



**HAL**  
open science

## Gestion des ravageurs des cultures en ACS

Jean-Pierre Sarthou, Antoine Gardarin, Cécile Waligora, Éric Blanchart

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Sarthou, Antoine Gardarin, Cécile Waligora, Éric Blanchart. Gestion des ravageurs des cultures en ACS. Stéphane Cordeau; Pierre-Alain Maron; Jean-Pierre Sarthou; Bruno Chauvel. L'agriculture de conservation des sols, Quae, 2024, 9782759235667. hal-04660597

**HAL Id: hal-04660597**

**<https://agroparistech.hal.science/hal-04660597v1>**

Submitted on 24 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Chapitre 10

## Gestion des ravageurs des cultures en ACS

Jean-Pierre Sarthou<sup>1</sup>, Antoine Gardarin<sup>2</sup>, Cécile Waligora<sup>3</sup>, Éric Blanchart<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Toulouse INP-ENSAT, INRAE, UMR AGIR, Av. de l'Agrobiopole, 31326 Castanet-Tolosan cedex - France

<sup>2</sup> Agronomie, INRAE, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Thiverval-Grignon 78850, France

<sup>3</sup> Revue TCS (Techniques culturales simplifiées)

<sup>4</sup> IRD, UMR Eco&Sols (Montpellier SupAgro, CIRAD, INRA, IRD), 2 place Pierre Viala, 34060, Montpellier Cedex 2, France

### 1. Introduction

Chaque année, entre 35 et 42% de la production agricole potentielle mondiale sont détruits par des bioagresseurs, majoritairement au champ, ce qui représente une valeur économique totale estimée à 2000 milliards de dollars (Pimentel, 1997). Au-delà de leurs limites environnementales et toxicologiques, les produits phytosanitaires présentent aussi potentiellement des limites agronomiques, avec l'apparition, chez les organismes cibles, de résistances à une ou plusieurs molécules herbicides, fongicides ou insecticides/acaricides. Ainsi, il est aujourd'hui dénombré au niveau mondial plus de 400 espèces d'arthropodes ayant développé au moins une population devenue résistante à au moins une substance active d'insecticides (Whalon *et al.*, 2008). Il est donc aujourd'hui devenu essentiel de mettre en place des systèmes de culture moins dépendants des produits phytosanitaires.

Il n'est plus rare aujourd'hui d'entendre des agriculteurs en ACS évoquer une moindre pression en ravageurs sur leurs cultures, mais cela est-il corroboré par la littérature scientifique ? Ce chapitre se propose de faire le point sur les connaissances en termes de comportement des populations de ravageurs et de leurs ennemis naturels en regard de certaines variables environnementales et dans les systèmes ACS, en mettant l'accent sur les régulations biologiques favorisées par ces derniers.

### 2. Fonctions exercées et services rendus par la faune dans les agroécosystèmes

#### 2.1. Vertébrés

La faune vertébrée des agroécosystèmes métropolitains, dite parfois « faune ordinaire », est riche de nombreux taxons : mammifères, oiseaux, reptiles ou encore batraciens et poissons lorsque des biotopes humides ou aquatiques ont été maintenus au sein des exploitations. La faune ordinaire des campagnes regroupe des herbivores, des

carnivores mais aussi des omnivores ou encore des animaux consommant de la matière organique morte, avec des détritivores, des coprophages et des nécrophages. Divers services écosystémiques sont apportés par cette faune vertébrée. Certains participent à la dissémination de pollens ou de graines quand d'autres consomment des arthropodes ravageurs de cultures (Lindell *et al.*, 2018). C'est le cas des chauves-souris dont le service de régulation des ravageurs a été estimé, annuellement, à près de 23 milliards US\$ en Amérique du Nord (Boyles *et al.*, 2011). Les hérissons quant à eux limitent les populations de limaces, dès lors qu'ils ont des gîtes autour des parcelles. Dans une revue bibliographique, Lindell *et al.* (2018) soulignent le potentiel d'augmentation de la régulation naturelle des ravageurs des cultures par des vertébrés, via l'amélioration de la qualité d'accueil des agroécosystèmes pour cette faune de vertébrés (habitats semi-naturels, nids, gîtes...).

*A contrario*, certains vertébrés occasionnent des disservices ou dégâts aux cultures, tels les campagnols, et notamment, en France métropolitaine, le campagnol des champs (*Microtus arvalis*, plutôt en grandes cultures), le campagnol terrestre (*Arvicola amphibius*, davantage inféodé aux milieux prairiaux) et le campagnol provençal (*Microtus duodecimcostatus*, redouté en cultures fruitières). De nombreux prédateurs consomment ces micromammifères : des spécialistes comme les petits mustélidés (belette et hermine), le faucon crécerelle, les chouettes ou les busards, jusqu'aux généralistes comme les renards, buses, hérons, grandes aigrettes, voire sangliers (Waligora, 2019).



**Figure 9.1.** L'hermine est un prédateur redoutable de campagnols qu'elle va chasser dans leurs galeries. Il est assez simple de favoriser la présence de ce mustélidé, tout comme celle de la belette : pas de perturbation du sol, couvert végétal et abris en périphérie de parcelle sous forme de tas de bois ou de pierres (© P. Grand).

## 2.2. Invertébrés

Les invertébrés assurent dans les agroécosystèmes des fonctions écologiques primordiales : consommation primaire, par les organismes phytophages dont les ravageurs des cultures ; consommations secondaire et tertiaire, par les prédateurs, super-prédateurs, parasitoïdes et hyper-parasitoïdes ; mutualisme par les organismes floricoles obligatoires et facultatifs ; recyclage des nutriments par les organismes saprophytes

acteurs de la décomposition des organismes morts et des flux d'énergie et de nutriments (Cock *et al.*, 2011). Ils sont ainsi à l'origine de services écosystémiques majeurs en agriculture comme le contrôle biologique des ravageurs des cultures, la pollinisation des plantes entomophiles et le recyclage de la matière organique morte, services dont la valeur économique globale est estimée aux alentours de 100, 200 et 760 milliards de dollars, respectivement (Pimentel *et al.*, 1997). Dans les agroécosystèmes, ils sont également à l'origine de disservices, soit les dommages occasionnés aux plantes et aux animaux domestiques. Au niveau mondial, on estime que les invertébrés ravageurs des plantes cultivées génèrent chaque année une perte de 18 à 20% de la production potentielle, soit une perte économique de plus de 400 milliards d'euros (Sharma *et al.*, 2017).

Les invertébrés phytophages comptent quelque 9 000 espèces d'insectes et d'acariens (Pimentel, 2009), 23 000 espèces de gastéropodes (dont plus de 90% sont phytophages mais moins de 20 espèces causent en France des dégâts sérieux aux cultures), et 2 500 espèces de nématodes phytoparasites dont moins de 10% sont des ravageurs de premier plan (Whitehead, 1998). Parmi les insectes, 1% seulement des espèces sont des bioagresseurs pour l'Homme, ses cultures ou ses animaux, toutes les autres sont neutres ou bénéfiques (Grimaldi et Engel, 2005).

### **3. Les conditions écologiques induites par l'ACS**

Le sol est un écosystème composite et multifonctionnel dont dépendent les performances des systèmes de culture, et dans le fonctionnement duquel les organismes telluriques, en interaction avec les variables abiotiques, jouent un rôle majeur (Wardle *et al.*, 2004). Ces activités biologiques sont essentielles aux processus écologiques de recyclage de la matière organique, afin d'immobiliser ou de libérer les nutriments du sol, de stabiliser la structure du sol via la formation d'agrégats, et de permettre la croissance des plantes (García-Palacios *et al.*, 2013) (Kibblewhite *et al.*, 2008). L'application des trois principes de l'ACS (diversification des espèces végétales cultivées dans l'espace et dans le temps, sol toujours couvert par des plantes maîtrisées et leurs résidus, non travail du sol) modifie les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol, en les rapprochant de celles des sols très peu anthropisés (Blumberg et Crossley, 1983), propriétés caractéristiques ou proches de la « santé des sols » (Kumar *et al.*, 2016 ; Pheap *et al.*, 2019). Ce changement d'état du sol sous l'effet des principes conjugués de l'ACS a plusieurs conséquences importantes pour les organismes telluriques, dont l'installation d'espèces normalement absentes des sols cultivés et pouvant assurer des fonctions déterminantes voire nouvelles (Bartz *et al.*, 2013 ; Blanchart *et al.*, 2007). La première conséquence directe, tout à fait fondamentale, est la préservation quantitative de la ressource sol, donc de l'habitat des organismes telluriques, grâce à la diminution drastique des érosions hydrique et éolienne (Reicosky et Crovetto, 2014). Une autre conséquence majeure qui influence fortement la vie du sol est le recyclage sur place d'une grande quantité de matière organique fraîche, essentiellement des résidus de culture, ce qui modifie toutes les propriétés du sol, en interaction les unes avec les autres : physiques, avec une meilleure stabilité structurale des agrégats (qui diminue le risque de battance et donc d'érosion), une continuité porale plus importante (qui améliore la pénétration et la circulation de l'eau et de l'air dans le profil du sol), une meilleure régulation thermique, une capacité de rétention en eau accrue du fait d'une mésoporosité augmentée car partiellement créée surtout par les hyphes mycéliens ; chimiques, avec une meilleure homéostasie électrochimique (pH, Eh), une meilleure capacité d'échange cationique, une augmentation du taux de saturation de



cette dernière, une plus grande disponibilité des nutriments, etc. ; biologiques, avec une augmentation de la diversité spécifique des communautés telluriques, de la biodiversité fonctionnelle et donc du potentiel de régulation biologique des ravageurs et maladies du sol (Basche *et al.*, 2016 ; Henneron *et al.*, 2015 ; Husson et Uphoff, sous-pression ; Verhulst *et al.*, 2010). Les diverses propriétés du sol ainsi améliorées conduisent à la fois à une amélioration des performances de croissance et à une meilleure santé des plantes (Reeve *et al.*, 2016). Enfin, le non travail du sol entraîne la présence à la surface du sol de nombreuses graines d'adventices qui représentent alors une ressource trophique pour de nombreuses espèces de vertébrés (oiseaux, campagnols) et d'invertébrés (insectes, annélides).

