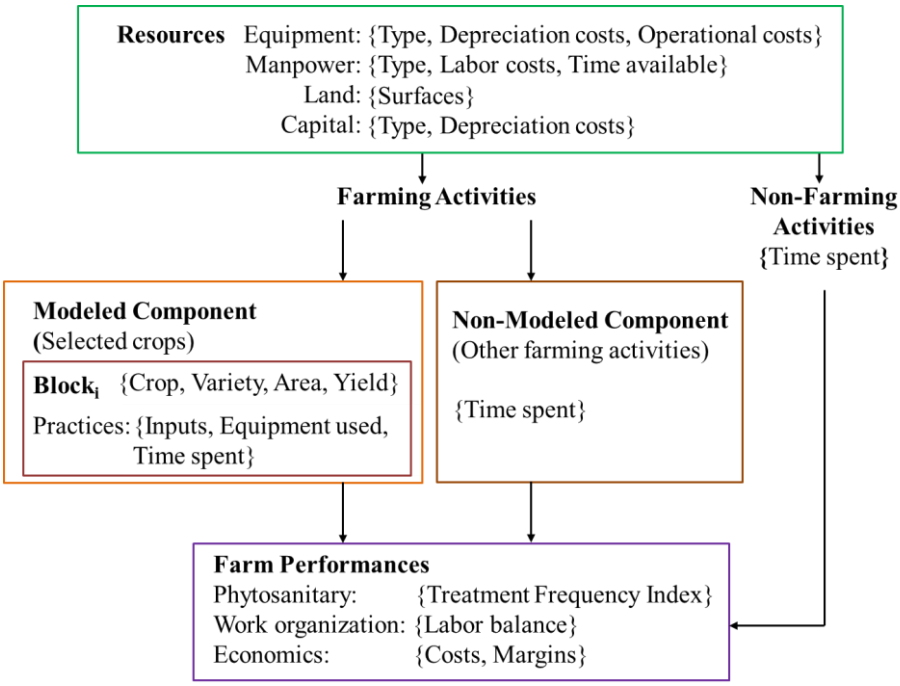


Figure 1. Schematic representation of a farm in CoHort. Input variables are listed in brackets.

3.2.A spreadsheet structure including three types of variables

CoHort was developed in Microsoft Excel® by researchers only, who re-used some concepts and elements from similar simulation tools built for other productions (Le Gal *et al*, 2013; Fuentes *et al*, 2016). It is organized into three sets of sheets, Parameter, Input and Output, which respectively include eight, nine and four sheets. Parameter values are relevant to a set of farms. They include mainly names entered by the user – for instance the list of crops or inputs potentially met in a given context (Table 2). These values then appear in drop-down lists in the Input sheets, where they are selected by the user according to the specific characteristics of the farm studied, without retyping them (Figure 2). This functionality avoids typing errors and provides the consistency required for some calculations.

The Input variables are specific to each farm studied. They concern both the farm and Block scales and include the following items (Table 3):

- Farm level: crop/livestock activities (respectively, in hectares and number of head), monthly available labour, time consumed monthly by non-modelled farming activities and non-farming activities;
- Block level (for each modelled crop): Block characterization, list of chemical inputs sprayed with their doses per Block, time spent per hectare for each practice per Block. Sprayed inputs can be defined individually (e.g., copper) or by category (e.g., fungicides and insecticides).

The Input data required to calculate the Outputs per scenario are valued according to the following principles:

- Farmers' data are used as long as their data are recorded. During the scenario building, when the data are not available, either because they were not recorded or because they concern an innovation unknown by the farmer, values are obtained from sources such as research and technical bodies.
- Sale prices can vary according to the quality of the product (e.g., fruit size);
- Labour cost amounts are defined per type of labour per unit of time because they may vary according to the workforce status (permanent or not permanent, qualified or not qualified);
- Equipment costs cover depreciation/maintenance and operation (energy and lubricants). The equipment costs are valued according to the data available for a given farm using the following three procedures: [A] amount per unit of time including all costs (this procedure also covers the case of contractor hiring), [B] depreciation/maintenance amount per hectare

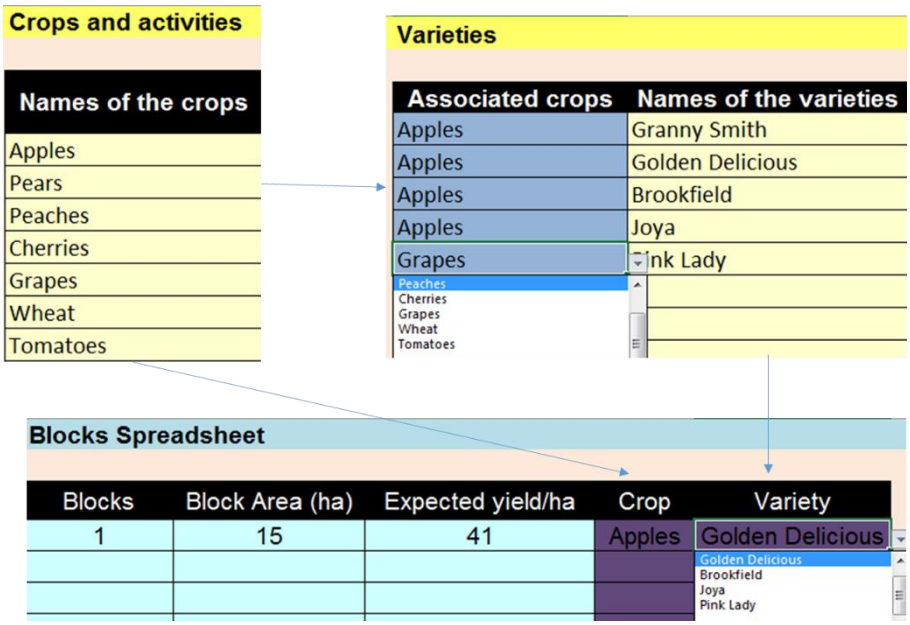
at the farm level and operation amount per hectare at the Block level, and [C] amount per hectare, including all costs at the farm level;

- Other fixed costs, such as insurance or water/electricity, are valued per hectare at the farm level, with the proportion assigned to the modelled part of the farm. These costs must be valued when the user aims to calculate a net margin at the farm level (modelled part of the farm only).

The Outputs are gathered in the four Results sheets corresponding to four items calculated for each simulated scenario: indicator of pesticide use (TFI), labour balance, costs and revenues (Table 4). Calculations are based on equations linking Input variables together (Annexe 5, Suppl.Mat.1). The tool only includes calculations using the four arithmetic operations and following basic accounting rules. The relevancy of this simple structure was checked by simulating the initial situation of a well documented farm and comparing the simulation results with the records held by the farmer in terms of protection, labour use and finances. During the support process which followed, the initial situation of each farm was systematically simulated and the results checked against the grower's own records.

Table 2: The eight Parameter sheets that can be filled in for a whole set of farms

Spreadsheet	Table content	Examples
Crops and activities	Crops	Apple, Wheat
	Livestock	Dairy cow, Sheep
	Activities	Cooperative administrator, Self-selling
Varieties	Varieties per crop defined above	Granny Smith, Golden Delicious (for Apple)
Practices	Practices	Fertilization, Spraying. Pruning
Input categories	Inputs potentially used and per-unit price per input	Mancozeb, Captan
Inputs sprayed	Categories of inputs sprayed	Fungicides, Insecticides
Labour categories	Categories of labour	Permanent, Family
Equipment	Equipment potentially used	Tractor, Sprayer
Costs	Fixed costs, depreciation costs and variable costs that affect each Block or the whole farm	



Caption:
- Name of the parameter spreadsheet s (not editable)
- Name of the input spreadsheet (not editable)
- Name of the columns (not editable)
- Parameters to be typed
- Inputs to be typed
- Scrolling list of the corresponding parameters entered previously
- Scrolling list of the corresponding parameter s entered previously

Figure 2. Example of association between Parameters and Inputs spreadsheets.

Table 3. The nine Input sheets and their content

Spreadsheet	Function	Name of the associated variables
Scenario	Capture information to identify the farm and the scenario tested.	-
FARM_Labour Resources	Assign a cost to each type of labour. Value the farm permanent labour supply per person and per month (unit of time to be selected by the user).	Labour costs Time available/month
FARM_Planning	Assign the monthly time amount for each non-farming activity or non-modelled farming activity (same time unit as above).	Time consumed/month
FARM_Equipment	Indicate for each practice the equipment needed and how much it costs per unit of time to use this equipment (labour excluded).	Equipment cost amount/unit of time
FARM_Fixed_Costs	Indicate the costs that affect the whole farm and not a specific BLOCK.	Fixed Cost amount/hectare to be assigned to the modelled system
BLOCK	Create and describe the different modelled BLOCKS.	Area Crop Variety Yield Sale Price Proportion of the BLOCK sold at a given price
BLOCK_Sprayed_Inputs	Describe the inputs or categories of inputs sprayed per BLOCK.	Number of sprays/input Quantity applied Proportion of the authorized dose applied Consider in TFI[1] or not[2]
BLOCK_Planning	Value the monthly time quantity and the type of labour force required for each practice implemented per BLOCK.	Time consumed per month/hectare
BLOCK_Intermediate_ Costs	Assign intermediate costs other than Sprayed_Inputs to each practice implemented per BLOCK.	Intermediate Cost amount/hectare

[1]Treatment Frequency Index

[2]The user can select the inputs that s/he wants to include in the TFI or not (e.g., weed killer or chemical thinning can be excluded). When only the input categories are available, the user needs to indicate the number of sprays and dose per category that s/he is planning for each block.

Rapport-Gratuit.com

Table 4. The four Results sheets and their content

Spreadsheet	Function
TFI-results	Calculates the Treatment Frequency Index per Block and for the whole farm and per input categories
Results-Planning	Calculates the monthly balance between the permanent labour supply of the farm with the total demand calculated from FARM_Planning
Results-Practices costs	Calculates the total cost per hectare (due to the equipment used, the time needed, the extra costs and the inputs sprayed) of each practice per Block
Economic results	Calculates the costs and revenues for each Block and for the whole modelled system for one scenario

4. CoHort application

4.1.A support approach based on discussions and simulations

The support approach followed a 4-step process involving a farmer and the CoHort user (a researcher, with the cooperative technician or not). The whole process was based on regular discussions between the farmer and the CoHort user that allowed the farmers to react and modify the scenarios produced. The CoHort user carried out the following tasks: explaining the approach and the functioning of the tool, supporting the farmer in making a diagnosis of his/her initial situation and in designing the scenarios to be simulated, providing data or searching for unavailable data, running simulations, presenting and discussing the results with the farmer.

Step 1. Diagnosis of the current farm situation and scenario formulation

Both the approach and CoHort objectives are first explained to the farmer. The current situation of the farm, its resources and its constraints are then discussed to understand the current strategy and objectives of the farmer regarding orchard management. Then the alternative scenarios are formalized. The data needed to simulate the initial state of the farm are then gathered as well as the data (if available) required for simulating the alternative scenarios that the farmer would like to evaluate regarding the evolution of his/her farm and his/her orchard management.

Step 2. Off-farm simulation

The CoHort user fills in the spreadsheets with the data gathered during the first meeting at the office. If there are any missing data or any clarification needed, the research team can contact

the farmer when possible. The initial state of the farm is first simulated to check if the results are consistent with the available data (Initial scenario). The alternative scenarios are then simulated in separated Excel® files.

Step 3. Presentation of results and discussions

During a second meeting, the simulated initial scenario is discussed with the farmer to check the relevance of its outputs. Then, the results of the alternative scenarios are discussed and compared with the Initial scenario. Modifications can be made in any scenario or new scenarios can be proposed after the simulation, leading to Step 2 again. This process can then go on as long as both the farmer and the user are keen to continue.

Step 4. Final discussion and evaluation

When the scenario process is over, the simulation results are transferred to the farmer through a final meeting and/or a report, depending on the availability of each participant. The report sums up the goal of the approach, the Initial scenario and the results for the different alternative scenarios.

4.2.Illustration of the approach

4.2.1. Parameterization

The approach described above was systematically applied. During phase 1, three kinds of data were available and collected on the farms: (i) the records of the farmers regarding the number of hours worked per operation, (ii) the financial reports generally managed by accountants, (iii) the spray records listing all the pesticides sprayed with date and dose, which farmers must legally log, (iv) each grower's yield records of the previous years to take into account the farm pedo-climatic conditions, or the whole cooperative records for cultivars simulated but not already grown in the farm. Parameters were entered to cover all the cases met in all the farms of each cooperative.

Three common rules specific to apple production were applied to all farms while informing the Input variables: (i) harvest time depends on apple yield – the more to harvest, the more time needed – and (ii) thinning, pruning and protection durations are reduced for younger orchards, (iii) blocks can be defined according to orchard age since young orchards do not produce before the third or four year of plantation, while old orchards between 10 and 15 years show lower yields but similar costs than younger and more productive ones.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Four rules were specific to organic apple production: (i) thinning is longer as it is only performed by hand instead of using chemical thinning (respectively 100 and 60 hours per hectare), (ii) green pruning is carried out in June to avoid alternation and reduced tree yields, (iii) weeding is mechanical and takes four times more than chemical weeding, (iv) crop protection start in February rather than March and is based on preventive sprays such as copper solutions.

The approach was conducted with two farms belonging to the Centre-West cooperative. Both farms are specialized in apple production and mainly grow Golden Delicious®. They belong to the same cooperative specialized in this cultivar which benefits from a Protected Designation of Area. Since the local climate is wet at spring, scab is the main disease and is difficult to manage. The following sections illustrate how the approach was conducted with the two farms on two different issues associated with apple orchard protection.

4.2.2. Farm 1: Introducing a scab-resistant cultivar

Farm 1 produced only Golden Delicious apples based on 15 ha. To reduce its pesticide use at the farm scale, the farmer wanted to partly replace Golden Delicious with a scab-resistant cultivar called Evelina®. The farmer wanted to evaluate the effects of replacing 1.5 ha of Golden Delicious (at first 0.5 ha, then an additional 1 ha when the first planting had reached full production five years later) on his economic performances and labour organization. Three scenarios were simulated: the Initial situation, the Planting a new cultivar situation and the Full production situation.

Some characteristics of the farm remained constant for every scenario: (i) since apple production was the only farm activity, the whole farm was modelled; (ii) the permanent labour team was composed of the farmer and his father who each work 35 hours/week. Their hours were not included into the labour costs since they covered their wages from the annual net margin. (iii) Temporary labour costs 13.5€/hour. (iv) The fixed charges remained the same since the planting costs were included in the variable charges of the Block concerned (no investment in new equipment).

Initial scenario

The farmer asked to consider only one Block of 15 ha of Golden Delicious with the same practices on the whole Block (Figure 3), reaching an average yield of 41 t/ha for an average price of 428€/t. The corresponding Input spreadsheets are available in Annexe 5, Suppl.Mat.2.

The farmer implemented only standard practices that generally occur in apple orchards (Figure 3). The two most time-consuming practices are thinning and harvesting of the fruits, which take up to 78% of the time spent on the orchard per hectare. The labour peak occurred in September during harvest and was managed by hiring temporary labour. The protection strategy included the use of synthetic inputs, such as standard insecticides, fungicides and herbicides, usually at full dose (Figure 4). Variable charges included gas, pesticides and fertilizers. The fixed costs included a list of items available in Annexe 5, Suppl.Mat.2.

Practices and time consumed per block

				Time consumed per hectare											
BLOCKS	Practices	Type of labour	Associated equipment	jan	feb	mar	apr	may	june	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	Pruning	Family labour		14	14	14									
1	Leaf shredding	Family labour											3		
1	Net handling	Family labour					3				3				
1	Thinning	Unqualified temporary labour						40	40	40					
1	Harvesting	Unqualified temporary labour										240			
1	Weeding	Family labour						4	4	4			4		
1	Observing	Family labour		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	Protection	Family labour				5	8	8	5	2	2	2			

Caption: Parameters to select from the list

Entries to be typed

Figure 3. Time consumed by practices carried out on the only apple Block of Farm 1 in its Initial scenario (screenshot of the BLOCK_Planning spreadsheet extracted and translated from CoHort. The data are given in hours).

Sprayed Inputs

BLOCKS	Practices	Input categories	Inputs	Nb of sprays/year	Quantity of input applied	Proportion of the legal dose	Take into account in TFI (1 yes, 0 no)
1	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	1,67	1	1
1	Protection	Insecticide	Ovipron	1	25	1	1
1	Protection	Insecticide	Karate Zeon	1	0,075	1	1
1	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	3,33	1	1
1	Protection	Fungicide	Scala	1	0,5	1	1
1	Protection	Fungicide	Dithane	1	2,1	1	1
1	Protection	Insecticide	Karate Zeon	1	0,11	1	1
1	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1	1	1
1	Protection	Fungicide	Azupec WG	1	7,5	1	1
1	Fertilization	Fertilizers	Fertileader T	2	4	0	0
1	Protection	Insecticide	Teppeki	1	0,14	1	1
1	Thinning	Thinning product	Tonicler	1	0,6	1	0
1	Thinning	Thinning product	LI 700	1	1,25	1	0
1	Protection	Fungicide	Syllit	2	1,69	1	1
1	Protection	Fungicide	Greman	2	0,25	1	1
1	Protection	Others	Topsin 70	1	1	1	0
1	Protection	Fungicide	Difcor	1	0,15	1	1
1	Protection	Fungicide	Delan	3	0,5	1	1
1	Protection	Insecticide	Supreme	1	0,25	1	1
1	Protection	Fungicide	Difcor	1	0,15	1	1
1	Protection	Insecticide	Precision	1	0,3	1	1
1	Protection	Natural product	Ginko	1	2	1	1
1	Protection	Fungicide	Azupec WG	2	5	1	1
1	Protection	Insecticide	Coragen	1	0,175	1	1
1	Protection	Insecticide	Supreme	1	0,5	1	1
1	Weeding	Weeding product	Aminugec 60	1	0,3	1	1
1	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1
1	Protection	Insecticide	Ovipron	1	10	1	1
1	Protection	Storing Product	Geoxe	1	0,4	1	1
1	Protection	Storing Product	Bellis	1	0,8	1	1
1	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1

Caption: Parameters to select in a list
Entries to be typed

Figure 4. Inputs sprayed on the only apple Block of Farm 1 in its Initial scenario (screenshot of the BLOCK_Sprayed_Inputs spreadsheet extracted and translated from CoHort).

Scenario 'Planting a new cultivar': the intermediate phase of planting

The scenario 'Planting a new cultivar' consisted of introducing a new variety over two phases: the intermediate phase during planting and the final phase, when the trees are supposed to be fully productive. As such, Farm 1 was divided into three Blocks (Table 5). Block 1 maintained the variety, practices, costs and sprayed inputs of the Initial scenario. There was no new equipment bought. Costs and practices were adapted to the variety and the orchard age. The depreciation of planting costs of both Blocks were added to the intermediate costs, i.e.,

2,200€/ha in total for each Block (costs of the trees, fertilization, tying up) according to the cooperative references. Input spreadsheets are available in Annexe 5, Suppl.Mat.3.

At the request of the farmer, his own time records from the Golden Delicious apples were applied to the two Evelina® Blocks instead of using other references. However, some modifications were applied to these Blocks. Block 2 had the same practices as Block 1, but the number of hours dedicated to protection were reduced. Fungicides were reduced since Evelina® is resistant to scab; therefore pesticides and gas costs were lowered. Only two practices were maintained in Block 3: net handling (10 hours/ha in November for installing the nets) and planting (10 hours/ha in August for uprooting the previous trees, 140 hours/ha in November and December for planting the new trees). Planting included the time needed to spray the 11 treatments (copper, weed killers, fertilizers and one insecticide) that are usually sprayed right after planting. Very young trees are less susceptible to bio-aggressors due to their reduced canopy. Variable costs were also reduced for Block 3.

Table 5. Definition of the three Blocks characterizing the scenario 'Planting a new cultivar', intermediate phase of planting – Farm 1

Block	Cultivar	Surface (ha)	Expected yield (t/ha)	Expected price (€/t)
1	Golden Delicious	13.5	41	428
2	Evelina®	0.5	60	450
3	Evelina®	1	0*	0*

*Year of planting;

'Planting a new cultivar': full production phase

The full production phase of the scenario consisted of a 13.5 ha Golden Block 1 identical to the Planting scenario and an Evelina® Block 2, which increased up to 1.5 ha and produced 55 t/ha (yield was reduced compared with the previous scenario, since some of the Evelina® apples may be still young). Practices, costs and equipment used were kept the same for Block 2, as in the Planting scenario.

Results

An extract of the Economic results spreadsheet for the Initial scenario can be seen in Annexe 5, Suppl.Mat.2.

During the planting phase, the new trees decreased the total gross product by 5% (Table 6). The total area did not increase; therefore, the farmer lost a hectare that did not produce any fruit. The average raw margin also decreased by 5% due to both the lost revenue and the planting costs of Evelina®. Since the fixed charges at the farm scale did not change because the planting costs were indicated in the intermediate costs of Block 2, the net margin decreased due to the reduction of the raw margin (Table 6).

The work balance showed a need for 240 extra hours to plant the new variety in November, a period that is usually not busy. However, 169 hours were saved in total for the 15 ha compared to the Initial scenario, since Evelina® plantings took less time to conduct.

In the Full production phase, the average gross margin increased by 5% compared with that of the Initial scenario, and the average net margin increased by 58% due to the important increase of the gross product, since the fixed charges do not differ much from those of the initial scenario. The work balance over the whole year showed a small gain of only 12h out of 6,957 hours, divided throughout March to September, since Evelina® required less spray. Evelina® only covers 1.5 ha of the whole surface, and the practices do not differ much. The TFI and TFI per ton of apples from Evelina® plots were, respectively, reduced from 32 (Golden) to 24 and from 0.78 to 0.40 due to the reduction in fungicide use.

These simulated results indicated to the farmer that his project would reduce his environmental impact while improving his economic results in the long term without any impact on his work organization. The selling risk could be considered low since the cooperative aims to develop this new variety and encourages its members to plant it. However, the farmer did not intend on planting a larger area because he considered that the sale prices were too speculative and that the yields could decrease rapidly due to weather complications. He would rather wait and watch the variety development before deciding to plant more. An extra risk scenario was then simulated, which confirmed his assumptions. Under bad weather conditions leading to a production of 15t/ha of Evelina®, the raw margin is reduced to 9,430 €/ha, and the net margin is reduced to -360€/ha.

Table 6. Outputs of the three scenarios simulated for Farm 1

	Initial	Full Production		
	(I)	Planting (P)	(F)	Variation (F)/(I) (%)
Average TFI[1]	32.0	26.2	26.7	-16.5
Labour balance[2]	-3,609	-3,440	-3,597	-0.2
		Economic results (€)		
Fixed charges /ha[3]	9,780	9,790	9,780	0
Gross product /ha	17,550	16,690	18,270	4
Raw margin /ha	10,700	10,090	11,230	5
Net margin /ha	910	305	1,440	58
Total net margin	13,720	4,570	21,620	58
Total raw margin	160,500	151,300	168,390	5

[1]Weighted according to the surface area of each plot

[2]Labour demand – Labour supply (hours)

[3]Fixed charges include the salaries of the farmer and his father

4.2.3. Farm 2: Extending organic production

Farm 2 contained eight hectares and cultivated three varieties: Golden Delicious, Opal® (under organic production) and Evelina®. The farmer's project was to shift to a system with three hectares of conventional Golden Delicious and five hectares of organic Opal®. The organic apples would be grown under a pest-exclusion net to better manage the codling moth. The farmer did not have any other activity or crop on her farm. An amount of 1.6 permanent workers were employed: the farmer who worked 40 hours/ha/month and one employee who worked part time for 10 hours/ha/month. The time was valued at 13€/h for permanent and temporary workers. Since the farmer always kept one hectare for planting to have constant orchard renewal, every scenario included a newly planted, a young and a fully productive orchard.

Initial scenario

Five Blocks were created to include the three varieties and to separate the Golden Delicious trees according to their age, with specific yield and practices (Table 7). The practices were adapted to the orchard age. Newly planted Blocks were not sprayed, but they still required hail net handling, fertilization and chemical weeding. Sprayed inputs were described according to

their category (fungicide, insecticide, etc.). Input spreadsheets are available in Annexe 5, Suppl.Mat.4.

Organic scenario

Five Blocks were created for the Organic scenario (Table 7). Practices were kept the same as in the Initial scenario for Blocks O1, O3 and O4 (adapted to the age of the orchard). References from the Agricultural Chambers were used regarding the different practices for the Opal® organic variety (Blocks O2 and O5). Input spreadsheets are available in Annexe 5, Suppl.Mat.5.

Prices of gas, pesticides and fertilizers were indicated for all the Blocks, with a difference between organic and non-organic. Organic fertilizers and pesticides were more expensive per unit, and the gas costs per hectare were higher due to all the mechanical work needed on organic plots (mechanical weeding, tillage, prophylaxis). The cost of organic certification (80€/ha) and depreciation of pest-exclusion nets were added for Blocks O2 and O5. The fixed charges were kept the same as in the Initial scenario.

Table 7. Definition of the apple Blocks characterizing the Initial (I1 to I5) and Organic scenarios (O1 to O5) – Farm 2

Block	Cultivar	Area	Expected yield	Expected price (€/t)
I1	Golden	3.0	45	75% at 450 25% at 170
I2	Young Golden	1.7	15	550
I3	Old Golden	1.3	14	500
I4	Opal (organic)	1.2	25	700
I5	Evelina®	0.8	0	-
O1	Golden	1	50	550
O2	Opal® (organic)	4	35[1]	800
O3	Young Golden	1	15	550
O4	Planted Golden	1	0	550
O5	Young Opal® (organic)	1	20	800

[1]Higher yield than Block I4 because the farmer estimated that she could do better several years from now.

Results

Block I4 in the Initial scenario showed the highest raw margin per hectare due to the high selling prices of organic apples and despite high labour costs, high intermediate costs and lower yield (Figure 5). The highly productive Golden Delicious provided a decent raw margin in Block I1, while Block I2 showed a negative margin due to the low yield of young orchards. Blocks I2 and I3 represented three ha that explained the low total raw margin (Table 8). As a result, the farm Initial total margin showed poor results. Indeed, the gross product was low due to the newly planted Blocks and low-yielding Blocks of Golden Delicious.

The Organic scenario significantly increased the gross product due to the better-valued prices of organic apples. Both the organic Opal®, which pay well, and the productive Golden Delicious® cultivars led to a positive net margin. Non-organic Block O1 had the highest raw margin (Figure 5) because organic Blocks have higher costs due to the handling and investments in pest-exclusion nets and the inputs that are more expensive. However, the improved balance between productive and unproductive Blocks explained the much higher total margin at the farm scale (Table 8).

The Organic scenario should require more labour than the Initial one, since there should be more apples to harvest (due to the higher total production) and more thinning and pruning in the organic Blocks. The farmer would have to adapt her hired labour force from March to November either by making her employees work more or by hiring new employees. However, in November and December, fewer hours of work are needed, as there is less to plant compared with the Initial scenario. The Organic scenario showed more labour peaks throughout the year, and some operations that impact yield, such as thinning, require trained labour, which can be more difficult to find in the Centre-West region of France where available labour is lacking. In full production, the Organic scenario showed a lower TFI in O2 compared with that of the conventional O1 (18 and 31, respectively). The number of sprays needed to produce one ton of apples also slightly decreased, albeit not considerably since the Opal yield was much lower than the Golden one (Table 9). However, the treatments needed used only non-synthetic inputs, such as copper, sulphur, viruses and bacteria.

After analysing the results, the farmer was convinced that implementing organic plots could fulfil her two objectives of having less negative impact on the environment and improving her economic situation. She planned on pushing the cooperative to develop its marketing strategy

Rapport-Gratuit.com

towards organic markets and to encourage the rest of the farmers to shift from conventional to organic production.

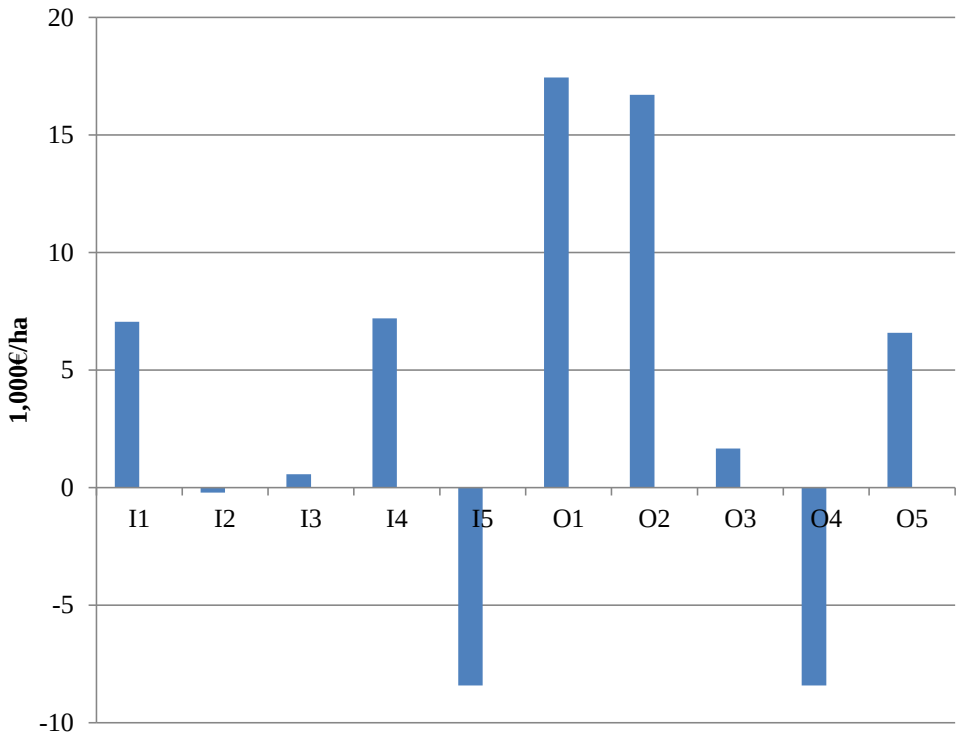


Figure 5. Raw margin per Block (€/ha) for Initial (I1 to I5) and Organic (O1 to O5) scenarios.

Table 8. Output results according to the Initial and Organic scenarios - Farm2

	Initial	Organic	% of variation
Average TFI	25.3	18.8	-26
Labour balance (hours)	-2,144	-2,343	9
	Economic results (€)		
Fixed charges /ha	6,180	6,180	0
Gross product /ha	11,930	20,470	72
Raw margin /ha	2,930	10,520	259
Net margin /ha	-3,250	4,340	234
Total raw margin	23,430	84,130	259
Total net margin	-25,980	34,730	234

Table 9: Total Treatment Frequency Index (TFI) and TFI per input category for each Block of the Organic scenario - Farm 2

Block	O1	O2	O3	O4	O5
TFI	31	18	23	6	18
TFI/t	0.62	0.51	1.53	0.00	0.90
TFI / input category					
Insecticide	6		4		
Fungicide	12		8		
Weed killer	6		6	6	
Chemical thinning	1		1		
Natural input	2	8	2		8
Chemical storing	4		2		
Copper		6			6
Sulphur		4			4

5. Discussion

5.1. A flexible tool adapted to a diversity of farms and scenarios

The flexibility of CoHort should allow a diversity of farms to be modelled as long as references are available for the different costs, equipment and time needed for the practices implemented. CoHort was tested with a total of six farmers belonging to the two cooperatives studied (results unshown). The characteristics of the farms were diverse: either diversified or specialized in apple production, with apple orchard areas varying from 8 to 120 hectares and including from one to six cultivars. Furthermore, unlike many fruit tree production models, CoHort does not focus on a single issue and can therefore simulate scenarios mixing environmental, economic and work balance considerations (Soto-Silva *et al.* 2016). For instance, most farmers would like to decrease pesticide use to reduce health and environmental impacts while maintaining the economic sustainability of their farms.

