

DEPHY-Abeille, un réseau de systèmes de grandes cultures innovants, économes en pesticides et favorables aux abeilles : Co-construction, mise à l'épreuve et évaluation

Allier F.^{1,2}, Barbottin A.⁴, Aupinel P.³, Bretagnolle V.⁵, Chabert A.⁶, Chabirand M.³, Chaigne G.⁷, Decourtye A.^{2,8}, Georges G., Henry M.^{2,9}, Lancien T., Michel N.¹⁰, Odoux J.-F.³, Plantureux S.¹⁰, Tamic T.³, Toulet C.³, Vialloux F.^{1,5} Gourrat M.

¹ ITSAP, 228 route de l'aérodrome, Domaine Saint-Paul/Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9

² UMT PrADE, 228 route de l'aérodrome, Domaine Saint-Paul/Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex 9

³ INRA, UE 1255 APIS, CS 40052, F-17700, Surgères

⁴ INRA- AgroParisTech, UMR SAD-APT, F-78850 Thiverval-Grignon

⁵ Centre d'Etudes Biologiques de Chizé, UMR 7372, CNRS et Université de La Rochelle, F-79360 Beauvoir-sur-Niort

⁶ ACTA, AGRAPOLE, 23 rue Jean Baldassini, F-69364 Lyon Cedex 07

⁷ Chambre d'Agriculture des Deux-Sèvres, Maison de l'Agriculture, CS 80004, F-79231 Prahecq cedex

⁸ ACTA, 228 route de l'aérodrome, F-84914 Avignon Cedex 9

⁹ INRA, UR Abeilles et environnement, 228 route de l'aérodrome, F-84914 Avignon Cedex 9

¹⁰ Université de Lorraine, INRA Nancy-Colmar, Laboratoire Agronomie et Environnement, 2, avenue de la Forêt de Haye, TSA 40602, F-54518 - Vandoeuvre Cedex

Correspondance : fabrice.allier@itsap.asso.fr

Résumé

Dans les agro-systèmes céréaliers la bonne santé des colonies d'abeilles domestiques et la durabilité économique des exploitations apicoles reposent principalement sur la disponibilité en ressources mellifères à proximité des colonies et sur l'absence de contamination dans leur alimentation ou leur environnement. Cette alimentation en nectar et pollen doit être abondante et diversifiée, à la fois à l'échelle du territoire et disponible tout au long de la saison de février à fin octobre. Une contamination extrêmement faible voire nulle de ces ressources limite le risque de l'exposition de ces insectes à des substances toxiques comme certains pesticides. Sous ces conditions, le territoire est en capacité de régénérer son potentiel de pollinisation, un service écosystémique nécessaire pour assurer une production durable des cultures et un maintien des espaces semi-naturels.

Si l'apiculteur peut lui-même intervenir sur son cheptel et ajuster ses pratiques pour atténuer les facteurs de mortalités et d'affaiblissement d'origine apicole, il ne maîtrise pas directement l'entretien des espaces fonciers. Son emprise sur l'environnement reste donc faible. En effet, la configuration des paysages, la répartition des espèces mellifères et le niveau d'exposition aux pesticides sont fortement dépendants des cultures et des pratiques agricoles gérées par les agriculteurs-cultivateurs.

Pour tenter de décrire la situation et l'améliorer en faveur des colonies d'abeilles domestiques et plus généralement des insectes pollinisateurs, tout en visant la durabilité des exploitations agricoles, le projet « DEPHY-Abeille » a été lancé dans le cadre du programme de recherche Ecophyto DEPHY EXPE. Nous nous sommes intéressés à la conciliation d'objectifs multiples de production agricole, apicole et de préservation de la biodiversité d'insectes pollinisateurs, selon les principes de durabilité des systèmes. Avec un réseau de 9 exploitants agricoles volontaires, nous avons testé puis évalué des

changements de pratiques au sein de leurs itinéraires techniques. Ceux-ci visaient à favoriser l'expression de la flore adventice messicole des cultures comme ressource alimentaire complémentaire des insectes pollinisateurs dans les parcelles, tout en répondant aux objectifs Ecophyto de baisse de l'indice de fréquence de traitement (IFT) et à assurer une rentabilité économique pour l'exploitant.

Mots-clés : Abeille mellifère, Apiculture, Systèmes de culture innovants, IFT, Modélisation d'accompagnement.

Abstract : DEPHY-Abeille, a network of innovative field crop systems, low pesticide use and bee-friendly: Co-construction, testing and evaluation.

In the crop agro-systems, health of honey bee colonies and economic sustainability of beekeeping operation are based, firstly, on an abundant and diversified availability of food resources, both on a territorial scale and throughout the full season from february to the end of october. On the other hand, in order to limit the risk of exposure of bees to pesticides, the contamination of this resource must be extremely low or even zero. If beekeeper can itself operate on their colonies and adjust their practices to mitigate the factors of death and bee weakening, he does not control not directly the management of the landscape. Its influence on the environment remains weak. Indeed, landscape configuration, resource availability, and level of pesticide exposure are highly dependent on crops and farmer-managed agricultural practices.

To try to describe the situation and improve it in favor of bee colonies and more generally pollinators, the "Dephy-Abeille" project was launched as part of the Ecophyto DEPHY EXPE research program. We were interested in reconciling multiple objectives of agricultural production, beekeeping and preserving the biodiversity of pollinators, according to the principles of sustainability. From a network of 9 volunteer farmers, we tested and evaluated changes in the technical practices. These were intended to promote the expression of the weed of crop as a complementary food resource for bees in the plots, while meeting the Ecophyto objectives of decreasing the frequency of treatment index (FTI) and ensuring economic profitability for the operator.

The article addresses this experimental approach based on a multi-agent support methodology adapted to our context to facilitate the exchange of knowledge, interests and constraints of actors acting on the same territory. Then, we present the results from a comparison of the economic performances of the experimental and control plots over 3 years of monitoring. These evolutions of technical itineraries have been analysed through a multi-criteria evaluation tool calls DEXI-Abeilles, the results of which are the subject of a third part of this article. Finally, we explore the performance of bee colonies during sunflower honeydew using a prototype predictive assessment tool for honey production.

Keywords: Honey bee, Apiculture, Innovative cropping systems, IFT, Companion modelling.

Introduction

Sur tous les continents, les populations d'abeilles domestiques ou sauvages, et de bourdons sont en déclin. Celui des apidés est particulièrement marqué en milieu agricole, lequel impacte par conséquence directe le service écosystémique de pollinisation de nombreuses espèces cultivées. Aujourd'hui, le caractère multifactoriel des causes de mortalités des apidés fait consensus mais leur hiérarchisation et leurs interactions sont toujours débattues : perte et fragmentation des habitats, manque de ressources alimentaires, intoxication et contamination des compartiments écologiques par l'usage des produits phytopharmaceutiques, développement de pathogènes, de parasites et de

prédateurs des abeilles (*Varroa destructor*, frelon asiatique *Vespa velutina*, virus), changement climatique. Parmi les facteurs explicatifs, les pratiques agricoles jouent un rôle important en modifiant la disponibilité en ressources alimentaires au cours du cycle de vie des abeilles ainsi que la qualité de cette ressource et des habitats (Requier et al., 2015).

Comment concilier production agricole, production apicole et préservation de la biodiversité en insectes pollinisateurs, viables et durables sur le territoire ? C'est cette question qui a conduit un collectif d'acteurs (INRA, CNRS, Chambre d'agriculture 79 et ITSAP-Institut de l'abeille) à proposer le projet DEPHY-Abeille (2013-2018) à l'appel d'offre Ecophyto Expe. Un des objectifs du projet était d'évaluer des changements de pratiques agricoles en vue de concilier productions agricoles, rentabilité économique et conservation des insectes pollinisateurs et notamment des abeilles domestiques sur la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre (79).

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes particulièrement intéressés aux ressources alimentaires pour les abeilles domestiques et abeilles sauvages, présentes dans les parcelles cultivées. Ces ressources sont complémentaires de celles des milieux semis-naturels qui composent les paysages agricoles et sont essentielles en période de disette (Requier et al., 2015, 2017).

L'approche choisie dans le cadre du projet est expérimentale. Nous présentons d'abord la méthodologie d'accompagnement multi-agents adaptée à notre contexte, facilitant les échanges de connaissances, sur les intérêts et les contraintes des acteurs agissant sur un même territoire. Ensuite, nous présentons les résultats issus d'une comparaison des performances économiques des parcelles expérimentales et témoins sur 3 années de suivi. Ces évolutions d'itinéraires techniques ont fait l'objet d'une évaluation multicritères grâce à l'outil DEXI-Abeilles dont les résultats font l'objet d'une troisième partie. Enfin, la disponibilité en pollen sur le territoire est explorée à travers l'étude de la performance des colonies d'abeilles au cours de la miellée de tournesol grâce à un prototype d'outil d'évaluation prédictif de la production de miel.

1. Mieux connaître les métiers et leurs contraintes pour faire émerger des pratiques en faveur des insectes pollinisateurs et de la durabilité des systèmes agricoles et apicoles

L'apiculture dans les plaines céréalières (régions Poitou-Charentes, Centre, Midi Pyrénées) est en déclin, alors même que ces régions étaient largement prisées pour leurs cultures mellifères. Si l'apiculture dépend en grande partie de l'agriculture, puisque les principales miellées sont celles de colza et de tournesol, le déclin des abeilles dans les milieux agricoles a aussi des répercussions sur la production agricole. Les services rendus par les abeilles pour la production agricole ne sont plus à démontrer, et l'activité apicole bénéficie en retour de grandes surfaces en cultures mellifères ; pourtant, filières agricoles et apicoles ont des objectifs souvent antagonistes (Decourtye et al., 2018). Sur la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre (une plaine céréalière au sud de Niort de 450 km²) comprenant environ 450 exploitations agricoles (Bretagnolle et al., 2018), nous avons déployé une étude à grande échelle avec l'INRA (Unité APIS, Magneraud) et l'ITSAP (Avignon), la plateforme ECOBEE (Odoux et al., 2014). Au cours des 10 dernières années, nous avons ainsi démontré que l'abeille domestique, dans les régions de grandes cultures en plaine, souffre d'une véritable disette alimentaire entre les périodes de floraisons massives du colza (avril) et celle du tournesol (juillet), période de deux mois pendant laquelle aucune ressource florale n'est disponible. Ainsi, en Mai et Juin, le régime alimentaire pollinique de l'abeille domestique peut être constitué de 60% de pollen de coquelicot (Requier et al., 2015), une messicole utile pour le service qu'elle fournit mais faisant l'objet, avec d'autres, de programmes de désherbage par les agriculteurs.

