

La biodiversité au cœur des agroécosystèmes : où en sommes-nous aujourd'hui ?

Petit S.¹ et Lescourret F.²

¹ INRA, UMR1347 Agroécologie, 17 rue Sully, BP 86510, F-21065 Dijon Cedex

² INRA, UR PSH, F-84914 Avignon

Correspondance : sandrine.petit-michaut@inra.fr

Résumé

La considération de la biodiversité et de ses rôles dans le fonctionnement et la durabilité des agroécosystèmes correspond à un changement de paradigme. Quelles sont les avancées dans la compréhension de ces rôles et dans la mise en place de systèmes agricoles basés sur la biodiversité ? Des progrès méthodologiques en biologie moléculaire et intelligence artificielle ont permis de révéler la biodiversité cachée, des sols en particulier, et de reconstituer des réseaux d'interactions biotiques. Les concepts d'écologie fonctionnelle renouvellent la compréhension du fonctionnement des communautés de plantes des agroécosystèmes et le choix et la sélection de plantes de service ou de génotypes à cultiver en mélange. Avec la montée en puissance du concept de service écosystémique qui aide à finaliser les rôles de la biodiversité, on voit apparaître des travaux, encore trop rares, reliant biodiversité, fonctions et services, parfois à grande échelle (étude EFESE-EA). Des principes de pilotage de la biodiversité planifiée à plusieurs échelles d'espace et de temps pour la fourniture de services multiples ont été explicités et mis à l'épreuve dans des modèles ou des expérimentations système innovantes. La conception et l'évaluation de systèmes agroécologiques basés sur la biodiversité requiert d'amplifier les recherches et la coopération entre acteurs.

Mots-clés : Biodiversité planifiée, Biodiversité associée, Réseau écologique, Ecologie fonctionnelle, Service écosystémique, Expérimentation système

Abstract: Biodiversity at the heart of agricultural systems/agroecosystems: where do we stand today?

The consideration of biodiversity and its roles in the functioning and sustainability of agroecosystems is a paradigm shift. What progress has been made in understanding these roles and in setting up agricultural systems based on biodiversity? Methodological advances in molecular biology and artificial intelligence have made it possible to reveal hidden biodiversity, particularly of soils, and to reconstitute networks of biotic interactions. Functional ecology concepts renew the understanding of how agroecosystem plant communities work and the choice and selection of service plants or genotypes to be grown in a mixture. With the rise of the concept of ecosystem services, which helps to finalize the roles of biodiversity, work is emerging, which is still too rare, linking biodiversity, functions and services, sometimes on a large scale (EFESE-EA study). Principles for managing planned biodiversity at multiple spatial and temporal scales for the provision of multiple services have been clarified and tested in innovative system models or experiments. The design and evaluation of biodiversity-based agro-ecological systems requires increased research and cooperation between stakeholders.

Keywords: Planned biodiversity, Associated biodiversity, Ecological network, Functional ecology, Ecosystem service, System experiment

Introduction

La reconnaissance de la biodiversité et de ses rôles en agriculture n'a cessé de croître ces dernières années en réponse à la nécessité de considérer et de préserver la santé des écosystèmes et des hommes. Le sol n'est plus considéré comme un support inerte mais comme un environnement vivant contribuant à la fertilité des terres et à la productivité primaire, la biodiversité cultivée est aujourd'hui revue sous le prisme de la diversification, et les espaces semi-naturels des régions agricoles sont reconnus pour leur rôle dans le maintien d'organismes bénéfiques aux agroécosystèmes, comme l'illustre le cas des insectes venus des cours d'eau, qui contribuent à la fertilité des cultures, à leur pollinisation et à la régulation de leurs bioagresseurs (Raitif et al., 2019). L'idée que la biodiversité représente un atout pour l'agriculture a fait son chemin, avec des changements de paradigmes majeurs pour la production agricole. L'agroécologie et les concepts de services écosystémiques et d'intensification écologique que l'on peut y associer, ont été largement mobilisés par la communauté scientifique. L'intensification écologique, une alternative aux systèmes agricoles classiques qui s'appuie sur les mécanismes écologiques (Dore et al., 2011) est un concept très lié au champ de l'agroécologie (Tuttonell, 2014). Un défi majeur de l'intensification écologique des systèmes de production agricole est de gérer les agroécosystèmes pour la fourniture de services écosystémiques (Bommarco et al., 2013). Le point majeur, commun à ces concepts et approches, est la reconnaissance qu'une utilisation renforcée des processus écologiques est un levier majeur pour augmenter la durabilité des systèmes agricoles. Ainsi, ce modèle suggère une transition de systèmes dont la gestion est basée sur les intrants, à fortes externalités négatives et faible niveau de biodiversité, vers des systèmes agroécologiques, caractérisés par des niveaux de biodiversité bien plus conséquents. Ces systèmes sont décrits parfois comme 'basés sur la biodiversité' puisque leur gestion repose sur la biodiversité planifiée (domestique, pilotée par le gestionnaire) et la biodiversité sauvage associée qui pour partie se maintient grâce à et interagit avec la biodiversité planifiée. La biodiversité planifiée et associée est à la base de nombreux processus écologiques fournissant des services écosystémiques d'intérêt en agriculture (Figure 1).

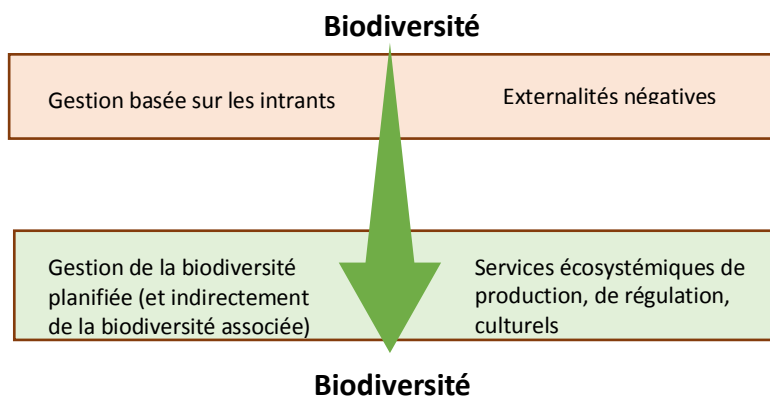


Figure 1 : Le passage de systèmes agricoles classiques à des systèmes basés sur la biodiversité.