#### **4. Réponse d'invertébrés et de vertébrés ravageurs ou auxiliaires des cultures, aux effets des principes de l'ACS**

Le non travail du sol comme composante de l'ACS, influence les invertébrés telluriques et certains vertébrés de trois façons : par l'absence de destruction mécanique de leur habitat ou lieu d'alimentation, par le maintien des résidus de culture à la surface du sol, et par la présence d'une couverture végétale continue composée d'espèces semées comme spontanées (Stinner et House, 1990). La diversification culturelle dans le temps et dans l'espace influence elle aussi fortement la faune vertébrée et invertébrée.

##### **4.1. Importance du sol en tant qu'habitat et lieu d'alimentation**

La pratique du labour non seulement expose limaces, larves de hannetons ou « vers blancs » et larves de taupins ou « larves fil de fer », à leurs ennemis naturels, mais, réalisée pendant des épisodes météorologiques marqués par le gel en hiver ou par la sécheresse en été, constitue un moyen de contrôle bien connu et efficace de ces ravageurs du sol. De ce fait, l'abandon du travail du sol génère encore de fortes craintes par rapport au risque de développement de ces derniers, particulièrement en culture de maïs. Aux Etats-Unis, où les premières recherches comparatives entre systèmes avec labour et systèmes en semis direct sur cette question ont été menées dès le développement commercial du 'no-till' dans les années 1960, il a été montré que la chrysome des racines du maïs *Diabrotica longicornis* pondait en effet trois fois plus d'œufs en non travail du sol qu'en système labouré. Toutefois, il s'est avéré que la survie de ces derniers et les dégâts occasionnés par les larves étaient identiques voire significativement moindres en systèmes de semis direct (Musick et Collins, 1971). Des observations similaires ont été faites au Brésil, dans la région du Cerrados, où les « vers blancs » (larves de Scarabéidés) se développent fortement après l'arrêt du travail du sol mais sans conséquence pour la culture (Blanchart *et al.*, 2007). Si l'absence de travail du sol préserve certains ravageurs telluriques, il en est de même en réalité pour leurs ennemis naturels et pour l'ensemble de la faune du sol (Henneron *et al.*, 2015). Par exemple, en culture de colza, les micro-hyménoptères parasitoïdes des méligèthes, des grosses altises et de plusieurs espèces de charançons, passent neuf mois dans le sol (du mois de mai de l'année n du colza, au printemps de l'année n+1) et sont ainsi très sensibles aux opérations mécaniques réalisées après la récolte, avec quatre fois moins d'émergences de parasitoïdes dès que le sol est travaillé pour la culture suivante (Nilsen, 1985). De manière générale, la méta-analyse de Rowen *et al.* (2020) montre que les arthropodes prédateurs sont plus abondants et que leurs communautés sont plus équilibrées (équitabilité des espèces plus élevée) en absence de travail du sol. Il en résulte un potentiel de régulation des ravageurs du sol plus important, compensant globalement l'absence de contrôle via les opérations mécaniques, et se traduisant par

des abondances de ravageurs globalement analogues entre systèmes avec et sans travail du sol.

Les chauves-souris illustrent parfaitement les liens trophiques unissant invertébrés et vertébrés. Plusieurs de leurs espèces sont favorisées par des systèmes de culture sans travail du sol, surtout s'ils intègrent des couverts végétaux en interculture pour limiter les herbicides (Barré *et al.*, 2018a). Les campagnols, commun (*Microtus arvalis*) et terrestre (ou rat-taupier, *Arvicola amphibius*), voient quant à eux dans le non labour, et surtout en systèmes de semis direct sous couvert, des conditions idéales de non perturbation de leur habitat. C'est pourquoi, en système conventionnel, le labour fait partie des outils conseillés pour contrôler le développement de ces ravageurs. En systèmes de techniques culturales simplifiées, un léger grattage de surface (herse) peut néanmoins se révéler efficace, mais sur une courte durée. Comme pour les invertébrés, si la non perturbation mécanique du sol profite aux campagnols, elle profite aussi à leurs prédateurs les plus adaptés à la chasse souterraine que sont les belettes et les hermines, et contribue ainsi très probablement à leur régulation naturelle (absence de données scientifiques sur cette question).

#### 4.2. Influence du devenir des résidus de culture

Les résidus de culture laissés à la surface du sol permettent l'installation d'importantes communautés de saprophages décomposeurs que sont les vers de terre épigés et certains arthropodes (Scarabéidés, collemboles, isopodes), aux dépens des taxons rhizophages (Gobat *et al.*, 2010). Ces décomposeurs constituent la base alimentaire de plusieurs macro-arthropodes prédateurs généralistes vivant en surface du sol, tels que les carabes et staphylins, les araignées et opilions (ou faucheux), dont la présence est initialement conditionnée par l'absence de travail du sol (Kladivko, 2001). Ces prédateurs peuvent naturellement devenir des auxiliaires directs dès lors qu'ils s'attaquent aussi à des invertébrés ravageurs tels que limaces, larves de hannetons, de taupins, de tipules, de noctuelles terricoles... D'autres prédateurs micro-arthropodes, moins sensibles à l'action mécanique du travail du sol de par leur taille moindre, mais bénéficiant eux aussi du non travail du sol par la non destruction de leur habitat, profitent de la décomposition à la surface du sol des résidus de culture et participent aux réseaux trophiques qui en découlent. Ainsi, de nombreux acariens du sol (Prostigmates, Méso-stigmates, Trombidiformes...) mais aussi certains collemboles, sont-ils eux aussi des auxiliaires car prédateurs importants d'œufs et larves de méso- et macro-arthropodes, également de nématodes, dont nombre d'espèces phytophages nuisibles aux cultures (Beaulieu et Weeks, 2007 ; Prischmann *et al.*, 2011).

Le broyage des résidus de culture est parfois conseillé car il détruit l'abri de certains ravageurs comme les foreurs de tige, s'y trouvant au stade larvaire. C'est le cas de la pyrale du maïs *Ostrinia nubilalis* et de la noctuelle du maïs *Sesamia nonagrioides*, dont les chenilles peuvent ainsi être tuées directement ou exposées à leurs prédateurs et parasites (champignons entomopathogènes des genres *Metarhizium* et *Beauveria*, plus aisément infectieux du fait des blessures occasionnées). Néanmoins, l'abandon des résidus à la surface du sol favorise également les limaces, particulièrement la loche grise *Deroceras reticulatum* et la loche noire *Arion hortensis*, ravageurs presque emblématiques de la pratique du semis direct et des couverts végétaux, mais contre lesquels nous verrons au paragraphe 6 que des processus de régulation sont peut-être à l'œuvre en systèmes ACS. Néanmoins, la présence de résidus de culture à la surface du sol ne profite pas automatiquement aux ravageurs. Dès les années 1980, plusieurs auteurs observent en effet, aux Etats-Unis, que les larves de la mouche grise des semis

*Delia platura* sont nettement moins nombreuses en situation de semis direct sur couvert d'hiver ou lorsque ce dernier est enfoui par un labour, que lorsqu'il est semi-enfoui par un travail du sol superficiel (Funderburk *et al.*, 1983). Il est possible que ce dernier détruit non seulement une proportion plus ou moins importante des prédateurs polyphages que sont les carabes, staphylins et araignées, mais également crée, dans les premiers centimètres du sol, des conditions hygrométriques plus favorables au développement des larves que celles rencontrées dans l'essentiel du mulch laissé à la surface (et abritant plus de prédateurs des larves). En plus d'une modification du microclimat, les résidus en surface du sol perturbent la reconnaissance visuelle de la plante hôte par les ravageurs et leur activité dans la parcelle, comme les déplacements et la ponte. On observe ainsi, en automne, une moindre colonisation des céréales par les pucerons (Kennedy *et al.*, 2010) et une moindre activité des altises sur colza (réduite de plus de 60% - (Lundin, 2019) lorsque ces cultures sont semées dans les résidus du précédent cultural.

#### **4.3. Influence d'une continuité de couverture végétale/organique**

La couverture permanente du sol, qu'elle soit réalisée par la culture, les plantes de service associées, les couverts d'interculture, les adventices ou les résidus de ces plantes, fournit en continu des abris et des ressources trophiques pour la faune (Jabbour *et al.*, 2016). Associée à une diversité végétale accrue dans la parcelle, elle entraîne une augmentation de l'abondance et de la diversité des communautés d'arthropodes (Lichtenberg *et al.*, 2017). Par exemple, l'activité-densité des carabes est plus élevée dans des rotations diversifiées permettant une couverture du sol en hiver que dans des rotations de cultures d'été sans couvert en hiver (O'Rourke *et al.*, 2008). En plus de leur fonction de couverture du sol, les plantes fournissent des ressources trophiques. De nombreux invertébrés dépendent de plantes adventices des cultures, dont leurs semences, et sont de ce fait indirectement et négativement impactés par tout travail du sol visant à les détruire (Stinner et House, 1990). Inversement, le non travail du sol favorise des communautés spécifiques d'adventices (Tørresen *et al.*, 2003) et permet à celles-ci de jouer leur rôle de ressource trophique pour les invertébrés phyllophages et granivores (si le cycle des adventices est complet). Les graines d'adventices sont en effet une ressource trophique pour de nombreux vertébrés, essentiellement oiseaux (Robinson et Sutherland, 1999) et micro-rongeurs (Fischer et Türke, 2016). Dans une synthèse bibliographique portant sur 22 espèces d'oiseaux, Holland *et al.* (2006) ont démontré que plusieurs espèces des familles Fringillidés, Emberizidés, Alaudidés, Columbidae et Phasianidés, se nourrissent régulièrement des graines de nombreuses espèces d'adventices, appartenant à plusieurs familles botaniques dont les plus importantes sont les Poacées, Polygonacées, Brassicacées, Astéracées et Chénopodiacées. Par exemple, un couple d'alouette des champs (Alaudidé) consomme environ 3,2 kg de graines d'adventices durant ses 9 mois de présence sur un territoire (6 g/jour/adulte) (Powolny, 2012). Corroborant cela, il a été montré que trois espèces de passereaux (alouette des champs, bruant proyer, bergeronnette printanière), en déclin dans les paysages agricoles français, sont plus abondantes en systèmes ACS qu'en systèmes conventionnels avec labour, la situation la plus défavorable à leurs populations étant celle du seul semis direct sans couvert végétal en interculture, donc avec emploi important d'herbicides (Barré *et al.*, 2018). Précisons que la bergeronnette printanière se nourrit d'insectes et autres invertébrés, eux-mêmes favorisés par une végétation plus abondante et diversifiée. Les Columbidae (pigeons, tourterelles) représentent un autre exemple intéressant. Cette famille se nourrit surtout de graines, au point d'occasionner des dégâts à certaines cultures comme le tournesol, et à l'occasion d'invertébrés. Les

