

Concevoir et expérimenter en réseau des combinaisons de pratiques pour une gestion durable des bioagresseurs du sol

Gard B.¹, Clerc H.², Goillon C.³, Parès L.⁴, Védie H.⁵, Lefèvre A.⁴

¹ Centre opérationnel de Balandran, CTIFL, Bellegarde, France

² Domaine de Lalande, INVENIO, Ste Livrade/Lot, France

³ APREL, Saint-Rémy-de-Provence, France

⁴ Domaine Expérimental Alénia Roussillon, Univ Montpellier, INRA, Alénia, France

⁵ GRAB, Avignon, France

Correspondance : gard@ctifl.fr

Résumé

En production maraîchère, un cortège varié de bioagresseurs telluriques induit des dégâts importants occasionnant de lourdes pertes économiques pour les exploitations. Face aux enjeux de réduction de l'usage des produits phytopharmaceutiques et de préservation de la production maraîchère, il est nécessaire d'apporter une réponse systémique en concevant des stratégies adaptées aux contextes technico-économiques locaux. Le projet GEDUBAT (Innovations techniques et variétales pour une Gestion Durable des BioAgresseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris) vise à concevoir et évaluer différents systèmes de culture ayant peu ou pas recours aux traitements chimiques pour gérer les champignons pathogènes du sol et les nématodes à galles. Cet article présente le réseau d'expérimentation des 19 systèmes de culture maraîchers sous abri, conçus par combinaison de pratiques améliorantes pour lutter contre les bioagresseurs telluriques puis testés dans six sites entre 2012 et 2017. Une 1^{ère} approche par analyse multivariée basée sur la fréquence d'usage des leviers permet de faire émerger, indépendamment des sites, quatre groupes de systèmes analogues (clusters) suggérant des approches stratégiques contrastées. L'évolution des indicateurs clés tels que l'IFT est présentée à l'échelle de ces groupes de systèmes. Les enseignements quant aux stratégies testées et les perspectives sont ensuite discutés par les auteurs.

Mots-clés : Maraîchage sous abri, Champignons pathogènes, Nématodes à galle, Systèmes de culture, Stratégie agronomique, Expérimentation système en réseau.

Abstract: Designing and assessing promising cropping systems for soil-borne pests and diseases management.

In protected vegetable systems, a large range of generalist soil-borne pests and diseases cause important damages on crops leading to heavy economical losses for farmers. Considering the challenge of decrease the pesticides use without altering vegetable productions under shelter, a systemic approach is required to design suitable strategies to their local economical and technical context. The GEDUBAT project is a French network built to test sets of innovative practices for soil-borne diseases and root-knot nematodes sustainable management in protected vegetables systems. A network of six experimental sites has been implemented supporting the design and assessment of different cropping systems using few or no fungicide nor nematicide for soil-borne pests and diseases. This article presents the 19 protected vegetable cropping systems (walk-in tunnels or plastic greenhouses). They were designed to combine promising and alternative practices and were tested in farms or experimental stations from 2012 to 2017. Multivariate analyses of the collected data based on the usage frequency of

each practice were performed. Thus, regardless the experimental site, four groups of similar systems were identified (clusters), suggesting four contrasted strategies. The temporal evolution of key assessment indicators such as the Frequency Treatment Index (FTI) is presented using those four clusters of systems. The first lessons regarding the tested strategies and the perspectives for further research and experiment are addressed.

Keywords: Protected vegetable crops, Pathogenic fungi, Root-knot nematodes, Cropping systems, Agronomic strategy, Cropping system experiment.

Introduction

Les engagements pris au niveau européen et français sur la désinfection des sols ont entraîné de profondes mutations dans les modes de gestion des bioagresseurs telluriques en maraîchage sous abri. La disparition progressive des produits de désinfection des sols fait réapparaître des problématiques majeures de santé des sols, pouvant conduire à des impasses techniques sur certaines exploitations. Ce constat oblige à réfléchir à de nouvelles solutions techniques. Au regard des orientations actuelles, règlementaires et sociétales, les techniques doivent permettre de contrôler les bioagresseurs telluriques (*e.g.* nématodes, champignons) tout en prenant en compte l'environnement, le consommateur et l'applicateur. Il est donc essentiel de pouvoir disposer de pratiques permettant d'améliorer l'état sanitaire des sols tout en réduisant le recours aux produits phytopharmaceutiques.

Le projet Prabiote (CASDAR, 2009-2011) a mis en évidence l'intérêt de certaines pratiques améliorantes, alternatives aux produits phytopharmaceutiques, comme la solarisation ou la biofumigation pour la gestion des bioagresseurs telluriques en cultures maraîchères sous abris (Janvier et Ade, 2013 ; Janvier 2012). Mais ces techniques, prises isolément, ne suffisent pas à maîtriser correctement l'inoculum présent dans le sol et à réduire l'incidence sur les cultures. Pour chaque parcelle cultivée, il est donc nécessaire de développer une stratégie globale combinant de manière cohérente plusieurs de ces pratiques en fonction du contexte sanitaire, de production et de commercialisation.

Contrairement à l'approche factorielle où les éléments du système sont étudiés séparément, l'expérimentation en système de culture a pour but de tester une stratégie globale, combinant différentes techniques pour satisfaire un ou des objectif(s) dans une diversité de contextes (Reau et al., 1996 ; Deytieux et al., 2012). On s'intéresse ainsi à l'ensemble des composantes du système de culture et à leurs interactions. La démarche consiste dans un premier temps à concevoir les systèmes de cultures en combinant les techniques les plus intéressantes en fonction des objectifs visés puis d'évaluer ces systèmes, notamment via l'expérimentation sur le terrain (Navarrete et al., 2010 ; Reau et al., 2010 ; Debaeke et al., 2009 ; Havard et al., 2017).

Cette approche systémique a été mise en œuvre dans le projet GEDUBAT (Innovations techniques et variétales pour une Gestion Durable des BioAgresseurs Telluriques dans les systèmes maraîchers sous abris) financé par Ecophyto et labellisé par le GIS PICléG. Il rassemble cinq partenaires techniques et scientifiques : le CTIFL (porteur du projet), l'unité expérimentale INRA d'Alénya ainsi que les stations régionales d'expérimentation APREL, GRAB et INVENIO. Ce réseau de partenaires s'est appuyé sur les résultats du projet Prabiote pour sélectionner des leviers agronomiques efficaces à combiner dans des systèmes de culture. L'objectif du projet est de concevoir, d'évaluer et d'expérimenter des systèmes de culture permettant (i) de réduire l'inoculum tellurique et d'améliorer l'état sanitaire du système et (ii) de réduire le recours aux produits phytosanitaires de synthèse par rapport aux systèmes de référence. L'évaluation concerne l'ensemble du système de culture et l'effet des pratiques sur le long terme et sur plusieurs bioagresseurs en même temps.

Ainsi 19 systèmes ont été conçus puis expérimentés entre 2012 et 2017 sur 6 sites expérimentaux, en station ou chez des maraîchers (sites GRAB et APREL). Ils ont permis d'étudier l'effet des combinaisons de pratiques dans divers contextes agronomiques. Cet article décrit les 19 systèmes de culture mis en œuvre, ainsi que les premiers résultats d'analyse des données à l'échelle de ce réseau, par groupes analogues de systèmes constitués à l'aide d'analyses multivariées. Deux stratégies d'actions émergent pour la gestion des bioagresseurs telluriques : la combinaison de leviers agissant sur la vie du sol et celle agissant directement sur l'inoculum tellurique. A termes, les systèmes de culture performants seront présentés aux maraîchers pour accompagner et inspirer leurs propres stratégies de gestion sanitaire des bioagresseurs telluriques.

