

L'association culturale, un levier pour améliorer santé des plantes, fertilité du sol et production des systèmes de culture maraichers diversifiés ?

Perrin B.¹ et Lefèvre A.¹

¹ Domaine expérimental Alénya Roussillon, Univ. Montpellier, INRA, F-66200 Alénya

Correspondance : benjamin.perrin@inra.fr

Résumé

En production maraîchère sous abri, pratiquer l'association culturale permet de produire une gamme diversifiée de légumes frais en optimisant le foncier sous abri. Cultiver ainsi plusieurs espèces sur une même surface pendant un période significative de leur croissance peut également contribuer au contrôle des bioagresseurs, à stimuler la fertilité du sol et à améliorer les rendements et leur stabilité. La conception puis la gestion de tels systèmes diversifiés implique de nombreux choix stratégiques et opérationnels ; or toute association culturale n'est pas nécessairement pertinente. Une approche intégrative des différentes dimensions de l'association est nécessaire pour identifier les configurations bénéficiant des effets favorables visés. Une partie des résultats de l'expérimentation système Dephy 4SYSLEG traite de cette question et fait l'objet du présent article. Pendant 5 ans, deux systèmes de culture avec association de trois espèces ont été comparés à des systèmes de culture pure. Le dispositif évalue si les associations bénéficient des effets favorables attendus en termes de pression sanitaire, de fertilité biologique du sol et de rendements commercialisables. Enfin, les implications techniques de l'adoption d'association sont discutées. Concevoir et piloter une association multi-performante n'est pas simple. Si les systèmes expérimentés sont effectivement peu ou pas soumis à des traitements chimiques, des voies d'amélioration de différentes performances des associations sont identifiées dans cette étude.

Mots-clés : Légumes, Maraichage sous abris, Conduite, Bioagresseurs, Expérimentation 4SYSLEG, Association culturale

Abstract: Intercropping, a way to improve crops health, soil fertility, and production of diversified vegetables cropping systems ?

In protected vegetables production, intercropping practicing allow to produce a wide range of fresh vegetables while optimizing available productive soil area under shelter. Cropping two or more different species together in the same field during a significant part of the growth period can also bring other services such as pests and diseases control, soil fertility enhancement or yields' quantity, quality and stability improvement. Numerous strategic and operational choices are expected while designing and managing such diversified and complex systems, but not all vegetables intercropping systems are relevant. To identify the systems with expected beneficial effects, an integrative approach considering all dimensions of intercropping is required. Some of the results from the system experiment 4SYSLEG funded by the French program Ecophyto deal with this issue and are presented in this article. Two cropping systems with intercropping of three species were compared for 5 years to sole crop systems. The experiment assesses if intercropping actually benefits from expected services in terms of pests and diseases control, soil biological fertility and marketable yields. Technical consequences of intercropping are also discussed. Designing intercropping protected vegetables systems so that it brings all beneficial

effects is clearly not easy. Even if none or few pesticides were applied on those tested systems, improvement leads of the overall performances of intercrop systems are presented.

Keywords: Vegetables, Protected market gardening, Crop management, Pests and diseases, 4SYSLEG experiment, Intercropping

Introduction

L'agriculture doit répondre à des enjeux ambitieux de réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, tout en maintenant une production en quantité et en qualité satisfaisante et économiquement performante. En France le plan Ecophyto accompagne les acteurs du monde agricole dans cette démarche par différents moyens dont la mise en place d'un réseau d'expérimentation : le dispositif DEPHY EXPE. C'est dans ce contexte que l'expérimentation nommée 4SYSLEG (Lefèvre, 2016) portant sur des systèmes maraîchers sous abri a été menée de 2013 à 2018 sur la station expérimentale INRA d'Alénia-Roussillon. La présente étude s'appuie sur une partie des résultats de ce projet DEPHY EXPE.

La filière maraîchère est fortement consommatrice de produits phytopharmaceutiques, une enquête française menée en 2013 (Agreste, 2015) suggère que les cultures de tomate, melon et salade reçoivent en moyenne 12.1, 8.3 et 3.5 traitements respectivement. La diminution de l'usage des pesticides dans cette filière représente donc un enjeu majeur pour minimiser son impact sur l'environnement mais aussi pour préserver la santé publique. La demande sociétale va d'ailleurs dans ce sens. Pour y répondre certaines structures de commercialisation proposent désormais des produits sans résidus de pesticides. Parallèlement, la filière légumière connaît des évolutions récentes et profondes en termes des modes de production et de commercialisation. Ainsi, on assiste depuis quelques années à un fort développement de l'agriculture biologique, les surfaces dédiées à la production de légumes frais en AB ont augmenté de 48% entre 2011 et 2016 (Agence bio, 2017). Les circuits courts sous différentes formes se développent également, ce mode de commercialisation est pratiqué par 46% des exploitants agricoles ayant des surfaces en légumes en 2010 (PIPAME, 2017). Cette mutation est favorable à la diversification des cultures au sein des exploitations : cela permet d'allonger les rotations culturales comme le demande le cahier des charges de l'AB et de fidéliser la clientèle des ventes directes notamment en lui proposant une large gamme de produits.

Les exploitations maraîchères sont principalement localisées en zones périurbaines où le foncier est coûteux, les surfaces sont souvent réduites en particulier sous abris avec des charges liées à ces équipements à rentabiliser. Dans ce contexte, la technique de l'association culturale est de plus en plus pratiquée en maraichage sous abris. Cela consiste à cultiver simultanément 2 espèces ou plus sur une même surface pendant une période significative de leur croissance. Cette pratique permet aux producteurs ayant peu d'espace productif sous abri de produire une gamme diversifiée de légumes. La littérature scientifique met aussi en avant plusieurs avantages agronomiques de l'association culturale et décrit les mécanismes et processus écologiques sous-jacents. Parmi les avantages couramment cités on retrouve :

(i) La réduction des problèmes sanitaires expliquée par l'effet de dilution des plantes hôtes, de barrière physique, de modification de l'habitat (architecture, climat), de l'environnement chimique ou indirectement par une stimulation des auxiliaires (refuges, ressources alternatives) (Malézieux et al., 2009 ; Ratnadass et al., 2012 ; Gaba et al., 2015) ;

(ii) L'amélioration de la fertilité du sol sur ses composantes physico-chimiques mais aussi biologiques lorsque des plantes ayant des propriétés allélopathiques, antibiotiques ou pièges sont associées. Mais la diversification des espèces végétales est plus généralement susceptible de stimuler la diversité,

l'abondance et l'activité des micro- et macro-organismes du sol (Lithourgidis et al., 2011 ; Ratnadass et al., 2012 ; Duchene et al., 2017 ; Ehrmann et Ritz, 2014) ;

(iii) L'amélioration du rendement, de sa stabilité et de sa qualité expliquée par les deux premiers points, par une robustesse accrue vis-à-vis des aléas ainsi que par l'utilisation plus efficace des ressources que sont la lumière, les nutriments et l'eau lors de leur absorption et de leur conversion en biomasse (Lithourgidis et al., 2011).

Pour contribuer à répondre aux multiples enjeux de la filière, l'association culturale apparaît donc comme un levier d'intérêt potentiel majeur en maraichage sous abris notamment pour réduire l'usage des produits phytosanitaires tout en maintenant un niveau de rendement satisfaisant en qualité et en quantité (Gaba et al., 2015). Mais toute association culturale n'est pas nécessairement pertinente. Les écologues donnent un cadre conceptuel des différentes interactions possibles entre deux espèces végétales avec, du plus au moins favorable : le mutualisme, le commensalisme, le neutralisme, l'amensalisme et la compétition. Toutes ces interactions peuvent résulter d'une association culturale. La concurrence pour les ressources est bien souvent à l'origine d'effets défavorables, mais l'association culturale peut aussi complexifier la production sur les plans techniques (mécanisation, fertilisation, irrigation, protection sanitaire) et organisationnel (complexité, temps de travail) (Lithourgidis et al., 2011). Les études qui portent sur les associations sont généralement focalisées sur un couple d'espèces évalué sur le court terme vis-à-vis d'une performance isolée ; les choix techniques sont souvent peu décrits, peu justifiés et peu discutés et les retours sur la faisabilité sont rares. Brooker et al. (2015) pointent ces manquements et conseillent une évaluation plus intégrative des associations en mobilisant une approche système et interdisciplinaire.

Dans cet article, nous présentons les résultats d'une expérimentation de systèmes maraichers diversifiés sous tunnel plastique mobilisant la pratique de l'association de cultures toute l'année et pendant 5 ans (2014-2018). **Nous formulons l'hypothèse que les systèmes mobilisant l'association avec des modalités de conduite adaptées sont favorables à la régulation des bioagresseurs, à l'amélioration de la fertilité biologique du sol et qu'ils permettent ainsi de réduire le recours aux pesticides de synthèse et d'améliorer les rendements.** Cette étude vise à évaluer sur cette période, les effets de systèmes en association continue de trois espèces maraichères en comparaison des systèmes en cultures dites pures en termes de pression de bioagresseurs aériens sur le peuplement cultivé, de fertilité biologique du sol et de rendements commercialisables des cultures. Enfin, nous décrivons les implications techniques de ces différents types d'association expérimentés sur le système technique, avec une attention particulière portée sur la protection des cultures et le recours aux intrants phytosanitaires.

1. Conception et conduite des systèmes de culture

1.1 Huit systèmes de culture sont conçus

Le dispositif a permis de conduire 8 systèmes de culture distincts sous tunnel plastique pendant 9 saisons culturales entre 2014 et 2018. D'une part, deux systèmes de cultures associées (nommées CA) dont l'un conduit en agriculture biologique (CA_AB) et l'autre en protection intégrée (CA_PI), ont comporté 3 espèces associées à chaque saison culturale (automne-hiver d'octobre à mars et printemps-été de mars/avril à septembre selon les années). D'autre part, 3 systèmes en culture pure (nommées CP1, CP2 et CP3) déclinés en AB ou en PI, accueillent chacun une des trois espèces associées dans le système CA.