parcelles en ACS leur sont donc favorables de par la présence en moyenne plus importante de graines d'adventices au sol et d'invertébrés. Contrairement à de nombreuses espèces d'oiseaux des campagnes, les Colombidés, particulièrement le pigeon ramier, voient leurs populations augmenter alors que leurs prédateurs naturels sont en déclin.



**Figure 9.2.** Aspect typique de la surface du sol en agriculture de conservation des sols fin août : des plantules de colza, des repousses d'orge qui jaunissent (herbicide), des légumineuses associées (gesse et fenugrec), des adventices (ray-grass), beaucoup de résidus et des turricules de vers de terre (© A. Gardarin).

#### **4.4. Influence de la diversification culturelle dans le temps et dans l'espace**

La diversification culturelle dans le temps, ou allongement de la rotation, constitue un élément fondamental de la protection intégrée des cultures telle que définie par l'IOBC/OILB (1973). De nombreux travaux (*e.g.* Lichtenberg *et al.* 2017 ; Tamburini *et al.*, 2020) confirment aujourd'hui l'hypothèse émise par Francis et Clegg (1990) selon laquelle plus la diversité des cultures est importante dans la rotation, meilleur est le contrôle des bioagresseurs par voie non chimique. La rotation ne permet pas de contrôler tous les ravageurs des cultures, et les plus aisément maîtrisables par cette technique sont les ravageurs endocycliques, *i.e.* dont le cycle est fortement inféodé à la parcelle et le développement très dépendant de l'endo-inoculum (Aubertot et Robin, 2013). C'est le cas des nématodes, et Neher *et al.* (2019) ont en effet mis en évidence le rôle déterminant, et plus important que celui de la gestion du sol ou de l'emploi de nématicides, de la rotation des cultures dans la structure des communautés des différents groupes fonctionnels de nématodes en culture de soja. La rotation des cultures peut avoir toutefois des effets répressifs y compris sur des ravageurs exocycliques (dont le cycle est peu voire pas inféodé à la parcelle et le développement très dépendant de l'exo-inoculum – Aubertot et Robin, 2013), comme cela a été démontré en Afrique sub-saharienne à l'encontre de la noctuelle américaine du maïs *Spodoptera frugiperda*



(Tambo *et al.*, 2020). En plus de cette approche ascendante (ou *bottom-up*) du contrôle des ravageurs, la rotation des cultures permet d'accroître la diversité des auxiliaires et donc la régulation naturelle des ravageurs par voie descendante (ou *top-down*) (Altieri et Letourneau, 1982).

La diversification culturelle dans l'espace fait référence aux cultures ou couverts végétaux associant plusieurs espèces ou variétés, et aboutit donc à une complexité de composition et de structure dans la parcelle (Malézieux *et al.*, 2009). L'hypothèse de la concentration des ressources (Root, 1973) prédit une relation négative entre diversité végétale et niveau de phytophagie par les invertébrés, synonyme de populations de ravageurs moins abondantes, générant moins de dégâts dans les cultures associées que dans les cultures pures (à espèces cultivées égales). Par exemple, l'association du colza avec des légumineuses gélives utilisées en plantes de services compagnes, aboutit à des dégâts de charançons réduits par rapport à des colzas seuls (Cadoux *et al.*, 2015). Cet effet est d'autant plus important que la biomasse du couvert végétal est élevée.



**Figure 9.3.** Colza associé à des plantes de service (fenugrec, lin, vesce, nyger, trèfle, etc.) gélives, permettant de réduire les dégâts de plusieurs types de ravageurs comme les altises et les charançons par rapport à des colzas semés seuls. Cet effet est d'autant plus important que la biomasse du couvert végétal est élevée (© A. Gardarin).

De manière analogue mais en milieu tropical, Blanchart *et al.* (2006) ont constaté de plus faibles densités de nématodes phytophages stricts et de plus fortes densités de nématodes phytophages facultatifs, bactériophages et prédateurs dans un maïs associé à une légumineuse (*Mucuna pruriens*) qu'en culture pure. Toujours en contexte de diversification culturelle dans l'espace, l'hypothèse des ennemis naturels (Pimentel, 1961) prédit quant à elle la prééminence de l'action des ennemis naturels de ravageurs dans le contrôle des populations de ces derniers. Cet effet s'observe par exemple sur du soja cultivé avec de la luzerne en couvert végétal permanent : sur le continent nord-américain, l'abondance des auxiliaires augmente de 45% comparativement à un soja

seul, entraînant une installation plus tardive et très peu dommageable des pucerons du soja *Aphis glycines* (Schmidt *et al.*, 2007). Il ressort des très nombreuses publications scientifiques sur cette question, dont des synthèses et méta-analyses réalisées ces dernières années pour vérifier ces hypothèses, que même si globalement les ravageurs et leurs ennemis naturels sont effectivement et respectivement à des niveaux légèrement inférieurs et supérieurs dans des cultures diversifiées par rapport à ce qu'ils sont dans des cultures pures (*e.g.* Iverson *et al.*, 2014), les effets de la diversification végétale des cultures sur les arthropodes ravageurs et auxiliaires sont très variables et tiennent avant tout à leur identité fonctionnelle (Lavorel *et al.*, 2008) et à la biomasse relative des différentes espèces dans le peuplement végétal. Malgré l'absence de tels travaux en situation spécifique d'ACS, il est permis de formuler l'hypothèse que les interactions plantes - ravageurs - ennemis naturels répondent aux mêmes logiques, et donc qu'en ACS également les cultures et les couverts diversifiés soient moins sensibles aux ravageurs. Néanmoins, les campagnols tirent mieux profit des formations végétales denses et diversifiées que leurs ennemis naturels, ceux-ci devant alors être aidés dans leur action par un fauchage ras lorsque ou dès que cela est possible (et par l'installation de poteaux d'affût dès le semis de la culture à protéger – J.-M. Prud'homme, 16140 Oradour, comm. pers.).

#### 4.5. Influence de l'ACS par effets combinés de ses trois principes

Lee *et al.* (2019) ont montré dans leur méta-analyse que le contrôle biologique des ravageurs est le moins étudié des services de régulation parmi les services associés à l'ACS. Néanmoins, cette dernière possède des caractéristiques intrinsèques, essentiellement des nouvelles propriétés physico-chimiques et biologiques de ses sols et de leur état de surface, et une complexité fonctionnelle de ses cultures dans le temps et dans l'espace, qui présentent le potentiel de contribuer de façon significative au maintien de ses cultures dans un bon état sanitaire. Ainsi, le premier fait marquant dans les systèmes ACS comparativement aux systèmes conventionnels et biologiques, est la plus grande abondance ou biomasse de la plupart des sous-groupes taxonomiques ou fonctionnels des trois principaux groupes d'organismes telluriques que sont les vers de terre (les plus gros et les plus abondants macro-invertébrés du sol), les nématodes et les macro-arthropodes (Henneron *et al.*, 2015). Cette meilleure disposition de l'ACS à accueillir davantage d'ennemis naturels des ravageurs que les systèmes avec travail du sol, a été confirmée par une synthèse bibliographique récente (Petit *et al.*, 2020). Celle-ci a même démontré que les régulations biologiques, exercées par des prédateurs polyphages épigés tels que carabes sur des pucerons et graines d'adventices, étaient généralement plus élevées en systèmes ACS (et toujours au moins égales aux systèmes conventionnels). Au-delà, c'est l'ensemble du **phytobiome** qui influence la santé des plantes vis-à-vis des ravageurs (Leach *et al.*, 2017). Par exemple, concernant les microorganismes, les champignons telluriques entomopathogènes *Beauveria bassiana* et *Metarhizium anisopliae* ont récemment dévoilé une phase endophytique (*i.e.* ils sont potentiellement présents aussi à l'intérieur des tiges et feuilles des plantes). Ils peuvent alors protéger non seulement leur hôte des insectes phytophages souterrains ou aériens (Jaber et Enkerli, 2016), mais améliorent aussi sa croissance en acheminant vers lui l'azote des cadavres d'insectes présents dans ou sur le sol, via leurs mycéliums (Behie *et al.*, 2012).