1. Problématiques visées et systèmes expérimentés

1.1 Les bioagresseurs telluriques ciblés

Les systèmes de culture maraîchers alternent une ou deux cultures d'automne/hiver, le plus souvent un légume feuille ou racine avec une culture de printemps/été souvent une solanacée ou une cucurbitacée. Dans ces systèmes de culture, les principaux bioagresseurs telluriques sont les champignons pathogènes et les nématodes à galles du genre *Meloidogyne*. Pour les cultures d'hiver, les principaux champignons pathogènes sont *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum* et *Rhizoctonia solani*, ainsi que les virus du big vein et de la tache orangée, transmis par le champignon *Ospidium virulentus*. Sur les cultures d'été, les principaux champignons pathogènes rencontrés sont *Colletotrichum coccodes* et *Pyrenochaeta lycopersici*. Les nématodes à galles peuvent se développer sur toutes les cultures des systèmes étudiés, avec une plus forte incidence sur les cultures en été, et les salades d'automne ou de printemps tardif quand les conditions sont plus favorables à leur multiplication.

1.2 Conception et évaluation des systèmes de culture

Six sites expérimentaux, accueillant chacun de 2 à 4 systèmes de culture sont étudiés dans le projet. Au total, il s'agit de 19 systèmes de culture, répartis sur le Sud (66, Alénia INRA ; 47, St Livrade INVENIO ; 30, Balandran CTIFL ; 84, Cheval-Blanc APREL ; 30, Marguerittes GRAB) et l'Ouest de la France (44, Carquefou CTIFL). Par la suite les différents sites seront annotés comme suit : ALN, APR, BLD, CQFM, GRB et INV respectivement pour Alénia, APREL, Balandran, Carquefou, GRAB et INVENIO. Pour la conception des systèmes, un socle de bonnes pratiques a été identifié comme autant de leviers de base à mettre en œuvre indistinctement pour tous les systèmes dans l'objectif notamment de mettre la culture dans les conditions optimales de son développement (Tableau 1) (Launais et al., 2014).

Pour ce qui concerne la gestion des bioagresseurs telluriques en particulier, les 19 systèmes ont été conçus par les expérimentateurs à partir de différents leviers identifiés et évalués dans d'autres projets de recherche et d'expérimentation (Tableau 2) et en s'appuyant sur une formalisation schématisée des objectifs du système (Figure 1). Trois axes d'intervention ont ainsi été définis et sont représentés sous la forme d'un triangle stratégique (Figure 1) : (i) freiner directement l'infestation et le développement de l'inoculum tellurique dans la parcelle, (ii) augmenter l'activité biologique du sol et (iii) stimuler le développement et agir sur la physiologie de la plante. Les différents systèmes de culture expérimentés mobilisent un ensemble de leviers positionnés sur ces axes et constituant les stratégies (Tableau 2 et Figure 1). Ce choix de stratégie(s) puis de leviers a été argumenté pour répondre aux objectifs sanitaires tout en prenant en compte les diverses situations locales de contraintes sanitaires ou technico-économiques, à des niveaux de rupture plus ou moins importants par rapport aux pratiques des producteurs. L'ensemble des systèmes de culture expérimentés (Tableau 3) sont détaillés dans les fiches EcophytoPic (http://ecophytopic.fr/sites/default/files/compil_Fiches_GEDUBAT.pdf).

Tableau 1 : Liste des « bonnes pratiques de culture » mobilisés dans l'ensemble des systèmes de culture du projet GEDUBAT, adaptée du guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques (Launais et al., 2014)

Les bonnes pratiques culturelles mobilisées
Utilisation de variétés résistantes/tolérantes
Utilisation de semences traitées (hors systèmes AB)
Retrait des organes aériens infestés
Utilisation de la protection physique
Raisonnement de la fertilisation azotée
Utilisation de macro-organismes
Irrigation à l'optimum des besoins des cultures
Contrôle du climat (aération)
Maintien de l'état optimal du sol (humidité et structure) à l'installation de la culture
Apport d'amendements organiques réguliers
Prophylaxie sur le matériel et les plants maraîchers

Tableau 2 : « Boîte à outils du projet GEDUBAT » : liste des leviers agronomiques mobilisés pour la construction des systèmes de culture visant spécifiquement à contrôler les bioagresseurs telluriques

Les leviers mobilisés	Légende des variables de l'ACP
Apport massif de matière organique	MO
Engrais verts (EV) pour la production de biomasse	EV_biomasse
Biofumigation (EV à effet biofumigant)	EV_biofum
Biodésinfection (EV + solarisation immédiate)	biodes
Engrais verts plante piège (< 21 jours l'été)	EV_pl_pg
Greffage	gref
Plante commerciale de coupure	pl_cpr
Retrait des racines	*
Rotations : augmenter le nombre d'espèces cultivées, augmenter le nombre de familles cultivées	nb_esp
Solarisation	solar
Produits fertilisants, biostimulants sans AMM phytosanitaire – effet SDP	fert_SDP
Recours limité/raisonné aux traitements chimiques (impasses, traitements localisés, traitement sur détection privilégié)	*
Produits de biocontrôle avec AMM phytosanitaire à effet direct ou effet SDP	bioctrl

SDP Stimulateur de Défense des Plantes, EV Engrais verts, AMM Autorisation de Mise sur le Marché ; ACP Analyse en Composantes Principales.

* A noter : les leviers « recours raisonné aux traitements chimiques » et « retrait des racines » n'ont pas été inclus dans l'analyse multivariée finale car ces variables sont associées à un axe de très faible inertie (axe 5), elles ont donc peu de poids dans la structure du nuage de points.

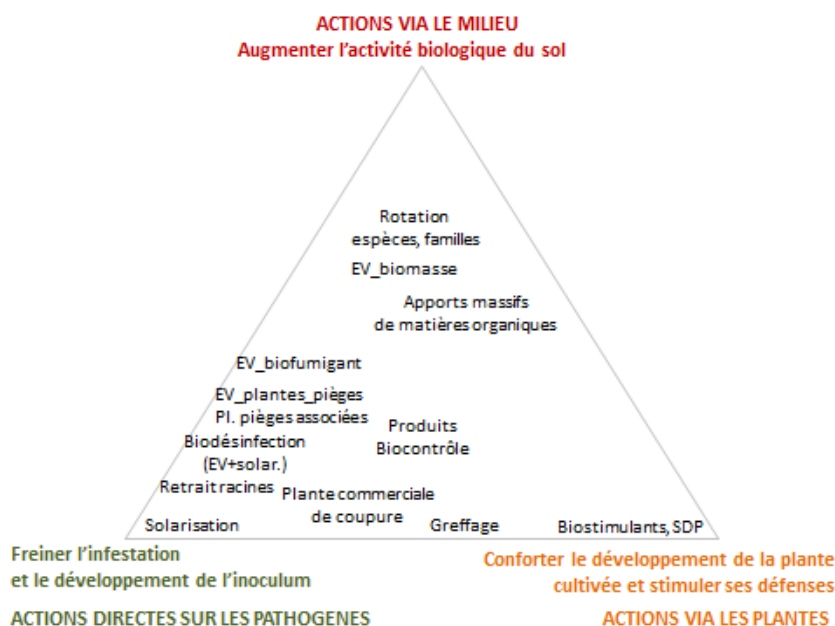


Figure 1 : Triangle des stratégies du projet GEDUBAT mis au point et mobilisé par les expérimentateurs pour aider à la conception des systèmes de culture.