Two scenarios on two farms were simulated with CoHort. The farms had different characteristics regarding their apple surface, the number of varieties, the available permanent labour. The scenarios were also different: one developed organic production under pest exclusion nets, and the other had standard practices but implemented a new cultivar. The tool was able to manage this diversity of scenarios and farms since all of the Parameters (e.g., names

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

of practices, inputs and equipment) and Input data (e.g., practices, time needed or costs) were entered by the user, as well as the choice of units and the number of blocks. Although the development of CoHort was based on apple production due to funding reasons, the tool was designed in a way it can be adapted to any kind of fruit/vegetable combinations. CoHort should then allow a diversity of farms and scenarios to be modelled. The challenge in the future is now to test the model on a larger number of farms.

5.2. References and accuracy of results

The availability and quality of references are a critical issue when using simulation tools (Le Gal *et al*, 2011). Users can work with different kinds of data: personal data, experimental data, official or scientific references, or only estimations. References can come from different sources, and farmers' knowledge can be combined with that of technicians and researchers (Probst and Hagmann, 2003). For instance, technicians may be more aware of new varieties and practices and may have access to the corresponding references, while farmers provide their own perceptions and information regarding their farm management.

As for any quantitative model, the accuracy of CoHort results depends on the accuracy of the input data. However, this data accuracy is often low in the contexts in which CoHort is used, in particular for the data concerning the time spent for other crops or non farming activities. Either because growers do not record their own data (input used, work involved), or because innovative practices are not fully and precisely described. Estimating yields and the quality of production, which largely determine a farmer's profits, may be difficult since they result from complex interactions between soil, weather, variety, practices and pest/disease development (Silva *et al.*, 2017) that are not modelled in CoHort.

This issue could be addressed by combining CoHort with crop models calculating the fruit yields and quality corresponding to a given set of practices. However, such models are not used frequently in apple production (Soto-Silva *et al*, 2012) and could be difficult to validate given the diversity of natural environments and practices encountered in, for example, a cooperative. Nonetheless, as CoHort is used to explore rather than to predict, the question of accuracy can be addressed either by comparing trends between scenarios rather than absolute values, or by conducting a sensitivity analysis. Growers can then build their own reasoning in terms of expected risk based on this range of outputs.

5.3. Transferring support tools from research to technicians

CoHort was built through a co-design process with technicians from two cooperatives, in order to obtain a tool that technicians could understand and use easily; the objective was to avoid a 'black box' effect (invisible processes or complicated calculations) stemming from a complex structure (Voinov and Bousquet, 2010). However, the whole approach is time consuming as it requires both farmers and technicians to be involved in several meetings, while most of them are already overbooked with daily activities. However, when strategic issues are involved, time is required to fully understand the farmers' initial situation and projects, design relevant scenarios, and discuss the value and feasibility of scenarios based on simulation outputs.

This new support approach may affect the role of technicians (Faure and Compagnone, 2011). At present, their advising work consists mainly of supporting farmers in their daily decisions, such as choosing a pesticide when a farmer faces pests or diseases. They focus only on the apple plots, and do not consider other possible crops, activities, or farm resources. However, in contexts such as the cooperatives involved in this study, the evolution of practices required by buyers may lead to in-depth changes regarding farm equipment and management. Discussions between farmers and technicians about the entire farm and its resources would then be important to better evaluate the possibility to make practices evolve (Carberry *et al.*, 2002).

Understanding how farmers think and make decisions would help technicians better identify the farmers who can implement new practices and why some farmers cannot do so (Vanloqueren and Baret, 2009). Technicians could then implement different solutions and plans at the cooperative scale, and better coordinate production and marketing strategies according to the farmers' flexibility, without putting the economic sustainability of farms at risk. The increased time required by technicians to address these management issues at the farm level should be weighed against the better efficiency of the advising process based on the knowledge acquired through support tools such as CoHort (Martin *et al.*, 2011).

5.4. Towards an evolution of the support approach

The structure of CoHort may evolve with further utilization cases as technicians have not yet started to use the tool by themselves. However, some perspectives already have emerged from the present study. Firstly, the environmental indicators included in CoHort only address frequency issues of pesticide use through TFI. Including toxicity impacts on the environment and human health (Brunet, 2007) would improve the evaluation capacity of CoHort if an easy to use and robust indicator was selected to remain in alignment with the design principles of

the simulation tool. Since finding such an indicator appeared difficult for a variety of reasons, including the complex calculations involved (Feola *et al.*, 2011) and a lack of evaluation data for some molecules, the current version of CoHort excluded this aspect. However, methods to facilitate toxicity and ecotoxicity evaluations of practices recently have been developed, such as UseTox® (Rosenbaum *et al.*, 2008; http://www.usetox.org/), that could be included in a further version of CoHort.

Secondly, the question of references remains critical for the use of CoHort in an advice context. Building a database including data and the references used in the support process with various farmers, such as work times per hectare or a description of innovative practices implemented by some farmers (Salembier *et al*, 2016), would provide a larger basis of knowledge. Sharing this knowledge between farmers during co-design workshops would also help to improve the set of references that technicians could use in the support approach.

Thirdly, changes at the farm level are partly conditioned by or impact the relationship of growers with their neighbourhoods, cooperatives and buyers. For instance, innovations such as pest-exclusion nets affect landscapes (Hunt, 2009), while technical changes at the farm level must be consistent with buyers' specifications in terms of production quantity and quality. Taking into account these stakeholders' preoccupations in the way strategic decisions are discussed and farm scenarios are designed would better orientate farmers in their choices.

6. Conclusion

CoHort has been designed to support strategic thinking as opposed to effective short-term decision making. It helps to assist fruit tree farmers to evaluate the impact of alternative crop management on their own farms before actually changing their practices by including labour, economic and environmental components. CoHort takes into account the farm scale and addresses strategic issues which are rarely taken into account in decision support tools. The co-design approach with technicians and farmers allowed a flexible tool to be built that corresponds to their needs and is adapted to a diversity of farms and scenarios. The support approach allows farmers to consider several sets of new practices, evaluate their impacts on their farms and consider possible evolutions.

Face-to-face discussions between farmers and technicians can be nourished by combining the quantitative analysis of CoHort outputs with the qualitative analysis of the feasibility of scenarios. Many aspects affected by the evolution of a farm can then be considered, including

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

technical, marketing and social issues. CoHort could also be used in collective arenas with farmers, technicians and researchers to redesign the management strategies of diverse fruit farms in a given region. However, since CoHort was tested over a short period, it was not possible to assess the support impact on the effective decisions made by growers regarding their projects. Moreover, some decisions may take into account factors that are not included in Cohort, such as the availability of funds, equipment or inputs to implement the simulated scenarios in the short term.

Acknowledgements

The authors are very grateful to the technicians and apple farmers who agreed participating to the design process of CoHort. They thank Grace Delobel for correcting their written English. This work was funded by the French Agence Nationale de la Recherche under the ALID/Sustain'apple project ANR-13-ALID-004.

De l'accompagnement à l'exploration

Le chapitre 4 présente le processus d'accompagnement développé dans le but de stimuler la réflexion, et d'aider les producteurs à évaluer leurs marges de manœuvre et les impacts d'un changement de stratégie sur leur exploitation. Ce processus, basé sur l'utilisation de l'outil de simulation CoHort, a permis de développer différents types de scénarios avec les producteurs intéressés. Mais tous relevaient d'innovations 'incrémentales' et non de 'rupture'. Pour aller plus loin dans la réflexion sur les alternatives aux pesticides, la méthode a été adaptée pour concevoir et simuler des scénarios de rupture, affectant la structure et le fonctionnement des exploitations, la configuration des vergers et les pratiques. Les producteurs n'ont pas été inclus dans le processus de conception afin de ne pas être limité par leurs contraintes propres et leurs perceptions des changements envisageables.

La démarche mise en place et exposée dans le prochain chapitre à partir d'un cas intégrant un atelier ovin dans une exploitation spécialisée en pomme, s'apparente à un processus exploratoire, où des alternatives *a priori* éloignées du système initial peuvent être simulées et discutées. Le scénario présenté a été détaillé à partir d'une exploitation existante, en mobilisant des connaissances expertes. Les résultats des simulations n'ont pu être présentés et discutés avant le dépôt du mémoire avec ces personnes ressources. Cette étape sera réalisée avant la transformation du chapitre 4 en un article à soumettre à une revue scientifique telle que Agricultural Systems.

Chapitre V. Evaluation ex-ante des effets de scénarios de rupture sur les exploitations arboricoles. Cas de l'introduction d'ovins en verger de pommes en France.

Ce chapitre fera l'objet d'une publication pour la revue Agricultural Systems.

1. Introduction

Le secteur agricole fait actuellement face à quatre types d'enjeux (Meynard *et al.*, 2012) : (i) les impacts négatifs des pratiques agricoles sur l'environnement, la santé et les ressources naturelles, (ii) l'évolution de la demande pour des produits alimentaires et non alimentaires de qualité, en quantité et accessibles pour les populations, (iii) les fluctuations importantes des prix, des revenus des producteurs et de leur qualité de vie, (iv) la nouvelle place de l'agriculture comme productrice de biens mais aussi de services.

En réponse à ces enjeux, les systèmes de production peuvent schématiquement évoluer selon trois processus : Efficience (E), Substitution (S) et Re-conception (R) (Hill and MacRae, 1996; Dupré *et al.*, 2017). L'Efficience consiste à optimiser les pratiques déjà en place, par exemple ajuster les doses de fertilisants aux besoins, limiter la dérive de produits phytosanitaires avec un équipement adapté, baser la date du traitement sur des observations pour cibler le ravageur en fonction de son cycle. La Substitution consiste à remplacer les produits de synthèse par des produits naturels considérés comme moins dommageables pour la santé et l'environnement, par exemple le cuivre pour remplacer certains fongicides, ou la matière organique pour remplacer les fertilisants minéraux. Ces deux directions ne nécessitent pas d'adaptation profonde des systèmes de production (Therond *et al.*, 2017). *A contrario* la Re-conception consiste à modifier des composantes structurantes du système de production, en prenant en compte tout ou partie de l'exploitation et de son environnement. Cela peut impliquer des changements couteux et/ou chronophages : par exemple l'achat de matériel spécifique ou la diversification de cultures pour bénéficier de nouveaux processus écologiques. E, S et R peuvent s'enchaîner progressivement ou se chevaucher au sein d'une même exploitation.

Efficience et Substitution sont les plus employées en pratique car elles sont plus faciles à mettre en œuvre et ont moins d'impacts sur l'exploitation agricole et ses performances (Pissonnier *et al.*, 2016). Mais elles restent fortement tributaires des contraintes présentes dans les exploitations. Reconcevoir les systèmes permet de dépasser ces contraintes, d'ouvrir le champ des possibles, et de considérer de nouvelles pratiques non envisageables par d'autres méthodes (Meynard *et al.*, 2012). Les transitions vers des systèmes re-conçus, aussi appelés systèmes de

rupture ou '*de novo*', sont plus complexes et nécessitent d'être évaluées préalablement pour mieux appréhender leurs effets et mieux organiser la transition.

L'arboriculture fruitière fait rarement l'objet d'exercices de re-conception, alors qu'elle est confrontée à de nombreux enjeux environnementaux, économiques et sociaux. La réduction de l'utilisation des pesticides de synthèse représente un enjeu stratégique, tant en termes environnemental qu'économique (Simon *et al.*, 2011; Pissonnier *et al.*, 2016). Les producteurs ont déjà fait de nombreux efforts à cet égard, par exemple en substituant des produits de synthèse par des méthodes et produits agréés en agriculture biologique (Marliac *et al.*, 2015). Ces efforts atteignent néanmoins leurs limites dès lors que l'aval de la filière réclame des fruits sans défaut cosmétique (Drogué and DeMaria, 2012).

Dans ce contexte, ce dernier chapitre vise à évaluer ex-ante les effets de systèmes de rupture sur les exploitations arboricoles La méthode développée par Pissonnier *et al.* (2017) basée sur l'outil de simulation CoHort sera utilisée pour évaluer les scénarios de rupture conçus. Cette méthode permet de prendre en compte les spécificités des vergers, et des exploitations agricoles. Elle vise à évaluer l'intérêt et la faisabilité d'un tel scénario en termes de réduction des pesticides, de travail nécessaire et de résultats économiques, en comparaison avec la situation initiale.

Le scénario développé s'intéresse à la combinaison, à l'échelle d'une exploitation, d'un atelier de production de pomme et d'un atelier de production ovine. Une telle combinaison associant culture et élevage représente une des voies possibles d'évolution des systèmes de production actuels vers des exploitations plus agroécologiques (Bonaudo *et al.*, 2014). L'association pomme-ovin peut créer des synergies améliorant la durabilité du système, au niveau économique avec la création d'une nouvelle source de revenu, environnemental avec la diminution du recours aux intrants de synthèse, et social avec le développement de nouvelles compétences et d'un nouveau réseau.

2. Matériel et Méthode

2.1.Définition : scénario de rupture

La démarche est basée sur la conception et l'analyse de scénarios à l'aide d'un outil de simulation. Chaque scénario correspond à une configuration d'exploitation caractérisée par les valeurs d'un ensemble de variables d'entrée décrivant sa structure et son mode de gestion (Le Gal *et al.*, 2013). La scénarisation permet de réfléchir sur la base de situations virtuelles, sans

conséquence réelle sur les systèmes étudiés. Elle permet de gagner du temps et de limiter la phase d'expérimentation et d'essai-erreur, toujours risquée à l'échelle d'une exploitation. Une quantité illimitée de scénarios peut être conçue, simulée et discutée dès lors que la démarche et les outils qu'elle utilise le permettent (Lejars *et al.*, 2008).

Une telle démarche a déjà été conçue et utilisée dans un objectif d'accompagnement d'arboriculteurs vers des stratégies alternatives (Pissonnier *et al.*, 2017). Elle est ici adaptée pour concevoir et évaluer des « scénarios de rupture » plus respectueux de l'environnement, qui n'entrent pas nécessairement dans les perspectives actuelles des producteurs et techniciens. Un tel scénario n'est pas défini seulement par des combinaisons de pratiques alternatives relevant de la prophylaxie, désherbage, taille, fertilisation, protection, éclaircissage ou récolte des vergers. Il s'intéresse aux ressources de l'exploitation (foncier, capital, main d'œuvre, équipement), à leur combinaison dans le choix des activités, et à la configuration spatiale ou temporelle du verger (porte greffe, variété, densité, forme des arbres, palissage, système d'irrigation, couvert herbacé) (Simon *et al.*, 2017). Les effets de ces combinaisons aux deux échelles parcelle et exploitation sont évalués tant en termes d'organisation du travail que de performances écologiques, techniques et économiques.

2.2.Règles de conception/évaluation et objectif

L'objectif global de la démarche entreprise, est d'évaluer les conséquences de ces scénarios de rupture sur les exploitations, dans l'optique d'encourager et de mieux prévoir par la suite les transitions vers ce type de systèmes. Les données sur lesquelles s'appuient les simulations tout comme leurs résultats doivent donc être le plus proche possible de la réalité, pour donner du crédit à la démarche. En ce sens, la méthode de conception/évaluation développée respecte cinq grandes règles :

(i) se baser sur des cas d'exploitations réelles afin de rendre la démarche plausible et discuter de manière plus concrète les conséquences des scénarios ;

(ii) fournir un maximum de détails sur les scénarios conçus, dans le but de discuter de leur mise en place réelle, et d'appuyer les discussions sur des résultats proches de la réalité ;

(iii) être flexible pour s'adapter à la diversité des situations rencontrées (Dedieu *et al.*, 2011). La flexibilité permet d'intégrer différentes cultures arboricoles associées ou non à d'autres activités productives selon des combinaisons de ressources variées, et d'imaginer une diversité des scénarios de rupture ;

(iv) impliquer une diversité d'acteurs pour bénéficier de différentes sources de connaissances, d'expériences et de point de vues pour enrichir les scénarios conçus et améliorer leur évaluation. Les producteurs peuvent être inclus ou non dans le processus, selon leur aptitude à s'extraire de leurs contraintes qui pourraient borner les scénarios qu'ils produisent (Lançon *et al.*, 2008) ;

(v) se baser sur un processus itératif d'allers-retours entre phases de conception et d'évaluation, afin d'améliorer et de modifier les scénarios en fonction des contraintes et questions soulevées ou de nouvelles hypothèses (Debaeke *et al.*, 2009).

2.3. Une démarche de conception en sept étapes.

La démarche de Pissonnier et *al.* (2017) a été adaptée en s'inspirant de travaux antérieurs sur les démarches de conception de systèmes de culture (Debaeke *et al.*, 2009) appliquées à l'arboriculture (Simon *et al.*, 2017). Elle se compose de sept étapes visant à concevoir des systèmes de production innovants à l'échelle d'une exploitation arboricole.

La première étape consiste à caractériser le système de production initial pour identifier ses contraintes et opportunités. Cette étape de diagnostic est indispensable à toute démarche de conception. Elle doit prendre en compte plusieurs composantes pour atteindre l'objectif visé et être la plus complète possible (Simon *et al.*, 2017) : le contexte socio-économique de l'exploitation agricole, l'exploitation agricole elle-même (structure, fonctionnement et performances), la configuration spatiale et temporelle du verger, et les pratiques déjà en place.

La deuxième étape vise à identifier les acteurs et sources d'information à même de contribuer à la conception et caractérisation des scénarios. L'origine de ces contributions peut être très diverse : travaux scientifiques des chercheurs, connaissances empiriques des agriculteurs et des techniciens, références puisées dans des bases de données publiques, rapports techniques. Cette combinaison de contributions est importante pour améliorer l'efficacité de la démarche, produire des scénarios solides et hybrider les savoirs scientifiques et pratiques (Vall *et al.*, 2016).

Sur la base du diagnostic et de ces contributions, la toisième étape permet d'identifier les scénarios répondant à l'objectif de la démarche et aux caractéristiques du système initial, notamment ses contraintes et opportunités.

La quatrième étape consiste alors à formaliser les règles de décisions en lien avec le fonctionnement du système scénarisé. Ces règles évoluent au fur et à mesure des simulations réalisées, de manière à parvenir à un fonctionnement cohérent du système représenté. Elles se

traduisent par une liste de pratiques à intégrer au scénario, avec leurs coûts et leurs besoins en main d'œuvre et équipement. Cette étape permet d'identifier les aménagements, modifications et efforts qui seront à réaliser à différents niveaux d'organisation (verger, exploitation, contexte socio-économique) pour le mettre effectivement en place.

Une fois conçu et décrit, le scénario passe dans une cinquième étape par une phase d'évaluation qualitative commune, conduite avec tous les contributeurs afin de vérifier sa cohérence et sa capacité à répondre aux objectifs fixés. Toutes les caractéristiques du scénario (nouvelles pratiques, équipements, investissements, intrants, temps nécessaires et impacts sur les autres pratiques) sont examinées et discutées pour vérifier leur cohérence et corriger d'éventuels manques.

L'étape suivante consiste à évaluer quantitativement les conséquences du scénario sur les performances de l'exploitation agricole choisie, avec l'outil de simulation CoHort dédié aux exploitations horticoles (voir Pissonnier *et al.*, 2017 pour une description détaillée de l'outil). Une exploitation est caractérisée dans CoHort par ses ressources disponibles (équipement, main d'œuvre, foncier, capital), le temps consommé par les activités agricoles et non agricoles, et les pratiques mises en place sur la totalité ou une partie des activités agricoles en prenant en compte les intrants, les équipements utilisés et le temps consommé (Figure 1). A partir de ces données d'entrée, CoHort calcule les performances économiques et phytosanitaire (Indice de Fréquence de Traitement - IFT) de l'exploitation représentée et son bilan mensuel offre-demande en travail.

Lors de la septième et dernière étape de la démarche ces résultats sont utilisés pour discuter l'intérêt et la faisabilité du scénario simulé au regard de l'objectif initial de la démarche. Ces discussions peuvent mobiliser les différents acteurs ayant contribué à la conception et caractérisation du scénario. Elles permettent de modifier certaines variables d'entrée ou de définir de nouveaux scénarios en fonction des résultats obtenus et des questions soulevées.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

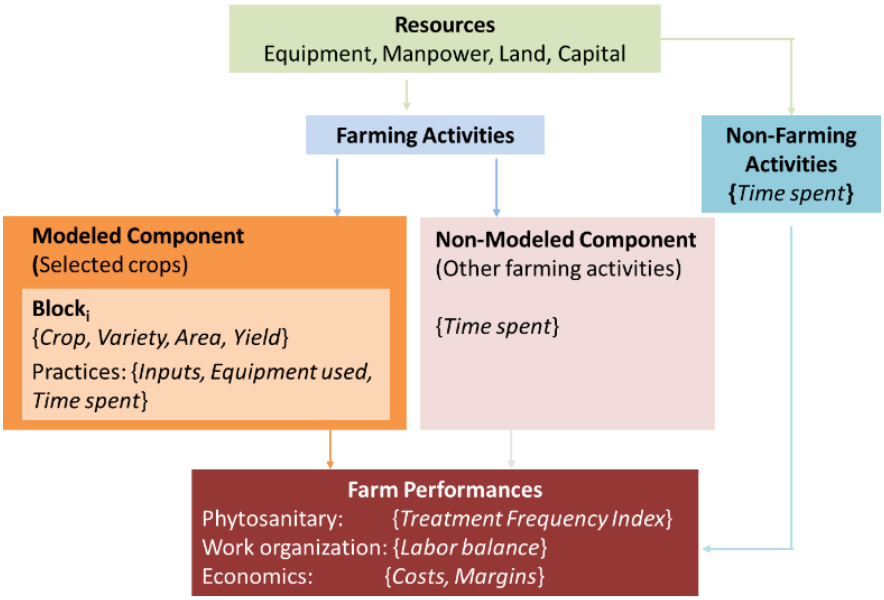


Figure 1. Structure de CoHort (source : Pissonnier *et al.*, 2017)

3. Résultats

3.1.Conception des scénarios (Etapes 1 à 5)

La situation et le scénario initiaux

Le scénario a été conçu sur la base d'une exploitation réelle de 35 hectares spécialisée en pommes, située à 40 kilomètres de Montpellier, et commercialisant sa production auprès d'une coopérative dont l'acheteur principal est la grande distribution. Les critères cosmétiques sur les fruits sont donc très stricts. La production de pommes est la seule activité de l'exploitation. La main d'œuvre comprend le chef d'exploitation, son fils, et deux salariés permanents. Ils constituent la main d'œuvre permanente, qui s'attèle à toutes les opérations décrites dans le tableau 1. La main d'œuvre permanente est disponible 40 heures par semaine soit 18h/ha au total (Figure 2). Les dépassements par rapport à l'offre en mars, mai et juin sont absorbés par l'exploitant et son fils, alors que des saisonniers sont embauchés au moment de la récolte en octobre et novembre. La femme du producteur gère la partie administrative, non comptabilisée dans les coûts de production et le planning.

L'objectif du chef d'exploitation est de produire des pommes à un niveau de rendement élevé en respectant les critères de qualité imposés par les acheteurs de la coopérative, en mettant en place un maximum d'alternatives techniques, tout en limitant les risques de perte de rendement commercialisable. Ces pratiques alternatives comprennent la confusion sexuelle, les nichoirs, les haies autour des vergers, et l'utilisation de pesticides naturels comme la carpovirusine. Mais

il parait aujourd'hui difficile pour le producteur d'aller au-delà de ces pratiques pour réduire l'usage des pesticides s'il veut respecter ses objectifs de rendement et de qualité.

Par souci de simplification et pour tous les scénarios, la partie verger est considérée comme un seul et unique bloc de 35 hectares sur lequel des pratiques identiques sont mises en place. Le détail des pratiques mises en place et les coûts liés à l'atelier pomme sont présentés dans les tableaux 1 et 2. L'IFT total est de 40, 43% est représenté par des fongicides, et 30% par des insecticides (Figure 3). Le rendement moyen est estimé à 60t/ha, vendu à un prix moyen de 340€/t. La main d'œuvre est comptabilisée dans les coûts de conduite et coûte 13€/h pour les saisonniers et 15€/h pour les permanents, le chef d'exploitation et son fils.

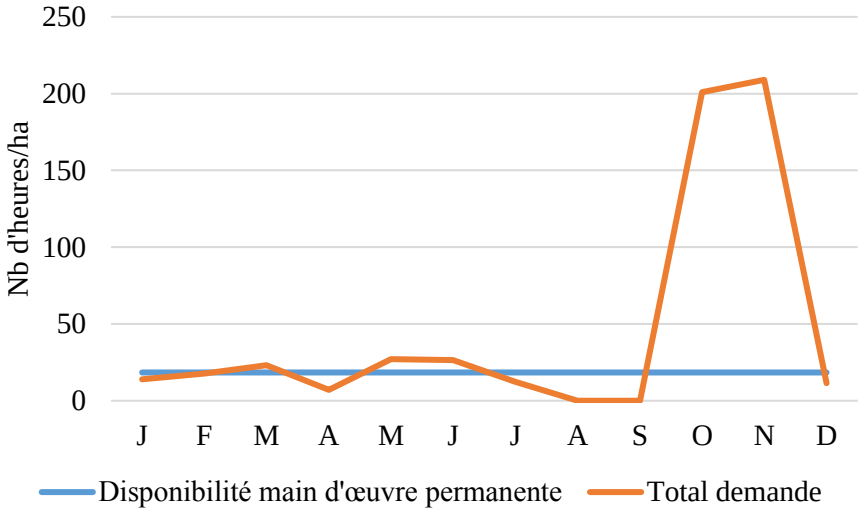


Figure 2. Comparaison entre la disponibilité en main d'œuvre permanente sur l'exploitation et la demande totale en travail.

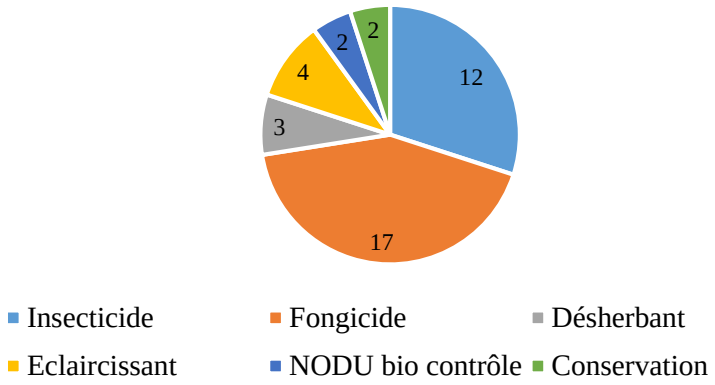


Figure 3. IFT par catégorie de pesticides

Tableau 1. Pratiques mises en place sur le bloc Pommes et temps mensuel nécessaire par hectare.

Pratiques	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Taille	14	18	15				12					
Protection			6	6	6	5						
Eclaircissage*					20	21						
Récolte										200	209	
Entretien matériels												11
Désherbage *			1			1				1		
Fertilisation *			1	1	1							

* Chimique

Tableau 2. Listes des coûts liés à l'atelier pommes, charges variables et fixes.

	Postes de coûts	Coûts (€/ha)
Charges variables	Protection : coût des produits phytosanitaires	1000
	Irrigation	1000
	Désherbage : coût des désherbants + essence	150
	Essence	250
	Fertilisation : coût des fertilisants	300
Charges fixes	Amortissement des jeunes vergers	900
	Amortissement global (matériel)	2000
	Assurance et autres	1000

Objectifs et processus de conception des scénarios de rupture

Le choix et la caractérisation du scénario ont été conduits à partir d'une recherche bibliographique et d'une consultation d'experts, sans interaction avec les producteurs et les techniciens de la coopérative pour ne pas se limiter dans les choix à réaliser. Les producteurs intégrés dans des circuits longs et soumis à des cahiers des charges stricts sont en effet bornés dans leurs pratiques, et peinent à prendre des risques aussi bien réels que fictifs lors de la conception de scénario. Cette démarche « à dire d'experts » a permis de concevoir et valider le scénario en accord avec l'objectif recherché, de fournir des références décrivant les pratiques avec leurs coûts et temps de travaux, d'évaluer les impacts potentiels de ce scénario et de les discuter.

Les recherches ont montré que les vergers intégrant un atelier ovin bénéficient de plusieurs avantages : (i) pâturage et diminution des adventices permettant une diminution voir suppression des herbicides, (ii) fertilisation et amélioration de l'activité du sol par les déjections, (iii) diminution de la pression de maladies et ravageurs par piétinement des feuilles mortes (diminution du stock d'inoculum tavelure), et par ingestion des pommes véreuses (diminution de la population de carpocapses) (Compagnone, 2016).

Concrètement ont contribué des chercheurs spécialisés en production ovine et un technicien appartenant à l'Inra (Institut national de recherche agronomique) spécialiste des systèmes verger-ovins et des systèmes arboricoles en général. Ces apports ont été complétés par des ressources bibliographiques, tels que articles de revues, sites internet, dossiers techniques, des témoignages de producteurs et la consultation d'instituts techniques et expérimentaux.

Peu de références chiffrées existent sur les effets positifs ou négatifs des moutons dans les vergers. Des retours d'expérience ont permis de hiérarchiser les effets les plus probables. Trois scénarios ont été créés correspondant aux trois types d'avantages cités : un premier scénario correspondant à la suppression du désherbage par pâturage des moutons dans les vergers (D), un second scénario correspondant à la suppression du désherbage et de la fertilisation par apport des fèces du troupeau (D+F), un troisième scénario correspondant à la suppression du désherbage, de la fertilisation, de deux traitements anti-tavelure et deux insecticides anti-carpocapse (D+F+CV). Ce dernier scénario présentant des risques pour la productivité des vergers, il a été simulé avec deux rendements différents (respectivement 60 et 55 t/ha commercialisable, correspondants aux scénarios D+F+CVa et D+F+CVb).

Dimensionnement de l'atelier ovin en lien avec la gestion de l'enherbement des vergers

Bien que chaque scénario relève d'une situation virtuelle, nous avons cherché à rendre aussi réaliste que possible sa caractérisation en l'appliquant à l'exploitation réelle choisie.

Dans le but de faire évoluer significativement le fonctionnement de l'exploitation, le troupeau appartiendra au producteur. La première étape consiste à dimensionner le troupeau en fonction de la taille du verger et de son désherbage, tâche principale dévolue à l'atelier ovin. Celui-ci doit demeurer une activité secondaire, et le troupeau de taille moyenne pour éviter (i) la spécialisation de l'exploitation en élevage, (ii) des coûts et temps dédiés au troupeau trop importants et donc une gestion trop compliquée. Les experts s'accordent sur une taille de 200 têtes à ne pas dépasser.

Pour choisir la taille du troupeau, il convient d'abord de déterminer le temps de présence des moutons sur les parcelles. Nous choisissons de faire pâturer le troupeau de la fin de la récolte jusqu'au début des traitements en mars, et en prairie le reste de l'année. Ce pâturage semi-permanent permet de ne pas déplacer les moutons hors des parcelles à chaque traitement phytosanitaire et de ne pas se préoccuper des délais de réentrée des animaux sur les parcelles.

