



HAL
open science

Amélioration de la durabilité des systèmes maraîchers biologiques sous abris : le projet Greenresilient

Laura Affriat

► **To cite this version:**

Laura Affriat. Amélioration de la durabilité des systèmes maraîchers biologiques sous abris : le projet Greenresilient. Amélioration des plantes. 2020. dumas-03174779

HAL Id: dumas-03174779

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03174779v1>

Submitted on 19 Mar 2021

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

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

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme Ingénieur Agronome

Option Production Végétale Durable

Amélioration de la durabilité des systèmes maraîchers biologiques sous abris : le projet Greenresilient.



par Laura AFFRIAT

Année de soutenance : 2020

Organisme d'accueil : Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (GRAB)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme Ingénieur Agronome

Option Production Végétale Durable

Amélioration de la durabilité des systèmes maraîchers biologiques sous abris : le projet Greenresilient.



par Laura AFFRIAT

Année de soutenance : 2020

Mémoire préparé sous la direction de :
Hugo FERNANDEZ-MENA

Présenté le 10/09/2020

Devant le Jury :

Stéphane DE TOURDONNET

Hugo FERNANDEZ-MENA

Aurélie METAY

Organisme d'accueil :

Groupe de Recherche en Agriculture
Biologique (GRAB)

Maître de stage : Hélène VEDIE

Résumé

Titre : Amélioration de la durabilité des systèmes maraîchers biologiques sous abris : le projet Greenresilient.

Face à l'augmentation de l'attractivité du maraîchage bio (AgenceBio, 2019), nous assistons à une intensification des productions notamment pour les systèmes sous abris. Pour maximiser la production, des rotations culturales très courtes parfois avec des espèces de la même famille sont pratiquées, entraînant une dégradation de la fertilité des sols et de l'état sanitaire des parcelles. Pour pallier à cela, une augmentation de l'utilisation de produits fertilisants, de produits phytosanitaires et de plastiques (H. Kirchmann et al, 2008) est souvent nécessaire ce qui vient mettre en danger l'autonomie des systèmes agricoles. Face à ce constat, l'amélioration des pratiques permettant d'augmenter la durabilité de ces systèmes est primordiale. C'est l'ambition du projet Greenresilient, qui a fédéré des expérimentateurs de tout l'Europe pour améliorer la durabilité des systèmes maraîchers sous abris via des systèmes de culture plus résilients.

Durant trois années, sur la station expérimentale du Grab d'Avignon, des systèmes différents nous ont permis d'analyser les effets de trois leviers : la présence de bandes fleuries en bordure interne de tunnel, l'association culturale et l'utilisation de paillage organique (foin de luzerne). Au total, six systèmes ont été étudiés dont quatre dit "intermédiaires" présentant différentes combinaisons de leviers, un système témoin et un système innovant combinant l'ensemble des leviers. Plusieurs indicateurs ont été étudiés afin d'avoir une appréciation de la durabilité des divers systèmes : la quantité de nitrate, l'humidité, la température du sol, le tea bag index (un indicateur de l'activité biologique du sol), le suivi de la croissance des cultures, le rendement et la nutrition azotée des cultures. Enfin, le dénombrement des populations de ravageurs ainsi qu'un suivi des insectes et arthropodes capturés dans des bols jaunes et pièges barbers nous ont permis de déterminer les impacts des leviers sur la biodiversité fonctionnelle.

En 2020, les bandes fleuries ont permis de minimiser l'impact des acariens tétranyques (*Tetranychidae*) sur le système. L'association culturale a permis d'augmenter le rendement de la culture de concombres ainsi qu'augmenter la présence d'auxiliaires offrant une meilleure régulation des ravageurs. L'arrière effet du paillage organique a permis d'augmenter les quantités de nitrate dans le sol malgré une diminution de la fertilisation aboutissant à une légère augmentation de la nutrition azotée des cultures.

Les résultats des trois années nous permettent de déterminer que le système innovant étudié peut être considéré comme plus durable d'un point de vue environnemental, car il favorise une meilleure diversité fonctionnelle, une amélioration de la fertilité du sol, une moindre dépendance aux intrants ainsi qu'une meilleure productivité.

Mots clés : maraîchage, agriculture biologique, durabilité, bandes fleuries, associations culturales, paillage organique, innovation.

Abstract

Title : Increasing the sustainability of organic greenhouse vegetable production through the Greenresilient project.

Nowadays, the increase of organic vegetable attractivity (AgenceBio, 2019) leads to an intensification of the production, especially in greenhouses systems. This intensification have huge consequences for the environment because it necessarily leads to an increase of farm inputs (H. Kirchmann et al 2008) that can pollute soil and groundwater. In order to maximize the production, time between crop rotation is decreased and often vegetable from the same family are cultivated successively. This phenomenon has a negative impact on soil fertility and sanitary state of the crops. To remedy this situation, farmers are using more fertilizers, crop protection produces and plastics that jeopardize the self-sufficiency of agricultural systems. In light of these problems, the European Greenresilient project was born in 2018 with the ambition of improving the greenhouse organic vegetable production sustainability.

During three years, the experimental station of the Grab in Avignon studied several systems to understand the effect of three levers: flowers strips in the inner edge of the greenhouse, mixed crops and organic mulch (lucerne's hay). A total of six systems was studied : four which combines different levers, one witness without any lever and an innovative system (with all three levers). Many indicators concerning the soil were monitored such as nitrogen quantity, tea bag index, soil humidity and temperature. Concerning plants development, their growth, nitrogen nutrition and yield were monitored. At last, a count of pest and insects caught in yellow bowls or barber's traps gave us information about the functional diversity of our systems.

In 2020, results have shown that flowers strips have allowed a better natural regulation of pests such as predator mites (*Tetranychidae*). Mixed crops shown to have a better yield and higher auxiliary population leading to a lower pests presence. The residual effect of organic mulch leads to an increase of nitrogen in the soil and a small increase of nitrogen nutrition in the plants

The end result of the experimentation allow us to say that the innovative system is the most environmentally sustainable. It has a better functional diversity, a higher soil fertility, a smaller dependency on farm input and a better production. An analysis of the social and economical dimension of this system could complete our understanding of the general sustainability of this innovative system.

Key words : vegetable production, organic farming, sustainability, flower strips, mixed crop, organic mulch, innovative.

Remerciements

Je remercie Hélène Védie pour son encadrement exceptionnel durant ce stage. En alliant parfaitement écoute, bienveillance et efficacité, elle m'a permis de m'épanouir dans ma position de stagiaire tout en me transmettant les fondamentaux de son métier.

Je remercie mes parents pour leur soutien et leur implication sans faille durant toute ma scolarité. Merci à mon père d'avoir toujours été de si bon conseil quand il s'agissait de faire des choix importants. Merci à ma mère pour sa patience lors des relectures de mon travail, grâce à elle, j'ai toujours pu rester "clame et concentrée".

Je remercie ma sœur de m'avoir toujours écouté et rassuré lors de mes moments de doutes à l'approche d'un examen. C'est avec une grande pensée pour le petit être qui nous rejoindra bientôt que j'ai écrit ce mémoire.

Je remercie mon frère qui a joué un rôle primordial dans l'élaboration de mon esprit critique et scientifique. Merci pour toutes ses discussions inspirantes qui ont toujours éveillées ma curiosité.

Je remercie la dream team du maraîchage : Jean, Priscille et Renaud. Qui de mieux que vous pour savourer les bonheurs que nous a accordé l'essai Greenresilient ? Merci de m'avoir offert votre temps, vos conseils et votre bonne humeur peu importe la température extérieure ou l'heure de la journée. Je remercie aussi l'ensemble des stagiaires et service civique du GRAB qui ont contribué à égayer mon stage !

Un grand merci à mes colocataires Kévin A, Kévin B, Larry et Rémi pour m'avoir accompagné dans mon aventure avignonnaise. Merci pour toutes ses discussions éclairantes, pour cette bonne ambiance et ces moments vécus ensemble !

Je remercie toute l'équipe du Grab pour leur accueil, leur écoute et leur gentillesse. Merci d'avoir créé cet espace convivial qui m'a permis de me sentir pleinement intégrée à l'équipe.

Je souhaite chaleureusement remercier toute l'équipe pédagogique de l'option PVD pour m'avoir ouvert les portes d'une agriculture nouvelle. Merci pour votre dévouement et votre disponibilité tout au long de cette année scolaire.

Et enfin, merci à tous les PVD de la promo 2019 qui ont fait de cette année charnière une période exceptionnelle, j'ai hâte de découvrir les agronomes que nous allons devenir !!

Table des matières

Résumé	3
Abstract	4
Remerciements	5
Index des figures	8
Index des tableaux	11
Index des annexes	12
Introduction	13
1 – Contexte et objectifs du projet	15
1.1 – Présentation du projet Européen Greenresilient	15
1.2 – Le projet Greenresilient au GRAB	15
2 – Etat de l’art	16
2.1 – Les bandes fleuries	16
2.1.1 - Biodiversité fonctionnelle et pratiques agricoles.....	16
2.1.2 - Les connaissances actuelles sur les effets des bandes fleuries.....	17
2.2 – Les associations culturelles	18
2.2.1 - Définition de l’association culturelle.....	18
2.2.2 - Les connaissances actuelles sur les effets des associations culturelles.....	18
2.3 – Le paillage en agriculture	20
2.3.1 - Définition et intérêt du paillage en agriculture.....	20
2.3.2 - Connaissances actuelles sur les effets du paillage organique.....	21
4 - Problématique et démarche	22
4.1 – La problématique du projet Greenresilient dans la station expérimentale du Grab..	22
4.2 – Les sous-questions et hypothèses de l’année 2020 traitées dans ce mémoire	22
4.3 – La démarche utilisée	23
5 - Matériels et méthodes	24
5.1 - Dispositif expérimental	24
5.1.1 - Aménagement spatial des tunnels expérimentaux.....	24
5.1.2 – Présentation des trois leviers d’actions.....	25
5.2 - La conduite de culture	27
5.2.1 – Gestion de la fertilisation.....	27
5.2.2 - Préparation du sol et dispositif de plantation.....	27
5.2.3 – Irrigation des cultures.....	28
5.2.4 - Suivi sanitaire.....	28
5.3 – Mesures et observations	29

5.3.1 - Les paramètres du sol.....	29
5.3.2 - Suivi du développement des cultures.....	30
5.3.3 - Le suivi de la biodiversité fonctionnelle.....	31
5.4 - Outils utilisés pour l'analyse de données	33
6 – Résultats.....	35
6.1 – Évolution des paramètres du sol.....	35
6.1.1 – Evolution de l'azote disponible dans le sol au cours de la culture.....	35
6.1.2 – Décomposition de la matière organique (TBI)	36
6.2 – Evolution et productivité des cultures.....	37
6.2.1 – Croissance des cultures	37
6.2.2 – Evolution de la nutrition azotée des cultures.....	39
6.2.3 – Le rendement des cultures	40
6.3 – Caractérisation du contrôle des ravageurs dans les systèmes étudiés.....	43
6.3.1 – Evolution des populations de ravageurs	43
6.3.2 – Evolution des populations d'auxiliaires.....	45
7 – Résultats généraux des trois années d'expérimentation.....	46
7.1 – Effets des bandes fleuries	46
7.2 – Effets des associations culturales.....	47
7.3 – Effet du paillage organique.....	48
8 – Discussion	50
8.1 – Les effets des leviers du projet Greenresilient.....	50
8.1.1 – Effets des bandes fleuries.....	50
8.1.2 – Effets de l'association culturale	51
8.1.3 – Paillage organique et son arrière effet.....	52
8.2 – Bilan des trois années de projet greenresilient.....	53
8.2.1 – Robustesse des résultats de l'expérimentation	53
8.2.2 – Durabilité environnementale des systèmes mis en place	55
9 – Les limites du projet Greenresilient.....	56
10 – Les perspectives du projet Greenresilient.....	57
Conclusion	58
Bibliographie.....	60
Annexes	68
Résumé.....	87
Abstract.....	88

Index des figures

Figure 1 : Disposition des modalités et leviers de l'essai Greenresilient sur les tunnel 5 et 6.....	24
Figure 2 : Positionnement des placettes sur les tunnels 5 et 6.....	25
Figure 3 : Composition et organisation des bandes fleuries du tunnel 5	26
Figure 4 : Positionnement des dispositifs en fonction des placettes et modalités.....	29
Figure 5 : Dispositif du tea bag index.....	30
Figure 5 : Piège Barber.....	32
Figure 6 : Bol jaune	32
Figure 7 : Evolution de la quantité de nitrate du sol sur l'horizon 0 – 25cm en fonction du temps. A gauche résultats par type de modalité (1 : BAU, 6 : INN, 2 : cultures pures avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). A droite résultats en fonction du précédent paillage organique (modalités 4 et 6) ou plastique (modalités 3 et 5) sur les modalités associées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.....	35
Figure 8 : Taux de décomposition k en fonction du taux de stabilisation après une incubation de 57 jours sur les modalités 3 (plastique) et 4 (foin). Boxplot de la répartition des valeurs de stabilisation en fonction du précédent paillage (en haut) et boxplot de la répartition des valeurs de taux de décomposition k en fonction du précédent paillage.	36
Figure 9 : Boxplot de la hauteur des plants de concombres en fonction des différentes modalités aux trois dates d'observations (1 : BAU, 6 : INN, 2 : cultures pures avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries).....	37
Figure 10: Boxplot de la hauteur des plants de tomates en fonction des différentes modalités aux trois dates d'observations (3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries, 6 : INN).....	38
Figure 11 : Evolution de la concentration de nitrate dans la sève des concombres en fonction du temps. A gauche résultats par modalité (1 : BAU, 6 : INN, 2 : culture pure avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). A	

droite résultats en fonction du précédent paillage organique (modalités 4 et 6) ou plastique (modalités 3 et 5) des modalités associées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne. 39

Figure 12 : Evolution de la quantité de nitrate dans la sève des tomates en fonction du temps. A gauche résultats par type de modalité (3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries, 6 : INN). A droite résultats en fonction du précédent paillage organique (modalités 4 et 6) ou plastique (modalités 3 et 5) des modalités associées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne. 40

Figure 13 : Evolution du rendement de concombres total cumulé en fonction du temps des diverses modalités (1 : BAU, 6 : INN, 2 : cultures pures avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne. 41

Figure 14 : Evolution du rendement de tomates total cumulé en fonction du temps des diverses modalités (3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries, 6 : INN). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne. 42

Figure 15 : Évolution des populations d'acariens tétranyques (*Tetranychus urticae*) entre le 25 mai et le 10 juillet observés sur les plants de concombres. Les valeurs sont données en pourcentages de chaque classe d'intensité. 43

Figure 16 : Évolution des populations de pucerons verts (dont *aphis gossypii*, *myzus persicae*) entre le 25 mai et le 10 juillet observés sur les plants de concombres. Les valeurs sont données en pourcentages de chaque classe d'intensité. 44

Figure 17 : Evolution en fonction du temps du nombre d'auxiliaires moyen capturés dans les pièges barber à gauche et dans les bols jaunes à droite (modalité 1 : BAU, modalité 6 : INN) 45

Figure 18 : Schéma bilan présentant les effets des leviers sur les paramètres du système et leur impact sur la durabilité du système innovant 55

Figure 19 : Prélèvement de sol à la sonde 0-25cm 71

Figure 20 : Photo du découpage et de l'extraction de la sève de pétiole de concombre dans le cadre du protocole PILazo 73

Figure 21 : Photo des différents types de déchets de concombres : en haut à gauche un concombre dont le poids est supérieur à 600g, en haut à droite un concombre ayant subi des dégâts de chenilles, en bas un concombre tordu 75

Figure 22 : Evolution du rendement de concombres commercialisables cumulé en fonction du temps des diverses modalités (1 : BAU, 6 : INN, 2 : culture pure avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.....	79
Figure 23 : Evolution du rendement de tomates commercialisables cumulé en fonction du temps des diverses modalités (1 : BAU, 6 : INN, 2 : culture pure avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.....	80
Figure 24 : Graphique représentant l'évolution de la moyenne de classe d'acariens observés sur concombres en fonction du temps.....	81
Figure 25 : Graphique représentant l'évolution de la moyenne de classe de pucerons observés sur concombres en fonction du temps.....	81
Figure 26 : Détail du total des auxiliaires décomptés dans les bols jaunes aux trois dates d'observation	82
Figure 27 : Détail du total des auxiliaires décomptés dans les pièges barber aux trois dates d'observation.....	83
Figure 28 : Moyenne des classes de mildiou déterminé dans les différentes modalités à deux dates de mesures.....	86

Index des tableaux

Tableau 1 : Fertilisation effectuée en fonction des modalités.....	27
Tableau 2 : Classes d'intensités en fonction du nombre d'individus observés sur les feuilles des plantes.	31
Tableau 3 : Présentation des données utilisée et de la stratégie d'analyse de données.....	33
Tableau 4 : Synthèse des effets des bandes fleuries sur les variables suivies lors des trois années d'expérimentation du projet Greenresilient.....	47
Tableau 5 : Synthèse des effets des associations culturales sur les variables suivies lors des trois années d'expérimentation du projet Greenresilient	48
Tableau 6 : Synthèse des effets ou arrières effets du paillage organique sur les variables suivies lors des trois années d'expérimentation du projet Greenresilient.....	49
Tableau 7 : Occurrences des effets positifs et négatifs des leviers d'action lors des trois années du projet Greenresilient (0 : aucun effet, 1 : effet sur une année parmi les trois, 2 : effet sur deux années parmi les trois, 3 : effet sur trois années parmi les trois)	54

Index des annexes

Annexe 1 : résultats du suivi des population d'auxiliaires sur les bandes fleuries du tunnel 5 dans le cadre du projet PLACHOB : « Suivi des essais de gestion agroécologique des pucerons : aménager les cultures pour favoriser les ennemis naturels » (2019).....	68
Annexe 2 : analyse du foin de luzerne effectué avant utilisation en 2019.....	69
Annexe 3 : composition de l'engrais AB flor 4 - 8 - 10	70
Annexe 4 : protocole de dosage des nitrates dans le sol.....	71
Annexe 5 : le protocole du Tea Bag Index (TBI).....	72
Annexe 6 : protocole de la méthode PILazo	73
Annexe 7 : grille de pilotage de la fertilisation de la méthode PILazo (melon et tomate)	74
Annexe 8: photos des différents types de déchets de concombres (prise le 27 juillet)	75
Annexe 9 : les différents types d'insectes prédateurs et leurs propriétés	76
Annexe 10 : listes des packages utilisés pour réaliser les tests statistiques.....	77
Annexe 11 : tableau des données brutes de quantité de nitrate (kg/ha) dans les horizons 0-30cm et 30-60cm à deux dates de prélèvement	78
Annexe 12 : rendement commercialisable de concombres produit entre le 8 juin et le 6 août	79
Annexe 13 : rendement commercialisable de tomates produit entre le 2 juillet et le 6 août.....	80
Annexe 14 : détail de l'évolution des ravageurs sur concombres	81
Annexe 15 : somme des captures par types d'insectes en fonction des deux modalités (barber)	82
Annexe 16 : somme des captures par types d'insectes en fonction des deux modalités (bols jaunes)	83
Annexe17 : résultats des analyses de sol effectué en début de projet Greenresilient.....	84
Annexe 18 : présence de mildiou en fonction des modalités.....	86

Introduction

Dans le cadre actuel de la transition agricole, la notion de durabilité d'un système n'a jamais été aussi importante. Cependant, cette notion complexe ne fait pas consensus au sein de la communauté scientifique qui peine à établir une définition claire et complète (F Zahm, et al. 2015). Une agriculture dite écologiquement saine, économiquement viable et socialement juste et humaine est une des définition que l'on pourrait donner à l'agriculture durable (F Youngberg, et al. 1990).

Face à cet enjeu autour de la durabilité, l'agriculture biologique semble être une des réponse possible. Elle constitue un levier efficace pour une bonne transition agricole d'un point de vue environnemental, économique et social (Levrel, et al. 2018) et suscite un grand intérêt du public et des agriculteurs. L'agriculture biologique est en effet, en pleine expansion avec une augmentation des surfaces cultivées en AB de 17 % entre 2017 et 2018 en France et de 5,9 % en Europe (AgenceBio, 2019). Le maraîchage est particulièrement touché par l'essor du bio avec un nombre d'exploitations en conversion qui ne cesse d'augmenter (plus 60 % entre 2017 et 2018) (Agencebio, 2019). Cette transition agricole s'accompagne d'une forte attirance des consommateurs pour les produits bio et une sensibilité accrue pour les questions éthiques, environnementales et sociales (AgenceBio, 2019).

Face à l'augmentation de la demande, le maraîchage sous serre peut être un moyen d'accroître la production. Cependant, il est souvent plus intensif, présente des rotations plus courtes et des risques sanitaires plus élevés nécessitant plus d'intrants.

La totale dépendance des systèmes maraîchers sous abris au plastique pour confectionner les tunnels et pailler les cultures est une réelle menace à leur durabilité. À titre d'exemple, en 2011, la culture de concombres à elle seule, a nécessité 137 tonnes de films plastiques non réutilisables ou recyclables en France (Erard, et al. 2015). Le plastique non-recyclable et issu du pétrole qui est une ressource non renouvelable condamne donc les systèmes agricoles qui en sont dépendants à une faible durabilité. La persistance de micro plastiques et de phtalates dans le sol ainsi que les risques de libération de gaz à effet de serre les rendent préjudiciables pour l'environnement. Le paillage plastique sur le long terme aboutit à un appauvrissement du sol causé par une accélération du métabolisme du carbone et de l'azote, une augmentation de la dégradation de la matière organique ainsi que l'accumulation de mycotoxines (Steinmetz, Zacharias et al. 2016). De plus, les systèmes sous serres présentent bien souvent des rotations culturales très courtes avec parfois la succession de cultures de même famille entraînant également, une diminution de la fertilité des sols. Afin d'assurer un rendement convenable, l'augmentation de l'utilisation de fertilisants est donc souvent essentielle (H. Kirchmann et al 2008) mais rend le système agricole plus dépendant aux intrants, en général produits hors de l'exploitation.

Les cultures sous serres sont particulièrement vulnérables aux bio-agresseurs, car les risques de contamination entre plantes sont très importants. C'est le cas notamment du virus de la tomate (Tomato brown rugose fruit virus ou ToBRFV) qui, en cas d'introduction dans un système sous abris, risque de ravager l'ensemble de la culture (Anses, 2020). Cette plus forte vulnérabilité entraîne aussi une augmentation de l'utilisation de produits phytosanitaires dont on connaît les effets néfastes sur l'environnement. Le cuivre, très utilisé en maraîchage pour lutter contre le mildiou notamment, en est un exemple, car son accumulation dans le sol (Komarek, et al. 2010) entraîne une baisse de fertilité et perturbe la faune des sols (La Torre, et al. 2018).