Le résultat est un système complexe. D'abord, sa composante biologique est très biodiverse, avec de multiples interactions biotiques entre communautés dont nous avons une connaissance incomplète (Petit et al., 2018). Ensuite, les liens et conditions nécessaires pour que cette biodiversité puisse alimenter un panel de services écosystémiques assurant la durabilité du système ne sont pas totalement connus (Cardinale et al., 2012). Enfin le pilotage de ces interactions biotiques par le gestionnaire peut se révéler délicat et nécessite de mieux décrire le lien entre combinaisons de pratiques de gestion agricole, composition des communautés et interactions biotiques (Médiène et al., 2011). Nous proposons ici un point d'étape, illustré par quelques exemples, des avancées récentes sur les trois fronts de science afférents, à savoir la caractérisation de la biodiversité et des interactions biotiques, les liens entre biodiversité et fourniture de bouquets de services écosystémiques et le

pilotage de la biodiversité et des interactions biotiques pour la fourniture de services. Nous présentons ensuite des exemples de démarches de modélisation et d'expérimentation actuellement en cours pour avancer sur la mise en œuvre de systèmes agroécologiques basés sur la biodiversité.

1. Caractériser la biodiversité, les interactions biotiques et leurs fonctions

La période récente a vu des développements techniques importants mobilisables pour caractériser la biodiversité, les interactions biotiques et le lien avec les processus écologiques. Ces progrès se sont accompagnés de développements théoriques adaptés à l'étude et à la mobilisation de la biodiversité planifiée et associée des agroécosystèmes. Nous présentons ici trois illustrations de ces avancées.

1.1 Des progrès dans la caractérisation de la biodiversité cachée

Des progrès importants ont été faits sur la caractérisation de la biodiversité 'cachée' des agroécosystèmes. L'exemple le plus marquant est sans doute celui de l'écologie microbienne des sols qui a connu une véritable révolution grâce au développement d'outils d'extraction, de quantification et d'analyse de l'ADN des sols (Ranjard et al., 2013). Ces progrès ont permis de déterminer la composition des communautés telluriques sur de larges dispositifs, avec le développement de bioindicateurs et de référentiels de l'état biologique des sols. L'analyse des liens entre composition des communautés et fonctions liées au cycle du carbone, de l'azote ou à la dégradation des pesticides ont permis de développer une écologie 'fonctionnelle' des sols avec la mise en évidence de groupes d'organismes spécifiquement impliqués dans certaines fonctions, par exemple dans la dénitrification qui joue un rôle majeur dans la capacité des sols à atténuer l'émission du gaz à effet de serre N_2O . Dans ce contexte, la plante cultivée, via sa rhizosphère, et les pratiques agricoles associées représentent des leviers essentiels de pilotage de communautés microbiennes fonctionnelles (Chemidlin-Prevost-Bouré et al., 2018).

1.2 La structure et le fonctionnement de réseaux d'interaction

Les interactions entre organismes ont été documentées et théorisées de longue date, mais de manière partielle faute de méthodes adaptées. De nouvelles méthodes ont été développées qui permettent de reconstituer les réseaux d'interactions entre taxa présents dans les agroécosystèmes et de décrire le lien entre la structure et les fonctions de ces réseaux (Bohan et al., 2013). Parmi ces nouvelles méthodes, les outils issus de la biologie moléculaire permettent de décrire des liens trophiques directs et complètent les approches biochimiques, isotopiques et d'imagerie pour reconstituer les réseaux trophiques. Les méthodes d'Intelligence Artificielle permettent quant à elles la reconstitution de réseaux d'interaction à partir de l'analyse de la co-occurrence d'organismes dans de larges jeux de données (Figure 2). Ces approches sont mobilisées pour décrire les réseaux d'interactions entre communautés végétales et pollinisateurs (fonction de pollinisation), entre plantes, bioagresseurs et ennemis naturels généralistes (Pocock et al., 2012), ou entre composantes de la biodiversité des sols (Morriën et al., 2017). Ce nouvel accès à la caractérisation de réseaux d'interactions a déjà modifié notre perception de la biodiversité en révélant la complexité des interdépendances entre différentes composantes biologiques et compartiments de l'agroécosystème. Il est probable que leur utilisation dans les prochaines années renouvellera profondément nos connaissances sur les interactions biotiques et leur lien avec le fonctionnement des agroécosystèmes (Bohan et al., 2017).

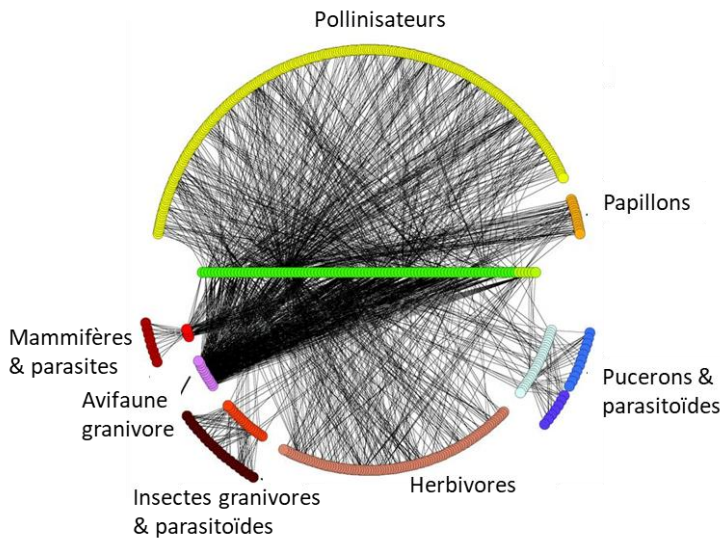


Figure 2 : Reconstitution des réseaux d'interactions trophiques autour des plantes de l'agroécosystème (en vert, au centre) par analyse de co-occurrence. Modifié d'après Pocock et al., 2012.