Le troupeau est donc présent sur les vergers pour une durée de 120 jours en moyenne. Quatre blocs de rotation sont créés pour respecter l'organisation spatiale de l'exploitation (Figure 4), et respecter le temps de repousse de l'herbe. Chaque bloc a son propre troupeau et donc sa propre rotation entre différents sous blocs.

Les sous-blocs sont composés de variétés à maturité similaire et donc récoltées au même moment. Cette gestion permet de retirer tous les moutons en même temps d'un même sous-bloc au moment de la récolte. La durée de pâturage sur un sous bloc est déterminée en fonction (i) du délai de repousse de l'herbe, estimé à 20 jours, (ii) d'un chargement moyen de 200 brebis par hectare et par jour de pâturage, référence utilisée en vigne. La taille totale du troupeau nécessaire pour contrôler l'enherbement du verger tout en permettant au troupeau de s'alimenter est alors de 158 têtes (Figure 4).

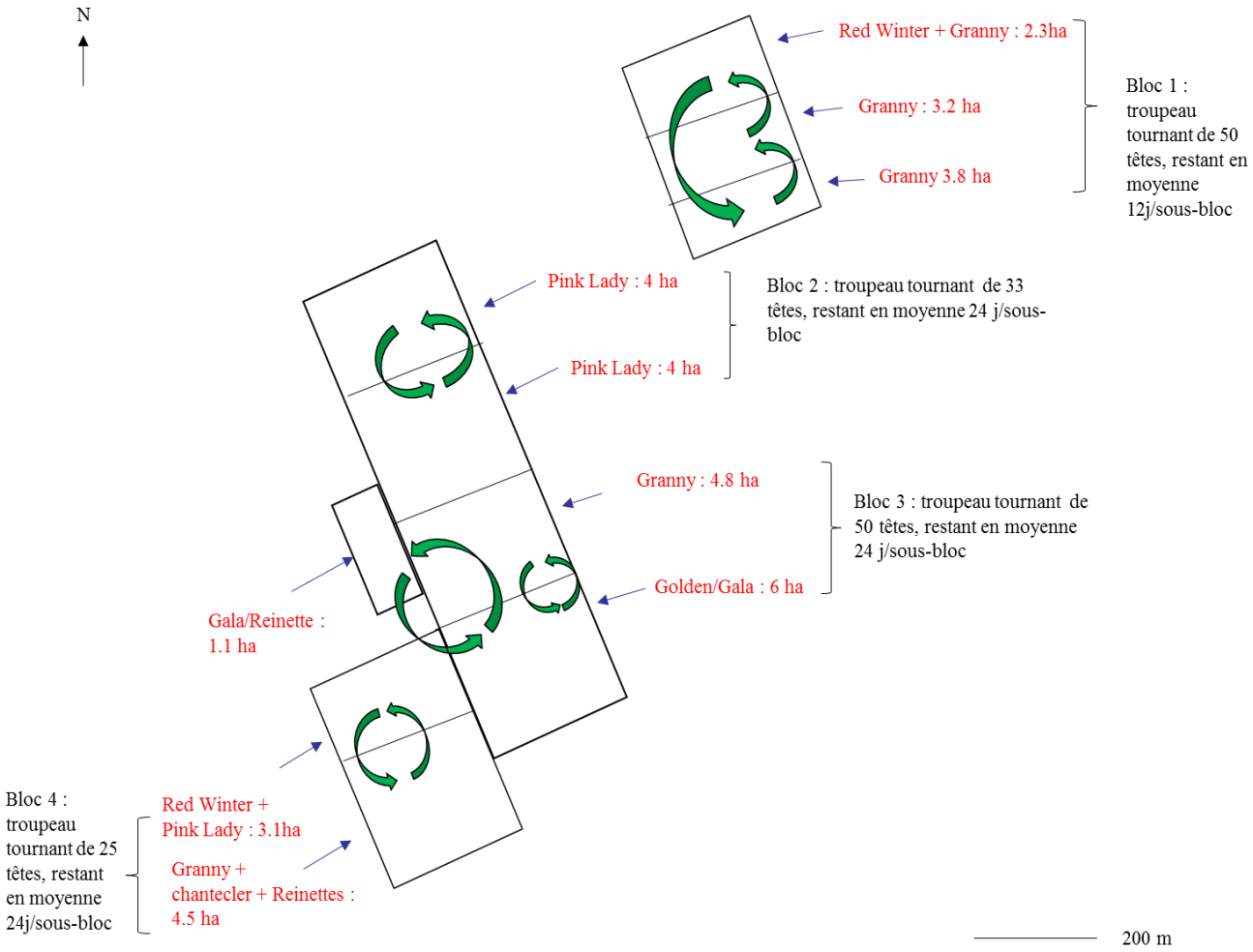


Figure 4. Organisation du pâturage en rotation sur quatre blocs depuis la fin de la récolte jusqu'au début des premiers traitements.

Conduite de l'atelier ovin en lien avec la gestion de l'enherbement des vergers

La race de mouton choisie, Shropshire, est adaptée au pâturage en verger, car réputée pour ne pas s'attaquer aux arbres. Cette race ne pouvant pas être dessaisonnée, les agnelages sont calés sur mars-avril. La dynamique du troupeau inclue le taux de renouvellement des brebis (20%) et un taux de pertes relativement élevé (15%) pour prendre en compte les difficultés de surveillance sur les parcelles excentrées (fuites et mortalité). Des tunnels plastiques servent d'abris et sont disposés sur chaque sous-bloc. Les brebis sont complémentées avec des pierres de sel pour éviter les carences et les attaques sur les troncs, jeunes feuilles ou fruits.

Le pâturage semi-permanent nécessite cependant de louer une prairie, car il n'est pas envisageable d'arracher une parcelle de verger, ce qui diminuerait fortement le chiffre d'affaire. Cette location est possible dans l'environnement de l'exploitation du fait de l'arrachage de

nombreuses parcelles de vigne. Pour limiter la surface à louer il est prévu de compléter l'affouragement par du foin en cours de période.

Dans le contexte climatique de l'exploitation, l'herbe pousse abondamment pendant la période de l'année où les moutons seraient en prairie (Figure 5). C'est pourquoi le troupeau revient ponctuellement pâturer intensivement les parcelles, dès qu'une fenêtre de plusieurs jours sans traitement est possible.

Les agneaux sont commercialisés en vente directe du fait de l'absence de coopérative dans un rayon proche de l'exploitation et l'existence d'une demande à proximité. Un abattoir proche propose d'abattre et conditionner la viande des producteurs, permettant d'éviter des frais en équipement supplémentaires pour le conditionnement et l'emballage sur l'exploitation. Les prix de vente sont de 12€/kg. Le chiffre d'affaire de l'atelier ovin est alors de 18 000€ sur la base de 100 agneaux vendus et 15 kg par agneau.

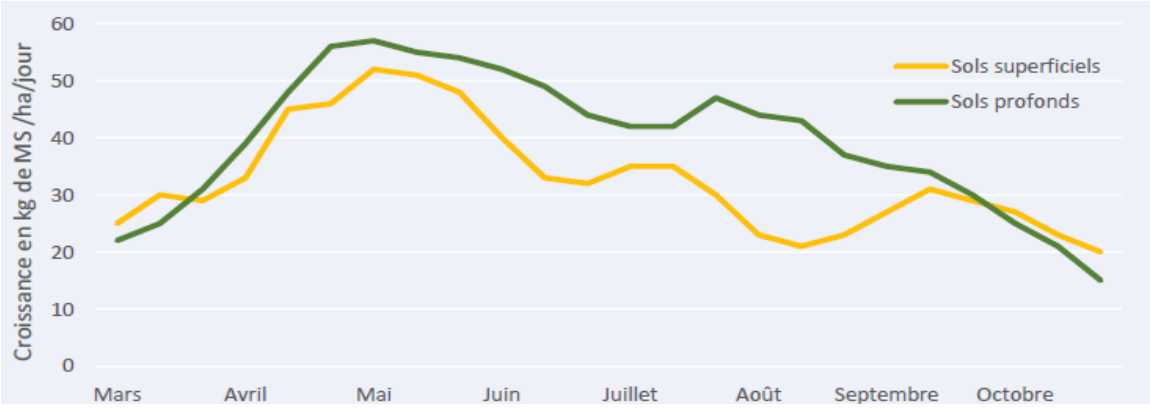


Figure 5. Courbe de croissance de l'herbe en plaine de mars à octobre

Coûts et temps supplémentaires

Les temps et coûts supplémentaires liés à l'introduction de l'atelier d'élevage sont listés dans les tableaux 3 et 4. Deux phases ont été distinguées : la phase d'installation qui nécessite des investissements en intrants et en temps, et la phase de croisière qui nécessite des investissements réguliers et fixes chaque année. Les investissements réalisés pour la phase d'installation sont comptabilisés par la suite en amortissement (sur 10 ans) dans la phase de « croisière ». Un poste de coût « temps d'installation » lié à la main d'œuvre nécessaire pour installer les parcs est ajouté à ces investissements d'installation. Il a été estimé à trois jours complets de huit heures de travail, réalisé par le chef d'exploitation et donc coutant 15€/h. Au total, les amortissements se chiffrent chaque année à 5760€.

Les différentes opérations nécessaires à la gestion de l'atelier ovin ont été recensées et leurs temps de travaux ont été calculés et positionnés mensuellement sur la base des références collectées : surveillance du troupeau ; tonte ; déplacements entre sous-bloc, sur la prairie et à l'abattoir ; livraison de la viande et vente à la ferme ; administration. Au total la conduite de l'atelier ovin nécessite annuellement 865 heures, les deux postes les plus importants étant la surveillance du troupeau (160h) et les tâches administratives (100h).

Tableau 3. Temps de travaux liés à l'atelier élevage pour les 158 têtes.

Nom opération	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Tps unitaire
Vente viande			21	14	21	21	14						3 à 5h/sem
Livraisons			5	5	5	5	5						1à2h/sem
Administratif	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	1h/j pr 5j
Dépl. troupeaux	5	8									5	5	1h/depl
Dépl. Abattoir			6	6	6	6	6						3h/AR
Depl. Prairie			4	4		4			4				4h/depl
Tonte			14										5min/mouton
Suivi/obs	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	2h/j
Total	**61**	**64**	**106**	**85**	**88**	**92**	**81**	**56**	**60**	**56**	**61**	**61**	

Rapport-Gratuit.com

Tableau 4. Liste des coûts supplémentaires liés à l'introduction de l'atelier ovins en phase d'installation et en rythme de croisière

Phase	Coûts	Frais	Nb d'unités	Coût Total (€)
Installation	Moutons	200€/tête	158 têtes	31600
	Tunnels	23€/10m	17	400
	Clôture électrique	1,7€/m	6600m[1]	11300
	Grillage amovible	1,4€/m	1200m	1800
	Electrificateur	200€[2]	1	200
	Tondeuse	300€	1	200
	Petite bétaillère	3000€	1	3000
	Camion frigorifique	Occasion : 6000€	1	6000
	Location prairie	400€/ha/an	5 hectares	2000
	Réservoir d'eau	30€/réservoir	10	300
	Formation élevage	360€	1	360
	Temps d'installation	360€	1	360€
Croisière	Pierre de sels	50€	1	50
	Soins véto	12€/tête	158	1896
	Alimentation	120€/t[3]	38t	4560
	Abattage	35€/tête[4]	100	3500
	Essence abattoir	20€/AR	2AR*4 mois	160
	Essence dépl.	1,14€/L	50L[5]	50

[1] D'après la cartographie des parcelles, 2000m de clôtures seront nécessaires pour le bloc 2, 1600m pour le bloc 1, et 3000m pour les blocs 3 et 4 réunis.

[2] D'après les références, les coûts d'électricité liés à la clôture électrique peuvent être considérés comme nuls.

[3] Les 158 brebis resteront 120 jours sur une prairie de 5 hectares. Sachant que 200 brebis pâturent un hectare en un jour, il faudra amener du foin en complément pour subvenir à leurs besoins. Une brebis mange 2kg de foin/j.

[4] Sur un troupeau de 158 têtes avec 20% pour le renouvellement et 15% de perte/fuite (35% au total non vendu = 100 agneaux vendus chaque année).

[5] La consommation d'un tracteur tractant une bétaillère est estimée à 50L/100km. On estime la totalité des déplacements entre parcelles et prairie à 100km.

Impacts sur la conduite de l'atelier pomme

La configuration du verger n'est pas directement impactée. Le système d'irrigation est déjà surélevé et ne risque pas d'être abîmé par les moutons. La taille des arbres ne sera pas modifiée car les moutons seront absents pendant la période de forte pousse et de fructification et l'herbe sera suffisamment abondante durant les pâturages intensifs pour couvrir leurs besoins

alimentaires. Il n'y a pas de contre-indication sur les variétés plantées donc pas d'arrachage prévu. Le palissage n'est pas à refaire car aucune infrastructure n'est prévue.

Concernant les pratiques, le cuivre sera banni pour tous les scénarios car il est nocif pour les animaux.

Pour le scénario D, les heures de désherbage chimique ont été supprimées (Figure 6, Tableau 5), permettant d'économiser 3 IFT. Pour le scénario D+F, les heures de fertilisation sont économisées en plus des heures de désherbage. Pour le scénario D+F+CV, quatre points d'IFT sont économisés en plus du désherbage. Ce dernier scénario permet d'économiser au total 10h/ha sur l'année, dont 4h/ha au mois de mars (Figure 6), et 590€/ha de charges variables (Tableau 5), sans compter la main d'œuvre, dont le coût diminue proportionnellement avec le nombre d'heures économisées.

Tableau 5. Charges variables économisées par type de scénario par rapport au scénario initial

	Désherbants[1]	Fertilisants[1]	Pesticides[1]	Total
D	150€/ha	-	-	150€/ha
D+F	150€/ha	320€/ha	-	470€/ha
D+F+CV	150€/ha	320€/ha	120€/ha	590€/ha

[1] Essence incluse

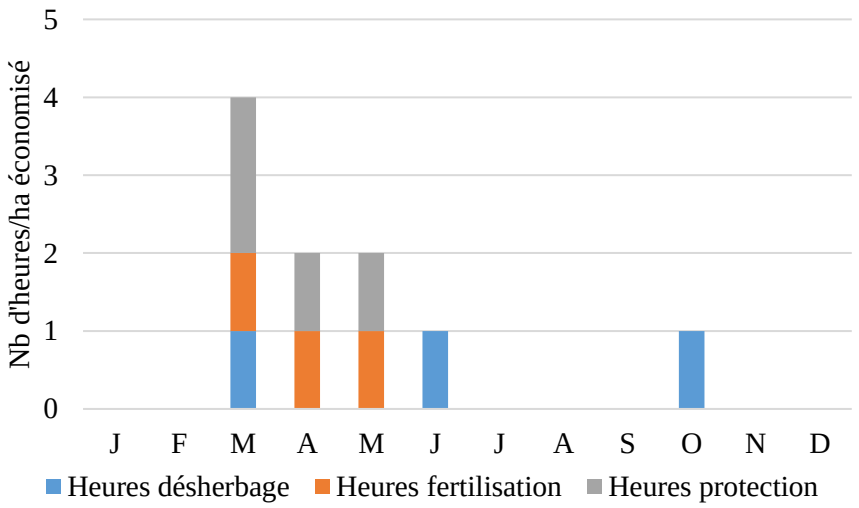


Figure 6. Nombre d'heures économisé par hectare tout au long de l'année sur l'atelier pomme

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

3.2.Evaluation et discussion des scénarios (Etapes 6 et 7)

Les simulations conduites avec CoHort permettent de calculer un certain nombre d'indicateurs : résultats économiques, environnementaux (IFT) et organisation du travail, sur lesquels se base l'évaluation et la comparaison des scénarios testés (Tableau 6, Figure 7).

Résultats économiques

Le scénario D (Désherbage) diminue légèrement la marge nette par rapport à la marge nette initiale. Il permet d'augmenter le chiffre d'affaire mais augmente les coûts de conduite et les charges fixes. L'augmentation des coûts de conduite est due à l'augmentation des charges variables (alimentation, soins, frais d'abattoir pour l'atelier ovin), et à l'augmentation du temps de travail et donc des coûts de main d'œuvre. Les coûts supplémentaires liés à l'élevage ne sont pas complètement compensés par l'augmentation du chiffre d'affaire, et les gains économiques liés à la suppression du désherbage.

Le scénario D+F permet d'augmenter légèrement la marge nette. Les économies réalisées grâce à la suppression du désherbage et de la fertilisation simultanément permettent de diminuer le coût global de la conduite par rapport à la situation initiale.

A rendement pomme identique, le scénario D+F+CVa permet d'augmenter la marge nette de 6%. C'est donc le scénario le plus intéressant au plan économique. Le coût global de la conduite est réduit grâce aux traitements économisés en désherbage, fertilisation et protection (prix des produits + essence + temps de travail). Dans la cas d'une perte de rendement de 5 t/ha (scénario D+F+CVb), la marge nette est diminuée de 21% par rapport à la situation initiale, tout en restant largement positive.

La marge nette devient négative à partir d'un rendement autour de 40,5 t/ha pour la situation initiale, soit une diminution de 33% du rendement. L'introduction d'ovins fait varier ce palier de quelques tonnes seulement : de 39 à 42 t/ha selon les scénarios. Le coût total (charges variables + main d'œuvre + charges fixes) de l'atelier ovin est de 890 €/ha, alors que celui de l'atelier pommes est de 14 020 €/ha. L'atelier ovin ajoute de faibles coûts par rapport à l'atelier pomme et ne rend donc pas la marge nette plus sensible, ni moins sensible aux aléas de rendement. Mais les risques pris sur l'atelier pomme, sous couverts d'hypothèses sur les impacts de l'atelier ovin, peuvent aboutir à une baisse de rendement qui peut impacter fortement les performances économiques globales de l'exploitation, alors que l'atelier ovin génère peu de gains.

Résultats environnementaux

D'un point de vue environnemental, le scénario D permet d'économiser trois herbicides et donc de diminuer l'IFT de 3 points soit une baisse de 8%. Pour le scénario D+F, le gain en IFT reste identique au scénario précédent, les fertilisants n'entrant pas par définition dans le calcul de l'IFT. En plus d'être le meilleur scénario économiquement, le scénario D+F+CV atteint aussi les meilleures performances environnementales puisque l'IFT diminue de 18%. C'est donc le scénario qui permet d'avoir potentiellement le moins d'impacts sur la santé et l'environnement, et est bénéfique pour le producteur lui-même, ses employés, mais aussi la collectivité.

Organisation du travail

Le surplus de travail nécessité par l'introduction de l'atelier ovin est faible par rapport à la demande totale liée à l'atelier pomme (respectivement 865 et 19 220h) (Figure 7). Mais la charge de travail augmente tout de même pour tous les scénarios, et n'est pas compensée par le temps gagné par les suppressions de certaines opérations sur l'atelier pomme. Les opérations concernées ne sont pas celles qui réclament le plus de temps, comparé à la récolte, l'éclaircissage, ou la taille.

Au vu du nombre total d'heures supplémentaires, l'emploi d'une personne à mi-temps sur l'année pourrait être justifié. Mais dans le secteur agricole, la main d'œuvre est difficile à trouver et fidéliser, ce qui peut poser un premier obstacle à la transition vers ce type de système. De plus, les activités concernent à la fois la production, la commercialisation et l'administratif, qui sont trois compétences distinctes et limitent donc les candidats possibles.

Une gestion au mois peut aussi être envisagée, en particulier sur les mois où les besoins dépassent l'offre. En cas de léger surplus comme en février, la main d'œuvre permanente pourrait absorber l'augmentation. En cas de surplus plus important comme en mai/juin (6 à 9% supplémentaire), l'emploi de saisonniers peut être une solution. Sur cette période l'augmentation est due aux activités de vente, livraison, et à l'éclaircissage. L'emploi d'un saisonnier sur ces deux mois permettrait d'aider sur l'une ou l'autre activité.

Conclusions

Dans tous les cas, les ovins permettent d'améliorer l'IFT et donc de diminuer les impacts sur l'environnement et la santé. Ils permettent d'améliorer la situation économique initiale seulement lorsqu'ils remplissent les deux fonctions de fertilisation et de désherbage. Les gains économiques sont surtout dus aux intrants économisés, car le surplus de main d'œuvre

nécessaire à la conduite de l'atelier n'est pas compensé par les quelques heures évitées sur l'atelier pomme. Le scénario permettant d'économiser des fongicides et insecticides est le plus intéressant économiquement mais aussi le plus risqué. Et dans tous les cas ces gains restent faibles. Pourtant, les conséquences sur l'organisation du travail sont importantes. Les ovins réclament des efforts et une organisation spécifique. Plusieurs solutions seraient à envisager : emploi d'une personne à mi-temps dédiée à l'atelier ovin et multitâche, emploi d'un saisonnier sur une période ciblée, ou absorption sur les mois concernés du surplus d'heures, comme cela est déjà le cas pour la situation initiale.

Tableau 6. Comparaison des performances entre les scénarios

	Situation initiale	D		D+F		D+F+CVa		D+F+CVb	
			% var		% var		% var		% var
IFT[2]	40	37	8	37	8	33	18	33	18
Temps de travail total (h)	19 220	19 980	4	19875	3	19770	3	19770	3
Résultats économiques (€/ha)									
Chiffre d'affaire	20 400	20 915	3	20 915	3	20 915	3	19 215	-6
Coût main d'œuvre	7 420	7 745	4	7 700	4	7 655	3	7 655	3
Total charges variables	2 700	2 900	7	2 580	-4	2 460	-9	2 460	-9
Coûts conduite	10 120	10 645	5	10 280	2	10 115	0	10 115	0
Marge brute	10 280	10 270	0	10 635	3	10 800	5	9 100	-11
Charges fixes	3 900	4 065	4	4 065	4	4 065	4	4 065	4
Marge nette	6 380	6 205	-3	6 570	3	6 735	6	5 035	-21

[2]Eclaircissants et désherbants inclus, fertilisants exclus

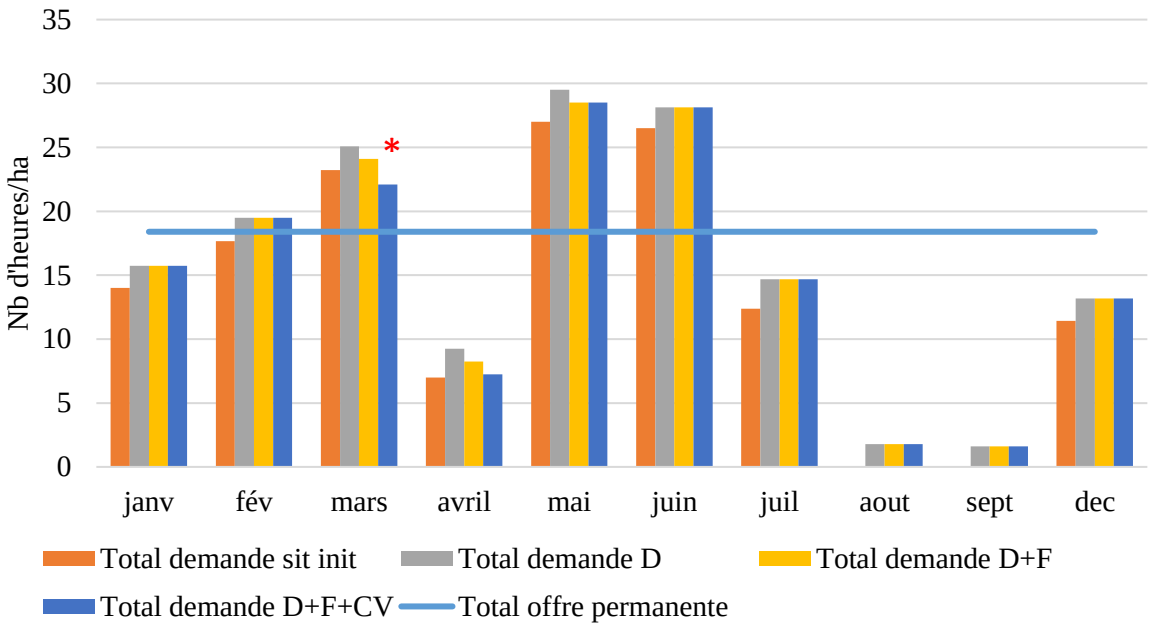


Figure 7. Demande en travail (h/ha) par rapport à l'offre permanente pour les quatre scénarios (mois de récolte exclus car nombres d'heures très élevés par rapport au reste de l'année)
*nombre d'heures/ha inférieur à la situation initiale.

4. Discussion

4.1. L'introduction d'ovins : trois types d'hypothèses formulées

Les hypothèses formulées pour ce scénario d'intégration agriculture-élevage relèvent de quatre catégories : (i) disponibilité des ressources (prairies en location, moutons, fourrages), (ii) existence de débouchés pour la vente de viande, (iii) processus physiologiques et climatiques (pousse de l'herbe suffisante pour nourrir les moutons et respecter la référence de 200 brebis/j/ha, existence d'une fenêtre sans traitements), (iv) conséquences des pratiques sur le désherbage, la fertilisation et la protection. Les deux premiers types d'hypothèse ont été discutés avec des acteurs locaux, qui connaissent le territoire, les débouchés possibles et les ressources, et ont aidé à formuler les hypothèses les plus plausibles. L'échelle du territoire est dans ce cas intéressante pour concevoir et évaluer des scénarios car elle permet de mieux comprendre les processus et les interactions entre les acteurs (Moraine *et al.*, 2016).

La troisième catégorie d'hypothèses pourrait être validée via l'utilisation de modèles prédictifs, capables de prédire la pousse de l'herbe par exemple (Martin *et al.*, 2011). Cette option a déjà été discutée dans l'article précédent pour améliorer CoHort de manière plus globale. Mais l'avantage de CoHort est de pouvoir explorer différentes options en faisant varier les variables d'entrées, ce qui permet de palier à ce problème. Pour le quatrième type d'hypothèse, les effets

des changements de pratiques de fertilisation et protection sont discutables, alors que le désherbage semble avéré (Compagnone, 2016). En effet la fertilisation organique seule est rarement suffisante pour assurer des performances similaires à la fertilisation minérale (Bravo *et al.*, 2012). Aucune référence scientifique n'est disponible pour confirmer les effets sur les bioagresseurs. La phase expérimentale est donc importante et nécessaire car elle permet de mesurer des données et constituer une base de références qui serait réutilisable pour la simulation. La méthode de prototypage proposée par Le Bellec *et al.*, (2012) et basée sur celle de Vereijken, (1997), propose une phase d'expérimentation dans la conception de nouvelles stratégies, mais est par conséquent plus longue dans le temps et réclame des besoins spécifiques : parcelle, intrants, expérimentateurs.

4.2. Les scénarios de rupture : d'autres associations d'espèces

Les associations d'espèces permettent d'optimiser la complémentarité des services environnementaux et des interactions entre bioagresseurs et auxiliaires, d'optimiser l'espace et de fournir un revenu complémentaire aux producteurs (Nair, 2011; Moraine *et al.*, 2016). Elles sont donc recommandées pour la transition vers des systèmes plus agroécologiques. Parmi les associations d'espèces végétales, les vergers-maraîchers et l'association arboriculture et agroforesterie sont les plus communes. L'agroforesterie influe négativement sur les populations de ravageurs et adventices, et positivement sur les populations d'auxiliaires (Pumariño *et al.*, 2015). Des effets bénéfiques sont aussi notés sur l'érosion, la biodiversité et la fertilité des sols (Torralba *et al.*, 2016). Les vergers maraîchers augmentent la biodiversité du verger, permettent de couvrir le sol et de lutter contre les adventices, et augmentent les populations d'auxiliaires (projet SMART : http://www.agroforesterie.fr/SMART/smart-agroforesterie-maraichage-le-projet.php). Pour les associations espèces animales et végétales, les plus courantes associent vergers et ovins, poules ou oies. Ces associations présentent les mêmes avantages que l'association verger-ovin : impacts positifs sur le désherbage, la fertilisation et les bio-agresseurs (Compagnone, 2016). Quel que soit le type d'association, elles peuvent impacter : (i) la configuration du verger via par exemple le type d'irrigation qui devra être adapté, (ii) la structure et le fonctionnement de l'exploitation via la mobilisation de main d'œuvre supplémentaire pour de nouvelles activités ou pour gérer la complexité du mélange d'espèces, (iii) le contexte socio-économique pour trouver les intrants et conseils techniques adaptés, (iv) les pratiques du système initial où le désherbage par exemple la protection devra être adaptée car un même pesticide n'est pas forcément autorisé pour deux espèces différentes. Ces

différents types d'associations offrent des perspectives de simulation intéressantes, pour identifier quel type d'association serait le plus adapté à une exploitation donnée.

4.3. Discussion des résultats des simulations avec des acteurs locaux : points à aborder

Les résultats des simulations doivent être discutés avec les concepteurs des scénarios mais le cercle d'acteurs peut aussi être élargi. Les acteurs à inclure dépendent du type de scénario construit. Dans notre cas, il pourrait être intéressant de discuter à l'échelle d'un territoire, avec des producteurs intéressés par l'introduction d'ovins, des producteurs déjà éleveurs, et différents types de techniciens (spécialisés en pomme ou ovins). Dans le cas d'une mise en place effective, l'échelle du territoire permettrait de réfléchir aux actions concrètes à mener pour encourager les transitions (Moraine *et al.*, 2016). Par exemple de mettre en place une gestion collective des troupeaux, ou de partager les équipements spécifiques.

Certains aspects liés au contexte socio-économique de chaque exploitation devront être discutés lors de la discussion des résultats, car ils pourraient constituer des freins aux transitions et à la mise en place de ces systèmes (Meynard and A. Messéan, 2013). Pour mettre en place et faire perdurer l'élevage ovin, des intrants spécifiques sont nécessaires : moutons, parc de pâturage, bétaillère et compléments alimentaires par exemple. Le producteur devra donc étendre ses fournisseurs pour trouver ces intrants spécifiques qui ne sont pas automatiquement vendus chez ses fournisseurs habituels. De plus, l'élevage nécessite de savoir repérer les bêtes malades, prodiguer les soins nécessaires, nourrir correctement les animaux, assurer le bon déroulement des mises bas (Sraïri and Ghabiyel, 2017). Des nouvelles compétences devront donc être acquises (Cerf and Sébillotte, 1997). Le producteur devra élargir son réseau technique pour recevoir les conseils de personnes compétentes comme des techniciens spécialisés en élevages ou des producteurs éleveurs (Faure and Compagnone, 2011). Il devra également développer une stratégie commerciale spécifique à la vente de la viande, notamment pour vendre en direct et communiquer sur la production pour attirer les clients (Omar, 2014).

4.4. Comment intéresser les producteurs pour concevoir et mettre en place des systèmes de rupture ?

L'intervention des utilisateurs finaux dans les processus de conception de scénarios et d'innovations en général est bénéfique et facilite leur adoption (Dogliotti *et al.*, 2014). Mais dans notre cas, nous avons choisi d'exclure les producteurs du processus de conception. Nous avons pu constater que les producteurs en circuit long n'osent pas prendre de risques, même fictifs, du fait des critères cosmétiques sur les fruits et les prix bas (Drogué and DeMaria, 2012).