Comment maintenir une flore spontanée diversifiée dans les cultures ? A priori, en réduisant l'utilisation des herbicides. Est-ce acceptable pour les agriculteurs ? Peut-être, si l'on démontre qu'une

augmentation des pollinisateurs peut favoriser les rendements d'autres cultures, comme le colza et le tournesol. En retour, peut-on espérer que des superficies importantes de ces cultures soient favorables aux miellées, et donc aux apiculteurs ? Souhaitant tenter de répondre à ces questionnements et partant du constat de l'impact avéré des pesticides sur les abeilles (Henry et al., 2015), l'hypothèse de recherche était la suivante :

Les itinéraires techniques des systèmes de culture céréaliers conventionnels observés dans la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre présentent des marges de manœuvre acceptables afin de limiter l'exposition des abeilles aux pesticides et favoriser la ressource pendant les deux périodes de disette identifiées, mai-juin et août-septembre ?

Les interdépendances observées, aussi bien entre agriculteurs et apiculteurs (professionnels et amateurs), entre cultures (céréales, colza, tournesol), entre milieux (cultures et infrastructures agro-écologiques) ou entre acteurs du territoire, constituent la colonne vertébrale des socio-écosystèmes des territoires ruraux (Bretagnolle et Gaba 2015).

Et c'est justement lorsque l'on propose aux acteurs du territoire qui peuvent influencer ces problématiques (apiculteurs et agriculteurs), de jouer un rôle dans une mise en scène où leurs interactions sont quasi obligatoires, que des éléments de réponses peuvent apparaître, tant d'un point de vue technique et scientifique, social, économique qu'environnemental (Allier et Gourrat, 2016). Nous mettons en évidence une prise de conscience sur la connaissance des métiers des autres et leurs contraintes associées. Ces échanges se font même de plus en plus précis et techniques au fur et à mesure du déroulement de la séquence. Nous présentons ici le type de données générées sur lesquelles il est possible de construire une discussion, argumenter puis de poursuivre avec des ateliers de co-construction et de mise à l'épreuve des innovations sur le terrain.

Au cours du projet, plus d'une dizaine d'ateliers d'accompagnement et de concertation a pu réunir une cinquantaine d'acteurs (cultivateurs, polyculteurs-éleveurs et apiculteurs) autour du jeu de rôles créé. Dans notre mise en situation, la configuration du territoire partagé est un bon exemple pour traduire les visions des uns et des autres, d'identifier les points de convergence et de divergence, puis d'évaluer les niveaux d'adaptation et de capacité d'évolution de leur système d'exploitation agricole ou apicole.

De par leur emprise forte sur le foncier, les agriculteurs (céréaliers et polyculteurs éleveurs) façonnent le territoire. Dans le jeu, si l'assolement dont ils rendent compte est réaliste de l'environnement réel et des habitudes des acteurs, il met également en exergue la part des cultures attractives pour les abeilles de celles qui ne le sont pas. Dans notre cas d'étude, les cultures céréalières non attractives pour les abeilles (blé et orge) représentent en moyenne 50% de l'assolement joué lors des ateliers. La moitié restante correspond à un ensemble de cultures attractives et intéressantes pour les abeilles (Figure 1). Parmi celles-ci, nous retrouvons des cultures classiques avec le colza dont la sole représente 17% en moyenne, suivie par le tournesol et le maïs (10% chacun) deux cultures emblématiques du territoire. Viennent ensuite le pois protéagineux, les prairies, la luzerne dont l'ensemble occupe moins de 10% du territoire observé et dont l'attractivité des cultures peut être relative et discutée selon les pratiques et les variétés (voir Bretagnolle et al., 2018 pour les superficies relatives de chacune de ces cultures).

Lorsque l'apiculteur est face à un tel assolement, deux questions principales se posent. D'une part, il cherche à évaluer le potentiel du territoire en termes de ressource alimentaire, et éventuellement si celle-ci est continue tout au long de la saison. D'autre part, il tentera d'estimer le niveau de risque de ses butineuses auquel elles sont exposées lorsque celles-ci butinent. Ainsi, si les premières questions abordées par l'apiculteur sont liées à la qualité et à la diversité de la ressource, il s'intéresse aussi à la quantité et au potentiel mellifère possible en fonction des surfaces fleuries et donc à la production de miel attendue et commercialisable. Si l'agriculteur est quant à lui d'abord intéressé par son assolement et sa stratégie de conduite des cultures, la configuration du jeu l'invite également à s'interroger sur la place des abeilles, leur rôle et les moyens de les préserver pour assurer le service de pollinisation et le maintien d'un bon niveau de production de ses cultures. Il est également sollicité pour la mise à

disposition d'emplacements pour les ruchers et l'adaptation de ses pratiques notamment sur les usages des pesticides et aménagements d'infrastructures agro-écologiques. La diversité des sujets est donc vaste.

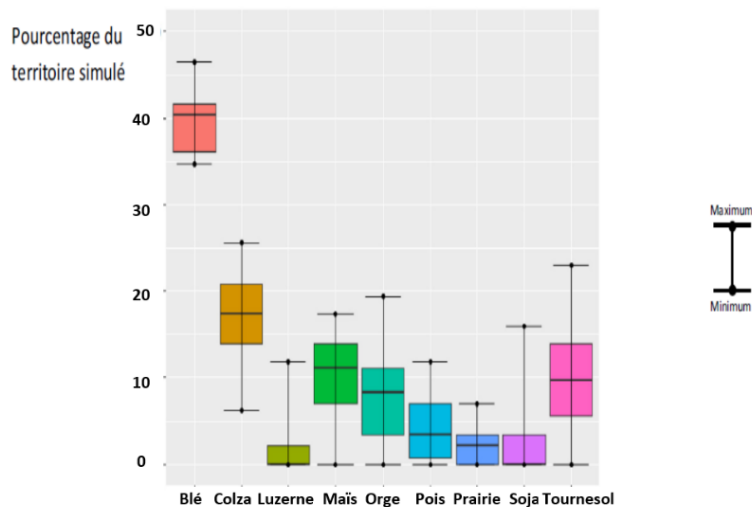


Figure 1 : Exemple de résultats de distribution (maximum et minimum) des proportions des principales cultures dans les territoires simulés lors des 13 sessions d'ateliers de mise en situation animés dans différentes régions en France (Gourrat, 2017).

Lors de ces ateliers, les participants avaient pour objectif de conduire leurs cultures et possibilité leur était donnée de traiter chimiquement contre les adventices, les pathogènes et les ravageurs des cultures. Bien que la démarche soit simplifiée par rapport à la réalité (on ne prend pas en compte la dose mais seulement le nombre de passages), il est possible de calculer un IFT théorique (Figure 2). Cet indice moyen estimé sur l'ensemble des sessions réalisées est dans la fourchette de l'IFT de référence de la région. Cet indice est le reflet des pratiques de l'agriculteur et à l'échelle de l'ensemble de nos ateliers, il reflète aussi la variabilité des pratiques pour une même culture et entre les cultures. Ce type d'indice de traitement devient, dans les échanges, un élément important de référence à partir duquel plusieurs leviers peuvent être identifiés pour imaginer différents scénarios d'évolution des systèmes.

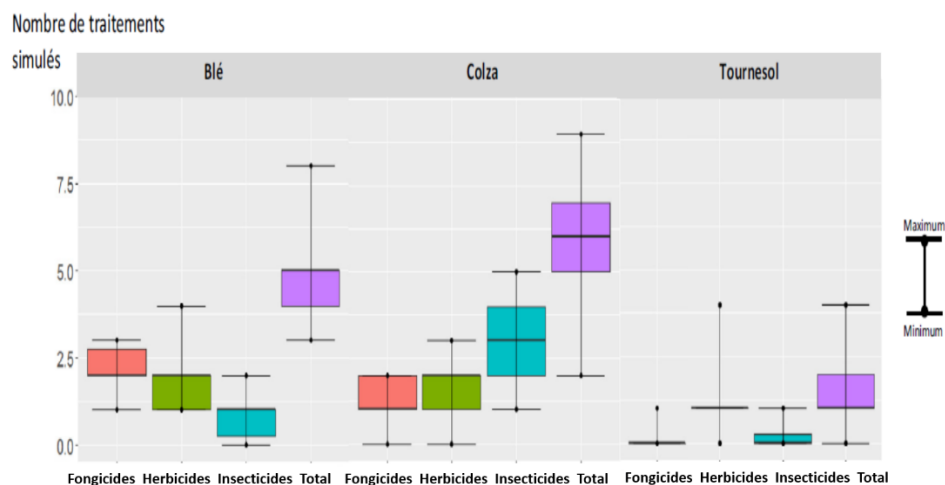


Figure 2 : Exemple de résultats de distribution des traitements simulés par les agriculteurs dans la gestion de leur exploitation pendant le jeu de rôle lors de 13 sessions d'ateliers dans différentes régions françaises. Les 3 principales cultures des assolements (blé, colza et tournesol) sont présentées (Gourrat, 2017).

Si sur le territoire, les agriculteurs et les apiculteurs peuvent s'apercevoir voire se croiser, souvent ils ne se connaissent pas ou ne prennent pas le temps d'explorer l'activité de l'autre. Or comme pour de nombreux autres métiers, l'apiculture et la culture céréalière dans notre cas d'étude ne vont pas l'une sans l'autre. La première nourrit la seconde et inversement. Ce principe est fondamental mais souvent inconscient, non intuitif ou trop complexe à étudier avec précision. La méthode d'accompagnement développée au cours du projet, issue du collectif COMMOD (Etienne et al., 2011), a permis d'approfondir ce principe et les relations, d'inciter les acteurs à expliciter leur perception du territoire et des productions agricoles pour mieux se connaître (Gourrat, 2017).

De ce fait, même si naturellement l'abeille et la fleur présentent entre-elles une co-évolution « mutualiste », celle-ci est malheureusement moins innée et naturelle aujourd'hui entre les agriculteurs et apiculteurs, qui finalement ne se côtoient moins que nécessaire. Cette méconnaissance, voire l'ignorance des activités d'autrui peut aboutir à des prises de positions parfois figées, dogmatiques, extrêmes de part et d'autres, sans volonté de comprendre les contraintes de son voisin. Connaître une activité voisine signifie d'identifier l'environnement et le territoire dans lequel elle a lieu. Cela requiert une connaissance des ressources sur lesquelles l'acteur s'appuie pour faire fonctionner son système, son activité, son exploitation. Il s'agit aussi d'être en mesure d'identifier les autres acteurs qui agissent ou qui interviennent dans et autour du système de son voisin. Enfin, la connaissance se précise lorsque plus finement, il est possible de comprendre les interactions qui se créent entre ces ressources et ces acteurs, ainsi que les dynamiques internes et externes au système décrit qui influencent le déroulement des choses. Ce travail a été mené dès le début du projet en appliquant la méthode ARDI (Etienne et al., 2011) et dont notre approche a été décrite par Gourrat (2018).