1.3 Des développements en écologie fonctionnelle des agroécosystèmes

Les concepts et méthodes d'écologie fonctionnelle (Violle et al., 2007) ont été largement mobilisés pour l'étude des agroécosystèmes ces dernières années. Ils ont permis de quantifier le rôle des pratiques culturales dans les changements de communautés observés ces dernières décennies dans les agroécosystèmes (Fried et al., 2012). Ils ont également été mobilisés pour évaluer les fonctions de la biodiversité sauvage ou cultivée (Mézière et al., 2015). Des cadres d'analyse spécifiques aux agroécosystèmes ont été proposés pour relier stratégies de gestion agricole, biodiversité et fonctions (Gaba et al., 2015). L'écologie fonctionnelle s'est aussi invitée dans la sélection variétale, jusqu'ici limitée à des critères de performance agronomique en environnement homogène et non limitant. Litrico et Violle (2015) ont proposé un cadre pour penser la sélection de mélanges agronomiques et suggèrent la création de mélanges optimisés de génotypes (idéomixes) sur la base de traits agronomiques et de traits d'interaction (performance du génotype dans un contexte biotique hétérogène). Barot et al. (2017) ont quant à eux récemment proposé une analyse d'écologues fonctionnels de ce qui peut être attendu de mélanges de variétés en termes de fonctions et de potentiel de services écosystémiques.

2. De la biodiversité et ses fonctions aux services écosystémiques et aux bouquets de services

Une littérature importante a été dédiée à l'évaluation d'un ou de multiples services dans les agroécosystèmes. Pour autant, force est de constater que la biodiversité est rarement explicitement prise en compte dans ces études et de fait, il est rare de trouver un continuum entre biodiversité, fonctions et services. On peut faire le même constat des approches de modélisation. Un inventaire récent au sein de l'INRA montre que la biodiversité est représentée explicitement dans près de la moitié des 107 modèles d'agroécologie recensés, via des traits, ou des guildes dans quelques cas, avec très majoritairement des fonctions associées (85% des cas) sans que cela se prolonge fréquemment vers la contribution de ces fonctions à la fourniture de services écosystémiques (Monod et al., 2018). Ceci n'est pas surprenant car évaluer fonctions et services ne relève pas forcément des mêmes méthodes et disciplines. Les services résultent de plusieurs fonctions (par exemple réduction de l'émission de N_2O et stockage du carbone pour la régulation du climat dans les agroécosystèmes) ; leur quantification biophysique, déjà complexe de ce fait, n'est qu'une étape dans un processus qui implique d'identifier des bénéfiques et des bénéficiaires et de réaliser des évaluations sociales et/ou économiques.

Une conséquence est que les recherches qui intègrent explicitement la biodiversité se limitent souvent à la recherche des potentiels pour assurer des services. Par exemple, les études portant sur le contrôle des ravageurs par des ennemis naturels utilisent souvent des indicateurs décrivant l'activité de prédation (fonction) sans mesurer la régulation qui est effectivement exercée sur les ravageurs (service résultant de la prédation et d'autres fonctions) ou la réduction subséquente des dégâts infligés aux cultures (pour l'agriculteur gestionnaire de ces cultures, un des bénéfices induits), qui se révèlent plus difficiles à estimer (Karp et al., 2018). De la même façon, la biodiversité végétale est souvent analysée en termes de profils fonctionnels contribuant potentiellement à la fourniture de services. Cette approche a été utilisée par Damour et al. (2014) qui ont montré l'importance d'assurer une complémentarité fonctionnelle entre espèces de couverts multi-spécifiques en bananeraies pour trois services visés, le contrôle des adventices, le contrôle de nématodes ravageurs et la fertilité des sols. Petit et al. (2015) ont analysé la contribution de la flore adventice des agroécosystèmes à la fourniture des services de pollinisation, contrôle biologique et production agricole pour une diversité de modes de gestion agricole. Pommier et al (2018) franchissent un pas supplémentaire en considérant les effets de traits fonctionnels de deux communautés en interaction, les communautés microbiennes des sols et les plantes cultivées. Leur étude démontre que l'intégration des communautés microbiennes dans l'analyse augmente significativement le pouvoir explicatif des niveaux de variation de plusieurs services liés au cycle de l'azote. Enfin, sur la base de données empiriques récoltées à l'échelle régionale, Perrot et al. (2018) estiment que l'abondance et diversité des insectes pollinisateurs, via leur fonction de pollinisation, contribuent significativement au rendement du colza (taux de grenaison, masse des graines) avec une part du rendement liée à la pollinisation estimée à 30%. On a donc ici un continuum quantifié entre biodiversité, fonction, service et bénéfice induit pour l'agriculteur.

La littérature offre aussi des cas d'étude intéressants sur la question des compromis et synergies entre services, souvent à des échelles larges. Les couverts de végétation (land use, occupation du sol) sont souvent mis en regard de services multiples dans ces évaluations de compromis et synergies. Ils sont quelquefois complétés par des mesures de biodiversité in situ. Felipe-Lucia et al. (2015) ont ainsi analysé la contribution de diverses occupations du sol à des bouquets de services en intégrant des mesures de biodiversité végétale dans ces couverts. Ils montrent que la direction et la force du lien entre biodiversité et services est modulé par le type d'occupation du sol considéré. L'étude EFES-EA des services fournis par les espaces agricoles à l'échelle du territoire français (Tibi et Théron, 2018) prend en compte les séquences de couvert de végétation et propose une analyse des compromis et synergies entre un panel de 14 services écosystémiques à l'échelle des petites régions agricoles. Les composantes de la biodiversité prises en compte sont multiples : auxiliaires, pollinisateurs, micro-organismes, mésofaune et macrofaune du sol. Cette analyse met en évidence le rôle crucial de la configuration spatio-temporelle des couverts gérés (cultures, infrastructures agroécologiques et biodiversité végétale associée) qui détermine directement le niveau de fourniture de 11 des 12 services de régulation étudiés. Elle propose également une analyse des relations indirectes – via la biodiversité - entre certaines pratiques de gestion agricole (fertilisation, usage de produits phytosanitaires, travail du sol) et la fourniture des 12 services de régulation.

3. Piloter la biodiversité pour la fourniture de services écosystémiques multiples dans les agroécosystèmes

Améliorer la performance des systèmes agricoles a longtemps été synonyme de réduction de la biodiversité dans ces systèmes, avec le choix d'implanter des variétés très uniformes génétiquement, dans un environnement aussi simplifié et homogène que possible. Les principes au cœur de la conception de systèmes agro-écologiques sont radicalement différents. La démarche consiste à réintroduire et maintenir de la biodiversité dans les systèmes de façon à (i) exploiter au mieux la gamme des conditions et ressources offertes et (ii) tirer profit de la complémentarité des caractéristiques adaptatives et fonctionnelles des espèces (Reboud et Malézieux, 2015). Elle doit être réfléchi en

fonction du panel de services écosystémiques dont on cherche à favoriser l'expression, dans un contexte donné de contraintes et d'opportunités de valorisation de la biodiversité et de ses fonctions (Gaba et al., 2015). Elle doit aussi se concevoir comme une combinaison de leviers qui peuvent être mobilisés de façon complémentaire à plusieurs échelles d'espace et de temps (Duru et al., 2015), de la plante au paysage et au fil de la séquence des couverts qui se succèdent (Figure 3).