La réticence à prendre des risques oriente les choix réalisés par les producteurs et les pratiques mises en place et donc les scénarios conçus (Fairbrother *et al.*, 2016). La conception de scénarios est freinée par le fait que les producteurs ne sont pas prêts à mettre en place concrètement les propositions simulées. Des producteurs hors de ce type de circuit de commercialisation et ayant déjà mis en place des systèmes alternatifs pourraient intervenir dans la phase de conception des scénarios. Leurs systèmes en agriculture biologique ou biodynamique, combinent différents types d'alternatives (filets, haies, nichoirs, traitements naturels, variétés résistantes par exemple), exploitent au maximum les services écosystémiques, favorisent la biodiversité et n'utilisent aucun intrant de synthèse (Marliac *et al.*, 2015). C'est au prix de plusieurs années d'essais, de succès et d'échecs que ces producteurs trouvent finalement l'équilibre, lorsque celui-ci n'est pas altéré par des aléas climatiques. Ils sont donc une source importante d'information, et connaissent le fonctionnement d'une exploitation agricole.

Les résultats des simulations montrent que les performances environnementales peuvent être améliorées, mais les gains économiques sont faibles, et l'organisation du travail fortement impactée. Ces résultats suggèrent que *in fine,* seuls des producteurs réellement intéressés et motivés par l'élevage pourraient être prêts à mettre en place ce type de système. L'intérêt de diversifier sa production ou d'acquérir de nouvelles compétences pourraient être des sources de motivations.

Pour intéresser plus de producteurs à s'orienter vers la conception et la mise en place de ce type de systèmes, d'autres types de mesures pourraient être mises en place. Une évolution de la réglementation sur les produits phytosanitaires autorisés, forcerait les producteurs à trouver des alternatives (Storck *et al.*, 2017), mais peut être un peu brutale. Des incitations économiques sur la prise de risque et la mise en place d'alternatives pourrait aussi stimuler la réflexion (Brewer *et al.*, 2004).

5. Conclusion

L'adaptation de la méthode développée dans le chapitre précédent pour accompagner les producteurs dans leurs réflexions sur des changements de stratégie, a permis d'utiliser CoHort en situation exploratoire. En s'éloignant des contraintes imposées par les acheteurs, et en excluant les producteurs de la réflexion, un scénario de rupture impliquant des modifications profondes du fonctionnement de l'exploitation agricole a pu être conçu simulé et discuté. La simulation montre l'importance de prendre en compte les performances économiques mais

surtout l'organisation du travail à l'échelle de l'exploitation, qui peuvent être fortement modifiées. La prochaine étape est d'organiser une restitution avec des producteurs afin d'aborder différents points liés au contexte socio-économique pouvant jouer un rôle dans l'adoption de ce type de scénario. Les travaux futurs pourront simuler d'autres types de scénarios de rupture sur d'autres types d'exploitations afin d'explorer les solutions les plus pertinentes selon le fonctionnement et les ressources de chaque exploitation. La partie expérimentale reste cependant nécessaire et complémentaire à la simulation, en particulier pour les scénarios de rupture qui peuvent parfois manquer de références sur les impacts des pratiques.

Rapport-Gratuit.com

Chapitre VI. Discussion générale

1. Une démarche combinant plusieurs échelles

1.1. Combiner analyse des pratiques et de l'exploitation agricole, pour une meilleure compréhension des processus et des freins aux transitions

Point de départ de cette étude, l'analyse des pratiques à l'échelle de la parcelle a permis de (i) décrire leur diversité et leurs liens, tels que les différents types de pesticides utilisés et les pratiques alternatives mises en place, (ii) formaliser cette diversité en regroupant les parcelles en types homogènes (Marliac *et al.*, 2015), (iii) analyser les effets de ces pratiques sur l'environnement en utilisant différents types d'indicateurs de fréquence, toxicité et efficience (Mghirbi *et al.*, 2015), (Pissonnier *et al*, 2017).

Combiner cette analyse descriptive avec la compréhension des objectifs et stratégies poursuivis par les agriculteurs à l'échelle de leur exploitation agricole permet de relier les pratiques à leurs déterminants. La prise en compte de cette échelle exploitation présente plusieurs intérêts. Elle permet de mieux cerner les problématiques auxquelles les producteurs ont à faire face et de traiter des questions mettant en jeu la durabilité des filières. Quelles sont par exemple les conséquences des demandes des marchés sur la gestion de la production agricole, du « fruit parfait » aux stratégies de protection des vergers ?

La prise en compte de l'échelle exploitation permet également de co-construire avec les producteurs des innovations et technologies qui seront plus facilement transférables et utilisables. Les contraintes de mise en place, d'utilisation ou de maintenance qui peuvent surgir au sein de l'exploitation du fait du manque de ressources ou d'une organisation particulière seront préalablement identifiées (Su and Moaniba, 2017). Prendre en compte l'exploitation agricole dans les réflexions permet donc de pointer des freins et leviers à la mise en place de nouvelles pratiques, et d'adapter les mesures ou innovations proposées. Cette étude illustre cette approche à travers (i) l'identification des déterminants des pratiques de protection en fonction du fonctionnement, de la structure et du contexte socio-économique de l'exploitation agricole, (ii) la formalisation de la diversité des logiques et stratégies des exploitations regroupées en trois types et quelques sous-types, (iii) la mise en évidence des freins aux transitions, tel que la demande des marchés et l'organisation du travail interne à l'exploitation (Navarrete *et al.*, 2014; Pissonnier *et al.*, 2016).

Ce type d'approche est générique et peut être appliqué à tous types de systèmes de production (Unay Gailhard and Bojnec, 2015). Mais il est aussi très chronophage (Pissonnier *et al.*, 2016). L'analyse des pratiques nécessite une collecte de données conséquente. Elles peuvent être disponibles comme dans notre cas avec les calendriers de traitements, ou peuvent nécessiter des dispositifs dédiés comme les enquêtes conduites avec les producteurs. Les données issues des enquêtes permettent d'identifier les pratiques supplémentaires mises en place et non indiquées dans les calendriers de traitements et d'analyser les processus de gestion en lien avec l'exploitation agricole et son contexte (Bernard *et al.*, 2011).

1.2.L'accompagnement et l'exploration par la simulation : deux processus complémentaires pour aider à la réflexion stratégique

Initialement conçu pour fournir une aide à la réflexion et à la discussion entre producteurs et techniciens, CoHort a été utilisé dans trois types de contexte : individuel, collectif et en laboratoire. Chaque modalité d'usage présente des intérêts et limites.

La simulation en contexte individuel producteur-chercheur ou technicien s'intègre dans un processus d'accompagnement des producteurs vers des évolutions de stratégies. Il s'agit d'un processus de recherche-action partant des questionnements des producteurs et de leur contexte spécifique, afin de répondre directement à leurs besoins et de les accompagner dans leurs réflexions stratégiques (Le Gal *et al.*, 2013). L'apprentissage est donc double : pour les producteurs qui peuvent réfléchir à leur situation actuelle, aux évolutions possibles de leurs stratégies et des conséquences sur leur exploitation ; pour les chercheurs qui peuvent (i) acquérir des connaissances sur le fonctionnement des exploitations et la manière de raisonner des producteurs, (ii) mieux identifier leurs problématiques, (iii) améliorer le processus d'accompagnement en lui-même (Moraine *et al.*, 2016). Ce processus a permis de concevoir et discuter des scénarios d'innovation incrémentale correspondant à des évolutions progressives des stratégies des producteurs.

Des ateliers de co-conception collective ont été organisés pour aller plus loin dans la réflexion et simuler des scénarios de changement plus profond, dit « de rupture », visant une réduction drastique de l'usage des pesticides de synthèse (zéro usage). L'objectif était de profiter des compétences et connaissances de différentes professions pour créer de tels scénarios et d'en discuter les conséquences sur les exploitations agricoles sur la base des simulations réalisées à l'aide de CoHort (Carberry *et al.*, 2002). Quatre types d'acteurs étaient représentés : des chercheurs spécialisés sur les expérimentations et les méthodes alternatives aux pesticides en

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

arboriculture, des chercheurs spécialisés sur le fonctionnement des exploitations agricoles, des producteurs, et leurs techniciens. Le déroulement des ateliers n'a pas permis de développer ces scénarios de rupture sur la base des exploitations présentes, les producteurs paraissant trop attachés à leur contexte et contraints par leurs caractéristiques socio-économiques (Drogué and DeMaria, 2012). Ils estimaient en effet ces scénarios trop risqués et mettant en danger la durabilité économique de leur exploitation. De plus, la moitié des chercheurs présents et les techniciens n'étaient pas familiers de l'approche « exploitation agricole ». Ils ont eu des difficultés à se saisir de cet objet et n'ont pas réussi à proposer des aménagements des pratiques alternatives quand des contraintes liées au fonctionnement ou à la structure de celles-ci étaient soulevées.

Face à cette difficulté, nous avons conçu des scénarios « en laboratoire », sans l'intervention de producteurs. Cette modalité a permis de s'extraire des contraintes soulevées par les producteurs lors de la phase de conception du scénario (Lançon *et al.*, 2008). La méthode a été construite de façon à bénéficier de différents types de connaissances et compétences et d'être au plus proche du fonctionnement d'une exploitation réelle pour être plausible. Cette méthode a permis de créer des scénarios de rupture, incluant de nouvelles activités comme l'élevage et bouleversant l'organisation du travail initiale. Mais sa principale limite actuelle est de ne pas être suffisante en elle-même pour développer l'intérêts des producteurs envers les scénarios de rupture.

Ces trois étapes de simulation ont permis de mettre en place deux processus complémentaires : un processus d'accompagnement des producteurs dans leurs réflexions par rapport à leurs questionnements, et un processus d'exploration des évolutions possibles des systèmes sur le long terme grâce aux scénarios de rupture. Ces deux approches d'accompagnement et d'exploration offrent une vision plus complète des scénarios possibles pour diminuer l'usage des pesticides.

2. Produire des pommes sans pesticide, un objectif réaliste ?

2.1.Place de la protection dans les préoccupations des producteurs

La protection en arboriculture est une composante centrale de la conduite des vergers. Mais son coût au regard d'autres postes (main d'œuvre pour la taille et la récolte) est faible. Les risques encourus en cas de mauvaise maitrise des attaques face à la faiblesse des marges réalisées par kg de pomme commercialisé *via* les circuits longs, conduisent les producteurs à opter pour des

pratiques « protectrices » qu'ils remettent difficilement en question (Pissonnier *et al.*, 2016). Les problèmes de main d'œuvre leur paraissent plus problématiques tant ils peinent à trouver du personnel compétent et à le fidéliser dans la durée. Les problématiques variétales et de renouvellement du verger sont aussi primordiales car les arbres sont plantés pour 10 à 15 ans (Simon *et al.*, 2017). Une erreur de variété, inadaptée à la pression des ravageurs et maladies de la région ou aux débouchés commerciaux, peut mettre en danger la durabilité économique de l'exploitation.

Le fait que les producteurs soient préoccupés par d'autres problématiques que la protection constitue un frein au développement et à la mise en place de pratiques alternatives, et éloigne l'objectif du « zéro pesticide ». En conséquence, la démarche a dû être adaptée pour prendre en compte ces problématiques, bien qu'éloignées du sujet de thèse initial : CoHort a été construit de sorte à pouvoir détailler l'intégralité de l'itinéraire technique, sans spécificité pour la protection.

2.2.Les systèmes alternatifs, quels effets sur les performances technico-économiques ?

Un des freins à la mise en place de méthodes alternatives est le risque de diminuer en rendement et qualité et de mettre en danger la durabilité économique de l'exploitation si ces pertes ne sont pas compensées par des prix au producteur plus élevés. Sur ce thème du lien entre l'usage des pesticides et les performances des exploitations, la communauté scientifique ne s'accorde pas.

Un étude publiée en mars 2017 visant à éclairer ces débats et relayée par les médias nationaux (http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/02/27/agriculture-pourquoi-la-reduction-des-pesticides-est-possible_5086364_3244.html) a montré que sur un échantillon de 946 exploitations en grandes cultures, il n'y avait aucun lien entre l'IFT et la profitabilité/productivité pour 77% des cas. Le deuxième résultat phare de cette étude est de montrer qu'une réduction de 42% en moyenne de l'IFT est possible sans affecter les performances économiques (Lechenet *et al.*, 2017).

Mais les résultats ne sont pas forcément extrapolables à l'arboriculture fruitière. L'IFT moyen de l'échantillon était de 3,1 et représenté à 49% par des herbicides. Les problématiques sont donc différentes. De plus, les marges de manœuvre pour diminuer l'usage des pesticides sont différentes car, d'une part, les produits des grandes cultures sont transformés et subissent donc moins de pression cosmétique et, d'autre part, ce type de système bénéficie avec la rotation des cultures d'un levier supplémentaire de lutte contre les maladies et ravageurs.

Des études en arboriculture comparant différents modes de production montrent des résultats plus contrastés. (Simon *et al.*, 2011) soulignent le poids de la variété : les moins sensibles aux maladies ne présentent pas des rendements moins élevés pour les systèmes bas intrants. (Rozman *et al.*, 2013) trouvent des rendements inférieurs de 4 à 9% pour leurs systèmes allégés en pesticides. Au sein d'une même étude, les résultats peuvent différer selon les années (Peck *et al.*, 2006). Dans tous les cas, il est très difficile d'isoler l'impact des pesticides sur le rendement, ce que confirme nos résultats tirés de l'analyse de la base de données « traitement » vu la faiblesse de la relation entre IFT et rendement (0,21) (Pissonnier et al). Ce type d'étude devrait être conduit sur un échantillon plus important, sur plusieurs années et à l'échelle du territoire national pour être extrapolé.

2.3.Les circuits de commercialisation, contrainte ou solution ?

Ces études s'accordent néanmoins à dire que les transitions doivent être accompagnées et sont synonymes de complexification des exploitations et redéfinition des filières (Lechenet *et al.*, 2017). En circuit long, les exportateurs ou GMS fixent un certain nombre de critères auxquels doivent correspondre les fruits, et qui dictent les variétés et pratiques à mettre en place (Figure 1). Ils réclament des variétés précises pour répondre à leur critère de transport et conservation. Le risque d'être déclassé et de perdre de l'argent est trop important, et amène les producteurs à mettre en place des pratiques minimisant les risques et maximisant le rendement commercialisable. Ce circuit présente donc pour eux des marges de manœuvre limitées mais il leur permet d'écouler des volumes de production importants, à des prix par contre peu rémunérateurs.

En parallèle existent des systèmes de production alternatifs en agriculture biologique et /ou biodynamique (Marliac *et al.*, 2015). Ces systèmes ont généralement un mode de commercialisation différent : vente en circuit court dans des magasins de producteurs, à la ferme, sur les marchés forains ou en AMAP (Gonçalves and Zeroual, 2016). Ces circuits nécessitent un investissement en temps, voire en matériel, mais permettent de compenser les diminutions de rendement et l'éventuelle moindre qualité des fruits (calibre, tâches, piqures) par des prix plus rémunérateurs qu'en circuit long. Ce type de commercialisation est-il pour autant plus propice au développement de pratiques alternatives ?

Il s'avère difficile d'évaluer les effets des circuits courts sur les pratiques car (i) ce concept couvre une grande diversité de stratégies commerciales sans lien strict avec des modes de production, (ii) les études s'intéressent généralement à un seul type de circuit court, sur des cas

très particuliers difficilement généralisables (Mundler and Laughrea, 2016). Les études constatent cependant que les circuits courts regroupent plus de producteurs certifiés biologiques, et que la proximité avec le consommateur et la nécessité de se démarquer des chaines de distribution classiques encouragent les producteurs à mettre en place des pratiques plus respectueuses de l'environnement (Gilg and Battershill, 2000). Mais hors certification « agriculture biologique » on y trouve aussi des modes de production intensifs utilisant des produits de synthèse (Pissonnier *et al.*, 2016).

Même s'ils participent au développement de pratiques alternatives les circuits courts représentent aujourd'hui une minorité des volumes écoulés. L'intégralité de la production pourrait difficilement être vendue par ce biais à moyen terme, car la grande distribution possède la majorité des parts de marché. On pourrait d'ailleurs s'interroger sur les impacts énergétiques et carbone de formes de commercialisation multipliant les transports individuels sur de faibles quantités de produits.

Les circuits courts semblent néanmoins montrer que la proximité avec le consommateur peut jouer un rôle dans la mise en place d'alternatives. Des initiatives de ce type ont déjà été mises en place dans les chaines de grandes distribution, où des producteurs sont parfois invités à mettre en avant leurs produits. Les mécanismes à l'origine des pratiques alternatives dans ce type de circuit pourraient inspirer des solutions pour d'autres circuits de commercialisation.

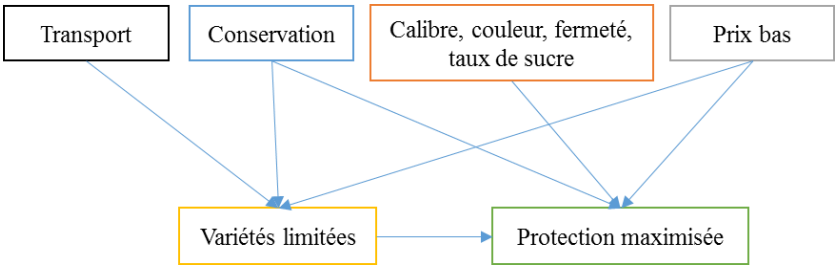


Figure 1. Critères influençant la variété et les pratiques de protection en circuit long

→ Influence

2.4. L'agriculture numérique et les nouvelles technologies : l'exploitation agricole de demain ?

Le développement des technologies numériques en agriculture permet, d'une part, de mieux connaitre la parcelle et les cultures qu'elle supporte grâce à des outils de mesures (satellites, capteurs) fournisseurs de données diverses et nombreuses, d'autre part, de robotiser et automatiser certaines tâches grâce au développement de nouvelles machines et robots. En agriculture de précision, l'acquisition de nouvelles données permet d'adapter les doses des

produits aux observations et ainsi de réduire les intrants, donc les coûts de production et les impacts environnementaux (De Baerdemaeker, 2013; Oberti *et al.*, 2016). Par exemple grâce aux mesures dans le sol, la fertilisation et l'irrigation peuvent être adaptées. Grâce aux données météorologiques, les risques de développement d'une maladie ou d'un insecte sont mieux estimés et prévus. La robotisation et l'automatisation des tâches permettent de résoudre les problématiques de main d'œuvre, importantes en arboriculture qui est chronophage. En pomme, les recherches actuelles portent par exemple sur le développement d'un système d'aspersion de pesticides sur la frondaison (Figure 2). Ce système permet d'intervenir plus rapidement, sans devoir utiliser le pulvérisateur, et d'optimiser les doses et quantité de produits appliquées au plus près de l'arbre, sous réserve d'adapter le système d'irrigation.

Ces nouvelles technologies pourraient constituer l'exploitation arboricole du futur, car elles répondent aux problématiques de main d'œuvre et d'optimisation de l'utilisation des intrants. Les producteurs utilisateurs de ces nouvelles technologies devront acquérir de nouvelles compétences, notamment dans la gestion des connaissances sur leurs parcelles. Leurs rôles, tâches et processus de décision devraient évoluer en conséquence. Toutes les exploitations ne pourront probablement pas investir dans ces nouvelles technologies et s'adapter à leur fonctionnement, au vu de la diversité des ressources qu'elles possèdent (Pissonnier *et al.*, 2016). Plusieurs trajectoires pourraient donc continuer à exister et devraient être prises en compte par les politiques agricoles et les recherches visant à faire évoluer les pratiques (Dupré *et al.*, 2017). L'application de la démarche utilisée dans cette étude à un scénario 100% mécanisé, voire robotisé pour certaines tâches, apporterait des éléments concrets à cette réflexion.

Figure 2. Aspersion de pesticides sur frondaison (source : GoodFruit)

3. Quels acteurs impliqués dans les processus de transition ?

Les producteurs ne doivent pas être les uniques cibles des démarches développées pour encourager le passage à des systèmes de production utilisant peu ou pas de produits de synthèse.

Comme l'a montré cette étude, les phénomènes de verrous socio-techniques se rencontrent tout au long de la filière (Guichard *et al.*, 2017).

3.1.Le rôle des GMS et des consommateurs : accepter les défauts cosmétiques pour un prix identique et promouvoir les variétés tolérantes/résistantes

Les GMS ont influencé les pratiques des producteurs via leurs cahiers des charges, et ont participé à la mise en place des premières pratiques de protection intégrée. Mais leur implication future est questionnable (Haynes *et al.*, 2010). Pour aller plus loin dans la mise en place de pratiques moins dépendantes des pesticides, une évolution des cahiers des charges semble nécessaire, en particulier pour abaisser le seuil d'exigence cosmétique. Quelques tâches ou piqures n'affectant pas la qualité sanitaire ou gustative des fruits pourraient être acceptées et permettraient d'alléger une partie de la protection. Mais malgré un relâchement des critères cosmétiques, le prix d'achat ne doit pas diminuer, car il déjà très faible et couvrant à peine les coûts de production. Les nouvelles campagnes de valorisation des fruits moches réalisées par Intermarché (Figure 3) partent d'une bonne initiative. L'objectif premier de cette démarche est d'éviter le gaspillage alimentaire, mais pourrait aussi servir à démocratiser des fruits pour l'instant « hors norme » mais d'une qualité gustative et sanitaire identique. Mais elles proposent des prix très bas pour ces fruits, qui sont issus des écarts de tri et récoltés à perte.

Les consommateurs sont-ils prêts à accepter des défauts pour le même prix ? Bien que les comportements des consommateurs soient très difficiles à étudier et prédire de par leur grande diversité, (De Hooge *et al.*, 2017) ont montré que certains types de consommateurs sont prêts à acheter des fruits non parfaits. Ce type de comportement dépend de leur âge, nationalité, valeurs, engagement environnemental et l'effet perçu de leurs actions. Malgré cela, l'acceptation d'une tâche reste encore très limitée et un défaut de couleur est perçu comme non attractif et ayant des incidences négatives sur la qualité gustative et sanitaire du fruit. En conséquence, l'acte d'achat n'est réalisé que si les prix sont plus faibles.

Même dans le cas où la qualité cosmétique des fruits reste la même, compter sur la volonté des consommateurs à payer plus cher des produits à meilleure performance environnementale demeure aléatoire car, d'une part, celle-ci dépend du genre, de l'éducation et des revenus mensuels du consommateur (Wang and Huo, 2016), d'autre part, les grandes tendances montrent que la part de l'alimentation dans le budget des consommateurs diminue (https://www.insee.fr/fr/statistiques/1379769), pour financer d'autres types de produits et services.

Promouvoir de nouvelles variétés pour développer les variétés tolérantes et résistantes permettrait aussi aux producteurs d'alléger le nombre de traitements. Mais les variétés résistantes ont des performances très variables (Peck *et al.*, 2006; Simon *et al.*, 2011). La Reine des Reinettes par exemple est tolérante à la tavelure mais plus difficile à conduire. La taille, plus complexe, prend plus de temps et son rendement est plus faible, ce qui augmenterait son prix de vente.

Des efforts sont donc nécessaires pour trouver des moyens: (i) d'éduquer les consommateurs et de les aider à réévaluer leur perception du sain et de la qualité en lien avec la qualité visuelle (De Hooge *et al.*, 2017), (ii) faire comprendre aux consommateurs que la qualité des denrées alimentaires n'est pas un dû et peut être associée à des coûts d'achat plus élevés.

Figure 3. Campagne de publicité Intermarché pour la consommation de « fruits moches »

3.2. Une meilleure répartition du prix à l'échelle de la filière

Ces constats questionnent le « juste prix » proposé au producteur, et donc la distribution de la valeur dégagée lors de la vente d'un produit sur l'intégralité de la filière. Une meilleure répartition de la valeur permettrait aux producteurs d'avoir une marge de manœuvre économique plus importante pour faire évoluer leurs pratiques. Ce débat récurrent dans le secteur agricole fonde également les états généraux pour l'alimentation lancés par le nouveau Président de la République, qui visent à « permettre aux agriculteurs de vivre dignement de leur travail » tout en accompagnant les transitions vers des modes de production plus durables (http://agriculture.gouv.fr/egalim-pourquoi-des-etats-generaux-de-lalimentation). L'origine de ces réflexions provient des crises laitières des dernières années, qui menacent la durabilité des

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

exploitations laitières, en particulier dans l'Ouest de la France. Les éleveurs estiment leur juste prix, censé couvrir leurs coûts de production, autour de 0,35€/l alors qu'en 2016 il ne dépassait pas les 0,30€/l. Les intermédiaires sont souvent pointés du doigt, et perçus par les consommateurs comme captant une part importante de la valeur créée (Busch and Spiller, 2016). Une récente étude de l'association de consommateurs UFC- Que choisir pointant les sur-marges que la grande distribution dégagerait sur les produits agricoles biologiques ne peut qu'alimenter la controverse en ce sens (http://www.lemonde.fr/economie/article/2017/08/29/la-grande-distribution-fait-ses-choux-gras-du-bio_5177856_3234.html). Une meilleure transparence de la distribution de la valeur créée semble donc nécessaire pour réfléchir à l'amélioration de la rémunération des producteurs leur permettant de couvrir leurs coûts de production et se dégager un salaire. Cependant cet objectif se heurte à deux obstacles majeurs : d'une part, le peu d'appétence des intermédiaires pour dévoiler leurs coûts de production et marges, informations stratégiques s'il en est, d'autre part, la diversité des producteurs et de leurs coûts de production qui rend la notion de « juste prix » difficile à évaluer.

Dans ces débats, le rôle du consommateur prend donc toute son importance dans la mesure où ses choix d'achat conditionnent pour une bonne part les dynamiques amont. Ainsi, en réponse à ces besoins de meilleure répartition de la valeur en particulier vers les producteurs, une marque a été créée par et pour les consommateurs : « la marque du consommateur » (https://lamarqueduconsommateur.com). Le site propose aux consommateurs de créer leur propre produit en répondant à un questionnaire portant sur le packaging, le prix, le contenu du produit, et la manière dont il est produit. La Figure 4 présente un exemple de questionnaire créé pour le jus de pomme de la marque. L'objectif global est de proposer des produits de qualité et responsables d'un point de vue social et environnemental. Le collectif se charge ensuite de trouver les partenaires prêts à intégrer la démarche pour produire en respectant les critères votés par les participants au questionnaire.

Rapport-Gratuit.com

JUS DE POMME CQLP résultats des votes

Nb de participants: 21018 **Prix sollicité : 1,62 €**

Rémunération des producteurs

Réponse	#	%
rémunération qui permet au producteur de se payer convenablement	9666	46.0%
rémunération qui permet au producteur de se payer convenablement et de profiter de temps libre	7389	35.2%
rémunération qui permet au producteur de ne pas perdre d'argent	2781	13.2%
alignement sur le cours mondial (non rentable)	1180	5.6%

Origine des pommes

Réponse	#	%
France	19451	92.5%
sans importance	1565	7.5%

Variété des pommes

Réponse	#	%
mélange de variétés identifiées	10314	49.1%
sans importance	5979	28.4%
variété unique, jus de cru (à partir de novembre 2017)	4722	22.5%

Type de culture

Réponse	#	%
ecoresponsable (ex. charte ANPP)	12842	61.1%
biologique (à partir de novembre 2017)	7087	33.7%
intensive (avec engrais et pesticides)	1087	5.2%

Type de jus

Réponse	#	%
Pur jus non filtré (trouble)	12502	59.5%
Pur jus filtré	8423	40.1%
Jus à base de concentré	60	0.3%
nectar (jus à base de concentré, eau et sucre)	33	0.2%

Emballage

Réponse	#	%
brique haute avec bouchon	10577	50.3%
brique standard sans bouchon	5434	25.9%
bouteille en verre	4030	19.2%
bouteille en plastique	977	4.6%

Figure 4. Questionnaire réalisé par la marque du consommateur pour un jus de pomme

3.3.Le rôle des médias : une meilleure communication sur les pratiques des producteurs

Les enquêtes réalisées au cours de cette thèse ont montré que les producteurs souffrent de l'image de « pollueurs » diffusée à travers les médias. Ce constat témoigne de la difficulté de la profession en général à communiquer autour de la problématique des pesticides et des efforts

déjà réalisés, mais aussi du peu d'efforts que fournissent les médias pour tenter de comprendre les processus qui amènent les producteurs à utiliser des pesticides, et rendre compte de la diversité des situations et des efforts déjà fournis (Figure 5). Améliorer la communication sur ces thématiques contribuerait à renouer le dialogue entre la société et le monde agricole, et faire connaitre aux consommateurs les raisons en partie responsables de l'usage des pesticides telles que la consommation de variétés sensibles aux maladies fongiques ou la sélectivité envers les fruits parfaits.

Améliorer la communication permettrait aussi de clarifier les différences entre les modes de production et d'éviter d'opposer agriculture biologique et conventionnelle qui cachent chacune une importante diversité de pratiques et d'impacts environnementaux et qui s'empruntent mutuellement techniques et solutions. Mettre en lumière la responsabilité partagée des acteurs de la filière sur la consommation de pesticides permettrait de soulager les producteurs qui exercent leur métier avec de plus en plus de difficultés et de pression sociale, dans une profession soumise à des taux de suicide 20% supérieurs à la population globale (Khireddine-Medouni *et al.*, 2016). Un meilleur dialogue permettrait de fournir des efforts communs et mettre les producteurs dans de meilleures conditions pour trouver des alternatives aux pesticides.

Ces travaux pourraient être vulgarisés sous forme d'articles de presse ou de reportages grand-public montrant la diversité des situations en arboriculture, les efforts déjà réalisés et les pratiques déjà mises en place, l'existence de verrous et freins, la complexité des décisions à prendre et des facteurs qui les influencent, et la responsabilité de chacun dans ces processus.

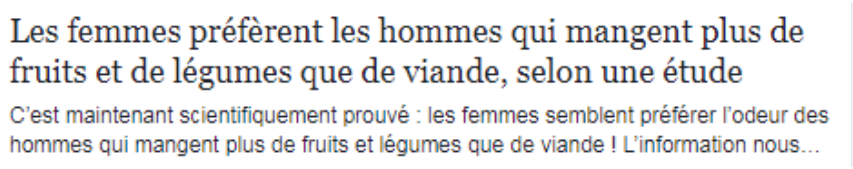


Figure 5. Exemple de l'état actuel du journalisme dit scientifique (source : consoglobe.com relayant l'étude de Ian D. Stephen et al., chercheur à l'université de Macquarie, Sydney)

3.4.Le rôle des politiques : améliorer la procédure d'homologation des pesticides

Cinq entreprises phytopharmaceutiques se partagent le marché des pesticides, dans l'ordre : Syngenta, Bayer Crop Science, BASF, Dow AgroSciences, Monsanto (https://www.statista.com/statistics/257489/revenue-of-top-agrochemical-companies-worldwide-2011/). Cette situation d'oligopole est favorable aux entreprises, et leur permet d'intervenir dans la législation via des lobbys puissants. Ces lobbys freinent la transition vers

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

des pratiques moins dépendantes des pesticides. Dernier exemple critiqué, l'adoption à la Commission Européenne d'une définition des perturbateurs endocriniens jugée « laxiste » et trop peu protectrice envers la santé publique et l'environnement, et permettant donc aux industries phytopharmaceutiques de continuer à produire certaines molécules (http://www.lemonde.fr/pollution/article/2017/07/04/perturbateurs-endocriniens-la-france-cede-a-l-allemagne_5155485_1652666.html).