Grâce à ces échanges, les interactions et le dialogue observés lors des ateliers de mise en scènes s'auto-alimentent aux cours des actions et décisions des joueurs. Ceux-ci génèrent eux-mêmes les connaissances lorsque des questions se posent. Si un changement de pratique ou une mauvaise pratique est observée par un joueur, l'autre joueur concerné ou impacté par cette action s'interrogera lors du jeu. Les comportements des joueurs sont souvent courtois et bienveillants car chacun a pour objectif, en recherchant des solutions collectives ou non, de tendre vers la durabilité des productions sur un territoire donné.

Cette étape « en salle » s'est révélée importante, nécessaire et constructive pour les acteurs qu'ils soient apiculteurs, cultivateurs céréaliers ou polyculteurs-éleveurs. Ils ont en effet appris à se connaître mais surtout à produire ensemble sur un même territoire, donc à générer des compromis dans leur stratégie d'exploitation. Ce temps d'échange a aussi permis d'exposer l'état des connaissances et d'identifier des trous de connaissances. Les résultats générés apportent d'une part des pistes de travail au niveau scientifique afin de combler les lacunes et ouvrent sur la nécessité de transférer ces acquis et ambitions en réalité de terrain. Pour assurer le transfert, les structures locales de développement ont toute leur place pour s'investir et développer des compétences en s'engageant de manière systémique par un accompagnement des acteurs sur le terrain. C'est l'objectif recherché au travers du projet DEPHY-Abeille, et en particulier dans son volet 2, lorsque les partenaires du projet en recherche et développement ont souhaité mobiliser des céréaliers pour tester des innovations et ajustements favorables aux abeilles sur leurs parcelles.

2. Approche expérimentale et mise à l'épreuve des changements de pratiques

2.1 Création d'un réseau expérimental de parcelles innovantes et de références

Un réseau de neuf agriculteurs volontaires pour participer au projet a été constitué pour tester des changements de pratiques sur les principales cultures de leurs successions. L'objectif des changements de pratiques était d'augmenter la ressource disponible pour les insectes pollinisateurs en

favorisant la présence d'adventices messicoles dans les parcelles de céréales à pailles, principales cultures de la zone d'étude ; et d'améliorer la qualité sanitaire (baisse de l'exposition des abeilles aux résidus de pesticides néonicotinoïdes) de la ressource sur les cultures fréquentées par les abeilles domestiques, à savoir le colza et le tournesol principalement.

A la différence de nombreux projets Ecophyto, il ne s'agissait pas ici de repenser les systèmes de culture existants au sein des exploitations partenaires, mais de privilégier des changements des itinéraires techniques qui favorisent l'expression de la flore adventice, flore que l'on cherche généralement à contrôler par une gestion chimique ou mécanique. L'ensemble des travaux d'animation du réseau d'agriculteurs, de suivi des protocoles, de collectes et d'analyses des données ont été principalement assurés par l'INRA Grignon, l'ITSAP et la Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres.

Afin de favoriser l'expression de la flore messicole et d'améliorer la qualité sanitaire de la ressource à disposition des pollinisateurs dans les cultures attractives, il était proposé aux agriculteurs :

- **Sur céréales à paille**, de diminuer conjointement les herbicides anti-dicotylédones (qui favorisent la présence d'adventices messicoles) et les apports d'azote (qui jouent sur la compétitivité entre l'espèce cultivée et les adventices). Ce changement de pratique pouvait également être appliqué aux autres cultures de la succession.
- **Sur les cultures mellifères et pollinifères**, de minimiser les risques d'exposer les insectes à des matières actives toxiques en adoptant les bonnes pratiques de traitement (traitement le soir), de faire l'impasse sur des insecticides et fongicides de printemps et de ne pas avoir recourt à des insecticides de la famille des néonicotinoïdes au sein de la succession : supprimer l'usage des enrobages de semences céréales à base d'imidaclopride (Ferial®/Gaucho®).
- **Sur le tournesol**, de limiter le binage en cours de culture.

Chaque exploitant suivait ces trois axes de changements d'itinéraires mais restait relativement libre dans la stratégie du choix des usages (fréquence et impasse des fertilisants et pesticides, dosage, type de molécules, composition des couverts mellifères...) sur chacune des trois cultures des successions étudiées entre 2015 et 2017. Enfin, il était proposé d'adapter le choix et la gestion d'un couvert en interculture pour favoriser un étalement de floraison d'espèces mellifères entre septembre et novembre.

Chez chaque exploitant, trois parcelles ont été sélectionnées et divisées en deux zones d'au moins 2 hectares : une parcelle « expérimentale » dans laquelle les exploitants mettaient en œuvre les changements de pratiques proposés et une parcelle « témoin » pour laquelle aucun changement n'était réalisé.

Différents relevés ont été réalisés sur les 54 parcelles de 2015 à 2017 (27 parcelles « témoins » et 27 parcelles « expérimentales ») :

- Un suivi « agronomique » (densité de plantes levées, abondance et diversité des adventices, état sanitaire du couvert, composantes de rendements).
- Des relevés du nombre d'insectes en action de butinage le long de transects de 50m au sein des cultures en floraisons potentiellement attractives ou bien au sein de patch d'adventices potentiellement attractives dans les céréales à pailles.

Les mesures collectées permettent d'évaluer la réponse de la flore adventice aux changements de pratique réalisés et de regarder si les changements d'itinéraires techniques étaient économiquement viables (maintien de la marge semi-nette sur 3 ans), économes en intrants (baisse de l'indicateur de fréquence de traitement, IFT) et favorables aux insectes pollinisateurs (amélioration de l'attractivité des insectes pollinisateurs par apport de ressources en pollen et nectar).

La marge semi-nette sur les trois ans du suivi a été calculée en intégrant les coûts en intrants, les coûts de semences, les charges de mécanisation (travail du sol, passages d'engins en cours de culture) ainsi

que les éventuelles réfections liées à la teneur en protéines pour les céréales à paille. Nous n'avons en revanche pas pris en compte les réfections liées aux impuretés potentielles et au taux d'humidité des lots récoltés.

Trois types de successions ont été étudiées dans le cadre de ce projet :

- Les successions basées uniquement sur des cultures d'hiver (implantées à l'automne) avec deux à trois céréales à pailles sur la période 2014-2017. Ces successions sont **a priori très sensibles aux changements de pratiques** proposés vis à vis de la gestion des adventices messicoles puisque n'alternant pas les périodes de travail du sol et donc de gestion mécanique des adventices.
- Les successions comprenant une culture de printemps entre 2014 et 2017 et deux céréales à pailles. Il s'agit principalement de successions Colza – Blé – Tournesol (ou Pois) – Blé. Ces successions sont **moins sensibles a priori aux changements de pratiques** proposés du fait de l'alternance des dates d'implantation des cultures et d'une plus grande diversité d'espèces que les types précédents.
- Les successions alternant céréales à pailles et cultures de printemps. Ces successions sont **les moins sensibles a priori aux changements de pratiques** proposés vis-à-vis de la gestion des adventices messicoles.

Les parcelles suivies étaient conduites suivant trois modalités de travail du sol : sans travail du sol (en semis direct – 6 parcelles) ; avec un travail du sol sans retournement (recours au déchaumage – 9 parcelles) et intégrant un ou plusieurs labours au cours de la succession (12 parcelles).

Dans les différentes successions considérées, 12 cultures ont été suivies. Ces cultures se différencient par la nature des traitements phytosanitaires réalisés et par la contribution de chaque type de traitement à l'IFT total. Les cultures sur lesquelles les changements de pratiques, et notamment la réduction des herbicides anti-dicotylédones et des insecticides sont attendus (céréales à pailles, colza respectivement) sont également celles pour lesquelles le poste « herbicide » et « insecticide » représente le principal poste contributif à l'IFT total (Figure 3). Les cultures sous contrat et plus spécifiques n'ont pas fait l'objet de changements de pratiques (féverole, lentille, lin, oeillette).

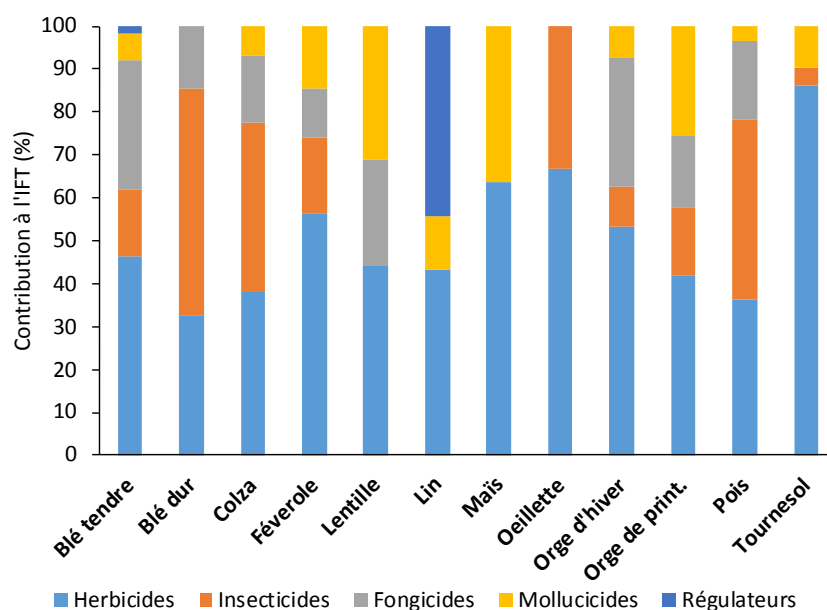


Figure 3 : Contribution des différents types de traitements phytosanitaires à l'IFT total pour les 12 cultures dans les successions suivies de 2015 à 2017.

2.2 Résultats obtenus sur 3 années de suivi de systèmes céréaliers

2.2.1 Mise en œuvre des changements de pratiques dans les parcelles

Les changements de pratiques et leur amplitude étant laissés au choix des agriculteurs, ceux-ci ont été très variables. Ces changements de pratiques ont par exemple été mis en œuvre une seule année pour quatre parcelles expérimentales. Treize parcelles expérimentales ont connu deux années de changement de pratiques et dix parcelles expérimentales ont vu les pratiques mises en œuvre modifiées les trois années du suivi.

Les changements de pratiques qui sont mises en œuvre concernent très majoritairement une réduction de la dose d'azote (de 7 à 100% de réduction de la dose totale apportée par rapport au témoin). Sur céréales à paille, ces réductions étaient en moyenne de 21% (de 7 à 45% de réduction de la dose totale apportée par rapport au témoin). La majorité des parcelles expérimentales ont connu au moins une année de réduction de l'IFT herbicide (les herbicides anti-dicotylédones étant généralement supprimés lors des traitements de printemps) et aucune réduction de l'IFT herbicide n'a été observée pour 6 parcelles sur 27.