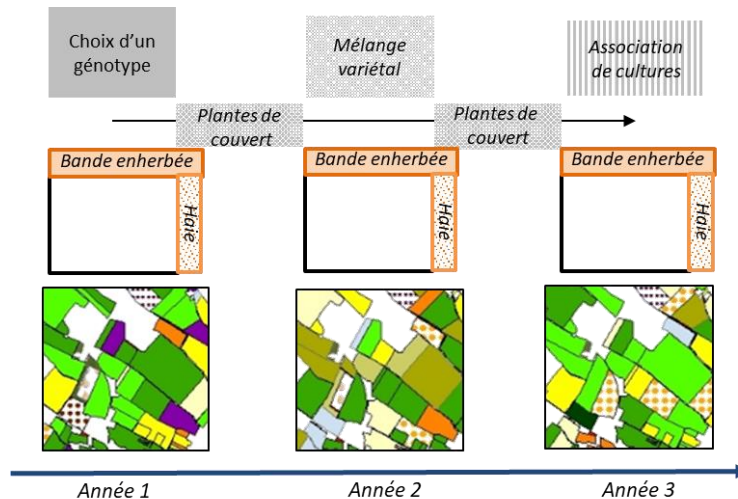


Figure 3 : Gestion de la biodiversité planifiée à de multiples échelles d'espace et de temps.

Il existe de multiples possibilités de diversifier la biodiversité pilotée dans la parcelle cultivée, qui vont du choix de(s) génotype(s), cultivés en mélange, à l'association de cultures ou de cultures et plantes de services, en passant par l'utilisation de couverts mono ou plurispécifiques pendant l'inter-culture. Les recherches visent souvent à déterminer les mélanges ou associations permettant de maximiser la complémentarité entre plusieurs services en fonction des conditions environnementales. Une récente méta-analyse montre ainsi l'intérêt d'associer des légumineuses aux céréales pour la gestion des adventices, sans contrepartie en termes de niveau de production agricole (Verret et al., 2017). L'étude des mélanges de Cultures Intercalaires Multiservices (CIMS) et de leur complémentarité pour la fourniture de multiples services - liés au cycle de l'azote, à la protection physique des sols, au stockage du carbone et au contrôle des adventices - est prometteuse en termes d'application (Justes et Richard, 2017). La diversification spatiale et temporelle des couverts, capable de défavoriser les bioagresseurs et de promouvoir leur contrôle biologique (Dassou et Tixier, 2016) est aussi un levier important à considérer. D'autres travaux ont cherché à identifier des itinéraires techniques et des successions de cultures permettant d'atteindre les meilleurs compromis dans la fourniture de services écosystémiques. C'est le cas du projet MACSI (Gary et al., 2018) qui a développé une méthode de conception de systèmes agricoles fournisseurs de services attendus par les acteurs locaux et l'a appliquée à des cas d'études contrastés en contextes tempérés et tropicaux. Cette initiative a notamment mis en évidence que certaines successions de culture, diversifiées et à faible niveau d'usage d'herbicides, permettent de contrôler l'abondance des adventices tout en augmentant leur diversité. Elle montre aussi qu'un haut niveau d'agrobiodiversité peut coïncider avec des rendements élevés et un faible usage de pesticides.

La création ou la gestion d'habitats linéaires existant en bordure de parcelles constitue une deuxième option, complémentaire de la précédente, pour augmenter la biodiversité de l'agroécosystème et fournir des services d'intérêt en agriculture. Ces habitats fournissent des ressources supplémentaires ou complémentaires pour de nombreux organismes auxiliaires (prédateurs, parasitoïdes) qui entrent dans la parcelle cultivée à certaines périodes de l'année par un effet de débordement (Landis et al., 2000). Les bordures pérennes (haies, bordure herbacée) sont donc intéressantes pour le contrôle biologique et la pollinisation, pourvu que leur composition floristique soit adéquate. De nouvelles infrastructures

agroécologiques peuvent aussi être implantées. Les bandes enherbées (mélange de monocotylédones) peuvent offrir des sites d'hivernation à de nombreux insectes. Les bandes fleuries (mélange de dicotylédones) fournissent des ressources florales (nectar, pollen) à des parasitoïdes et pollinisateurs. Là encore, le choix des espèces végétales implantées, et leur complémentarité en termes de fonctions, vont être déterminantes pour leur rôle (Holland et al., 2016). Le projet R&D Muscari (Warlop et al., 2018) propose aux gestionnaires des mélanges pour bandes fleuries, en fonction des objectifs visés.

Le troisième niveau est celui du paysage, qui peut être vu comme une mosaïque changeante de couverts cultivés et semi-naturels. La diversité de ces couverts est un facteur majeur pour expliquer le niveau de biodiversité d'un paysage et la simplification importante des mosaïques agricoles a été identifiée comme une cause majeure du déclin de services comme le contrôle biologique des bioagresseurs (Oliver et al., 2015). La proportion d'habitats semi-naturels, la diversité des couverts cultivés mais aussi les caractéristiques de leur gestion agricole (niveau de pression phytosanitaire, régime de travail du sol) sont autant de facteurs qui interagissent de façon complexe pour déterminer l'intensité du contrôle biologique (Begg et al., 2017 ; Petit et al., 2017) ou de la pollinisation (Kennedy et al., 2013). Un suivi biologique et agronomique de réseaux de paysage sur le long terme (par exemple en France le réseau national SEBIOPAG <http://sebiopag.inra.fr>) permet de mieux appréhender ces relations complexes. Le recours à la modélisation spatialisée est aussi une option pour ces échelles larges auxquelles il est très difficile d'expérimenter. Des travaux de modélisation ont notamment permis d'analyser les effets de scénarios de changements de composition et d'agencements de couverts cultivés sur des compartiments de biodiversité (Ricci et al., 2018) ou sur le caractère suppressif de paysages pour des maladies (Papaix et al., 2018). Ils doivent se poursuivre en intégrant une large gamme de processus biotiques et abiotiques et d'activités de gestion, et leurs interactions, de manière à matérialiser la notion de multifonctionnalité d'un paysage (Vinatier et al., 2016). La recherche doit ici aider à renforcer la mobilisation de leviers paysagers et territoriaux pour la fourniture de services écosystémiques.