Pour donner moins de poids aux lobbys, (Storck *et al.*, 2017) proposent d'améliorer dans un premier temps la réglementation européenne permettant l'homologation des produits phytosanitaires. La Figure 6 résume les principales propositions d'amélioration de la procédure actuelle, à savoir faire appel à des prestataires extérieurs indépendants pour évaluer les risques environnementaux, faire évaluer simultanément les molécules actives et les formulations par la même instance, réévaluer directement les produits et molécules au fur et à mesure de l'apparition d'études prouvant leurs effets néfastes, et non au bout du délai officiel de 10 ou 15 ans. D'autres mesures secondaires sont proposées : aider la recherche scientifique à rattraper son retard d'analyse sur les nouvelles molécules créées, prendre en compte plus d'impacts environnementaux notamment sur les sols et la biodiversité lors des évaluations, et limiter le nombre de dérogations pour les pesticides interdits.

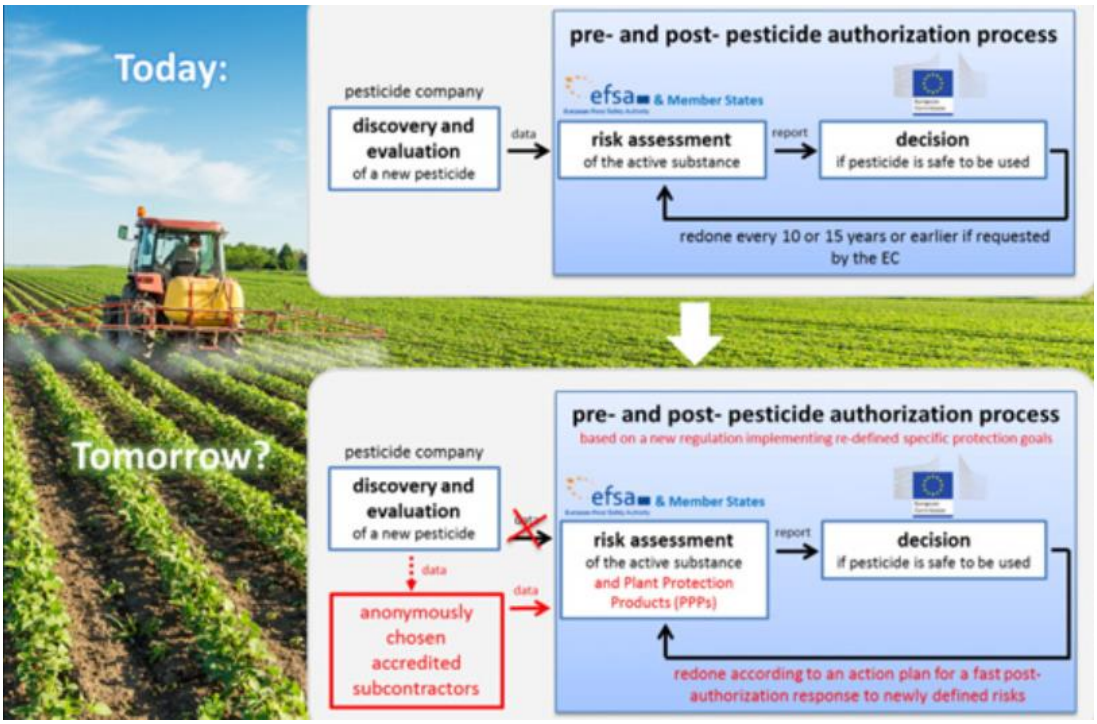


Figure 6. Propositions d'amélioration de la procédure d'homologation des pesticides (Storck *et al.*, 2017).

4. Perspectives de recherche et développement

4.1.Evolution de la démarche en interaction avec les techniciens

La démarche a été utilisée sur des exploitations productrices de pommes dans deux régions données, mais elle a été construite de sorte à être générique. Sa généricité a été en partie démontrée à travers la diversité des exploitations et des scénarios sur lesquels elle a été testée. Pour aller plus loin, les objectifs sont doubles : l'étendre sur d'autres exploitations productrices de pommes à l'échelle du territoire national, et l'utiliser sur d'autres productions arboricoles avec des exploitations spécialisées ou diversifiées. Mobiliser la démarche sur des cas supplémentaires et d'autres types de production arboricole permettrait d'enrichir nos résultats, consolider la démarche et démontrer sa généricité.

En lien avec cet élargissement des situations d'utilisation de la démarche, il parait possible et souhaitable de la transférer aux techniciens apportant un appui aux producteurs dans le cadre de structures de conseil ou de commercialisation telles que les coopératives. Dans cet esprit il sera nécessaire de leur transmettre une version professionnelle de CoHort afin qu'ils puissent l'utiliser avec leurs producteurs en complète autonomie. Ce transfert suppose de faire évoluer avec un prestataire informatique la version actuelle, construite sous Excel, en un logiciel simple d'utilisation et stabilisé, en respectant ses principes de bases et en conservant sa simplicité d'utilisation et sa transparence concernant les équations sur lesquelles il est basé.

4.2.L'analyse de cycle de vie pour une vision plus globale des impacts environnementaux

L'analyse de cycle de vie est une évaluation quantitative globale des impacts d'un produit ou d'un service sur l'environnement. Cette approche a une double particularité : (i) elle considère l'intégralité du cycle de vie d'un produit pour en faire l'inventaire des flux entrants et sortants (extraction des matières premières, distribution, utilisation, collecte, élimination/recyclage, transport), (ii) elle est multicritère et permet donc d'utiliser plusieurs indicateurs d'analyse de flux. C'est une méthode aujourd'hui normalisée dans la communauté internationale (http://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv). Articulée avec la simulation de scénarios d'exploitations par CoHort, cette méthode permettrait d'apporter plus d'informations aux producteurs pour les aider dans leurs choix de systèmes de production, et plus d'informations aux décideurs politiques pour justifier quelles pratiques promouvoir pour diminuer les impacts environnementaux.

Ce type d'analyse apporte en effet un éclairage supplémentaire sur les impacts des pratiques, avec des résultats parfois contre-intuitifs. Par exemple, (Tasca *et al.*, 2017) ont montré que les pratiques en agriculture biologique sur endive n'avaient pas de meilleurs impacts environnementaux que les pratiques conventionnelles. En arboriculture, (Alaphilippe *et al.*, 2016) ont comparé des vergers de pomme intensifs (densité de plantation forte, utilisation intensive d'intrants et durée de vie raccourcie); et des vergers de pommes semi-extensifs (utilisation plus faible d'intrants, densité de plantation deux fois moins élevée, et durée de vie de 10 ans de plus). Dans les deux cas, les auteurs ont constaté le poids important de la phase non productive du verger et des fertilisants dans les impacts environnementaux. Par rapport à sa durée de vie, le verger intensif atteignait les impacts environnementaux (calculés par tonne) les plus élevés dû à la forte consommation de fertilisants. Avec une méthode similaire appliquée à différentes stratégies de protection pour les fruits à pépins, (Caffi *et al.*, 2017) ont montré que les pratiques innovantes permettant de réduire la consommation de pesticides atteignaient une meilleure qualité environnementale avec des rendements similaires et sans coûts supplémentaires comparé à une stratégie conventionnelle.

4.3.Lier les disciplines pour une vision plus systémique

Les systèmes de production sont complexes et composés de divers compartiments biologiques, économiques, environnementaux et sociaux en interaction. Appréhender leurs différentes facettes dans une vision intégrée suppose une approche interdisciplinaire. Celle-ci doit en effet permettre de (i) mieux saisir leur complexité, (ii) produire une connaissance synthétique et mobilisable (Rodela and Alasevic, 2017), (iii) proposer des mesures de gestion des ressources et d'améliorations des pratiques adaptées au contexte étudié (Kragt *et al.*, 2016). Bien que souvent mise en avant dans les projets de recherche, ce type d'approche est néanmoins ardu à mettre en œuvre. Les difficultés rencontrées relèvent des différences de langage et de vocabulaire, des compréhensions différentes d'un même système, et du côté chronophage de telles démarches (Kragt *et al.*, 2016). Pour remédier à ces difficultés, Kragt et al proposent dès le début du processus de prendre le temps pour s'accorder sur la problématique et les questions de recherche, favoriser au maximum la communication, et éventuellement faire appel à des personnes externes chargées d'intégrer les apports et connaissances de chacun en les faisant expliciter et en distribuant la parole. De tels dispositifs sont cependant lourds à mettre en œuvre.

La démarche développée dans le cadre de cette étude fait appel à la conception de scénarios, qui représente un moyen alternatif de faire interagir les disciplines en facilitant la compilation et re-combinaison de connaissances de différents types tout en fournissant une plateforme concrète de discussion entre les chercheurs (Kröger and Schäfer, 2016). Il pourrait être intéressant d'inclure des spécialistes des sciences humaines dans la démarche afin de prendre en compte des facteurs supplémentaires influençant les décisions comme les compétences ou l'éducation reçue (Hashemi and Damalas, 2010), et d'avoir ainsi une vision plus complète des freins potentiels à l'évolution des pratiques pour mettre en place des mesures adaptées.

Conclusion générale

Pour correspondre aux critères de leurs acheteurs, les arboriculteurs doivent produire des fruits parfaits. Les pesticides de synthèse sont utilisés préférentiellement pour atteindre cet objectif. Mais ayant des effets nocifs sur la santé et l'environnement, les systèmes de production arboricoles doivent évoluer pour réduire leur consommation. Afin d'encourager les transitions, nous avons proposé de développer une démarche pour évaluer les marges de manœuvre et les impacts d'une évolution des stratégies de production sur le fonctionnement et les performances des exploitations arboricoles, en prenant le cas de la protection de la culture de pommes.

Une démarche en quatre étapes a été développée. La première étape analyse la diversité des pratiques d'utilisation des pesticides et évalue leurs impacts *via* des indicateurs de fréquence, de toxicité et d'efficience. La deuxième étape analyse les processus à l'échelle de l'exploitation agricole qui expliquent la mise en place de ces pratiques et identifie les freins aux transitions. Sur cette base de connaissances, la troisième étape met en place un processus d'accompagnement fondé sur un outil de simulation spécifiquement conçu lors de cette étude. Ce processus, basé sur la conception et la simulation de scénarios alternatifs de gestion à l'échelle de l'exploitation, permet d'aider les producteurs à évaluer les effets de nouvelles stratégies sur les performances de leurs exploitations. La dernière étape adapte le processus développé précédemment à l'exploration de scénarios de rupture, dont les effets potentiels sur les exploitations sont analysés.

En déployant cette démarche, nous avons pu montrer la diversité des pratiques d'utilisation des pesticides qui existe dans un contexte commun, les classant en quatre catégories. Les liens entre les indicateurs de fréquence, toxicité et efficience utilisés pour décrire ces pratiques sont complexes et montrent que l'indicateur de fréquence d'utilisation des pesticides peut cacher une diversité de pratiques, qu'il n'est pas synonyme d'efficience, et n'explique qu'en partie les scores de toxicité environnementale des parcelles. Des actions possibles à mettre en place ont pu être discutées à la lumière de ces résultats pour diminuer l'utilisation des pesticides, comme la meilleure prise en compte de la diversité et améliorer la surveillance des ravageurs et maladies correspondants aux pesticides les plus utilisés.

Ces pratiques ont été reliées aux caractéristiques des exploitations, mettant en lumière une diversité de stratégies. Trois stratégies ont été mises en évidence, répondants chacune à des objectifs environnementaux et économiques différents. L'étude des caractéristiques des exploitations a permis de montrer la cohérence existante au sein de chaque stratégie entre les

objectifs économiques et environnementaux, la stratégie commerciale, les ressources en main d'œuvre, la diversification/spécialisation et la surface cultivée. En particulier, l'influence de l'organisation du travail et de la stratégie commerciale sont à prendre en compte pour aider les stratégies à évoluer et anticiper les éventuels freins aux transitions.

Le processus d'accompagnement mis en place par la suite a permis aux producteurs de concevoir et évaluer des scénarios d'évolution à court ou moyen terme, témoignant de leur faible marge de manœuvre. Les producteurs hésitent à prendre des risques, du fait de leurs contraintes commerciales ou de la complexité de leur organisation du travail. Les simulations réalisées sur le scénario de rupture 'pomme-ovin' ont confirmé l'importance de l'organisation du travail dans les alternatives mises en place.

Cette démarche présente plusieurs intérêts. Elle mobilise plusieurs outils qui lui permettent de saisir la complexité et la diversité des processus analysés : indicateurs, typologie, outil de simulation. Elle articule les échelles parcelle et exploitation agricole et s'intéresse à leurs liens avec leur environnement, notamment économique, afin d'avoir une vision plus complète des processus étudiés. Elle s'exerce dans des contextes d'accompagnement et d'exploration permettant de dépasser la seule analyse des processus existants. Elle s'appuie sur une forte participation et interaction avec une diversité d'acteurs, qui apportent des compétences et connaissances variées permettant de l'améliorer. Elle se veut générique et adaptée à une diversité d'exploitations agricoles, de schémas décisionnels, de pratiques et de scénarios.

Ces différents résultats peuvent contribuer à faciliter les transitions pour réduire l'utilisation des intrants de synthèse à l'échelle des exploitations arboricoles. La démarche globale pourrait être réutilisée à l'échelle du territoire national, ou sur d'autres cultures arboricoles. Mais l'objectif à moyen terme est de la transmettre, et en particulier l'outil, pour que les techniciens puissent la remobiliser avec leurs producteurs de manière autonome. Aller plus loin dans l'évolution des systèmes de production nécessitera des efforts à l'échelle des filières, mobilisant acheteurs, consommateurs, chercheurs, producteurs, techniciens, médias et politique. Chaque groupe d'acteurs, dans sa diversité, a son rôle à jouer dans l'évolution des stratégies vers une diminution de l'usage des intrants de synthèse.

Bibliographie

Agreste, 2012. Exploitations arboricoles et vergers - Recensement agricole 2010. Agreste Primeur 277, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf_primeur277.pdf

Agreste, 2014a. Enquête pratiques phytosanitaires en arboriculture 2012, Nombre de traitements, Agreste Les Dossiers 22, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/dossier22_integral.pdf

Agreste, 2014b. Répartition des circuits de commercialisation par espèce fruitière – année 2011, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/verger2014T5bsva.pdf

Agreste, 2014c. Surface régionale du verger en production en 2013, SSP Agreste, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/verger2014T4bsva.pdf

Agreste, 2015. 13 700 exploitations agricoles en Limousin en 2013. Agreste Limousin 113, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/R7415A18.pdf

Alaphilippe, A., Boissy, J., Simon, S., Godard, C., 2016. Environmental impact of intensive versus semi-extensive apple orchards: use of a specific methodological framework for Life Cycle Assessments (LCA) in perennial crops. Journal of Cleaner Production 127, 555-561.

Association Pomme du Limousin, 2010. L'histoire de la Pomme du Limousin AOP.

Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J, Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Voltz, M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA and Cemagref, Paris.

Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision making processes for annual crop management. Agricultural Systems 56, 45-65.

Baldi, I., Cordier, S., Coumoul, X., Elbaz, A., Gamet-Payrastre, L., Le Bailly, P., Multigner, L., Rahmani, R., Spinosi, J., Van Maele-Fabry, G., 2013. Pesticides - effets sur la santé, Expertise collective, synthèse et recommandations. INSERM, Paris.

Barreteau, O., Antona, M., d'Aquino, P., Aubert, S., Boisseau, S., Bousquet, F., Dare, W., Etienne, M., 2003. Our Companion Modelling Approach. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 6.

Bernard, J., Le Gal, P.Y., Triomphe, B., Hostiou, N., Moulin, C.H., 2011. Involvement of small-scale dairy farms in an industrial supply chain: when production standards meet farm diversity. Animal: an international journal of animal bioscience 5, 961-971.

Berthet, E.T.A., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2015. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. Journal of Environmental Planning and Management, 1-22.

Bigouin, C., Chambonnière, S., Domenget, C., Ghion, K., Dordolo, M., Larrieu, J.-F., Sagnes, J.-L., Adgié, G., Saphy, B., 2013. Chiffres repères en arboriculture fruitière. CER France Tarn et Garonne et Chambre d'agriculture Tarn et Garonne.

Blouet, A., Pervanchon, F., Pervanchon, M., 2003. L'agriculture raisonnée. Limites et alternatives du modèle agricole dominant. Futuribles 283, 27-42.

Bogo, A., Casa, R.T., Agostineto, L., Gonçalves, M.J., Rufato, L., 2012. Effect of hail protection nets on apple scab in 'Royal Gala' and 'Fuji' apple cultivars. Crop Protection 38, 49-52.

Bohle, C., Maturana, S., Vera, J., 2010. A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. European Journal of Operational Research 200, 245-252.

Boller, E.F., Avilla, J., Joerg, E., Malavolta, C., Wijnands, F.G., Esbjerg, P., 2004. Guidelines for Integrated Production - Principles and Technical Guidelines. Commission on "IP Guidelines and Endorsement", IOBC wprs Bulletin 27.

Bonaudo, T., Bendahan, A.B., Sabatier, R., Ryschawy, J., Bellon, S., Leger, F., Magda, D., Tichit, M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. European Journal of Agronomy 57, 43-51.

Bravo, K., Toselli, M., Baldi, E., Marcolini, G., Sorrenti, G., Quartieri, M., Marangoni, B., 2012. Effect of organic fertilization on carbon assimilation and partitioning in bearing nectarine trees. Scientia Horticulturae 137, 100-106.

Brewer, M.J., and Goodell, P.B., 2012. Approaches and Incentives to Implement Integrated Pest Management that Addresses Regional and Environmental Issues. Annual Review of Entomology 57, 41–59.

Brewer, M.J., Hoard, R.J., Landis, J.N., Elworth, L.E., 2004. The Case and Opportunities for Public-Supported Financial Incentives to Implement Integrated Pest Management. Journal of Economic Entomology 97, 1762-1789.

Brunet N., Guichard, L., Omon B., Pingault, N., Pleyber, E., Seiler, A., 2008. L'indicateur de fréquence de traitements (IFT) : un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. Courrier de l'environnement de l'INRA 56, 131-141.

Busch, G., and Spiller, A., 2016. Farmer share and fair distribution in food chains from a consumer's perspective. Journal of Economic Psychology 55, 149-158.

Caffi, T., Helsen, H.H.M., Rossi, V., Holb, I.J., Strassemeyer, J., Buurma, J.S., Capowiez, Y., Simon, S., Alaphilippe, A., 2017. Multicriteria evaluation of innovative IPM systems in pome fruit in Europe. Crop Protection 97, 101-108.

Capillon, A., 1993. Typologie des exploitations agricoles, contribution à l'étude régionale des problèmes techniques. INA-PG, Paris.

Carberry, P.S., Hochman, Z., McCown, R.L., Dalgliesh, N.P., Foale, M.A., Poulton, P.L., Hargreaves, J.N.G., Hargreaves, D.M.G., Cawthray, S., Hillcoat, N., Robertson, M.J., 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. Agricultural Systems 74, 141-177.

Rapport-Gratuit.com

Cerf, M., and Sébillotte, M., 1997. Approche cognitive des décisions de production dans l'exploitation agricole. Economie rurale 239, 11-18.

Chantre, E., and Cardona, A., 2014. Trajectories of French Field Crop Farmers Moving Toward Sustainable Farming Practices: Change, Learning, and Links with the Advisory Services. Agroecology and Sustainable Food Systems 38, 573-602.

Codron, J.-M., Adanacioğlu, H., Aubert, M., Bouhsina, Z., El Mekki, A.A., Rousset, S., Tozanli, S., Yercan, M., 2014. The role of market forces and food safety institutions in the adoption of sustainable farming practices: The case of the fresh tomato export sector in Morocco and Turkey. Food Policy 49, 268-280.

Compagnone, M., 2016. Intégrer les animaux aux cultures pérennes : l'exploration d'une démarche innovante. Etude de cas en arboriculture et viticulture. INRA, Ecodéveloppement. ISARA Lyon, Lyon.

Cooper J., and Dobson, H., 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. Crop Protection 26, 1337-1348.

Cowan, R., and Gunby, P., 1996. Sprayed to death: path dependence, lock-in and pest control strategies. The Economic Journal 106, 521-542.

Damalas, C.A., 2015. Pesticide Drift: Seeking Reliable Environmental Indicators of Exposure Assessment. In: Armon, R.H., Hänninen, O. (Eds.), Environmental Indicators. Springer, pp. 251-261.

Damalas, C.A., and Eleftherohorinos, I.G., 2011. Pesticide exposure, safety issues, and risk assessment indicators. International journal of environmental research and public health 8, 1402-1419.

Damalas, C.A., and Koutroubas, S.D., 2014. Determinants of farmers' decisions on pesticide use in oriental tobacco: a survey of common practices. International Journal of Pest Management 60, 224-231.

De Baerdemaeker, J., 2013. Precision Agriculture Technology and Robotics for Good Agricultural Practices. IFAC Proceedings Volumes 46, 1-4.

De Hooge, I.E., Oostindjer, M., Aschemann-Witzel, J., Normann, A., Loose, S.M., Almli, V.L., 2017. This apple is too ugly for me! Food Quality and Preference 56, 80-92.

Debaeke, P., Munier-Jolain, N., Bertrand, M., Guichard, L., Nolot, J.M., Faloya, V., Saulas, P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies. A review. Agronomy for Sustainable Development 29, 73-86.

Dedieu, B., Aubin, J., Duteurtre, G., Alexandre, G., Vayssières, J., Bommel, P., Faye, B., 2011. Conception et évaluation de systèmes d'élevage durables en régions chaudes. INRA Productions animales 24, 113-128.

Devillers, J., Farret, R., Girardin, P., Rivière, J.L., Soulas, G., 2005. Indicateurs pour évaluer les risques liés à l'utilisation des pesticides. In: Tec et Doc and Lavoisier (Eds.), 280p.

Deytieux, V., Munier-Jolain, N., Caneill, J., 2016. Assessing the sustainability of cropping systems in single- and multi-site studies. A review of methods. European Journal of Agronomy 72, 107-126.

Didelot, F., Caffier, V., Orain, G., Lemarquand, A., Parisi, L., 2016. Sustainable management of scab control through the integration of apple resistant cultivars in a low-fungicide input system. Agriculture, Ecosystems & Environment 217, 41-48.

Dogliotti, S., García, M.C., Peluffo, S., Dieste, J.P., Pedemonte, A.J., Bacigalupe, G.F., Scarlato, M., Alliaume, F., Alvarez, J., Chiappe, M., Rossing, W.A.H., 2014. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. Agricultural Systems 126, 76-86.

Dogliotti, S., Van Ittersum, M.K., Rossing, W.A., 2006. Influence of farm resource endowment on possibilities for sustainable development: a case study for vegetable farms in South Uruguay. Journal of environmental management 78, 305-315.

Drogué, S., and DeMaria, F., 2012. Pesticide residues and trade, the apple of discord? Food Policy 37, 641-649.

Dupré, M., Michels, T., Le Gal, P.-Y., 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. European Journal of Agronomy 90, 23-33.

Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.-A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.-E., Sarthou, J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. Agronomy for Sustainable Development 35, 1237–1257.

Eckert, H., Breitschuh, G., Sauerbeck, D.R., 2000. Criteria and standards for sustainable agriculture. Plant Nutrition and Soil Science 163, 337-351.

Eisenhardt, K.M., and Graebner, M.E., 2007. Theory building from cases: opportunities and challenges. Academy of Management Journal 50, 25-32.

Fairbrother, A., Hartl, B., Hope, B.K., Jenkins, J.J., Li, Y.W., Moore, D.R.J., 2016. Risk management decisions for pesticides and threatened and endangered species: The role of uncertainty analysis. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal 22, 502-518.

Faure, G., and Compagnone, C., 2011. Les transformations du conseil face à une nouvelle agriculture. Cahiers Agricultures 20.

Faure, G., Gasselin, P., Triomphe, B., Temple, L. Hocdé, H., 2014. Innovating with rural stakeholders in the developing world: Action research in partnership. In: CTA, PAG and Quae (Eds.), 224p.

Faure, G., Rebuffel, P., Violas, D., 2011. Systemic Evaluation of Advisory Services to Family Farms in West Africa. The Journal of Agricultural Education and Extension 17, 325-339.

Feola, G., Rahn, E., Binder, C.R., 2011. Suitability of pesticide risk indicators for Less Developed Countries: A comparison. Agriculture, Ecosystems & Environment 142, 238-245.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

FranceAgriMer, 2014. La pomme en 2013-2014, Bilan de campagne, Réseau des nouvelles et des marchés, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.

FranceAgriMer, 2016. La pomme en 2015-2016. Bilan de campagne. Réseau des nouvelles et des marchés, Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.

Fuentes, E., Bogue, J., Gómez, C., Vargas, J., Le Gal, P.Y., 2016. Supporting small-scale dairy plants in selecting market opportunities and milk payment systems using a spreadsheet model. Computers and Electronics in Agriculture 122, 191-199.

Ghimire, N., and Woodward, R.T., 2013. Under- and over-use of pesticides: An international analysis. Ecological Economics 89, 73-81.

Giannakis, E., and Bruggeman, A., 2015. The highly variable economic performance of European agriculture. Land Use Policy 45, 26-35.

Gilg, A.W., and Battershill, M., 2000. To what extent can direct selling of farm produce offer a more environmentally friendly type of farming? Some evidence from France. Journal of Environmental Management 60, 195-214.

Giuliano, S., Ryan, M.R., Véricel, G., Rametti, G., Perdrieux, F., Justes, E., Alletto, L., 2016. Low-input cropping systems to reduce input dependency and environmental impacts in maize production: A multi-criteria assessment. European Journal of Agronomy (In Press)

Goldberger, J.R., Lehrer, N., Brunner, J.F., 2013. Adoption of Organophosphate Alternatives in Washington Apple IPM Programs: Survey Evidence From Pest Management Consultants and Growers. Journal of Integrated Pest Management 4, 1-8.

González-Araya, M.C., Soto-Silva, W.E., Espejo, L.G.A., 2015. Harvest Planning in Apple Orchards Using an Optimization Model. Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food industry, 224, 79-105.

Guichard, L., Dedieu, F., Jeuffroy, M.H., Meynard, J.M., Reau, R., Savini, I., 2017. Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France : décryptage d'un échec et raisons d'espérer. Cahiers Agricultures 26, 14002.

Guillaume, S., Bruzeau, C., Justes, E., Lacroix, B., Bergez, J.E., 2016. A conceptual model of farmers' decision-making process for nitrogen fertilization and irrigation of durum wheat. European Journal of Agronomy 73, 133-143.

Halberg, N., 1999. Indicators of resource use and environmental impact for use in a decision aid for Danish livestock farmers. Agriculture, Ecosystems & Environment 76, 17-30.

Hashemi, S.M., and Damalas, C.A., 2010. Farmers' Perceptions of Pesticide Efficacy: Reflections on the Importance of Pest Management Practices Adoption. Journal of Sustainable Agriculture 35, 69-85.

Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., 2009. Design Theory and Collective Creativity: A Theoretical Framework to Evaluate KCP Process. International Conference on Engineering Design, Stanford, CA.

Haynes, I., Lamine, C., Wierzbicka, A., Szabo, Z., Lehota, J., Vandenberg, I., Buurma, J., Maraccini, E., Moonen, C., Williamson, S., Paratte, R., 2010. Are supermarkets an appropriate

tool for facilitating the transition to low input farming practices? 9th European IFSA Symposium, Vienna (Austria).

Hellweg, S., and Mila i Canals, L., 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Science 344,1109-1113.

Hémidy, L., Maxime, F., Soler, L.G., 1993. Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole. Cah. Econ. Sociol. Rurales 28, 91-118.

Hill, S.B., and MacRae, R.J., 1996. Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. Journal of Sustainable Agriculture 7, 81-87.

Hostiou, N., Cialdella, N., Vazquez, V., Muller, A.G., Le Gal, P.Y., 2015. Work organization on smallholder dairy farms: a process unique to each farm. Tropical Animal Health and Production 47, 1271-1278.

Huat, J., Aubry, C., Dore, T., 2014. Understanding Crop Management Decisions for Sustainable Vegetable Crop Protection: A Case Study of Small Tomato Growers in Mayotte Island. Agroecology and Sustainable Food Systems 38, 764-785.

Hunt, L., 2009. Interpreting orchardists' talk about their orchards: the good orchardists. Agriculture and Human Values 27, 415-426.

Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M., Garrote, L., 2011. From climate change impacts to the development of adaptation strategies: Challenges for agriculture in Europe. Climatic Change 112, 143-168.

Karunasagar, I., and Karunasagar, I., 2016. Challenges of Food Security – Need for Interdisciplinary Collaboration. Procedia Food Science 6, 31-33.

Khan, M., Mahmood, H.Z., Damalas, C.A., 2015. Pesticide use and risk perceptions among farmers in the cotton belt of Punjab, Pakistan. Crop Protection 67, 184-190.

Khireddine-Medouni, I., Breuillard, É., Bossard, C., 2016. Surveillance de la mortalité par suicide des agriculteurs exploitants - Situation 2010-2011 et évolution 2007-2011. Santé travail. Santé publique France, Saint-Maurice, p. 9.

Kragt, M.E., Pannell, D.J., McVittie, A., Stott, A.W., Vosough Ahmadi, B., Wilson, P., 2016. Improving interdisciplinary collaboration in bio-economic modelling for agricultural systems. Agricultural Systems 143, 217-224.

Kröger, M., and Schäfer, M., 2016. Scenario development as a tool for interdisciplinary integration processes in sustainable land use research. Futures 84, 64-81.

Kutinkova, H., Samietz, J., Dzhuvinov, V., Charmillot, P.J., Veronelli, V., 2009. Mating disruption of codling moth, Cydia pomonella (L.), using Isomate C plus dispensers in apple orchards of Bulgaria. Pheromones and other Semiochemicals, IOBC wprs Bulletin 41, 27-32.

Laget, E., Guadagnini, M., Plénet, D., Simon, S., Assié, G., Billote, B., Bourgouin, B., Fratantuono, M., Guérin, A., Hucbourg, B., Lemarquand, A., Loquet, B., Mercadal, M., Parveaud, C.E., Ramade, L., Rames, M.H., Ricaud, V., Rousselou, C., Sagnes, J.L., Zavagli, F., 2014. Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques, fiches techniques. GIS Fruits et Ministère de l'agriculture, Paris, France.

Lançon, J., Reau, R., Cariolle, M., Munier-Jolain, N., Omon, B., Petit, M.S., Viaux, P., Wery, J., 2008. Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants. In: Reau, R., Doré, T. (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ? Educagri éd, Dijon.

Landais, E., 1998. Modelling farm diversity: new approaches to typology building in France. Agricultural Systems 58, 505-527.

Le Bellec, F., Rajaud, A., Ozier-Lafontaine, H., Bockstaller, C., Malezieux, E., 2012. Evidence for farmers' active involvement in co-designing citrus cropping systems using an improved participatory method. Agronomy for Sustainable Development 32, 703-714.

Le Gal, P.Y., Bernard, J., Moulin, C.H., 2013. Supporting strategic thinking of smallholder dairy farmers using a whole farm simulation tool. Tropical animal health and production 45, 1119-1129.

Le Gal, P.Y., Dugué, P., Faure, G., Novak, S., 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. Agricultural Systems 104, 714-728.

Le Gal, P.Y., Merot, A., Moulin, C.H., Navarrete, M., Wery, J., 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. Environmental Modelling & Software 25, 258-268.