Tableau 3 : Résumé des systèmes de culture expérimentés dans les six sites du réseau GEDUBAT (détails à consulter dans http://ecophytopic.fr/sites/default/files/compil_Fiches_GEDUBAT.pdf)

Sites et systèmes		Cortège de pathogènes ciblé	Cultures produites (la culture principale est soulignée si pertinent)	
			Hiver	Eté
CTIFL Carquefou (CQF) - 44	M1E	Corky-root	<u>Radis</u> , épinard, mâche, salade	<u>Tomate</u> , courgette
	M2E		Radis, (salade)	tomate
	M1O		Radis, salade	<u>Tomate</u> , courgette
	M2O.		Radis (salade)	tomate
CTIFL Balandran (BLD) - 30	T10	Pathogènes telluriques et nématodes	Salade	<u>Tomate</u> , melon, aubergine
	T11		<u>Salade</u> , épinard, mâche, Radis, chicorée	<u>Tomate</u> , melon, concombre
	T12		Salade	<u>Melon</u> , courgette
	T13		salade	<u>Tomate</u> , melon, poivron
INRA Alénya (ALN) - 66	T5	Maladies cryptogamiques	<u>Salade</u>	Tomate ou concombre
	T6		<u>Salade</u> , fenouil, oignon, épinard, chou rave	Tomate, aubergine, poivron, concombre
	T7		<u>Salade</u>	Tomate ou concombre
INVENIO (INV) - 47	T4	<i>B. cinerea</i> et nématodes	<u>Salade</u>	Melon, aubergine
	T3		Radis, épinard, navet	<u>Aubergine</u>
GRAB (GRB) - 30	T3N en AB	Nématodes	Mâche, chou rave, persil	courgette
	T3S en AB		Mâche, chou rave, persil	courgette
	T2 en AB		Roquette, chou rave, persil, fenouil, oignon	
APREL (APR) - 84	C3	Nématodes	Salade	Melon
	C4		Salade	Melon
	C5		Salade	Melon

1.3 Méthode d'évaluation des systèmes de culture du réseau d'expérimentation GEDUBAT

Les systèmes de culture expérimentés sont évalués au cours des 6 années vis-à-vis de leur niveau de maîtrise des bioagresseurs telluriques et de la réduction des IFT pour les produits qui ciblent ces pathogènes (« IFT tellurique »). Mais il faut noter qu'ils sont mis en place dans des contextes environnementaux et agronomiques différents. En effet, selon la configuration sanitaire initiale (nature du cortège de pathogènes et niveau de pression, situation pédoclimatique) et selon les objectifs technico-économiques assignés localement au système maraîcher, les successions culturales et les pratiques adoptées varient. Une analyse site par site et système par système a été réalisée tout au long du projet par les pilotes d'expérimentations (analyse non développée dans cet article). Ces résultats ont été partagés et discutés une à deux fois par an entre tous les partenaires. Par ailleurs, sur la durée du projet, aucun outil d'aide à l'évaluation multicritère adapté à ces systèmes de production maraîchère sous abri n'était disponible. Afin de pouvoir évaluer et comparer l'ensemble des systèmes de culture étudiés au sein du réseau d'expérimentation GEDUBAT, deux démarches sont conduites et structurent cet article : (i) une caractérisation globale des systèmes de culture expérimentés à l'échelle du réseau d'expérimentation afin de faire émerger convergence et divergence entre les systèmes et (ii) une évaluation agronomique qui a pour but de mesurer, à l'aide d'indices, l'état sanitaire du système cultivé, après chaque culture sur l'ensemble des systèmes.

1.4 Démarche de caractérisation globale du réseau de systèmes

La caractérisation de l'ensemble des systèmes de culture expérimentés est réalisée à l'aide d'une analyse en composante principale (ACP), effectuée sur les 19 systèmes de culture étudiés (individus). Cette caractérisation est basée sur le nombre de fois où chaque levier agronomique a été mis en œuvre (variable) dans le système tout au long des 6 années pour la gestion des bioagresseurs telluriques. Cela rend compte des objectifs et de la stratégie effectivement adoptée pour chaque système de culture. Cette analyse permet de représenter les liens entre les différents systèmes, et entre les systèmes et les leviers. Il est ainsi possible de mettre en évidence indépendamment du site expérimental, les convergences et les divergences entre les systèmes du réseau, et les stratégies agronomiques finalement privilégiées à l'issue des 6 années d'expérimentation. Cette description est consolidée par une classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisée avec la méthode de Ward afin de faire émerger les groupes de systèmes homogènes. Ces groupes homogènes nommés clusters, sont ensuite mobilisés pour identifier des tendances quant aux indicateurs d'évaluation. Pour chaque groupe homogène, les variables caractéristiques des groupes sont identifiées à l'aide d'un test de Chi². L'ensemble des analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 3.3.2 (R Core Team, 2016) et le package « FactoMineR » (Lê et al., 2008).

1.5 Démarche d'évaluation agronomique

Pour les nématodes comme pour les champignons pathogènes, une observation d'un échantillon¹ de systèmes racinaires est réalisée après chaque culture, selon une cartographie permettant de rendre compte de la répartition spatiale et de son évolution dans le temps. Les dégâts liés à la présence de nématodes (galles) sont notés de 0 à 10 suivant l'échelle de Zeck (1971). Cette note est l'indice de galles racinaire (IGR). Les dégâts liés aux attaques de champignons (nécroses) sont notés de 0 (aucune attaque) à 10 (système racinaire entièrement nécrosée). Cette note constitue l'indice de nécroses racinaires (INR). Ces indices sont complétés par le calcul de l'IFT tellurique en distinguant s'ils

¹ En station à l'INRA d'Alénia par exemple, observation de 50% des plantes de culture d'été et 5% des plantes de culture d'hiver (salade etc...).

appartiennent à la liste officielle, la plus récente publiée, des produits de biocontrôle (Bulletin Officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018) (IFT biocontrôle tellurique) ou non (IFT chimique tellurique).

L'évolution de ces indicateurs au cours du temps, au sein des systèmes, est mesurée à l'aide du coefficient de régression linéaire (R^2) au sens des moindres carrés, à l'aide du package « stats » du logiciel R (R Core Team, 2016). Les indicateurs de performance sont comparés à l'aide d'un test ANOVA et d'une comparaison multiple, grâce aux packages « car » et « phia » du logiciel R.

Les indices IGR et INR sont complétés selon les sites, par des analyses quantitatives de la nématofaune ainsi que par des indicateurs de vie microbienne sur des échantillons de sol, (données non présentées dans cet article) qui permettent de mesurer l'évolution des communautés au fil des années.

2. Résultats

2.1 Caractérisation des systèmes de culture

Les 4 premiers axes de l'ACP permettent d'expliquer 80,5% de la variabilité du nuage de points avec plus de 50% d'inertie visualisée sur les 2 premiers axes (respectivement 38.9%, 20%) et 11,9 et 9.75% pour les axes 3 et 4 respectivement. Les leviers « Fertilisants Biostimulants SDP », « biodésinfection », « engrais vert plante piège », et dans une moindre mesure, « produits de biocontrôle » contribuent plus que les autres leviers à la structure du nuage de points et majoritairement à la construction de l'axe 1. Ils sont corrélés positivement à cet axe ce qui suggère que ces leviers se combinent dans les stratégies où ils sont utilisés (Figure 2). L'axe 1 décrit les stratégies basées sur la mise en place d'intercultures, complétées par l'utilisation de produits de biocontrôle pour freiner l'infestation et le développement de l'inoculum tellurique et l'utilisation de produits biostimulants (SDP et/ou fertilisant) pour stimuler le développement et agir sur la physiologie de la plante. L'axe 1 décrit la stratégie testée dans les systèmes APRC3, APRC4 (Figure 2).