Face à ces constats, il semble primordial de trouver des alternatives permettant de rendre plus durable le maraîchage bio sous serre. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet européen Greenresilient qui, depuis 2018, rassemble plusieurs organismes de recherches dont le but commun est de trouver des leviers d'actions permettant la réduction des impacts environnementaux des pratiques agricoles actuelles. L'écosystème est considéré dans son ensemble, via une approche systémique, afin de trouver le meilleur équilibre permettant de produire tout en préservant l'environnement et la durabilité sur le long terme (Hill S. 1985).

L'objet de ce mémoire est de présenter l'effet de trois leviers d'action sur la durabilité du système innovant étudié. Dans une première partie, l'état de l'art permettra de définir ces trois leviers ainsi que nos connaissances actuelles quant à leurs effets sur la durabilité des systèmes agricoles. Une présentation du dispositif expérimental et de la méthodologie de l'expérimentation de l'année 2020 sera décrite en deuxième partie avant d'en présenter les résultats. L'année 2020 étant la dernière année du projet, une synthèse du travail de ces trois années sera effectuée afin d'obtenir une vue d'ensemble du projet. Ces trois parties, permettront enfin d'alimenter la discussion de ce mémoire.

1 – Contexte et objectifs du projet

1.1 – Présentation du projet Européen Greenresilient

Le projet Greenresilient s’inscrit dans le programme 2020 ERA-Net CORE Organic Cofund (lien vers le site internet du projet : <https://www.greenresilient.net/>). Il a débuté en 2018 et finira en 2021, il regroupe 18 centres de recherche, 8 pays (Autriche, Belgique, Danemark, France, Italie, Suisse, Suède et Pays-Bas) et 5 sites d'expérimentation. L’objectif principal de Greenresilient est de démontrer le potentiel et la faisabilité d’une approche agroécologique de la production biologique sous serre. Via une approche multidisciplinaire (agronomie, agroécologie, chimie des sols, entomologie, phytopathologie et écologie), une des ambitions du projet est de proposer des systèmes de cultures innovants, durables et résilients qui conviennent aux contraintes locales des régions concernées. Les pays du Nord et du centre de l’Europe ont pour enjeux de produire à basse température et faible luminosité afin d’utiliser moins d’énergie nécessaire à l’éclairage et au chauffage des serres. Quant aux pays du Sud possédant de fortes pressions de bioagresseurs ainsi que des terres moins fertiles, les enjeux sont principalement autour de la diminution d’utilisation d’intrants. Pour tous les pays, une approche systémique est utilisée pour définir des stratégies qui, en intégrant les connaissances multidisciplinaires permettront d'améliorer la durabilité des systèmes maraîchers sous serre.

1.2 – Le projet Greenresilient au GRAB

Le Grab est l’un des 5 sites expérimentaux du projet Greenresilient depuis 2018, avec pour principal objectif la diminution de l’utilisation d’intrants. L’expérimentation vise à comparer les performances d’un système classique qu’on nomme BAU (pour « business as usual ») avec un système innovant qu’on nomme INN. Trois leviers ont été choisis pour construire le système INN : la présence de bandes fleuries pour favoriser la biodiversité fonctionnelle en alternative aux traitements phytosanitaires ou lâchers d’auxiliaires (lutte biologique), l’association culturale de plusieurs espèces de légumes, et l’utilisation de paillage organique en alternative au paillage plastique. Au total, trois systèmes de cultures printemps/été et deux systèmes de cultures automne/hiver ont été mis en place dans le cadre de ce projet. Nous traiterons uniquement dans ce mémoire des cultures printemps/été.

Lors de la première année d’expérimentation en 2018, l’association de tomates (*Fiorentino* greffé sur *Emperador*) et concombres (*Diapason* greffé sur *Flexifort*) a été étudiée. Lors de la seconde année en 2019, c’est l’association aubergines (*Black Pearl AB* greffé sur *Solanum torvum*) et poivrons (*Almuden NT* en franc) qui a été choisie. Pour cette troisième année d’expérimentation, l’association tomates (*Cauralina* en franc) et concombre (*Diapason* en franc) comme culture principale sera à nouveau étudiée. Les effets de ces associations sur la productivité des cultures ainsi que la lutte contre les ravageurs et maladies sont étudiés lors des

trois années, en comparaison à des cultures pures de tomates, aubergines et concombres respectivement en 2018, 2019 et 2020.

Durant les deux premières années d'expérimentation, du foin de luzerne (25 T/ha) produit localement a été utilisé pour pailler une partie des cultures du projet Greenresilient. En 2018, la fertilisation était identique pour l'ensemble des systèmes étudiés, car l'hypothèse que le foin de luzerne ne minéraliserait pas immédiatement avait été émise. En 2019, 50 unités d'azote en moins a été apporté pour les systèmes avec paillage organique. Les effets sur la lutte contre les adventices ainsi que la fertilisation des cultures étaient observés. Pour la troisième année d'expérimentation, il n'y a pas eu de nouvel apport de foin, et c'est l'arrière-effet sur la fertilisation azoté et l'activité biologique des années n-2 et n-1 du paillage de foin de luzerne qui est observé.

Les bandes fleuries étant constituées d'espèces pérennes, elles sont identiques pour les trois années d'expérimentation.

2 – Etat de l'art

2.1 – Les bandes fleuries

2.1.1 - Biodiversité fonctionnelle et pratiques agricoles

On appelle biodiversité fonctionnelle toute biodiversité ayant un **impact positif** sur l'écosystème cultivé aussi bien sur le plan environnemental, économique ou social (Jean-Paul Bordes, 2018). Les pratiques agricoles intensives, notamment l'utilisation de produits phytopharmaceutiques, ont entraîné une **diminution considérable de la biodiversité** et donc de la biodiversité fonctionnelle, mettant ainsi en danger la production agricole ne bénéficiant plus des services écosystémiques qui en découlent (Butler, et al. 2007).

Bien que l'Agriculture Biologique semble moins problématique pour la biodiversité fonctionnelle, les pratiques restent améliorables et certains insecticides comme le Spinosad utilisé en bio, ont aussi des **effets fortement délétères** pour des organismes non ciblés (Anastassiadou, et al. 2018). De plus, la lutte biologique majoritairement pratiquée en maraîchage sous serre bio s'avère être une **méthode très coûteuse** pouvant mettre en danger la durabilité économique du système (Ricard, et al. 2012).

Les pratiques agricoles peuvent aussi avoir un impact positif sur la biodiversité fonctionnelle, notamment grâce à la mise en place de surfaces d'intérêt agroécologique sur les exploitations agricoles. Ces surfaces permettent de créer de véritables **réservoirs de biodiversité** de plantes, insectes, oiseaux et mammifères (Bianchi FJJA, et al. 2006). On trouve notamment : des carabidés (Varchola et Dunn, 2001), des staphylinidés (Maudsley, et al. 2002), des araignées (Schmidt et Tscharrntke, 2005), des coccinellidés (Honěk, 1989), des syrphides

(Cowgill, et al. 1993), des chrysopides (Sengonca, et al. 2002), des acariens prédateurs (Rieux, et al. 1999), des parasitoïdes (Krueess et Tschardtke, 1994), des Heteroptera prédateurs (Nicholls, et al. 2001) ainsi que des oiseaux insectivores (Dix, et al. 1995).

L'accroissement de la biodiversité peut avoir un effet direct sur l'efficacité du biocontrôle. Le succès de la lutte biologique semble intimement corrélé à **l'augmentation de la biodiversité** : elle permet d'augmenter et de varier les populations de prédateurs ainsi que l'abondance des proies pouvant les nourrir (Snyder WE, et al. 2005). Ces effets sont cependant contestés par Denoth et al (2002), qui assure que l'augmentation de la diversité des auxiliaires n'est pas plus bénéfique que la présence du "meilleur" auxiliaire sur la parcelle, pour lutter de manière efficace contre les ravageurs. Cependant, l'augmentation de la biodiversité permet une **augmentation de la probabilité de présence** de ce meilleur ravageur.

Dans le projet Greenresilient, c'est l'utilisation de **bandes fleuries** qui est étudiée pour permettre une augmentation de la biodiversité fonctionnelle des systèmes maraîchers sous abris et ainsi réduire l'utilisation d'insecticides ou de lâchers d'auxiliaires. Les bandes fleuries correspondent à des surfaces d'intérêt agroécologique composées d'une ou de plusieurs espèces florales (semées ou spontanées) présentes sur une partie d'une parcelle agricole. Elles peuvent être positionnées à plusieurs endroits, mais sont majoritairement présentes en bordure de parcelle ou au niveau des cours d'eau (Les Services de l'état dans le Loiret). Les bandes enherbées ou bandes fleuries sont **parfois obligatoires** pour respecter des zones de non-traitement ou des directives nitrates (Cordeau S et Chauvel B, 2008)(Lafitte J.J. et Cravero G, 2010).

2.1.2 - Les connaissances actuelles sur les effets des bandes fleuries

Les bandes fleuries présentent de nombreux intérêts pour améliorer et faciliter la lutte biologique naturelle. On a pu observer par exemple une diminution de 40 % des larves de *Oulema melanopus* et 55 % des populations adultes de ce même ravageur sur des parcelles présentant des bandes fleuries. Cela permet une diminution de 61 % des dommages observés sur le blé d'hiver tout en diminuant l'utilisation d'insecticide (Tschumi, et al. 2015). En étant positionnées en bordure de parcelle, elles permettent une plus grande augmentation des populations d'auxiliaires de blé (*Syrphidae*) et donc une **meilleure régulation naturelle des ravageurs** (Sebastian Haenke, 2009). En maraîchage, les bandes fleuries se sont aussi montrées efficaces. Une réduction de **75 % de la population de pucerons** a été observée sur des cultures de pommes de terre présentant des bandes fleuries. Ce résultat s'accompagne d'une augmentation de 127 % des oeufs de bombyles et 48 % des oeufs de chrysopes, prédateurs connus des pucerons. En fonction du positionnement des bandes fleuries, les effets sur les populations d'auxiliaires sont différents (Tschumi Matthias, et al. 2016).

Un autre effet bénéfique de telle surface résulte dans leur capacité à **attirer de nombreux pollinisateurs** (bourdons, abeilles solitaires, bombyles) sur les parcelles agricoles (Jönsson, 2015). Le rendement du trèfle des prés est supérieur lorsqu'il est cultivé en présence d'une bande fleurie de phacélie. Il est de plus, positivement corrélé à la largeur de la bande

fleurie. Ce phénomène s'explique par une **augmentation de la population de bourdons** en présence de bandes florales, espèce responsable à 60 % de la pollinisation du trèfle (Rundlöf, et al. 2018). Concernant le succès de reproduction des fraises (*Fragaria Vesca*), l'effet de la bande fleurie est bénéfique pour **les plants à proximité** de ces structures et nul pour les plants éloignés (Herbertsson, et al. 2018). Par ailleurs, on sait qu'une **augmentation de la diversité d'espèces de fleurs** permet aussi une meilleure disponibilité en pollen et nectar, sur une période plus étendue (Mario V., et al. 2014).

2.2 – Les associations culturales

2.2.1 - Définition de l'association culturale

L'association culturale correspond à la **culture simultanée** de deux espèces ou plus, sur la même surface, pendant une période significative de leur cycle de croissance (Willey, et al. 1972). L'objectif de cette association est de **maximiser la croissance** et la **productivité** des plantes cultivées grâce à leurs interactions bénéfiques (Trenbath, 1999). Cette technique culturale, lorsqu'elle est efficace, permet d'assurer une meilleure production en minimisant l'utilisation d'intrants. Ce levier est donc en accord total avec les objectifs globaux du projet Greenresilient.

2.2.2 - Les connaissances actuelles sur les effets des associations culturales

Les cultures en associations présentent un **rendement plus élevé** et plus **stable** que les cultures pures, une **marge brute** plus importante et une meilleure optimisation de l'utilisation des ressources abiotiques (Bedoussac, et al. 2015). En complément de ces résultats généraux, de nombreuses études permettent de caractériser plus en précision les effets de certaines associations. L'association culturale entre légumineuses et céréales réduit les compétitions interspécifiques en renforçant les processus de complémentarité et de facilitation. Cela permet une meilleure exploitation des ressources du milieu et donc une **meilleure efficacité de l'agrosystème** (Olivier Duchene, 2017). En association avec le pois, l'orge présente une nutrition azotée améliorée et le pois une fixation d'azote atmosphérique plus importante. Cela s'explique par la plus forte compétitivité des céréales à l'azote par rapport aux légumineuses qui favorisent ainsi la fixation de l'azote pour subvenir à leurs besoins. L'orge étant en moins forte densité dans le cas d'une association, l'azote minéral du sol est disponible en plus grande quantité pour chaque plante (H. Hauggaard-Nielsen, et al. 2019). Dans le cas de cette association, **moins d'intrants azotés** (chimiques ou organiques) sont nécessaires pour satisfaire les besoins des céréales et assurer un bon rendement et une bonne qualité de production.

Les associations culturales peuvent aussi être utiles pour lutter contre certains ravageurs de cultures et ainsi permettre une **diminution de l'utilisation d'insecticides**. Une étude de (Girma Hailu, 2018) a permis de montrer l'efficacité de l'association maïs/légumineuse pour améliorer la lutte contre *Spodoptera frugiperda*, ravageur très problématique du maïs. La

stratégie “détournement stimulo-dissuasif”, appelée “Push-Pull” en anglais, élaborée grâce à cette association, a permis une réduction considérable de la population de ravageurs, entraînant une augmentation du rendement. Le système en association est ainsi plus résistant et plus durable qu’une culture pure de maïs.

Des effets bénéfiques sur la **biodiversité du sol** ont aussi été observés. Une comparaison de la population de vers de terre présente sur des parcelles de blé en culture pure comparée à du blé semé dans du trèfle, a abouti à des résultats en faveur de l’association : une plus grande abondance de vers de terre et une composition de la population de lombrics semblable à celle d’une prairie permanente (Schmidt, et al. 2001). Une autre étude montrant la meilleure rétention de l’azote dans le sol et la meilleure séquestration du carbone démontre que **l’activité biologique du sol** entière est améliorée en cas d’association (Wen-Feng Cong, et al. 2014).

Même si l’association de cultures a été moins étudiée, c’est aussi un domaine très prometteur en maraîchage. Le concombre associé à l’ail permet une **augmentation de la productivité** du concombre et favorise **l’activité biologique** du sol. Deux années d’expérimentation en tunnel, ont permis de mettre en exergue l’effet allélopathique et antimicrobien de l’ail, permettant une **meilleure croissance** du concombre avec une **augmentation de rendement** de 13,4 % en cas d’association (Xiao, et al. 2012). De plus, alors qu’on observe une diminution de la diversité et de l’abondance des communautés bactériennes en cas de culture pure, les résultats sont **stables** dans le cas de cultures associées. On note aussi l’augmentation de l’activité enzymatique du sol témoignant une amélioration de **l’activité biologique** du sol (Xingang Zhou, et al. 2011). L’étude de Du, et al. (2017) effectuée dans un contexte de fatigue du sol a également montré des résultats tout autant favorables à l’association concombre et ail. Cette association permet de diminuer l’impact de la fatigue du sol sur le rendement du concombre, notamment en augmentant les populations bactériennes et fongiques du sol, et en augmentant l’activité biologique du sol (augmentation de la respiration basale et du quotient métabolique mesurés).

Concernant la lutte contre les ravageurs, une étude menée en 2013 évaluant l’effet de plusieurs associations pour lutter contre l’aleurode du tabac *Bemisia tabaci* a montré une forte efficacité des associations concombre et céleri ainsi que concombre et épinard malabar. Les aleurodes sont fortement repoussées par les composés volatils aqueux libérés par ces plantes (D-limonène et nitrile de géranyle) agissant comme **barrières de protection** du concombre (Qing Zhao, et al. 2013). L’association concombre et amarante pour lutter contre les ravageurs du concombre (*Epilachna Chrysomelina*, *Podagrica Uniforma*, *Dacus Ciliatus*) a fait l’objet d’une étude de Pitan, et al. en 2014. Les résultats montrent une diminution des populations de ravageurs dans les systèmes associés, une diminution des dégâts sur concombres permettant une augmentation du rendement (LER de 0,7). L’étude montre aussi qu’une plantation simultanée des deux espèces aboutit à de meilleurs résultats. C’est le cas dans le dispositif Greenresilient au GRAB, où les plantes associées sont plantés le même jour.

Dans les pays du sud, des associations plus exotiques ont été étudiées. L’association gombos et concombres est délétère pour le gombo mais bénéfique pour le concombre qualifiée de culture “agressive”(Mohamed Fouad, 2007). L’association du concombre avec de l’asiminier

trilobé (Paw Paw) entraîne une diminution du rendement de Paw Paw mais une **augmentation de la marge brute** dégagée par le système (Olubode, et al. 2012).

En ce qui concerne la tomate, une étude de 2014 a montré que son association avec l'ail était fortement favorable. En effet, la **qualité des tomates** (teneur en vitamine C, teneur en acide et poids de la matière sèche) était meilleure en association. Les populations de bactéries et d'actinomycètes ont augmenté et la marge brute dégagée était supérieure qu'en culture pure malgré un rendement plus faible (Liu, et al. 2014). Une étude similaire a montré les effets bénéfiques de l'association tomates et brocolis sur l'assimilation de certains nutriments (N, K, Mg), indiquant la mise en place de processus de facilitation de la nutrition des plantes concernées (Demir, et al. 2006). L'association de la tomate et la ciboulette provoque une diminution considérable de la population de *Pseudomonas solanacearum* infectant la tomate notamment grâce à des exsudats racinaires libérés par la ciboulette qui inhibent la multiplication de *P. solanacearum* (Jing Quan, et al. 1999).

2.3 – Le paillage en agriculture

2.3.1 - Définition et intérêt du paillage en agriculture

Le paillage ou mulch correspond à tout **matériel recouvrant le sol** d'une parcelle agricole (Chalker-Scott, L. 2007). En fonction des matériaux utilisés, on compte **trois catégories de paillage** : le paillage organique, le paillage inorganique (plastique ou biodégradable) et le paillage spécial (roche, sable) (Kader, et al. 2017). Quel que soit le matériel utilisé, les objectifs sont communs : **protéger** le sol pour limiter sa dégradation, **conserver l'eau** en diminuant son évaporation, couvrir le sol pour une meilleure **gestion des adventices**, augmenter la **température** du sol en hiver et la diminuer en été, augmenter l'activité biologique du sol (Kader, et al. 2017). La pratique du paillage est avantageuse d'un point de vue **économique et environnemental** car elle permet une diminution des coûts de gestion des adventices (moins d'herbicides nécessaires ou moins de temps de travail en cas de désherbage mécanique) et une diminution de l'irrigation nécessaire à la bonne conduite de culture (Ingman, et al. 2015). Ces effets sont cependant dépendants de la nature et des modalités de mise en place du paillage.

Actuellement, c'est le **paillage plastique** qui est majoritairement utilisé. Les plus gros avantages des paillis en plastique proviennent de leurs **propriétés optiques** permettant la transmission ou la réflectance de longueurs d'ondes spécifiques du rayonnement solaire entrant en contact avec la surface du sol (Chalker-Scott, 2007). Ils permettent une augmentation du **rendement**, de la précocité et de la **qualité des productions** et une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau.

Depuis les années 60, l'utilisation des paillages **photodégradables ou biodégradables** comme alternatives au paillage plastique est étudiée (Kasirajan, 2012). L'utilisation de paillages biodégradables a montré des résultats encourageants avec une bonne dégradation des matériaux et de bons rendements. Cependant, certains problèmes de taille, comme le **temps de décomposition** pouvant être trop rapide ou trop lent, ainsi que le **coût** des matériaux, rendent cette pratique peu attractive auprès des agriculteurs (Kasirajan, 2012).

Dans le cadre du projet Greenresilient, c'est le **paillage organique** qui est étudié comme alternative au paillage plastique. Le paillis organique peut être directement produit sur la ferme ou acheté à d'autres agriculteurs le rendant très disponible et peu onéreux (Yin, et al. 2016). Actuellement, la **paille de céréales** est la plus communément utilisée (Ji S., et al. 2001.).

2.3.2 - Connaissances actuelles sur les effets du paillage organique

De nombreux avantages à l'utilisation de paillage organique ont été observés concernant la **préservation de l'humidité** du sol car ce type de paillage réduit de manière efficace l'évaporation de l'eau présente dans le sol en comparaison à un sol nu (Zribi, 2015). Une étude de 2007 sur l'utilisation de paille de *Pennisetum Purpureum* a montré une diminution du ruissellement, une meilleure infiltration de l'eau et une diminution de l'érosion du sol rendant cette pratique très efficace pour **réduire les pertes en eau** (Adekalu, et al. 2007). Le paillage organique permet une augmentation de la matière organique (MO) du sol ce qui entraîne une augmentation de la porosité et donc une diminution de la densité apparente du sol (Sinaj et Sokrat, 2019). Cette diminution permet une **meilleure circulation de l'eau** et une meilleure **prospection racinaire** (Abdellaoui, et al. 2011) ayant pour conséquences une **meilleure croissance et nutrition** des plantes cultivées. Le paillage organique semble favoriser la lutte biologique naturelle. Par exemple, pour la culture du poivron, **plus d'auxiliaires** ont été observés avec l'utilisation de paillage organique (Mochiah, et al., 2012).

Une comparaison des effets du paillage organique (balle de riz) contre du paillage synthétique (polyéthylène noir) sur l'état hydrique du sol en condition d'irrigation limitée a été favorable au paillage organique. Il permet une **humidité du sol** optimale pour la culture de blé ainsi qu'une **meilleure efficacité** de l'utilisation de l'eau par le blé malgré un stress hydrique (Chakraborty, 2008). Une étude de 2015 vient cependant contredire ce résultat car une évaporation moindre de l'eau du sol a été observée avec la modalité paillage plastique comparée à un paillage organique (Zeibi, et al. 2015). Le paillage organique entraîne une augmentation de la température du sol plus lente que le paillage plastique (baisse de 1 à 4°C en fonction des conditions climatiques) (Johnson, et al. 2004) pouvant entraîner un **retard de croissance** des plantes cultivées.

Certains inconvénients du paillage organique sont cependant avancés. Ce paillage peut entraîner une **acidification** trop importante du sol (Chalker-Scott L., 2007), il peut contenir des graines **salissant les parcelles** (Boyhan, et al. 2006) et entraîner ainsi une **diminution du rendement** (Maltas, et al. 2018). Une étude comparant l'utilisation de paillage organique à un désherbage à la main de culture d'oignons, montre une diminution du rendement en cas de paillage organique ainsi qu'un taux de développement d'adventices très important (George E, et al. 2006). De plus, les mulchs à base de paille ayant un C/N très élevé peuvent entraîner une **faim d'azote**. (Kasirajan, et al. 2012). En effet, les microorganismes du sol en surnombre immobilisent l'azote qui n'est alors plus disponible pour assurer la bonne nutrition des plantes cultivées (Maltas, et al. 2018).