4. Mise en œuvre opérationnelle de systèmes agroécologiques

Un des défis majeurs en agroécologie est de concevoir et évaluer des systèmes agroécologiques basés sur la biodiversité. Il s'agit de démontrer que l'on peut miser sur la biodiversité (planifiée et associée) pilotée par des pratiques cohérentes, à différentes échelles, pour obtenir des systèmes agricoles durables et multi-performants.

4.1 Modéliser le fonctionnement d'agroécosystèmes jusqu'à la fourniture de services écosystémiques

Des outils de modélisation ont été développés qui simulent de façon détaillée l'effet des systèmes de culture sur le long terme sur les composantes biologiques de l'agroécosystème. A titre d'illustration, le modèle FLORSYS (Colbach et al., 2014, 2017) simule la dynamique pluriannuelle d'une flore adventice plurispécifique et les interactions avec les plantes cultivées au niveau d'un îlot de parcelles et habitats semi-naturels, en fonction des systèmes de culture et des conditions pédoclimatiques. FLORSYS analyse ensuite l'impact de la flore adventice sur la production agricole, la biodiversité et l'environnement (Mézière et al., 2015). Il considère plusieurs types d'interactions (plante-plante, plante-parasite, plante-champignon, plante-prédateur) et de services écosystémiques. Un avantage majeur de cet outil est qu'il contribue à l'évaluation de systèmes de cultures actuellement en place mais aussi à la conception de systèmes 'virtuels', jamais expérimentés, en autorisant une simulation ex-ante de scénarios de systèmes de cultures. Cette double capacité de conception et d'évaluation en fait un outil opérationnel pour identifier des systèmes de cultures agroécologiques 'candidats' dans différents contextes de production.

4.2 Expérimenter des systèmes basés sur la biodiversité

L'expérimentation de systèmes de culture est utilisée depuis longtemps en agronomie pour évaluer la performance de certaines combinaisons de pratiques, pour un service particulier ou sur plusieurs critères simultanément. La conception et l'évaluation de systèmes basés sur la biodiversité adopte la même approche 'systémique' mais elle s'en différencie car le pilotage de la biodiversité planifiée devient un déterminant majeur de la performance du système. Par ailleurs, comme évoqué précédemment, les systèmes basés sur la biodiversité peuvent mobiliser des leviers à des échelles spatiales plus larges que la parcelle, en considérant notamment les éléments semi-naturels bordant l'espace de production ainsi que l'agencement spatial et temporel entre les différents éléments de la mosaïque, cultivés ou non. Il s'agit donc de concevoir et d'évaluer les effets combinés de systèmes agricoles cohérents à des échelles spatiales emboîtées.

Dans cette section, nous présentons deux initiatives d'expérimentations de systèmes basés sur la biodiversité, le premier en grandes cultures et le second en production horticole. Ces expérimentations partagent la même ambition de concevoir et d'évaluer des systèmes basés sur la biodiversité, d'étudier l'évolution du fonctionnement de l'agroécosystème, et de développer et renouveler les méthodes expérimentales pour produire des connaissances en agroécologie. Les deux initiatives placent la biodiversité planifiée au centre de systèmes conduits sans pesticides en faisant le pari que l'accroissement de la biodiversité planifiée (et ainsi de la biodiversité associée) permettra la fourniture de services, dont la régulation des bioagresseurs. Elles accordent aussi une importance particulière à l'agencement spatial du système, à différentes échelles spatiales. Les systèmes testés ont dans les deux cas fait l'objet d'une co-construction avec des acteurs locaux. Les deux expérimentations ont été mises en place en 2018 aussi nous nous limiterons ici à en présenter les caractéristiques.

La plateforme CA-SYS (<https://www6.inra.fr/plateforme-casys>) s'est développée sur l'UE INRA Epoisses dans la plaine de Dijon sur des systèmes de grandes cultures. CA-SYS teste sur 120ha une diversité de systèmes agro-écologiques en semi-direct ou avec travail du sol limité (Cordeau et al., 2015). Ces systèmes sont des rotations longues et diversifiées, et mobilisent des associations végétales. Aux échelles supra-parcellaires, des infrastructures paysagères (bandes enherbées, bandes fleuries, quelques haies) ont été implantées en densité importante sur l'exploitation afin de renforcer la régulation des bioagresseurs (Figure 4). L'agencement spatial des parcelles de différents systèmes a été organisé en trois zones (Figure 4, semi-direct, travail du sol possible, zone mixte) de façon à analyser la possible complémentarité entre conduites de systèmes.

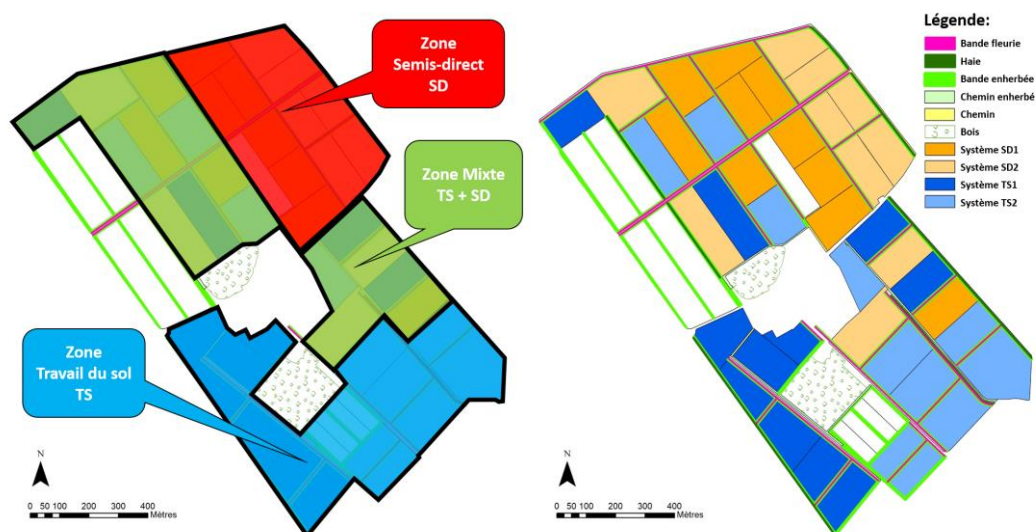


Figure 4 : Agencement spatial des infrastructures paysagères et des systèmes de culture sur la plateforme CA-SYS (d'après Cordeau et al., 2015).