Les leviers « augmenter le nombre d'espèces », « augmenter le nombre de familles », « engrais vert biofumigant » et « plante commerciale de coupure » contribuent fortement à la formation de l'axe 2 et sont corrélés positivement sur cet axe (Figure 2). Ceci met en évidence une autre stratégie pour la gestion des bioagresseurs telluriques basée sur la diversification du système de culture, et sur la rotation culturale. Ces leviers renvoyant à la diversification de la culture sont groupés dans le triangle des stratégies (Figure 1) et sont associés à la stratégie « Augmenter l'activité biologique du sol ». Le levier « EV_biofumigation » a un effet plus ponctuel sur l'inoculum qui guide également l'axe 2 ; il est décliné dans le système APRC3. L'axe 2 oppose ainsi les systèmes GRBT2 et ALNT6 très diversifiés (9 espèces cultivées sur 6 à 7 familles botaniques incluant régulièrement des cultures commerciales de coupure) et le système APRC3 aux systèmes APRC5, BLDT10, BLDT12, CQFM2O et CQFM2E peu diversifiés avec des successions culturales monotones (tomate/salade ou melon/salade tous les ans par exemple).

Les leviers « apports massifs de matière organique » et « greffage » sont corrélés positivement à l'axe 3 et s'opposent au levier « solarisation » corrélé négativement à l'axe 3. Cet axe oppose deux types de stratégies. La première combine des leviers orientés sur l'amélioration de l'activité biologique du sol et/ou la stimulation de la plante. Elle concerne les systèmes CQFM1E, INVT3, CQFM1O, qui mobilisent à la fois le greffage et l'apport massif de matière organique (fumier ou compost). La stratégie opposée vise à agir directement sur l'inoculum. Elle concerne les systèmes GRBT3N, GRBT3S et APRC5, qui ont recours à la solarisation régulièrement. Enfin, le levier « engrais vert pour biomasse » est corrélé positivement à l'axe 4 et s'oppose au levier « produits de biocontrôle » corrélé négativement à cet axe.

Cet axe oppose le système INVT4 qui mobilise davantage le levier « engrais vert pour biomasse » et très peu le levier « produits de biocontrôle » et les systèmes BLDT13, CQFM20 et CQFM2E qui sont fortement liés au levier « produits de biocontrôle » car ils mobilisent préférentiellement ces produits comme alternative aux produits phytosanitaires conventionnels.

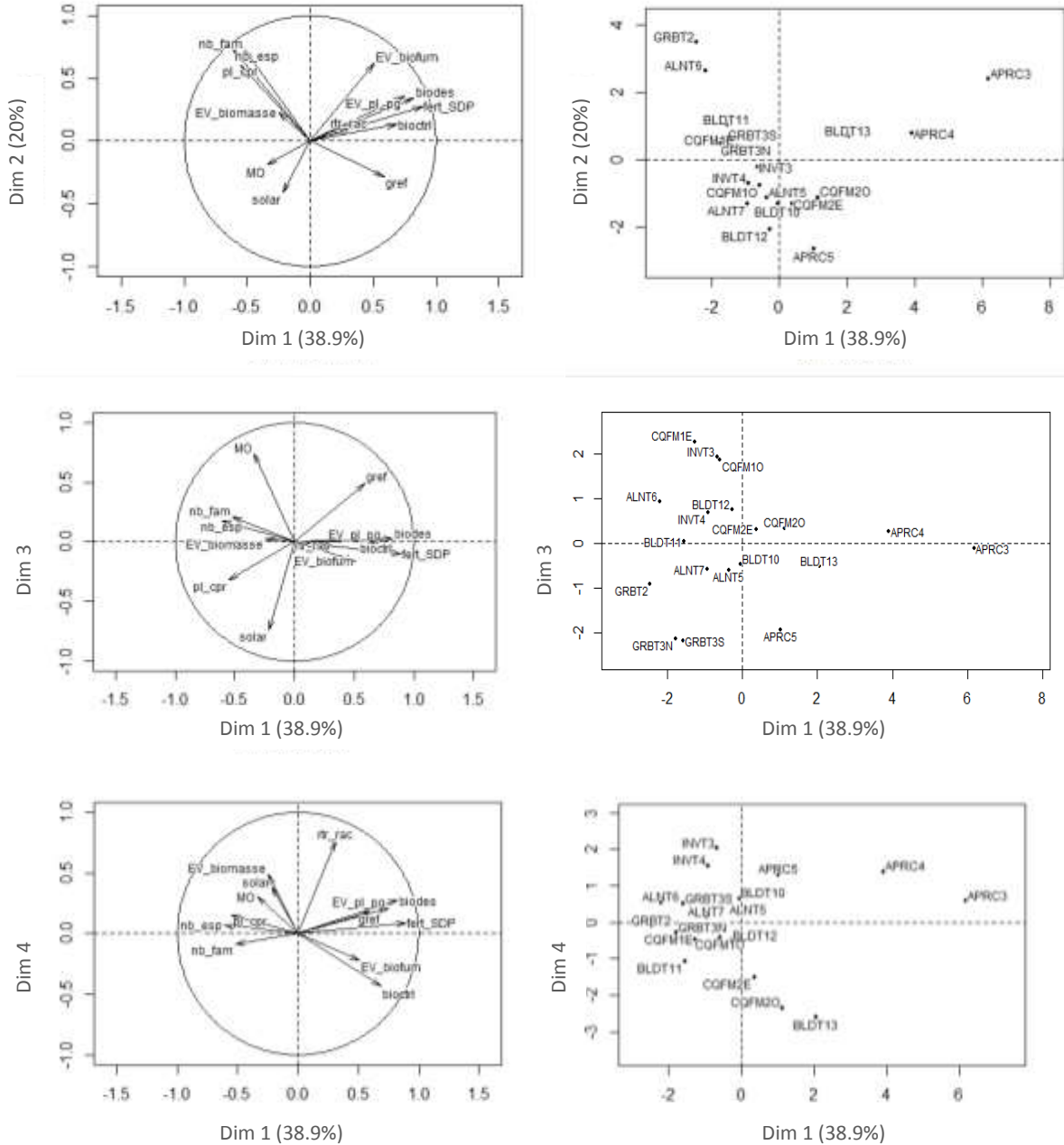


Figure 2 : Analyses en composantes principales (ACP) décrivant les 19 systèmes étudiés lors du projet GEDUBAT. A gauche : cercle des corrélations des variables sur les plans 1-2, 1-3 et 1-4 de haut en bas. A droite : Projection des individus sur les plans 1-2, 1-3 et 1-4 de haut en bas. Les acronymes des sites sont les suivants : ALN, APR, BLD, CQF, GRB, INV respectivement pour INRA Alénya, APREL, CTIFL Balandran, CTIFL Carquefou et INVENIO. Ils sont suivis d'un chiffre correspondant au système testé (Tableau 3).

En complément, le modèle de classification ascendante hiérarchique propose la meilleure classification à 3 clusters. Pour affiner la description de l'un des clusters ainsi obtenu, nous avons retenu une classification plus fine découpant en 4 clusters (gain d'inertie de 1,25 en passant de 3 à 4 groupes).

Nous pouvons ainsi sur la base de l'intensité d'usage des leviers, distinguer au sein du réseau de 19 systèmes, 4 groupes de systèmes de culture présentant de fortes similitudes, indépendamment des sites expérimentaux (Figures 3 et 4).

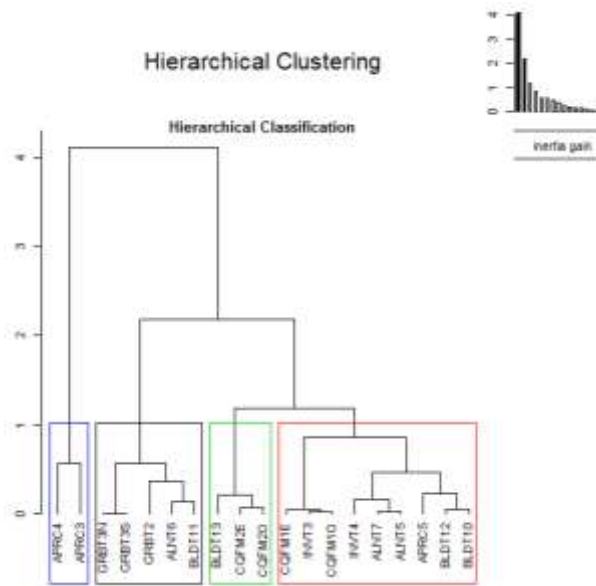


Figure 3 : Arbre de classification issu de la méthode de Ward avec 4 classes de systèmes obtenues (clusters) suite à la classification hiérarchique ascendante. Avec cluster 1 cadre noir, cluster 2 cadre rouge, cluster 3 cadre vert et cluster 4 cadre bleu.