Sur les parcelles de céréales à paille, seules 12 situations expérimentales sur 47 avaient des semences traitées à base d'imidaclopride pour les 3 années de suivi : 6 parcelles sur 13 en 2015, 3 parcelles sur 18 en 2016 et 3 parcelles sur 17 en 2017. Pour 21 des 35 situations pour lesquelles aucun insecticide n'était utilisé en enrobage de semence, un traitement d'automne anti-puceron a été réalisé et pour 14 parcelles aucun insecticide n'a été appliqué. Pour ces 14 parcelles, le rendement s'est révélé à la baisse chez un agriculteur.

Sur les trois années de suivi, la réduction de l'IFT total cumulé a varié de 3 à 45%. Huit parcelles sur les 27 ayant réduit leur IFT total d'au moins 10% et 7 parcelles de plus de 20%.

2.2.2 Effets des changements de pratiques sur les résultats économiques des successions étudiées

Les marges semi-nettes cumulées sur trois ans varient de 591€/ha à 3561€/ha toutes parcelles confondues. Les marges semi-nettes cumulées des parcelles témoins sont en moyenne plus élevées pour les successions Colza – Blé – Tournesol (ou Pois) – Blé ainsi que pour les successions diversifiées alternant céréales à pailles et cultures de printemps (respectivement 2168€/ha et 1750€/ha).

Les écarts de marges semi-nettes entre parcelles expérimentales et parcelles témoins varient de -48% (marge semi-nette supérieure sur la parcelle expérimentale) à +41% (marge semi-nette supérieure sur la parcelle témoin). La moitié des parcelles expérimentales présentent une marge semi-nette comparable à celle de la parcelle témoin correspondante (moins de 10% d'écart entre la marge du témoin et celle de la parcelle expérimentale). Pour 5 des 27 parcelles expérimentales, l'écart de marge est en faveur du changement de pratique, les économies d'intrants et de passage compensant les éventuelles pertes de rendement. A l'inverse, pour 8 des 27 parcelles expérimentales, les écarts de marge sont en faveur de la conduite « témoin », les pertes de rendement associées aux réductions d'intrants mises en œuvre n'étant pas compensées par les économies d'intrants (Figure 4).

Les écarts de marges observés ne sont pas corrélés au nombre ou à la nature des changements mis en œuvre sur les parcelles au cours des trois ans, ni à l'effort de réduction en intrants. Nous n'avons pas observé non plus de lien entre la sensibilité *a priori* de la succession aux changements de pratiques et les écarts de marges sur 3 ans. Ceux-ci sont dépendants de la parcelle considérée, les parcelles expérimentales suivies chez un même agriculteur pouvant présenter des marges semi-nettes favorables ou défavorables aux changements de pratiques en comparaison du témoin.

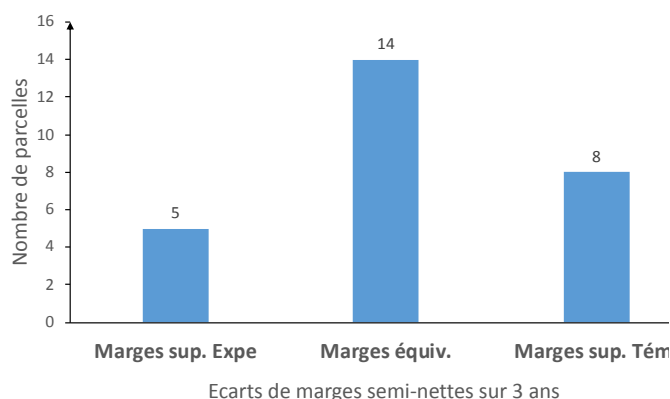


Figure 4 : Nombre de parcelles en fonction des écarts de marge semi-nettes entre parcelles témoins et parcelles expérimentales. Un écart de marge de moins de 10% a été considéré comme non significatif entre les deux modalités.

2.2.3 Effets des changements de pratiques sur l'expression de la flore adventice messicole dans les céréales à paille

Nous avons mesuré dans chaque parcelle expérimentale la densité d'adventices par m^2 observée au sein de 5 placettes de $1m^2$ dans la diagonale de la parcelle. Les adventices relevées sont dans 90% des cas des espèces cibles des herbicides anti-dicotylédones. Les espèces observées sont variables entre parcelles avec cependant des espèces telles que les renouées *sp.*, les mercuriales *sp.* et les pensées *sp.* (*Viola*), qui ont été observées dans de nombreuses situations. La Figure 5 présente les niveaux d'adventices observées dans les parcelles de céréales à paille les trois années de suivi. Sur 30 des 47 situations où des céréales à paille étaient implantées dans le réseau, les densités d'adventices étaient faibles (de 1 à 5 plantes recensées) voire nulles.

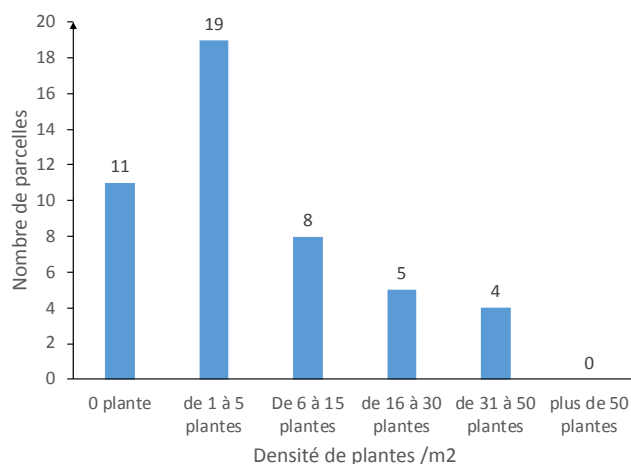


Figure 5 : Densité d'adventices observées en moyenne dans les parcelles expérimentales implantées en céréales à pailles entre 2015 et 2017.

La majorité des situations pour lesquelles les valeurs de densité d'adventices sont les plus élevées (plus de 16 plantes/ m^2) ont été observées en 2017 pour des parcelles ayant expérimenté de 0 à 2 réductions de la dose d'herbicide au cours des trois années expérimentales (cas de successions de céréales à pailles). Les parcelles pour lesquelles la succession de culture impliquait trois céréales à paille sur les trois années de suivi présentaient au moins de 6 à 15 plantes/ m^2 quel que soit l'année de suivi. A fréquence de réduction en herbicides équivalentes, les autres types de succession ne présentaient pas ou peu d'adventices (moins de 5 plantes/ m^2).

Les valeurs de densité les plus élevées ont été observées sur des parcelles pour lesquelles la flore adventice était déjà présente la première année d'expérimentation. Seules trois parcelles expérimentales sur les 27 ont présenté une augmentation de la densité d'adventice au cours de l'expérimentation. Nous n'avons observé aucun lien entre la fréquence des réductions en herbicide au cours des trois ans et la densité d'adventices ou son évolution au sein des parcelles expérimentales.

2.3 Conclusion et perspectives

Nous avons suivi pendant trois ans un réseau de parcelles expérimentales dans lesquelles des changements de pratiques ont été mis en œuvre par des agriculteurs volontaires. Ces parcelles étaient conduites sous une diversité de successions de cultures et de travail du sol, représentatifs de la diversité des systèmes existant dans la zone Atelier Plaine & Val de Sèvre. Les performances des parcelles expérimentales ont été comparées à celles de parcelles témoins sur lesquelles les pratiques « habituelles » de l'agriculteur étaient maintenues. L'analyse des performances économiques des parcelles sur 3 ans montre que dans la majorité des situations, les changements appliqués n'ont pas eu de conséquences sur la marge semi-nette cumulée à l'hectare et ceux, que les réductions en produits phytosanitaires (évaluées par la baisse de l'IFT) et en azote aient été importantes ou non.

Les changements de pratiques mis en œuvre ne se sont pas traduits par des augmentations importantes de la densité d'adventices dans les parcelles de céréales à pailles, excepté pour trois situations (sur 27). Lorsque les adventices messicoles étaient présentes dans les parcelles, il s'agissait pour une majorité des cas de parcelles sur lesquelles était observée une succession de céréales à paille. Lorsque des adventices messicoles étaient présentes dans les parcelles de céréales à paille, elles représentaient une ressource attractive pour les pollinisateurs sauvages principalement. Les abeilles domestiques ont été observées dans les situations où la densité d'adventices attractives était très élevée, formant un couvert dense.

Nous avons montré que pour les parcelles suivies, la réduction ponctuelle en intrants est possible sans perte économique. C'est-à-dire soit une impasse sur un passage d'un herbicide anti-dicotylédones ou d'azote, soit une réduction de dose d'herbicide ou d'unité d'azote. Les réductions testées n'ont cependant pas permis l'expression systématique de la flore adventice dans les céréales à paille. Dans le cas d'un suivi court terme (3 ans), il est donc difficile de mobiliser ce seul levier afin d'augmenter et de diversifier la ressource en pollen et nectar pour les pollinisateurs domestiques et sauvages. Les suivis de butinage réalisés sur les cultures à fleurs présentes dans les successions ont montré que celles-ci représentaient des sites d'alimentation intéressants pour une diversité d'espèces pollinisatrices. A l'échelle du réseau des parcelles, l'expression de la flore attractive, que ce soit des cultures, des adventices ou des intercultures, a permis d'offrir une continuité de ressources alimentaires de fin mars à fin septembre comme ce qui est représenté sur la Figure 6. Toutes ces espèces se sont révélées butinées par l'entomofaune pollinisatrice (abeilles domestiques, bourdons, autres abeilles sauvages et syrphes).

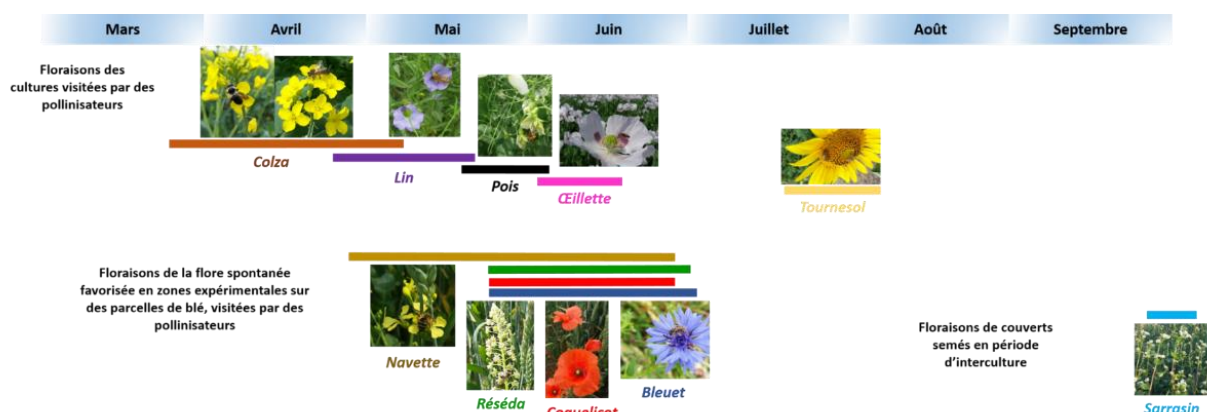


Figure 6 : Calendrier présentant les floraisons successives créées à partir de l'ensemble des parcelles constituant le réseau expérimental. Les changements de pratiques et les cultures des rotations suivies génèrent une ressource alimentaire en nectar et pollen importante pour les abeilles de fin mars à fin septembre. Une période en août laisse encore apparaître un creux alimentaire.