Les successions culturales, les variétés et les calendriers de plantation étaient les mêmes pour les systèmes en AB et en PI (Figure 1). Lorsque l'offre variétale permettait une segmentation marquée de la production comme attendu en vente directe, deux variétés visuellement différentes ont été implantées pour une même espèce dans les CA et les CP. Toutes les espèces choisies sont valorisables en vente

directe. Leur mise en place s'est faite par plantation de mottes sur paillage plastique conduites à plat ou palissées. Des engrais verts ont été semés en interculture sur les 400 m² à deux reprises (2015 et 2017).

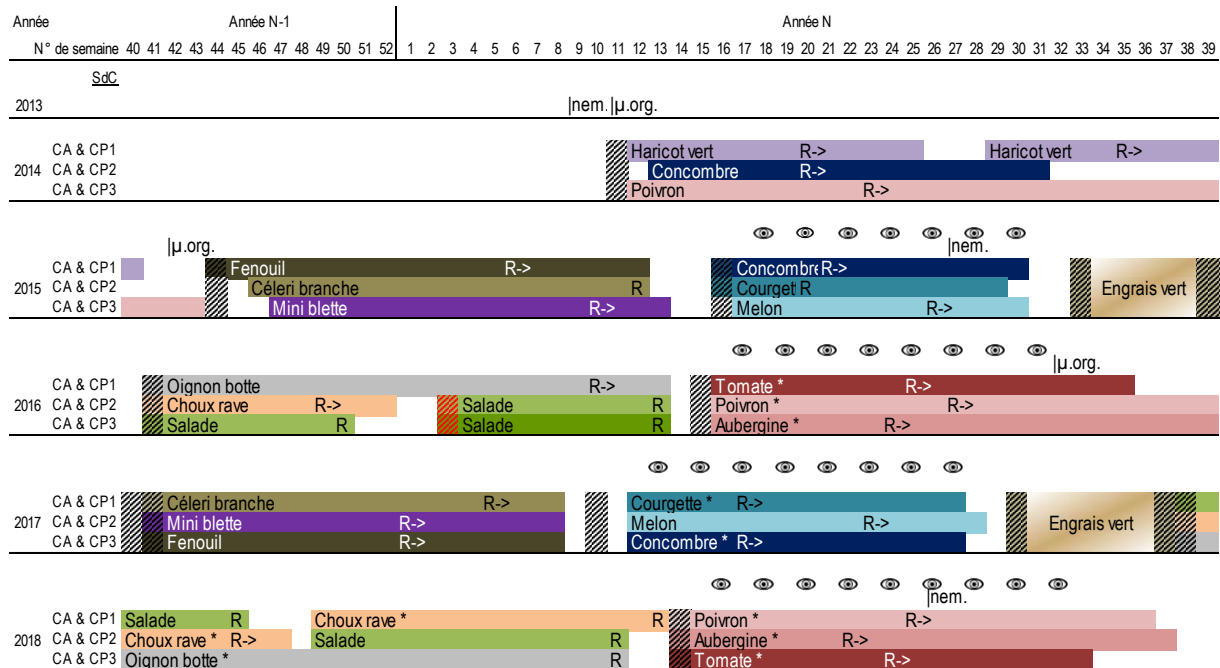


Figure 1 : Frise de 2014 à 2018 des assolements en systèmes de culture pure (CP1, CP2 et CP3) et en systèmes de cultures associées (CA).

Légende : * : 2 variétés par espèce, R : Récolte en 1 passage, R-> : 1^{ère} récolte d'un produit cueilli en plusieurs fois, Hachures noire : travail du sol en CP et CA, hachure rouge : travail du sol en CP uniquement, ☉ : Observations de bioagresseurs aériens, |nem. : Prélèvements de sol pour analyse nématologique, |µ.org. : Prélèvements de sol pour l'étude des microorganismes du sol.

1.2 Conception et conduite des associations d'espèces (systèmes CA)

En neuf saisons culturales, le système CA a permis la succession et le test de cinq associations différentes (2 en hiver et 3 en été) et quatre d'entre elles ont été répétées sur deux saisons. Plusieurs paramètres ont été considérés pour choisir les espèces associées. Avant tout, les espèces devaient avoir des créneaux et des durées de culture proches afin que le sol puisse être travaillé entre chaque saison et ainsi optimiser l'usage du sol. Cependant, des enchaînements de deux cultures à cycle court de haricot vert en été 2014, et de chou rave et salade en hiver 2015-16 et 2017-18 ont pu être associées à des cultures à cycle plus long de poivron/concombre et d'oignon botte respectivement. Les plantations des 3 espèces associées étaient donc *in fine* synchronisées ou alors faiblement, modérément ou fortement décalées dans le temps (Tableau 1). Les trois espèces associées devaient aussi avoir des besoins proches en nutriments et en eau avec des méthodes d'irrigation compatibles.

Les espèces ont été agencées dans l'espace puis palissées et taillées de manière à maximiser leur proximité et leurs densités de plantation tout en évitant la concurrence inter- et intra-spécifique, et en veillant à la faisabilité de la mise en place puis de la conduite des plantes. La prise en compte de ces objectifs nous a amené à arranger les espèces selon quatre modes d'agencement différents. Ainsi dans les 100 m² alloués à chaque système CA, les espèces sont soit alternées sur le rang (AsR), alternées par rangs (ApR), agencées par bandes longitudinales (BL) dans la longueur ou par bandes transversales à la longueur du tunnel (BT) (Figure 2, Tableau 1). En fonction des agencements définis, nous avons choisi les manières de fertiliser et d'irriguer les cultures associées permettant de respecter au mieux les besoins théoriques de chaque espèce sans pénaliser la faisabilité technique.

Tableau 1 : Type d'agencement spatial et d'enchaînement temporel des cultures en CA et CPs

	2014		2014-15	2015	2015-16	2016	2016-17	2017	2017-18	2018
CA & CP1	Haricot vert	Haricot vert	Fenouil	Concombre*	Oignon botte	Tomate*	Céleri branche.	Courgette*	Salade	Chou rave*
CA& CP2	Concombre		Céleri branche	Courgette*	Chou rave	Poivron*	Mini blette	Melon	Chou rave*	Salade
CA& CP3	Poivron		Mini blette	Melon	Salade	Aubergine*	Fenouil	Concombre*	Oignon botte*	Poivron*
Ecart entre les dates de plantation des 3 espèces de CA	Modéré	Fort	Modéré	Faible	Aucun	Fort	Aucun	Aucun	Aucun	Fort
Agencement spatial des 3 espèces en CA	ApR		BT	AsR	BL	AsR	BT	AsR	BL	AsR
	Alternance par rang		Bandes transversales	Alternance sur les rangs	Bandes Longitudinales	Alternance sur les rangs	Bandes transversales	Alternance sur les rangs	Bandes Longitudinales	Alternance sur les rangs

* : 2 variétés par espèce ; Aucun : pas d'écart de date, Faible : écart <1 semaine, Modéré : écart <1 mois, Fort : écart >1 mois.

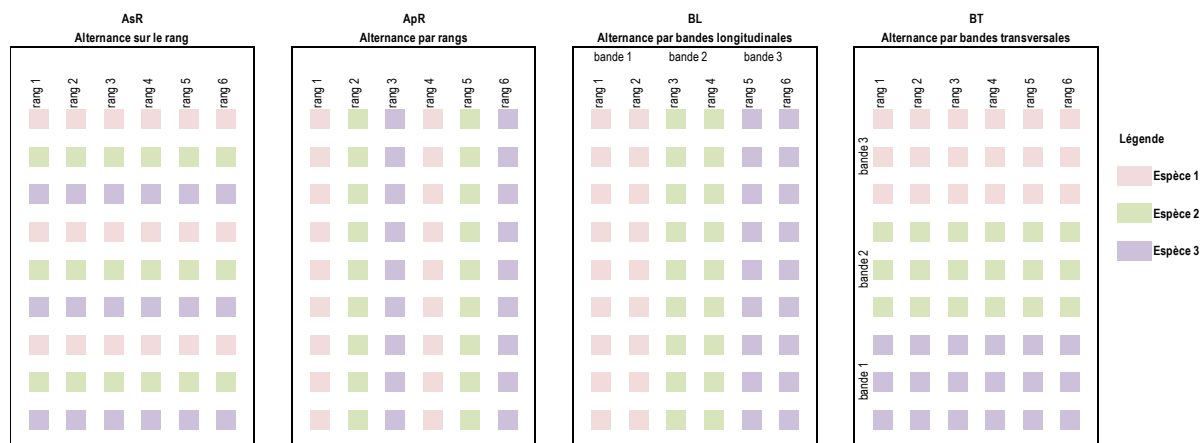


Figure 2 : Schématisation des quatre modes d'agencement testés dans l'espace de 100m² pour les systèmes CA. Dans ce schéma, les nombres de rangs et de plantes par rang sont choisis à titre d'exemple.

1.3 Conception et conduite des systèmes en culture pure (CP)

Les espèces ont été attribuées aux différents systèmes CP1, CP2 et CP3 de manière à allonger au maximum les délais de retour de chaque espèce et famille botanique. A chaque saison, les trois cultures en CP d'un même tunnel ont été conduites de manière indépendantes et optimales selon les références techniques disponibles et l'expertise interne et externe à la station expérimentale.

1.4 Stratégies de protection sanitaire des cultures en CA et CP

Les règles de décision qui guidaient la protection des cultures étaient identiques pour les CP et les CA d'un même mode de conduite. Les pressions biotiques (ravageurs et maladies aériennes) étaient suivies de manière qualitative et hebdomadaire dans chacun des 8 systèmes. Ces observations dédiées au pilotage de la protection des cultures, permettaient d'activer les règles de décision et donc d'adapter les actions de protection aux pressions subies dans chaque système. Ainsi lorsque des pressions similaires étaient observées en CA et en CP d'un même mode de conduite, les mêmes interventions y étaient réalisées au même moment sous réserve de faisabilité en CA. A l'inverse, des pressions différentes en CA et CP pouvaient nous amener à des actions différentes.