L'Unité Expérimentale INRA de Gotheron (Drôme) propose un verger expérimental réinventé avec une densification et une diversification de la production pour limiter la diminution de rendement à l'échelle du verger. Plusieurs scénarios d'agencement spatial des espèces à associer aux pommiers ont été définis, dont l'un propose une organisation circulaire concentrique de différentes espèces fruitières et variétés de pommes ainsi que d'infrastructures abritant des plantes pièges, répulsives, ressources pour les auxiliaires s'attaquant aux nombreux ravageurs (Figure 5 ; Simon et al., 2018).

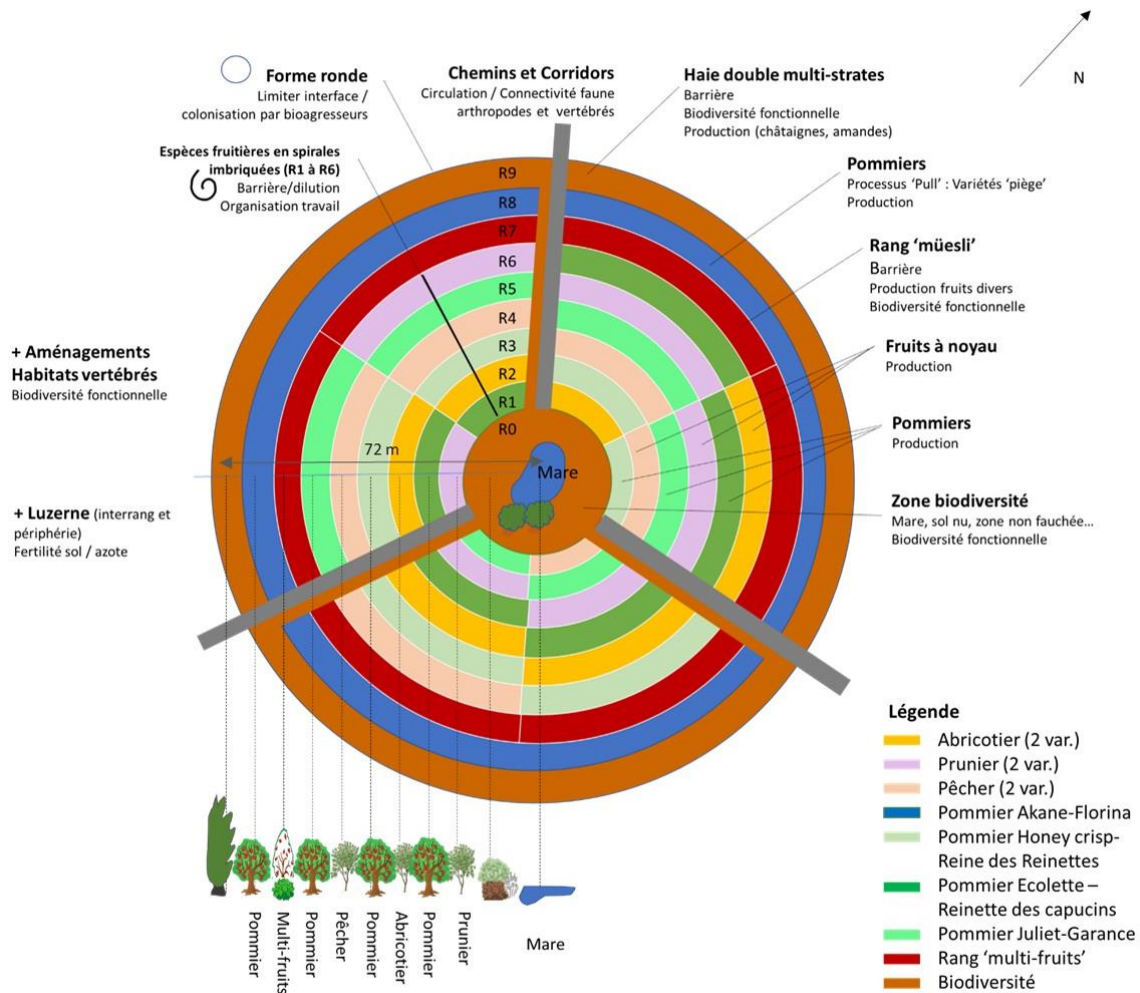


Figure 5 : Organisation spatiale d'espèces et variétés fruitières dans le verger de Gotheron (d'après Simon et al., 2018).

Conclusions

Ces dernières années, les connaissances scientifiques sur la biodiversité planifiée et associée des espaces agricoles ont nettement progressé. La caractérisation de la biodiversité s'est perfectionnée grâce aux outils modernes de la biologie moléculaire, mais les chercheurs sont allés au-delà en accroissant les connaissances sur les liens entre les communautés ou les réseaux d'interactions biotiques et les fonctions d'auto-entretien, de support, et de régulation des écosystèmes cultivés. Ils ont suivi en cela un mouvement général de la biologie qui passe de la description à la prédiction. Le concept de service écosystémique et la notion de bouquets de services ont largement aidé à finaliser les rôles de la biodiversité et des travaux novateurs sur le lien entre biodiversité et services écosystémiques ont été conduits à différentes échelles. Plus avant, des principes de pilotage de la

biodiversité pour la fourniture de services multiples sont disponibles et mis en œuvre opérationnellement dans quelques cas d'étude pionniers, au travers de modèles de conception et d'évaluation, et d'expérimentations novatrices.