Pour aller au-delà d'un ajustement des itinéraires techniques, la conciliation d'objectifs de maintien des performances économiques pour l'agriculteur et d'augmentation de la disponibilité en ressources alimentaires devra s'appuyer sur une étape de re-conception des systèmes de culture existants, qui permettrait d'aller plus loin dans la baisse de l'IFT. En effet, les réductions d'IFT réalisées ont été relativement limitées et n'ont pas permis d'atteindre les objectifs attendus dans le cadre du plan Ecophyto. Pour les atteindre, un dispositif plus approprié pourrait être de repenser complètement les successions et les conduites des cultures en diversifiant les espèces au sein de la succession, mais également au sein des parcelles, en privilégiant par exemple les mélanges d'espèces (céréales à paille et légumineuses dans la rotation ou sous couvert par exemple). Ce type de dispositif nécessite un accompagnement important et constant sur le terrain auprès des agriculteurs, qui n'a pu être mis en œuvre ici.

3. DEXi-Abeilles, un outil à l'équilibre entre simplicité d'usage et sensibilité liée aux changements

Malgré le fort intérêt de nombreuses parties prenantes pour améliorer les itinéraires techniques culturaux en faveur des abeilles, voire plus largement le système de culture, la description d'un système de culture et surtout son évaluation selon l'objectif « abeilles » reste un exercice complexe. En effet, pour que l'engagement des agriculteurs génère une réelle satisfaction technique et économique, la mise à l'épreuve d'un aménagement fleuri ou d'une adaptation d'un traitement phytosanitaire par exemple se doit de produire un résultat rapidement mesurable visuellement sur le terrain et/ou grâce à des outils d'évaluation. Dans cet objectif, l'outil d'évaluation multicritères DEXi-Abeilles a été créé dans le projet Casdar POLINOV (Decourtye et al., 2014) pour aider les chercheurs, les conseillers et à terme les agriculteurs pour mieux évaluer les systèmes *a priori* (avant la mise en pratique) et *a posteriori* (après les modifications effectuées sur le terrain). Dans le cadre du projet DEPHY-Abeille, l'amélioration de cet outil a été assurée par l'ACTA et l'université de Nancy. Il a ensuite été testé sur des systèmes de culture expérimentaux avec notre groupe de 9 agriculteurs céréaliers.

3.1 L'évaluation multicritères

L'idée recherchée en s'appuyant sur des méthodes d'évaluation multicritères est de mettre au point des outils capables de traiter des informations qualitatives. Dans le cas de systèmes de culture comme dans beaucoup de domaines, les connaissances scientifiques ne sont pas toujours suffisantes pour disposer de toutes les données sous forme quantitative. Notre choix s'était donc porté sur l'outil DEXi (Bohanec, 2014) et l'évaluation multicritères, en particulier en s'appuyant sur les méthodes dites MADM (multiple attribute decision making). Ces méthodes permettent de prendre en compte des données qualitatives et sont basées sur des règles de décision. L'outil DEXi utilise des règles d'agrégation de la forme « si...alors » qui permettent d'attribuer une classe au critère agrégé. Par exemple si l'offre en ressources alimentaires est qualifiée comme « élevée » et les risques phytosanitaires « faibles » alors le système de culture est dit « favorable » aux abeilles domestiques.

Dans le cadre du projet POLINOV, l'outil DEXi-Abeilles a été conçu et structuré autour d'un arbre de décision à trois branches principales. Celles-ci permettent d'évaluer la durabilité des systèmes sur les aspects social et économique pour les agriculteurs et les apiculteurs ainsi que sur l'aspect environnemental. Si les branches des deux piliers social et environnemental sont adaptés de l'outil MASC 1.0 (Sadock et al., 2009), la branche dédiée à l'évaluation de la durabilité environnementale intègre la partie « pollinisateurs ». Cette dernière donne la possibilité d'évaluer les systèmes de culture vis-à-vis des abeilles. Cette nouvelle branche « insectes pollinisateurs » est elle-même constituée de trois branches qui permettent de distinguer les abeilles domestiques, les abeilles sauvages et les bourdons. Cette distinction a été faite afin de prendre en compte les différences écologiques et

comportementales qui existent entre ces trois grands groupes d'abeilles notamment au niveau du comportement de butinage (Rollin et al., 2013).

3.2 Test de l'outil sur différents systèmes de culture céréaliers

Après avoir retravaillé les règles de décision, les indicateurs et les critères, l'évolution de l'outil nous a permis d'aboutir à une version DEXi-Abeilles 3.0 et de s'inscrire dans la continuité des travaux précédents. Actuellement, l'évaluation s'appuie sur 105 règles de décision, uniquement pour la branche « insectes pollinisateurs » de l'outil.

Les résultats des tests effectués, tant sur les systèmes de culture du projet POLINOV (2010-2012) et sur ceux du projet DEPHY-Abeille (2013-2018), révèlent une bonne sensibilité de l'outil au niveau des ressources alimentaires proposées par le système de culture. En effet, les améliorations retenues par les experts apidologues, telles que la mise en place de bandes apicoles, d'intercultures mellifères, et de rotations mellifères permettent généralement d'améliorer les performances du système de culture en ce qui concerne les ressources alimentaires. Cette version est aussi plus précise puisqu'elle offre la prise en compte de la floraison ou non des intercultures à l'automne.

Par exemple, concernant la règle relative au niveau des ressources fournies par les bordures de parcelles gérées par l'exploitant, cette nouvelle version s'appuie sur deux critères qui sont la période et la fréquence d'entretien de la bordure. La bordure est considérée intéressante pour l'abeille domestique uniquement si la période d'entretien est tardive (nettement après la période de floraison) vers fin septembre et si la fréquence d'entretien est moyenne (1 à 2 fois/an). Dans ce cas les pratiques sont théoriquement favorables à la floraison des plantes des bordures de parcelles.

3.3 Cas d'une évaluation des systèmes de culture innovants testés par les agriculteurs

L'outil a été utilisé pour évaluer un réseau de parcelles en expérimentation chez un groupe d'agriculteurs ayant modifié leurs itinéraires techniques sur une partie de leur parcellaire dans l'objectif de prendre en compte les insectes pollinisateurs (projet DEPHY-Abeille). Les modifications de pratiques ont été décrites dans la deuxième partie de cet article : Tolérance d'une flore messicole, gestion d'un couvert d'interculture mellifère, et diminution du risque d'exposition des insectes pollinisateurs à des substances toxiques. L'évaluation avec l'outil DEXi-Abeilles a porté sur ces systèmes dits « innovants » et les systèmes dits de « références » correspondant au système classique de l'exploitant, pratiqué sur le reste de son exploitation.

Les résultats de cette comparaison sont présentés sous forme de radars (Figure 7). Pour la branche « insectes pollinisateurs » de l'outil DEXi-Abeilles, 8 composantes sont considérées : la qualité d'habitat pour les bourdons et les abeilles sauvages, les ressources alimentaires disponibles pour les abeilles domestiques, les abeilles sauvages et les bourdons, les risques phytosanitaires pour les abeilles domestiques, les abeilles sauvages et les bourdons.

Sur les cinq couples de systèmes de culture références/innovants étudiés (n= 5 exploitations retenues), seuls deux couples présentent des différences d'évaluation sur au moins un critère (exploitations A et B). Ces différences portent sur une amélioration de la disponibilité en ressources alimentaires pour les abeilles sauvages (les deux cas) et les bourdons (1 cas). Malgré les changements de pratiques mis en œuvre dans les systèmes de culture innovants, aucune amélioration des notes d'impact sur les composantes du milieu relatives aux abeilles domestiques n'est observée. Aucun changement n'est également observé sur les 3 composantes « risque phytosanitaire ».

L'exploitation A présente un système de culture innovant associant réduction de la dose d'azote totale (50 unités) et impasse sur un insecticide et un herbicide anti-dicotylédone sur la succession. A ces

impasses a été ajoutée une réduction du nombre de passages en désherbage mécanique sur le tournesol. La double réduction de la pression sur les adventices a été considérée comme favorable aux abeilles sauvages et bourdons, groupes taxonomiques s'alimentant très majoritairement sur la flore sauvage. Ainsi, les changements de pratiques dans le système de culture innovant ont permis d'améliorer la note sur les ressources alimentaires des abeilles sauvages et les bourdons. Aucune amélioration au final n'est observée pour les abeilles domestiques.

De manière similaire, le système de culture innovant de l'exploitation B associe réduction d'azote et impasse sur deux herbicides anti-dicotylédones sur la succession. Ces changements en comparaison du système de référence permettent d'améliorer la note de la composante ressource alimentaire pour les abeilles sauvages. Contrairement au cas précédent, aucune amélioration n'est observée pour les bourdons. Pour mieux décrypter là où la pratique abaisse la note ou au contraire là où le levier améliore la situation, une analyse plus fine des différents niveaux d'agrégation des critères et des règles de décision est possible en remontant dans les branches de l'arbre.

A l'échelle d'un système, des modifications d'itinéraire technique, telles que des diminutions de doses ou des impasses ne se traduisent pas forcément par une différence de la note finale d'évaluation DEXi-Abeilles. Cela étant, les différences de résultats obtenus à l'échelle du réseau de parcelles nous permettent d'observer que DEXi-Abeilles 3.0 est capable de bien discriminer des systèmes de culture conventionnels aux pratiques phytosanitaires différentes et de comparer leurs performances.