2. Expérimentation et évaluation des 8 systèmes de culture

2.1 Dispositif expérimental

L'essai a été conduit sur la station expérimentale INRA Alénya-Roussillon (42°38'14.98"N ; 2°58'17.43"E) sur une période de 5 ans (5 saisons d'été et 4 d'hiver) entre 2014 et 2018 dans 2 tunnels plastiques de 400m². Les tunnels ont été installés début 2013 sur un sol de type limono-sableux (pH eau de 7.8 et taux de matière organique de 1.4% à 0-30cm en 2013) précédemment cultivés en

céréales depuis plusieurs années en agriculture conventionnelle. Chaque tunnel est équipé de 4 réseaux d'irrigation différents, d'ouvertures à commande automatisée sur consigne de température au faitage et d'ouvertures manuelles sur les côtés.

Chaque tunnel comporte quatre systèmes de culture dont un en association (CA) et 3 en culture pure (CP1, CP2 et CP3). Chaque système de culture occupait ainsi une surface 100m² sous l'abri (Figure 3). Dès 2013, un tunnel a été conduit selon le cahier des charges de l'agriculture biologique (AB) et l'autre en protection intégrée (PI).

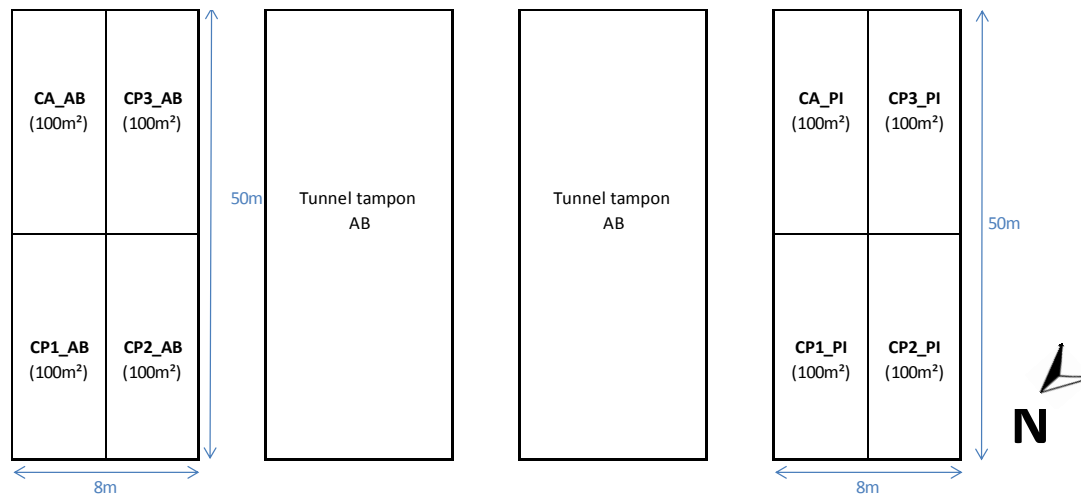


Figure 3 : Disposition spatiale des systèmes de culture dans les tunnels conduits en AB et en PI dans l'expérimentation 4SYSLEG (AB agriculture biologique, PI protection intégrée ; CP culture pure, CA cultures associées).

2.2 Mesures expérimentales

Le dispositif vise à évaluer les effets de l'association sur l'état sanitaire des cultures, la fertilité biologique du sol et sur les rendements. Les variables mesurées pour en rendre compte portent sur la pression des bioagresseurs sur les cultures, sur l'état sanitaire des racines, sur les communautés de nématodes et l'activité microbienne dans le sol, ainsi que sur les rendements commercialisables en vente directe.

2.2.1 Présence des bioagresseurs aériens en cultures d'été

Parmi le cortège de maladies et de ravageurs aériens présents sur les cultures à production estivale, cinq groupes taxonomiques ont été particulièrement observés : aleurodes, pucerons, acariens, thrips et oïdium blanc. La pression de ces groupes de bioagresseurs a été suivie sur les cultures des huit systèmes pendant les saisons d'été en 2015, 2016, 2017 et 2018. Pour chaque système et chaque saison, nous avons observé 4 feuilles par plante sur 4 plantes par variété, toutes les deux semaines pendant les 2 à 3 premiers mois de culture et noté la présence ou l'absence des bioagresseurs, puis nous avons calculé le pourcentage de feuilles touchées par plante (dates des observations en Figure 1, échantillonnage en Tableau 2).

2.2.2 Etat sanitaire des racines et fertilité biologique du sol

L'état sanitaire des racines des cultures a été suivi sur les cultures d'été des huit systèmes en 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018 (Tableau 2). A l'arrachage de chaque espèce, un tiers des plantes est déraciné selon un maillage régulier puis, après nettoyage des racines à l'eau, un Indice de Nécrose Racinaire (INR) de 0 à 10 est attribué à chaque plante en fonction de la proportion du système racinaire impacté par des nécroses. L'échelle de notation (0 : 0%, 1 : 10%, ... 10 : 100%) est inspirée de l'échelle de Zeck (1971) utilisée pour évaluer le niveau d'infestation d'une plante par les nématodes à galles.

Les populations de nématodes du sol ont été suivies par des prélèvements de sol réalisés en 2013, 2015 et 2018 respectivement aux semaines calendaires 9, 27, et 28. Pour chaque année de suivi et chacun des huit systèmes, trois échantillons composites de 500g de sol (5 prélèvements/échantillon) ont été prélevés à la tarière sur l'horizon 0-30cm puis tamisés à 5mm (dates de prélèvement en Figure 1, Tableau 2). Les analyses de la nématofaune ont été réalisées selon la norme NF ISO 23611-4 modifiée (Seinhorst, 1962) par le laboratoire de nématologie de l'IRD de Montpellier en 2013 et 2015, et par celui d'Elisol en 2018. Les nématodes ont été extraits par élutriation, puis identifiés (clés de Mai et Mullin, 1996) et dénombrés par genre ou famille pour les nématodes phytoparasites et seulement dénombrés pour les non-phytoparasites.

L'activité biologique des sols a été suivie sur 4 systèmes (CA_AB, CA_PI, CP1_AB et CP1_PI) par des prélèvements de sol réalisés en 2013, 2015 et 2016¹ respectivement aux semaines 11, 42 et 32 (Figure 1, Tableau 2). Pour chaque année de suivi et chaque système, trois échantillons composites de 50g de sol (5 prélèvements/échantillon) ont été prélevés à la tarière sur l'horizon 0-30cm, tamisés à 5mm et envoyés au laboratoire INRA Génosol² pour stockage des échantillons puis analyse par qPCR pour quantifier la biomasse moléculaire microbienne et de la densité bactérienne et fongique. Le ratio champignon/bactérie a été calculé à partir de ces densités.

2.2.3 Rendements commercialisables

Les rendements commercialisables en vente directe de chaque espèce ont été estimés sur des parcelles agronomiques en kg.m⁻² pour les huit systèmes de culture à chaque saison depuis l'été 2014 jusqu'à l'été 2018. Pour distinguer à chaque récolte, les légumes commercialisables des déchets, nous avons conçu des grilles de tri adaptées aux critères de la vente directe locale, spécifiques à chaque produit et identiques pour les 8 systèmes. Pour évaluer et expliquer l'effet des associations sur les rendements, nous avons calculé les DER (Density Equivalent Ratio, Malézieux et al., 2009), LER (Land Equivalent Ratio, Malézieux et al., 2009) à chaque saison pour les deux modes de production (AB et PI) selon les formules suivantes :

$$DER = \sum_{i=1}^3 DER_i = \sum_{i=1}^3 D_{CAi}/D_{CPi}$$

$$LER = \sum_{i=1}^3 LER_i = \sum_{i=1}^3 R_{CAi}/R_{CPi}$$

DER_i et LER_i sont les ratios partiels calculés pour chaque espèce i à partir des densités (D, exprimé en plants.m⁻²) et rendements commercialisables (R, exprimés en kg.m⁻²), les indices CA_i et CP_i indiquent qu'il s'agit respectivement des valeurs de l'espèce i en CA et CP. Les densités et rendements sont donc calculés pour chaque système sur une surface de 100m². Lorsque deux variétés étaient cultivées pour une même espèce, nous avons utilisé la somme de leur densité et la moyenne de leur rendement. Lorsque deux cultures s'enchaînaient sur une même saison (été 2014, hivers 2015-16 et 2017-18) nous avons pris la somme de leur densité et de leur rendement.

Tableau 2 : Echantillonnage réalisé pour l'acquisition des données

Facteurs	Association	Mode de conduite	Saison													
			2013	2013-14	2014	2014-15	2015	2015-16	2016	2016-17	2017	2017-18	2018			
Protocoles	Individu	Nombre	CA	CP	AB	PI										
Bioagresseurs aériens	plante (4 feuilles/plante)	2720	1360	1360	1360	1360				528		768		560		864
Indices de nécroses racinaires	système racinaire	2446	682	1764	1223	1223				320		516		376		368
Nématodes du sol	échantillons de sol	72	18	54	36	36	24			24						24
Activité biologique	échantillons de sol	36	18	18	18	18	12			12		12				

¹ Pour l'activité biologique des sols, des prélèvements ont également été réalisés en octobre 2018 pour qualifier l'état final des systèmes mais n'ont pas pu être encore analysés. De même, des prélèvements en CP2 et CP3 au fil des années restent à traiter.

² http://www.dijon.inra.fr/plateforme_genosol

2.2.4 Indice de Fréquence de Traitement

L'Indice de Fréquence de Traitement (IFT) est calculé en CA sur 100m² et en CP sur 300m² selon la formule ci-dessous pour n produits appliqués

$$IFT = \sum_{i=1}^n \left(\frac{da_i}{dr_i} \right) * sa_i$$

Où da_i , dr_i et sa_i sont respectivement la dose appliquée, la dose de référence du produit i et les proportions de surface traitées avec ce produit. Les produits ont été classés dans deux catégories distinctes : chimique ou biocontrôle selon la liste en vigueur en mars 2019 établie dans la note de service éditée par ministère français de l'agriculture et de l'alimentation. Ainsi IFT chimique et IFT biocontrôle sont calculés séparément.

2.3. Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées sous R v3.5.1 (R Development Core Team, 2005) avec un seuil de significativité de 5%.