En cette période où l'érosion de la biodiversité s'accroît à l'échelle planétaire, il est plus que jamais nécessaire de remettre la biodiversité au cœur du fonctionnement des agroécosystèmes afin de les rendre plus durables. L'installation, à plusieurs échelles, d'une biodiversité planifiée efficace au sens de ses rôles directs et de sa capacité à favoriser une biodiversité sauvage assurant des fonctions essentielles, est un levier très spécifique aux agroécosystèmes qui pose nombre de défis passionnants à la recherche et au développement. Sachant l'urgence de trouver des solutions ou des principes adaptables à chaque contexte, un enjeu majeur sera de renforcer la coopération entre différents acteurs et de combiner savoirs locaux, technologies modernes et connaissances scientifiques pour la conception d'agroécosystèmes basés sur la biodiversité (Tixier-Boichard et Lescourret, 2015).

Remerciements

Les auteurs remercient les métaprogrammes SMaCH et EcoServ de l'INRA dont les animations et actions ont permis le développement de la réflexion autour de l'émergence de systèmes agroécologiques et sur les liens entre biodiversité et services des agroécosystèmes.

Références bibliographiques

- Barot S., Allard V., Cantarel A., Enjalbert J., Gauffreteau A., Goldringer I., Lata J.C., Le Roux X., Niboyet A., Porcher E., 2017. Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. *Agronomy for Sustainable Development*, 37 (2).
- Begg G.S., Cook S., Dye M., Ferrante M., Frank P., Lavigne C., Lövei G., Pell J., Petit S., Quesada N., Ricci B., Birch N.E., 2017. A functional overview of conservation biological control. *Crop Protection* 97, 145-158.
- Bohan D.A., Raybould A., Mulder C., Woodward G., Tamaddoni-Nezhad A., Bluthgen N., Pocock M.J.O., Muggleton S., Evans D.M., Astegiano J., Massol F., Loeuille N., Petit S., Macfadyen S., 2013. Networking Agroecology: Integrating the Diversity of Agroecosystem Interactions. In: *Advances in Ecological Research*, Vol 49: Ecological Networks in an Agricultural World (Woodward G., Bohan D.A., Eds), 1-67.
- Bohan D.A., Vacher C., Tamaddoni-Nezhad A., Raybould A., Dumbrell A.J., Woodward G., 2017. Next-Generation Global Biomonitoring: Large-scale, Automated Reconstruction of Ecological Networks. *Trends in Ecology & Evolution*, 32 (7), 477-487.
- Bommarco R., Kleijn D., Potts S.G., 2013. Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution*, 28 (4), 230-238.
- Cardinale B.J., Duffy J.E., Gonzalez A., Hooper D.U., Perrings C., Venail P., Narwani A., Mace G.M., Tilman D., Wardle D.A., Kinzig A.P., Daily G.C., Loreau M., Grace J.B., Larigauderie A., Srivastava D.S., Naeem S., 2012. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 486 (7401), 59-67.
- Chemidlin Prévost-Bouré N., Cannavacciuolo M., D'Oiron-Verame E., Villenave C., Cluzeau D., Riou V., Mulliez P., Maron P.A., Ranjard L., 2018. Appréhender l'impact des pratiques agricoles sur l'état biologique et le fonctionnement du sol. Quelles recommandations et pistes de R&D en matière de pilotage biologique des sols ? *Innovations Agronomiques* 69, 39-46.
- Colbach N., Biju-Duval L., Gardarin A., Granger S., Guyot S., Mézière D., Munier-Jolain N.M., Petit, S., 2014. The role of models for multicriteria evaluation and multiobjective design of cropping systems for managing weeds. *Weed Research* 54, 541-555.
- Colbach N., Colas F., Pointurier O., Queyrel W., Villerd J., 2017. A methodology for multi-objective cropping system design based on simulations. Application to weed management. *European Journal of Agronomy*, 87, 59-73.

- Cordeau S., Deytieux V., Lemanceau P., Marget P., 2015. Towards the establishment of an experimental research unit on Agroecology in France. *Aspects of Applied Biology* 128: Valuing Long-Term sites and Experiments for Agriculture and Ecology, 271-273.
- Damour G., Dorel M., Quoc H.T., Meynard C., Risede J.M., 2014. A trait-based characterization of cover plants to assess their potential to provide a set of ecological services in banana cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 52, 218-228.
- Dassou A.G., Tixier P., 2016. Response of pest control by generalist predators to local-scale plant diversity: a meta-analysis. *Ecology & Evolution*.25, 1143-53.
- Dore T., Makowski D., Malezieux E., Munier-Jolain N., Tchamitchian M., Tiftonell P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy*, 34 (4), 197-210.
- 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., 2015. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 1-23.
- Felipe-Lucia M.R., Comin F.A., 2015. Ecosystem services-biodiversity relationships depend on land use type in floodplain agroecosystems. *Land Use Policy*, 46, 201-210.
- Fried G., Kazakou E., Gaba S., 2012. Trajectories of weed communities explained by traits associated with species' response to management practices. *Agr. Ecosyst. Environ.* 158, 147-155.
- Gaba S., Lescourret F., Boudsocq S., Enjalbert J., Hinsinger P., Journet E.P., Navas M.L., Wery J., Louarn G., Malezieux E., Pelzer E., Prudent M., Ozier-Lafontaine H., 2015. Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services: from concepts to design. *Agronomy for Sustainable Development*, 35 (2), 607-623.
- Gary C. et al., 2018. Mobilisons l'Analyse des Compromis entre Services écosystémiques pour l'Ingénierie agroécologique des systèmes agricoles et forestiers (MACSI). Compte-rendu de projet financé par le MP EcoServ. <http://2025.inra.fr/3perf/Billets/FM2018-EcoServ-Modelisation-MACSI-contribution-a-3Perf-1-et-Climat-3>
- Holland J.M., Bianchi F.J.J.A., Entling M.H., Moonen A.-C., Smith B.M., Jeanneret P., 2016. Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest Management Science*, 72: 1638-1651.
- Justes E., Richard G., 2017 Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. *Innovations Agronomiques* 62, 1-15.
- Karp D.S. et al., 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *PNAS* 115 (33) <https://doi.org/10.1073/pnas.1800042115>
- Kennedy C.M., Lonsdorf E., Neel M.C., Williams N.M., Ricketts T.H., Winfree R., Bommarco R., Brittain C., Burley A.L., Cariveau D., Carvalho L.G., Chacoff N.P., Cunningham S.A., Danforth B.N., Dudenhofer J.H., Elle E., Gaines H.R., Garibaldi L.A., Gratton C., Holzschuh A., Isaacs R., Javorek S.K., Jha S., Klein A.M., Kremen K., Mandelik Y., Mayfield M.M., Morandin L., Neame L.A., Otieno M., Park M., Potts S.G., Rundlof M., Saez A., Steffan-Dewenter I., Taki H., Viana B.F., Westphal C., Wilson J.K., Greenleaf S.S., Kremen C., 2013. A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecology Letters*, 16 (5), 584-599.
- Landis D.A., Wratten S.D., Gurr G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* 45, 175-201.
- Litrico I., Violle C., 2015. Diversity in Plant Breeding A New Conceptual Framework. *Trends in Plant Science*, 20 (10), 604-613.
- Mézière D., Petit, S., Granger S., Biju-Duval L., Colbach N., 2015. Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* 48, 157-170.
- Monod H., Gascuel-Oudou C., Lescourret F., Roques L., Bohan D., Costes E., Courtois P., Fabre F., Faverdin P., Franc A., Hoch T., Phocas F., Steyer J.P., Tchamitchian M., 2018. Modèles en agroécologie : état et perspectives à l'Inra. Modélisation des interactions biotiques, en lien avec des dynamiques abiotiques, sociales et économiques : contribution à la représentation de la cascade pratiques agricoles - biodiversité - fonctions et services écosystémiques des agroécosystèmes, 51 pp.