Les plantes bénéficient également d'interactions avec la méso- et microfaune, *i.e.* avec les micro-arthropodes, nématodes et protozoaires du sol, interactions qui se traduisent



par une protection améliorée contre les bioagresseurs (agents phytopathogènes et ravageurs), une meilleure attractivité vis-à-vis des invertébrés bénéfiques telluriques (e.g. nématodes entomopathogènes) comme des insectes auxiliaires aériens et épigés, et une tolérance accrue aux stress abiotiques et biotiques (Berendsen *et al.*, 2012 ; Briones, 2018 ; Neher et Barbercheck, 2019). Les micro-arthropodes prédateurs (acariens, certains collemboles) sont eux aussi favorisés par la non-perturbation mécanique de leur habitat et le maintien à la surface du sol de résidus de culture en décomposition (Hendrix *et al.*, 1986 ; Rieff *et al.*, 2020). Le potentiel de régulation de ravageurs du sol par ces micro-arthropodes en situation réelle d'ACS n'a pas encore été étudié *in situ*, mais Brust et House (1988) ont constaté que *Tyrophagus putrescentiae* était, en culture d'arachide, significativement plus abondant en parcelles ACS qu'en parcelles conventionnelles, et qu'il était un prédateur effectif des œufs de la chrysomèle maculée du concombre *Diabrotica undecimpunctata*, ravageur sur racines de la légumineuse. Concernant les nématodes en systèmes ACS, leurs communautés apparaissent plus complexes et diversifiées, avec davantage d'espèces prédatrices, moins d'opportunistes et surtout moins de phytophages des cultures, qu'en systèmes conventionnels (Carneiro *et al.*, 2019 ; Henneron *et al.*, 2015 ; Villenave *et al.*, 2009).



**Figure 9.4.** La chrysope verte ou « mouche aux yeux d'or » (*Chrysopa perla*) est un insecte de l'ordre des Névroptères, dont les larves comme les adultes, tel ici sur des fêveroles, se nourrissent de pucerons. Ces auxiliaires sont essentiellement crépusculaires et nocturnes, et sont favorisés par les infrastructures agroécologiques de type haies, lisières, bandes fleuries (© V. Sarthou).

Ces conditions de sol particulières à l'ACS sont également favorables aux macro-invertébrés. Ainsi, Brévault *et al.* (2007) ont-ils observé au Cameroun des communautés de détritivores (vers de terre, termites, fourmis) et de prédateurs (carabes, staphylins, araignées et myriapodes chilopodes) plus diversifiées en systèmes ACS qu'en systèmes conventionnels. A travers une méta-analyse conduite sur 20 publications scientifiques parues entre 1999 et 2016, Xiao *et al.* (2018) ont démontré que les vers de terre améliorent en moyenne et proportionnellement à leurs abondance et diversités

spécifique et fonctionnelle, la croissance des plantes de 20%, leur production de composés chimiques de défense contre les thrips (très petits insectes piqueurs des cellules de l'épiderme des plantes) de 31%, et leur résistance à ces derniers de 81%. En revanche, ils n'améliorent pas cette résistance face aux ravageurs broyeur (chenilles, larves de taupins, limaces), voire l'amointrissent quand il s'agit de ravageurs piqueurs du phloème (pucerons se nourrissant de sève élaborée, dont la qualité, améliorée par un sol plus riche en matières organiques, les favorise). Enfin, en milieu tropical, les vers de terre peuvent réduire la sévérité d'infection des racines de bananier par le nématode *Radopholus similis* (Lafont *et al.*, 2007), celle des attaques de thrips sur la tomate (Xiao *et al.*, 2019) et la sévérité de la pyriculariose du riz (Blanchart *et al.*, 2020).

La prédation exercée par les vertébrés, micro-rongeurs et oiseaux, sur les graines d'adventices commence à être connue (Fischer et Türke, 2016 ; Navntoft *et al.*, 2009 ; Tschumi *et al.*, 2018), mais son impact réel sur le contrôle biologique des adventices en systèmes ACS est encore à préciser. Étonnamment, le rôle d'auxiliaires des cultures des oiseaux insectivores, prédateurs potentiels de ravageurs, semble par contre bien moins connu et n'avoir été étudié que par rapport à l'influence de la structure du paysage et de l'offre en nichoirs (mais voir Lindell *et al.* 2018, et paragraphe 5.1.2. ci-dessous), et non par rapport à celle du type de gestion du sol.

## **5. Organisation du paysage, ACS et effets sur les ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels**

### **5.1. Synthèse des connaissances sur les interactions entre échelles d'organisation de l'espace et dynamique des ravageurs et auxiliaires**

En climat tempéré, 9 auxiliaires entomophages sur 10 passent les saisons défavorables (été et/ou hiver) hors de la parcelle cultivée, alors qu'un ravageur sur deux seulement est dans ce cas (Keller et Häni, 2000). Il en résulte que la gestion de la santé des cultures ne peut être raisonnée à l'échelle seule de la parcelle et qu'elle doit également prendre en compte les abords immédiats de la parcelle et le paysage environnant.

#### **5.1.1. Échelle locale**

##### *1. Influence des bandes herbacées avec fleurs*

Les bandes herbacées pérennes, de type prairial, sont composées de plusieurs espèces indigènes, semées, et forment un couvert végétal stable, servant d'abri et de refuge lors de perturbations dans la parcelle adjacente (Landis *et al.*, 2000 ; MacLeod *et al.*, 2004). La densité et la complexité du couvert végétal ainsi que la présence de litière modifient le microclimat et créent des conditions favorables à l'oviposition, à l'estivation et à l'hivernation de la faune épigée (Griffiths *et al.*, 2008). Elles fournissent également des ressources trophiques aux auxiliaires, principalement du nectar (source d'énergie), du pollen (source de protéines) et des proies/hôtes alternatifs, venant en supplément et souvent en complément des ressources déjà présentes dans la parcelle. Ces ressources sont indispensables à la réalisation du cycle de vie de nombreux auxiliaires (Landis *et al.*, 2000). Elles doivent non seulement être abondantes, mais aussi disponibles toute l'année, certains auxiliaires étant actifs dès février (e.g. les parasitoïdes des larves d'altises), d'autres en automne jusqu'en novembre (e.g. les parasitoïdes et prédateurs de pucerons des céréales). Enfin, elles doivent aussi être

accessibles, ce dernier critère dépendant de la morphologie florale vis-à-vis de l'insecte (Baggen et al., 1999). En réponse à l'implantation d'une bande herbacée avec fleurs, on observe en général à moyen terme une augmentation progressive de l'abondance et du nombre d'espèces prédatrices et parasitoïdes utilisant ces habitats pour leur hibernation, leur alimentation et/ou leur reproduction (Frank et Shrewsbury, 2004 ; Ganser et al., 2019 ; Ramsden et al., 2015), autant d'auxiliaires colonisant alors plus facilement par la suite les parcelles cultivées pour y améliorer le contrôle biologique des ravageurs (Thomas et al. 1991 ; Lys et al., 1994 ; Nentwig et al., 1998 ; Tschumi et al., 2015, 2016a,b).

## 2. *Influence des haies composites*

Outre qu'elles représentent dans l'imaginaire collectif l'élément paysager emblématique des agroécosystèmes accueillant la biodiversité, les haies ont été et sont encore parfois négativement perçues par les agriculteurs, de par la gêne qu'elles peuvent occasionner pour les travaux agricoles et la concurrence qu'elles exercent sur les premiers mètres de la culture adjacente.



**Figure 9.5.** Les bandes fleuries à base de plantes à fleur annuelles, bisannuelles ou pérennes, fournissent habitat et ressources trophiques, potentiellement tout au long de l'année, à de nombreux auxiliaires des cultures, entomophages comme pollinisateurs. L'idéal est d'adosser ou de connecter les bandes fleuries à une haie afin de bénéficier de leurs effets complémentaires (© A. Marchant).

Une récente synthèse au niveau européen montre que ce dernier point se vérifie, avec une baisse moyenne de 29% des rendements sur deux fois la hauteur de la haie (du fait d'une compétition exercée vis-à-vis de la lumière et de l'eau essentiellement). Au-delà de cette courte distance, elle montre également que ces rendements sont au contraire augmentés en moyenne de 6% sur 20 fois sa hauteur, grâce à une réduction, sur cette distance, de la vitesse moyenne du vent et par conséquent de l'évapotranspiration potentielle au niveau de la culture (Van Vooren *et al.*, 2017). Cette même étude prouve



aussi que les parcelles bordées par des haies montrent des teneurs en carbone organique du sol plus élevées et interceptent beaucoup mieux les ions nitrate et phosphates lixiviés (de près de 70% et de plus de 30% respectivement) mais aussi les sédiments de sol lessivés (de plus de 90%). Enfin, elle montre que les haies en bordure de parcelles augmentent la richesse spécifique des communautés d'auxiliaires au sein de celles-ci, et que les bandes herbacées sont plus efficaces pour en augmenter l'abondance, caractéristique relevée aussi par Albrecht *et al.* (2020). Notons pour finir que les haies sont particulièrement intéressantes pour offrir des ressources florales à la fois très tôt au printemps avec les saules (*Salix caprea* notamment) voire dès la fin d'hiver avec le prunellier (*Prunus spinosa*) et la viorne tin (*Viburnum tinus*), et en automne avec notamment l'arbousier (*Arbutus unedo*) et le lierre grimpant (*Hedera helix*), qui de plus offre un excellent gîte hivernal.



**Figure 9.6.** Coccinelle à 7 points (*Coccinella septempunctata*) et syrphe porte-plume (*Sphaerophoria scripta*) femelle, butinant sur une Apiacée afin de recueillir du pollen et du nectar, essentiellement destinés à leur maturation ovocytaire et à leurs déplacements, respectivement (© A. Marchant).



**Figure 9.7.** Les linéaires d'arbres en agroforesterie intra- et péri-parcellaire (haies, lisières) peuvent aider les oiseaux et les chauves-souris à reconquérir l'intérieur des parcelles cultivées (© J.-P. Sarthou).