2.3.1 Bioagresseurs aériens en cultures d'été

Pour chaque taxon de bioagresseur suivi, nous avons utilisé des modèles mixtes (fonction lmer du package 'lmerTest') pour tester les effets de l'**association culturale** (CA ou CP), du **mode de conduite** (AB ou PI), de l'**espèce végétale** et de leurs interactions (facteurs à effets fixes) sur le **pourcentage de feuilles touchées par plante**. Afin de tenir compte de la structuration du jeu de données, l'**imbrication** du facteur **espèce végétale dans la semaine calendaire puis dans l'année** a été considérée comme facteur à effet aléatoire. Des ANOVA de type III ont été effectuées puis des tests de Tukey avec la fonction lsmeans du package 'lsmeans' pour comparer le pourcentage moyen de feuilles touchées/plante en cultures pures et associées pour chaque espèce végétale et chaque mode de conduite.

2.3.2 Etat sanitaire des racines et fertilité biologique du sol

Nous avons utilisé un modèle linéaire généralisé avec une loi de poisson (fonction glm du package 'stats') pour tester les effets de l'**association culturale**, du **mode de conduite**, de l'**année** et de leurs interactions sur l'**indice de nécrose racinaire** (INR). Une analyse de déviance a été effectuée puis des tests de Tukey avec la fonction lsmeans du package 'lsmeans' pour comparer deux à deux les INR moyens obtenus en cultures pures et associées pour chaque année et pour chaque mode de conduite.

Pour **chaque taxon de nématodes**, nous avons utilisé des modèles mixtes (fonction lmer du package 'lmerTest') pour tester les effets de l'**association culturale**, du **mode de conduite**, de l'**année** et de leurs interactions (effets fixes) sur les **abondances de nématodes** transformés en $\log_{10}(x+1)$; la **zone de prélèvement** des échantillons a été utilisée comme facteur à effet aléatoire. Des ANOVA de type III ont été effectuées puis des tests de Tukey avec la fonction lsmeans du package 'lsmeans' pour comparer les moyennes obtenues pour chaque modalité des facteurs fixes.

Une analyse de variance multivariée par permutation a aussi été réalisée sur la **structure des communautés de nématodes**. Pour cela les données d'abondance de nématodes des échantillons prélevés en 2015 et 2018 ont été transformées en racine carrée (x) et la matrice de similarité (coefficient de Bray-Curtis) a été calculée à l'aide de la fonction vegdist du package 'vegan'. Un test permanova a ensuite été réalisé à l'aide de la fonction adonis2 ; ce test permet d'évaluer statistiquement les effets de l'**association**, du **mode de conduite** et de l'**année** sur la communauté nématofaunique ainsi que les interactions éventuelles entre traitement. La même procédure a été suivie sur les données de 2013 pour vérifier que la structure des communautés était homogène avant la mise en place de l'essai.

Nous avons utilisé des modèles mixtes (fonction lmer du package 'lmerTest') pour tester les effets de l'**association culturelle**, du **mode de conduite**, de l'**année** et de leurs interactions (effet fixes) sur les **biomasses moléculaires microbiennes** et les **ratios C/B** transformés en $\text{Asin}(\text{racine}(x))$; la **zone de prélèvement** des échantillons a été utilisée comme facteur à effet aléatoire. Des ANOVA de type III ont été effectuées puis des tests de Tukey avec la fonction lsmeans du package 'lsmeans' pour comparer deux à deux les moyennes obtenues en cultures pures et associées pour chaque année et pour chaque mode de conduite.

3. Résultats

3.1 Pression des bioagresseurs aériens en cultures d'été

La pression des aleurodes, des thrips, des acariens et de l'oïdium blanc sont soumises à un effet significatif de l'**espèce végétale** (Tableau 3), ce qui révèle des différences importantes de sensibilité ou d'attractivité des espèces végétales vis-à-vis de ces groupes de bioagresseurs. Cependant, les bioagresseurs observés n'ont pas fait systématiquement l'objet d'une détermination taxonomique précise. Il est très probable que d'une espèce végétale à l'autre, certains groupes de bioagresseurs soient composés de différentes espèces, sous-espèces ou souches ; c'est notamment le cas pour les différentes espèces de pucerons qui ont des gammes d'hôtes privilégiées. L'association de ces espèces peut donc permettre de réduire les pressions des bioagresseurs en perturbant leur arrivée, leur développement et leur expansion. La pression des pucerons, des thrips et des acariens sont soumises à un effet significatif du **mode de conduite**. L'**association culturelle** a un effet significatif sur la pression des pucerons et de l'oïdium blanc. L'**effet de l'association varie selon le mode de conduite** pour les aleurodes et les acariens, **selon l'espèce végétale** pour les aleurodes, les pucerons, les acariens et l'oïdium blanc et **selon la conduite et l'espèce** pour les aleurodes et les thrips (Figure 4).

Tableau 3 : Effet de l'association culturelle, du mode de conduite, de l'espèce végétale, de leurs interactions sur la pression de cinq groupes de bioagresseurs

	Aleurodes	Pucerons	Thrips	Acariens	Oïdium blanc
Espèce	0.032281 *	0.2109	2.217e-13 ***	0.0146038 *	0.003159 **
Conduite	0.623179	7.219e-14 ***	0.01439 *	0.0055290 **	0.824765
CA.CP	0.493536	< 2.2e-16 ***	0.26882	0.5493323	7.828e-07 ***
Espèce:Conduite	0.012086 *	4.096e-05 ***	0.00735 **	9.841e-08 ***	1.111e-05 ***
Espèce:CA.CP	3.515e-16 ***	4.906e-14 ***	0.89424	1.736e-06 ***	1.408e-07 ***
Conduite:CA.CP	0.008658 **	0.2226	0.54159	0.0009965 ***	0.318984
Espèce:Conduite:CA.CP	0.001067 **	0.2728	7.620e-05 ***	0.0785810 .	0.532937

Les probabilités issues des analyses variance (type III) sont données dans le tableau ainsi que les codes de significativité : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1.

La pression des **aleurodes** n'a pas été impactée par l'association pour les solanacées. Pour les cucurbitacées, l'effet de l'association sur les aleurodes dépend du mode de conduite et de l'espèce : il est favorable sur melon et courgette en AB et sur melon en PI et défavorable sur concombre en PI (c'est-à-dire plus de pression aleurodes sur concombre en CA_PI qu'en CP_PI) (Figure 4.a). Aucun effet défavorable de l'association n'a été montré sur la pression des **pucerons** et de l'**oïdium blanc** (Figure 4.b et 4.e); quelles que soient l'espèce et la conduite, l'effet de l'association est soit non significatif, soit favorable. L'effet de l'association sur la pression des **thrips** est non significatif pour toutes les espèces végétales hormis pour le concombre pour lequel l'effet de l'association est favorable en AB mais défavorable en PI (Figure 4.c). En AB, l'effet de l'association sur la pression des **acariens**

est non significatif pour toutes les espèces végétales, sauf pour le concomre où l'effet association est favorable réduisant la pression des acariens et pour la courgette où l'effet est défavorable augmentant la pression des acariens. En PI l'association a eu un effet sur la pression des acariens non significatif pour la courgette, le melon et la tomate, favorable pour le concomre et défavorable pour le poivron, l'aubergine (Figure 4.d).

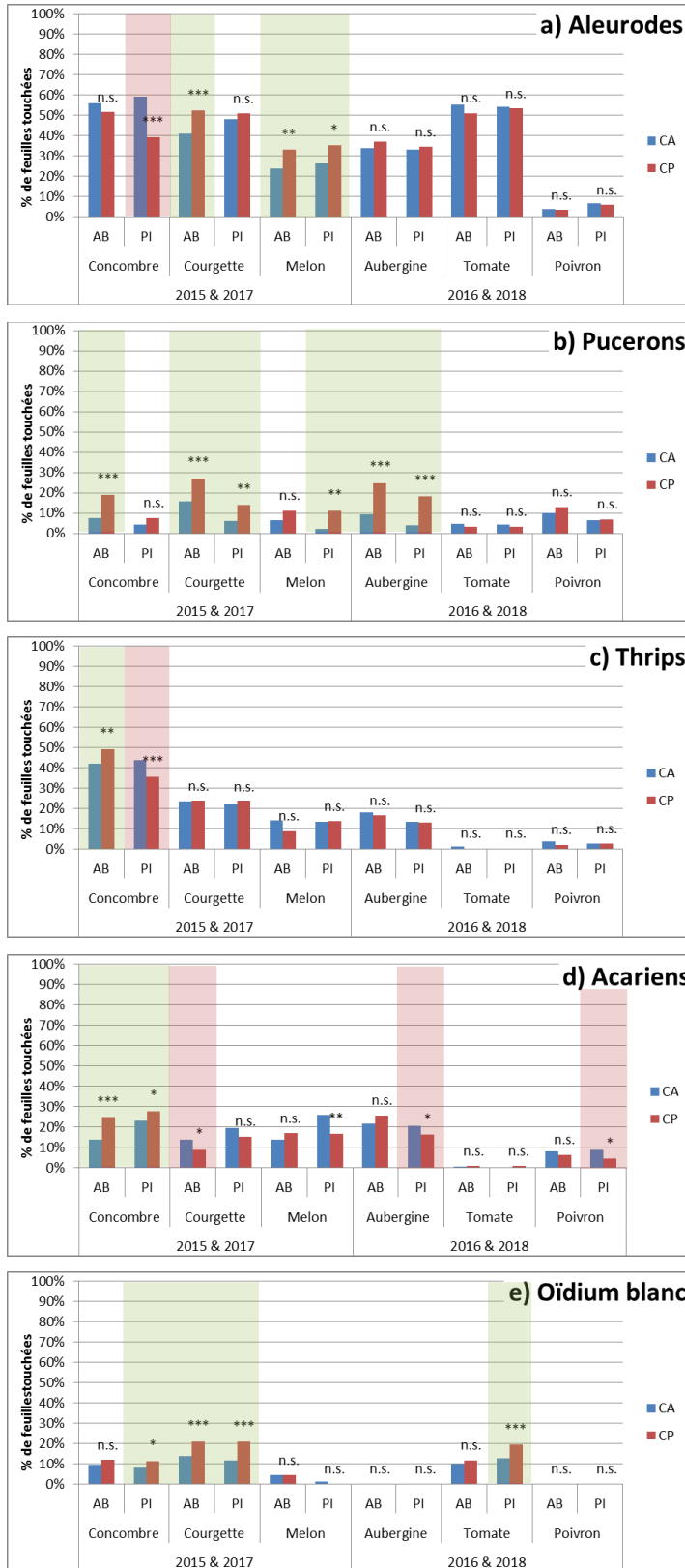


Figure 4 : Effet de l'association sur la pression des groupes aleurodes (a), pucerons (b), thrips (c), acariens (d) et oïdium blanc (e) pour chaque espèce végétale en AB et en PI.