Le foin de luzerne n'est pas souvent utilisé comme paillage mais présente un effet **fertilisant**, lié à sa plus grande richesse en azote, qu'on ne retrouve pas avec des pailles de céréales. Une étude en 2006 a montré une corrélation positive entre la **quantité de foin de luzerne** utilisée pour le paillage et **l'absorption d'azote** de la culture, **le rendement** en grains et la **teneur en protéines** du grain. Une quantité de 3,9 à 5,2 tonnes de paillage par hectare permet d'obtenir le même rendement qu'avec un amendement de 30 à 60 kg par hectare de nitrate d'ammonium. De plus, à rendement équivalent, le grain du blé paillé a un **plus haut taux de protéines** que celui issu de la fertilisation minérale. Ces effets bénéfiques sur la nutrition des cultures sont observables l'année suivante à l'utilisation du paillage de foin de luzerne (Wiens, et al. 2006). L'utilisation de ce type de paillis est donc très prometteuse pour les systèmes à faibles intrants car il permet aussi une diminution des fertilisants organiques d'origine exogène.

4 - Problématique et démarche

4.1 – La problématique du projet Greenresilient dans la station expérimentale du Grab

Lors des trois années d'expérimentation, l'objectif du projet Greenresilient était de répondre à la problématique suivante :

La mise en place de bandes fleuries, d'associations culturales et de paillage organique permet-elle de diminuer la dépendance aux intrants des systèmes maraîchers bio sous abris et ainsi d'améliorer leur durabilité ?

4.2 – Les sous-questions et hypothèses de l'année 2020 traitées dans ce mémoire

Pour chaque année d'expérimentation, des sous-questions permettant de répondre à la problématique générale sont posées, ainsi que des hypothèses élaborées grâce aux références connues et aux années antérieures d'expérimentation. Au cours de l'été 2020, nous nous interrogerons et émettrons les hypothèses suivantes :

Les bandes fleuries, en améliorant la biodiversité fonctionnelle, permettent-elles d'assurer une meilleure lutte contre les ravageurs des cultures ?

On émet l'hypothèse qu'il y aura plus d'auxiliaires sur les modalités avec bandes fleuries permettant une diminution des dégâts de ravageurs et une meilleure résistance du système.

L'association culturale concombres et tomates est-elle un moyen efficace d'assurer une bonne productivité et un bon état sanitaire des cultures ?

On émet l'hypothèse ici que le système en association est plus productif car il permet de limiter les compétitions intraspécifiques des espèces cultivées et ainsi d'assurer une meilleure utilisation des ressources du milieu. De plus, on s'attend à une diminution des pertes dues aux bio-agresseurs car le système associé permet de limiter la propagation des bio-agresseurs.

L'utilisation de paillage organique de foin de luzerne les deux premières années d'expérimentation, a-t-elle un arrière effet sur la nutrition azotée des cultures actuelles ?

On émet l'hypothèse que l'arrière effet du paillage organique contribue à une meilleure nutrition azotée des plantes grâce aux reliquats azotés, malgré une diminution de la fertilisation effectuée.

Le système innovant INN combinant l'ensemble de ces leviers est-il plus productif et durable que le système classique BAU ?

On émet l'hypothèse que le système INN est le plus résilient en cas de stress, qu'il demande moins d'intrants tout en restant aussi productif que le système BAU.

L'année 2020 étant la dernière année d'expérimentation, nous nous posons aussi la question suivante :

Quelles grandes conclusions peut-on tirer des trois années d'expérimentation pour répondre à la problématique générale du projet Greenresilient ?

4.3 – La démarche utilisée

Afin d'élaborer des hypothèses, les connaissances actuelles concernant les trois leviers étudiés ont été recensées dans l'état de l'art. L'approche expérimentale systémique est ensuite utilisée pour tester ces hypothèses et répondre à la problématique. Pour appréhender la complexité du système innovant INN combinant les trois leviers, une telle approche est nécessaire car elle nous permet de comprendre les effets des interactions entre chaque levier sur les paramètres du système (Cambien et al, 2007). Suite à l'analyse des données ayant été recueillies lors de l'expérimentation, on peut évaluer le système dans sa globalité et comprendre si la combinaison de ces leviers agroécologiques permet une meilleure durabilité du système maraîcher sous abris.

5 - Matériels et méthodes

5.1 - Dispositif expérimental

5.1.1 - Aménagement spatial des tunnels expérimentaux

L'essai Greenresilient a été mis en place dans deux tunnels de 400 m² (50 m * 80 m) de la station expérimentale du GRAB pour les trois années d'expérimentation. Le sol est de type limono-argileux calcaire profond, typique des alluvions de la Durance.

Sur l'ensemble des tunnels sont réparties six modalités correspondant à des systèmes présentant des combinaisons de leviers différentes. La modalité numéro 1 correspond au témoin (BAU), il s'agit en 2020 d'une culture pure de concombre sur paillage plastique dans un tunnel sans bandes fleuries. La sixième modalité correspond au système innovant (INN) combinant les trois leviers mobilisés dans l'essai. Le reste des modalités sont des systèmes intermédiaires présentant un levier ou une combinaison de deux leviers. Ces systèmes intermédiaires nous permettent d'appréhender l'effet de chaque levier sur les paramètres d'étude et ainsi comprendre les interactions entre deux leviers. On notera que chaque système où un levier a été mis en place pourra être comparé à un témoin ne présentant pas le levier concerné. L'effet du paillage organique n'est cependant évalué que sur l'association culturale.

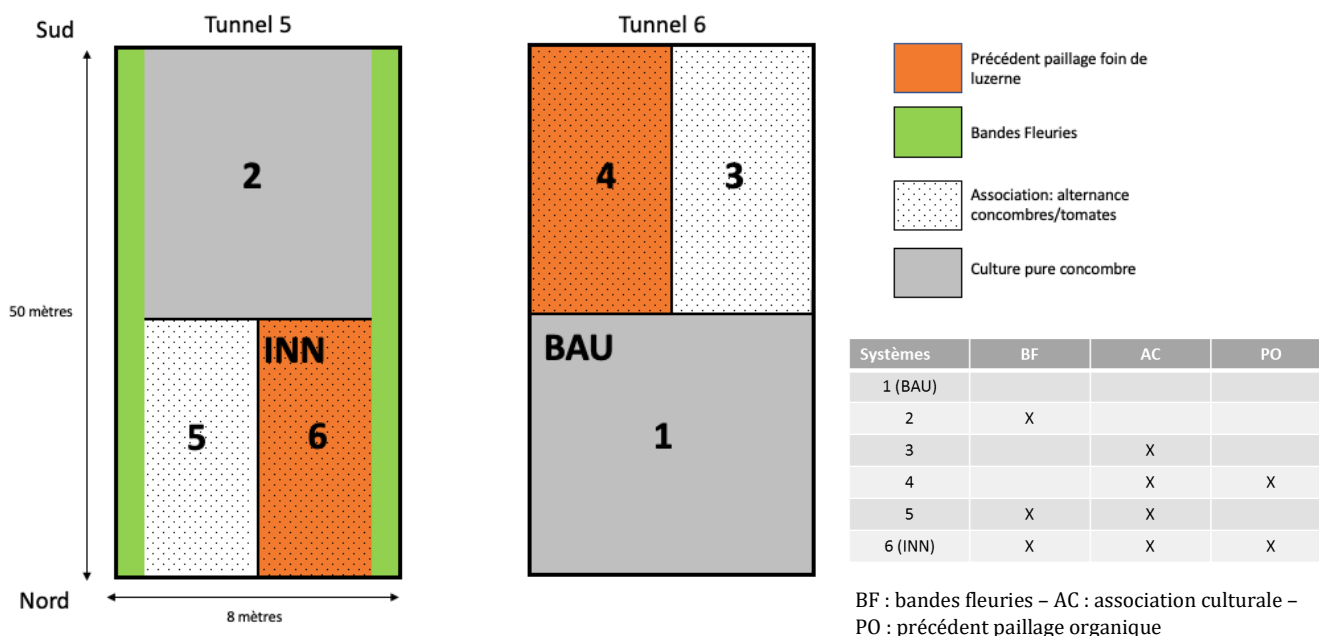


Figure 1 : Disposition des modalités et leviers de l'essai Greenresilient sur les tunnel 5 et 6

Pour chaque modalité, 4 placettes composées de 10 plantes sont étudiées. Dans le cas des modalités de culture pure 1 et 2 il s'agit de 10 concombres, pour les autres modalités, les placettes sont constituées de 5 concombres et 5 tomates. L'essai permet donc un suivi de 24 placettes équivalant à 160 plants de concombres et 80 plants de tomates. Toutes les placettes se trouvent sur les rangs extérieurs des tunnels.

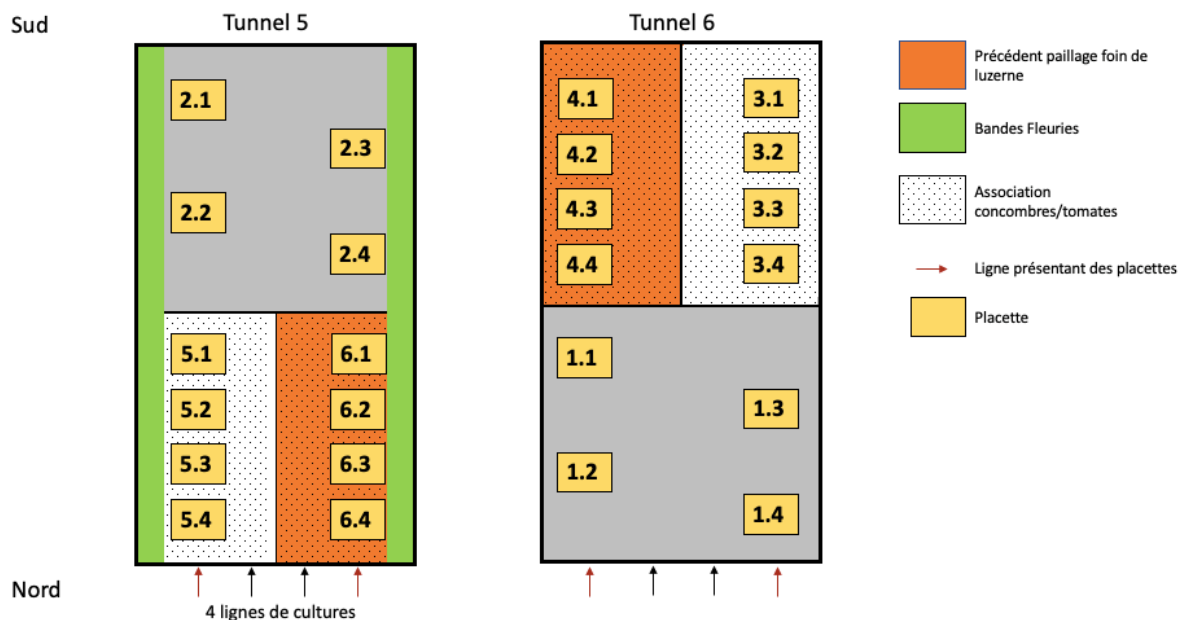


Figure 2 : Positionnement des placettes sur les tunnels 5 et 6

5.1.2 – Présentation des trois leviers d’actions

5.1.2.1 – Les bandes fleuries

Les résultats du projet AGATH” (gestion agroécologique du puceron *Aphis gossypii*) et du projet “MUSCARI” (Mélanges botaniques utiles aux systèmes de culture et auxiliaires permettant une réduction des insecticides) (Lambion 2016), menés en 2016, ont guidé l’élaboration des deux bandes fleuries présentes dans le tunnel 5. Elles sont chacune composées de **6 espèces pérennes** différentes dont la disposition est présentée sur la figure 3 ci-dessous. Malgré la disposition en « patches » des espèces dans les bandes fleuries qui n’habitent ainsi pas la même population d’insectes et arthropodes (annexe 1), on considère l’effet des bandes fleuries comme **homogène** sur l’ensemble du tunnel 5 dans l’essai Greenresilient.

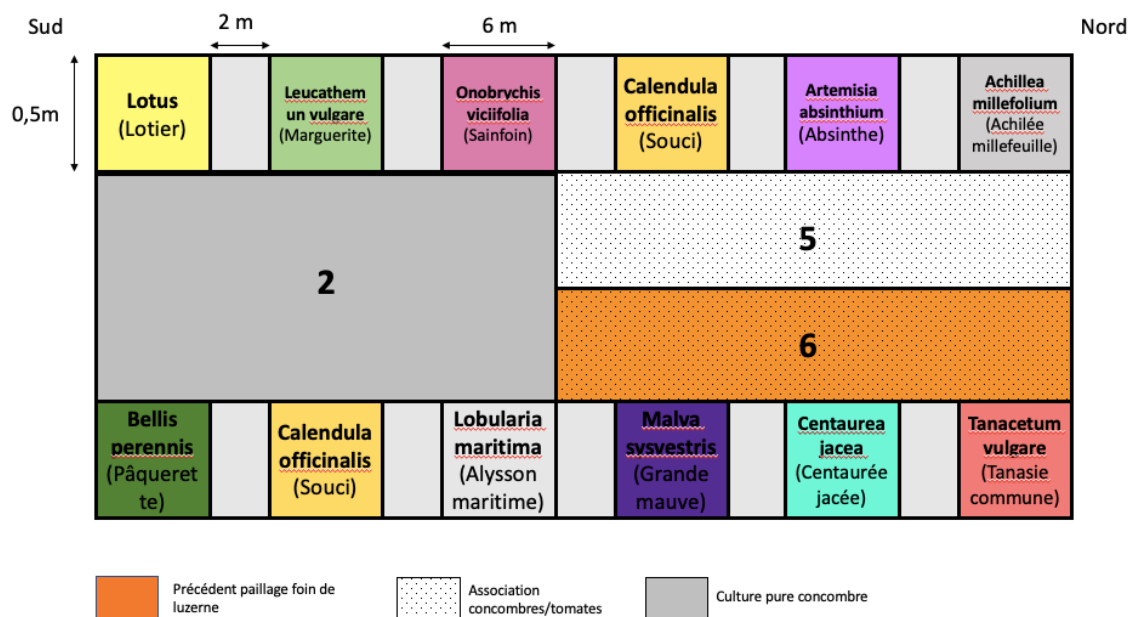


Figure 3 : Composition et organisation des bandes fleuries du tunnel 5

5.1.2.2 – L’association culturale

Le concombre et la tomate, respectivement de la famille des cucurbitacées et solanacées, présentent des itinéraires techniques, un mode de palissage et une période de culture **semblables**. Le concombre étant très sensible aux maladies et ravageurs, il y a un réel enjeu autour de **l’amélioration de la conduite** d’une telle culture pour **diminuer** les intrants nécessaires. Dans le cadre de notre expérimentation, une disposition par substitution a été effectuée en alternant plants de concombres et plants de tomates sur chaque rang, le but étant de maximiser les effets de l’association.

5.1.2.3 - L’arrière-effet du paillage organique de foin de luzerne

Lors des deux premières années d’expérimentation, c’est du **foin de luzerne** produit localement qui a été utilisé pour pailler une partie des cultures du projet Greenresilient (Cf figure 1). Celui-ci était disposé en surface en couche de 6 à 8 cm environ (soit 25t/ha) sur les cultures d’été après le travail du sol, et enfoui à la fin de la culture. Pour la troisième année d’expérimentation, uniquement du paillage plastique est utilisé pour l’ensemble des cultures et c’est **l’arrière-effet** du paillage de foin de luzerne des deux années précédentes qui est étudié. Les propriétés de ce paillage sont présentées en annexe 2.

5.2 - La conduite de culture

5.2.1 – Gestion de la fertilisation

En 2020, les fertilisants AB Flor 4-8-10 (composition en annexe 3) et de la farine de plume 13-0-0 ont été utilisés pour satisfaire les besoins nutritifs des cultures. La fertilisation effectuée dans les tunnels a été raisonnée en fonction du paillage effectué lors des années 2018 et 2019 et demeure identique entre le tunnel 5 et 6. Ainsi, pour les modalités 4 et 6 (précédent foin de luzerne), la fertilisation a été réduite de moitié pour la farine de plume et d'un peu moins de la moitié pour l'AB Flor, de façon à apporter 80 unités N/ha, contre 190 dans les autres modalités. Le détail des apports de fertilisants est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Fertilisation effectuée en fonction des modalités

	AB Flor 4-8-10	Farine de plume 13-0-0	Vinasse de betterave	Total des apports (kg/ha)
Modalités 4 et 6 avec précédent foin de luzerne	1,5 t/ha, N : 60, P : 120, K : 150	150 kg/ha soit N : 20	Aucun apport	N : 80, P : 120, K : 150
Modalités 1, 2, 3, 5 sans précédent foin de luzerne	2,7 t/ha soit, N : 108, P : 210, K : 270	333 kg/ha soit N : 43	N : 40	N : 190, P : 210, K : 270

En cours de culture, deux apports de 20 unités d'azote par hectare ont été réalisés par fertirrigation avec des vinasses de betterave sur les modalités sans précédent foin de luzerne (1, 2, 3 et 5). Les mesures d'azote pétiolaire des plantes montraient en juin une forte chute de la nutrition azotée des concombres et tomates ce qui a motivé les re-fertilisations.

5.2.2 - Préparation du sol et dispositif de plantation

Le sol a été travaillé à l'aide d'un griffon, d'une herse rotative et d'un cultivateur le 22 avril avant la plantation. Les gaines de goutte à goutte et le paillage plastique ont ensuite été posés sur l'ensemble des modalités. Le 28 avril, les plants de concombres de la variété Diapason (*Cucumis Sativus L.*) non greffés et les tomates de la variété Cauralina (*Lycopersicon lycopersicum L.*) non greffés ont été plantés sur 4 rangs simples dans les tunnels 5 et 6. Les plants proviennent du pépiniériste Sarl du Tilleul et sont certifiés être issus de l'agriculture biologique.

La densité de plantation est de 1,25 plants/m² et les plantes bénéficient d'un palissage vertical sur ficelle. L'ensemble des modalités bénéficient d'un paillage plastique (polyéthylène) opaque marron étant micro-perforé.

5.2.3 – Irrigation des cultures

L'irrigation est différenciée entre les deux tunnels et entre la partie Nord et Sud de chaque tunnel. Le pilotage de l'irrigation s'effectue grâce au suivi des valeurs tensiométriques des Watermarks situés dans chaque demi-tunnel (CF figure4). L'objectif est de conserver une valeur tensiométrique comprise entre 20 cbar et 40 cb à 30cm de profondeur et une valeur de 35cbar à 45cm de profondeur. Si les valeurs relevées sont supérieures, plus d'eau sera apportée dans la zone concernée et inversement si les valeurs relevées sont plus basses. Cette année, l'irrigation a été homogène entre les parties Nord et Sud des tunnels avec un apport d'environ 790 mm d'eau par goutte à goutte ou aspersion.

5.2.4 - Suivi sanitaire

A partir de début juin, certains plants de concombres présentaient les symptômes du virus "peau de crapaud" dont les cicadelles sont les vecteurs. Pour limiter la propagation du virus, nous avons procédé à l'arrachage des plants atteint le 11 juin.

L'apparition de mildiou sur les concombres a provoqué trois traitements à l'aide d'un mélange de soufre et cuivre en juin pour limiter sa propagation.

Dès les premières apparitions d'acariens tétranyque (*Tetranychus urticae*), une introduction d'acariens prédateurs *Amblyseius californicus* a été effectuée le 19 juin. Un lâché de *Aphidius colemani* a été effectué le même jour en prévention d'une potentielle invasion de pucerons. Ces lâchés concernent uniquement le tunnel sans bandes fleuries.

5.3 – Mesures et observations

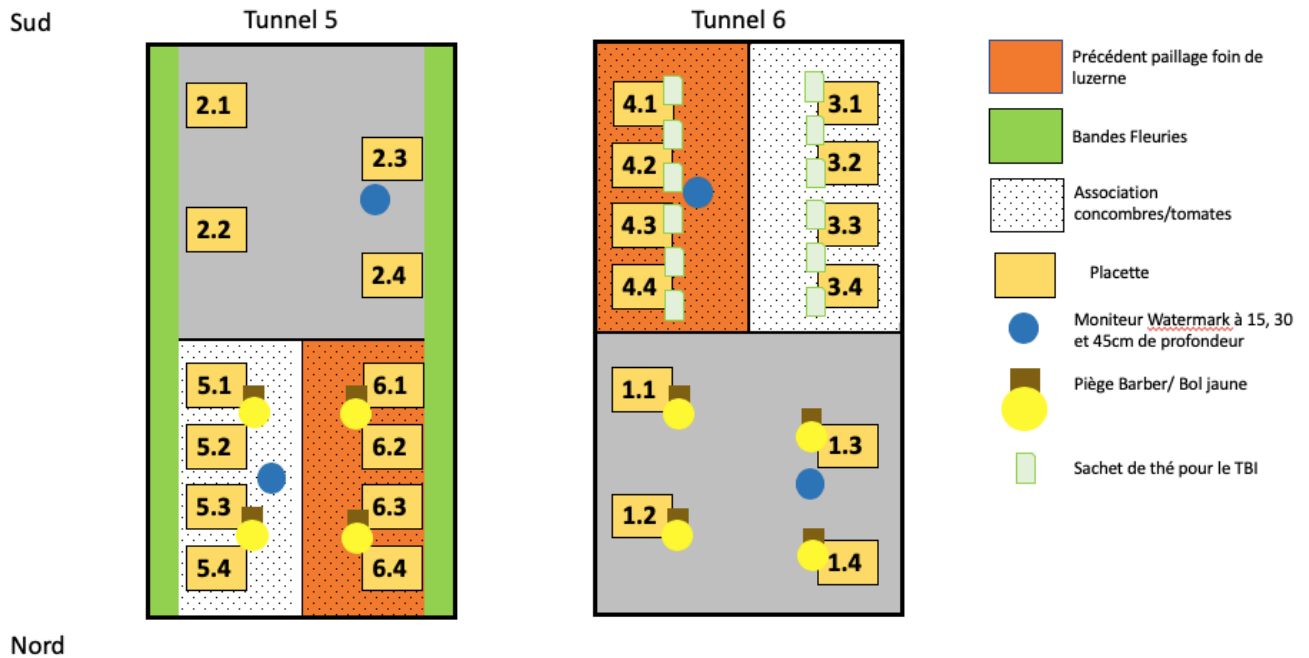


Figure 4 : Positionnement des dispositifs en fonction des placettes et modalités.

5.3.1 - Les paramètres du sol

5.3.1.1 - Evolution de l'azote disponible dans le sol

Toutes les deux à trois semaines à partir du 19 Mai, un suivi des nitrates du sol est effectué sur l'horizon 0-25 cm. Deux échantillons, résultants chacun de 15 prélèvements à la tarière, sont analysés pour chaque modalité. Les nitrates présents dans chaque échantillon sont ensuite dosés au Nitratecheck (voir protocole en annexe 4).