Lechenet, M., Bretagnolle, V., Bockstaller, C., Boissinot, F., Petit, M.S., Petit, S., Munier-Jolain, N.M., 2014. Reconciling pesticide reduction with economic and environmental sustainability in arable farming. PloS one 9, e97922.

Lechenet, M., Dessaint, F., Py, G., Makowski, D., Munier-Jolain, N., 2017. Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. Nat Plants 3, 17008.

Lejars, C., Le Gal, P.Y., Auzoux, S., 2008. A decision support approach for cane supply management within a sugar mill area. Computers and Electronics in Agriculture 60, 239-249.

Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., Ménassieu, J., 2009. Agronomy for sustainable agriculture: a review. In: Springer (Ed.), Sustainable Agriculture, Dordrecht, pp. 1-7.

Lubello, P., 2015. Apple world market update (actors and flows). WP4.1, Sustain'Apple project.

Marette, S., Messéan, A., Millet, G., 2012. Consumers' willingness to pay for eco-friendly apples under different labels: Evidences from a lab experiment. Food Policy 37, 151-161.

Marliac, G., Penvern, S., Barbier, J.M., Lescourret, F., Capowiez, Y., 2015. Impact of crop protection strategies on natural enemies in organic apple production. Agronomy for Sustainable Development 35, 803-813.

Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. Environmental Modelling & Software 26, 1442-1453.

Martin, G., Martin-Clouaire, R., Duru, M., 2012. Farming system design to feed the changing world. A review. Agronomy for Sustainable Development 33, 131-149.

Matson, P.A., Parton, W.-J., Power, A., Swift, M., 1997. Agricultural intensification and ecosystem properties. Science 277, 504-509.

Meynard, J.M., Dedieu, B., Bos, A.P., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices. In: Springer (Ed.), Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic, pp. 407-432.

Meynard, M., Messéan, A., Charlier, A., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.B., Savini, I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. In: INRA (Ed.), p. 52.

Mghirbi, O., Ellefi, K., Le Grusse, P., Mandart, E., Fabre, J., Ayadi, H., Bord, J.P., 2015. Assessing plant protection practices using pressure indicator and toxicity risk indicators: analysis of the relationship between these indicators for improved risk management, application in viticulture. Environmental science and pollution research international 22, 8058-8074.

Mitchell, G., 1996. Problems and fundamentals of sustainable development indicators. Sustainable Development 4, 1-11.

Mitchell, P.D., and Hutchison, W.D., 2009. Decision making and economic risk in IPM. In: Cambridge University Press (Ed.), Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies, pp. 33-50.

Mohanraj, I., Ashokumar, K., Naren, J., 2016. Field Monitoring and Automation Using IOT in Agriculture Domain. Procedia Computer Science 93, 931-939.

Moraine, M., Duru, M., Therond, O., 2016. A social-ecological framework for analyzing and designing integrated crop–livestock systems from farm to territory levels. Renewable Agriculture and Food Systems 32, 43-56.

Moreno-Pérez, O.M., Arnalte-Alegre, E., Ortiz-Miranda, D., 2011. Breaking down the growth of family farms: A case study of an intensive Mediterranean agriculture. Agricultural Systems 104, 500-511.

Mouron, P., Heijne, B., Naef, A., Strassemeyer, J., Hayer, F., Avilla, J., Alaphilippe, A., Höhn, H., Hernandez, J., Mack, G., Gaillard, G., Solé, J., Sauphanor, B., Patocchi, A., Samietz, J., Bravin, E., Lavigne, C., Bohanec, M., Golla, B., Scheer, C., Aubert, U., Bigler, F., 2012. Sustainability assessment of crop protection systems: SustainOS methodology and its application for apple orchards. Agricultural Systems 113, 1-15.

Mundler, P., and Laughrea, S., 2016. The contributions of short food supply chains to territorial development: A study of three Quebec territories. Journal of Rural Studies 45, 218-229.

Murtagh, F., 1985. Multidimensional Clustering Algorithms. COMPSTAT Lectures 4. Physica-Verlag, Vienna.

Murtagh, F., and Legendre, P., 2014. Ward's hierarchical agglomerative clustering method: which algorithms implement Ward's criterion? Journal of Classification 31.

Nair, P.K., 2011. Agroforestry systems and environmental quality: introduction. J Environ Qual 40, 784-790.

Navarrete, M., and Le Bail, M., 2007. SALADPLAN: a model of the decision-making process in lettuce and endive cropping. Agronomy for Sustainable Development 27, 209-221.

Navarrete, M., Dupré, L., Lamine, C., 2014. Crop management, labour organization, and marketing: three key issues for improving sustainability in organic vegetable farming. International Journal of Agricultural Sustainability 13, 257-274.

Oberti, R., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., Hočevar, M., Baur, J., Pfaff, J., Schütz, C., Ulbrich, H., 2016. Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot. Biosystems Engineering 146, 203-215.

Omar, N., 2014. Communication Competence during the Preparation Phase of the Direct Selling Communication Activities. Procedia - Social and Behavioral Sciences 155, 228-235.

Osty, P.L., 1978. L'exploitation agricole vue comme un système : diffusion de l'innovation et contribution au développement. Bull Tech Inf 326, 43 - 49.

Pardo, G., Riravololona, M., Munier-Jolain, N., 2010. Using a farming system model to evaluate cropping system prototypes: Are labour constraints and economic performances hampering the adoption of Integrated Weed Management? European Journal of Agronomy 33, 24-32.

Peck, G., Adrews, P., Renagold, J., Fellman, J., 2006. Apple orchard productivity and fruit quality under organic, conventionnal and integrated management. HortScience 41, 99-107.

Penrose, L.J., Bower, C.C., Nicol, H.I., 1996. Variability in pesticide use as a factor in measuring and bringing about reduction in pesticide usage in apple orchards. Agriculture, Ecosystems & Environment 59.

Penvern, S., Bellon, S., Fauriel, J., Sauphanor, B., 2010. Peach orchard protection strategies and aphid communities: Towards an integrated agroecosystem approach. Crop Protection 29, 1148-1156.

Pissonnier, S., Lavigne, C., Le Gal, P.Y., 2017. A simulation tool to support the design of crop management strategies in fruit tree farms. Application to the reduction of pesticide use. Computer and Electronics in Agriculture, *In Press.*

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.

Probst, K., and Hagmann, J., 2003. Understanding participatory research in the context of natural resource management - Paradigms, approaches and typologies. Agricultural Research & Extension Network 130.

Probst, L., Adoukonou, A., Amankwah, A., Diarra, A., Vogl, C.R., Hauser, M., 2012. Understanding change at farm level to facilitate innovation towards sustainable plant protection: a case study at cabbage production sites in urban West Africa. International Journal of Agricultural Sustainability 10, 40-60.

Pumariño, L., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Kaartinen, R., Barrios, E., Muchane, M.N., Midega, C., Jonsson, M., 2015. Effects of agroforestry on pest, disease and weed control: A meta-analysis. Basic and Applied Ecology 16, 573-582.

Rebuffel, P., Lemoine, C., Faure, G. 2015. Le difficile accès au conseil pour les petites exploitations agricoles : le cas de Mayotte. Cahiers Agricultures 24, 269-276.

Reganold, J.P., and Wachter, J.M., 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. Nature Plants 2, 15221.

Reus, J., Leendertse, P., Bockstaller, C., Fomsgaard, I., Gutsche, V., Lewis, K., Nilsson, C., Pussemier, L., Trevisan, M., van der Werf, H., Alfarroba, F., Blümel, S., Isart, J., McGrath, D., Seppälä, T., 2002. Comparison and evaluation of eight pesticide environmental risk indicators developed in Europe and recommendations for future use. Agriculture, Ecosystems & Environment 90, 177-187.

Rizzati, V., Briand, O., Guillou, H., Gamet-Payrastre, L., 2016. Effects of pesticide mixtures in human and animal models: An update of the recent literature. Chem Biol Interact 254, 231-246.

Rodela, R., and Alasevic, D., 2017. Crossing disciplinary boundaries in environmental research: Interdisciplinary engagement across the Slovene research community. Sci Total Environ 574, 1492-1501.

Rosenbaum, R.K., Bachmann, T.M., Gold, L.S., Huijbregts, M.A.J., Jolliet, O., Juraske, R., Koehler, A., Larsen, H.F., MacLeod, M., Margni, M., McKone, T.E., Payet, J., Schuhmacher, M., van de Meent, D., Hauschild, M.Z., 2008. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment 13, 532-546.

Rozman, Č., Unuk, T., Pažek, K., Lešnik, M., Prišenk, J., Vogrin, A., Tojnko, S., 2013. Multi Criteria Assessment of Zero Residue Apple Production. Erwerbs-Obstbau 55, 51-62.

Rusinamhodzi, L., Dahlin, S., Corbeels, M., 2016. Living within their means: Rellocation of farm resources can help smallholder farmers improve crop yields and soil fertility. Agriculture, Ecosystems & Environment 216, 125-136.

Sabiha, N.E., Salim, R., Rahman, S., Rola-Rubzen, M.F., 2016. Measuring environmental sustainability in agriculture: A composite environmental impact index approach. Journal of environmental management 166, 84-93.

Salembier, C., Elverdin J.H., Meynard, J.M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. Agronomy for Sustaniable Development 36, 1-10.

Sattler C., and Nagel, U. J., 2010. Factors affecting farmers' acceptance of conservation measures-A case study from north-eastern Germany. Land Use Policy 27, 70-77.

Schiavon, M., Perrin-Ganier, C., Portal, J., 1995. La pollution de l'eau par les produits phytosanitaires : état et origine. Agronomie, EDP Sciences 15, 157-170.

Sébillotte, M., 1974. Agronomie et agriculture. Essai d'analyse des tâches de l'agronome. Cah. ORSTOM Série Biologie, 3-25.

Sébillotte, M., 1990. Systèmes de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In: Combe, L., Picard, D. (Eds.), Les systèmes de culture. Inra, Versailles, pp. 165-196.

Sébillotte, M., and Soler, L.G., 1990. Les processus de décision des agriculteurs. Acquis et questions vives. In: Brossier, J., Vissac, B., Lemoigne, J.L. (Eds.), Modélisation systémique et systèmes agraires. Inra, Paris, pp. 103-117.

Sempore, A.W., Andrieu, N., Nacro, H.B., Sedogo, M.P., Le Gal, P.Y., 2015. Relevancy and role of whole-farm models in supporting smallholder farmers in planning their agricultural season. Environmental Modelling & Software 68, 147-155.

Silva, J.V., Reidsma, P., Laborte, A.G., van Ittersum, M.K., 2017. Explaining rice yields and yield gaps in Central Luzon, Philippines: An application of stochastic frontier analysis and crop modelling. European Journal of Agronomy 82, 223-241.

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

Simon, S., Lesueur-Jannoyer, M., Plénet, D., Lauri, P.E., Le Bellec, F., 2017. Methodology to design agroecological orchards: Learnings from on-station and on-farm experiences. European Journal of Agronomy 82, 320-330.

Singh, S.B., Mukherjee, I., Maisnam, J., Kumar, P., Gopal, M., Kulshrestha, G., 2009. Determination of pesticide residues in integrated pest management and nonintegrated pest management samples of apple (Malus pumila Mill.). Journal of agricultural and food chemistry 57, 11277-11283.

Soto-Silva, W.E., Nadal-Roig, E., González-Araya, M.C., Pla-Aragones, L.M., 2016. Operational research models applied to the fresh fruit supply chain. European Journal of Operational Research 251, 345-355.

Sraïri, M.T., and Ghabiyel, Y., 2017. Coping with the work constraints in crop-livestock farming systems. Annals of Agricultural Sciences 62, 23-32.

Storck, V., Karpouzas, D.G., Martin-Laurent, F., 2017. Towards a better pesticide policy for the European Union. Sci Total Environ 575, 1027-1033.

Su, H.-N., and Moaniba, I.M., 2017. Investigating the dynamics of interdisciplinary evolution in technology developments. Technological Forecasting and Social Change 122, 12-23.

Tasca, A.L., Nessi, S., Rigamonti, L., 2017. Environmental sustainability of agri-food supply chains: An LCA comparison between two alternative forms of production and distribution of endive in northern Italy. Journal of Cleaner Production 140, 725-741.

Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., Richard, G., 2017. A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities. A review. Agronomy for Sustainable Development 37.

Ticha, J., Hajslova, J., Jech, M., Honzicek, J., Lacina, O., Kohoutkova, J., Kocourek, V., Lansky, M., Kloutvorova, J., Falta, V., 2008. Changes of pesticide residues in apples during cold storage. Food Control 19, 247-256.

Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P.J., Moreno, G., Plieninger, T., 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment 230, 150-161.

Trapman, M., and Philion, V., 2015. A threshold for early termination of fungicide treatments to control scab (*Venturia pirina*) on Conference pears based on disease history and growth level. IOBC/WPRS Bulletin, 47-50.

Unay Gailhard, İ., and Bojnec, Š., 2015. Farm size and participation in agri-environmental measures: Farm-level evidence from Slovenia. Land Use Policy 46, 273-282.

Vall, E., Chia, E., Blanchard, M., Koutou, M., Coulibaly, K., Andrieu, N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. Cahiers Agricultures 25, 15001.

Van Zelm, R., Larrey-Lassalle, P., Roux, P., 2014. Bridging the gap between life cycle inventory and impact assessment for toxicological assessments of pesticides used in crop production. Chemosphere 100, 175-181.

Vanloqueren, G., and Baret, P.V., 2009. How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations. Research Policy 38, 971-983.

Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. European Journal of Agronomy 7, 235-250.

Voinov, A., and Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. Environmental Modelling & Software 25, 1268-1281.

Wang, L., and Huo, X., 2016. Willingness-to-pay price premiums for certified fruits —A case of fresh apples in China. Food Control 64, 240-246.

Wilson C., and Tisdell, C., 2001. Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. Ecological Economics 39, 449-462.

Witzgall, P., Kirsch, P., Cork, A., 2010. Sex Pheromones and Their Impact on Pest Management. Journal of Chemical Ecology 36, 80-100.

Wyss, E., and Daniel, C., 2004. Effects of autumn kaolin and pyrethrin treatments on the spring population of Dysaphis plantaginea in apple orchards. Journal of Applied Entomology 128, 147-149.

Yang, H., Klerkx, L., Leeuwis, C., 2014. Functions and limitations of farmer cooperatives as innovation intermediaries: Findings from China. Agricultural Systems 127, 115-125.

Rapport-Gratuit.com

Annexes

Annexe 1. Extrait de calendrier de traitement, coopérative PERLIM

RECAPITULATIF DES TRAITEMENTS

Code palox : AB

Date (jour/mois)	Phase (mm)	Temps (°C)	Stade (Golden)	Produit Nom commercial	Produit Matière active	Dosage (kg ou l/ha)	Gestion du stock Quantité réelle totale sortie du stock (kg ou l)	Délai Avant Récolte (en jours)	Délai de Réentrée (en heures)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
18/03				Oviphyt	Huiles Minérales	20	80	30	6				X	X	X			
				Calypso	Thiaclopride	0,25	1,2	30	48	X	X	X	X	X	X	X	X	
20/03				Pirimor	Pirimicarbe	0,4	1,2	30	24	R	R		R	R	R	R		
				Mancozèbe	Mancozèbe	2,15	6,5	H	48	P	P		P	P	P	P	P	
24/03	11			Mancozèbe	Mancozèbe	2,15	6,5	H	48	P	P		P	P	P	P	P	P
				Chorus	Cyprodinil	0,45	1,35	21	6	P	P		P	P	P	P	P	P
1/04	3			Delfin	Bacillus	0,75	4,5	3	48	X	X		X	X	X	X	X	
				Sullit	Dodine	1,7	10,0	60	24	X	X		X	X	X	X	X	
				Urée	~~Bacillus~~	4	25			X	X		X	X	X	X	X	
7/04				Delan	Dithianon	0,5	3	14	48	X	X		X	X	X	X	X	X
				Microthiol	Soufre	3	18	3	6	X	X		X	X	X	X	X	X
				Sufix		10	30			X	X		X	X	X	X	X	X
				Suprême	Acétamiprède	0,25	1,5	30	6	X	X		X	X	X	X	X	X
15/04				Sufix		10	16			X			X					
				Regalis	Prohexadione Calcium	1,25	2	55	6				X					
				Nimrod	Bupirimate	0,5	0,8	14	24				X					
18/04				Regalis	Prohexadione Calcium	1,25	2	55	6				X					
				Dipel	Bacillus	0,75	3,4	3	48	X	X		X	X	X	X	X	X
				Alcygol		3	18,1			X	X		X	X	X	X	X	X
				Ordoral	Thirame	2,5	14,75	42	48	X	X		X	X	X	X	X	X
				Soufre	Soufre	2	3,2	3	6				X					
				Nimrod	Bupirimate	0,6	2,6	14	24	X	X			X	X	X	X	X
				ATS		10	25			X	X				X	X	X	X
21/04	4			Sigma DG	Captane	1,8	10	28	48	X	X		X	X	X	X	X	X
				Difcor	Difenoconazole	0,15	0,9	30	24	X	X		X	X	X	X	X	X
				Regulex	Giberellines	0,3	16	30	6		X		X	X	X	X		
				Unibore	Bore					X	X		X	X	X	X	X	X

Annexe 2. Extrait de calendrier de traitements informatisé, coopérative Cofruid'Oc

J270 | 10

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Ordr	DATE	Typetache	PARCELLE	VARIETE	CATEGOR	PRODUIT	Lieu	Parcelle	Codestation	SURFAC
41	1	22/03/2013	TRT	p10Gala/Galaxy	GALA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	10	170 10	0,5656
42	1	22/03/2013	TRT	p11Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	11	170 11	1,6344
43	1	22/03/2013	TRT	p12Brookfield	GALA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	12	170 12	1,332
44	1	22/03/2013	TRT	p13Granny	GRA	FONG	CUPROCAFFARO	Colombier	13	170 13	0,3
45	1	22/03/2013	TRT	p14Granny	GRA	FONG	CUPROCAFFARO	Colombier	14	170 14	3,1998
46	1	22/03/2013	TRT	p15Granny	GRA	FONG	CUPROCAFFARO	Colombier	15	170 15	3,7854
47	1	22/03/2013	TRT	p2Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	2	170 2	0,936
48	1	22/03/2013	TRT	p21Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	21	170 21	2,106
49	1	22/03/2013	TRT	p3Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	3	170 3	1,2593
50	1	22/03/2013	TRT	p31Granny	GRA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	31	170 31	2,334
51	1	22/03/2013	TRT	p31Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	31	170 21	0,1208
52	1	22/03/2013	TRT	p4Granny	GRA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	4	170 4	1,1655
53	1	22/03/2013	TRT	p41Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	41	170 21	0,1208
54	1	22/03/2013	TRT	p51Brookfield	GALA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	51	170 51	2,4
55	1	22/03/2013	TRT	p51Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	51	170 21	0,1208
56	1	22/03/2013	TRT	p6Galaxy	GALA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	6	170 6	0,0497
57	1	22/03/2013	TRT	p61Brookfield	GALA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	61	170 61	2,12
58	1	22/03/2013	TRT	p61Pink	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	61	170 21	0,0945
59	1	22/03/2013	TRT	p7Galaxy	GALA	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	7	170 6	0,0459
60	1	22/03/2013	TRT	p8RosyGlow	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	8	170 8	2,7618
61	1	22/03/2013	TRT	p8RosyGlow12	PL	FONG	CUPROCAFFARO	Carthagène	8	170 8	1,4

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Annexe 3. Guide d'entretien producteurs

DATE :

ENQUETEUR(S) :

ZONE D'ENQUETE :

Pièces jointes : calendrier de traitement, relevés météo, cartographie des parcelles (si disponible)

GUIDE D'ENTRETIEN EXPLOITANT

Gestion du risque sanitaire et phytosanitaire dans les exploitations productrices de pomme

Objectif : quelle stratégie de gestion du risque sanitaire et phytosanitaire, pour quel objectif, comment est-elle mise en place (quels moteurs) et quels sont les résultats ?

Nom / Prénom exploitant :

Age :

Adresse :

N° Tel :

Fonction de l'interlocuteur :

Objectifs du producteur pour son exploitation :

STRUCTURE DE L'EXPLOITATION

Statut juridique de l'exploitation :

Autres activités de l'exploitant non agricoles :

SAU :

Orientation de l'exploitation (spé/diversifié) :

Foncier (parcellaire) :

Variété/culture	Age	Parcelle (localisation)	Type de sol/caract. pédoclim	Topo	Erosion	Surface (ha) déclarée	n-2	n-1	n
POMME									

Distance entre parcelles ?

Nombre d'actifs (permanents, saisonniers) / Famille :

MO permanente	Nb	Tâches dédiées	Périodes
Famille Salariés			
MO saisonnière Type :			

Classement des différentes productions de votre exploitation dans un ordre décroissant d'importance, **quel critère est utilisé** ?

Calendrier des opérations culturales sur l'ensemble des exploitations :

Dans l'année : où se situent les pics d'activité ? Quelle combinaison d'évènements en est responsable ? Et donc quelles cultures sont concernées ?

Comment gérez-vous ces pics ? (Quels sont les sacrifices à faire dus à ce pic et sur quelles cultures ?)

Quelle est la place du verger de pomme au sein du système de culture, comment a-t-elle évolué ? Par rapport au temps passé sur cette culture (quelle priorité ?)

GESTION DE L'INFORMATION spécifique à la culture de pommes

Fait partie d'un réseau d'information/de formations/démonstration ? Pourquoi, pour quelles opérations ?

Le conseil vient de quels organismes (chambre, GR CETA, indépendants, coopérative…), quelle fréquence/Pas de conseil ?

Le conseil sert à répondre à quels types de questions ? (doses, produits, stratégies plus globale à l'échelle de l'exploitation ?) / dans quels cas faire appel aux conseillers ?

Utilisation d'OAD, règles de décision, autres outils… ? Pour quel type de problème (prédiction maladie) et fournis par qui ?

Essais sur la parcelle ? Personnels ou par la coop ou recherche

HISTORIQUE DE L'EXPLOITATION

Historique général de l'exploitation (installation puis évolution, assolement)

Pourquoi et quand la pomme ?

ENVIRONNEMENT PAYSAGER :

- Pression sociétale :

Quel type d'environnement autour du verger ? Urbain, Péri-urbain, rural… Proximité des habitations

Contraintes et avantages du paysage autour des parcelles : cours ou source d'eau, zone nitrate ou sensible (oiseaux ou autres espèces), Natura 2000, exposition, micro climat ?

- Pression sanitaire :

Autres vergers (pommes/poires) aux alentours ?

Quelle sensibilité de la zone à des maladies/ravageurs particuliers ?

ENVIRONNEMENT SOCIO-ECONOMIQUE

Stratégies PAC / Politique environnementale / Aides :

Cahiers des charges ?

- Partenaires commerciaux/stratégie de commercialisation :

Quel(s) mode(s) de commercialisation ? Pourquoi ? Avantages et inconvénients ?

Quelle proportion des différents débouchés ?

Variation de ces modes de commercialisation au cours de l'année ?

Lieux de vente

Variation selon les années ? Fidélisation ?

Pertes à la vente/écarts de tri ? Quels niveaux ?

Concurrence sur le marché ?

Quels marchés visés ? (export, babyfood… pas de marché visé ?) Quels marchés réalisés ?

Doit répondre / Souhaite répondre à quel cahier des charges ?

Quels contrôles du respect de la réglementation et du cahier des charges ?

- Données économiques

	€
Coût de production	
Prix de vente	
Marge Brute	
Rendement	

Pertes de rendement à la parcelle ? Maladie/ravageurs/climat

PRODUCTION POMME

Mode de production : Agriculture Raisonnée/Biologique/Production Fruitière Intégrée ? Charte vergers éco-responsables ?

Equipement, bâtiments :

	Pomme
Avantages techniques	
Avantage économique	
Contraintes techniques	
Contraintes économiques	

Itinéraire technique – Informations complémentaires. Répartition des opérations culturales :

RAISONNEMENT PROTECTION PHYTO

Planning de traitement : avec qui, quand, comment ? Principales contraintes à prendre en compte ?

Ecarts au planning? Pourquoi ? (conditions météorologiques, concurrence avec d'autres cultures, pression de maladie en augmentation, conseils extérieurs…)

Raisonnement des interventions : à la parcelle □ au bloc □ à l'espèce □

à la variété : sensibilité □ et/ou phénologie □ en référence à une autre parcelle □

Organisation des Observations ? Quel ravageur et quel seuil ? appel à un service supplémentaire ?

Remarques décisions protection, actes techniques particuliers, matériel, etc......

Techniques alternatives mises en place (confusion, filet, plantes de couverture, haies…) ? Depuis quand ? Pourquoi / Quel objectif ? Quel initiateur ?

Si non pourquoi ?

Traitements phytosanitaires : - en général □ - dans ce verger en particulier □

Volume cuve :.....Volume de traitement :.....

Si volume < 1000 l, maintien de la dose ha ? :.....

EVOLUTION DES PRATIQUES

Comment ont évolué les pratiques ? Quels moteurs ?

Projet pour l'évolution de la culture au sein du système

PERSPECTIVES

Global sur l'exploitation (retraite, agrandissement, succession…)

Annexe 4. Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level

Crop Protection 88 (2016) 109–117

Contents lists available at ScienceDirect

Crop Protection

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cropro

Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level

Solène Pissonnier [a, b, *], Claire Lavigne [b], Jean-François Toubon [b], Pierre-Yves Le Gal [a]

[a] CIRAD-ES, TA C-85/15, 73 rue Jean-François Breton, 34398, Montpellier Cedex 5, France
[b] INRA, UR 1115 PSH, Plantes et Systèmes de Culture Horticoles, F-84000, Avignon, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 6 April 2016
Received in revised form
9 June 2016
Accepted 10 June 2016

Keywords:
Pesticide
Fruit
Farm
Typology
France

ABSTRACT

While protecting their crops, apple growers must also satisfy the requirements of their buyers regarding pesticide residues and fruit characteristics. Based on an analysis of farm pesticide application schedules and semi-structured interviews of 35 apple growers in two areas of France, this study described how growers designed and implemented their apple protection strategies, and identified the factors which helped and/or prevented them from using less pesticide. Different combinations of economic and environmental concerns led to three main protection strategies. Growers implementing the bio-ecological strategy (S1) had high environmental concerns, used no synthetic pesticides, and compensated their lower yields with high selling prices. Growers implementing the combined strategy (S2) had moderate environmental concerns. They planted scab-resistant varieties and sprayed natural products, while diversifying their outlets and cultivars to compensate for low selling prices. The low risk strategy (S3) was implemented by growers from cooperatives with low environmental concerns who aimed for high yields and visual quality by using mainly synthetic pesticides. S2 and S3 growers were constrained by low selling prices and by the increased workload and economic risks represented by alternative methods. Extending the range of alternatives to pesticides and implementing innovative advice methodologies could be levers to reduce pesticide use.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Pests and diseases affect fruit crop yields and quality, and consequently the economic results of growers (Cooper and Dobson, 2007). The application of synthetic pesticides is one means to control these threats. However, the impact of pesticide residues on the environment and on the health of living organisms are major concerns (Ghimire and Woodward, 2013). Apples are among the crops most treated with pesticides (Drogué and DeMaria, 2012). They are susceptible to many harmful pests and diseases including aphids, codling moths and apple scab, which can both reduce yield and damage the cosmetic quality of fruit. Retailers, supermarkets and consumers are increasingly demanding regarding the appearance of apples and, backed up by public regulations, the absence of pesticide residues, both on national and export markets (Aubertot et al., 2005). These two criteria are included in contract specifications which apple growers and their first buyers must fulfill.

Most studies on apple protection have been conducted at the plot level. While some studies focused on the effects of a given technique on yield, fruit quality, and/or insect populations (Wyss and Daniel, 2004; Bogo et al., 2012), others sought to compare the performance of various protection management options with regard to these variables (Singh et al., 2009; Simon et al., 2011). Some studies were carried out at the orchard level, defined as the set of apple plots on a farm. They analyzed, for instance, the factors facilitating or impeding a transition to more sustainable practices (Goldberger et al., 2013), or evaluated protection practices based on multicriteria environmental methods (Mouron et al., 2012). By only focusing on apple orchards, these studies provided a partial view of the processes that led a grower to select and implement a protection strategy. To obtain a more comprehensive understanding of these processes, the investigation must be extended to the farm level. This is where growers allocate their resources (land, labor force, equipment and capital) to various tasks and activities

* Corresponding author. CIRAD-ES, TA C-85/15, 73 Rue Jean-François Breton, 34398, Montpellier Cedex 5, France.
E-mail addresses: solene.pissonnier@cirad.fr (S. Pissonnier), claire.lavigne@avignon.inra.fr (C. Lavigne), jean-francois.toubon@avignon.inra.fr (J.-F. Toubon), pierre-yvesle_gal@cirad.fr (P.-Y. Le Gal).

http://dx.doi.org/10.1016/j.cropro.2016.06.007
0261-2194/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

according to their natural and economic environment to reach their specific objectives (Le Gal et al., 2010). This farm level understanding is needed to provide tailored support to growers to reduce their pesticide use and respect increasingly strict environmental restrictions. Such analyses have been carried out on vegetable crops (Probst et al., 2012; Huat et al., 2014) regarding crop management and changes in pesticide use. However, few studies have investigated fruit growers' protection strategies.

This study aimed to establish how apple growers designed and implemented their crop protection strategies at the farm level by (i) analyzing the set of common factors driving decisions, (ii) explaining the diversity of pesticide use in the same context through the analysis of growers' practices, (iii) characterizing three protection strategies and the factors that framed growers' production decision-making process. It was based on quantitative and qualitative surveys of 35 French apple farms in two areas which sold their production either to Apple Grower Cooperatives (AGCs) or directly by themselves.

2. Materials and method

2.1. Study context

The study was carried out in two areas, one in south-east France (SEF) around Montpellier and one in center-west France (CWF) around Limoges. These two areas had similar apple areas, production volumes, and numbers of farms, but they differed in terms of climate and the main varieties cultivated (Table 1). Golden Delicious was the main cultivar in CWF. A diversity of cultivars was found in SEF, but Cripps Pink and Rosy Glow were popular among growers. They were marketed as Pink Lady® apples, a trademark managed by a growers association which limits the areas planted to maintain a balance between supply and demand. This denomination will be used in the paper when referring to the two corresponding cultivars. Granny Smith apples were also popular in SEF as their physiology is adapted to the hot and dry climate (early flowering) and young trees reach a high productivity sooner than in other regions.

Apple Grower Cooperatives (AGC) were the main marketing channels in the two study areas (Table 1). Owned by growers who shared their social capital, they aimed to gather and facilitate the sale of their agricultural products and the supply of their agricultural inputs. They could also provide technical advice. Their marketing department interacted with buyers, mainly national and international supermarket chains. The buyers each had their own specifications for the fruit. The AGCs' technical departments incorporated all of these various specifications into a set of recommendations provided to their growers. Usually plots were selected by the AGCs only for very specific requirements like Organic or Baby Food certifications. Both the buyers and the AGCs verified that growers were following these recommendations and were respecting public regulations. The AGCs had to be able to trace fruits from a plot to the buyer and to conduct residue analysis for each grower. Some growers sold their fruits themselves through various channels such as street markets, specialized stores, wholesale markets, or directly on the farm. They could access technical advice through extension services provided by private technicians, public services or grower associations. All of the advisors operating in a given area met once a year to write a crop protection guide which was made available to every grower.