Les fonds verts et rouges indiquent respectivement les couples espèce végétale*mode de conduite pour lesquels l'association a eu un effet significativement favorable et défavorable sur la régulation des bioagresseurs. La significativité de ces effets selon des tests de Tukey est notée 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 'ns' 1.

Le fait de conduire les modalités CP et CA sous les mêmes abris les met dans des conditions environnementales proches, mais c'est aussi susceptible de générer un biais lié aux flux de populations de bioagresseurs entre modalités qui auraient tendance à homogénéiser les pressions entre celles-ci. Les résultats montrent toutefois un effet favorable de l'association vis-à-vis des pucerons et de l'oïdium blanc alors que les effets de l'association sur les thrips les acariens et les aleurodes varient en fonction du système technique.

3.2 Etat sanitaire des racines et fertilité biologique du sol

3.2.1 Etat sanitaire des racines

L'association culturelle et le mode de conduite n'ont pas d'effet significatif sur les indices de nécrose racinaire, mais les effets des interactions **association*conduite** et **association*année** sont significatifs (Tableau 4). L'effet de l'association sur les INR dépend donc de l'année et de la conduite : dans certaines situations (PI en 2014) l'état sanitaire des racines est déprécié par l'association et dans d'autres (AB et PI en 2018) il est amélioré. L'effet de l'association sur les INR est non significatif pour toutes les autres combinaisons année*mode de conduite (Figure 5). En tendance les racines des cultures associées sont de plus en plus saines par rapport à celles des cultures pures.

Tableau 4 : Effet de l'association culturelle, du mode de conduite, de l'année et de leurs interactions sur les variables de fertilité biologique du sol

	CA.CP	Conduite	Année	CA.CP:Conduite	CA.CP:Année	Conduite:Année	CA.CP:Conduite:Année
INR			***	**	***	***	
Pratylenchus			***				
Tylenchidae			***				**
Telotylenchidae	*	*	***		*		**
Non_phytoparasites			***				**
Tylenchorhynchus			***				
Paratylenchus				*			
Aphelenchus							
Meloidogyne							
structure communauté (2013)		**	-			-	-
structure communauté (2015-18)		*	***				
Biomasse moléculaire microbienne							
Ratio C/B	**		*				**

La significativité des effets des facteurs et de leurs interactions sur les variables de fertilité du sol est notée : 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 1, - : non concerné.

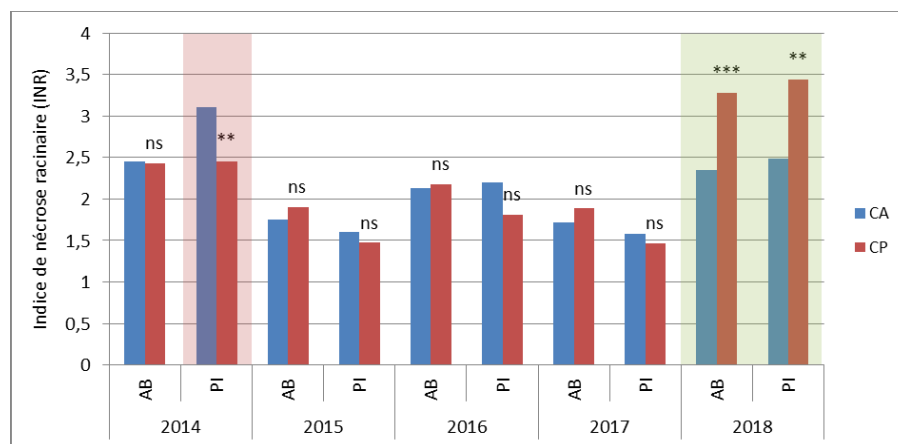


Figure 5 : Effet de l'association sur l'état sanitaire des racines par année en AB et en PI

Les fonds verts et rouges indiquent respectivement les couples année*mode de conduite pour lesquels l'association a eu des effets significativement favorables et défavorables sur l'état sanitaire des racines. La significativité de ces effets selon des tests de Tukey est notée 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 1, - : non concerné.

L'état sanitaire des racines dépend des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, des pratiques culturales et de l'âge des racines au moment de l'observation. L'association culturale est susceptible de modifier ces trois éléments ; les mesures observations des INR étaient réalisées lors de l'arrachage des cultures, qui pouvaient intervenir à des dates différentes en CA et en CP pour un même mode de conduite et une même espèce. Le fait d'agencer les espèces par alternance régulière sur le rang (AsR) dans les CA d'été de 2015 à 2018 nous a amené à synchroniser les arrachages des 3 espèces associées pour ne pas perturber les racines des cultures encore en place par le retrait des racines des cultures finies. Ainsi lors des observations, les racines étaient souvent plus vieilles en CA qu'en CP donc potentiellement moins saines.

3.2.2 Nématofaune

Parmi tous les taxons de nématodes identifiés, seuls les Telotylenchidae sont soumis à un effet significatif de l'**association** et du **mode de conduite** (Tableau 4). L'**année** a eu un effet significatif sur les abondances de tous les taxons hormis sur les genres Paratylenchus et Meloidogyne largement sous représentés. L'**association culturale** a eu un effet **défavorable** sur la nématofaune en stimulant le développement des nématodes phytoparasites de la famille des Telotylenchidae en 2015 en AB et en PI, et ceux des genres Tylenchorhynchus et Paratylenchus en 2018 en PI. Un effet **favorable** de l'association a été observé sur les Tylenchorhynchus (abondance plus faible en CA qu'en CP) en AB en 2018 (Tableau 5).

Tableau 5 : Effets de l'association sur l'abondance des différents taxons de nématodes

Année Mode de conduite CA/CP	2013				2015				2018			
	AB		PI		AB		PI		AB		PI	
	CA	CP	CA	CP	CA	CP	CA	CP	CA	CP	CA	CP
Pratylenchus (ind/dm ³)	420 a	547 a	680 a	671 a	944 a	463 a	778 a	648 a	74 a	21 a	160 a	185 a
Tylenchidae (ind/dm ³)	779 a	1123 a	947 a	1087 a	0 a	0 a	0 a	74 a	6518 a	3838 a	728 a	1572 a
Telotylenchidae (ind/dm ³)	24 a	71 a	387 a	267 a	222 b	0 a	167 b	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a
Non_phytoparasites (ind/dm ³)	2823 a	5299 a	9507 a	5636 a	14833 a	16907 a	13778 a	15944 a	13235 a	8597 a	8889 a	5230 a
Tylenchorhynchus (ind/dm ³)	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	383 a	1632 b	1518 b	901 a
Paratylenchus (ind/dm ³)	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	16 b
Aphelenchus (ind/dm ³)	0 a	0 a	0 a	0 a	111 a	56 a	0 a	19 a	0 a	0 a	0 a	0 a
Meloidogyne (ind/dm ³)	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	0 a	18 a	72 a

Les fonds verts et rouges indiquent respectivement les couples année*mode de conduite pour lesquels l'association a eu des effets significativement favorables et défavorables sur l'abondance du taxon de nématodes. Les lettres situées à droite des moyennes correspondent aux groupes homogènes de traitement pour chaque couple année*mode de conduite d'après des tests de Tukey.

L'analyse multivariée des prélèvements de **2013** nous indique que les **structures des communautés** de nématodes étaient différentes entre le tunnel conduit AB et celui conduit en PI avant la mise en place de l'essai mais homogène au sein de chaque tunnel. L'analyse multivariée des prélèvements de **2015 et 2018** montre que la structure des communautés de nématodes est soumise à un effet significatif de l'**année** et du **mode de conduite** mais qu'elle n'a pas été impacté par l'**association culturale** (Tableau 4).

3.2.3 Activité microbienne du sol

Les bioindicateurs de biomasse moléculaire microbienne BMM et de rapport de densités de champignons sur bactéries (C/B) caractérisent la qualité biologique du sol en lien avec le rôle de cette biomasse dans la régulation, la transformation et le stockage des nutriments du sol. Comme souligné par Thibault et Lecompte (2018), si les indicateurs quantitatifs et qualitatifs de biomasse microbienne sont très réactifs aux pratiques, les référentiels pour l'interprétation des résultats en cultures maraichères restent à développer. Les données produites via 4SYSLEG pourront y contribuer.

En **2013**, avant la mise en place de l'essai, les **BMM** du sol étaient similaires sur les parcelles qui ont accueillies les systèmes CP1 et CA en AB et en PI. Pour les 2 modes de conduite testés, la mise en œuvre de **l'association culturale** a eu tendance à réduire la biomasse moléculaire microbienne du sol par rapport aux systèmes CP1 en **2015 et 2016**. Cette réduction n'a été significative qu'en 2015 pour la conduite en PI. En **2013**, avant la mise en place de l'essai, les **ratios C/B** étaient déjà (très) élevés et significativement supérieurs sur les parcelles qui ont accueilli les systèmes CA à ceux des parcelles qui ont accueilli les systèmes CP1. Ces différences observées à l'état initial pour les deux modes de conduite n'étaient plus significatives en **2015 et 2016** suite à la mise en œuvre de **l'association culturale** ; il semblerait donc que l'association culturale ait favorisé le développement des bactéries et/ou défavorisé celui des champignons dans le sol par rapport à une conduite en culture pure (voir Figure 6).