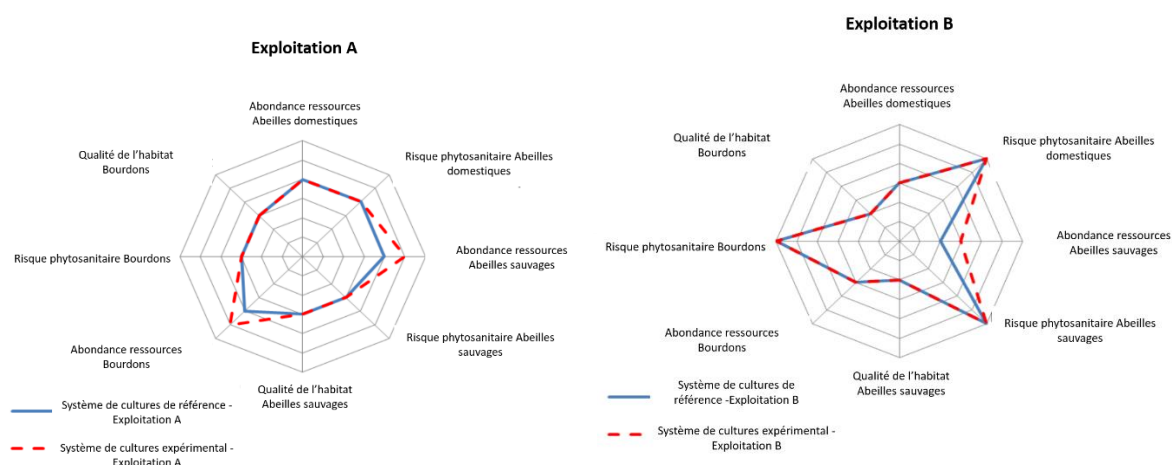


Figure 7 : Evaluation de l'impact des systèmes de culture de référence et système innovant des exploitations A et B. Les systèmes de culture sont comparés quant à leur impact sur 8 composantes : la qualité d'habitat pour les bourdons et les abeilles sauvages (plus la valeur s'éloigne du centre plus la culture est favorable), les ressources alimentaires disponibles pour les abeilles domestiques, les abeilles sauvages et les bourdons (plus la valeur s'éloigne du centre plus la culture est favorable), les risques phytosanitaires pour les abeilles domestiques, les abeilles sauvages et les bourdons (plus la valeur s'éloigne du centre moins la culture est favorable) (Georges, 2015).

Concernant les risques d'intoxication liés aux traitements phytosanitaires, la nouvelle version de DEXi-Abeilles est plus précise à plusieurs niveaux. En particulier et grâce à l'amélioration des connaissances, l'outil prend mieux en compte les risques liés aux traitements des semences en leur donnant un poids plus important que précédemment. Cela tend à mieux discriminer les systèmes mais rend en contrepartie l'évaluation finale peu sensible aux faibles améliorations concernant les traitements phytosanitaires appliqués par pulvérisation. Par exemple en évaluant 2 scénarios d'itinéraires techniques théoriques, aucune amélioration n'est observée alors que l'engagement des agriculteurs sur le terrain requiert des efforts stratégiques et techniques et une prise de risque à court terme : scénario 1, remplacement des insecticides les plus toxiques entre avril et juin, et diminution de l'intensité des

traitements insecticides entre mars et septembre ; et scénario 2, suppression de tous les traitements insecticides appliqués entre mars et septembre.

L'outil n'étant pas complètement abouti, il peut encore être amélioré sur la discrimination des systèmes sur plusieurs points notamment les critères liés à l'exposition des abeilles aux pesticides :

- En prenant mieux en compte la période et les conditions météorologiques pendant lesquelles est réalisé le traitement, en dehors de la période de floraison de la culture mellifère.
- En prenant en compte la rémanence dans le sol de certains pesticides utilisés au cours de la rotation. Ceux-ci contaminent ensuite le nectar et le pollen des plantes cultivées suivantes et des plantes adventices.
- En prenant en compte les effets négatifs liés à des doses sublétales dont les effets sont déjà bien démontrés scientifiquement. En effet, la toxicité étant évaluée à l'aide d'un coefficient, qui utilise la DL50 (Dose Létale tuant 50 % des abeilles exposées) connu pour une partie des produits seulement, l'extrapolation à l'ensemble des substances en devient cependant difficile.
- En se basant sur la DL50 qui est principalement connue et calculée scientifiquement pour l'abeille domestique mais peut varier selon les espèces d'abeilles sauvages, souvent plus vulnérables.

3.4 Conclusion

A ce stade de développement, l'outil DEXi-Abeilles et en particulier la branche « insectes pollinisateurs » est suffisamment robuste pour décrire, évaluer et discriminer des systèmes de culture à partir d'une centaine de règles de décision. La phase d'évaluation nécessite un engagement important des conseillers techniques pour collecter toutes les données nécessaires pour faire fonctionner l'outil. Même si l'évaluation finale n'est pas tant révélatrice de certains changements de pratiques, l'analyse et l'interprétation plus fine par branches et sous-branches offre une bonne lecture des évaluations intermédiaires et cibles les leviers à améliorer. Dans un cadre de projet de R&D, l'utilisation de DEXi-Abeilles est complètement adaptée à un accompagnement technique des agriculteurs dans un processus de co-construction de systèmes favorables aux abeilles.

4. Vers l'élaboration d'un indicateur et de variables expliquant la production de miel de tournesol dans la zone atelier

4.1 L'intérêt d'un indicateur prédictif de la production de miel

Si les pratiques agricoles et l'environnement des abeilles exercent une influence forte sur le développement et la productivité des colonies, les paramètres intrinsèques à celles-ci sont de très bons estimateurs de leur dynamique tout au long de la saison et de leur capacité à produire du miel pour l'apiculteur. En complément de l'expérimentation ciblée sur les itinéraires techniques de culture et la baisse de l'usage des intrants (pesticides et azote) décrite ci-dessus, l'unité APIS de l'INRA du Magneraud et le CEBC ont réalisé une étude prospective visant à créer un indicateur prédictif de la production de miel de tournesol. Le tournesol est la principale culture mellifère d'été en Poitou-Charentes, pollinisée en premier lieu par *A. mellifera*. L'apiculture régionale en tire l'une de ses ressources majeures et cette production contribue à hauteur de 12% de la collecte de miel français (FranceAgrimer, 2018).

Le miel constitue en effet l'aboutissement du travail réalisé par la colonie, il paraît logique de considérer que la quantité de miel produit synthétise un ensemble d'informations complexes représentatives de l'histoire des différentes composantes de la population d'une colonie mais également des pressions antérieures exercées sur ces différentes entités (maladies, manque de ressources, contamination par

des résidus de pesticides...) (Henry, 2017). La production de miel reste le principal objectif de la filière apicole française et celle-ci représente plus de 85% de son chiffre d'affaires (FranceAgrimer, 2012).

Afin de répondre à la question suivante : Est-il possible de concevoir un outil de prédiction de la production de miel de tournesol ? D'autres questions secondaires nécessitent d'être traitées préalablement :

- Quelles sont les caractéristiques temporelles intrinsèques d'une colonie productrice de miel ?
- Les colonies moins sujettes aux maladies produisent-elles plus de miel ?
- Peut-on évaluer rapidement, simplement et par anticipation la future performance d'une colonie d'abeilles ?
- Quels autres facteurs environnementaux peuvent influencer sur la performance des colonies ?

Par définition, un indicateur est une information (qualitative ou quantitative) utilisée pour évaluer l'état ou l'évolution d'un système généralement complexe, et que l'on peut difficilement appréhender de manière directe (Manoliadis, 2002). Les données recueillies exigent d'être sensibles au phénomène défini. Les indicateurs ont pour but de capturer l'essence du problème et d'avoir une interprétation normative, claire et acceptée (Hak, Kovanda, et Weinzettel, 2012). Ils créent ainsi un langage et un référentiel commun pour un groupe d'acteurs, leur permettant de communiquer, d'échanger, de comparer leurs résultats (Grosshans et al., 2009). Finalement, ils améliorent notre visibilité pour généralement nous aider à prendre des décisions (Singh et al., 2009). En effet, le travail réalisé vise à terme à proposer à l'apiculteur d'estimer la productivité future de ses colonies et ainsi de prendre les mesures adéquates au vu de cette prédiction (fusion de colonies, changement de reine, apport artificiel en sirop, ou opérations de sélection de cheptel telles que la transformation en ruche d'élevage).

4.2 Identification des paramètres liés à la production de miel

Afin d'atteindre l'objectif principal, des analyses des corrélations ont été réalisées sur la base des paramètres relevés dans le cadre de l'observatoire ECOBEE (Odoux et al., 2014). Cinquante colonies positionnées aléatoirement chaque année sur la Zone Atelier Plaine & Val de Sèvre sont suivies au cours de la saison. Les paramètres de réserves (pollen et nectar), du couvain (ouvert et fermé) ainsi que celle des abeilles (population adulte) sont mesurées à intervalles de deux semaines.

Les analyses corrélatives mettent en évidence une cascade temporelle des paramètres intrinsèques dans la production de miel des colonies. Ainsi, le premier paramètre chronologiquement corrélé est l'importance du pollen, suivi par la quantité ou la surface de couvain évalué et enfin par la population d'abeilles adultes. Cet enchaînement est bien connu et a déjà mis en évidence l'interdépendance du pollen et du couvain (Requier, 2017), et la relation entre le pollen collecté au printemps affectant la survie hivernale des colonies.

Plus précisément, focalisés sur la production de miel de tournesol, nos résultats nous ont permis de déterminer les dates importantes de cet enchaînement pour chacun de ces paramètres. La production de miel de tournesol semble être au départ extrêmement influencée par le pollen disponible et collecté 40 à 60 jours avant la floraison du tournesol, soit début mai lorsque les floraisons printanières des éléments semi-naturels (érable, prunus, aubépine, cornouiller et diverses fabacées) et de colza se terminent. Cette quantité de miel de tournesol est expliquée ensuite, par le couvain d'ouvrières 4 à 2 semaines avant (soit au cours du mois de juin durant la période de disette dans cet agroécosystème céréalier) et par la population adulte deux semaines avant (soit autour de fin juin-début juillet) (Figure 8). En d'autres termes, la quantité de pollen disponible à partir de mai entraîne incontestablement la dynamique de la ponte pour les 4 à 6 semaines qui suivent, d'où naîtront des ouvrières dès mi-juin et jusqu'à mi-juillet. La floraison du tournesol s'étalant dans ce secteur d'étude de mi-juillet à début août.

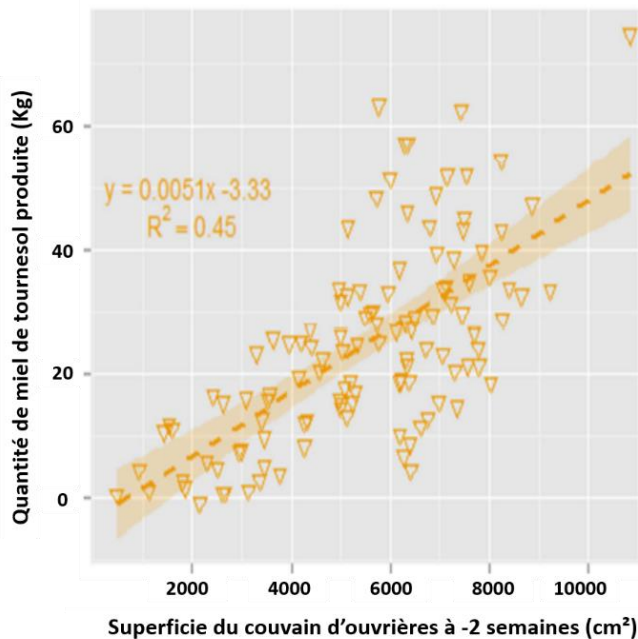


Figure 8 : Régression de la quantité de miel obtenue en fonction de la superficie du couvain d'ouvrières deux semaines avant le début de la floraison du tournesol. Le pouvoir prédictif du modèle est élevé avec un coefficient de corrélation de 0,7 (Lancien, 2016).