SEF orchards were more susceptible to insects due to a warm and dry Mediterranean climate in which rainfall is concentrated during the autumn. CWF orchards were more susceptible to fungal diseases like scab because the climate was wetter throughout the year. Synthetic pesticides and alternative practices were used in both areas to control pests and diseases (Table 2). Since 1989, mating disruption has been the most widespread alternative practice as the hormone dispensers are easy to handle and the technique is efficient (Witzgall et al., 2010). French legislation required growers to manually or digitally record every pesticide application (date, dose and plot) in an annual application schedule (AS), which could be controlled for fraud.

Table 1
Climatic and production context of the two areas studied.

	SEF	CWF
Mean annual rainfall[a] (mm/year)	880	1030
Mean annual temperature[a] (°C)	16.4	12.4
Production[c] (t)	79,500	76,300
% of national production[c]	4.6	4.4
Number of apple farms[b]	236	284
Apple surface area[c] (ha)	1621	1975
% of production sold in an AGC[b]	83	86

[a] (Météociel, 2013).
[b] (Agreste, 2013).
[c] (FranceAgriMer, 2014).

2.2. Analyzing protection practices at the AGC level

One AGC near Montpellier (AGC-M) in SEF and one near Limoges (AGC-L) in CWF were selected to collaborate with the research team. AGC-L regrouped 118 farms and sold 78% of the total apple volume produced in the CWF area, mainly Golden Delicious (Table 3). AGC-M regrouped 28 farms and sold 29% of the total volume of the SEF area. It worked with a larger range of cultivars, with Pink Lady® and Granny Smith cultivars representing 87% of the total AGC-M volume and 66% of the plots (Table 3). They both provided the 2013 application schedules (AS) of all of their growers.

Both sets of AS were analyzed to evaluate the diversity of protection practices implemented within the same climatic, varietal and selling context. To do so, the Treatment Frequency Index (TFI) was used (Eq. (1)). This indicator was created in the 1980s in Denmark to assess the intensity of pesticide use and the reliance of apple growers on pesticides. It can be easily calculated from AS and takes into account not only the number of treatments but also the quantity applied. It also renders it possible to both aggregate and separate different types of products (Brunet et al., 2008). This indicator has already been used in several studies to compare different orchard production systems (Marliac et al., 2015; Simon et al., 2011; Laget et al., 2014).

Only sprays to control pests and diseases were considered since the use of herbicides and thinning products was driven by specific decision rules and represented a minor part of the pesticide applications (13% in CWF and 9% in SEF) (Agreste, 2014). Plots under three years old were excluded since they were sprayed differently due to their smaller fruit production and higher susceptibility to insects and diseases. The analysis was conducted for three cultivars separately to explore the relationship between protection practices and cultivars. It included the two main cultivars in AGC-M, i.e., Granny Smith and Pink Lady®, and the main cultivar in AGC-L, i.e., Golden Delicious (Table 3).

$$\mathrm{TFI[protection]}_j = \sum_{i=1}^{n} (AD_i \div RD_i) \quad (1)$$

with:

i = individual pesticide application,
AD_i = applied dose/ha,

Table 2
Range of alternative practices available to apple growers against pests and diseases.

	Natural pesticides	Biological	Physical
Pest	Clay, essential oils, talc, bacteria and viruses	Insect trap plant, release of pest enemies, mating disruption, hedgerows	Traps, insect-proof net, elimination of damaged fruits
Diseases	Copper, sulphur, minerals, herbal teas, essential oils, talc	Yeast, fungus	Elimination of damaged fruits, litter grinding

(Adapted from Laget et al., 2014).

Table 3
Number of plots per cultivars grown in each AGC.

	AGC-M	AGC-L
Pink Lady®	100	–
Granny Smith	72	5
Golden Delicious	21	711
Gala	27	1
Chantecler	3	10
Braeburn	1	6
Reine des reinettes	16	–
Sainte Germaine	–	3
Others	21	32
Total	**261**	**736**

RD_i = authorized dose/ha.

2.3. Analyzing protection strategies at the farm level

Ten growers from AGC-M and 13 growers from AGC-L were then surveyed to understand the decision-making processes that led to a given protection strategy. These growers were selected to cover the diversity of the AS sets in each AGC. Six independent growers who sold their products themselves, referred to as 'self-sellers', were added to the sample in each area. The objective was to increase the potential diversity of crop protection strategies in relation with selling strategies. A total of 35 farms thus were surveyed from November 2014 to June 2015.

Based on similar studies (Navarrete and Le Bail, 2007), the semi-structured survey was designed to collect information on (i) the characteristics of each farm in terms of land use and labor, (ii) the farm's natural and socio-economic environment, (iii) the grower's protection practices and marketing strategies, and (iv) the factors driving the grower's decision-making processes (Table 4). The AGC growers' AS were collected and analyzed before the interviews to focus the discussion on the qualitative information required to understand the growers' decision-making processes and to define the factors influencing them.

Protection practices of the growers surveyed were analyzed at the orchard scale (Table 5). Since a farm orchard corresponds to its total apple area, orchard TFI ($TFI[Protection]_{orchard}$) was estimated by the weighted mean of every plot TFI ($TFI[Protection]_{plot}$ as calculated with Eq. (1)) according to the corresponding plot area. Orchard TFI was also calculated per type of product (Table 5) to better describe protection practices according to the kind of product used (synthetic or natural). All of the cultivars of the 35 growers were considered in the analysis.

The effects of a given protection strategy on farm economic performance were evaluated by calculating average apple yield per farm, production costs per kg, gross margin of the apple production and number of hours worked to produce one ton of apples. Yields were estimated based on AGC tonnage records for AGC growers and grower's estimation for independent growers. Apple-linked expenses included inputs (fertilization, irrigation, protection, others), depreciation of machinery and buildings (except selling facilities), labor (nets, thinning, pruning, protection, harvest, observation, soil working, other) and marketing (time, packaging, storage). Standard values produced by extension services and the AGCs were used when data regarding the time and money spent on orchards lacked on some farms. These values were specific to each area and each production mode (organic or not). Plantation costs were not included. An inductive approach (Guillaume et al., 2016) enabled a comparison of individual protection strategies and the regrouping of similar ones, in terms of objectives and practices, into a typology of strategies by taking into account diversity while simplifying it (Landais, 1998).

3. Results

3.1. A set of common factors driving decisions

The interviews showed that growers' protection decisions were shaped by government regulations, the specifications of private operators, climate conditions and biological events. Public regulations included items such as the list of authorized products, pre-harvest intervals and the maximum number of applications of a given product. Growers farming organically on all or part of their apple area were subject to specific public regulations, particularly in terms of authorized products. Private specifications applied to every grower selling the same product to the same buyer (supermarkets, exporters), either directly or through the AGC. These specifications could include requirements which were not directly linked to protection practices, such as GLOBALGAP (www.globalgap.org/), and protection-focused requirements that were stricter than public regulations, such as (i) banning some legally authorized products, (ii) reducing applications of a given product during a season, or (iii) forbidding any pesticide use 30 days before harvest. All of the growers interviewed had signed contracts which

Table 4
Items included in the survey questionnaire and their corresponding knowledge objectives.

Item	Knowledge objective
Grower's agricultural and apple production objectives	To assess the place of apple production within the farm
Farm history, structure and management	To define characteristics, factors and events influencing orchard protection management
Marketing strategy	To evaluate how buyers influenced orchard protection management
Protection practices	To identify factors influencing both daily and tactical decision-making processes
Farm performance regarding apple production	To evaluate the effects of orchard protection on farm performance (yield, returns)
Future of the farm and the orchard	To evaluate the possible evolution of protection practices

Reproduction interdite

Table 5
Variables characterizing the practices per strategy at the orchard scale of the growers surveyed.

Variable	Grower's position
Percentage of surface covered with scab resistant/tolerant cultivars	Efforts made to decrease the number of sprayings by using agronomic levers
TFI[Protection]$_{orchard}$ [a]	Efforts to decrease pesticide use by voluntarily committing to stricter specifications (organic agriculture, biodynamic farming or baby food), or by implementing their own restriction rules
Coefficient of variation of the TFI[protection]$_{plot}$ within the same farm	Spraying adapted to the circumstances of each plot
Number of alternative methods	Efforts made to substitute pesticides with the following practices: mating disruption, nesting box, management of auxiliaries through grass cover, hedgerow
Percentage of TFI[NODU]$_{2013}$ and TFI[copper and sulphur] in TFI[protection]$_{orchard}$	Efforts to substitute synthetic pesticides with natural ones. "NODU vert 2013" is a list of natural products published by the French government and updated every year
Percentage of TFI[captan, mancozeb, dithianon] in the TFI[protection]$_{orchard}$	Reliance on synthetic molecules to control scab with the most common fungicides

[a] Weighted average of plot TFI according to the area of each plot within the farm.

included private specifications, with GLOBALGAP being the most common one.

At the plot level, growers facing identical local conditions followed similar spraying rules. Decisions to spray on a given day were usually carried out based on climate conditions and biological events. For instance, protection products which were leached by rainfall exceeding 20 mm were re-applied to renew protection. Growers, the AGCs and the extension services used models for scab spore hatching to decide when to apply fungicides. The vegetative stage of a plot at the beginning of the season (mid or late March) triggered preventive applications against fungal diseases to protect the first young leaves exposed to humidity and cold. Growers also had to alternate active compounds to avoid the development of pathogen resistance. In the case of scab, they set an application plan alternating the three main compounds (dithianon, mancozeb, captan) for each plot over the season, while organic farmers used only copper-based products, eventually mixed with sulphur. Plots which had been contaminated were noted to be monitored the following season.

3.2. Yet a diversity of pesticide use in the same context

Despite this common framework, both AGC sets of AS showed a large diversity of pesticide use (Table 6). The TFI[protection]$_{plot}$ average was quite high in both cases, with a higher value in AGC-L because of the wetter climate and the predominance of a scab-susceptible cultivar. Fungicides against scab represented 47% of the applications sprayed in AGC-L compared to 20% in AGC-M. In both cases, however, the dispersion of TFI[protection]$_{plot}$ around the average was quite large, with coefficients of variation ranging between 21% and 27%. This variability was not linked to the cultivar in AGC-M, where the most represented cultivars (Pink Lady® and Granny Smith) showed similar average values as they were susceptible to the same pests and diseases and were harvested at the same time. However, Pink Lady® showed a higher maximum than Granny Smith (respectively 59 and 46) because of its higher susceptibility.

The variability observed in relation to the same cultivar within a single area was due to how each grower designed and implemented his or her protection strategy. For instance, while a minority of growers sprayed all of their plots uniformly in order to simplify the task, a majority selected pesticide applications according to the pest/disease pressure on each plot (Table 6). A typology of protection strategies was designed to obtain a more comprehensive but synthetic view of the diversity encountered in the sample of growers interviewed.

3.3. Three main types of protection strategies

The growers interviewed designed their protection strategies by combining two kinds of concerns that were both used to build the typology: their expectations in terms of income from apple production, and their expected environmental impacts (Fig. 1). Three combinations of these concerns were found in the sample, corresponding to three main types of strategies: S1, S2 and S3. Growers implementing the same type of strategy shared similar expectations regarding their income and their environmental impacts. As the S3 strategy gathered 19 growers, it was divided into four sub-strategies according to specific farm characteristics and growers' concerns (Table 7). The consistency of each type is analyzed below regarding the growers' specific objectives, protection-related practices (Table 8), farm characteristics and performance (Table 9).

3.3.1. S1: Bio-ecological strategy

The 'bio-ecological' strategy (S1) gathered 6 growers, all independent, who had a very specific and consistent production system. Deeply concerned about their environmental impact, they aimed to reach a balance between pest control and environmental

Table 6
Variation of TFI[protection]$_{plot}$ per main cultivar in the two AGC (source: set of AS per AGC).

	AGC-M			AGC-L
	All plots	Pink Lady	Granny Smith	Golden Delicious
Number of farms	28	26	21	118
Number of plots	254	100	72	711
TFI[protection]$_{plot}$ mean	30.1	32.5	32.3	37.8
TFI[protection]$_{plot}$ max	59.2	59.2	46.6	62.0
TFI[protection]$_{plot}$ min	12.5	15.6	18.0	17.6
Standard deviation	8.2	8.7	8.0	8.4
Coefficient of variation (%)	27	27	25	21
Proportion of growers spraying their whole orchard uniformly (%)[a]	10	15	24	14

[a] With more than one plot.

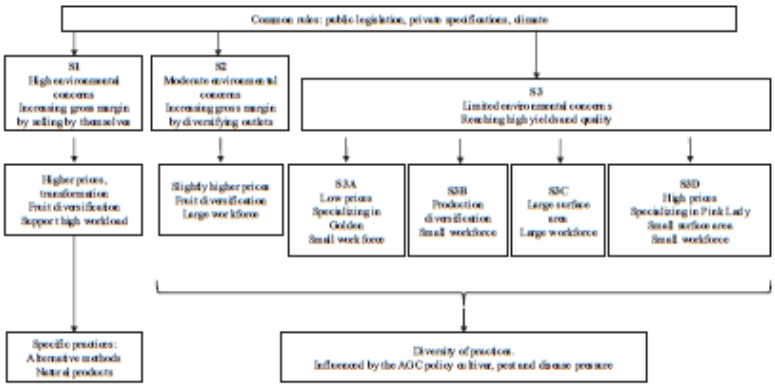


Fig. 1. Characterization of the three protection strategies and four sub-strategies identified in the 35 apple farms surveyed.

Table 7
Distribution of growers by marketing channel and protection strategy.

	S1	S2	S3A	S3B	S3C	S3D
Total growers	6	10	7	6	3	3
AGC-M	0	5	0	1	1	3
AGC-L	0	2	7	2	2	0
Independent	6	3	0	3	0	0

hedgerows and cover crops). They managed to drastically reduce their TFI[protection]$_{orchard}$ to an average of 11, the lowest of the sample.

However, these sets of practices could have a negative impact on both fruit yields (only 17.5 t/ha in average) and appearance. To compensate for their low yields, they developed marketing strategies allowing them to sell their entire production at very good

Table 8
Protection practices according to the grower's strategy.

	S1	S2	S3A	S3B	S3C	S3D
% of surface covered by tolerant/resistant cultivars	87.9	11.7	5.0	27.5	5.7	0.0
Self-restriction of pesticide use	Yes	Yes	No	No	No	No
Coefficient of variation of TFI[protection]$_{plot}$ between plots (%)	–[a]	14	5	7	3	4
Number of alternative methods	3	3–4	3	0–4	3	0–1
TFI[Protection]$_{orchard}$	10.8	34.8	37.3	33.4	36.7	35.2
TFI[Protection]$_{orchard}$ coefficient of variation (%)	57	19	17	35	28	32
TFI[NODU]/TFI[Protection]$_{orchard}$ (%)	30	10	2	4	7	7
TFI[captan, mancozeb, dithianon]/TFI[Protection]$_{orchard}$ (%)	0	31	51	40	42	31
TFI [sulphur and copper]/TFI[Protection]$_{orchard}$ (%)	18	7	0	3	1	9

[a] Missing data at plot scale.

Table 9
Farm characteristics, socio-economic context and performance by protection strategy.

	S1	S2	S3A	S3B	S3C	S3D
Apple surface (ha)	5.6	18.0	12.2	3.6	29.7	2.2
Nb of cultivars	9	5	2.6	1–11	2.7	1
% of apple orchard/total surface	30	6–100	8–100	21	92	93
Nb of permanent workers	0.0[a]	1.9	0.6	0.2	4.0	0.0
Nb of hours worked (h/t)[b]	46	15	16	21	12	15
Selling price (€/kg)	1.3	0.5	0.3	0.3–1.9	0.4	0.6
Technical network	Multi-source	Multi-source	AGC	AGC/guide book	Own network + AGC	AGC
Estimated yield (t/ha)	17.5	41.5	43.0	38.9	61.5	61.9
TFI[Protection]$_{orchard}$/t	0.5	0.8	0.8	1.3	0.6	0.9
% decrease of the yield leading to no-margin	43	25	2	39	43	39
Gross Margin (€/kg)	0.85	0.02	0.01	0.03–1.40	0.14	0.30
Gross Margin per hour worked (€/h)	18.4	1.3	0.6	2.9–47.7	11.7	20.0

[a] Except one farm with one worker.
[b] For the total work force (family, permanent employees, hired labor).

conservation. They did so by: (i) using only natural pesticides such as copper, sulphur, herbal teas, and biological agents like viruses or bacteria, (ii) implementing alternative methods, planting scab-resistant cultivars, developing orchard biodiversity (through

prices by combining (i) fruit processing of damaged apples, (ii) direct sales to consumers or retailers, including the sale of small graded apples, and (iii) subscribing to organic certification or biodynamic labels to gain consumer trust. Moreover, they planted

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

several apple cultivars (9 per farm on average) and developed other productions (fruits, vegetables, animal breeding) to meet consumers' demand and extend their harvest periods.

Apple surfaces were limited to 5.6 ha on average, in order to keep land for other productions and to cope with the high workload (46 h/ton of apple) linked jointly to protection practices, direct sales and information collection. This workload was shouldered entirely by the family to reduce expenses. This combination of low yield, high selling price and high workload led to the highest average gross margin per kg in the sample (0.85 €/kg of apple), but to low gross margin per hour worked (18 €/h). However, these results were over-estimated compared to the AGC growers since the depreciation cost of sales and storage buildings, which may have been up to €100,000 per farm, were excluded from expenses, while this cost was borne by AGC growers through the fees they paid their cooperatives. However, S1 growers did not appear to be very susceptible to yield variation, since their initial yield would have to decrease by 43% before they met with a negative margin.

3.3.2. S2: Combined strategy

The 'combined' strategy (S2) gathered 10 growers, some belonging to a cooperative, others independent. They showed a moderate environmental concern by searching for a balance between pests and auxiliaries, limiting the use of synthetic pesticides and implementing alternative methods, while securing a minimum income by diversifying their sale outlets. This diversification could take several forms: growing niche scab-resistant cultivars, developing an organic production activity separated from their conventional activities, or dividing their farm into two legal entities and dedicating one to direct sales. They partly replaced synthetic pesticides with natural ones, such as copper and sulphur. They applied as many alternative methods as possible (at least 3) to the whole orchard but kept a large proportion of non-tolerant cultivars. They adjusted their pesticide applications to the specific situation of each plot, leading to the highest coefficient of variation of TFI $[protection]_{plot}$ in the sample (14%).

With 18 ha under apple cultivation on average, most of these farms preferred to belong to an AGC or sell to big retailers due to their high production volumes. All S2 growers had to follow the specifications imposed by their buyers and accept a rather low selling price (0.35 €/kg). However, by diversifying their cultivars, selling the apples either through their AGC or by themselves, they could increase this price to 0.50 €/kg, which improved their margin per kg. They could then take more risks regarding protection practices, although their margins were more sensitive than S1 to a yield decrease. Belonging to an AGC was also a way to reduce their workload in terms of marketing, while the employment of one to three permanent workers allowed some of them to adopt labor-demanding practices such as hail or insect-proof nets.

3.3.3. S3: Risk limitation strategy

The 'risk limitation' strategy (S3) grouped 19 growers, of which only three were independent. These growers mainly aimed to secure a high income by maximizing their yield for a given level of expense. Their actions to reduce their environmental impact were limited to respecting the legal and private specifications required by their buyers, and could include alternative methods to pesticides such as codling moth mating disruption. Four sub-strategies were created since the practices and characteristics of the farms in this category were highly diverse. S3A, S3B and S3C growers chose to rely mainly on synthetic pesticides and a limited use of natural products with a $TFI[NODU]_{orchard}$ and $TFI[sulphur\ and\ copper]_{orchard}$ always below 7% and 3% of $TFI[protection]_{orchard}$. They systematically sprayed their entire orchard and their proportion of scab-resistant cultivars was generally low, except for S3B, which was more diversified due to the existence of direct sale farms in this group.

Most of the AGC-L growers interviewed implemented a S3A strategy. They suffered from the recurrent weather events in their region (CWF) which led to low yields and higher investments (hail nets), and low selling prices linked to the Golden Delicious variety (0.30 €/kg on average). Consequently, their margin was close to zero and depended highly on the yield and cosmetic quality of their fruits. They relied on synthetic fungicides which represented more than 50% of their sprays. Their workload was not particularly high although they cultivated 12 ha of apple orchard on average. Most of the work was carried out by family members, which affected their capacity to move towards alternative techniques requiring more observation, handling and monitoring. Changing their practices in the short term would have been too risky for the economic sustainability of their farms.

The six S3B growers planted apple orchards on a small part of their cultivated area (21%) to earn extra income. They were involved in other activities which they aimed to develop such as direct sales, animal breeding and plant breeding/nursery. None were willing to spend more time and money or take risks to develop alternative practices on their orchard. Their objective was to maximize the income they could earn from their orchard without investing too much in it. Their selling prices, margin and hours spent in the orchard were variable as the growers were either self-sellers or belong to an AGC. The self-sellers reached margins of around 1.40 €/kg thanks to high selling prices. They grew 8 cultivars on average, mixing common ones such as Golden Delicious and Granny Smith with rustic ones such as Sainte Germaine and Reine des Reinettes. AGC growers' margins remained very poor (around 0.03 €/kg on average) and they all grew only one cultivar (Pink Lady® or Golden Delicious). Despite the better selling price of Pink Lady®, its grower had a low margin due to a scab infection, showing the sensitivity of this cultivar to scab attacks.

S3C growers cultivated large apple orchards (30 ha on average) based on a production model combining high yields, low gross margins per kg and a large workforce (4 permanent workers on average and up to 50 seasonal workers during the harvest). Two of these growers were in the Limousin region and only grew Golden Delicious apples. The other grower had six classic cultivars (Pink Lady®, Gala, Granny Smith, Golden Delicious, Reine des reinettes, Braeburn). They aimed to reduce their production costs and to make all tasks (pruning, thinning, spraying, harvesting) cost-effective and easy to manage. Applying a systematic plan of pesticide use on the whole orchard constituted a central piece of this strategy, which led to the lowest time spent to produce one ton of fruit in the sample (12 h/t). Growers needed to sell their large apple volumes to an AGC, where they often occupied a high position (president, AGC founder). Their sound knowledge and technical skills, based on their close relationships with AGC advisors and on their own growers network, led to high yields and a good selling price for AGC growers (0.38 €/kg). They were not reluctant to implement alternative practices that they combined (more than replaced) with the use of synthetic pesticides. Their margin per kg was low (0.14 €/kg on average) due to their high equipment and labor costs but higher than other AGC growers thanks to their good results.

S3D strategy gathered three growers from SEF with 2 ha of apple orchard on average. Their entire farms were designed to avoid specific equipment or workers. To valorize this small area, the growers planted the high-value cultivar Pink Lady®, sold through AGC-M at 0.60 €/kg. Consequently, their gross margin was the highest of the AGC farmers, both per kg and per hour, since their workload was similar to S2 and other S3 strategies. Moreover these margins showed the lowest susceptibility to yield variation. This

profitable context, based on a variety harvested late and highly sensitive to scab and powdery mildew, did not encourage growers to decrease their pesticide use, although the low scab pressure allowed them to use copper and sulphur without taking too many risks. However, they did not implement many alternative practices as small areas are not adapted to having mating disruption or hedgerows.

Based on these observations, the selection and implementation of an orchard protection strategy by growers resulted from diversified and complex combinations of common external factors (public regulations and buyers' private specifications), climatic factors linked to pest and disease pressures, farm circumstances (especially orientation of activities, surface areas and labor resources) and a grower's personal concerns about his or her environmental impacts and economic objectives (Fig. 1). However, the efficiency of a given strategy applied to a specific farm estimated with the TFI[Protection]$_{orchard}$/ton of apple produced, could be very variable (Fig. 2). Comparing the mean TFI[Protection]$_{orchard}$/t per strategy showed that protection efficiency was not related to the practices implemented (Table 9). The most efficient strategies were indeed those representing the two extremes of pesticide use, S1 and S3C. S1 was efficient because the use of pesticide was low although yield was low; S3C was efficient because yield was high although the use of pesticide was high.

4. Discussion

4.1. Apple protection as viewed by farmers: a range of constraints with few opportunities

This study showed that protection strategies were designed and implemented by apple growers based on consistent combinations of objectives in terms of income and environmental impacts and a range of generic drivers including: (i) the grower's marketing strategy which conditioned the specifications s/he would have to respect and the selling prices s/he could expect from buyers, (ii) the time s/he was willing to spend on the orchard according to his or her work force, (iii) the cultivated surface area, and (iv) the production system (diversification *vs* specialization). Based on these combinations, six types of strategies were identified on a rather small sample. This diversity of protection strategies within a common context was also observed by Marliac et al. (2015), who identified four types of protection strategies within a sample of 24 organic apple growers in south-east France. However, given the number of interacting drivers involved, each farm studied appeared to be a unique case where these processes took specific values. Such a result was already observed regarding work organization in dairy farms (Hostiou et al., 2015).

The "bio-ecological" growers managed to decrease their pesticide use to a low level. However, they balanced their low yields, related to the agronomic risks they took, with a better valorization of their fruits through short food chains while increasing their workload. This production and marketing model is frequently found in organic agriculture (Reganold and Wachter, 2016). It did not seem, however, appropriate for every apple grower due to both individual farm circumstances and the structure of the apple sector in France, where 90% of apple volumes were managed by supermarkets and exporters (Agreste, 2013). These apple buyers looked for a standardized fruit with no pesticide residue and no cosmetic defaults that was available at a low price to fulfill their consumers' requirements. These low purchase prices led to the low gross margins of the AGC growers and encouraged a limited-risk strategy based on pesticide use.

For AGC growers, most of the alternative methods to pesticides seemed risky, especially because these methods were not suitable for all farms and they impacted yield, quality and expenses (Wilson and Tisdell, 2001). For instance, rain-proof tarps can prevent scab spores from hatching but up to 210 h/ha are needed to install and handle the nets and their costs are high (Laget et al., 2014). Thus a contradiction emerges between consumers' requirements, as channeled by supermarkets and exporters, and growers' capacity to meet these requirements without pesticide use.

4.2. Analyzing and formalizing growers' decision-making processes

The farm-scale approach used in this study and the inductive analysis based on both application schedules and semi-structured interviews allowed protection practices to be linked with a farm's socio-economic context, farm structure, and the grower's management processes. This methodology required a considerable investment of time to collect both quantitative and qualitative data and to understand the grower's decision-making processes on each

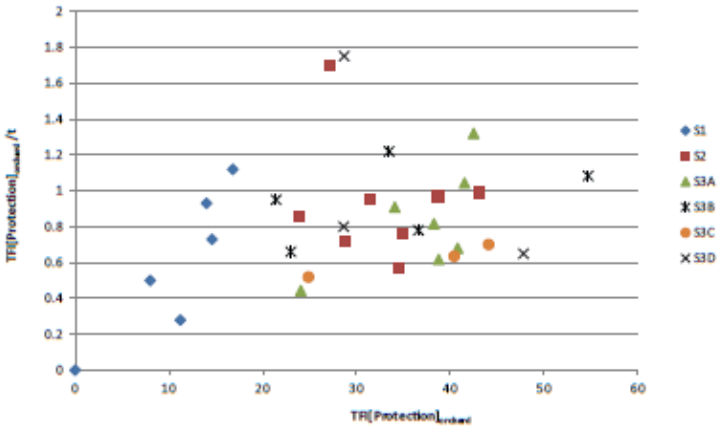


Fig. 2. Variation of the pesticide application efficiency (TFI[Protection]$_{orchard}$/ton of apple produced) according to the mean total application (TFI[Protection]$_{orchard}$) per farm and per protection strategy (n = 35).

farm. Combined with financial and time constraints, these elements justified the reduced sample size, which is frequently observed in such studies (Sattler and Nagel, 2010; Bernard et al., 2011; Guillaume et al., 2016). This small size was balanced by the diversity of the farms selected, independent of their weight in the total farm population concerned by the study. This diversity enriched the comparative analysis between farms and allowed a more generic explanatory model of the processes studied to be built (Eisenhardt and Graebner, 2007). This model included growers' general objectives in terms of economic and environmental concerns, which also were found in others production systems (Aubry et al., 1998), and generic factors influencing farmers' decision-making processes (Navarrete et al., 2014). Further similar studies conducted in other fruit production areas could contribute to validate and enrich this typology.

Apple growers' daily practices were analyzed during a specific year. They obviously depended on the climatic conditions of the year, which impacted pest and disease pressures. However, both the strategic decision-making processes driving these practices and the factors influencing them remain constant on a mid-term horizon. The TFI resulting from a given strategy thus may vary depending on annual climatic conditions. However, these conditions do not have an effect on the implementation of alternative practices requiring strategic choices such as insect-proof nets.

The typology of crop protection strategies based on this model was a means to understand this diversity. It could be used to adjust advisors' support to groups of farmers or to orientate technical research on topics relevant to some types of strategy (Rebuffel et al., 2015). It nonetheless remains a simplified picture of reality focused on the topic addressed (Rusinamhodzi et al., 2016). This picture could be improved by considering all of the practices at the orchard scale (fertilization, thinning, pruning) as well as the farm scale in a more holistic approach to crop protection. As shown by the S3B strategy, orchard practices indeed interact with other production practices. Such an extended approach should be required to study farm transition from synthetic, chemicals-based to biodiversity-based agriculture (Duru et al., 2015).

Moreover, growers' decision-making processes involve additional factors beyond the technical and management considerations studied here. Growers' attitudes and preferences play a part in the implementation of a given protection strategy. For instance, Hashemi and Damalas (2010) have shown that the amount of pesticide used by growers was influenced by their perception of pesticide efficacy. Hunt (2009) showed that growers' practices were influenced by the way they interpret their relationship with their orchard through their senses (sight, touch, hearing, taste and smell). Socio-demographic factors can also influence growers' practices. Wilson and Tisdell (2001) showed that growers in developing countries could be less inclined to decrease their pesticide use because of their lack of knowledge regarding the health effects of pesticide use and the existence of alternative practices.

4.3. Towards less pesticide use?

Several levers that could be used to support growers to shift towards more sustainable practices can be suggested. Amongst the technical alternatives to be developed in the near future, full or partial scab resistant cultivars sprayed only when infection levels are high should allow decreasing fungicide use (Didelot et al., 2016). Acceptance of these new cultivars has to be accompanied by a strong marketing strategy. Alternative practices and efforts also have to be developed at a landscape scale to insure their efficiency since diseases, pests and biological controls ignore the boundaries of plots and farms. However, managing crop protection at such a scale may be quite complex since it requires co-ordination between growers and probably other stakeholders that can only be reached if effective social and policy tools are established (Brewer and Goodell, 2012).

Supporting growers in (re)designing their protection strategies at the farm level requires an evolution in the kind of advice delivered. At present, advisors provide mainly tactical and operational advice aiding growers to best time their spraying interventions to avoid infections. This is useful in reducing pesticide use by improving application efficiency. However, this kind of advice is not enough to support an evolution towards alternative practices which would impact several farm components such as work organization or diversification (Pardo et al., 2010). Strategic advice is required which takes into account the whole farming system and identifies the barriers preventing growers from innovating (Le Gal et al., 2011). Such advice can also take into account risk management processes when growers' risk perceptions regarding alternative methods prevent them from changing their practices (Mitchell and Hutchison, 2009). Modeling tools at the farm level can then be used to evaluate *ex-ante* the consequences of an innovative scenario on farm functioning and performance (Le Gal et al., 2013; Dogliotti et al., 2014). This approach can be jointly conducted by researchers, advisors and growers in the framework of co-innovation or participatory research processes, which better meet the stakeholders' requirements and address specific issues (Faure et al., 2014).