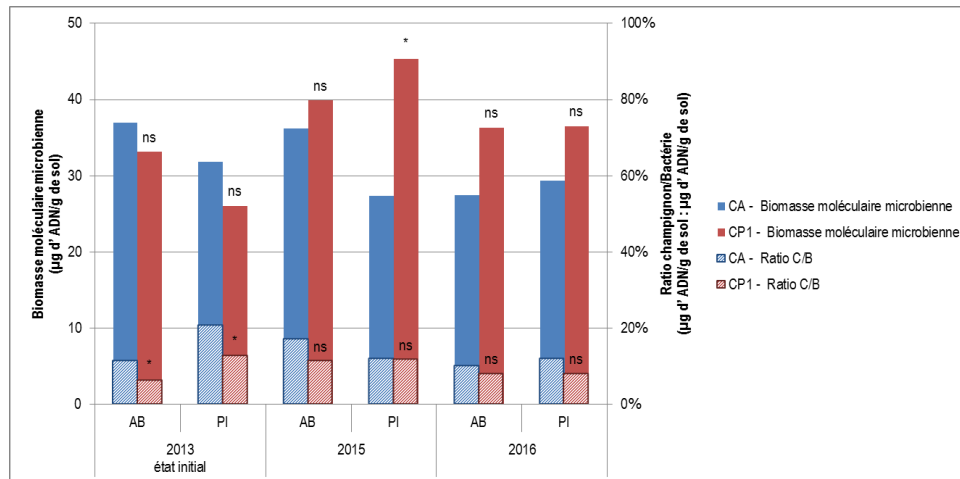


Figure 6 : Effet de l'association sur l'activité microbienne du sol par année en AB et en PI

La significativité des différences entre les valeurs en CA et en CP1 pour chaque couple mode de culture*année selon des tests de Tukey est notée 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 'ns' 1.

Au vu des résultats obtenus, l'association culturale semble avoir peu impacté les variables de fertilité biologique du sol. La mise en œuvre de cette pratique a favorisé le développement des nématodes phytoparasites de la famille des Telotylenchidae et des bactéries et/ou défavorisé celui des champignons par rapport aux systèmes en cultures pures. L'effet de l'association sur l'état sanitaire des racines varie en fonction de l'année et du mode conduite. L'ensemble de l'interprétation de ces données liées à la biologie du sol restent cependant à consolider avec les données des échantillons 2018 notamment.

3.3 Rendements commercialisables

L'effet de **l'association** sur les **rendements** varie logiquement selon la **saison** alors qu'il est peu impacté par le **mode de conduite** (Tableau 6). En moyenne sur les 9 saisons, les associations mises en place améliorent légèrement les rendements commercialisables dans les deux modes de conduite, puisque les LER totaux moyens en AB et PI sont de 1,04. Cette valeur signifie qu'il faut 1,04 ha de cultures pures pour produire la même quantité de légumes que sur 1 ha de cultures associées. Les rendements ont été améliorés en CA par rapport à CP pour 5 saisons mais réduits pour les 4 autres dans les deux modes de conduite. Les rendements de chacune des trois espèces associées répondent différemment à l'association, la perte de rendement induite par l'association sur une espèce est souvent compensée par un gain de rendement sur une autre espèce.

Tableau 6 : Land Equivalent Ratios (LER) et Density Equivalent Ratios (DER) partiels et totaux par saison en AB et PI

Saison	SdC Conduite	CP1 & CA		CP2 & CA		CP3 & CA		TOTAL				
		Espèce	DER ₁	LER ₁	Espèce	DER ₂	LER ₂	Espèce	DER ₃	LER ₃	DER _{total}	LER _{total}
été 2014	AB	Haricot (1+2)	0,63	1,02	Concombre	0,25	0,16	Poivron	0,29	0,15	1,16	1,33
	PI			0,87			0,25					0,11
hiver 2014-2015	AB	Fenouil	0,33	0,35	Céleri	0,33	0,33	Miniblette	0,33	0,32	1,00	1,00
	PI			0,34			0,19					0,63
été 2015	AB	Concombre	0,34	0,30	Courgette	0,36	0,44	Melon	0,26	0,13	0,95	0,87
	PI			0,37			0,52					0,07
hiver 2015-2016	AB	Oignon	0,29	0,26	Chou-rave + Salade	0,29	0,11	Salade (1+2)	0,29	0,42	0,86	0,80
	PI			0,35			0,11					0,32
été 2016	AB	Tomate	0,29	0,44	Poivron	0,39	0,29	Aubergine	0,33	0,42	1,02	1,14
	PI			0,43			0,24					0,47
hiver 2016-2017	AB	Céleri	0,33	0,33	Miniblette	0,31	0,32	Fenouil	0,33	0,25	0,98	0,90
	PI			0,28			0,31					0,32
été 2017	AB	Courgette	0,42	0,52	Melon	0,55	0,58	Concombre	0,34	0,29	1,31	1,39
	PI			0,49			0,51					0,26
hiver 2017-2018	AB	Salade + Chou rave	0,33	0,34	Chou-rave + Salade	0,33	0,37	Oignon	0,33	0,43	1,00	1,14
	PI			0,39			0,29					0,40
été 2018	AB	Poivron	0,23	0,12	Aubergine	0,26	0,28	Tomate	0,20	0,42	0,69	0,82
	PI			0,12			0,29					0,39
MOYENNE AB				0,41		0,32		0,30		0,31	0,98	1,04
MOYENNE PI				0,40		0,30				0,33		1,04

La couleur attribuée aux Land Equivalent Ratio partiels indique l'effet qu'a l'association sur le rendement commercialisable par plante de l'espèce « i » : vert si (LER_i>DER_i) l'association améliore le rendement commercialisable par plante de l'espèce « i », rouge (LER_i<DER_i) si elle le réduit. Le même jeu de couleur est utilisé sur les LER totaux, vert si (LER>1) l'association améliore le rendement commercialisable par m² toutes espèces confondues, rouge (LER<1) si le rendement est réduit par l'association.

Certaines associations d'espèces ont pu être expérimentées deux fois au cours de l'expérimentation, on observe alors que l'effet de l'association sur le rendement n'est pas stable d'une fois sur l'autre. Ces variations d'effet inattendues peuvent s'expliquer par des conditions sanitaires et climatiques différentes ou par des modifications de l'agencement des plantes ou encore de la conduite des CA et/ou des CP entre la 1^{ère} et la 2^{nde} mise en œuvre. Ainsi, dans la CA de l'été 2015 le melon était planté à 0.24 plant/m² et conduit à plat alors qu'il était planté à 0.52 plants/m² et palissé sur ficelle verticale en 2017. Cette modification a considérablement augmenté le LER partiel du melon et le DER entre les étés 2015 et 2017. Dans la CA de l'été 2016, chaque espèce était plantée à 0.52 plant/m² au sein de 2 rangs doubles et la tomate, le poivron et l'aubergine y étaient conduits respectivement sur 1, 2 et 3 bras. Au contraire, en 2018, les plants de tomate, poivron et aubergine étaient plantés en 2 rangs simples à 0.18, 0.18 et 0.2 plants/m² et conduits sur 2, 2 et 4 bras respectivement. Cette modification dont l'objectif était d'élargir les allées et de favoriser l'accès des plantes à la lumière a réduit les DER et les LER entre les étés 2016 et 2018. Entre les hivers 2015-16 et 2017-18, les densités de plantation des salades, choux-raves et oignons dans les CP sont respectivement passées de 12.6, 12.6 et 25.2 à 10.8, 10.8 et 21.6 plants/m² en raison de l'aménagement d'allées de circulation supplémentaires ; ceci a augmenté les DER et les LER entre ces deux saisons. Ces trois exemples illustrent aussi qu'il existe un lien fort entre les DER et les LER. Les **LER** sont positivement corrélés aux **DER** (coeff. Corr.= 0.87). Ainsi pour espérer avoir un effet favorable de l'association culturale sur les rendements, il faut maximiser les densités lors de la conception de cette association d'espèces. Cette corrélation est aussi importante entre les **LER et DER partiels** (coeff. corr. = 0.73).

L'association culturelle a permis d'améliorer très légèrement les rendements en AB et en PI mais son effet est très variable d'une saison à l'autre. Cet effet résulte des choix faits par saison lors de la conception de chaque association culturelle, des conditions sanitaires et climatiques subies ainsi que de l'ensemble des interventions réalisées.

3.4 Implications techniques

La mise en place d'associations culturelles nous a amené à adapter les **pratiques culturales** sur différents registres techniques, notamment sur le travail du sol et son paillage, les densités de plantation, la fertilisation, l'irrigation, le palissage et la protection des cultures. Les choix techniques sur ces différents registres à chaque saison ont été fortement contraints par le **type d'agencement spatial** (AsR, ApR, BL ou BT, Figure 2) et par **l'écart entre les dates de plantation** des trois espèces associées (Tableau 1). Nous proposons donc d'aborder les implications techniques de l'association à travers cette typologie.

3.4.1 Rotation culturale

Dans les systèmes en CA, ce ne sont plus des espèces qui s'enchaînent sur une parcelle de 100m² mais ici des trios d'espèces. Les délais de retour de chaque espèce sur la même zone des 100 m² sont donc plus faibles en CA qu'en CP ce qui peut avoir des effets vis-à-vis des problèmes sanitaires telluriques. Pour effectivement respecter les stricts délais de retour, le type d'agencement devrait être fixé et constant pour définir des sous-parcelles (par rang ApR, par bandes longitudinales BL ou transversales BT) qui suivraient alors chacune un schéma de rotation propre. Cela n'est pas faisable pour un agencement en alternance régulière sur le rang (AsR), qui permet par ailleurs de minimiser la distance entre plantes d'espèces différentes et de maximiser celle entre plantes d'une même espèce et donc en théorie d'actionner plus efficacement certains mécanismes propres à l'association culturelle tels que la dilution des plantes hôtes des groupes de bioagresseurs ou encore le partage des ressources.

3.4.2 Travail du sol

En CA, les interventions de préparation du sol avant chaque plantation ont pu être réalisées comme en CP³ sauf lorsque les dates de plantations des trois espèces étaient fortement décalées. Dans ces situations, il n'y a pas eu de travail du sol avant plantation car les autres espèces encore en place empêchaient le passage des outils en plein sur la zone. Pour favoriser la reprise des plants dans ces conditions, les mottes de choux-raves et de salade ont été semi-enterrées et non posées directement sur le sol ; ceci a permis une bonne installation de ces cultures.