Des analyses de sol des horizons 0-30 cm et 30-60cm sont aussi effectuées selon le même protocole d'échantillonnage à 3 dates : avant la plantation, au milieu et en fin de culture. Les échantillons sont envoyés au laboratoire d'analyse Auréa afin de mesurer la totalité de l'azote minéral présent dans le sol.

5.3.1.2 - Tea Bag Index (TBI)

Cette méthode standardisée, peu coûteuse et facile à mettre en place nous permet d'appréhender l'évolution de la matière organique du sol et ainsi d'appréhender l'activité biologique du substrat. Le protocole expérimental utilisé est présenté en annexe 5.

Six couples de sachets de thé (thé vert et thé roïbos) ont été positionnés dans le sol le 10 juin et incubés pendant 57 jours sur les modalités 4 (précédent foin de luzerne) et 3 (Cf figure 4). La comparaison des dynamiques de dégradation de la matière organique présentes dans les sachets de thé nous permettra de savoir si deux années d'apport de foin de luzerne influencent l'activité des microorganismes responsables de la décomposition de la matière organique du sol.



Figure 5 : Dispositif du tea bag index

5.3.2 - Suivi du développement des cultures

5.3.2.1 - Croissance des plantes

Afin de déterminer l'évolution de la croissance des plants dans le temps, la mesure de leur hauteur a été effectuée toutes les deux semaines. Pour cela, tous les plants de concombres et de tomates constituant les placettes ont été mesurés du sol à l'apex principal. Pour les modalités pures 1 et 2, 40 concombres ont donc été mesurés contre 20 concombres et 20 tomates pour les modalités associées. Les mesures de hauteur ne pouvant plus se faire lorsque les plants dépassent 2 mètres, trois mesures ont été réalisées.

5.3.2.2 - Nutrition azotée des cultures

Afin de déterminer l'état de nutrition azotée (taux de nitrate dans la sève) des cultures, nous avons utilisé la méthodologie PILazo dont le protocole se trouve en annexe 6 et les recommandations de fertilisation en annexe 7. Les mesures sont effectuées toutes les deux semaines et ont débuté le 25 mai. Pour les modalités pures, on prélève deux fois dix pétioles de concombres. Pour les modalités en association, on prélève deux fois dix pétioles de tomates et deux fois dix pétioles de concombre par modalité. Le pétiole de la plus jeune feuille de taille adulte est à chaque fois prélevée. Ce test nous permet de suivre les différences de nutrition entre les modalités et de décider de réajustements d'engrais en cours de culture si nécessaire.

5.3.2.3 - Rendement

Cet indicateur est mesuré pour chaque placette soit 4 répétitions par modalité. Les récoltes de concombre ont débuté le 6 juin avec deux récoltes par semaine, et celles de tomate le 2 juillet. Les fruits sont répartis en deux catégories : les commercialisables dont le poids est compris entre 340 g et 600 g et les déclassés, non commercialisables pour de la vente en gros. Les causes de déclassement des concombres peuvent être diverses : concombres tordus, poids inférieur à 340 g ou supérieur à 600 g, dégâts de chenilles ou escargots (voir annexe 8). Ainsi, on obtient trois variables d'intérêts : le poids total, le poids commercialisable et le poids de « déchets » produits par plant.

5.3.3 - Le suivi de la biodiversité fonctionnelle

5.3.3.1 - Comptage des ravageurs et auxiliaires

Toutes les deux semaines, un comptage des ravageurs et auxiliaires présents sur les plantes a été effectué à partir du 25 mai. Pour cela, on compte sur 5 feuilles de 5 plants par placette, le nombre de ravageurs des familles suivantes : pucerons (verts et noirs), aleurodes (larves ou adultes), acariens et *Tuta absoluta*. On attribue une classe à chaque espèce en fonction de l'intensité de présence dénombrée selon l'échelle suivante :

Tableau 2 : Classes d'intensités en fonction du nombre d'individus observés sur les feuilles des plantes.

Classe	0	1	2	3	4	5
Nombres de ravageurs	aucun	1 à 3	4 à 10	11 à 30	31 à 100	> 100

On effectue aussi le comptage des auxiliaires suivants : les momies (pucerons ayant été parasités par *Aphidus Colemani*), les macrolophus et les phytoseïdes.

5.3.3.2 - Pièges barber

Les pièges barber nous permettent d'effectuer des suivis de population d'insectes et arthropodes terrestres. Des gobelets remplis d'eau savonneuse sont enterrés de telle sorte qu'ils affleurent au niveau de la surface du sol. Ils sont recouverts afin qu'aucun élément aérien ne tombe dans le piège. Au total, 8 pièges sont positionnés sur les modalités 1 (BAU), 5 et 6 (INN) (Cf figure 4). Les pièges sont en place une semaine sur deux, les comptages sont donc effectués toutes les deux semaines. Les populations de macro-invertébrés (prédateurs généralistes, carabes, staphylins, opilions, araignées et scolopendres) sont identifiées et dénombrées. Les populations sont regroupées pour donner un nombre moyen d'insectes auxiliaires présents par modalité.



Figure 5 : Piège Barber

5.3.3.3 - Bols jaunes

Sur le même principe que les piège barber, des bols jaunes remplis d'eau savonneuse ont été positionnés au même endroit dans les tunnels afin de déterminer les populations d'insectes aériens présents. Ils sont placés une semaine sur deux en alternance avec les pièges barber. Les pièges sont ensuite vidés et les populations de prédateurs généralistes et ravageurs communs volants sont dénombrés. Les populations sont regroupées pour donner un nombre moyen d'insectes auxiliaires présents par modalité. Un tableau des différents types de prédateurs ainsi que leurs propriétés est présenté en annexe 9.



Figure 6 : Bol jaune

5.4 - Outils utilisés pour l'analyse de données

Les analyses de données ont été effectuées avec les relevés terrains de l'année 2020. Certaines modalités ont été regroupées afin de mettre en évidence l'effet de certains leviers (CF tableau 2). En complément des analyses graphiques, une analyse statistique a été effectuée avec le logiciel R (version 4.0.2). Pour l'ensemble des indicateurs, nous étudions l'effet des modalités ou regroupement de modalités (variables qualitatives) sur les variables d'intérêts (variables quantitatives). Des analyses de variances (ANOVA), avec un risque alpha de 5% accepté, ont été réalisées. Les hypothèses de validité de l'ANOVA (la normalité, l'indépendance et l'homoscédasticité des résidus) ont été vérifiées via les tests de Shapiro-Wilk et Barlett ainsi qu'une analyse graphique des valeurs résiduelles (droite de Henry des valeurs résiduelles, histogramme des valeurs résiduelles, valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées et valeurs résiduelles en fonction de l'ordre). Lorsque les conditions de validité de l'ANOVA étaient réunies, un test post-hoc de Tukey a été réalisé. En cas d'impossibilité d'effectuer l'ANOVA, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été effectué suivi d'un test de Wilcoxon. L'ensemble des packages utilisés lors de cette analyse de données est présenté en annexe 10. Les deux tableaux suivants résument la structure des données étudiées et les analyses ayant été effectuées.

Tableau 3 : Présentation des données utilisée et de la stratégie d'analyse de données.

Indicateurs	Échantillonnage	Fréquence de relevés	Nombre de relevés au total	Variabiles d'intérêts	Comparaisons effectuée	Méthodes d'analyse
Azote nitrique du sol	Deux échantillonnages par modalité	Toutes les deux à trois semaines	Six relevés, soit 12 observations par modalité	Quantité de NO3- des échantillons de sol (kg/ha)	Toutes les modalités entre elles + modalités 4 et 6 (associée, précédent foin de luzerne) comparées aux 3 et 5 (associées).	Analyse graphique, Anova, Tukey
TBI	Six couples de sachets de thé sur les modalités 3 et 4	Incubation de 57 jours au total	Un relevé, soit 6 observations par modalité	Taux de décomposition de la matière organique (%)	Entre modalité 3 et 4 (arrière-effet paillage organique)	Kruskal-Wallis
Croissance des cultures	Par placette	Toutes les deux semaines	Trois relevés, soit 120 observations par modalité	Hauteur des plantes (cm)	Toutes les modalités entre elles	Kruskal-Wallis
Nutrition azotée des cultures	Deux échantillonnages par modalité	Toutes les deux semaines	Quatre relevés, soit 8 observations par modalité	Concentration de NO3- présent dans la sève des échantillons (ppm)	Toutes les modalités entre elles + modalités 4 et 6 (associée, précédent foin de luzerne) comparées aux 3 et 5 (associées).	Analyse graphique, Kruskal – Wallis, Wilcoxon test, ANOVA, Tukey
Rendement	Par placette	Deux récoltes par semaine	18 pour les concombres, 11 pour les tomates	Poids total cumulé produit par plante (kg/plant)	Ensemble des modalités entre elles	Analyse graphique, Anova, Tukey
Présence de bioagresseurs	5 concombre pour les modalités pures, 5 concombres et 5 tomates pour les modalités associées	Toutes les deux semaines	6 observations	Classe obtenue pour chaque bio-agresseur	Ensemble des modalités entre elles	Analyse graphique, Kruskal- Wallis
Présence de prédateurs généralistes	Deux pièges pour les modalités 5 et 6 et quatre pour la modalité 1	Toutes les deux semaines	3 relevés par pièges	Nombre moyen d'auxiliaires présents	Modalité 1 (BAU) et 6 (INN)	Analyse graphique, Kruskal- Wallis

6 – Résultats

6.1 – Évolution des paramètres du sol

6.1.1 – Evolution de l'azote disponible dans le sol au cours de la culture

L'étude de ce paramètre nous permet de déterminer si l'un des trois leviers activés lors de l'essai a une influence sur l'évolution des nitrates présents dans le sol. L'arrière-effet du foin de luzerne est étudié avec une attention particulière car nous avons émis l'hypothèse que plus d'azote sera disponible sur ces modalités. Les résultats bruts obtenus pour les horizons 0-30cm et 30-60cm sont présentés en annexe 11.

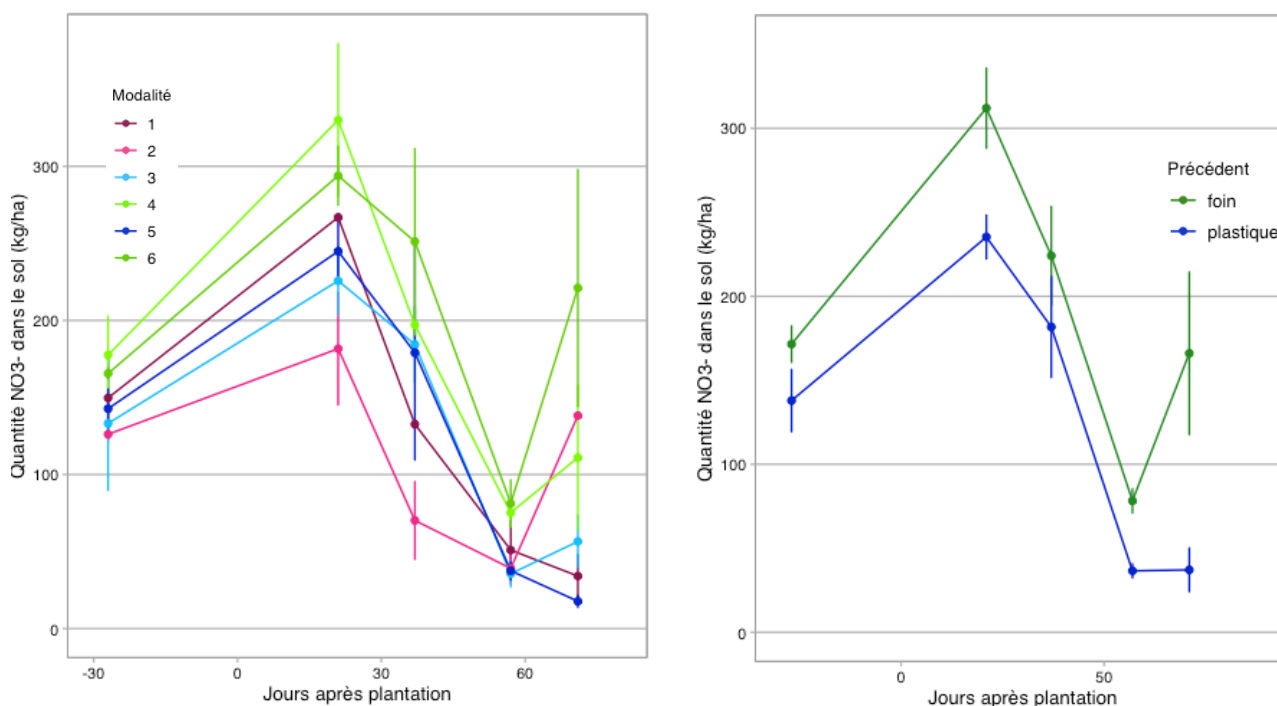


Figure 7 : Evolution de la quantité de nitrate du sol sur l'horizon 0 – 25cm en fonction du temps. A gauche résultats par type de modalité (1 : BAU, 6 : INN, 2 : cultures pures avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). A droite résultats en fonction du précédent paillage organique (modalités 4 et 6) ou plastique (modalités 3 et 5) sur les modalités associées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'ensemble des modalités suivent des évolutions identiques jusqu'au 57^{ème} jour : les valeurs maximales de nitrate sont relevées en début de cultures puis chutent continuellement. On observe ensuite une augmentation des quantités de nitrates pour les modalités avec précédent foin de luzerne uniquement, potentiellement dû à une augmentation de la dynamique

de minéralisation du paillage. La valeur initiale après plantation pour les modalités avec précédent foin de luzerne (4 et 6) est de 312 kg/ha de nitrate contre 230 kg/ha pour les autres modalités et ce, malgré une fertilisation initiale diminuée pour ces modalités. Les quantités de nitrate du sol sont significativement supérieures sur les modalités bénéficiant de l'arrière effet foin de luzerne (p-value de l'ANOVA de 0.01368). Aucune différence n'est observable entre les modalités pures (1 et 2) et les modalités associées sans arrière effet foin de luzerne (3 et 5).

6.1.2 – Décomposition de la matière organique (TBI)

Le taux de décomposition k et le taux de stabilisation S ont été calculés après 57 jours d'incubation des sachets de thé selon la méthode normalisée.

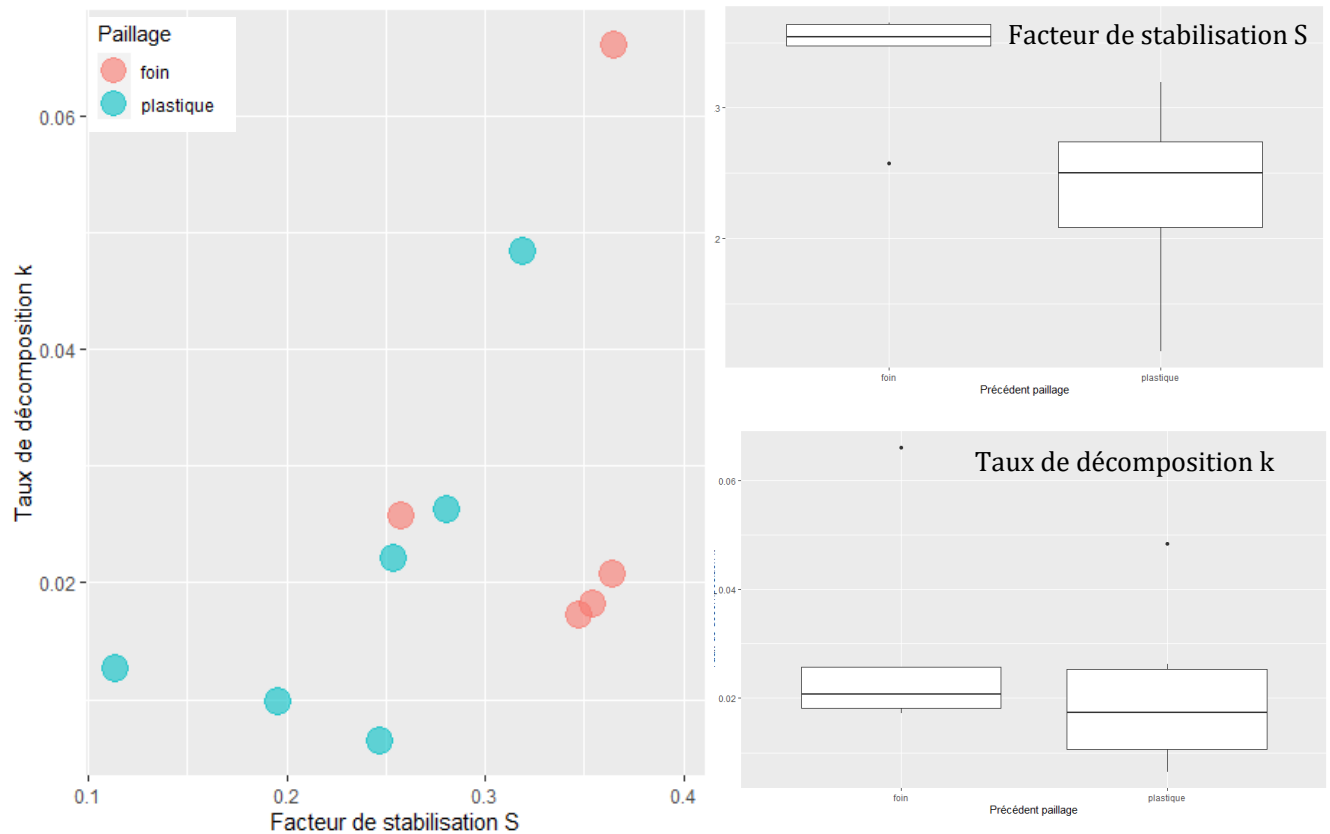


Figure 8 : Taux de décomposition k en fonction du taux de stabilisation après une incubation de 57 jours sur les modalités 3 (plastique) et 4 (foin). Boxplot de la répartition des valeurs de stabilisation en fonction du précédent paillage (en haut) et boxplot de la répartition des valeurs de taux de décomposition k en fonction du précédent paillage.

En fonction du précédent paillage, les valeurs du taux de décomposition k sont semblables (p-value = 0.4652) et le facteur de stabilisation est supérieur dans le cas d'un

précédent foin de luzerne (p-value = 0.009499). Ainsi, le précédent paillage organique a entraîné une plus forte stabilisation de la matière organique que le paillage plastique.

6.2 – Evolution et productivité des cultures

6.2.1 – Croissance des cultures

Résultats pour les concombres

La première mesure a été effectuée 27 jours après plantation car le site expérimental n'était pas accessible avant. Lorsque les plants de concombres ont dépassé 2 mètres, la mesure de leur hauteur n'était plus possible. On cherche à déterminer si les leviers mobilisés influencent la croissance des plantes.

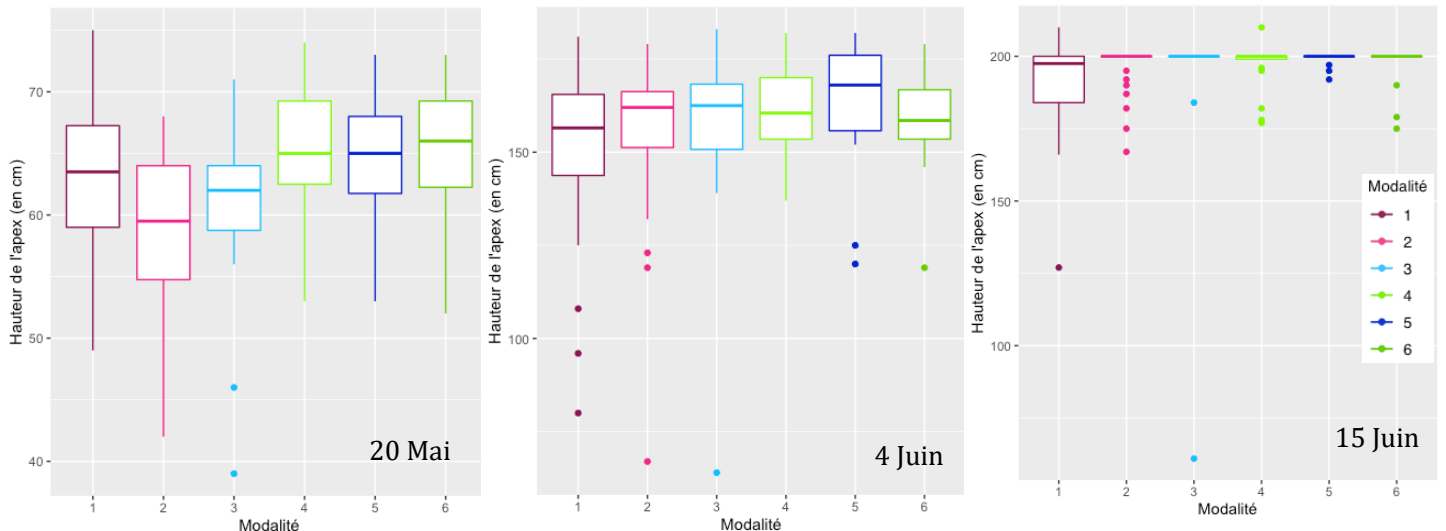


Figure 9 : Boxplot de la hauteur des plants de concombres en fonction des différentes modalités aux trois dates d'observations (1 : BAU, 6 : INN, 2 : cultures pures avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries).

Le test de Kruskal Wallis montre une différence significative entre modalités à la date d'observation du 20 mai (p-value = 4.096e-05). Le test de wilcoxon nous permet de déterminer que les modalités 2 et 3 présentent des hauteurs significativement plus basses que les modalités 1, 4, 5 et 6. Les plants de concombres mesurés à cette date font en moyenne 58 cm et 60,5 cm pour les modalités 2 et 3, soit 5,7 cm et 4,2 cm de moins que les autres modalités en moyenne. Concernant les deux autres dates d'observations, le test de Kruskal Wallis ne montre pas de différence significative (p-value = 0.1158 au 4 juin et p-value = 0.004362 au 15 juin), on ne remarque aucune tendance nette de l'effet des traitements sur la croissance des plantes.