4.3 La dynamique des colonies et leur performance est dépendante de l'état des ressources alimentaires

A partir des coefficients de corrélation de nos régressions linéaires, nous avons pu évaluer l'influence des paramètres démographiques, par rapport aux intervalles de temps précédemment établis, sur la productivité en miel de tournesol. Le rapport révèle que, dans notre contexte et d'après nos données, 10 000 abeilles adultes sont capables de produire 11kg de miel ou bien que 1 000cm² de couvain d'ouvrières engendreront chaque fois 5 kg miel. Cette approche analytique n'est pas nouvelle puisque en 1989, Szabo et Lefkovitch avaient pu évaluer l'influence des variables démographiques dans l'explication de la production de miel dans un contexte agricole canadien en été.

Ces auteurs canadiens mettent en évidence des valeurs de corrélations extrêmement proches de celles que nous avons trouvées : ($r = +0,65$ pour la corrélation du couvain et la quantité de miel obtenue 42 jours plus tard et $r = +0,62$ pour la corrélation entre la population et la quantité de miel obtenue). Toutefois, les pentes de ces régressions linéaires ne concordent pas avec les nôtres. En effet, dans cette étude canadienne la production de miel augmentait significativement de 2,9 fois toutes les 1 000 cellules d'ouvrières, soit 11 kg de miel pour chaque pas de 1 000cm² de couvain. L'unité moyenne de production de miel était de 2,2 kg toutes les 1 000 ouvrières adultes soit 22kg de miel par kilo d'abeilles.

Ainsi, la performance des colonies entre les deux études serait réduite de moitié puisqu'ils ont obtenu des performances de 120 kg de miel par ruche en moyenne. Plusieurs facteurs pourraient certainement expliquer en partie cet écart concernant la ruche (âge des reines, niveau de développement des pathogènes et parasites (*varroa*) des colonies plus virulents aujourd'hui) ou les modifications environnementales induisant des perturbations (disponibilité des ressources florales et attractivité des variétés, contexte de pollutions pesticides et de changement climatique...). Par ailleurs, cette étude a eu lieu il y a près de 30 ans. Si nous nous référons à l'évolution de la production de miel dans les pays industrialisés tels qu'en France, nous constatons que celle-ci a diminué de moitié de 1995 à aujourd'hui (FranceAgriMer et Agrex, 2018). Cette diminution de la productivité des colonies semblerait donc plausible.

4.4 Les maladies et la qualité de l'environnement jouent sur l'efficience des colonies

Parmi les variables disponibles et analysées, l'influence du nombre de maladies recensées sur la productivité de miel de tournesol apparaît significative (Figure 9).

Pourtant, nos résultats sur l'effet de chaque anomalie, prise individuellement, sur le modèle (Miel ~ Couvain) ne semble pas mettre en évidence d'effet significatif, hormis pour la présence de loque européenne et de mycose.

Il est cependant nécessaire de préciser que ce recensement et dénombrement des maladies ont été réalisés sur la base d'observations sanitaires des symptômes sans la réalisation d'analyses pathologiques de prélèvements. En effet, le simple recensement d'absence/présence ne permet pas d'estimer l'impact du symptôme détecté. Dans cette analyse n'a pas été pris en compte le varroa, parasite entraînant un affaiblissement des capacités immunitaires de l'abeille. Par ailleurs, Pioz et Vidau (2018) présentent des résultats convergents avec cette analyse, mais prennent en compte précisément la charge en varroa pour 100 abeilles ainsi que la diversité et la quantité de molécules chimiques retrouvées dans le pollen de trappe. Ces deux facteurs, associés à la quantité de couvain évalué avant le début de la miellée de tournesol, montrent des effets négatifs sur la production de miel de tournesol.

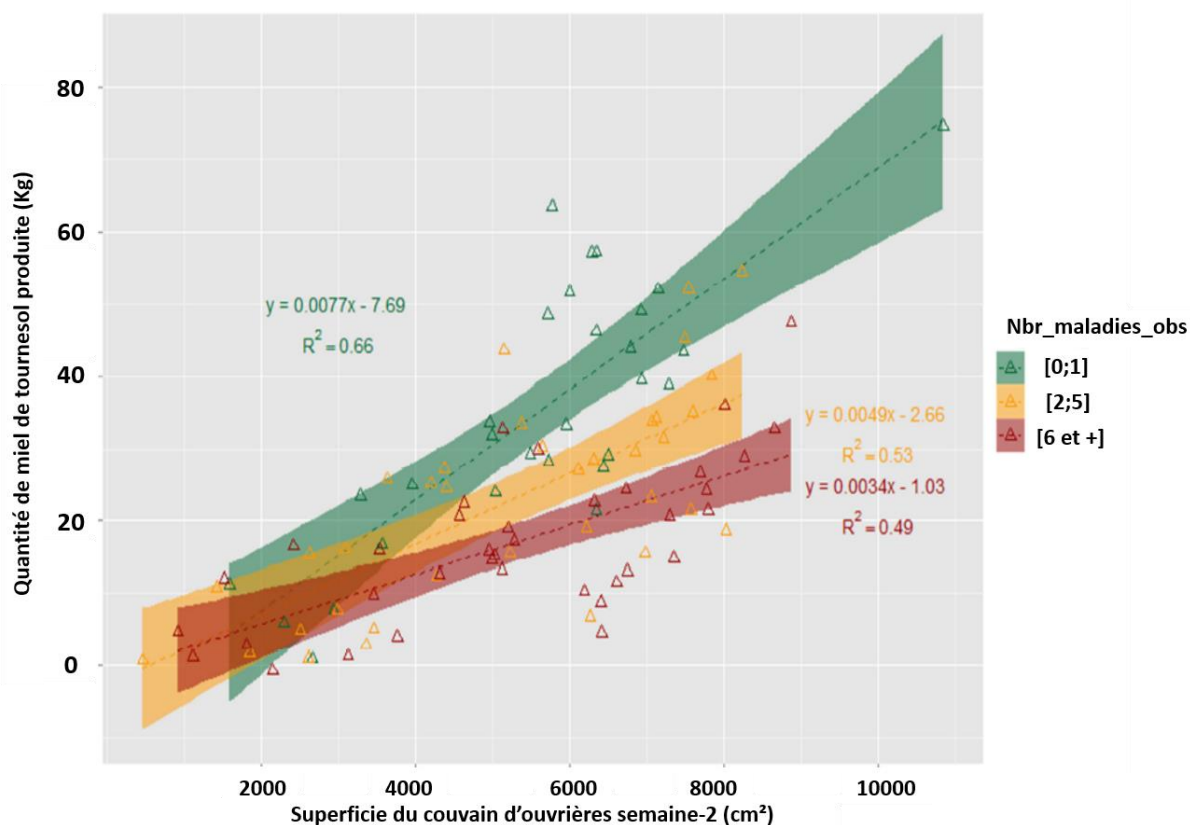


Figure 9 : Influence du nombre de maladies recensées avant la miellée sur la production de miel en fonction du couvain, deux semaines avant le début de la floraison du tournesol. L'illustration graphique met en évidence que le recensement des symptômes sanitaires ou maladies, effectué avant la miellée pourrait être un des paramètres de prédiction de la productivité des colonies. En effet, la pente diminue progressivement sous la pression du nombre maladies recensées, selon 3 modalités significativement différentes deux à deux ([0-1 maladies observées] ; [2-5 maladies obs.] ; [6 et + maladies obs.]). Ces trois modalités sont donc en interaction avec le modèle miel ~ couvain. En d'autres termes, la superficie du couvain et la somme de maladies observées avant la miellée influencent significativement la quantité de miel de tournesol (Lancien, 2015).

Au-delà des réserves polliniques constituées par les butineuses, les ressources florales de l'environnement des colonies n'ont pas été prises en compte au cours de cette étude. Même s'il est extrêmement intéressant de poser des hypothèses sur l'effet du paysage (assolement inclus) sur la productivité des colonies, cette analyse relève d'un travail à part entière qui n'a pas pu être réalisé dans ce projet. Toutefois, de telles approches expérimentales exploratoires (Rivière, 2015 ; Pouliquen, 2016) ont déjà pu montrer que la répartition des cultures de colza et de tournesol dans un rayon de 1,5 km autour des ruchers dans cette même zone d'étude a peu d'incidence sur les niveaux de réserves des colonies.

Ainsi, outre des facteurs intrinsèques à la culture de tournesol liés à la période de floraison, aux conditions pédo-climatiques et à l'attractivité des variétés de tournesol, cette étude révèle l'importance de la disponibilité pollinique au printemps pour la constitution des réserves de miel de tournesol. Nous savons par exemple que près de 11% du pollen printanier récolté par les colonies est issu des fleurs du colza, ainsi les 89 % restants résultent de la flore semi-naturelle constituée de ligneux et herbacées dont une grande partie sont des adventices des cultures (Requier et al., 2015). Néanmoins, nous savons que cette ressource en protéine est indispensable, en abondance et en diversité, au développement des larves, des jeunes abeilles et de la santé des colonies (Di Pasquale et al., 2013), et reste peu disponible à l'échelle d'une aire de butinage dans l'environnement étudié. L'intensification agricole a considérablement réduit la place de ces ressources semi-naturelles de sorte que la disponibilité des pollens printaniers est trop souvent une contrainte limitante pour les colonies d'abeilles domestiques comme elle l'est d'ailleurs tout autant pour les abeilles sauvages (Decourtye et al., 2010).

4.5 Conclusion

Ce travail basé sur les expérimentations et mesures réalisées sur l'observatoire d'ECOBEE conforte l'idée que l'évaluation des colonies avant la période de miellée visée fournit aux chercheurs des données pertinentes à la prédiction de la production de miel. Au-delà de l'intérêt scientifique, ces variables reflétant les quantités de réserve en pollen et de couvain peuvent constituer la base d'un indicateur simplifié pour évaluer la performance des colonies. La modélisation et la simplification de ce type d'indicateur devrait permettre aux apiculteurs d'adapter leurs stratégies et leurs pratiques en amont d'une période de production de miel, afin que les colonies reposent sur une quantité correcte de couvain et qu'elles soient populeuses.

Conclusion générale

Les actions menées au travers du projet DEPHY-Abeille ont permis de concrétiser et d'explorer de nombreuses pistes de recherches ouvertes par l'UMT PrADE et ses partenaires les années précédentes sur la Zone atelier Plaine & Val de Sèvre : en particulier par l'acquisition de très nombreuses données, références et de nouvelles connaissances sur les relations entre les abeilles et la production végétale ou plus largement la prise en compte de ces insectes dans les systèmes de culture. Les interactions au sein d'un socio-écosystème ont été discutées en particulier avec entre apiculteurs et agriculteurs.