Pour des associations agencées par rangs ou par bandes, pour localiser le travail du sol sur les rangs ou les bandes à replanter, il aurait pu être fait usage d'un motoculteur ou microtracteur attelé à un outil de faible largeur (≤ 1 m). Les agencements par bandes transversales ou en alternance régulière sur le rang ne permettent pas ces adaptations et sont donc incompatibles avec un fort décalage des dates à moins de renoncer au travail du sol ou à sa mécanisation.

3.4.3 Paillage du sol et densités de plantation

Contrairement aux CP⁴, en CA le paillage plastique n'a pas pu être renouvelé lorsque les dates de plantation étaient fortement décalées car d'autres cultures étaient encore en place sur l'ancien paillage. Les plants des seconds tours de haricot vert, salade et chou rave ont donc été plantés sur l'ancien

³ En CP, le travail du sol était réalisé avant chaque plantation (sauf avant le 2nd tour des cultures de l'hiver 2017-18) avec un canadien pour un travail du sol en profondeur et/ou un vibroculteur muni d'un rouleau pour un travail de surface, pour la gestion des adventices et la préparation du lit de plantation.

⁴ En CP, toutes les cultures sont implantées sur un paillage plastique renouvelé à chaque plantation par mesure de prophylaxie. En hiver, les paillages utilisés mesurent 4 m de large et sont macro-perforés à la densité la plus adaptée à l'espèce cultivée et l'ensemble de la planche (env. 4 m) est planté.

paillage entre les mottes du 1^{er} tour en perçant manuellement des trous supplémentaires. En hiver, nous avons associé des espèces habituellement plantées à des densités différentes. Nous avons donc dû faire un compromis sur le choix des paillages et modifier les densités ou faire des trous supplémentaires pour pouvoir planter à la bonne densité lorsque c'était possible. Ces problèmes auraient pu être contournés tout en maintenant la couverture du sol, en utilisant des bandes de paillage différentes pour chaque espèce ou du mulch organique. Pour les CA d'hiver agencés par bandes longitudinales BL des passe-pieds supplémentaires ont été aménagés en laissant des lignes non plantées pour pouvoir cueillir les espèces les plus précoces sans piétiner les plus tardives. Ceci n'était pas nécessaire avec un agencement par bandes transversales BT de 4m de large.

3.4.4 Fertilisation

En CA agencée par rang (ApR) et par bandes transversales (BT), les apports de produits fertilisants étaient réalisés comme en CP⁵ de manière à couvrir les besoins théoriques (N-P-K) de chaque culture. Cette gestion était incompatible avec l'agencement en bandes longitudinales (BL) trop étroites et par alternance régulière sur le rang (AsR) car la localisation des apports par espèce n'était pas possible. Nous avons donc établi de nouvelles références de besoins NPK pour chaque association à partir de la moyenne des besoins des 3 espèces associées. Les cultures ayant les besoins les plus faibles des trois cultures associées ont parfois montré des signes de sur-fertilisation ou ont exprimé de forte vigueur en début de cycle, mais a priori cela n'a pas eu de conséquences majeures. D'autre part, pour les CA avec des dates de plantation fortement décalées (les seconds tours), il n'était pas possible d'enfouir les apports pour les cultures implantées sans travail du sol. Les apports des deux tours successifs ont donc été réalisés et enfouis en une seule fois en début de saison. L'utilisation d'engrais liquide, désormais disponibles en AB mais coûteux, aurait éventuellement pu solutionner ce problème.

3.4.5 Irrigation et recours au bassinage

Contrairement aux CP⁶, en CA la couverture stricte des besoins hydriques de chaque espèce par aspersion n'était pas possible quel que soit le type d'agencement, mais l'arrosage par goutte à goutte la rend possible à condition de disposer d'autant de réseaux d'irrigation que d'espèces et d'agencer ces dernières par rangs parallèles aux lignes de goutteurs. Ainsi en hiver 2015-16 et 2017-18 des espèces aux besoins très différents et habituellement arrosées par aspersion ont été arrosés au goutte à goutte en CA. L'aspersion a toutefois été utilisée la première semaine après chaque plantation afin d'assurer une bonne humectation des mottes et une reprise efficace des plants. Cette modification n'a pas entraîné de problèmes cultureux particuliers. Les associations par bandes transversales ou par alternance régulière sur le rang sont donc plus adaptées à des associations d'espèces aux besoins hydriques proches. Pour les CA des étés de 2015 à 2018 agencées en BT ou AsR, nous avons créé des références de Kc pour chaque association à partir des Kc et des stades de chaque culture en prenant la moyenne des besoins ou la valeur de la culture la plus exigeante selon les cas. Cette démarche a donné des résultats satisfaisants en termes de gestion des arrosages.

Le bassinage des cultures d'été, qui consiste à mouiller les plantes par aspersion pour faire augmenter l'hygrométrie et baisser la température dans le but de fournir un climat moins propice aux acariens phytophages et plus favorable aux acariens prédateurs, n'a pas pu être utilisé convenablement en CA quel que soit leur mode d'agencement. En effet, si cette technique est adaptée à certaines espèces

⁵ En CP, les apports de fertilisants étaient calculées pour couvrir les besoins NPK théoriques de chaque espèce en tenant compte de la disponibilité des éléments dans le sol évalués par des analyses de sol triennales et des tests nitrates réalisés avant chaque plantation. En AB, les fertilisants étaient apportés en fond sous forme organique et en PI sous forme organique ou minérale en fond complétés en été par des apports minéraux fractionnés en ferti-irrigation.

⁶ En CP, l'arrosage par aspersion ou par goutte à goutte est réalisé selon les besoins spécifiques des cultures et la teneur en eau du sol évaluée par des tensiomètres et par des carottages en hiver et par l'ETP et des carottages en été. En été les quantités d'eau à apporter sont calculées en multipliant l'ETP par le coefficient cultural Kc qui dépend de l'espèce et du stade de culture.

telles que le poivron ou l'aubergine elle peut aussi se révéler très risquée pour d'autres telles que la tomate et le melon sensibles aux maladies comme le mildiou et *Botrytis cinerea*. Le bassinage et l'association culturale sont donc deux techniques a priori peu compatibles à moins de n'associer que des espèces supportant les hygrométries élevées.

3.4.6 Palissage

En CP, les cultures d'hiver sont toutes cultivées à plat et celles d'été sont soit palissées sur des ficelles verticales avec 1 bras/plante (tomate, concombre, courgette, haricot vert) ou 3 bras/plante (aubergine) soit conduites en haies maintenues par des ficelles horizontales tenues grâce à des poteaux (poivron) ou à plat (melon). La conduite des plantes a été aménagée pour les CA d'été : les poivrons de 2014, 2016 et 2018 et les melons de 2017 ont par exemple été palissés sur ficelle verticale avec 1 ou 2 bras/plant car la conduite habituelle était irréalisable ou inadaptée à l'association. De même en 2018, les tomates et les aubergines ont été palissées sur ficelles verticales avec 2 et 4 bras/plant respectivement pour compenser la réduction de la densité par une augmentation du nombre de bras.

3.4.7 Protection des cultures

Globalement, les stratégies de protection adoptées ont permis dans les deux modes de conduites de générer des valeurs d'IFT chimique très faibles à quasi nulle en AB. Les notes qualitatives des pressions biotiques étaient souvent identiques en CA et en CP et justifiaient la plupart du temps les mêmes interventions. Les différences d'IFT entre les systèmes en cultures associées et pures (Figure 7) s'expliquent donc principalement par des contraintes techniques et réglementaires induites par l'association culturale.

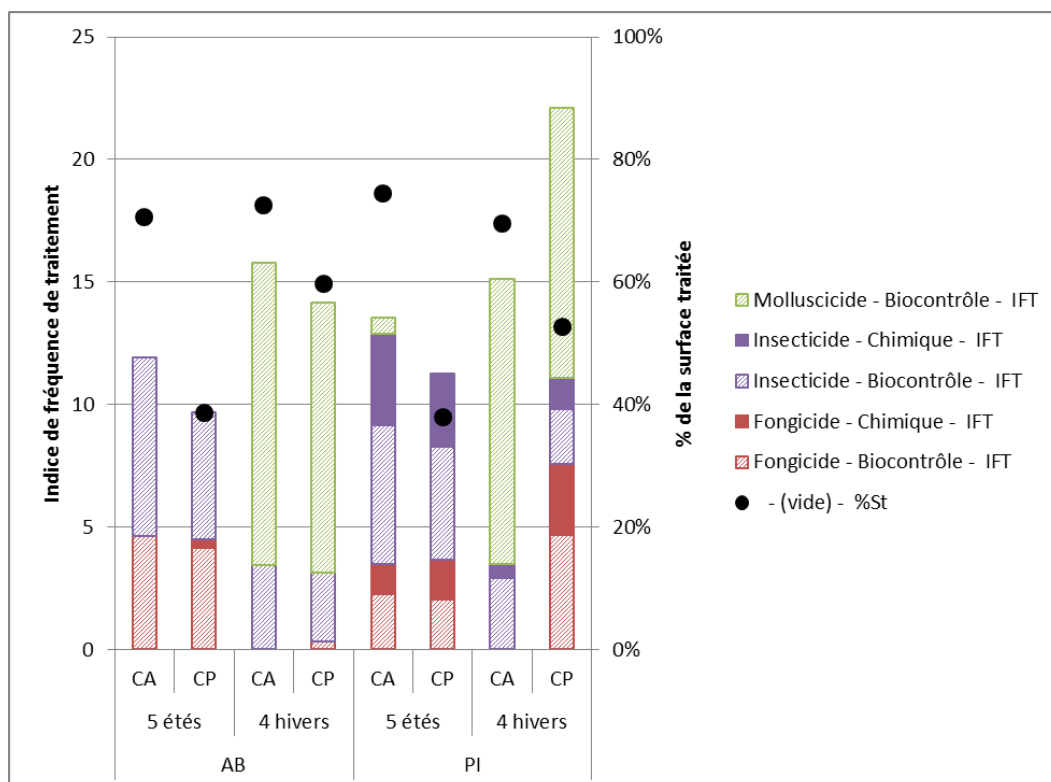


Figure 7 : Cumul des IFT pour les saisons d'hiver et d'été dans les cultures pures et associées en AB et PI du printemps 2014 à l'automne 2018 et proportion de la surface moyenne traitée.