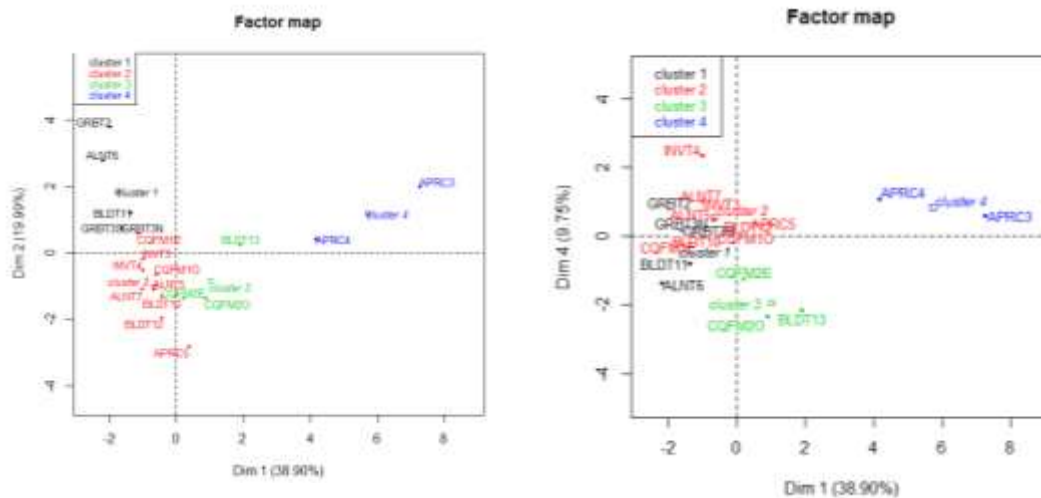


Figure 4 : Projection des individus avec le barycentre de la classe (cluster) sur le plan 1-2 (à gauche) et sur le plan 1-4 (à droite).

Le cluster 1 regroupe les 3 systèmes conduits en agriculture biologique GRBT3S, GRBT3N et GRBT2, ainsi que les systèmes BLDT11 et ALNT6. Cette classe est caractérisée par des systèmes qui ont, de façon significative ($p < 0,001$), davantage recours aux plantes commerciales de coupe et qui présentent la plus grande diversification dans la rotation culturale, avec en moyenne 7 espèces cultivées différentes appartenant à 5 familles botaniques. Ce sont également les systèmes qui ont le moins recours au greffage. Le cluster 2 est constitué des systèmes CQFM1E, CQFM10, INVT4, INVT3, BLDT10, BLDT12, ALNT7, ALNT5 et APRC5. Ces systèmes sont caractérisés par l'utilisation prépondérante de matière organique dans la stratégie, avec en moyenne un apport massif de matière organique ($>20t/ha$) chaque année et un recours significativement moindre aux produits de biocontrôle

par rapport aux autres classes ($p < 0,001$). Bien que la variable solarisation ne soit pas significative ($p > 0,05$), 5 systèmes sur 9 sont également caractérisés par un recours fréquent à la solarisation (INVT4, BLDT10, ALNT5, ALNT7, APRC5). Les clusters 1 et 2 s'opposent sur l'axe 2, le cluster 1 étant corrélé positivement et le cluster 2, négativement. Le cluster 3 regroupe les systèmes BLDT13, CQFM2E et CQFM2O qui se caractérisent par un recours significativement plus important à l'utilisation des produits de biocontrôle pour réduire l'inoculum tellurique. Le cluster 3 se distingue des autres clusters sur l'axe 4. Enfin, le cluster 4 regroupe les systèmes APRC3 et APRC4 qui privilégient les leviers d'intercultures d'été tels que l'utilisation d'engrais vert biofumigant, les engrais verts à action plantes pièges, la biodésinfection et l'utilisation de produits biostimulants (SDP ou fertilisant) pour le contrôle des bioagresseurs telluriques. Le cluster 4 se distingue des autres clusters sur l'axe 1.

Ces analyses couplant ACP et CAH mettent en évidence des approches différentes dans l'utilisation des différents leviers et la construction des stratégies bien que les objectifs soient communs entre les expérimentateurs (protection contre les nématodes et/ou les champignons telluriques). Les clusters obtenus soulignent les différences dans le choix des stratégies de gestion et des combinaisons de leviers qui en ont découlées. D'une part des systèmes qui visent avant tout à gérer la problématique des bioagresseurs telluriques par une amélioration de l'activité biologique du sol et par une logique d'évitement via la diversification des cultures (cluster 1) ou l'apport massif de matière organique (cluster 2) : ils se situent dans la moitié supérieure du triangle des stratégies (Figure 1). D'autre part, des systèmes qui visent plutôt à réduire le développement de l'inoculum tellurique soit par des actions directes sur les pathogènes comme la solarisation ou l'application de produits de biocontrôle (clusters 2 et 3, respectivement) ou en combinant l'effet de plantes de service par l'introduction en été de différentes intercultures (cluster 4) : ces systèmes se situent dans la moitié inférieure du triangle (Figure 1).

Ces résultats permettent de souligner que dans la conception des systèmes (réflexion autour du triangle) puis dans la mise en œuvre sur 6 années d'expérimentation (application effective des leviers agronomiques), les pilotes d'expérimentation ont suivi des stratégies contrastées sur ce plan. Ils laissent à penser que les stratégies d'action via le sol versus actions sur l'inoculum ou via la plante ne sont pas aisément « compatibles » à la conception comme dans leur mise en œuvre pratique.

2.2 Evolution des indicateurs de performance mesurés

Tableau 4 : Étude de l'évolution des indicateurs de performance dans le temps par la méthode des moindres carrés. Coefficient de détermination R^2 de la corrélation linéaire, significativité de la relation au seuil de 5% avec NS=non significatif, *= $p < 0.05$, **= $p < 0.001$, et ***= $p < 0.0001$

	IFT Chimique tellurique	IFT biocontrôle tellurique	IGR	INR
Cluster 1	NS	NS	$r^2=0.22^{**}$	NS
Cluster 2	NS	NS	NS	NS
Cluster 3	NS	NS	NS	NS
Cluster 4	$R^2=0.36^*$	NS	NS	NS

Afin de proposer une 1^{ère} analyse des résultats à l'échelle des 19 systèmes du réseau, nous nous appuyons sur les 4 clusters identifiés précédemment. Ces derniers représentent des stratégies contrastées de gestion des bioagresseurs telluriques, qui opposent actions directes (clusters 3 et 4) et indirectes sur les bioagresseurs telluriques (clusters 1 et 2). L'analyse des indicateurs de performance par cluster permet d'évaluer les tendances obtenues en termes de maîtrise de l'inoculum et de réduction des traitements chimiques à cible tellurique (Figure 3) pour une combinaison de leviers donnée.