Résultats pour les tomates

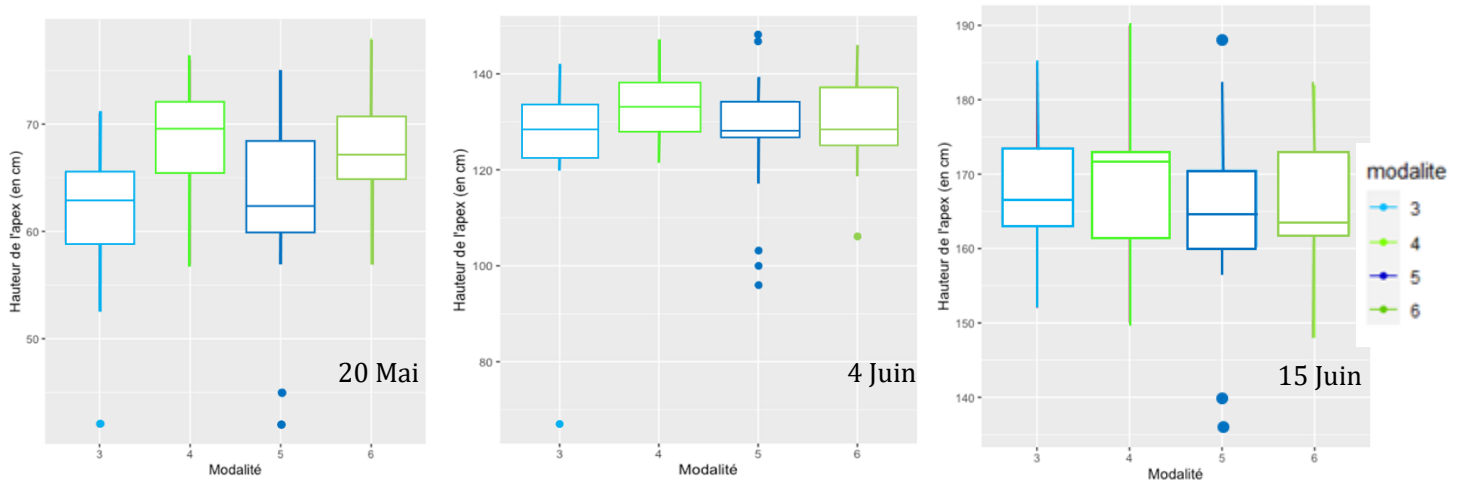


Figure 10: Boxplot de la hauteur des plants de tomates en fonction des différentes modalités aux trois dates d'observations (3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries, 6 : INN).

Concernant la croissance des tomates en fonction des modalités, les tests de Kruskal Wallis ne montrent aucune significativité témoignant d'une différence de croissance (p -value = 0.804, p -value = 0.5185 et p -value = 0.4536 respectivement aux dates du 20 mai, 4 juin et 15 juin). On remarque cependant une légère tendance des modalités 4 et 6 (précédent foin de luzerne) à présenter des plants plus hauts à la première date d'observation mais cet effet disparaît lors des deux autres dates d'observation.

6.2.2 – Evolution de la nutrition azotée des cultures

Résultats pour les concombres

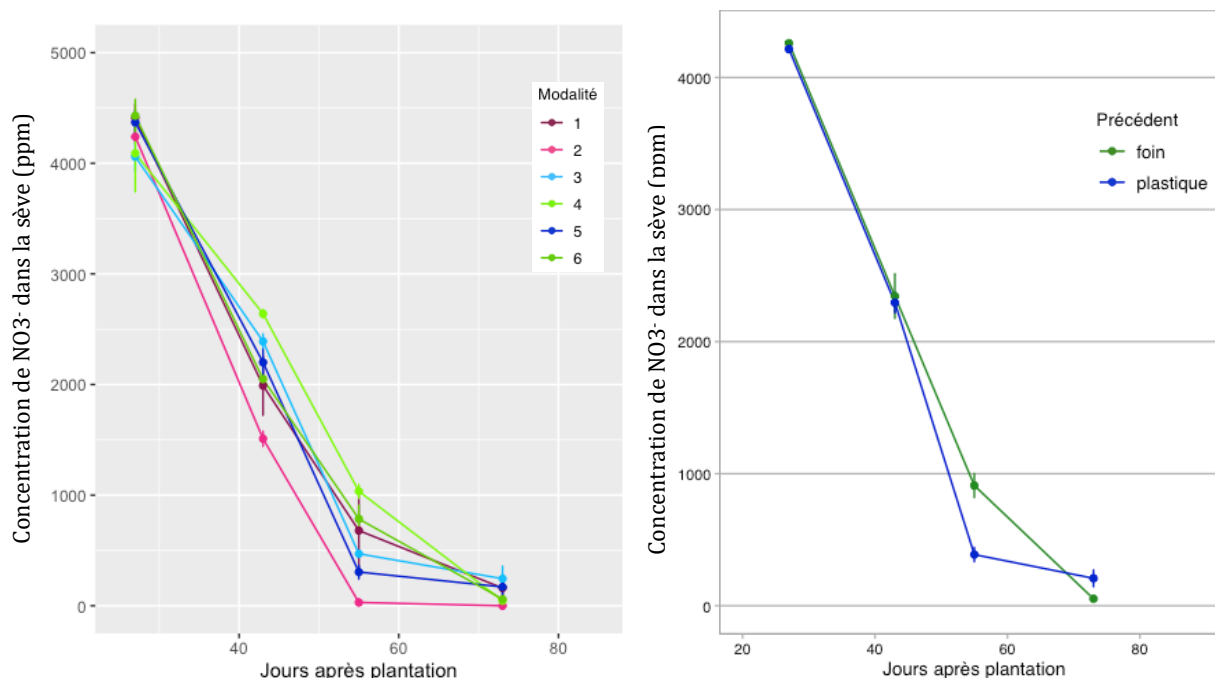


Figure 11 : Evolution de la concentration de nitrate dans la sève des concombres en fonction du temps. A gauche résultats par modalité (1 : BAU, 6 : INN, 2 : culture pure avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). A droite résultats en fonction du précédent paillage organique (modalités 4 et 6) ou plastique (modalités 3 et 5) des modalités associées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

L'évolution de la nutrition azotée en cours de culture semble identique entre les modalités. La quantité de nitrate dans la sève à la première et dernière date de mesures sont homogènes entre les modalités avec une moyenne de 4266 ppm mesurée et 113 ppm en fin de culture. Aux deux dates de mesures intermédiaires on remarque qu'en tendance, la modalité 4 présente des valeurs plus élevées et la modalité 2 plus basses. Aucune différence significative n'est cependant observable entre l'ensemble des modalités (test de Kruskal-Wallis donnant une p-value de 0.8681). En regroupant les modalités 4 et 6 (foin sur le graphique figure 11 et les modalités 5 et 3 (plastique sur le graphique figure 11) on obtient une différence significative de résultats sur une observation (au 55^{ème} jour après plantation) ou les modalités au précédent foin de luzerne présentaient une moyenne de 910 ppm contre 387 ppm pour les autres modalités. Le reste des observations ne présentent aucune différence significative (test de Kruskal-Wallis donnant une p-value de 0.6617).

Résultats pour les tomates

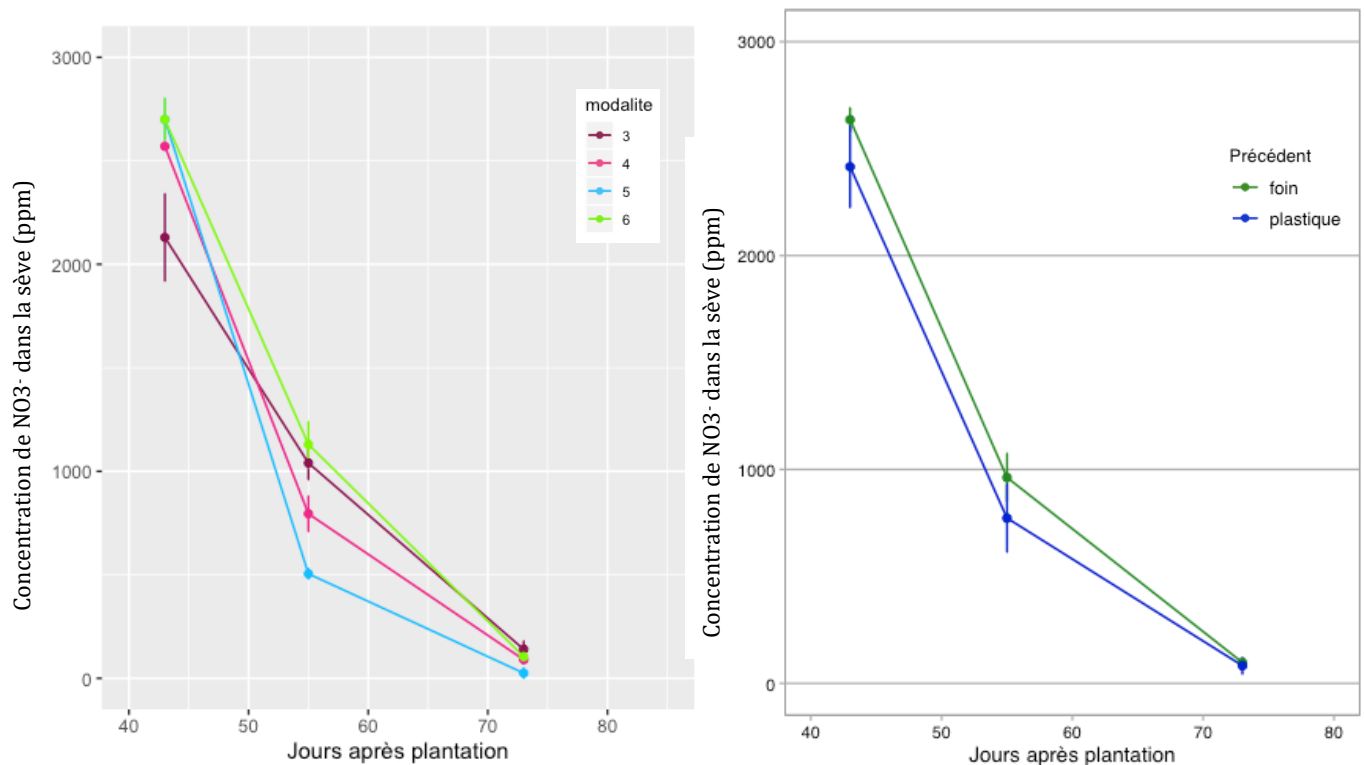


Figure 12 : Evolution de la quantité de nitrate dans la sève des tomates en fonction du temps. A gauche résultats par type de modalité (3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries, 6 : INN). A droite résultats en fonction du précédent paillage organique (modalités 4 et 6) ou plastique (modalités 3 et 5) des modalités associées. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Concernant les tomates, les modalités ayant un précédent foin de luzerne présentent en tendance des quantités d'azote supérieures par rapport aux autres modalités, ce résultat n'est cependant pas significatif (ANOVA présentant une p-value de 0.8959). Les différences entre modalités au cours du temps ne sont pas significatives (test de Kruskal-Wallis donnant une p-value de 0.9405) et, bien qu'en tendance la modalité 6 soit supérieure aux autres, on ne remarque pas de tendance sur les autres modalités.

6.2.3 – Le rendement des cultures

Résultats pour les concombres

La première récolte de concombres s'est déroulée le 8 juin et la dernière le 6 août soit une période de production totale de 59 jours. Les récoltes ont eu lieu deux fois par semaine les

lundis et jeudis. Les résultats de rendements sont présentés de manière cumulée au cours de la culture afin d'avoir une idée de la productivité totale de chaque modalité étudiée. Les normes de ventes des concombres étant très strictes (notamment sur la taille et la courbure des fruits), une main d'œuvre importante de palissage et d'éclaircissage est nécessaire, ce qui a parfois fait défaut lors de notre expérimentation. Il en résulte qu'une quantité très importante de déchets a été produite avec une moyenne de 4 kg par plante. Nous utilisons pour la suite des analyses le rendement total (concombres commercialisables et déchets) nous permettant d'avoir une meilleure représentativité des capacités de production des plantes. Les courbes de rendement commercialisables sont présentées en annexe 12.

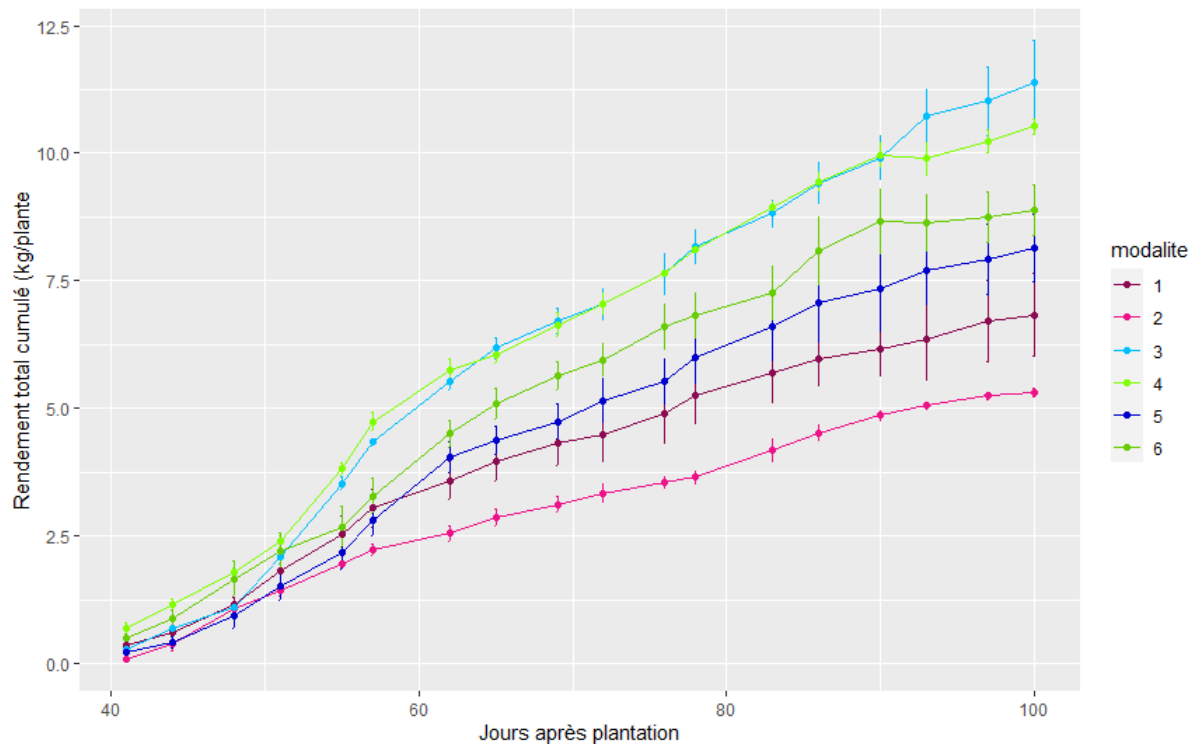


Figure 13 : Evolution du rendement de concombres total cumulé en fonction du temps des diverses modalités (1 : BAU, 6 : INN, 2 : cultures pures avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Les tests statistiques ont été réalisés à la date finale, sur le rendement total cumulé et montrent des différences significatives (p -value = 0.001802, Kruskal Wallis).

Le mois de juin a été le plus productif avec des pics de production le 15, 22 et 29 juin (soit 48, 55 et 62 jours après plantation). Les modalités 3 et 4 ont été significativement les plus productives avec respectivement une moyenne de 11,4 kg et 10,5 kg de concombres produits par plantes constituant ces modalités. La modalité 2 a été la moins productive (p -value = 0,029) avec 5,3 kg de fruits récoltés par plante en moyenne. Cette faible productivité peut être

corrélée avec la très forte propagation de mildiou sur cette modalité qui a affaibli très fortement les plants de concombres. On remarque que les modalités du tunnel 6 (1, 3 et 4) sont significativement plus productives que les modalités équivalentes du tunnel 5 (respectivement 2, 5 et 6). Les modalités associées (3, 4, 5 et 6) présentent un rendement supérieur aux modalités pures (1 et 2). Les modalités 3 et 4 ainsi que les modalités 5 et 6 présentent des rendements sensiblement identiques (p -value = 0,486 selon le test de wilcoxon entre les modalités 3 et 4 et p -value = 0,486 entre les modalités 5 et 6). L'arrière effet foin de luzerne ne semble donc pas influencer la productivité du système.

Résultats pour les tomates

Les récoltes de tomates ont débuté le 2 juillet soit 65 jours après la plantation. Les données présentées témoignent de la productivité des tomates jusqu'au 6 août, elles poursuivent leur production après cette date. Les courbes de rendement commercialisables sont présentées en annexe 13.

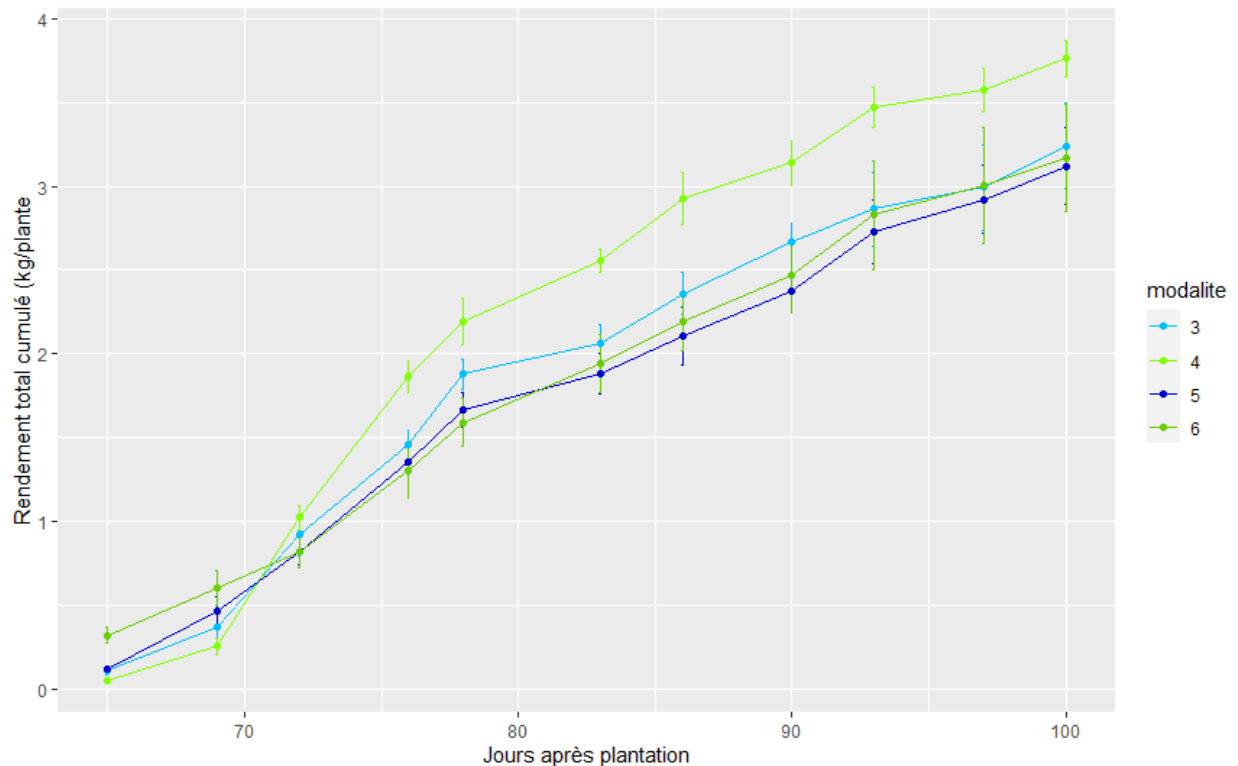


Figure 14 : Evolution du rendement de tomates total cumulé en fonction du temps des diverses modalités (3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries, 6 : INN). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

La productivité des tomates, toutes modalités confondues, est assez basse ce qui laisse à penser que l'association avec le concombre a été un facteur limitant la productivité. On remarque que la modalité 4 est la plus productive avec 3,1 kg de fruits produits contre 2,6 kg en moyenne pour les autres modalités. Les différences ne sont cependant pas significatives (ANNOVA à p-value = 0.468 suivi d'un Tukey test ne montrant aucune différence entre modalités). Les modalités 4 et 3 (tunnel 6) sont, sur l'ensemble de la durée de récolte souvent plus productives que les modalités 5 et 6 (tunnel 5), on retrouve ici des résultats cohérents avec ceux observés sur les rendements des concombres.

6.3 – Caractérisation du contrôle des ravageurs dans les systèmes étudiés

6.3.1 – Evolution des populations de ravageurs

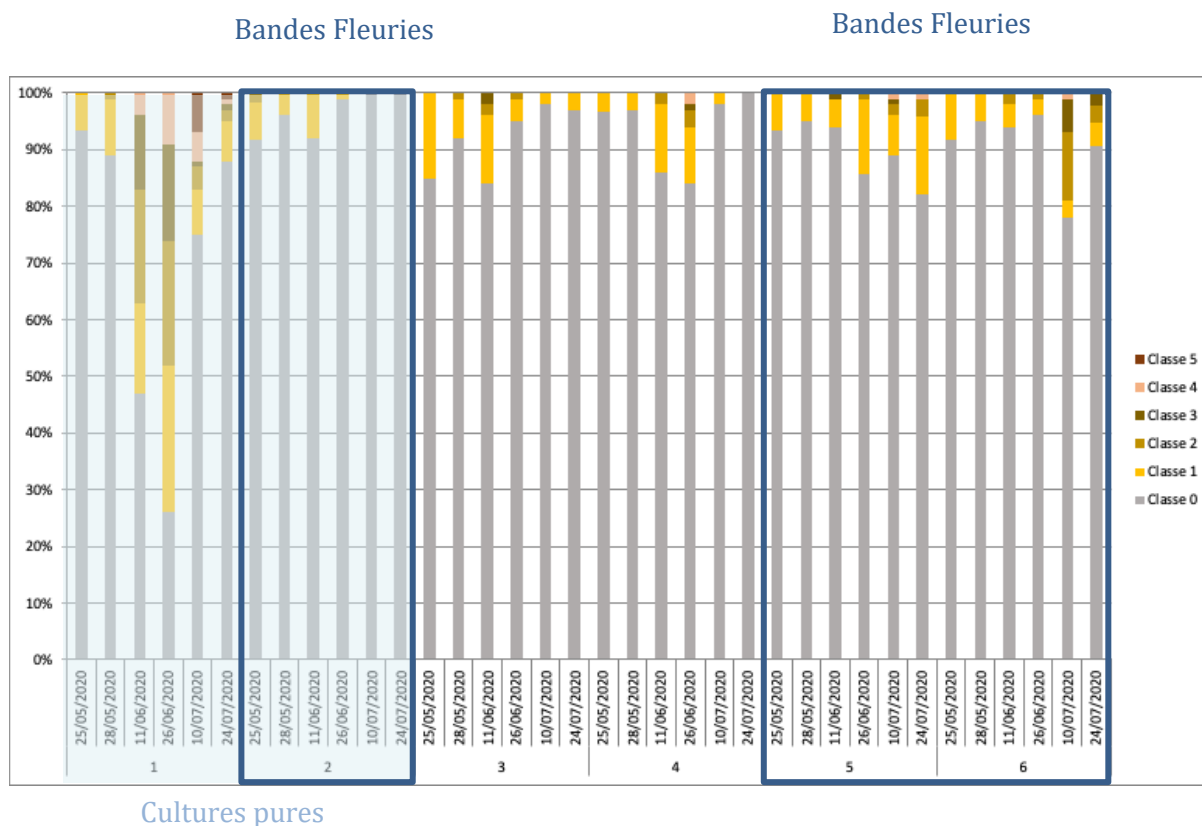


Figure 15 : Évolution des populations d'acariens tétranyques (*Tetranychus urticae*) entre le 25 mai et le 10 juillet observés sur les plants de concombres. Les valeurs sont données en pourcentages de chaque classe d'intensité.