Il apparaît maintenant clairement que le maintien de l'ensemble de la faune pollinisatrice, dont les abeilles domestiques et la production de miel associée, est dépendant de l'environnement. L'état de cet environnement, composé des espaces cultivés et semi-naturels entretenus, conditionne la capacité du territoire à générer des productions alimentaires diverses en son sein. L'offre en pollen et nectar tout au long de l'année est primordiale. La diminution du niveau d'exposition des abeilles aux pesticides est également un paramètre lié à leur bonne santé et vitalité. Car de ces deux paramètres, associés au niveau de pression développé par l'acarien varroa, dépendent fortement la dynamique des colonies d'abeilles, leur performance et leur capacité à résister à l'hiver.

La durée du projet a été un atout pour aborder ces sujets et mener une réflexion de longue haleine avec les différents acteurs rencontrés et volontaires pour participer aux expérimentations et différentes actions de concertation.

Si les agriculteurs ont tous été volontaires et enthousiastes pour aborder ces sujets difficiles, ils sont restés rigoureux et transparents dans leur investissement. Nous constatons malheureusement que toutes leurs initiatives n'ont pas pu être assurées pour différentes raisons. Evidemment, les conditions météorologiques ont eu raison parfois d'une floraison précoce des intercultures attendue à l'automne. La difficulté d'approvisionnement, auprès de leurs fournisseurs, pour un produit hors catalogue, le manque d'organisation ou d'habitude ou encore la réticence au changement de ces structures ont parfois pu montrer des limites face à l'engagement des agriculteurs dans leur volonté de sortir de leur zone de confort et s'aventurer vers des chemins moins explorés. Par exemple, la dissémination de l'information relative à la caractérisation du niveau de risque d'une molécule chimique renforce la méconnaissance sur la dangerosité d'un produit et les bonnes conditions d'utilisation de ces produits. Cela rend, aujourd'hui encore, compliqué la création d'un outil d'aide à la décision simple et efficace sur le risque attendu des pesticides homologués.

Enfin, le positionnement de ce projet, à mi-chemin entre les dispositifs EXPE et FERME révèle l'importance de l'accompagnement des acteurs sur le terrain dans leurs stratégies de changement de systèmes. Ce lien fort entre le conseiller et l'agriculteur est un gage de l'atteinte des objectifs ECOPHYTO. Un lien efficace si l'investissement est fort et systémique à l'échelle des structures techniques et de développement, et associé à des partenariats solides créés avec la recherche plus fondamentale.

Remerciements

Les expérimentations ont pu voir le jour grâce à l'engagement et au professionnalisme des principaux acteurs de terrain. Nous adressons nos sincères remerciements aux 9 agriculteurs volontaires pour leur disponibilité et leur bienveillance dans les échanges ainsi qu'aux apiculteurs.

L'ensemble des travaux, enquêtes, entretiens et protocoles ont été menés et réalisés grâce à la précieuse participation et sans relâche de nombreuses personnes, nous tenons à remercier Catherine Baron (INRA), Sabrina Gaba (INRA), Rémy Ferrandes (ITSAP), Bastien Paix (ITSAP), Domitille Pouliquen (INRA), Coraline Rivière (INRA-CEBC), Solène Rousselet (ITSAP), Alexis Santilan (CEBC), Elisabeth Simon (ITSAP) et Valentin Verret (ITSAP/INRA).

Nous remercions également l'équipe de la cellule d'animation nationale DEPHY avec Emeric Emonet et Marie Rougier, pour la coordination et les temps forts organisés autour des projets DEPHY EXPE.

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet DEPHY-Abeille (2013/2018) financé par le programme ECOPHYTO et l'appel à projet DEPHY EXPE 2. Le financement est géré par l'AFB à partir des taxes sur les produits chimiques pour pollution diffuse. Un co-financement a été assuré par la fondation LISEA ciblé sur l'accompagnement des agriculteurs.

Références bibliographiques

Allier F., Gourrat M., 2016. Co-concevoir des solutions techniques entre apiculteurs et cultivateurs. *Innovations Agronomiques* 53, 49-62

Bohanec M., 2014. DEXi: A Program for Multi-Attribute Decision Making [en ligne]. Disponible à l'adresse : <http://kt.ijs.si/MarkoBohanec>

- Bretagnolle V., Berthet E., Gross N., Gauffre B., Plumejeaud C., Houte S., Badenhauer I., Monceau K., Allier F., Monestiez P., Gaba S., 2018. Towards sustainable and multifunctional agriculture in farmland landscapes: Lessons from the integrative approach of a French LTSER platform. *Science of the Total Environment*, 627, 822-834.
- Bretagnolle V., Gaba S., 2015. Weeds for bees ? A review. *Agronomy for Sustainable Management*, 35(3), pp 891-909
- Decourtye A., 2018. Abel l'apiculteur et Caïn le cultivateur. Chapitre 9 in *Les abeilles, des ouvrières agricoles à protéger*. Editions France agricole-ACTA Editions, pp99-106.
- Decourtye A., Gayraud M., Chabert A., Requier F., Rollin O., Odoux J.-F., Henry M., Allier F., Cerrutti N., Chaigne G., Petrequin P., Plantureux S., Gaujour E., Emonet E., Bockstaller C., Aupinel P., Michel N., Bretagnolle V., 2014. Concevoir des systèmes de cultures innovants favorables aux abeilles. *Innovations Agronomiques* 34, 19-33
- Decourtye A., Mader E., Desneux N., 2010. Landscape enhancement of floral resources for honey bees in agro-ecosystems. *Apidologie* 41 (3) : 264-77. Doi :10.1051/apido/2010024.
- Di Pasquale G., Salignon M., Le Conte Y., Belzunces L., Decourtye A., Kretzschmar A., Suchail S., Brunet J.-L., Alaux C., 2013. Influence of Pollen Nutrition on Honey Bee Health: Do Pollen Quality and Diversity Matter? Edited by J Zeil. *PLoS ONE* 8 (8). Doi :10.1371/journal.pone.0072016.
- Etienne M., Du Toit D., Pollard S., 2011. ARDI: a co-construction method for participatory modeling in natural resources management. *Ecol Soc* 16(1) : 44.
- FranceAgriMer, AgrexConsulting, 2018. Observatoire de la production de miel et gelée royale. Les synthèses FranceAgriMer: 4.
- FranceAgriMer, Protéis+, 2012. Audit économique de la filière apicole française. Rapport.
- Georges G., 2015. Evaluation de systèmes de cultures vis-à-vis de la protection des abeilles: Amélioration et évaluation de l'outil DEXi-Abeilles. Rapport de stage – Master 2. ACTA - Université de Lorraine, UMR Agronomie et Environnement Nancy-Colmar.
- Gourrat M., 2018. Partager des savoirs pour imaginer et concrétiser collectivement des actions locales. Chapitre 20 in *Les abeilles, des ouvrières agricoles à protéger*. Editions France agricole-ACTA Editions, pp229-237.
- Gourrat M., 2017. De la concertation territoriale à l'expérimentation en plein champs, différents leviers pour accompagner les acteurs d'un territoire agricole à façonner des paysages durablement favorables à des productions oléagineuses et des productions de miel. OCL, Doi: 10.1051/ocl/2017042
- Grosshans R., Abdelrehim A., Rajbhandari P., Gutierrez-Espeleta E., Wieler C., van Woerden J., 2009. IEA - Training Manual -A training manual on integrated environmental assessment and reporting.
- Hak T., Kovanda J., Weinzettel J., 2012. A Method to Assess the Relevance of Sustainability Indicators: Application to the Indicator Set of the Czech Republic's. Sustainable Development Strategy. *Ecological Indicators* 17 : 46-57. Doi :10.1016/j.ecolind.2011.04.034.
- Henry M., Becher M.-A., Osborne J.-L., Kennedy P.-J., Aupinel P., Bretagnolle V., Brun F., Grimm V., Horn J., Requier F., 2017. Predictive systems models can help elucidate bee declines driven by multiple combined stressors. *Apidologie* 48 : 328-339. Doi :10.1007/s13592-016-0476-0.
- Lancien T., 2016. Etude des paramètres déterminant la production de miel de tournesol par les colonies d'abeilles domestiques. Rapport de stage – Master 2. INRA APIS – CNRS-CEBC.
- Manoliadis, Odysseus G., 2002. Development of Ecological Indicators - a Methodological Framework Using Compromise Programming. *Ecological Indicators* 2 (1-2),169-76. Doi :10.1016/S1470-160X(02)00040-7.
- Odoux J.-F., Aupinel P., Gateff S., Requier F., Henry M., Bretagnolle V., 2014. ECOBEE : a tool for long-term honey bee colony monitoring at the landscape scale in West European intensive agroecosystems. *Journal of Apicultural Research* 53(1): 57-66. DOI 10.3896/IBRA.1.53.1.05.

Pioz M., Vidau C., 2018. Produire du miel de tournesol : quelle est l'influence de la structure de la colonie, de Varroa et des pesticides ? Colloque Insectes Pollinisateurs en Grandes Cultures. CNRS de Chizé, France. Septembre.

Pouliquen D., 2016. Impact of agricultural landscape on honey reserves in bee colonies, Vol. Msc Agroecology/ Ingénieur en Agriculture: ESA/NMBU (ed., Angers), p. 71.

Requier F., Odoux J.-F., Henry M., Bretagnolle V., 2017. The carry-over effects of pollen shortage decrease the survival of honeybee colonies in farmlands. *Journal of Applied Ecology*. 2017, 54, (4), 1161-1170

Requier F., Odoux J.-F., Tamic T., Moreau N., Henry M., Decourtye A., Bretagnolle V., 2015. Honey Bee Diet in Intensive Farmland Habitats Reveals an Unexpectedly High Flower Richness and a Major Role of Weeds. *Ecological Applications* 25 (4) : 881-90. Doi :10.1890/14-1011.1.

Rivière C., 2015. Impact des pratiques agricoles sur l'abeille domestique en plaine agricole : Dynamique des réserves dans une colonie d'abeilles, Vol. Master 2 : Biologie, Ecologie, Evolution (ed. Poitiers, UFR Sc. Fond. Appl), p. 32.

Rollin O., Bretagnolle V., Decourtye A., et al., 2013. Differences of floral resource use between honey bees and wild bees in an intensive farming system. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment*. Vol. 179, p. 78-86. DOI 10.1016/j.agee.2013.07.007.

Sadock W., Angevin F., Bergez J.-E., et al., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. In : *Agronomy for Sustainable Development*. Vol. 29, n° 3, p. 447-461. DOI 10.1051/agro/2009006.

Szabo T.I., Lefkovitch L.P., 1989. Effect of brood production and population size on honey production of honeybee colonies in Alberta, Canada. *Apidologie* 20, 157-163.

Singh R.K., Murty H.R., Gupta S.K., Dikshit A.K., 2009. An Overview of Sustainability Assessment Methodologies. *Ecological Indicators* 9 (2): 189-212. Doi :10.1016/j.ecolind.2008.05.011.

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



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

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