Growers could be encouraged to take more agronomic risks if their economic impacts are reduced. Increasing apples prices or implementing financial incentives with adapted educational programs (Brewer et al., 2004) are ways to increase growers' margins. Commercial brands such as Pink Lady® have efficient marketing strategies leading to higher prices, but they do not systematically include environmental objectives. Marette et al. (2012) showed that consumer willingness to pay for environmentally friendly products increased if precise information about pesticide use was given. Although pesticide issues are frequently addressed by the media, the presentations are often one sided, and fail to address the underlying causes of pesticide use: a demand for perfect looking fruit at low prices.

To conclude, pesticide use is an increasing concern worldwide due to its impacts on the environment and human health. Alternative methods to pesticides are available but they have to be integrated into the protection strategies designed and implemented by farmers based on their environmental and economic objectives and their farming resources, especially land, labor and capital. In the apple sector, marketing strategies are a key element behind protection choices since they frame the selection of cultivars, the specifications growers have to fulfill, and the prices they can get from their buyers. Although each farm is a specific case, the diversity of protection practices encountered in a small sample set within a similar climatic and regulatory context could be organized into a few types showing consistent sets of pesticide practices.

Pesticide use is generally reduced under pressure from public regulations and apple buyers. However, it will be difficult to reduce the current use levels due to fruit quality standards and low market prices. Indeed, alternative methods are more risky than pesticides in terms of yield losses and lead "bio-ecological" growers to directly sell their production to obtain good prices and reasonable incomes. Given the diversity of constraints and opportunities at the farm level, coupled with consumers' conflicting demands, innovative advice methodologies are needed to support growers in (re) designing their crop protection strategies according to their own environmental and economic objectives and evolving market requirements. With that in mind, the next step of this study will consist of designing a calculation tool able to simulate the impact of

a given protection strategy on farm management and performance by taking into account the specificities of each farm. This tool will be used to provide strategic advice to growers by *ex-ante* evaluating a range of both protection and cultivar options according to their impacts on the farm in terms of TFI, workload and economic returns.

Acknowledgments

The authors are very grateful to the apple growers and the apple cooperatives who agreed to provide the rich set of information collected on their protection practices. They thank Grace Delobel for editing the paper in English. This work was funded by the French Agence Nationale de la Recherche under the ALID/Sustain'apple project ANR-13-ALID-004.

References

Agreste, 2013. http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/verger2014T4bsva.pdf. (accessed January 2016).
Agreste, 2014. Enquête pratiques phytosanitaires en arboriculture 2012, Nombre de traitements, Agreste les Dossiers 22.
Aubertot, J.N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.J., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Voltz, M., 2005. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA and Cemagref, Paris.
Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision making processes for annual crop management. Agric. Syst. 56, 45–65.
Bernard, J., Le Gal, P.-Y., Triomphe, B., Hostiou, N., Moulin, C.H., 2011. Involvement of small-scale dairy farms in an industrial supply chain: when production standards meet farm diversity. Animal 5, 961–971.
Bogo, A., Casa, R.T., Agostineto, L., Gonçalves, M.J., Rufato, L., 2012. Effect of hail protection nets on apple scab in 'Royal Gala' and 'Fuji' apple cultivars. Crop Prot. 38, 49–52.
Brewer, M.J., Hoard, R.J., Landis, J.N., Elworth, L.E., 2004. The case and opportunities for public-supported financial incentives to implement integrated pest management. J. Econ. Entomology 97, 1762–1789.
Brewer, M.J., Goodell, P.B., 2012. Approaches and incentives to implement integrated pest management that addresses regional and environmental issues. Annu. Rev. Entomology 57, 41–59.
Brunet, N., Guichard, L., Omon, B., Pingault, N., Pleyber, E., Seiler, A., 2008. L'indicateur de fréquence de traitements (IFT): un indicateur pour une utilisation durable des pesticides. Courr. de l'environnement de l'INRA 56, 131–141.
Cooper, J., Dobson, H., 2007. The benefits of pesticides to mankind and the environment. Crop Prot. 26, 1337–1348.
Didelot, F., Caffier, V., Orain, G., Lemarquand, A., Parisi, L., 2016. Sustainable management of scab control through the integration of apple resistant cultivars in a low-fungicide input system. Agric. Ecosyst. Environ. 217, 41–48.
Dogliotti, S., García, M.C., Peluffo, S., Dieste, J.P., Pedemonte, A.J., Bacigalupe, G.F., Scarlato, M., Alliaume, F., Alvarez, J., Chiappe, M., Rossing, W.A.H., 2014. Co-innovation of family farm systems: a systems approach to sustainable agriculture. Agric. Syst. 126, 76–86.
Drogué, S., DeMaria, F., 2012. Pesticide residues and trade, the apple of discord? Food Policy 37, 641–649.
Duru, M., Therond, O., Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.-A., Justes, E., Journet, E.-P., Aubertot, J.-N., Savary, S., Bergez, J.-E., Sarthou, J.P., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. Agron. Sustain. Dev. 35, 1237–1257.
Eisenhardt, K.M., Graebner, M.E., 2007. Theory building from cases: opportunities and challenges. Acad. Manag. J. 50, 25–32.
Faure, G., Gasselin, P., Triomphe, B., Temple, L., Hocde, H., 2014. Innovating with Rural Stakeholders in the Developing World, Action Research in Partnership. IM Publishers. Edition Quae, 224p.
FranceAgriMer, 2014. La pomme en 2013-2014, bilan de campagne.
Ghimire, N., Woodward, R.T., 2013. Under- and over-use of pesticides: an international analysis. Ecol. Econ. 89, 73–81.
Goldberger, J.R., Lehrer, N., Brunner, J.F., 2013. Adoption of organophosphate alternatives in Washington apple ipm programs: survey evidence from pest management consultants and growers. J. Integr. Pest Manag. 4, 1–8.
Guillaume, S., Bruzeau, C., Justes, E., Lacroix, B., Bergez, J.-E., 2016. A conceptual model of farmers' decision-making process for nitrogen fertilization and irrigation of durum wheat. Eur. J. Agron. 73, 133–143.
Hashemi, S.M., Damalas, C.A., 2010. Farmers' perceptions of pesticide efficacy: reflections on the importance of pest management practices adoption. J. Sustain. Agric. 35, 69–85.
Hostiou, N., Cialdella, N., Vazquez, V., Muller, A.G., Le Gal, P.-Y., 2015. Work organization on smallholder dairy farms: a process unique to each farm. Trop. Anim. Health Prod. 47, 1271–1278.
Huat, J., Aubry, C., Dore, T., 2014. Understanding crop management decisions for sustainable vegetable crop protection: a case study of small tomato growers in Mayotte island. Agroecol. Sustain. Food Syst. 38, 764–785.
Hunt, L., 2009. Interpreting orchardists' talk about their orchards: the good orchardists. Agric. Hum. Values 27, 415–426.
Laget, E., Guadagnini, M., Plénet, D., Simon, S., Assié, G., Billote, B., Bourgouin, B., Pratantuono, M., Guérin, A., Hucbourg, B., Lemarquand, A., Loquet, B., Mercadal, M., Parveaud, C.-E., Ramade, L., Rames, M.-H., Ricaud, V., Rousselou, C., Sagnes, J.-L., Zavagli, F., 2014. Guide pour la conception de systèmes de production fruitière économes en produits phytopharmaceutiques, fiches techniques. GIS Fruits et Ministère de l'agriculture, Paris, France.
Landais, E., 1998. Modelling farm diversity: new approaches to typology building in France. Agric. Syst. 58, 505–527.
Le Gal, P.-Y., Merot, A., Moulin, C.H., Navarrete, M., Wery, J., 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. Environ. Model. Softw. 25, 258–268.
Le Gal, P.-Y., Dugué, P., Faure, G., Novak, S., 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. Agric. Syst. 104, 714–728.
Le Gal, P.-Y., Bernard, J., Moulin, C.-H., 2013. Supporting strategic thinking of smallholder dairy farmers using a whole farm simulation tool. Trop. Anim. Health Prod. 45, 1119–1129.
Marette, S., Messéan, A., Millet, G., 2012. Consumers' willingness to pay for eco-friendly apples under different labels: evidences from a lab experiment. Food Policy 37, 151–161.
Marliac, G., Penvern, S., Barbier, J.-M., Lescourret, F., Capowiez, Y., 2015. Impact of crop protection strategies on natural enemies in organic apple production. Agron. Sustain. Dev. 35, 803–813.
Mitchell, P.D., Hutchison, W.D., 2009. Decision Making and Economic Risk in IPM. Cambridge University Press (Cambridge Books Online. Cambridge University Press).
Météociel, 2013. http://www.meteociel.fr. (Accessed January 2016).
Mouron, P., Heijne, B., Naef, A., Strassemeyer, J., Hayer, F., Avilla, J., Alaphilippe, A., Höhn, H., Hernandez, J., Mack, G., Gaillard, G., Solé, J., Sauphanor, B., Patocchi, A., Samietz, J., Bravin, E., Lavigne, C., Bohanec, M., Golla, B., Scheer, C., Aubert, U., Bigler, F., 2012. Sustainability assessment of crop protection systems: sustain OS methodology and its application for apple orchards. Agric. Syst. 113, 1–15.
Navarrete, M., Le Bail, M., 2007. Saladplan: a model of the decision-making process in lettuce and endive cropping. Agron. Sustain. Dev. 27, 209–221.
Navarrete, M., Dupré, L., Lamine, C., 2014. Crop management, labour organization, and marketing: three key issues for improving sustainability in organic vegetable farming. Int. J. Agric. Sustain. 13, 257–274.
Pardo, G., Riravololona, M., Munier-Jolain, N.M., 2010. Using a farming system model to evaluate cropping system prototypes: are labour constraints and economic performances hampering the adoption of Integrated Weed Management? Eur. J. Agron. 33, 24–32.
Probst, L., Adoukonou, A., Amankwah, A., Diarra, A., Vogl, C.R., Hauser, M., 2012. Understanding change at farm level to facilitate innovation towards sustainable plant protection: a case study at cabbage production sites in urban West Africa. Int. J. Agric. Sustain. 10, 40–60.
Rebuffel, P., Lemoine, C., Faure, G., 2015. Le difficile accès au conseil pour les petites exploitations agricoles: le cas de Mayotte. Cah. Agric. 24, 269–276.
Reganold, J.P., Wachter, J.M., 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. Nat. Plants 2, 15221.
Rusinamhodzi, L., Dahlin, S., Corbeels, M., 2016. Living within their means: reallocation of farm resources can help smallholder farmers improve crop yields and soil fertility. Agric. Ecosyst. Environ. 216, 125–136.
Sattler, C., Nagel, U.J., 2010. Factors affecting farmers' acceptance of conservation measures-a case study from north-eastern Germany. Land Use Policy 27, 70–77.
Simon, S., Brun, L., Guinaudeau, J., Sauphanor, B., 2011. Pesticide use in current and innovative apple orchard systems. Agron. Sustain. Dev. 31, 541–555.
Singh, S.B., Mukherjee, I., Maisnam, J., Kumar, P., Gopal, M., Kulshrestha, G., 2009. Determination of pesticide residues in integrated pest management and nonintegrated pest management samples of apple (Malus pumila Mill.). J. Agric. Food Chem. 57, 11277–11283.
Wilson, C., Tisdell, C., 2001. Why farmers continue to use pesticides despite environmental, health and sustainability costs. Ecol. Econ. 39, 449–462.
Witzgall, P., Kirsch, P., Cork, A., 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. J. Chem. Ecol. 36, 80–100.
Wyss, E., Daniel, C., 2004. Effects of autumn kaolin and pyrethrin treatments on the spring population of Dysaphis plantaginea in apple orchards. J. Appl. Entomol. 128, 147–149.

Annexe 5. Supplementary Materials of Chapter 4

Supplementary Materials 1

Table 1: Calculations carried out by Co-Hort: list of equations used

	Output	Formula
Index	*b*	Block
	c	intermediate Cost index (other than Sprayed input)
	e	equipment
	i	sprayed input
	j	price category
	k	practice
	m	month
BLOCK scale (b)	*TFI* $_b$	$\sum_i S_i \times AD_i$ S_i= Number of sprays for one input *i* AD_i= Proportion of the authorized dose applied *Nota bene:* When the user only uses categories of input and does not indicate the % of the legal dose applied, the TFI is calculated directly by using the number of sprays indicated.
	Gross input/ha [GP_b]	$\sum_j P_j \times Y_j \times PY_j$ P_j= Prices/volume unit Y_j= Yield/ha PY_j= Proportion of the yield sold at this price
	Total_Labor_Cost_amount /ha [TLC_b]	$\sum_k T_k \times LC_k$ T_k= Time spent per practice/ha LC_k= Associated labor cost amount/time unit
	Total_Input_ sprayed_ Cost_amount/ha [TPC_b]	$\sum_i IP_i \times QS_i \times S_i$ PP_i= Input Price per unit sprayed QS_i= Quantity Sprayed for one spray/ha S_i= Number of sprays per input
	Total_Equipment_ Cost_amount/ha [TEC_b]	$\sum_e EC_e \times \sum_m T_m^e$ EC_e= Equipment Cost amount/time unit T_m^e= Monthly working time of Equipement *e*

	Total_Other_Intermediate _Cost_amount/ha [TIC_b]	$\sum_c IC_c$ IC_c= Cost amount/ha
	Total_ "Strategy"_ Costs_amount/ha [TSC_b]	$TLC_b + TPC_b + TEC_b + TIC_b$
	Gross_Margin/ha [GM_b]	$GP_b - TSC_b$
Modelled FARM SCALE	Total_Sales_ Revenue [TGP]	$\sum_b GP_b \times SURF_b$ $SURF_b$= Surface of Block b
	Total Fixed_Cost/ha [TFX]	$\sum_x FC_x$ x= Fixed cost index FC_x= Fixed Cost amount x/ha
	Total_Gross_Margin [TGM]	$\sum_b GM_b \times SURF_b$
	Average Gross_Margin/ha [$TGMha$] average?	$TGM \div \sum_b SURF_b$
	Total_Net_Margin [TGN]	$TGM - (TFX \times \sum_b SURF_b)$
	Average Net margin/ha [$TGNha$]	$TGN \div \sum_b SURF_b$
Whole FARM SCALE	Total labor available [TLA]	$\sum_m TLA_m$ TLA= Total labor available/month
	Total labor demand [TLB]	$\sum_m \sum_b \sum_p (TC_{p,b} \times SURF_b)_m$ TC_p= Time Consumed per practice and per hectare $SURF_b$= Surface of Block b
	Labor balance	$TLA - TLB$

Supplementary Materials 2

Intermediate costs per block

Blocks	Practices	Costs	Costs/ha
1		Gas	309
1	Protection	Pesticides	1336
1	Fertilization	Fertilizers	344

Figure 1: Screenshot of BLOCK_Intermediate_Costs spreadsheet.

Fixed costs

Associated practices	Fixed costs	Total cost/year/ha	Proportion of the cost to affect to the system modeled (0 to 1)
	Depreciation of equipment	3942	1
Planting	Trees	15.5	1
	Packaging	26.9	1
	Various provisions	114.6	1
	Construction	35.7	1
	Salaries for associates	2200	1
	Equipment maintenance	485	1
	Insurance	306	1
	Taxes	27	1
	Building maintenance	98	1
	Availabilities	307	1
	Electricity & water	131	1
	Postage fees	1991	1
	Business travels	36	1
	Taxes	69	1
	Depreciaiton of the previous orchard	147	1

Figure 2: Screenshot of FARM_Fixed_Costs spreadsheet.

Economic results

		BLOCKS	
		1	-
	Crop	APPLE	-
	Variety	GOLDEN	-
BLOCK	Sales revenue /ha	17548	-
	Labor cost amount /ha	4860	-
	Product sprayed cost amount /ha	0	-
	Equipment cost amount /ha	0	-
	Intermediate cost amount /ha	1989	-
	Total strategy cost amount /ha	6849	-
	Gross margin /ha	10699	-
FARM MODELLED	Total Fixed cost /ha	9785	
	Total Sales revenue	17548	
	Average Gross margin /ha	10699	
	Average Net margin /ha	914	
	Total Net margin	13715	
	Total Gross margin	160485	

Figure 3: Screenshot of Economic results spreadsheet.

Rapport-Gratuit.com

Supplementary Materials 3

Input spreadsheets for Farm 1 Planting scenario, extracted and translated from CoHort.

Intermediate costs per block

Blocks	Practices	Costs	Costs/ha
1		Gas	309
1	Protection	Pesticides	1336
1	Fertilization	Fertilizers	344
2		Gas	280
2	Protection	Pesticides	1100
2	Fertilization	Fertilizers	344
3	Planting	Planting	2200
2	Planting	Planting	2200

Figure 1: Screenshot of BLOCK_Intermediate_Costs spreadsheet.

Practices and time consumed per block

				Time consumed per hectare											
BLOCKS	Practices	Type of labour	Associated equipment	jan	feb	mar	apr	may	june	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	Pruning	Family labour		14	14	14									
1	Leaf shredding	Family labour											3		
1	Net handling	Family labour					3				3				
1	Thinning	Unqualified temporary labour						40	40	40					
1	Harvesting	Unqualified temporary labour										240			
1	Weeding	Family labour						4	4	4			4		
1	Observing	Family labour		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	Protection	Family labour				5	8	8	5	2	2	2			
2	Pruning	Family labour		14	14	14									
2	Leaf shredding	Family labour											3		
2	Net handling	Family labour					3				3				
2	Thinning	Unqualified temporary labour						40	40	40					
2	Harvesting	Unqualified temporary labour										240			
2	Weeding	Family labour						4	4	4			4		
2	Observing	Family labour		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2	Protection	Family labour				3	5	5	5	2	2	2			
3	Planting	Family labour									10			140	140
3	Net handling	Family labour												10	

Figure 2: Screenshot of BLOCK_Planning spreadsheet.

Sprayed Inputs

BLOCKS	Practices	Input categories	Inputs	Nb of sprays/year	Quantity of input applied	Proportion of the legal dose	Take into account in TFI (1 yes, 0 no)
1	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	1,67	1	1
1	Protection	Insecticide	Ovipron	1	25	1	1
1	Protection	Insecticide	Karate Zeon	1	0,075	1	1
1	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	3,33	1	1
1	Protection	Fungicide	Scala	1	0,5	1	1
1	Protection	Fungicide	Dithane	1	2,1	1	1
1	Protection	Insecticide	Karate Zeon	1	0,11	1	1
1	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1	1	1
1	Protection	Fungicide	Azupec WG	1	7,5	1	1
1	Fertilization	Fertilizers	Fertileader T	2	4	0	0
1	Protection	Insecticide	Teppeki	1	0,14	1	1
1	Thinning	Thinning product	Tonicler	1	0,6	1	0
1	Thinning	Thinning product	LI 700	1	1,25	1	0
1	Protection	Fungicide	Syllit	2	1,69	1	1
1	Protection	Fungicide	Greman	2	0,25	1	1
1	Protection	Others	Topsin 70	1	1	1	0
1	Protection	Fungicide	Difcor	1	0,15	1	1
1	Protection	Fungicide	Delan	3	0,5	1	1
1	Protection	Insecticide	Supreme	1	0,25	1	1
1	Protection	Fungicide	Difcor	1	0,15	1	1
1	Protection	Insecticide	Precision	1	0,3	1	1
1	Protection	Natural product	Ginko	1	2	1	1
1	Protection	Fungicide	Azupec WG	2	5	1	1
1	Protection	Insecticide	Coragen	1	0,175	1	1
1	Protection	Insecticide	Supreme	1	0,5	1	1
1	Weeding	Weeding product	Aminugec 60	1	0,3	1	1
1	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1
1	Protection	Insecticide	Ovipron	1	10	1	1
1	Protection	Storing Product	Geoxe	1	0,4	1	1
1	Protection	Storing Product	Bellis	1	0,8	1	1
1	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1
2	Fertilization	Fertilizers	Fertilizers	1	150	0	0
2	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	1,67	1	1
2	Protection	Insecticide	Ovipron	1	25	1	1
2	Protection	Insecticide	Karate Zeon	1	0,075	1	1
2	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	3,33	1	1
2	Protection	Insecticide	Karate Zeon	1	0,11	1	1
2	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1	1	1
2	Protection	Fungicide	Azupec WG	1	7,5	1	1
2	Fertilization	Fertilizers	Fertileader T	2	4	0	0
2	Protection	Insecticide	Teppeki	1	0,14	1	1
2	Thinning	Thinning product	Tonicler	1	0,6	1	0
2	Thinning	Thinning product	LI 700	1	1,25	1	0
2	Protection	Fungicide	Greman	2	0,25	1	1
2	Protection	Others	Topsin 70	1	1	1	0
2	Protection	Fungicide	Delan	1	0,5	1	1
2	Protection	Insecticide	Supreme	1	0,25	1	1
2	Protection	Insecticide	Precision	1	0,3	1	1
2	Protection	Natural product	Ginko	1	2	1	1
2	Protection	Fungicide	Azupec WG	2	5	1	1
2	Protection	Insecticide	Coragen	1	0,175	1	1
2	Protection	Insecticide	Supreme	1	0,5	1	1
2	Weeding	Weeding product	Aminugec 60	1	0,3	1	1
2	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1
2	Protection	Insecticide	Ovipron	1	10	1	1
2	Protection	Storing product	Geoxe	1	0,4	1	1
2	Protection	Storing product	Bellis	1	0,8	1	1
2	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1
3	Fertilization	Fertilizers	Fertilizers	1	150	0	0
3	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	1,67	1	1
3	Protection	Insecticide	Ovipron	1	25	1	1
3	Protection	Fungicide	Nordox 75	1	3,33	1	1
3	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1	1	1
3	Protection	Fungicide	Azupec WG	1	7,5	1	1
3	Fertilization	Fertilizers	Fertileader T	2	4	0	0
3	Weeding	Weeding product	Aminugec 60	1	0,3	1	1
3	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1
3	Weeding	Weeding product	RoundUp	1	1,1	1	1

Figure 3: Screenshot of BLOCK_Sprayed_Inputs spreadsheet

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Supplementary Materials 4

Input spreadsheets for Farm 2, Initial scenario extracted and translated form CoHort.

Practices and time consumed per block

				Time consumed per hectare											
BLOCKS	Practices	Type of labour	Associated equipment	jan	feb	mar	apr	may	june	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
1	Thinning	Permanent labour						22	22	22					
1	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
1	Hail net handling	Permanent labour					3				3				
1	Observing	Permanent labour				2	2	2	2						
1	Protection	Permanent labour				10	10	10							
1	Harvesting	Unqualified temporary labour										262			
1	Pruning	Permanent labour		33	33	33	33								33
2	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
2	Thinning	Permanent labour						22	22	22					
2	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
2	Hail net handling	Permanent labour					3				3				
2	Observing	Permanent labour				2	2	2	2						
2	Protection	Permanent labour				10	10	10							
2	Harvesting	Unqualified temporary labour										140			
2	Pruning	Permanent labour		33	33	33	33								33
3	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
3	Thinning	Permanent labour						16	16	16					
3	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
3	Hail net handling	Permanent labour					3				3				
3	Observing	Permanent labour				2	2	2	2						
3	Protection	Permanent labour				5	5	4			2				
3	Harvesting	Unqualified temporary labour										140			
3	Pruning	Permanent labour		16	16	16	16								16
4	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
4	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
4	Plantation	Permanent labour									10			140	140
4	Hail net handling	Permanent labour					3				3				
5	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
5	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
5	Plantation	Permanent labour									10			140	140
5	Hail net handling	Permanent labour					3				3				
6	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
6	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
6	Plantation	Permanent labour									10			140	140
6	Hail net handling	Permanent labour					3				3				

Figure 1: Screenshot of BLOCK_Planning spreadsheet.

Intermediate costs per block

Blocks	Practices	Costs	Costs/ha
1		Gas	412
1	Fertilization	Fertilization product	786
1	Protection	Pesticides	591
1	Chemical weeding	Pesticides	150
1		Hail net	1000
2		Gas	412
2	Fertilization	Fertilization product	786
2	Protection	Pesticides	591
2	Chemical weeding	Pesticides	150
2		Hail net	1000
3		Gas	300
3	Fertilization	Fertilization product	786
3	Protection	Pesticides	194
3	Chemical weeding	Pesticides	150
3		Hail net	1000
4		Hail net	1000
4	Fertilization	Fertilization product	786
4	Chemical weeding	Pesticides	150
4		Gas	300
5		Hail net	1000
5	Fertilization	Fertilization product	786
5	Chemical weeding	Pesticides	150
6		Hail net	1000
6	Fertilization	Fertilization product	786
6	Chemical weeding	Pesticides	150
6		Gas	300

Figure 2: Screenshot of BLOCK_Intermediate_Costs spreadsheet.

Sprayed Inputs

BLOCKS	Practices	Input categories	Inputs	Nb of sprays/year	Quantity of input applied	Proportion of the legal dose	Take into account in TFI (1 yes, 0 no)
1	Protection	Storing product		4		1	1
1	Thinning	Thinning product		1		1	1
1	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
1	Protection	Fungicide		12		1	1
1	Protection	Insecticide		6		1	1
1	Protection	Natural product		2		1	1
1	Chemical weeding	Weeding product		6		1	0
2	Protection	Storing product		4		1	1
2	Thinning	Thinning product		1		1	1
2	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
2	Protection	Fungicide		12		1	1
2	Protection	Insecticide		6		1	1
2	Protection	Natural product		2		1	1
2	Chemical weeding	Weeding product		6		1	0
3	Protection	Storing product		2		1	1
3	Thinning	Thinning product		1		1	1
3	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
3	Protection	Fungicide		8		1	1
3	Protection	Insecticide		4		1	1
3	Protection	Natural product		2		1	1
3	Chemical weeding	Weeding product		6		1	0
4	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
4	Chemical weeding	Weeding product		6		1	0
5	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
5	Chemical weeding	Weeding product		6		1	0
6	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
6	Chemical weeding	Weeding product		6		1	0

2:

Figure 3: Screenshot of BLOCK_Sprayed_Inputs spreadsheet.

Fixed costs

Associated practices	Fixed costs	Total cost/year/ha	Proportion of the cost to affect to the system modeled (0 to 1)
	Packaging	31.3	1
	Others	1857,0	1
	Construction	117.3	1
	Equipment maintenance	622	1
	Insurance	253	1
	Rent	375	1
	Building maintenance	92	1
	Frais de gestion	1653	1
	Transport	2	1
	Taxes	94	1
	Social costs	1079	1

Figure 4: Screenshot of BLOCK_Fixed_Costs spreadsheet.

Supplementary Materials 5

Input spreadsheets for Farm 2, Organic scenario, extracted and translated from CoHort.

Practices and time consumed per block

				Time consumed per hectare											
BLOCKS	Practices	Type of labour	Associated equipment	jan	feb	mar	apr	may	june	jul	aug	sep	oct	nov	dec
1	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
1	Thinning	Permanent labour						22	22	22					
1	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
1	Net handling	Permanent labour					3				3				
1	Observing	Permanent labour				2	2	2	2						
1	Protection	Permanent labour				10	10	10							
1	Harvesting	Unqualified temporary labour										262			
1	Pruning	Permanent labour		33	33	33	33								33
2	Mechanical weeding	Permanent labour						4	4	4			4		
2	Thinning	Unqualified temporary labour						33	33	33					
2	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
2	Observing	Permanent labour			1	1	2	2	1						
2	Protection	Unqualified temporary labour		2	2	3	3	3						2	2
2	Harvesting	Unqualified temporary labour										292			
2	Insect Proof net handling	Unqualified temporary labour					40						20	20	
2	Pruning	Unqualified temporary labour		20	20	20	20								20
2	Green pruning	Unqualified temporary labour							30						
3	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
3	Thinning	Permanent labour						10	10	10					
3	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
3	Hail net handling	Permanent labour					3				3				
3	Observing	Permanent labour				2	2	2	2						
3	Protection	Permanent labour				5	5	4			2				
3	Harvesting	Unqualified temporary labour										150			
3	Pruning	Permanent labour		16	16	16	16								16
4	Chemical weeding	Permanent labour				1	1	1	1	1			1		
4	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
4	Planting	Permanent labour									10			140	140
4	Hail net handling	Permanent labour												10	
5	Mechanical weeding	Permanent labour						4	4	4			4		
5	Thinning	Unqualified temporary labour						17	16	16					
5	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
5	Observing	Permanent labour			1	1	2	2	1						
5	Protection	Unqualified temporary labour		2	2	3	3	3						2	2
5	Harvesting	Unqualified temporary labour										150			
5	Insect Proof net handling	Unqualified temporary labour					40						20	20	
5	Pruning	Unqualified temporary labour		10	10	10	10								20
5	Green pruning	Unqualified temporary labour							15						
6	Mechanical weeding	Permanent labour						4	4	4			4		
6	Fertilization	Permanent labour			1	1	1								1
6	Insect Proof net handling	Permanent labour												50	
6	Planting	Permanent labour									10			140	140

Figure 1: Screenshot of BLOC_Planning spreadsheet.

Intermediate costs per block

Blocks	Practices	Costs	Costs/ha
1		Gas	412
1	Fertilization	Fertilizers	786
1	Protection	Products	741
1		Net	1000
2	Fertilization	Organic fertilizers	600
2	Protection	Protection	1000
2	Protection	Mechanical work	896
2		Certification	80
2	Protection	Net	1000
2		Gas	500
3		Gas	400
3	Fertilization	Fertilizers	786
3	Protection	Products	500
3		Net	1000
4		Gas	300
4	Fertilization	Fertilizers	786
4	Protection	Products	150
5	Fertilization	Organic fertilizers	600
5	Protection	Protection	1000
5	Protection	Mechanical work	896
5		certification	80
5	Protection	Net	1000
5		Gas	500
4	Planting		2200

Figure 2: Screenshot of BLOC_Intermediate_Costs spreadsheet.

Sprayed Inputs

BLOCKS	Practices	Input categories	Inputs	Nb of sprays/year	Quantity of input applied	Proportion of the legal dose	Take into account in TFI (1 yes, 0 no)
1	Protection	Storing product		4		1	1
1	Thinning	Thinning product		1		1	1
1	Fertilization	Fertilizers		5		1	0
1	Protection	Fungicide		12		1	1
1	Protection	Insecticide		6		1	1
1	Protection	Natural product		2		1	1
1	Weeding	Weeding product		6		1	1
2	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
2	Protection	Natural product		8		1	1
2	Protection	Copper		6		1	1
2	Protection	Sulphur		4		1	1
3	Protection	Storing product		2		1	1
3	Thinning	Thinning product		1		1	1
3	Fertilization	Fertilizers		5		1	0
3	Protection	Fungicide		8		1	1
3	Protection	Insecticide		4		1	1
3	Protection	Natural product		2		1	1
3	Weeding	Weeding product		6		1	1
4	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
4	Weeding	Weeding product		6		1	1
5	Fertilization	Fertilizers		4		1	0
5	Protection	Natural product		8		1	1
5	Protection	Copper		6		1	1
5	Protection	Sulphur		4		1	1

Figure 3: Screenshot of BLOC_Sprayed_Inputs spreadsheet.