- Morriën E., Hannula S.E., Snoek L.B., Helmsing N.R., Zweers H., de Hollander M., Soto R.L., Bouffaud M.-L., Buée M., Dimmers W., Duyts H., Geisen S., Girlanda M., Griffiths R.I., Jørgensen H.-B., Jensen J., Plassart P., Redecker D., Schmelz R.M., Schmidt O., Thomson B.C., Tisserant E., Uroz S., Winding A., Bailey M.J., Bonkowski M., Faber J.H., Martin F., Lemanceau P., de Boer W., van Veen J.A., van der Putten W.H., 2017. Soil networks become more connected and take up more carbon as nature restoration progresses. *Nat. Commun.* 8:art. 14349
- Oliver T.H., Isaac N.J.B., August T.A., Woodcock B.A., Roy D.B., Bullock J.M., 2015. Declining resilience of ecosystem functions under biodiversity loss. *Nature Communication* 6, 10122 doi: 10.1038/ncomms10122 (2015).
- Papaix J., Rimbaud L., Burdon J.J., Zhan J., Thrall P.H., 2018. Differential impact of landscape-scale strategies for crop cultivar deployment on disease dynamics, resistance durability and long-term evolutionary control. *Evol. Appl.*, 11, 705–717.
- Petit S., Munier-Jolain N.M., Bretagnolle V., Bockstaller C., Gaba S., Mézière D., Colbach N., 2015. Ecological intensification through pesticide reduction: weed control, weed biodiversity and sustainability in arable farming. *Environmental Management* 56, 1078-1090.
- Petit S., Trichard A., Biju-Duval L., McLaughlin O., Bohan D. A., 2017. Interactions between conservation agricultural practice and landscape composition promote weed seed predation by invertebrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 240, 45–53.
- Petit S., Cordeau S., Chauvel B., Bohan D., Guillemain J.P., Steinberg C., 2018. Biodiversity-based options for arable weed management. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38 (5).
- Pocock M.J., Evans D.M., Memmott J., 2012. The robustness and restoration of a network of ecological networks. *Science*; 335(6071):973-7. doi: 10.1126/science.1214915.
- Perrot T., Gaba S., Roncoroni M., Gautier J.L., Bretagnolle V., 2018. Bees increase oilseed rape yield under real field conditions. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 266, 39-48.
- Pommier T., Cantarel A.a.M., Grigulis K., Lavorel S., Legay N., Baxendale C., Bardgett R.D., Bahn M., Poly F., Clement J.C., 2018. The added value of including key microbial traits to determine nitrogen-related ecosystem services in managed grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 55 (1), 49-58.
- Raitif J., Plantegenest M., Roussel J.-M., 2019. From stream to land: Ecosystem services provided by stream insects to agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 270-271, 32-40.
- Ranjard L., Dequiedt S., Prevost-Boure N.C., Thioulouse J., Saby N.P.A., Lelievre M., Maron P.A., Morin F.E.R., Bispo A., Jolivet C., Arrouays D., Lemanceau P., 2013. Turnover of soil bacterial diversity driven by wide-scale environmental heterogeneity. *Nature Communications*, 4.
- Reboud X., Malézieux E., 2015. Vers une agroécologie biodiverse : enjeux et principaux concepts mobilisés. *Innovations Agronomiques* 43, 1-6.
- Ricci B., Petit S., Allanic C., Langot M., Parisey N., Poggi, S., 2018. How much can a large landscape-scale planning reduce local weed infestations? A landscape-scale modelling approach. *Ecological Modelling* 384, 221-232.
- Simon S., et al., 2018. Systèmes Agroécologiques en Production Fruitière : Innovation et Reconception. *Compte-rendu de projet financé par le MP EcoServ.*
- Tibi A., Théron O., 2018. Services écosystémiques fournis par les espaces agricoles. *Evaluer et caractériser.* Editions Quae, Versailles.
- Tittonell P., 2014. Ecological intensification of agriculture - sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, 53-61.
- Tixier-Boichard M., Lescourret F., 2015. Mieux utiliser la biodiversité pour réussir la transition agro-écologique : une synthèse de l'atelier 'Utiliser la biodiversité'. *Innovations Agronomiques*, 43, 41-50.
- Verret V., Gardarin A., Pelzer E., Mediene S., Makowski D., Valantin-Morison M., 2017. Can legume companion plants control weeds without decreasing crop yield? A meta-analysis. *Field Crops Research*, 204, 158-168.
- Vinatier F., Lagacherie P., Voltz M., Petit S., Lavigne C., Brunet Y., Lescourret F., 2016. An Unified Framework to Integrate Biotic, Abiotic Processes and Human Activities in Spatially Explicit Models of Agricultural Landscapes. *Frontiers in Environmental Science*, 4.

Violle C., Navas M.L., Vile D., Kazakou E., Fortunel C., Hummel I., Garnier E., 2007. Let the concept of trait be functional ! *Oikos* 116 (5), 882-892.

Warlop F., et al., 2018. Le projet MUSCARI. Mélanges Utiles aux Systèmes de Cultures et Auxiliaires pour favoriser une Réduction des Intrants. <https://wiki.itab-lab.fr/muscari/>

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).