Ainsi, pour chacun de ces clusters, a été étudiée dans un 1^{er} temps, l'évolution au cours des années des 4 indicateurs de performances suivants : IFT chimique tellurique moyen annuel (moyenne par cluster du cumul annuel des IFT), IFT biocontrôle tellurique moyen annuel, IGR moyen annuel et INR moyen annuel (Tableau 4, Figure 5). Sur ces éléments qui ne tiennent pas ici explicitement compte de l'état initial ni de la variabilité inter-culture par an, il en ressort que des effets significatifs seraient observés par les systèmes du cluster 1 en terme de réduction de l'IGR et par les systèmes du cluster 4 en terme de réduction de l'IFT chimique tellurique. En revanche, pour les autres groupes de systèmes, les données obtenues ne permettent pas d'établir de façon significative l'évolution des indicateurs au cours du temps (Tableau 4).

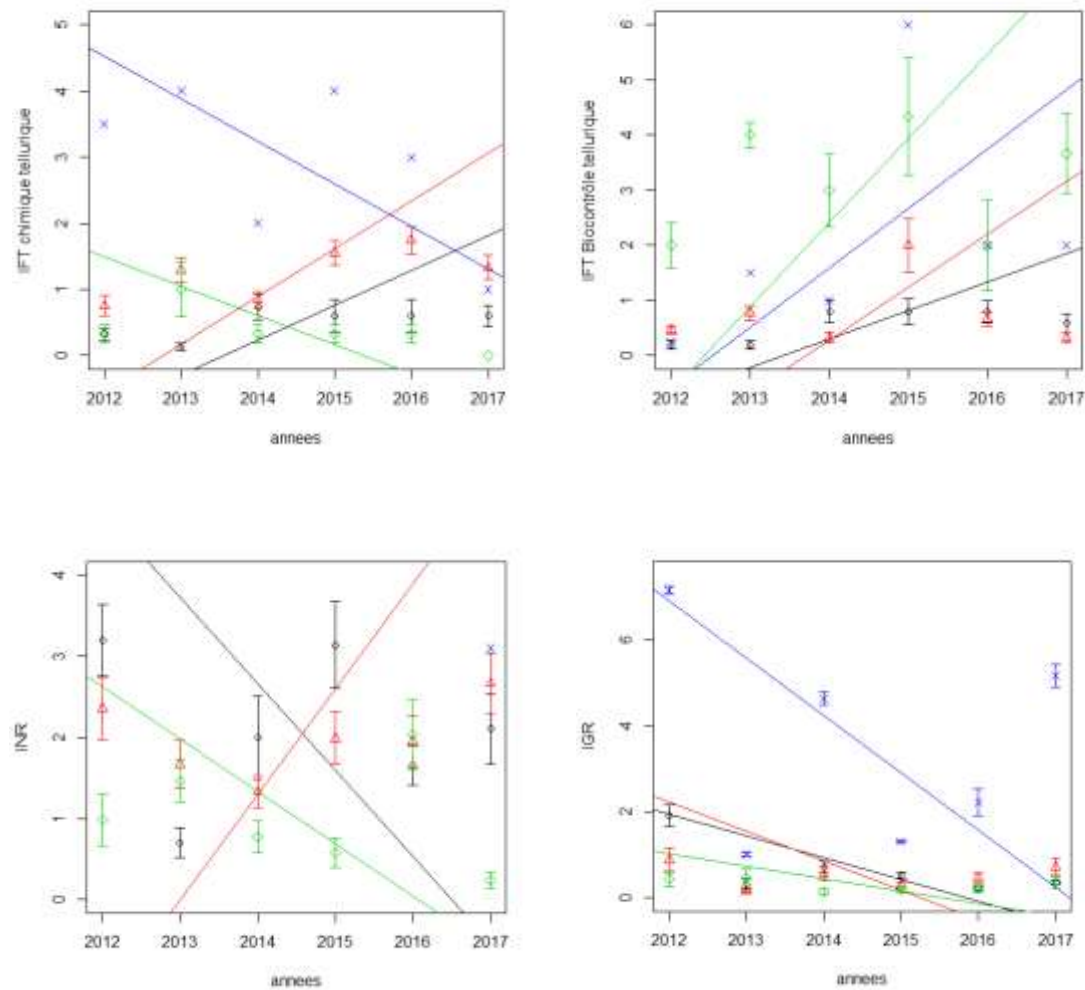


Figure 5 : Évolution des indicateurs de performance au cours du temps dans les 4 classes de stratégies. Représentation de la régression linéaire au sens des moindres rectangles (noir = cluster 1, rouge= cluster 2, vert = cluster 3, bleu = cluster 4)

Pour le cluster 1, les IFT chimiques telluriques sont nuls à faibles tout comme les IFT de biocontrôle telluriques. Les stratégies utilisées misent davantage sur l'établissement d'équilibres biologiques, notamment via la biodiversité dans le sol que sur l'élimination totale de l'inoculum pathogène. Les cultures diverses mobilisées ont été retenues pour limiter l'expression de symptômes voire pour faire une rupture dans le cycle de développement des bioagresseurs. Ces systèmes semblent assez peu impactés par les nématodes à galles et les stratégies utilisées aboutissent à une réduction significative de l'IGR en fin d'expérimentation. Pour ce cluster, les dégâts liés aux maladies cryptogamiques sont

plus marqués mais avec un INR < 4 (Figure 5). Pour confirmer à plus long terme la robustesse de ces stratégies, il conviendrait de vérifier l'évolution des dégâts sur culture dans les parcelles des systèmes de ce cluster, ainsi que l'évolution des populations de champignons pathogènes dans le sol.

Pour le cluster 2, on observe une tendance non significative vers la hausse de l'IFT chimique tellurique. Le recours aux produits phytosanitaires est significativement plus important que dans les systèmes des clusters 1 et 3 mais restent inférieur aux systèmes du cluster 4 (Figure 6). Dans ce groupe sont présents 4 systèmes à faible prise de risque vis-à-vis des dommages sur cultures (APRC5, ALNT7, BLDT10 et BLDT12) qui ont davantage recours à la protection chimique dont un système conduit sur une exploitation agricole (APRC5). De plus, ce cluster regroupe 9 systèmes, soit près de la moitié du réseau d'expérimentation, il s'agit là d'une classe moyenne. Au sein de ce cluster, il existe une importante variabilité entre les systèmes en termes d'IFT, de pression parasitaire et d'état sanitaire des sols, ce qui masque des trajectoires différentes. C'est le cas des systèmes CQFM1E et CQFM1O qui n'ont quasiment pas recours aux produits phytosanitaires (IFT proche de 0) sur les 6 années d'expérimentation. Cette tendance à l'augmentation pour l'IFT tellurique témoigne de la nécessité de recourir à des applications phytosanitaires pour contrôler certains pathogènes telluriques, notamment les pathogènes sur les cultures de laitue. Néanmoins, cela ne doit pas laisser penser à un échec des solutions alternatives, comme le montrent les résultats du système ALNT5, avec une réduction de 30% des IFT chimiques telluriques par rapport au système ALNT7, pour une capacité de production commercialisable identique. On observe également une stabilisation de l'IGR et l'INR au cours du temps et ces indicateurs conservent des valeurs relativement faibles. Le cluster mobilise les leviers « apport massif de matière organique (MO) », et « solarisation », combinés ou non. Les bons résultats sur l'état sanitaire final du sol au sein du cluster suggèrent une efficacité intéressante de ces leviers. Il faudra donc dans un 2^{ème} temps approfondir la comparaison des systèmes au sein de ce cluster pour valider l'intérêt notamment de cette combinaison MO et solarisation. On observe que les clusters 1 et 2 ont significativement moins recours aux produits phytosanitaires de synthèse (Figure 6).