### 5.1.2. Échelle du paysage

Ces dernières décennies, la simplification des paysages dans les régions d'agriculture intensive d'Europe et d'Amérique du Nord, a entraîné une baisse de près de 50% de l'intensité du contrôle biologique des ravageurs par leurs ennemis naturels (Rusch *et al.*, 2016), davantage du fait de la baisse du nombre d'espèces d'auxiliaires entomophages que de celle de leur abondance (Dainese *et al.*, 2019). Inversement, les régions qui offrent une forte densité d'écotones (*i.e.* « d'effets de bordure ») entre parcelles cultivées et habitats semi-naturels, voient les effectifs de près de la moitié de leurs auxiliaires entomophages croître dans les parcelles cultivées, et donc l'intensité de régulation naturelle des ravageurs des cultures augmenter de 40% (Martin *et al.*, 2019). Toutefois, Karp *et al.* (2018) mettent clairement en évidence que la structure paysagère n'explique pas à elle seule la variabilité d'intensité du contrôle biologique des ravageurs par leurs ennemis naturels, et que les pratiques agricoles doivent être également prises en compte. En effet, Ricci *et al.* (2019) ont démontré que la pression phytosanitaire moyenne dans un paysage vient atténuer les effets de ce dernier en termes de soutien au contrôle biologique des ravageurs par sa richesse en habitats semi-naturels, qui sont des refuges d'auxiliaires. Concernant les vertébrés, les chauves-souris sont particulièrement sensibles à la structure paysagère car elles se localisent et chassent par écholocation. La majorité de leurs espèces ont donc besoin pour se localiser de structures hautes (lisières, haies) organisées en réseaux, davantage que de bandes enherbées sans ligneux adjacents qui ne sont exploitées que par quelques espèces de chiroptères (Barré *et al.*, 2018a). Quant aux oiseaux insectivores, une synthèse bibliographique a recensé au niveau mondial (régions tempérées et tropicales) plus de 200 espèces capables de participer au contrôle biologique des ravageurs des cultures (Boeing *et al.*, 2017). Il est également apparu que ce service écosystémique, au sein des parcelles cultivées, était positivement corrélé à l'hétérogénéité du paysage, à la proportion d'habitats constitués de peuplements végétaux natifs, et au rapprochement entre ces derniers et les cultures. La présence, en bordure de parcelle cultivée, d'arbres

et/ou arbustes suffisamment hauts, permet d'accroître significativement la présence d'oiseaux insectivores, y compris en période hivernale, et donc le contrôle biologique des ravageurs au sein des cultures (Kross *et al.*, 2016). Toutefois, l'intensité du service rendu par les oiseaux peut être disparate en fonction des cultures. En effet, Garfinkel *et al.* (2020) ont démontré que, dans un même paysage de l'Illinois aux Etats-Unis, les passereaux insectivores délivrent un service estimé à 275 US\$/ha en culture de maïs en se nourrissant bien plus d'invertébrés ravageurs que d'auxiliaires, mais font subir des pertes moyennes de 348 US\$/ha en culture de soja en capturant essentiellement des arthropodes auxiliaires, sans presque toucher aux ravageurs.

## **5.2. Interactions entre variables locales de l'ACS et structure du paysage sur la dynamique des ravageurs et des auxiliaires**

Comme vu précédemment, les principes de l'ACS aboutissent à conférer au sol d'une parcelle cultivée, particulièrement à son horizon de surface, des propriétés proches de celles d'un sol d'un habitat naturel. C'est ainsi que Tamburini *et al.* (2016) ont démontré que des parcelles en ACS hébergeaient des communautés d'auxiliaires prédateurs plus abondantes, et de ce fait bénéficiaient d'un contrôle biologique des pucerons plus important, que des parcelles en travail du sol. En croisant avec les effets du paysage, les mêmes auteurs ont observé que seules ces dernières bénéficiaient d'une augmentation de son hétérogénéité, sous la forme d'une amélioration du contrôle des pucerons. Cela démontre que les parcelles en ACS, en étant capables d'héberger en leur sein des auxiliaires, compensent au moins partiellement les effets négatifs de la simplification des paysages (Tamburini *et al.*, 2016). Un autre exemple intéressant concerne le taux de parasitisme des larves de méligèthes du colza (*Meligethes aeneus*), qui est amélioré quand une proportion plus importante d'habitats semi-naturels et de parcelles précédemment en colza (l'année n-1), est observée dans les environs proches d'une culture de colza (l'année n) (Rusch *et al.*, 2011). Ce taux de parasitisme est par contre dégradé lorsqu'il augmente, dans un périmètre plus large, la proportion de parcelles précédemment en colza (l'année n-1) qui ont été par la suite mises en culture (pour l'année n) de façon conventionnelle, *i.e.* avec travail du sol (mais il peut être, à cette échelle, amélioré par une proportion plus importante d'habitats semi-naturels). Cette observation met en exergue l'impact très fortement négatif du travail du sol, en fin d'été ou début d'automne, sur la survie des parasitoïdes (*Tersilochus heterocerus* et *Phradis* spp.) encore dans les larves de méligèthes, elles-mêmes encore dans les premiers centimètres du sol lorsqu'elles ont été parasitées pendant leur phase de développement dans les fleurs de colza (Nilsson 2010) – les larves de méligèthes non parasitées s'étant nymphosées en adultes et ceux-ci ayant émergé au mois de mai. *A contrario*, elle permet d'en déduire l'effet bénéfique du semis direct en automne des cultures suivant un colza, comme mis en évidence par Nilsson (2010). Enfin, et de façon plus surprenante, plus l'ancienneté d'un labour, sur sols peu argileux, est importante, plus l'intensité de régulation des pucerons des épis du blé par les larves du syrpe *Sphaerophoria scripta*, croît ; cette variable technique devenant alors plus importante pour l'intensité de la régulation que la structure paysagère (Chabert et Sarthou, 2017). L'hypothèse émise par les auteurs est qu'en sols peu argileux, le déficit de fer (très présent dans les feuillets d'argile) implique que la forte oxydation du sol provoquée par le labour, ne peut être efficacement tamponnée que par la matière organique évoluée du sol (qui cède des électrons à l'oxygène, au cours de sa minéralisation). Si celle-ci fait également défaut dans un sol peu argileux car fréquemment labouré, le potentiel redox du sol reste trop élevé pour la plante, qui utilise alors ses photosynthétats pour le réduire autour de ses racines, par le biais de la microflore ainsi stimulée (phénomène d'exsudation racinaire



pour créer la rhizosphère). La plante ferait, pour permettre cela, l'économie de l'émission de (suffisamment de) composés organiques volatiles de type HIPV (*Herbivore Induced Plant Volatiles*), lui permettant normalement de repousser les ravageurs tout en attirant leurs ennemis naturels (Gols, 2014).

## 6. Le cas particulier des limaces

Cela est bien connu, les limaces constituent le principal problème en matière de ravageurs des cultures en systèmes de non labour et surtout de semis direct (Kennedy *et al.*, 2013 ; Voss *et al.*, 1998), sujet malgré tout très peu abordé dans la littérature scientifique internationale. En grandes cultures, *Deroceras reticulatum* ou loche grise, est l'espèce la plus fréquente en France mais apparemment ailleurs en Europe aussi, suivie d'*Arion hortensis*, la loche noire (à pied orange), qui occasionne surtout des dégâts aux semences en germination, dans les sillons. Certaines cultures, forcément d'hiver, sont réputées les favoriser, comme le colza et les couverts d'avoine, et d'autres pour y être très sensibles, comme le tournesol et le seigle. En systèmes de travail du sol réduit et de semis direct, la prévention basique consiste à éviter de placer ces dernières après les premières, et la lutte tout aussi basique à épandre des granulés molluscicides au moins sur le pourtour de la parcelle. Depuis quelques années, une 'trouvaille' fortuite d'un agriculteur a été largement adoptée : semer les cultures d'hiver qui suivent un colza ou un couvert d'été (susceptibles donc d'héberger des limaces), « dans le vert », en ayant pris soin de ne détruire ces couverts et/ou repousses qu'au moment du semis. Les plantes en train de mourir attirent alors les limaces (probablement parce que leurs métabolites secondaires d'antibiose et d'antixénose, à effet répulsif, sont parmi les premières à se dégrader) et font ainsi diversion le temps que la culture se développe au-delà des stades critiques. C'est par tous ces moyens que les agriculteurs en ACS parviennent à cultiver, malgré ces ravageurs. Une autre observation mérite attention. De plus en plus d'agriculteurs disent voir toujours beaucoup de limaces dans leurs cultures, mais avec des niveaux de dégâts souvent étonnamment bas. Dans le cadre d'une thèse sur l'agriculture de conservation des sols (Chabert, 2017), il a été observé qu'une espèce absente des manuels techniques d'identification des limaces de France métropolitaine, *Ambigolimax valentianus* (précédemment *Lehmania valentiana*), était parfois très abondamment présente mais uniquement dans des parcelles en ACS depuis au moins 5 ans et qui n'avaient jamais reçu pendant ce temps de molluscicides. Dans ces conditions, cette espèce semblait remplacer presque totalement *Deroceras reticulatum* et surtout ne semblait pas du tout intéressée par les jeunes plantules de blé (comptages et observations nocturnes). Des analyses isotopiques du carbone et de l'azote d'individus de cette espèce (et d'autres) ont semblé indiquer qu'*A. valentianus* était essentiellement détritivore. Et si, pure hypothèse pour l'instant, *A. valentianus* s'avérait un jour être, au moins partiellement et à l'instar d'autres espèces de limaces, carnivore et donc potentiellement prédatrice d'œufs de loche grise lorsqu'elle en trouve ?...

## Conclusion

Il ressort de cette synthèse sur la gestion des ravageurs des cultures en ACS, que les régulations biologiques à l'encontre de ces derniers sont clairement favorisées par les conditions écologiques générées par ces systèmes et offrent ainsi un potentiel très important, jusqu'alors insoupçonné ou tout au mieux très mal connu de réduction des pressions de ravageurs sans recourir aux molécules biocides phytosanitaires. Toutefois, ponctuellement et particulièrement lors de la transition vers l'ACS, des pressions trop importantes de ravageurs peuvent nécessiter des interventions de type curatif, et

en tout état de cause, c'est bien l'approche intégrant différents moyens de lutte, le moyen chimique étant mobilisé en dernier recours (principe de la protection intégrée des cultures), qui doit prévaloir.