Des acariens tétranyques, ravageurs principal du concombre, ont été observés sur l'ensemble des modalités dès le 25 mai. Le système 1 (BAU) est le plus lourdement infesté par les acariens et présente aux dates du 11 et 26 juin une prédominance de classe 1, 2 et 3

(respectivement 26%, 22% et 17% le 26 juin) témoignant d'une forte présence du ravageur (annexe 14). En règle générale, les modalités du tunnel 5 avec bandes fleuries présentent en tendance moins d'acariens que les modalités du tunnel 6. Les modalités associées (3, 4, 5 et 6) sont elles aussi moins touchées (notamment par rapport au système 1) par les acariens, mais en vue de la très faible présence du ravageur sur la modalité pure 2, l'effet des bandes fleuries semble être le facteur explicatif des différences observées. Cependant, le système 2 ayant été très fortement infesté par le mildiou, on peut émettre l'hypothèse que les plantes de ce système sont moins attractives pour les acariens. On notera que plus de Phytoseiides et d'auxiliaires ont été dénombrés sur le système BAU, phénomène potentiellement expliqué par la plus forte présence de proies dans ce système.

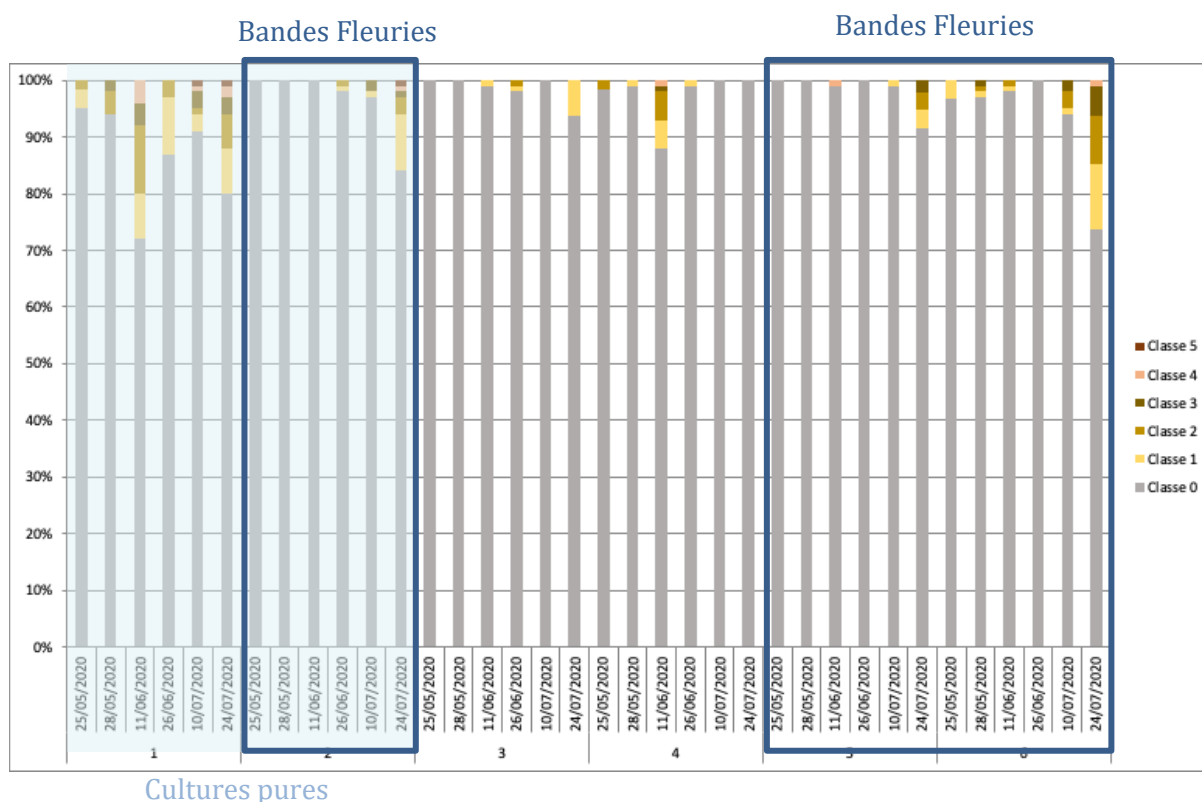


Figure 16 : Évolution des populations de pucerons verts (dont *aphis gossypii*, *myzus persicae*) entre le 25 mai et le 10 juillet observés sur les plants de concombres. Les valeurs sont données en pourcentages de chaque classe d'intensité.

Les pucerons n'ont pas été observés en même temps sur l'ensemble des modalités et sont apparus sous forme de foyer de manière localisée. Le système 1 dit BAU est le plus touché avec une infestation maximale le 11 juin (8% de classe 1, 12% de classe 2 et 4% de classe 3 et 4). Les modalités avec bandes fleuries sont globalement moins affectées bien que la modalité 6 présente un pic d'infestation le 27 juillet (11% de classe 1, 8% de classe 2 et 5% de classe 3). Les modalités associées semblent moins touchées que les modalités pures (notamment par rapport

au système 1). La présence de pucerons vert n'a cependant pas été très importante et a été maîtrisée avant de présenter un problème pour les cultures.

6.3.2 – Evolution des populations d'auxiliaires

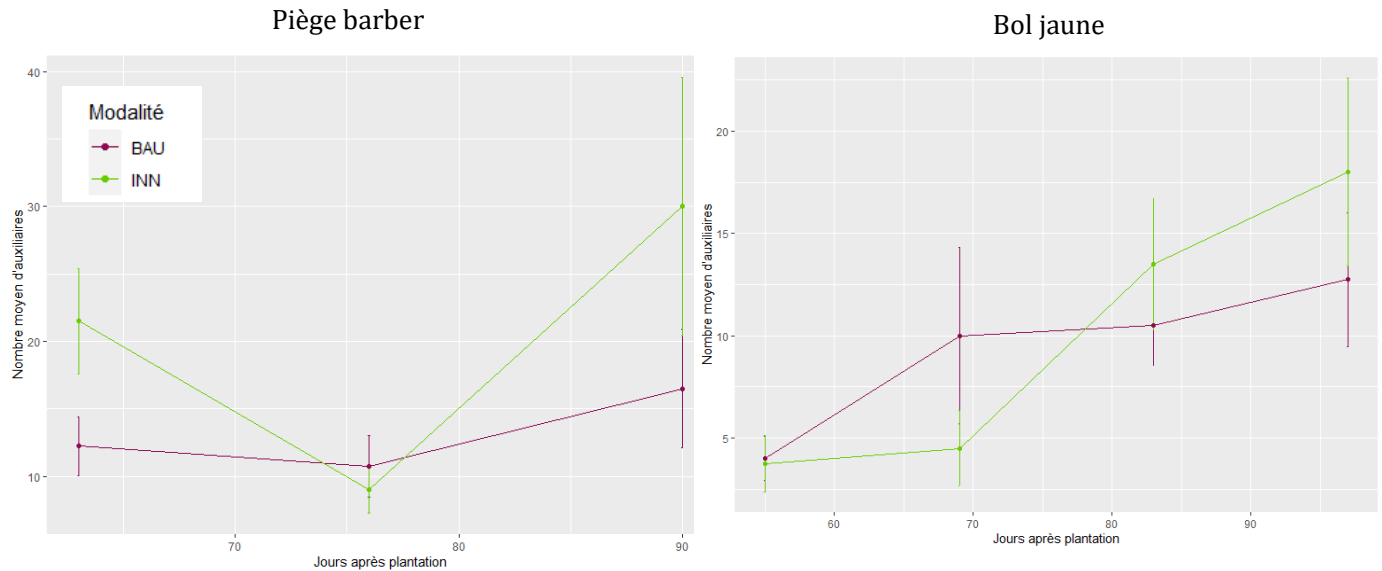


Figure 17 : Evolution en fonction du temps du nombre d'auxiliaires moyen capturés dans les pièges barber à gauche et dans les bols jaunes à droite (modalité 1 : BAU, modalité 6 : INN)

Concernant les populations d'auxiliaires terrestres (résultats pièges barbers) ou aériens (résultats des bols jaunes), il est difficile en vue de la grande variabilité des tendances au cours du temps de tirer des conclusions. De plus, les résultats ne sont pas significativement différents (p -value = 0,294 pour les barbers et p -value = 0,9398 pour les bols jaunes). En terme de composition, dans les bols jaunes le système BAU présente plus d'araignée (32 comptés au total contre 14 pour INN) et le système INN présente plus d'hétéroptères prédateurs (19 comptabilisé contre 7 sur le système BAU). Plus d'opiliens (102 contre 84) et d'araignées (103 contre 55) ont été décomptés dans les barbers du système INN que dans ceux du système BAU. Les détails des espèces retrouvées dans les pièges sont présentés en annexe 15 et 16. Si on s'intéresse au ratio auxiliaires/ravageurs, on notera que malgré un nombre plus important d'auxiliaires présent au total sur le système BAU, le système INN possède un potentiel régulateur plus élevé.

7 – Résultats généraux des trois années d’expérimentation

Dans cette partie, nous présentons et mettons en relation les résultats obtenus lors des trois années du projet Greenresilient de la station expérimentale du Grab.

7.1 – Effets des bandes fleuries

Les bandes fleuries composées d’espèces pérennes n’ont influencé aucun paramètre du sol lors des trois années d’expérimentation.

Concernant le suivi du développement des cultures, le rendement des cultures principales (tomates et concombres) des années 2018 et 2020 dans les modalités avec bandes fleuries était inférieur à celui des modalités sans bandes fleuries. L’effet inverse est observé pour l’année 2019.

En 2018, plus de pucerons étaient présents sur concombres dans le tunnel avec bandes fleuries et une augmentation de la progression de la cladosporiose de la tomate (dû au champignon *Fulvia Fulva*) été observée. Aucun effet sur la présence et les dégâts liés au ravageur *Tuta Absoluta* n’a été identifié. Aucun effet sur les populations d’auxiliaires *Dicyphus errans* est observée en présence de ce levier agronomique.

En 2019, ce levier a permis une diminution des populations de pucerons sur aubergine et une diminution de la présence d’acariens tétranyques. Cela a été permis notamment grâce à une augmentation des populations d’auxiliaires de type *Macrolophus* et *Phytoseïdes*.

Les bandes fleuries ont, en règle générale, joué un rôle important sur l’état sanitaire des cultures en influençant lors des trois années, les populations de ravageurs et d’auxiliaires ainsi que la présence de maladies. Les effets sur les populations de ravageurs et d’auxiliaires sont similaires lors des années 2019 et 2020 et les effets sur la propagation des maladies identiques lors des années 2018 et 2020. Les résultats sont présentés sur le tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Synthèse des effets des bandes fleuries sur les variables suivies lors des trois années d'expérimentation du projet Greenresilient

		2018	2019	2020
Paramètres du sol	Température			
	Humidité			
	Azote minéral du sol			
	Croissance des cultures			
Développement des cultures	Rendement des cultures	Diminution	Augmentation	Diminution
	Nutrition azotée des plantes			
	Bilan entrées-sorties du systèmes			
Régulation des bio-agresseurs	Nombre de ravageurs de la culture principale		Diminution	Diminution
	Nombre de ravageurs de la culture associée	Augmentation	Diminution	Diminution
	Nombre d'auxiliaires	Augmentation	Augmentation	Diminution
	Progression des maladies	Augmentation		Augmentation

7.2 – Effets des associations culturales

Les effets de ce levier sont très similaires lors des trois années d'études malgré la différence de nature des associations. Les systèmes associés en 2018 et 2019 étaient plus performants et exportaient de manière plus efficace l'azote, le potassium et le phosphore du milieu (donnée non disponible à ce jour pour l'année 2020). En 2018 et 2020, une diminution de la propagation des maladies des cultures principales (respectivement cladosporiose et mildiou) a été observée. Les modalités associées présentent des rendements de cultures principales supérieurs par rapport aux cultures pures : 13,1 kg/plant de tomates produits en moyenne sur les modalités associées contre 12,6 kg/plant en 2018, 7,9 kg/plant d'aubergines produits contre 4,5kg/plants en 2019 et 9,6 kg/plant de concombres produits contre 6,1 kg/plant en 2020. Ce résultat est certainement lié à la nette amélioration de l'état sanitaire des cultures associées et à la diminution de la compétition intraspécifique permettant un meilleur développement de la culture principale. Les résultats sont présentés sur le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Synthèse des effets des associations culturales sur les variables suivies lors des trois années d'expérimentation du projet Greenresilient

		2018	2019	2020
Paramètres du sol	Température			
	Humidité			
	Azote minéral du sol			
	Croissance des cultures			
Développement des cultures	Rendement des cultures	Augmentation	Augmentation	Augmentation
	Nutrition azotée des plantes			
	Bilan entrées-sorties du systèmes	Meilleure utilisation de l'azote	Meilleure utilisation de l'azote	NA
Régulation des bio-agresseurs	Nombre de ravageurs de la culture principale		Diminution	Diminution
	Nombre de ravageurs de la culture associée		Diminution	Diminution
	Nombre d'auxiliaires	Augmentation		
	Progression des maladies	Diminution		Diminution

7.3 – Effet du paillage organique

En 2018 et 2019 les modalités 4 et 6 ont bénéficié d'un paillage organique de foin de luzerne (25 t/ha soit 6cm d'épaisseur environ) et en 2020 c'est l'arrière-effet de ces deux années de paillage qui est étudié.

Un effet néfaste de ce levier observé en 2018 et 2019 est la diminution de la température du sol par rapport à l'utilisation d'un paillage plastique. Ce phénomène a eu pour conséquence un retard de croissance les 2 années aboutissant à une perte de précocité des aubergines en 2019 et des concombres en 2018. Concernant les autres paramètres d'études, les résultats sont identiques pour les deux années. Cette pratique entraîne une augmentation de l'humidité du sol, une augmentation de l'azote minéral présent dans le sol (200 unités d'azote en plus en 2018 par rapport aux modalités en paillage plastique) ainsi qu'une meilleure nutrition azotée. Cela a permis une diminution de la fertilisation de 320 unités d'azote au total sur les trois ans d'expérimentation par rapport aux modalités en paillage plastique. Concernant le rendement, il est le plus important pour les modalités avec paillage organique en 2018 sur la culture principale : 15 kg/plant de tomates contre 13,1 kg/plant pour les cultures tomates associées sur paillage plastique uniquement. On remarque cependant une diminution du rendement de la culture secondaire (concombre) avec 2,5 kg/plant produit en moins pour les

modalités 4 et 6. En 2019, le rendement est légèrement plus faible que pour les modalités associées bénéficiant d'un paillage classique (rendement de 7,2 kg/plant contre 7,9 kg/plants). Ce levier permet une diminution de la présence de ravageurs sur les cultures secondaires (pucerons et acariens), une bonne gestion des adventices et une diminution de l'irrigation nécessaire.

En 2020, des arrières effets cohérents avec les années précédentes ont été observés notamment avec l'augmentation de l'azote présent dans le sol et la légère amélioration de la nutrition azotée des cultures. Ci-dessous, la synthèse des résultats des trois années.

Tableau 6 : Synthèse des effets ou arrières effets du paillage organique sur les variables suivies lors des trois années d'expérimentation du projet Greenresilient

		2018	2019	2020
Paramètres du sol	Température	Diminution	Diminution	
	Humidité	Augmentation	Augmentation	
	Azote minéral du sol	Augmentation	Augmentation	Augmentation
	Croissance des cultures	Croissance plus lente	Croissance plus lente	
Développement des cultures	Rendement des cultures	Augmentation	Perte de précocité	Aucun effet
	Nutrition azotée des plantes	Effet positif	Effet positif	Faible effet positif
	Bilan entrées-sorties du systèmes	Meilleure utilisation de l'azote	Meilleure utilisation de l'azote	
Régulation des bio-agresseurs	Nombre de ravageurs de la culture principale		Diminution	Diminution
	Nombre de ravageurs de la culture associée	Augmentation	Diminution	Diminution
	Nombre d'auxiliaires	Augmentation	Augmentation	Diminution
	Progression des maladies	Augmentation		Augmentation

8 – Discussion

8.1 – Les effets des leviers du projet Greenresilient

8.1.1 – Effets des bandes fleuries

Les résultats de l'année 2020 vont en faveur de l'utilisation de bandes fleuries pour favoriser la régulation des acariens tétranyques. Ce résultat, vient confirmer celui de l'année 2019 où le même phénomène avait été observé. La bonne régulation naturelle de ce ravageur a orienté les pratiques culturales vers une plus grande sobriété dans l'utilisation d'intrants. Dans le tunnel 6, sans bandes fleuries, l'utilisation de sachets « Spical Ulti-Mite » contenant des acariens prédateurs (*Neoseiulus californicus*) a été nécessaire pour limiter la propagation du ravageur entraînant un coût supplémentaire non-négligeable (environ 50 centimes par sachet à raison de deux sachets par plante). De même, les modalités du tunnel 5 ont été moins infestées par les pucerons en 2020 et 2019, ce qui a aussi permis une diminution des lâchers d'auxiliaires (quatre lâchés de *Aphidius colemani* dans le tunnel 6 contre zéro dans le tunnel 5 en 2020).

En fonction de la composition des bandes fleuries, les effets sur la biodiversité fonctionnelle sont différents (Picault, et al. 2017). Par exemple, l'utilisation de souci (*Calendula Officinalis*) dans les bandes fleuries aurait permis d'augmenter les populations de *Macrolophus*, prédateur efficace contre *Tuta Absoluta* (Lambion, 2018) et ainsi diminuer les dégâts de ce ravageur sur les tomates en 2018. Le choix de la disposition des bandes fleuries est tout aussi importante, car plus la bande fleurie est proche des cultures, plus son effet sera accentué (Herbertsson, et al. 2018) mais augmentera les risques de compétitions. Il est donc conseillé de réaliser une étude approfondie avant la mise en place de bandes fleuries afin de maximiser les effets bénéfiques de ces structures (Uyttenbroeck, et al. 2015).

Bien que les effets observés soient significatifs, il est nécessaire de prendre certaines précautions quant aux différences mesurées entre les deux tunnels. À l'effet des bandes fleuries, se superpose un effet tunnel qui influence les résultats obtenus. Les modalités du tunnel 5 présentent des rendements inférieurs aux modalités du tunnel 6. On ne peut cependant pas attribuer ces différences à l'effet des bandes fleuries. En 2018, une analyse du sol (annexe 17) a montré que le tunnel 6 était plus riche en matières organiques (3 % contre 2,6 % pour le tunnel 5) ainsi qu'en éléments nutritifs (N, P, K). Ces différences, peuvent être des facteurs explicatifs aux écarts de rendements observés, masquant ainsi l'effet des bandes fleuries sur le rendement. À cela s'ajoute, en 2020, une très forte infestation de mildiou dans la modalité 2 du tunnel 5 (bandes fleuries) qui accentue les différences entre les deux tunnels (annexe 18). On pourrait émettre l'hypothèse que les plantes infestées soient moins attractives pour les acariens, diminuant ainsi les populations de ravageurs sur les modalités plus sévèrement atteintes par le mildiou. De plus, cela a eu un effet certain sur la diminution du rendement des modalités du tunnel 5. Comme aucun lien entre les bandes fleuries et la

présence de mildiou n'a été établie dans la littérature scientifique, on émet donc l'hypothèse que les disparités entre tunnels sont responsables de telles différences.

Cependant, les résultats obtenus vont dans le sens des recherches déjà effectuées sur le sujet (Cf Etat de l'art) et nous permet d'établir une conclusion sur l'effet bénéfique de ce levier sur l'amélioration de la biodiversité fonctionnelle. Ce levier, peu coûteux et n'entraînant pas beaucoup de travail, surtout en cas d'utilisation d'espèces pérennes, peut contribuer à la gestion efficace de certains ravageurs et ainsi améliorer la résilience et l'autorégulation du système de culture.

8.1.2 – Effets de l'association culturale

L'association culturale a permis d'augmenter le rendement des concombres en 2020 ce qui vient confirmer un certain nombre de résultats présents dans la littérature scientifique (Bedoussac, et al. 2015). Cette augmentation considérable et significative, peut-être la résultante d'une moindre compétition interspécifique entre tomates et concombres comparée à une compétition intraspécifique entre concombres. Ainsi, le concombre étant une culture relativement « agressive » (Mohamed Fouad, 2007), l'association lui a été très bénéfique. Cependant, face à l'absence d'une modalité en culture pure de tomates, nous ne pouvons pas quantifier l'effet de l'association sur cette culture. On note que les plantes étaient étiolées, présentaient une faible croissance et ont produit en moyenne 2,8 kg/plants entre le mois de juillet et août. Bien que ce rendement semble faible, nous ne pouvons pas le comparer à une référence et éventuellement établir un Land Equivalent Ratio (Mead and Willey, 1980). De plus, après l'arrachage des plants de concombres, les tomates peuvent potentiellement rattraper leur retard de production et aboutir à des résultats satisfaisants.

Concernant l'état sanitaire des cultures associées, l'augmentation de la présence de certains auxiliaires comme par exemple, les *Dicyphus Errans*, a permis une diminution des populations de ravageurs. Cet effet est observable en 2019 et 2020 avec une nette diminution des acariens Tétranyques. Des résultats identiques, concernant l'association tomates concombres, ont été obtenus lors d'un essai mené par la Chambre d'Agriculture du Morbihan en 2015 (Maët, le Lan. 2015) : cette association est bénéfique pour la lutte contre les acariens tétranyques. Cependant, une grande attention doit être portée au choix des espèces associées, car des effets néfastes sur l'état sanitaire des cultures peuvent en découler. C'est notamment le cas pour certains ravageurs possédant une large gamme de plantes hôtes, qui s'épanouissent plus facilement dans un environnement à végétation variée (Ratnadass, et al. 2010).

On notera que la mise en œuvre pratique des associations peut être techniquement compliquée. L'association nécessite des adaptations sur presque toutes les techniques culturales (fertilisation, irrigation, palissage, traitements), aboutissant parfois à des impasses ne permettant pas de couvrir les besoins de toutes les cultures. De plus, en cas de traitements phytosanitaires, la conduite de cultures associées peut également poser des problèmes

d'homologation de produits qui peuvent être autorisés sur l'une des espèces, mais pas sur l'autre. Cette pratique culturale demande donc de faire des compromis et de posséder de nouvelles connaissances et savoir-faire.