Pour le cluster 3, l'indicateur IFT biocontrôle tellurique apparaît significativement plus important en moyenne que pour les autres clusters (Figure 6). A l'inverse l'IFT chimique tellurique est modéré et tendrait à baisser. Ceci est conforme à la stratégie retenue de substitution des leviers chimiques par les leviers de biocontrôle mobilisés plus fréquemment dans les systèmes de ce groupe par rapport aux autres clusters. Les 3 systèmes de ce cluster semblent en moyenne très peu impactés par les atteintes racinaires (INR et IGR) sauf en 2016 où l'on observe une augmentation de l'INR moyen, supérieur à 2. Cette augmentation est liée à une augmentation des attaques des champignons pathogènes sur les cultures d'hiver (laitue) dans les systèmes BLDT13 et CQFM2O. Dans ces systèmes, la gestion des maladies telluriques se fait au maximum à l'aide de produits de biocontrôle, donc avec une plus forte prise de risque, la protection n'est pas toujours optimale. Ceci est d'autant plus vrai si les conditions climatiques sont particulièrement à risque, comme en 2016. Dans ce cas, les dégâts étaient imputés à la présence de *Rhizoctonia solani* et *Botrytis cinerea*. L'incidence est moins importante sur les cultures d'été bien que l'on observe ponctuellement des plants de tomates très touchés (INR>6) dans le système BLDT13.

Pour le cluster 4, l'indicateur IFT chimique tellurique tend à diminuer au cours du temps de façon significative. De plus, l'indicateur IFT biocontrôle est significativement plus élevé que dans les clusters 1 et 2 et on n'observe pas de différence significative avec le cluster 3 qui mobilise ce levier de façon préférentielle (Figure 6). Ce cluster regroupe 2 systèmes présentant le niveau de contamination significativement le plus élevé pour les nématodes à galles (Figure 6). La contamination par les maladies telluriques (INR mesuré uniquement en 2017) est également relativement importante. Cependant, la tendance est à une amélioration de l'état sanitaire du sol malgré une forte variabilité observée sur les 6 années de suivi. Les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt de la combinaison des leviers pour la gestion des nématodes : engrais verts biofumigants et à vocation plante piège, associés à une utilisation raisonnée de la solarisation. Les combinaisons testées dans le

cluster 4 semblent permettre de maintenir, voire d'améliorer l'état sanitaire du sol (malgré des conditions fortement dégradées) tout en s'affranchissant d'une partie des traitements chimiques utilisées auparavant pour la gestion des bioagresseurs telluriques.

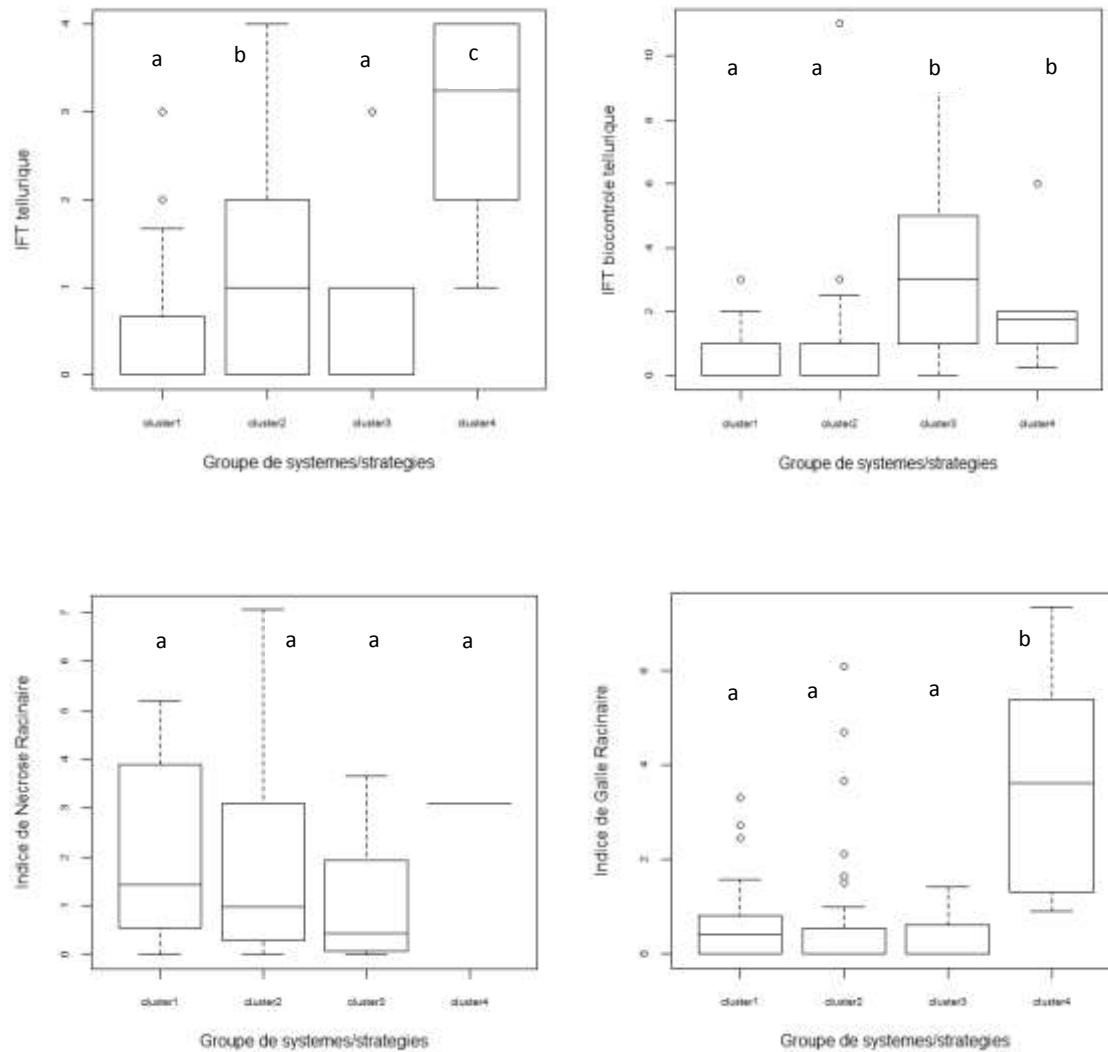


Figure 6 : Distribution des indicateurs de performance mesurés pour les 4 classes de stratégies. Les lettres indiquent l'appartenance à des groupes statistiques différents (ANOVA et test de comparaison multiples au seuil de 5%).

3. Discussion et perspectives

Les résultats obtenus au sein du réseau d'expérimentation GEDUBAT suggèrent la possibilité de réduire l'IFT chimique tellurique grâce à la combinaison de plusieurs leviers agronomiques et la substitution partielle des produits phytosanitaires conventionnels par les produits de biocontrôle. Ce travail met également en avant l'intérêt de la diversification des cultures pour la réduction des dégâts liés aux nématodes à galles. Les tendances observées sur l'apport massif de matière organique suggèrent la possibilité de maintenir un état sanitaire du sol acceptable, mais le nombre limité de systèmes testés ne permet pas d'aboutir à des différences significatives. Ces résultats obtenus quant à la diversification et l'apport de matières organiques, invitent à analyser plus précisément l'intérêt de leur combinaison au sein d'un système de culture.

Dans un premier temps, cette approche globale et synthétique a permis d'identifier les analogies et les divergences entre systèmes au sein du réseau d'expérimentation GEDUBAT, indépendamment du site expérimental. L'analyse a porté sur la fréquence d'utilisation des leviers agronomiques dans chaque système. Afin de caractériser de façon plus fine l'effort de re-conception et de rupture, il est maintenant nécessaire de compléter cette première approche par l'analyse d'autres descripteurs des stratégies comme le nombre de leviers combinés dans un système. Il sera ainsi possible de mieux rendre compte de la faisabilité opérationnelle dans l'association de certains leviers ou des difficultés issues de la complexification du système.