**Figure 9.8.** La testacelle blanche (*Testacella haliotidea*) est une limace non phytophage car prédatrice exclusive d'œufs et de larves d'autres limaces ou escargots mais aussi de vers de terre. Elle ne se rencontre que dans des sols non travaillés (jamais à leur surface) riches en proies, et sa coquille vestigiale au bout de l'abdomen est caractéristique (© J.-P. Sarthou).

De par ses principes, l'ACS appuie fortement l'approche préventive de la santé des cultures, approche dont la pertinence s'est révélée ici. Les effets de l'ACS génèrent en effet, dans les compartiments aérien et épigé comme dans le compartiment endogé des agroécosystèmes, une intensification des interactions biologiques, bénéfiques à la production agricole, entre composantes de la biodiversité planifiée et associée (composantes directement et indirectement favorisées par ces systèmes). En ce sens, l'ACS s'inscrit pleinement dans la logique de la protection agroécologique des cultures (voir Deguine *et al.*, 2017).

## Références

- Albrecht M., Kleijn D., Williams N. M., Tschumi M., Blaauw B. R., Bommarco R., Campbell A. J., Dainese M., Drummond F. A., Entling M. H., Ganser D., Arjen de Groot G., Goulson D., Grab H., Hamilton H., Herzog F., Isaacs R., Jacot K., Jeanneret P., ... Sutter L., 2020. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: a quantitative synthesis. *Ecology Letters*, 23(10), 1488-1498. <https://doi.org/10.1111/ele.13576>
- Altieri M. A., Letourneau D. K., 1982. Vegetation management and biological control in agroecosystems. *Crop Protection*, 1(4), 405-430. [https://doi.org/10.1016/0261-2194\(82\)90023-0](https://doi.org/10.1016/0261-2194(82)90023-0)
- Aubertot J.-N., Robin M. H., 2013. Injury Profile SIMulator, a qualitative aggregative modelling framework to predict crop injury profile as a function of cropping

- practices, soil, climate and field environment. I. Conceptual bases. *PLoS ONE*, 8 (9), e73202. <https://doi.org/doi:10.1371/journal.pone.0073202>
- Baggen L. R., Gurr G. M., Meats A., 1999. Flowers in tri-trophic systems: mechanisms allowing selective exploitation by insect natural enemies for conservation biological control. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 91 , 155-161. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-1890-5\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1890-5_19)
- Barré K., Le Viol I., Julliard R., Chiron F., Kerbiriou C., 2018. Tillage and herbicide reduction mitigate the gap between conventional and organic farming effects on foraging activity of insectivorous bats. *Ecology and Evolution*, 8 , 1496-1506. <https://doi.org/10.1002/ece3.3688>
- Barré K., Le Viol I., Julliard R., Kerbiriou C., 2018. Weed control method drives conservation tillage efficiency on farmland breeding birds. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 256, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.004>
- Bartz M. L. C., Pasini A., Brown G. G., 2013. Earthworms as soil quality indicators in Brazilian no-tillage systems. *Applied Soil Ecology*, 69 , 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.01.011>
- Basche A. D., Kaspar T. C., Archontoulis S. V., Jaynes D. B., Sauer T. J., Parkin T. B., Miguez F. E., 2016. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172 , 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.006>
- Beaulieu F., Weeks A. R., 2007. Free-living mesostigmatic mites in Australia: their roles in biological control and bioindication. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 47 (4), 460. <https://doi.org/10.1071/EA05341>
- Behie S. W., Zelisko P. M., Bidochka M. J., 2012. Endophytic insect-parasitic fungi translocate nitrogen directly from insects to plants. *Science*, 336 (6088), 1576-1577. <https://doi.org/10.1126/science.1222289>
- Berendsen R. L., Pieterse C. M. J., Bakker P. A. H. M., 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science*, 17 (8), 478-486. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.04.001>
- Blanchart E., Ratsiatosika O., Raveloson H., Razafimbelo T., Razafindrakoto M., Sester M., Becquer T., Bernard L., Trap J., 2020. Nitrogen supply reduces the earthworm-silicon control on rice blast disease in a Ferralsol. *Applied Soil Ecology*, 145 , 103341. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.08.003>
- Blanchart E., Villenave C., Viallatoux A., Barthès B., Girardin C., Azontonde A., Feller C., 2006. Long-term effect of a legume cover crop (*Mucuna pruriens* var. *utilis*) on the communities of soil macrofauna and nematofauna, under maize cultivation, in southern Benin. *European Journal of Soil Biology*, 42 , S136-S144. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.018>
- Blanchart Eric, Bernoux M., Sarda X., Siqueira M., Cerri C. C., Piccolo M., Douzet J.-M., Scopel E., Feller C., 2007. Effect of direct seeding mulch-based systems on soil carbon storage and macrofauna in central Brazil. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 72 (1), 81-87.
- Blumberg A. Y., Crossley D. A., 1983. Comparison of soil surface arthropod populations in conventional tillage, no-tillage and old field systems. *Agro-Ecosystems*, 8 , 247-253.
- Boesing A. L., Nichols E., Metzger J. P., 2017. Effects of landscape structure on avian-mediated insect pest control services: a review. *Landscape Ecology*, 32 (5),

931-944. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0503-1>

- Boyles J. G., Cryan P. M., McCracken G. F., Kunz T. H., 2011. Economic Importance of Bats in Agriculture. *Science*, 332 (6025), 41-42. <https://doi.org/10.1126/science.1201366>
- Brévault T., Bikay S., Maldès J. M., Naudin K., 2007. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. *Soil and Tillage Research*, 97 (2), 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.09.006>
- Briones M. J. I., 2018. The serendipitous value of soil fauna in ecosystem functioning: the unexplained explained. *Frontiers in Environmental Science*, 6 , 149. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00149>
- Brust G. E., House G. J., 1988. A study of Tyrophagus putrescentiae (Acari: Acaridae) as a facultative predator of southern corn rootworm eggs. *Experimental & Applied Acarology*, 4 (4), 335-344. <https://doi.org/10.1007/BF01275164>
- Cadoux S., Sauzet G., Valantin-Morison M., Pontet C., Champolivier L., Robert C., Lieven J., Flénet F., Manganot O., Fauvin P., Landé N., 2015. Intercropping frost-sensitive legume crops with winter oilseed rape reduces weed competition, insect damage, and improves nitrogen use efficiency. *OCL*, 22 (3), D302. <https://doi.org/10.1051/ocl/2015014>
- Carneiro M. A. C., de Assis P. C. R., Paulino H. B., da Rocha M. R., Teixeira R. A., Pinto F. A., dos Santos J. V., Siqueira J. O., de Souza E. D., 2019. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and nematodes in a 14 years no-tillage chronosequence. *Rhizosphere*, 10 , 100149. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2019.100149>
- Chabert A., 2017. Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants: étude des déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage. *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Toulouse INP*.
- Chabert A., Sarthou J. P., 2017. Practices of conservation agriculture prevail over cropping systems and landscape heterogeneity in understanding the ecosystem service of aphid biocontrol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 249 , 70-79. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.005>
- Cock M. J. W., Biesmeijer J. C., Cannon R. J. C., Gerard P. J., Jiménez J. J., Lavelle P. M., Raina S. K., 2011. Climate change and invertebrate genetic resources for food and agriculture: state of knowledge, risks and opportunities, In: Background Study Paper N° 54; Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture, p. 109, FAO.
- Dainese M., Martin E. A., Aizen M. A., Albrecht M., Bartomeus I., Bommarco R., Carnevali L. G., Chaplin-Kramer R., Gagic V., Garibaldi L. A., Ghazoul J., Grab H., Jonsson M., Karp D. S., Kennedy C. M., Kleijn D., Kremen C., Landis D. A., Letourneau D. K., ... Steffan-Dewenter I., 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5 (10), eaax0121. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>
- Deguine, J. P., Gloanec, C., Laurent, P., Ratnadass, A., & Aubertot, J. N. (Eds.). (2017). *Agroecological crop protection*. Springer.
- Fischer C., Türke M., 2016. Seed preferences by rodents in the agri-environment and implications for biological weed control. *Ecology and Evolution*, 6 (16), 5796-5807. <https://doi.org/10.1002/ece3.2329>