Un élément intéressant aurait été d'évaluer la charge et la pénibilité de travail des systèmes associés afin d'avoir un indicateur en plus sur la faisabilité de cette pratique. Cela a été mesuré lors de l'expérimentation menée par la Chambre d'Agriculture du Morbihan en 2015 (Maët le Lan, 2015) et a révélé que plus de temps de travail était nécessaire lors de la récolte des cultures associées. On notera cependant que la marge brute dégagée était plus élevée (11 euros par m² contre 9 euros en cultures pures), notamment grâce à la meilleure rentabilité de la tomate. Dans l'optique de diminuer un maximum la charge de travail, une réflexion autour de l'agencement spatial de l'association culturale est nécessaire. Un agencement par substitution a été choisi pour le projet Greenresilient afin de maximiser les effets de l'association, mais d'autres types d'agencements peuvent être tout aussi bénéfiques tout en diminuant la charge de travail (Perrin, et al. 2019).

8.1.3 – Paillage organique et son arrière effet

Lors des deux premières années du projet Greenresilient, le paillage organique de foin de luzerne a représenté un apport d'azote considérable pour les cultures (425 unité d'azote en 2019) permettant une diminution de la fertilisation nécessaire pour les modalités concernées. Dans une optique de diminution d'intrants, l'utilisation de ce genre de paillage organique semble donc intéressante d'autant que le foin de luzerne possède un C/N de 22 présentant de faibles risques d'immobilisation d'éléments nutritifs pouvant aboutir à une faim d'azote (Büchi, et al. 2017). Ce type de paillage peut cependant présenter des risques d'acidification du sol (Chalker-Scott L., 2007) mais, les sols où se sont déroulés l'essai étant basiques (en moyenne, un pH de 8,5 mesuré en avril 2018), cela ne pose pas de problème.

En 2020, l'arrière effet foin de luzerne a aussi permis une augmentation des nitrates dans le sol, montrant que cette pratique a un effet fertilisant sur le long terme. On rappelle, qu'une plus faible quantité de fertilisants a été utilisée pour ces modalités, ainsi, même si l'effet sur la nutrition azotée des cultures semble faible, l'arrière-effet du paillage reste observable.

Les résultats de 2019 et 2020 montrent que les modalités avec paillage organique ou précédent paillage organique ont un facteur de stabilisation plus élevé. Cette caractéristique est un élément intéressant, car une bonne stabilisation de la matière organique offre un certains nombres d'intérêts : formation du complexe argilo-humique, meilleure rétention des éléments nutritifs du sol et augmentation de leur disponibilité ainsi qu'une stimulation de l'activité biologique du sol. En plus de cela, il permet un stockage de CO₂ et ce qui contribue activement à la régulation du climat (Lefevre, 2015). L'analyse complète du sol qui sera

effectuée en 2021 nous permettra de conclure et de quantifier l'effet d'un tel paillage sur la matière organique.

Une meilleure régulation des ravageurs notamment via l'augmentation des populations d'auxiliaires sur les modalités avec paillage organique a aussi été mis en évidence. Bien qu'aucune relation directe entre ce levier et les populations d'insectes et arthropodes ne soient fait dans la littérature, on peut émettre l'hypothèse que le microclimat créé par le paillage rend favorable la présence de certains auxiliaires.

Cette pratique a aussi mis en évidence un certain nombre d'inconvénients lors des deux premières années. Concernant la gestion des adventices, le paillage a introduit des graines de graminées et a ainsi légèrement salis la parcelle. De plus, il a entraîné un réchauffement du sol plus lent aboutissant à un retard de croissance et d'entrée en production des cultures en 2018 et 2019. Bien que les cultures aient rattrapé leur retard, des pertes économiques peuvent en découler, car le prix de vente des légumes, principalement des solanacées diminue avec l'avancement de la saison. Il aurait été intéressant de quantifier les pertes économiques engendrées par cette perte de précocité lors de l'essai.

8.2 – Bilan des trois années de projet greenresilient

8.2.1 – Robustesse des résultats de l'expérimentation

Le projet Greenresilient présente la particularité d'être une expérimentation systémique avec notamment l'ambition de comparer un système innovant avec un système témoin classique. Cette approche nous permet d'appréhender la complexité des systèmes étudiés mais rend difficile l'analyse et la synthèse des résultats obtenus.

De plus, en vue des différences d'espèces ou variétés étudiées lors des trois années, il est difficile de conclure à des résultats généraux. Les diverses cultures ne présentent pas la même compétitivité intra et interspécifique, ne sont pas sensibles aux mêmes bioagresseurs et n'ont pas les mêmes besoins. De plus, lors de l'année 2020, le protocole expérimental a été légèrement modifié avec l'étude de l'arrière-effet du paillage organique. Il est donc impossible d'obtenir des résultats généraux chiffrés mais, en étudiant l'occurrence des résultats obtenus entre les différentes années, on peut déterminer la robustesse de certains effets et ainsi évaluer s'ils peuvent être généralisés. Sur le tableau 7 ci-dessous figurent les occurrences des effets de chaque levier permettant d'avoir une appréhension de la robustesse des résultats obtenus.

Tableau 7 : Occurrences des effets positifs et négatifs des leviers d'action lors des trois années du projet Greenresilient (0 : aucun effet, 1 : effet sur une année parmi les trois, 2 : effet sur deux années parmi les trois, 3 : effet sur trois années parmi les trois)

		Bandes Fleuries		Association culturale		Paillage organique	
		Effet positif	Effet négatif	Effet positif	Effet négatif	Effet positif	Effet négatif
Paramètres du sol	Température						2
	Humidité					2	
	Azote minéral du sol					3	
	Croissance des cultures						2
Développement des cultures	Rendement des cultures	1	2	3		1	1
	Nutrition azotée des plantes					3	
	Bilan entrées-sorties du systèmes			2		2	
Régulation des bio-agresseurs	Nombre de ravageurs de la culture principale	2		2			
	Nombre de ravageurs de la culture associée	2		2		2	
	Nombre d'auxiliaires	2	1	1			
	Progression des maladies		2	2			1

Certains résultats sont identiques lors des trois années d'expérimentation et peuvent donc être qualifiés de robustes. Ainsi, on aboutit aux résultats généraux indépendants des espèces étudiées et des caractéristiques climatiques et sanitaires du milieu, suivants :

L'association culturale augmente la présence d'auxiliaires et permet une augmentation du rendement par rapport à une culture pure.

Le paillage organique de foin de luzerne permet d'augmenter la quantité de nitrate dans le sol et dans la sève des plantes.

Certains résultats obtenus ne se répètent pas ou sont contradictoires d'une année à l'autre. Cette absence de stabilité peut s'expliquer par les variations de conduites de cultures des différentes années, ou bien par des conditions sanitaires ou climatiques différentes (Perrin, et al. 2019).

8.2.2 – Durabilité environnementale des systèmes mis en place

L'ambition du projet Greenresilient était de trouver des leviers d'action permettant l'amélioration de la durabilité de systèmes maraîchers sous abris. Au vue des résultats des trois années, on peut conclure que le système innovant INN est effectivement plus durable et constitue une alternative satisfaisante au système témoin BAU. Pour évaluer la durabilité du système INN, nous nous intéressons à trois axes environnementaux : l'augmentation de la diversité fonctionnelle de l'agrosystème, la diminution de la dépendance aux intrants et l'amélioration de la fertilité du sol. On s'intéresse aussi à l'amélioration de la productivité du système. La synthèse des résultats est présentée sur la figure 18.

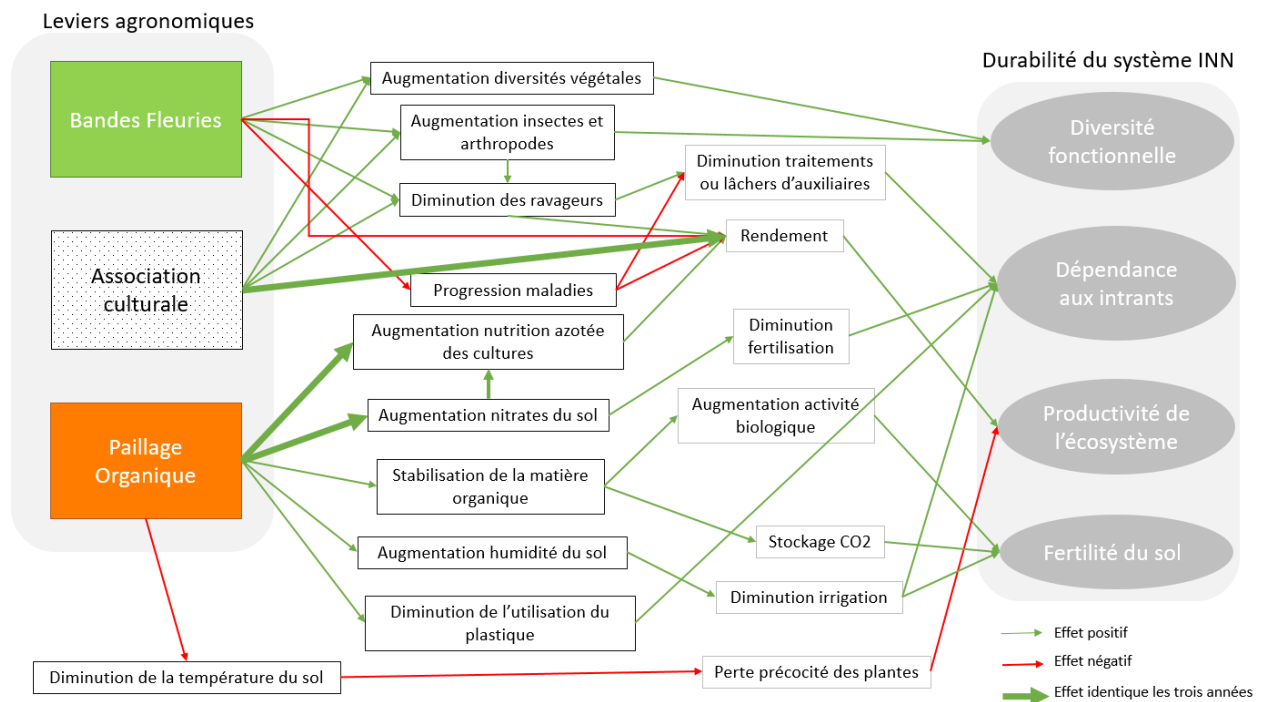


Figure 18 : Schéma bilan présentant les effets des leviers sur les paramètres du système et leur impact sur la durabilité du système innovant

Le système INN présente une diversité fonctionnelle plus importante, une moindre dépendance aux intrants, une meilleure fertilité du sol et une bonne productivité. Il peut donc être qualifié de plus durable sur le plan environnemental.

9 – Les limites du projet Greenresilient

L'approche systémique mis en place lors des trois années du projet Greenresilient était très ambitieuse notamment par la décomposition de chaque levier et association de levier dans les quatre systèmes intermédiaires. Cette décomposition a permis d'isoler l'effet de chaque levier et ainsi avoir une analyse plus fine des répercussions sur les indicateurs étudiés. En contrepartie, les six systèmes mis en place sur les deux serres expérimentales sont de plus petite taille et permettent donc d'effectuer moins de répétitions ce qui aboutit à une perte de puissance statistique. La perte de certains plants de concombres en cours d'essai à cause de certains bio-agresseurs (mildiou, virus peau de crapaud ou *Sclerotinia Sclerotiorum*) est venu amoindrir les répétitions au sein de certaines placettes. L'unique mise en place d'un système témoin et d'un système innovant sur les deux serres aurait permis une augmentation considérable du nombre de plantes étudiées pour chaque système aboutissant à une moindre sensibilité aux pertes des plants et une diminution de la charge de travail de l'essai. Une baisse d'information considérable en aurait cependant découlé.

L'essai souffre aussi du manque d'un témoin de la culture secondaire. Cela aurait permis de déterminer la réelle productivité du système en utilisant des outils comme le LER (Mead and Willey, 1980). Si l'association est trop défavorable pour une des culture, comme on le soupçonne dans le cas de la tomate associée au concombre en 2020, l'adoption de cette pratique ne serait pas envisageable, car elle entraînerait des pertes économiques considérables.

Un certain nombre d'effets indésirables sont venus perturber l'essai en créant des hétérogénéités au sein des systèmes. Comme évoqué précédemment, les tunnels 5 et 6 ne sont pas homogènes et présentent un écart de productivité possiblement dû à un plus fort taux de matière organique et éléments nutritifs dans le tunnel 6. Cette différence vient masquer et modifier l'effet des bandes fleuries et représente un réel problème quant à l'analyse de la productivité des systèmes. De plus, une haie se situant au Nord des tunnels entraîne des disparités entre les parties Nord et Sud de chaque tunnel. Cela a motivé, en 2019, la suppression de certaines placettes des systèmes 5 et 6 ayant trop souffert du stress hydrique engendré par la compétition avec les arbres constituant la haie.

Le projet s'est principalement focalisé sur des plantes de la famille des cucurbitacées et solanacées ne respectant ainsi pas le délai de retour de quatre ans recommandé en maraîchage pour ces familles (Rey, et al. 2015). Or, on sait que les rotations culturales permettent une meilleure fertilité des sols via une augmentation de la matière organique et une diminution de la lixiviation de l'azote (Marriot and Wander 2006), une augmentation du rendement (Teasdale, et al. 2007) et jouent aussi un rôle sur l'état sanitaire des cultures (Kuepper, et al. 2015). Cependant, un agencement par substitution n'aurait pas été possible en respectant les quatre années de retour d'une même espèce sur une parcelle. Les espèces les plus problématiques à

cultiver et les plus attractives en période estivale ont volontairement été étudiées lors de cet essai, rendant le respect d'une rotation longue impossible. Une association moins fine, par exemple en alternant les planches d'espèces cultivées permettrait de mettre en place des rotations et ainsi intégrer ce levier connu pour améliorer la durabilité des systèmes de culture.

10 – Les perspectives du projet Greenresilient

L'année 2020 est une année charnière pour le projet Greenresilient, car elle vient clôturer les trois années d'expérimentation. D'autres analyses compèteront et achèveront le projet : l'analyse de la nématofaune du sol, la mesure de la biomasse microbienne, l'analyse des exportations effectuées par les cultures, les analyses chimiques finales du sol ainsi que le calcul du taux de matière organique du sol.

Une analyse du cycle de vie (ACV) va être réalisée en 2021 et permettra de compléter notre appréhension de la durabilité de ce système innovant.

Dans un but de compléter notre appréciation de la durabilité, la dimension économique et la dimension sociale aurait pu être étudiées. L'évaluation des pertes économiques, notamment de part le retard de production des années 2018 et 2019 comparées aux gains économiques, notamment via la diminution des intrants et l'augmentation des rendements finaux nous permettrait d'évaluer la viabilité économique du système innovant. Bien que le rendement soit mesuré, il n'est pas mis en relation avec le prix du marché au moment des diverses récoltes et permet donc uniquement de comparer les productivités des systèmes entre eux. Par exemple, un système produisant un rendement cumulé total plus faible peut être économiquement plus favorable si les périodes de fortes productivités arrivent au moment où le prix du marché est le plus haut. Ayant toutes les données nécessaires à ce calcul, cette analyse de la rentabilité économique des divers systèmes est possible et sera réalisée à posteriori. De plus, l'enregistrement du temps travail nécessaire à la bonne conduite des cultures ainsi que la pénibilité de ce travail nous permettraient de déterminer si une amélioration de la qualité de vie des agriculteurs découlerait de la mise en place d'un tel système.

Le système innovant réunissant les trois leviers d'action est très éloigné du schéma classique pratiqué en maraîchage sous abris et nécessite de nouveaux savoir-faire ainsi qu'une réorganisation du travail. Une enquête auprès d'agriculteurs permettrait de déterminer les freins possibles à l'adoption de ses pratiques pour évaluer la faisabilité de la transition. Ces enquêtes permettraient d'ajuster le système innovant pour le rendre plus accessible et plus en lien avec les réalités du monde agricole. Par exemple, on pourrait déterminer quel type d'agencement d'association est la plus attractive et possède le moins de freins auprès des agriculteurs. Cela permettrait de croiser les connaissances techniques et agronomiques acquises lors du projet Greenresilient avec une étude sociologique permettant de se rapprocher d'une mise en place concrète.

A l'échelle européenne, les résultats obtenus sur les cinq sites expérimentaux permettront d'élargir les perspectives de solutions possibles pour améliorer la résilience des systèmes maraîchers sous abris.

Conclusion

Dans l'expérimentation Greenresilient conduite pendant trois ans au GRAB, six systèmes ont permis d'étudier les effets de trois leviers d'actions sur des indicateurs du sol, du développement des cultures et de la biodiversité fonctionnelle ont été étudiés.

Le premier dispositif mis en place dans cet essai est la présence de bandes fleuries en bordure interne du tunnel. Une augmentation des populations d'auxiliaires de cultures ainsi qu'une diminution des ravageurs ont été permises par ce levier aboutissant à une meilleure biodiversité fonctionnelle. Le rendement des cultures s'est vu diminué et la progression des maladies augmentée en présence des bandes fleuries, bien que le lien avec ce levier ne puisse clairement être établi.

Le second levier concerne l'association culturale de deux espèces potagères par substitution avec l'association tomates concombres en 2018, aubergines poivrons en 2019 et concombres tomates en 2020. Ce levier a eu un impact positif sur la biodiversité fonctionnelle, car il a permis une augmentation des auxiliaires décomptés sur les parcelles et une diminution des ravageurs. Les rendements des cultures principales associées sont supérieurs aux rendements des cultures pures, et ce, durant les trois années d'expérimentation.

Le troisième levier d'action mobilisé en 2018 et 2019 consiste en la substitution d'un paillage plastique par un paillage organique de foin de luzerne. Les résultats montrent un réchauffement du sol plus lent, aboutissant à un retard de croissance et une perte de précocité des espèces potagères (tomates, concombres, aubergines et poivrons). La minéralisation de ce paillage organique a provoqué, dès la première année d'utilisation, une augmentation des quantités de nitrate mesurées dans le sol ce qui a permis une meilleure nutrition azotée des cultures. L'arrière-effet du paillage organique a été étudié en 2020 et a permis de mettre en exergue l'effet fertilisant sur le long terme d'une telle pratique.

Le système innovant qui combine l'ensemble des leviers étudiés s'est montré être plus durable d'un point de vue environnemental que le système témoin lors des trois années de Greenresilient. La mise en place de ces dispositifs met en évidence une augmentation de la diversité fonctionnelle des végétaux, insectes et arthropodes de l'agrosystème. Ils permettent une amélioration sur le long terme de la fertilité des sols tout en réduisant la dépendance aux intrants et en assurant la bonne productivité des cultures.

Au vue de ces résultats satisfaisants, une étude de la durabilité économique et sociale de ce système innovant pourrait être intéressante afin de compléter nos connaissances et

déterminer si la durabilité globale du système est améliorée. Le projet Greenresilient a permis de fournir de nombreuses réponses quant aux diverses alternatives pouvant être mis en place dans l'objectif d'une production maraîchère sous abris plus respectueuse de l'environnement.

Bibliographie

- Abdellaoui Z, H Teskrat, A. Belhadj, and O. Zaghouane. 2011. "Étude Comparative De L' Effet Du Travail Conventionnel, Semis Direct Et Travail Minimum Sur Le Comportement D' Une Culture De Blé Dur Dans La Zone Subhumide." *Options Méditerranéennes. Séries A. Mediterranean Seminars* 87(96): 71–87.
- Adeniyi, O. R., Omotunde, C. T., 2001, "Effect of Planting Pattern on Growth and Yield of Tomato-Cowpea Intercrops", *Journal of Vegetable Crop Production*, Vol 7, Iss 2
- Adekalu, K. O., I. A. Olorunfemi, and J. A. Osunbitan. 2007. "Grass Mulching Effect on Infiltration, Surface Runoff and Soil Loss of Three Agricultural Soils in Nigeria." *Bioresource Technology* 98(4): 912–17.
- AgenceBio. 2019. "Baromètre de consommation et de perception des produits biologiques en France Agence BIO/Spirit Insight." Agence pour le Développement et la Promotion de l'Agriculture Biologique.
- AgenceBio. 2018. "L'agriculture Biologique, Un Accélérateur Économique, à La Résonance Sociale et Sociétale." Agence pour le Développement et la Promotion de l'Agriculture Biologique.
- Ahmad, Imran et al. 2013. "Effect of Intercropped Garlic (*Allium Sativum*) on Chlorophyll Contents, Photosynthesis and Antioxidant Enzymes in Pepper." *Pakistan Journal of Botany* 45(6): 1889–96.
- Anastassiadou, Maria et al. 2018. "Peer Review of the Pesticide Risk Assessment of the Active Substance Spinosad." *EFSA Journal* 16(5):5252: 33.
- Karin Hage-Ahmed Anna Moyses Andreas Voglgruber Franz Hadacek Siegrid Steinkellner, "Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Glomus mosseae* and the Soilborne Pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*", *Journal of Phytopathology*, 2013 / 12 Vol. 161; Iss. 11-12, <https://doi.org/10.1111/jph.12130>
- Bracken, M.E.S. 2009. *Encyclopedia of Ecology Monocultures versus Polycultures*. 2nd ed. Elsevier Inc.
- Bengtsson J, Ahnstrom J, and Weibull A. 2005. The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta analysis. *J Appl Ecol* 42: 261-69.
- Boyhan, G.E., Hicks, R., Hill, C.R., 2006 "Natural mulches are not very effective for weed control in onions", *HortTechnology* 16, 523–526.
- Bianchi FJJA, Booij CJH, and Tscharntke T, 2006, "Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity, and natural pest control." *P Royal Soc B* 273 : 1715-27.
- Bordes Jean-Paul, Ecophyto Plc, La biodiversité fonctionnelle, [en ligne], 2018, mis à jour 3 Décembre 2019, consultation en ligne le 03/04/2020 : <https://ecophytopic.fr/concevoir-son-systeme/biodiversite-fonctionnelle>
- Büchi, Lucie et al. 2017. "Long and Short Term Changes in Crop Yield and Soil Properties Induced by the Reduction of Soil Tillage in a Long Term Experiment in Switzerland." *Soil and Tillage Research* 174(June): 120–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.07.002>.
- Butler, S. J., J. A. Vickery, and K. Norris. 2007. "Farmland Biodiversity and the Footprint of Agriculture." *Science* 315(5810): 381–84.

Cambien, A. 2007. Une introduction à l'approche systémique : Appréhender la complexité. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). Lyon. 84 p. ISSN : 1263-2570.