Les 6 sites expérimentaux étudiés présentent des états sanitaires très différents qui influent sur la dynamique des bioagresseurs telluriques, sur l'impact des techniques améliorantes et donc sur le résultat final du système. Il est donc nécessaire de poursuivre l'analyse des données du réseau d'expérimentation en comparant, site par site, les effets des systèmes de culture, compte-tenu des états sanitaires de départ et des données climatiques locales. Les complexes de bioagresseurs telluriques sont différents selon les sites, l'émergence de nouveaux bioagresseurs (mollusques, champignons pathogènes) souligne l'importance d'analyses pluri-pathogènes et l'utilisation de nouvelles méthodes de diagnostic pour leur prise en compte. Les conditions pédoclimatiques et la variabilité interannuelle influencent également fortement la dynamique des bioagresseurs telluriques et le résultat des leviers mis en place localement. Leur prise en compte est donc nécessaire pour évaluer correctement l'impact des systèmes sur la régulation des bioagresseurs telluriques.

Des analyses technico-économiques devront également être réalisées à l'échelle de chaque site, car le contexte particulier de chaque bassin de production et la diversité des cultures rendent peu pertinente une comparaison multi-sites avec les outils d'analyse disponibles. Ce travail intégratif doit permettre à terme d'évaluer le coût des stratégies mises en place à l'échelle de 6 ans dans les systèmes étudiés et d'identifier les données économiques intéressantes pour les producteurs. En complément des éléments présentés dans le présent article, les systèmes de culture de GEDUBAT sont détaillés dans des fiches « système de culture » diffusées sur le site internet DEPHY du portail EcoPhytoPIC. Ces fiches renseignent sur les systèmes, en termes de bilan général, de faisabilité, et de points à retenir.

Sur l'ensemble des systèmes mis au point et évalués au cours du projet, aucune désinfection chimique du sol n'a été réalisée, et cela pendant les 6 années d'expérimentation. Ce résultat est partagé par tous les pilotes d'expérimentations même dans les situations très infestées. Cependant, lorsque la situation sanitaire est fortement dégradée au départ, il est difficile d'aboutir à une réduction suffisante de l'inoculum, mais au mieux à une stabilisation de la situation qui reste encore fragile même lorsque la stratégie de gestion est appliquée avec beaucoup de rigueur. Ce constat met l'accent sur le besoin de compléments pour renforcer les systèmes conçus et obtenir une situation stable et acceptable dans la durée.

Pour aller plus loin dans la gestion des bioagresseurs telluriques, la caractérisation des sols et de leurs composantes biologiques (communautés micro et mésofaune notamment) devrait être approfondie. Il faudrait ainsi pouvoir mobiliser des indicateurs fiables de santé des sols maraîchers en lien avec les pratiques et leurs effets sur les équilibres biologiques du sol. Il semble également indispensable d'augmenter le nombre et la fréquence des analyses biologiques du sol et notamment celles destinées à caractériser les flores pathogène et symbiotique tout en développant des travaux permettant d'en interpréter les données, afin de pouvoir mieux quantifier et apprécier la dynamique de leurs populations et leur sensibilité aux pratiques dans le temps.

L'observation des symptômes sur les organes racinaires reste encore l'approche la plus accessible et simple pour diagnostiquer et suivre les évolutions des problèmes telluriques. Les outils d'aide aux diagnostics pour les expérimentateurs et les conseillers sont une plus-value importante, car pouvoir poser rapidement un diagnostic au champ reste une nécessité incontournable. Il apparaît donc important d'orienter les programmes de recherche et développement vers la mise au point de méthodes

de diagnostics simples et suffisamment fiables pour le suivi des problèmes telluriques par les maraîchers. Établir une stratégie d'échantillonnage : ce qu'il faut observer, à quel moment et de quelle façon... est un travail important à mener suite à ce projet, à partir notamment de l'expérience des pilotes d'expérimentations. Ce n'est qu'à partir de ce diagnostic que des règles de décision pourront être développées et appliquées.

Remerciements

Nous remercions les partenaires financiers AFB (projet DEPHY EXPE), le GIS PIClég. Ce dispositif expérimental en réseau multi-sites et de longue durée a impliqué de nombreuses et précieuses contributions tout au long de ces 6 années. Nous remercions en particulier l'ensemble des techniciens qui ont œuvré dans ces systèmes en stations expérimentales, les maraîchers et les exploitations de lycée agricole qui ont accueilli les expérimentations, Céline Janvier, Céline Ade et Yannick Trottin-Caudal pour l'animation successive du réseau, Tiphaine Sargentini pour son travail d'appui à la formalisation des données en 2017, l'équipe de la CAN DEPHY EXPE dont Sandrine Longis pour l'appui statistique et Cathy Eckert, l'appui scientifique tout au long du projet de Dominique Blancard (INRA), Caroline Djian-Caporalino (INRA), Jonathan Gaudin (INRA) et Thierry Mateille (IRD).

Références bibliographiques

- Bulletin Officiel du Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2018 Note de service DGAL/SDQSPV/2018-205 du 15-03-2018. Liste des produits phytopharmaceutiques de biocontrôle, au titre des articles L.253-5 et L.253-7 du code rural et de la pêche maritime. <https://info.agriculture.gouv.fr/gedei/site/bo-agri/instruction-2018-205/telechargement> consulté le 23/03/2018
- Debaeke P., Munier-Jolain N., Bertrand M., Guichard L., Nolot J.-M., Faloya V., Saulas P., 2009. Iterative design and evaluation of rule-based cropping systems: methodology and case studies - A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 73-86.
- Deytieux V., Vivier C., Minette S., Nolot J.-M., Piaud S., Schaub A., Lande N., Petit M.-S., Reau R., Fourrié L., Fontaine L., 2012. Expérimentations de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelles. *Innovations Agronomiques*, 20, 49-78.
- Havard M., Alaphilippe A., Deytieux V., Estorgues V., Labeyrie B., Lafond D., Meynard J.M., Petit M.S., Plénet D., Picault S., Faloya V., 2017. Guide de l'expérimentateur système : concevoir, conduire et valoriser une expérimentation "système" pour les cultures assolées et pérennes, GIS PIClég, GIS Fruits, Réseau ECOVITI, RMT Systèmes de culture innovants, GIS Relance Agronomique, 172 p.
- Janvier C., Ade C., 2013. Proposer des solutions techniques pour la gestion des bioagresseurs telluriques en cultures légumières : bilan du projet Prabiote. *Innovations Agronomiques*, 28, 87-99.
- Janvier C., 2012. Maîtrise des bioagresseurs telluriques en cultures légumières. Vers l'utilisation des pratiques améliorantes : le projet Prabiote. *Infos CTIFL*, 252, 46-51.
- Launais M., Bzdrenga L., Estorgues V., Faloya V., Jeannequin B., Lheureux S., Nivet L., Scherrer B., Sinoir N., Szilvasi S., Taussig C., Terrentroy A., Trottin-Caudal Y., Villeneuve F., 2014, Guide pratique pour la conception de systèmes de culture légumiers économes en produits phytopharmaceutiques, Ministère chargé de l'agriculture, Onema, GIS PIClég, 178 p.
- Lê S., Josse J., Husson F., 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18.
- Navarrete M., Tchamitchian M., Aissa Madani C., Collange B., Taussig C., 2010. Elaborating innovative solutions with experts using a multicriteria evaluation tool; the case of soil borne disease control in market-gardening cropping systems. E. Coudel, H. Devautour, C.-T. Soulard, B. Hubert, ISDA 2010, Jun 2010, Montpellier, France. Cirad-Inra-SupAgro, 10 p.
- R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Reau R., Mischler P., Petit M.-S., 2010. Evaluation au champ des performances de systèmes innovants en cultures arables et apprentissage de la protection intégrée en fermes pilotes. *Innovations Agronomiques*, 8, 83-103.

Zeck W.M., 1971. A rating scheme for field evaluation of root-knot nematode infestations. *Pflanzenschutz-Nach.* 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).