- Francis C. A., Clegg M. D., 1990. Crop rotations in sustainable agricultural systems. In: C. A. Edwards *et al.* (Eds.), *Sustainable Agriculture Systems. Soil and Water Conserv. Soc.*, Ankeny, IA, USA, pp. 107-122.
- Frank S. D., Shrewsbury P. M., 2004. Effect of conservation strips on the abundance and distribution of natural enemies and predation of *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae) on golf course fairways. *Environmental Entomology*, 33 (6), 1662-1672. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-33.6.1662>
- Funderburk J. E., Pedigo L. P., Berry E. C., 1983. Seedcorn maggot (Diptera: Anthomyiidae) emergence in conventional and reduced-tillage soybean systems in Iowa. *J. Econ. Entomol.*, 76:131-34. <https://doi.org/10.1093/jee/76.1.131>
- Ganser D., Knop E., Albrecht M., 2019. Sown wildflower strips as overwintering habitat for arthropods\_ Effective measure or ecological trap? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 275, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.02.010>
- García-Palacios P., Maestre F. T., Kattge J., Wall D. H., 2013. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes. *Ecology Letters*, 16 (8), 1045-1053. <https://doi.org/10.1111/ele.12137>
- Garfinkel M. B., Minor E. S., Whelan C. J., 2020. Birds suppress pests in corn but release them in soybean crops within a mixed prairie/agriculture system. *The Condor*, 122 , 1-12.
- Gobat J. M., Aragno M., Matthey W., 2010. *Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols* (Vol. 14). PPUR Presses polytechniques.
- Gols R., 2014. Direct and indirect chemical defences against insects in a multitrophic framework: Plant chemical defences against insects. *Plant, Cell & Environment*, 37 (8), 1741-1752. <https://doi.org/10.1111/pce.12318>
- Griffiths G. J. K., Holland J. M., Bailey A., Thomas M. B., 2008. Efficacy and economics of shelter habitats for conservation biological control. *Biological Control*, 45 , 200-209.
- Grimaldi D., Engel M. S., 2005. *Evolution of the Insects*. xv + 755 pp. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Hendrix P. F., Parmelee R. W., Crossley D. A., Coleman D. C., Odum E. P., Groffman P. M., 1986. Detritus food webs in conventional and no-tillage agroecosystems. *BioScience*, 36 (6), 374-380.
- Henneron L., Bernard L., Hedde M., Pelosi C., Villenave C., Chenu C., Bertrand M., Girardin C., Blanchart E., 2015. Fourteen years of evidence for positive effects of conservation agriculture and organic farming on soil life. *Agronomy for Sustainable Development*, 35 (1), 169-181. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0215-8>
- Holland J. M., Hutchison M. A. S., Smith B., Aebischer N. J., 2006. A review of invertebrates and seed-bearing plants as food for farmland birds in Europe. *Annals of Applied Biology*, 148 (1), 49-71. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2006.00039.x>
- Husson O., Uphoff N., sous-presse. The Influences of pH and Eh on Soil System Dynamics and Fertility with Microbial Mediation. In: *Biological Approaches to Regenerative and Resilient Soil Systems* (N. Uphoff, A. S. Ball, E. C. S. Fernandes, H. R. Herren, O. Husson, M. D. Laing, C. Palm, J. Pretty, P. Sanchez, N. Sanginga, & J. Thies, Éds.), Boca Raton : CRC Press, p. Chapitre 18,

- IOBC / OILB, 1973. Statutes. IOBC wprs Bull./OILB srop Bull. 1973/1.
- Iverson A. L., Marín L. E., Ennis K. K., Gonthier D. J., Connor-Barrie B. T., Remfert J. L., Cardinale B. J., Perfecto I., 2014. Do polycultures promote win-wins or trade-offs in agricultural ecosystem services? A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, 51 (6), 1593-1602. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12334>
- Jabbour R., Pisani-Gareau T., Smith R. G., Mullen C., Barbercheck M., 2016. Cover crop and tillage intensities alter ground-dwelling arthropod communities during the transition to organic production. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 31 (4), 361-374. <https://doi.org/10.1017/S1742170515000290>
- Jaber L. R., Enkerli J., 2016. Effect of seed treatment duration on growth and colonization of *Vicia faba* by endophytic *Beauveria bassiana* and *Metarhizium brunneum*. *Biological Control*, 103 , 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2016.09.008>
- Karp D. S., Chaplin-Kramer R., Meehan T. D., Martin E. A., DeClerck F., Grab H., Gratton C., Hunt L., Larsen A. E., Martínez-Salinas A., O'Rourke M. E., Rusch A., Poveda K., Jonsson M., Rosenheim J. A., Schellhorn N. A., Tscharrntke T., Wratten S. D., Zhang W., ... Zou Y., 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115 (33), E7863-E7870. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800042115>
- Keller S., Häni F., 2000. Ansprüche von Nützungen und Schädlingen an den Lebensraum. In : Nentwig W. (ed.), *Streifenförmige ökologische Ausgleichsflächen in der Kulturlandschaft : Ackerkrautstreifen*. Buntbrache, Feldränder, vaö Verlag Agrarökologie, Switzerland, Agrarokolo Edition, pp. 199–217.
- Kennedy T. F., Connery J., Fortune T., Forristal D., Grant J., 2013. A comparison of the effects of minimum-till and conventional-till methods, with and without straw incorporation, on slugs, slug damage, earthworms and carabid beetles in autumn-sown cereals. *The Journal of Agricultural Science*, 151 (5), 605-629. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000706>
- Kennedy T. F., McDonald J. G., Connery J., Purvis G., 2010. A comparison of the occurrence of aphids and barley yellow dwarf virus in minimum-till and conventional-till autumn-sown cereals. *The Journal of Agricultural Science*, 148 (4), 407-419. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000304>
- Kibblewhite M. G., Ritz K., Swift M. J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363 (1492), 685-701. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2178>
- Kladivko E. J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil & Tillage Research*, 61 (1-2), 61-76.
- Kross S. M., Kelsey T. R., McColl C. J., Townsend J. M., 2016. Field-scale habitat complexity enhances avian conservation and avian-mediated pest-control services in an intensive agricultural crop. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 225 , 140-149.
- Kumar S., Garg A. K., Aulakh M. S., 2016. Effect of Conservation Agriculture Practices on Physical, Chemical and Biological Attributes of Soil Health Under Soybean–Rapeseed Rotation. *Agricultural Research*, 5 (2), 145-161. <https://doi.org/10.1007/s40003-016-0205-y>
- Lafont A., Risède J.-M., Loranger-Merciris G., Clermont-Dauphin C., Dorel M., Rhino B., Lavelle P., 2007. Effects of the earthworm *Pontoscolex corethrurus*



- on banana plants infected or not with the plant-parasitic nematode *Radopholus similis*. *Pedobiologia*, 51 (4), 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2007.05.004>
- 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 (1), 175-201. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.45.1.175>
- Lavorel S., Sarthou J. P., Carré G., Chauvel B., Cortet J., Dajoz I., Dupraz C., Farrugia A., Lavergne S., Liagre F., Lumaret J. P., Quétier F., Roger-Estrade J., Schmid B., Simon S., Steinberg C., Tichit M., Vaissière B., van Tuinen D., Villenave C., 2008. Intérêts de la biodiversité pour les services rendus par les écosystèmes. In : Le Roux *et al.* Eds., INRA (France), *Expertise Scientifique Collective « Agriculture et Biodiversité – Valoriser les synergies »*, 198-463.
- Leach J. E., Triplett L. R., Argueso C. T., Trivedi P., 2017. Communication in the phytobiome. *Cell*, 169 (4), 587-596. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.04.025>
- Lee H., Lautenbach S., Nieto A. P. G., Bondeau A., Cramer W., Geijzendorffer I. R., 2019. The impact of conservation farming practices on Mediterranean agroecosystem services provisioning—a meta-analysis. *Regional Environmental Change*, 19 (8), 2187-2202. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1447-y>
- Lichtenberg E. M., Kennedy C. M., Kremen C., Batary P., Berendse F., Bommarco R., Bosque-Pérez N. A., Carvalheiro L. G., Snyder W. E., Williams N. M., Winfree R., Klatt B. K., Astrom S., Benjamin F., Brittain C., Chaplin-Kramer R., *et al.*, 2017. A global synthesis of the effects of diversified farming systems on arthropod diversity within fields and across agricultural landscapes. *Global Change Biology*, 1-12. <https://doi.org/10.1111/gcb.13714>
- Lindell C., Eaton R. A., Howard P. H., Roels S. M., Shave M. E., 2018. Enhancing agricultural landscapes to increase crop pest reduction by vertebrates. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 257, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.028>
- Lundin O., 2019. No-till protects spring oilseed rape (*Brassica napus* L.) against crop damage by flea beetles (*Phyllotreta* spp.). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 278, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.03.014>
- Lys J. A., Zimmermann M., Nentwig W., 1994. Increase in activity density and species number of carabid beetles in cereals as a result of strip-management. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 73, 1-9.
- MacLeod A., Wratten S. D., Sotherton N. W., Thomas M. B., 2004. « Beetle banks » as refuges for beneficial arthropods in farmland: long-term changes in predator communities and habitat. *Agricultural and Forest Entomology*, 6 (2), 147-154.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 43-62.
- Martin E. A., Dainese M., Clough Y., Báldi A., Bommarco R., Gagic V., Garratt M. P. D., Holzschuh A., Kleijn D., Kovács-Hostyánszki A., Marini L., Potts S. G., Smith H. G., Al Hassan D., Albrecht M., Andersson G. K. S., Asís J. D., Aviron S., Balzan M. V., ... Steffan-Dewenter I., 2019. The interplay of landscape composition and configuration: new pathways to manage functional biodiversity and agroecosystem services across Europe. *Ecology Letters*, ele.13265. <https://doi.org/10.1111/ele.13265>