Lors d'un traitement localisé sur une espèce en CA, le risque de dérive des produits phytosanitaires vers les autres espèces a été jugé important. Ainsi l'association obligeait à utiliser uniquement des produits homologués sur les 3 espèces menant parfois à des impasses techniques lorsque qu'aucun

produit ne remplissait ces conditions. C'est en hiver 2015-16 et 2017-18, pour les traitements préventifs fongicides des salades qu'il y a eu le plus d'impasse en CA car les substances actives chimiques ou biocontrôle utilisées en CP n'étaient pas homologuées sur les autres espèces associées (chou rave et oignon botte) : le cumul des IFT d'hiver en CA_PI est donc inférieur à celui en CP_PI (Figure 7). Cette différence n'est pas visible en AB car il n'y a pas eu de protection fongicide préventive des salades en CP. Par ailleurs, les molluscicides utilisés sont homologués pour un usage large « Traitements généraux*Trt Sol*Limaces et escargots » ce qui les rend compatibles avec toutes les associations d'espèces. De la même manière, les homologations des produits à base de *Bacillus thuringiensis* et de soufre étaient suffisamment larges pour qu'ils soient utilisables en CA. L'usage d'insecticides et de fongicides de type chimique a parfois été possible en CA mais pas systématiquement.

Les DAR (Délai Avant Récolte) et DRE (Délai de Ré-Entrée) de chaque produit appliqué en CA, même localisé sur une seule espèce, ont été respectés sur les trois espèces : il est arrivé qu'une récolte d'une espèce soit reportée ou non commercialisée en raison d'un traitement sur une espèce voisine.

Dans les CA agencées en agencement sur le rang (AsR), la localisation des traitements sur une seule espèce était techniquement impossible, les produits y étaient donc appliqués obligatoirement sur les trois espèces de l'association pour parfois ne viser qu'une seule. Cela explique qu'en CA, la proportion moyenne de surface traitée est supérieure à celles en CP, ce qui se répercute sur les IFT cumulés (Figure 7). L'association culturale peut aussi contraindre le choix du matériel de pulvérisation, par exemple l'utilisation d'une rampe horizontale, habituellement utilisée sur les cultures d'hiver en CP, ne permettait pas de localiser un produit sur une espèce en CA par bandes longitudinales, nous avons donc soit utilisé une machine à dos ou un pistolet soit appliqué le produit sur les trois espèces à la rampe.

Le recours aux lâchers d'auxiliaires n'a pas été impacté par l'association culturale, l'opération étant manuelle, il est toujours possible de localiser les introductions sur une espèce. L'ajustement des doses de lâcher se fait aisément en les convertissant en nombre d'individus/plant lorsqu'elles sont initialement exprimées en nb/m².

Ainsi, cette expérimentation de longue durée confirme la faisabilité de mettre en œuvre des systèmes de trois cultures associées et documente sa réalisation dans différentes configurations en maraichage sous abris. L'association culturale sous abri exige toutefois des ajustements techniques, nécessitant de produire de nouvelles références pour le pilotage, de modifier les règles de décision, d'évoluer dans les matériels et les intrants. La culture de plusieurs espèces sous un même abri est incompatible avec certaines techniques culturales et demande souvent de faire des compromis ; ainsi il est parfois impossible de couvrir les besoins théoriques « de référence » (N-P-K, apport d'eau, protection des cultures) de chaque espèce présente. Telle qu'elle a été expérimentée dans 4SYSLEG, l'association s'accompagne de valeurs d'IFT cumulés faibles, mais la pratique de l'association en tant que telle n'a pas permis de réduire les IFT sauf lorsqu'elle induisait une impasse menant à renoncer au traitement. Les contraintes réglementaires liées à l'usage des produits phytosanitaires sont amplifiées en association, ce qui contraint le choix des intrants et parfois du matériel de protection des plantes.

Conclusion

Lors de la conception de ce volet de l'expérimentation système 4SYSLEG, l'hypothèse à tester était que les systèmes de culture avec association continue été comme hiver, s'accompagnent d'une amélioration en termes de régulation des ravageurs et maladies, de fertilité du sol et de production commercialisable et que ces tendances seraient visibles au bout de plusieurs années.

Les différents groupes de bioagresseurs étudiés ont réagi différemment à l'association culturale estivale. Les résultats montrent que cette pratique permet de réduire significativement mais légèrement la pression des pucerons et de l'oïdium blanc sur les cultures d'été mais que la pression des thrips, des

acariens et des aleurodes peuvent être augmentées ou réduites par l'association selon l'espèce et le mode de conduite. L'association n'a pas eu d'effet significatif sur l'état sanitaire des racines, mais en tendance les racines des cultures associées sont de plus en plus saines au fil des années par rapport à celles des cultures pures. Les suivis des nématodes du sol ont révélé un impact faible de l'association culturale sur la nématofaune, elle n'a eu un effet significatif que sur les nématodes phytoparasites de la famille Telotylenchidae pour lesquels la densité était significativement supérieure en association par rapport aux cultures pures. Les communautés de nématodes étaient statistiquement identiques en cultures pures et associées. Les suivis de la biomasse moléculaire microbienne ont révélé un effet défavorable de l'association sur les microorganismes du sol ; ces résultats restent à confirmer par des analyses et une expertise supplémentaire. L'association culturale a eu un effet variable sur le rendement d'une saison à l'autre mais proche en AB et en PI. Sur les 9 saisons suivies, les rendements ont été très légèrement améliorés en CA dans les deux modes de conduite.

Enfin, l'essai 4SYSLEG témoigne que l'association culturale en maraichage sous abris demande des adaptations techniques sur la majorité des opérations culturales et malgré ces adaptations, il est parfois impossible de couvrir les besoins théoriques de référence de chaque espèce. L'association culturale oblige souvent à faire certains compromis, elle peut être incompatible avec d'autres pratiques culturales et mener à des impasses techniques. Le type d'agencement spatial et la synchronisation ou non des plantations déterminent à la fois la gamme des choix techniques possibles et la nécessité de modifier certaines composantes du système technique.

Ce dispositif apporte des ressources pour la conception d'association des cultures en maraichage sous abri. Les résultats témoignent du fait qu'il n'est pas aisé d'obtenir pour toute configuration, tous les effets favorables que l'on pourrait attendre de l'association. La conception d'une association multi-performante n'est pas une chose simple ; les choix des espèces, de leur agencement dans l'espace, de leur enchaînement dans le temps et des pratiques culturales sont interdépendants et doivent être cohérents. Ils conditionnent l'effet qu'aura l'association sur les bioagresseurs aériens et telluriques et les organismes utiles, sur l'accès des plantes aux ressources et sur les rendements. Ces choix conditionnent aussi le matériel requis, le type et le volume des intrants et d'autres éléments comme la charge de travail, la charge mentale et la pénibilité qui n'ont pas été abordés dans cette étude.

Remerciements

Nous remercions le partenaire financier AFB (projet DEPHY EXPE) pour ce projet. Ce dispositif expérimental de longue durée a impliqué de nombreuses et précieuses contributions tout au long de ces 6 années : nous remercions en particulier l'ensemble du personnel de la station INRA d'Alénya ainsi que Chloé Salembier qui a contribué au lancement du dispositif de 2013 à 2015 et Thierry Mateille (IRD Montpellier) pour les données nématologiques. Nous remercions l'animateur du comité de pilotage Jean-Marc Meynard pour son appui et sa motivation ainsi que les participants au comité et l'équipe de la CAN DEPHY EXPE.

Références bibliographiques

- Agence bio, 2017. Repères chiffrés 2017 du bio en France. 16p.
- Agreste, 2015. Enquête Pratiques culturales sur les légumes en 2013 – nombre de traitements phytosanitaires. Agreste Les Dossiers n° 27 juillet 2015, 25p
- Brooker R.W., Bennett A.E., Cong W.-F., Daniell T.J., George T.S., Hallett P.D., Hawes C., Iannetta P.P.M., Jones H.G., Karley A.J., Li L., McKenzie B.M., Pakeman R.J., Paterson E., Schöb C., Shen J., Squire G., Watson C.A., Zhang C., Zhang F., Zhang J., White P.J., 2015. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist* 206(1), 107–117.

Duchene O., Vian J.-F., Celette F., 2017. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 240, 148–161.

Ehrmann J., Ritz K., 2014. Plant: soil interactions in temperate multi-cropping production systems. *Plant and Soil* 376(1–2), 1–29.

Gaba S., Lescourret F., Boudsocq S., Enjalbert J., Hinsinger P., Journet E.-P., Navas M.-L., Wery J., Louarn G., Malézieux 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.

Lefèvre A., 2016. 4SYSLEG : Conception et évaluation multicritère de 4 systèmes de production intégrée de cultures légumières sous abri non chauffé, adaptés à différents contextes technico-économiques. http://www.ecophytopic.fr/sites/default/files/Compil_Fiches_4SYSLEG.pdf

Lithourgidis A.S., Dordas C.A., Damalas C.A., Vlachostergios D., 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian journal of crop science* 5(4), 396-410.

Mai W.F., Mullin P.G., 1996. Plant-parasitic nematodes. A pictorial key to genera. Cornell Univ. Press, 277p.

Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29(1), 43–62.

PIPAME, 2017. Prospective PIPAME Économie sociale et solidaire : les circuits courts alimentaires. 58p

Ratnadass A., Fernandes P., Avelino J., Habib R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32(1), 273–303.

R Development Core Team, 2005. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Seinhorst J.W., 1962. Modifications of the elutriation method for extracting nematodes from soil. *Nematologica*, 8(2), 117-128.

Thibault C., Lecompte F., 2018. Gestion de la fertilité des sols en cultures légumières et maraîchères. Rapport d'étude du GIS Picléq. 72p.

Zeck W.M., 1971. A rating scheme for field evaluation of root-knot nematode infestations. *Pflanzen-Nachrichten Bayer Ag* 24, 141-144.

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).