- Musick G. J., Collins D. L., 1971. Northern corn rootworm affected by tillage. *Ohio Rep.*, 56, 88-91.
- Navntoft S., Wratten S. D., Kristensen K., Esbjerg P., 2009. Weed seed predation in organic and conventional fields. *Biological Control*, 49 (1), 11-16. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.12.003>
- Neher D. A., Nishanthan T., Grabau Z. J., Chen S. Y., 2019. Crop rotation and tillage affect nematode communities more than biocides in monoculture soybean. *Applied Soil Ecology*, 140, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.03.016>
- Neher D., Barbercheck M., 2019. Soil microarthropods and soil health: intersection of decomposition and pest suppression in agroecosystems. *Insects*, 10 (12), 414. <https://doi.org/10.3390/insects10120414>
- Nentwig W., Frank T., Lethmayer C., 1998. Sown weed strips: artificial ecological compensation areas as an important tool in conservation biological control. In : P. Barbosa, (Éd.), *Conservation biological control*, Academic Press, 133-153.
- Nilsson C., 1985. Impact of ploughing on emergence of pollen beetle parasitoids after hibernation. *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie*, 100 (1-5), 302-308. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1985.tb02783.x>
- Nilsson C., 2010. Impact of soil tillage on parasitoids of oilseed rape pests. In: Williams I. H. (Ed.), *Biocontrol-based integrated management of oilseed rape pests*. Springer, Berlin, pp 305–311. [http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3983-5\\_11](http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-3983-5_11)
- O'Rourke M. E., Liebman M., Rice M. E., 2008. Ground beetle (Coleoptera: Carabidae) assemblages in conventional and diversified crop rotation systems. *Environmental Entomology*, 37 (1), 121-130. [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2008\)37\[121:GBCCAI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2008)37[121:GBCCAI]2.0.CO;2)
- Petit S., Muneret L., Carbonne B., Hannachi M., Ricci B., Rusch A., Lavigne C., 2020. Landscape-scale expansion of agroecology to enhance natural pest control: A systematic review. In: *Advances in Ecological Research*, 63, 1-48, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2020.09.001>
- Pheap S., Lefèvre C., Thoumazeau A., Leng V., Boulakia S., Koy R., Hok L., Lienhard P., Brauman A., Tivet F., 2019. Multi-functional assessment of soil health under Conservation Agriculture in Cambodia. *Soil and Tillage Research*, 194, 104349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104349>
- Pimentel D., 1961. An ecological approach to the insecticide problem. *Journal of Economic Entomology*, 54(1), 108-114. <https://doi.org/10.1093/jee/54.1.108>
- Pimentel D., 1997. Pest management in agriculture. In D. Pimentel (Ed.), *Techniques for Reducing Pesticide Use: Economic and Environmental Benefits*, John Wiley and Sons, Chichester, 1-11.
- Pimentel D., 2009. Pesticides and Pest Control. In: *Integrated Pest Management: Innovation-Development Process* (R. Peshin & A. K. Dhawan, Éds.), p. 83-87, Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8992-3_3)
- Powolny T., 2012. Faire face à l'hiver. Quelles réponses à l'hétérogénéité de la ressource en agroécosystème ? L'exemple de l'alouette des champs (*Alauda arvensis*). Thèse de Doctorat en Physiologie, Biologie des organismes, Populations, Interactions. Université de Poitiers.
- Prischmann D. A., Knutson E. M., Dashiell K. E., Lundgren J. G., 2011. Generalist-feeding subterranean mites as potential biological control agents of immature

- corn rootworms. *Experimental and Applied Acarology*, 55 (3), 233-248. <https://doi.org/10.1007/s10493-011-9468-y>
- Ramsden M. W., Menéndez R., Leather S. R., Wäckers F., 2015. Optimizing field margins for biocontrol services: The relative role of aphid abundance, annual floral resources, and overwinter habitat in enhancing aphid natural enemies. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 94-104.
- Reeve J. R., Hoagland L. A., Villalba J. J., Carr P. M., Atucha A., Cambardella C., Davis D. R., Delate K., 2016. Organic farming, soil health, and food quality: considering possible links. *Advances in Agronomy*, 137, 319-368.
- Reicosky D., Crovetto C., 2014. No-till systems on the Chequen Farm in Chile: A success story in bringing practice and science together. *International Soil and Water Conservation Research*, 2(1), 66-77.
- Ricci B., Lavigne C., Alignier A., Aviron S., Biju-Duval L., Bouvier J. C., Mezerette F., Plantegenest M., Savary G., Thomas C., Vialatte A., Petit S., 2019. Local pesticide use intensity conditions landscape effects on biological pest control. *Proc. R. Soc. B*, 286: 20182898. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.2898>
- Rieff G. G., Natal-da-Luz T., Renaud M., Azevedo-Pereira H. M. V. S., Chichorro F., Schmelz R. M., Sá E. L. S. de, Sousa J. P., 2020. Impact of no-tillage versus conventional maize plantation on soil mesofauna with and without the use of a lambda-cyhalothrin based insecticide: A terrestrial model ecosystem experiment. *Applied Soil Ecology*, 147, 103381. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103381>
- Robinson R. A., Sutherland W. J., 1999. The winter distribution of seed-eating birds: habitat structure, seed density and seasonal depletion. *Ecography*, 22(4), 447-454. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.1999.tb00581.x>
- Root R. B., 1973. Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological Monographs*, 43(1), 95-124. <https://doi.org/10.2307/1942161>
- Rowen E. K., Regan K. H., Barbercheck M. E., Tooker J. F., 2020. Is tillage beneficial or detrimental for insect and slug management? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 106849. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106849>
- Rusch A., Chaplin-Kramer R., Gardiner M. M., Hawro V., Holland J., Landis D., Thies C., Tschamtker T., Weisser W. W., Winqvist C., Woltz M., Bommarco R., 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 221, 198-204. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.039>
- Rusch A., Valantin-Morison M., Sarthou J. P., Roger-Estrade J., 2011. Multi-scale effects of landscape complexity and crop management on pollen beetle parasitism rate. *Landscape Ecology*, 26, 473-486.
- Schmidt N., O'Neal M. E., Singer J., 2007. Alfalfa living mulch advances biological control of soybean aphid. *Environmental Entomology*, 36(2), 416-424. <https://doi.org/10.1093/ee/36.2.416>
- Sharma S., Kooner R., Arora R., 2017. Insect Pests and Crop Losses. In: *Breeding Insect Resistant Crops for Sustainable Agriculture* (R. Arora & S. Sandhu, Éds.), p. 45-66, Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6056-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6056-4_2)

- Stinner B. R., House G. J., 1990. Arthropods and other invertebrates in conservation-tillage agriculture. *Annual Review of Entomology*, 35, 299-318.
- Tambo J. A., Day R. K., Lamontagne-Godwin J., Silvestri S., Beseh P. K., Oppong-Mensah B., Phiri N. A., Matimelo M., 2020. Tackling fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) outbreak in Africa: an analysis of farmers' control actions. *International Journal of Pest Management*, 66(4), 298-310. <https://doi.org/10.1080/09670874.2019.1646942>
- Tamburini G., Bommarco R., Wanger T. C., Kremen C., van der Heijden M. G. A., Liebman M., Hallin S., 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6, eaba1715. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba1715>
- Tamburini G., De Simone S., Sigura M., Boscutti F., Marini L., 2016. Conservation tillage mitigates the negative effect of landscape simplification on biological control. *Journal of Applied Ecology*, 53, 233-241. <https://doi.org/doi:10.1111/1365-2664.12544>
- Thomas M. B., Wratten S. D., Sotherton N. W., 1991. Creation of 'island' habitats in farmland to manipulate populations of beneficial arthropods: predator densities and emigration. *Journal of Applied Ecology*, 28, 906-917. <https://doi.org/10.2307/2404216>
- Tørresen K. S., Skuterud R., Tandsæther H. J., Hagemo M. B., 2003. Long-term experiments with reduced tillage in spring cereals. I. Effects on weed flora, weed seedbank and grain yield. *Crop Protection*, 22 (1), 185-200. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(02\)00145-X](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(02)00145-X)
- Tschumi M., Albrecht M., Bärtschi C., Collatz J., Entling M. H., Jacot K., 2016. Perennial, species-rich wildflower strips enhance pest control and crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220, 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.001>
- Tschumi M., Albrecht M., Collatz J., Dubsy V., Entling M. H., Najjar-Rodriguez A. J., Jacot K., 2016. Tailored flower strips promote natural enemy biodiversity and pest control in potato crops. *Journal of Applied Ecology*, 53 (4), 1169-1176. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12653>
- Tschumi M., Albrecht M., Entling M. H., Jacot K., 2015. High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 282, 20151369. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1369>
- Tschumi M., Ekroos J., Hjort C., Smith H. G., Birkhofer K., 2018. Rodents, not birds, dominate predation-related ecosystem services and disservices in vertebrate communities of agricultural landscapes. *Oecologia*, 188 (3), 863-873. <https://doi.org/10.1007/s00442-018-4242-z>
- Van Vooren L., Reubens B., Broekx S., De Frenne P., Nelissen V., Pardon P., Verheyen K., 2017. Ecosystem service delivery of agri-environment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 244, 32-51. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.04.015>
- Verhulst N., Govaerts B., Verachtert E., Castellanos-Navarrete A., Mezzalana M., Wall P. C., Chocobar A., Deckers J., Sayre K. D., 2010. Conservation Agriculture, Improving Soil Quality for Sustainable Production Systems? In: *Food Security and Soil Quality* (R. Lal & B. A. Stewart, Éds.), 0 éd., p. 137-208, CRC Press. <https://doi.org/10.1201/EBK1439800577-7>
- Villeneuve C., Rabary B., Chotte J.-L., Blanchart E., Djigal D., 2009. Impact of direct

- seeding mulch-based cropping systems on soil nematodes in a long-term experiment in Madagascar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44 (8), 949-953. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800022>
- Voss M. C., Ulber B., Hoppe H. H., 1998. Impact of reduced and zero tillage on activity and abundance of slugs in winter oilseed rape. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 105(6) : 632-640. <http://www.jstor.org/stable/43386985>
- Waligora, C., 2019. *Faune utile des bords de champ*. France Agricole Editions, 256 pp.
- Wardle D. A., Bardgett R. D., Klironomos J. N., Setälä H., Van Der Putten W. H., Wall D. H., 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304 (5677), 1629-1633. <https://doi.org/10.1126/science.1094875>
- Whalon M. E., Mota-Sanchez D., Hollingworth R. M. (Eds.), 2008. *Global pesticide resistance in arthropods*. Cabi.
- Whitehead A. G. 1998. *Plant nematode control*. Wallingford Edition, UK, CAB.
- Xiao Z., Wang X., Koricheva J., Kergunteuil A., Le Bayon R. C., Liu M., Hu F., Rasmann S., 2018. Earthworms affect plant growth and resistance against herbivores: A meta-analysis. *Functional Ecology*, 32, 150-160. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12969>
- Xiao Zhenggao, Jiang L., Chen X., Zhang Y., Defosse E., Hu F., Liu M., Rasmann S., 2019. Earthworms suppress thrips attack on tomato plants by concomitantly modulating soil properties and plant chemistry. *Soil Biology and Biochemistry*, 130, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.023>