Cahenzli, Fabian, Sigsgaard, Lene, Daniel, Claudia, Herz, Annette, Jamar, Laurent, Kelderer, Markus, Jacobsen, Stine Kramer, Kruczyńska, Dorota, Matray, Silvia, Porcel, Mario, Sekrecka, Małgorzata, Św, 2019, "Perennial flower strips for pest control in organic apple orchards - A pan-European study", *Agriculture, Ecosystems & Environment* 2019 / 06 Vol. 278

Chakraborty, Debashis et al. 2008. "Effect of Mulching on Soil and Plant Water Status, and the Growth and Yield of Wheat (*Triticum Aestivum* L.) in a Semi-Arid Environment." *Agricultural Water Management* 95(12): 1323–34

Charntke, T., Karp, D.S., Chaplin-Kramer, R., Batary, P., DeClerck, F., Gratton, C., Hunt, L., Ives, A., Jonsson, M., Larsen, A., Martin, E.A., Martinez-Salinas, A., Meehan, T.D., O'Rourke, M., Poveda, K., Rosenheim, J.A., Rusch, A., Schellhorn, N., Wanger, T.C., Wratten, S., Zhang, W., 2016. When natural habitat fails to enhance biological pest control - Five hypotheses. *Biological Conservation* 204, 449-458

Chalker-Scott, L. 2007. "Impact of Mulches on Landscape Plants and the Environment-a Review." *J. Environ. Hortic.*

CORDEAU S. & CHAUVEL B. (2008). Qu'est-ce que les bandes enherbées ? Conséquences environnementales et biologiques. *Rev. sci. Bourgogne-Nature*.

Cowgill S.E, Wratten S.D & Sotherton N.W, 1993, "The effect of weeds on the numbers of hoverfly (Diptera: Syrphidae) adults and the distribution and composition of their eggs in winter wheat." *Ann. Appl. Biol.* 123, 499–515.

Crews, T.E., Peoples, M.B., 2004, "Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs", *Agric. Ecosyst. Environ.* 102, 279– 297.

Demir H, Polat E., 2006, "Effects of tomato-broccoli intercropping on macro element contents in tomato fruits and leaves under greenhouse conditions", *Acta Horticulturae*, 10 Iss 11442

Denoth M, Frid L, and Myers JH, 2002, "Multiple agents in biological control : improving the odds?", *Biol Control*, 24: 20-30

Dix M.E, et al, 1995, "Influences of trees on abundance of natural enemies of insect pests: a review." *Agrofor. Syst.* 29, 303–311.

Du, Lantian, Huang, Baojian, Nanshan, Guo, Shirong, Shu, Sheng, Sun, Jin, 2017, "Effects of Garlic/Cucumber Relay Intercropping on Soil Enzyme Activities and the Microbial Environment in Continuous Cropping", *HortScience*, 01 Vol. 52; Iss. 1

Erard, P., and T. Arias. 2015. "PAILLAGE DES CULTURES LÉGUMIÈRES CARTOGRAPHIE DE LA FILIÈRE FILMS AGRICOLES." *Infos CTIFL*: 55–61.

George E. Boyhan, Ray Hicks, and C. Randell Hill , 2006, "Natural Mulches Are Not Very Effective for Weed Control in Onions", *HortTechnology*, 16(3)

Girma Hailu, Saliou Niassy, Khan R. Zeyaur, Nathan Ochatum, and Sevgan Subramanian, 2018, « Maize–Legume Intercropping and Push–Pull for Management of Fall Armyworm, Stemborers, and Striga in Uganda", *Agronomy Journal*, Volume 110, Issue 6

Haenke Sebastien, Barbara Scheid, Matthias Schaefer, Teja Tscharnke, Carsten Thies, 2009, « Increasing syrphid fly diversity and density in sown flower strips within simple vs. complex landscapes », *Journal of Applied Ecology* 2009 Vol. 46; Iss. 5

Hage-Ahmed, Karin Moyses, Anna Voglgruber, Andreas Hadacek, Franz Steinkellner, Siegrid, 2013, "Alterations in Root Exudation of Intercropped Tomato Mediated by the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Glomus mosseae* and the Soilborne Pathogen *Fusarium oxysporum* f.sp. *lycopersici*", *Journal of Phytopathology*, 2013 / 12 Vol. 161; Iss. 11-12

Hill, S. 1985. "Redesigning the Food System for Sustainability." *Alternatives Spring/Sum*(3-4): 32-36. <http://eap.mcgill.ca/publications/eap23.htm>.

Schultz Brian, Phillips Cruz, Rosset Peter, Vandermeer John, 1982, "An experiment in intercropping cucumbers and tomatoes in Southern Michigan, U.S.A", *Scientia Horticulturae*, 18

Hans Petersen, Heidi N., McSorley, Robert, Liburd, Oscar E., 2010, "The Impact of Intercropping Squash with Non-Crop Vegetation Borders on the Above-Ground Arthropod Community", *Florida Entomologist*, 12 Vol. 93; Iss. 4

Hauggaard-Nielsen, M. Gooding, P. Ambus, G. Corre-Hellou, Y. Crozat, C. Dahmann, A. Dibet, P. von Fragstein, A. Pristeri, M. Monti, E.S. Jensen, 2009, "Pea-barley intercropping for efficient symbiotic N₂-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems", *Field Crops Research* 113 (2009) 64-71

Herbertsson, Lina, Jönsson, Annelie M., Andersson, Georg K.S., Seibel, Kathrin, Rundlöf, Maj, Ekroos, Johan, Stjernman, Martin, Olsson, Ola, Smith, Henrik G., 2018, "The impact of sown flower strips on plant reproductive success in Southern Sweden varies with landscape context", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018 / 05 Vol. 259

Honěk A, 1989, "Overwintering and annual changes of abundance of *Coccinella septempunctata* in Czechoslovakia (Coleoptera, coccinellidae)", *Acta Entomol. Bohemoslov.* 86, 179-192.

Ingman, M., Santelmann, M.V., Tilt, B., 2015, "Agricultural water conservation in China: plastic mulch and traditional irrigation" *Ecosyst. Health Sustain.* 1

Jiji, S., Unger, P.W., 2001, "Soil water accumulation under different precipitation, potential evaporation and straw mulch conditions" *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65, 442-448

Johnson, J. M., J. A. Hough-Goldstein, and M. J. Vangessel. 2004. "Effects of Straw Mulch on Pest Insects, Predators, and Weeds in Watermelons and Potatoes." *Environmental Entomology* 33(6): 1632-43.

Jönsson, Annelie M., Ekroos, Johan, Dänhardt, Juliana, Andersson, Georg K.S., Olsson, Ola, Smith, Henrik G., 2015, "Sown flower strips in southern Sweden increase abundances of wild bees and hoverflies in the wider landscape", *Biological Conservation* 2015 / 04 Vol. 184

Kader, M. A., M. Senge, M. A. Mojid, and K. Ito. 2017. "Recent Advances in Mulching Materials and Methods for Modifying Soil Environment." *Soil and Tillage Research* 168: 155-66.

Kasirajan, S., Ngouajio, M., 2012. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 501-529.

Kasirajan, Subrahmaniyan, and Mathieu Ngouajio. 2012. "Polyethylene and Biodegradable Mulches for Agricultural Applications : A Review." *Agronomy Sustainable Developpement* 32(January): 501-529.

Kirchmann Holger, Bergström Lars, 2008, "Organic Crop Production – Ambitions and Limitations || Plant Nutrients in Organic Farming", Springer, 10.1007/978-1-4020-9316-6_4

Komarek M, Cadkova E, Chrastny V, Bordas F, Bollinger J-C (2010) Contamination of vineyard soils with fungicides: a review of environmental and toxicological aspects. *Environ Int* 36:138–151

Kruess A et Tschardt T, 1994, "Habitat fragmentation, species loss, and biological control". *Science*. 264, 1581–1584.

Kuepper G (2015) Market Farming with Rotations and Cover Crops: An Organic Bio-Extensive System. Kerr Center for Sustainable Agriculture, Poteau, OK. <http://kerrcenter.com/wp-content/uploads/2015/02/Bioextensive-Model-report-2015-small.pdf>.

Lafitte J.J., Cravero G. (21 mai 2010). La généralisation des bandes enherbées le long des cours d'eau (article 52 du projet de loi Grenelle 2) : réflexion sur l'impact et la mise en œuvre de cette disposition

Lambion, Jérôme. 2016. "La Biodiversité Fonctionnelle En Maraîchage. Un Outil Pour Protéger Les Cultures Contre Les Ravageurs." Journées Ref Bio PACA. Biodiversité fonctionnelle et aménagements paysagers, 90: 6–7. <http://www.grab.fr/wp-content/uploads/2017/03/MBI-90-1er-trim-2017-1.pdf>.

Jérôme Lambion, 2018, « Le souci, plante hôte de *Macrolophus* », Ressources : votre référence fruits et légumes, Protection biologique intégrée collection 2 document 2F. <https://www.grab.fr/wp-content/uploads/2018/12/Macrolophus-4p.pdf>

La Torre A, Iovino V, Caradonia F (2018) Copper in plant protection: current situation and prospects. *Phytopathol Mediterr* 57:201–236

Laurent Bedoussac & Etienne-Pascal Journet & Henrik Hauggaard-Nielsen & Christophe Naudin & Guenaëlle Corre-Hellou & Erik Steen Jensen & Loïc Prieur & Eric Justes, 2015, "Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review", INRA and Springer-Verlag

Les Services de l'état dans le Loiret. Application de la Directive Nitrates. Mise à jour le 14/02/2020. Consulté le 3/04/2020 sur <http://www.loiret.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-eau-foret-chasse-peche/Eau/Lutte-contre-les-pollutions-diffuses/Application-de-la-Directive-Nitrates/Informations-Directive-Nitrates/Les-bandes-enherbees-le-long-des-cours-d-eau>

Les Services de l'état dans le Loiret (janvier 2019) Mesures du programme d'actions national et du programme d'actions régional pour la région Centre-Val de Loire Consulté en ligne le 3/04/2020 sur :http://www.loiret.gouv.fr/content/download/40937/291846/file/PAN-PAR_consolide_vDREAL_janvier2019.pdf

Letourneau, Deborah K., and Sara G. Bothwell. 2008. "Comparison of Organic and Conventional Farms: Challenging Ecologists to Make Biodiversity Functional." *Frontiers in Ecology and the Environment* 6(8): 430–38

Levrel, H., Couvet, D. 2018. "Analyse de La Transition Vers l'agriculture Biologique." Disponible sur internet : <https://www.sfecologie.org/regard/r79-mai-2018-levrel-et-couvet-agriculture-biologique/> [consulté le 27/03/2020].

- Liu Tongjin, Cheng Zhihui, Meng Huanwen, Ahmad Imran, Zhao Huiling, 2014, "Growth, yield and quality of spring tomato and physicochemical properties of medium in a tomato/garlic intercropping system under plastic tunnel organic medium cultivation", *Scientia Horticulturae*, 2014 / 05 Vol. 17
- Mead, R., and R. W. Willey. 1980. "The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping." *Experimental Agriculture* 16(03): 217.
- Maët le Lan, 2015, « Stratégies de protection contre les ravageurs des cultures maraîchères », compte rendu d'essai, Chambre d'Agriculture du Morbihan.
- Malinconico, M et al, 2008, "Progress in polymer degradation and stability research An Overview on Innovative Biodegradable Materials for Agricultural Applications", *Institute of Chemistry and Technology of Polymers, Moeller*, pp.69-114
- Maltas, Alexandra et al. 2018. "The Effects of Organic and Mineral Fertilizers on Carbon Sequestration, Soil Properties, and Crop Yields from a Long-Term Field Experiment under a Swiss Conventional Farming System." *Land Degradation and Development* 29(4): 926–38
- Marriot EM, Wander MM (2006) Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems *Soil Sci Soc Am J* 70:950–959
- Mario V. Balzan, Gionata Bocci, Anna-Camilla Moonen, 2014, "Augmenting flower trait diversity in wildflower strips to optimise the conservation of arthropod functional groups for multiple agroecosystem services", *Journal of Insect Conservation* 2014 / 08 Vol. 18; Iss. 4
- Mario V. Balzan* & Anna-Camilla Mooneen, 2013, "Field margin vegetation enhances biological control and crop damage suppression from multiple pests in organic tomato fields", *Entomologia Experimentalis et Applicata* 150: 45–65
- Maudsley M, Seeley B& Lewis O, 2002, "Spatial distribution patterns of predatory arthropods within an English hedgerow in early winter in relation to habitat variables." *Agric. Ecosyst. Environ.* 89, 77–89.
- Mochiah M., and P. Baidoo, 2012, "Effects of Mulching Materials on Agronomic Characteristics, Pests of Pepper (*Capsicum Annuum* L.) and Their Natural Enemies Population." *Agriculture and Biology Journal of North America* 3(6): 253–61.
- Mohamed Fouad, Dokashi Mohamed, Hamam Mousa, Magdy Ali, Ahmed Elnobi, Emad-Elden Fouad Elsayed, 2007, "Yield of Crops in Within-Row Intercropped Okra-Cowpea or Okra-Cucumber", *International Journal of Vegetable Science*, Volume 13; Issue 2
- Naylor R.L& Ehrlich P.R, 1997, "Natural pest control services and agriculture", *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems & Daily G.C.* 1997pp. 151–174. Eds. Washington, DC: Island Press.
- Nicholls C.I, Parrella M& Altieri M.A, 2001, "The effects of a vegetational corridor on the abundance and dispersal of insect biodiversity within a northern California organic vineyard", *Landscape Ecol.* 16, 133–146.
- Nwofia G. E., F. Jiwuba, D. A. Okpara, and E. U. Mbah, 2017, "Yield and Productivity of Eggplant Genotypes Intercropped with Vegetable Cowpea in the Humid Tropics." *International Journal of Vegetable Science* 23(5): 400–410.
- Olasantan, F. O., 1985, "Effects of Intercropping, Mulching and Staking on Growth and Yield of Tomatoes", *Experimental Agriculture*, 4 Vol. 21; Iss. 2

Olivier Duchene, Jean-François Vian, Florian Celette, 2017, "Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review", *Agriculture, Ecosystems and Environment* 240 (2017) 148–161

O.O. Olubode, I.O.O. Aiyelaagbe, J.G. Bodunde, 2012, "Responses of 'Sunrise-solo' pawpaw, okra and cucumber components of pawpaw based cropping system to time of intercropping", *Scientia Horticulturae*, Vol 139

Perrin B. et Lefèvre A, 2019, « L'association culturale, un levier pour améliorer santé des plantes, fertilité du sol et production des systèmes de culture maraichers diversifiés ? », *Innovations Agronomiques* 76 (2019), 3-20

Picault Sébastien, Jérôme Lambion, Daniel Bouvard, David Deboevre, Sandrina, Lavigne, and Alexandra Schoeny. 2017. "La Colonisation de Pucerons En Cultures de Melon. L'emploi Des Bandes Fleuries Comme Outil de Régulation." *Infos-Ctifl* n°331: 21–29. http://www.ctifl.fr/ecophytopic/infos_ctifl/infos331/331p21-29.pdf

Pitan, O.O.R., Esan, E.O., 2014, "Intercropping cucumber with amaranth (*Amaranthus cruentus* L.) to suppress populations of major insect pests of cucumber (*Cucumis sativus* L.)", *Archives Of Phytopathology And Plant Protection*, 2014 / 05 Vol. 47; Iss. 9

Pitan, O.O.R., Filani, C.O., 2014, "Effect of intercropping cucumber *Cucumis sativus* (Cucurbitaceae) at different times with maize *Zea mays* (Poaceae) on the density of cucumber insect pests", *International Journal of Tropical Insect*, 12 Vol. 34; Iss. 4

Qing Zhao , Junwei J. Zhu , Yuchuan Qin , Pengliang Pan , Hongtao Tu , Wenxiao Du , Wangfang Zhou et Frederick P. Baxendale, 2013, "Reducing whiteflies on cucumber using intercropping with less preferred vegetables", *The Netherlands Entomological Society Entomologia Experimentalis et Applicata* 150: 19–27

Quan Yu, 1999, "Allelopathic Suppression of *Pseudomonas solanacearum* Infection of Tomato (*Lycopersicon esculentum*) in a Tomato-Chinese Chive (*Allium tuberosum*) Intercropping System", *Journal of Chemical Ecology*, Vol 25 No 11

Alain Ratnadass, Paula Fernandes, Jacques Avelino, Robert Habib, 2010, « Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review », *Agronomy Sust. Developm*, DOI 10.1007/s13593-011-0022-4.

Rey, F. et al. 2015. Guide Technique "Produire Des Légumes Biologiques", Tome 2 : Fiches Techniques Par Légume.

Ricard Jean-Michel, Alain Garcin, Michel Jay, and Jean-François Mandrin. 2012. "Chapitre 2 : La Lutte Biologique Par Conservation et Les Relations Entre Les Ravageurs et Leurs Ennemis Naturels." In *Biodiversité et Régulation Des Ravageurs En Arboriculture Fruitière.*, Paris, 471

Rieux R, Simon S & Defrance H, 1999, "Role of hedgerows and ground cover management on arthropod populations in pear orchards." *Agric. Ecosyst. Environ.* 73, 119–127.

Romain Lefevre, 2015, « Matière organique stable du sol : dynamique et mécanismes de (dé)stabilisation », *Ecole doctorale « Sciences de l'Environnement d'Ile de France » Laboratoire iEES Paris / Département Sol et Eau.*

Rundlöf, Maj, Lundin, Ola, Bommarco, Riccardo, 2018, "Annual flower strips support pollinators and potentially enhance red clover seed yield", *Ecology and Evolution* 2018 / 07

SCHMIDT*, J P CURRY, R A HACKETT, G PURVIS and R O CLEMENTS, 2001, "Earthworm communities in conventional wheat monocropping and low-input wheatclover intercropping systems", *Association of Applied Biologists*, 138:377-388

Schmidt M.H & Tschardt T, 2005, "The role of perennial habitats for Central European farmland spiders". *Agric. Ecosyst. Environ.* 105, 2005, b235–242.

Schoeny Alexandra, Lauvernay Antoine, Lambion Jérôme, Mazzia Christophe, Capowiez Yvan, 2019, 'The beauties and the bugs: a scenario to design flower strips adapted to aphid management in melon crops', *Biological Control*, 2019 / 5

Sengonca C, Kranz J & Blaeser P, 2002, "Attractiveness of three weed species to polyphagous predators and their influence on aphid populations in adjacent lettuce cultivations." *J. Pest Sci.* 75, 161–165.

Sinaj Sokrat, 2019, "Préserver La Durabilité Des Systèmes de Grande Culture : Bilan de 50 Ans d'Essais à Changins." (January).

Snyder WE, Chang GC, and Prasad RE, 2005, "Conservation biological control: biodiversity influences the effectiveness of predators." In: Barbosa P and Castellanos I (Eds). *Ecology of predator-prey interactions*. New York, NY: Oxford

Steinmetz, Zacharias et al. 2016. "Plastic Mulching in Agriculture. Trading Short-Term Agronomic Benefits for Long-Term Soil Degradation?" *Science of the Total Environment* 550: 690–705.

Teasdale JR, Coffman CB, Mangum RW et al (2007) Potential long-term benefits of no-tillage and organic cropping systems for grain production and soil improvement. *Agron J* 99:1297–1305

Trenbath, B.R., 1999, "Multispecies cropping systems in India—predictions of their productivity, stability, resilience and ecological sustainability." *Agroforest. Syst.* 45, 81–107.

Tschumi Matthias, Albrecht Matthias, Entling Martin H., Jacot Katja, 2015, "High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2015 / 09 Vol. 282; Iss. 1814

TsTschumi Matthias, Albrecht Matthias, Collatz Jana, Dubsy Viktor, Entling Martin H., Najar-Rodriguez Adriana J., Jacot Katja, 2016, "Tailored flower strips promote natural enemy biodiversity and pest control in potato crops", *Journal of Applied Ecology* 2016 / 03

Uyttenbroeck Roel, Hatt Séverin, Piqueray Julien, Paul Aman, Bodson Bernard, Francis Frédéric, Monty Arnaud, 2015, "Creating Perennial Flower Strips: Think Functional!", *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 2015 Vol. 6

Van Buskirk J & Willi Y., 2004, "Enhancement of farmland biodiversity within set-aside land", *Conserv. Biol.* 18, 987–994

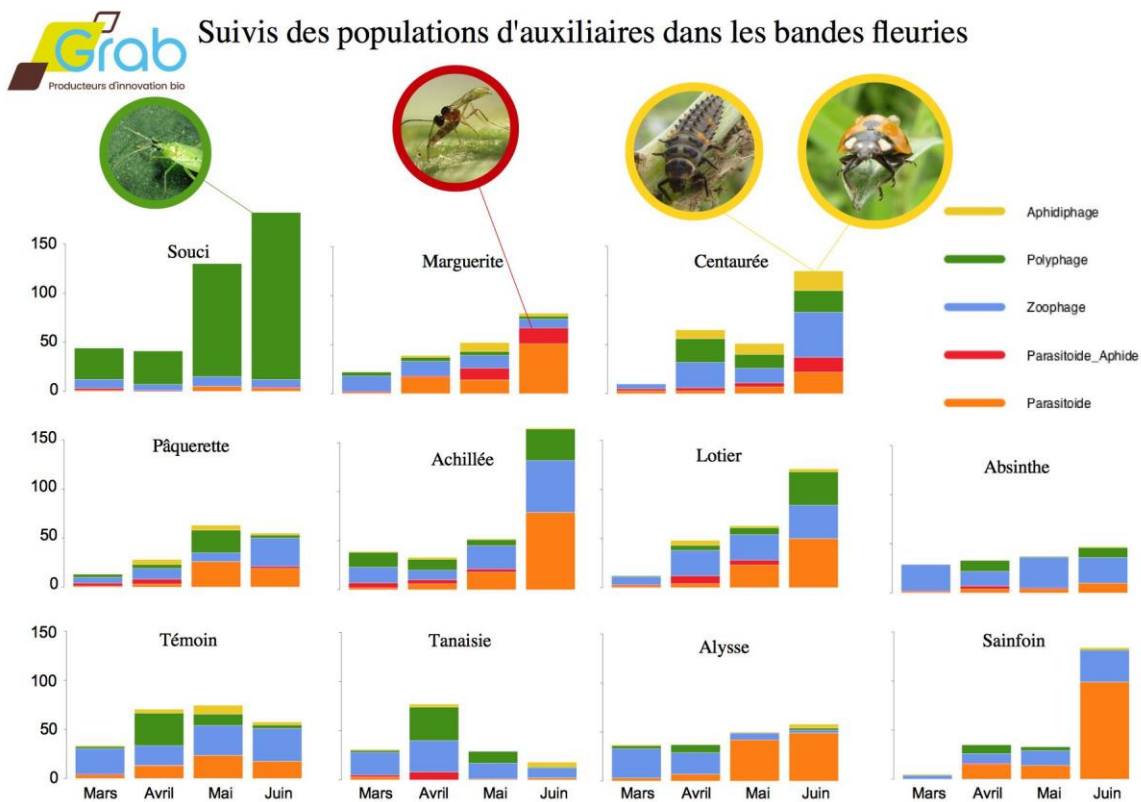
Varchola J.M & Dunn J.P, 2001, "Influence of hedgerow and grassy field borders on ground beetle (Coleoptera: Carabidae) activity in fields of corn." *Agric. Ecosyst. Environ.* 83, 153–163.

WEN-FENG CONG, ELLIS HOFFLAND, LONG LI, JOHAN SIX, JIAN-HAO SUN, XING-GUO BAO, FU-SUO ZHANG and WOPKE VAN DER WER, 2014, "Intercropping enhances soil carbon and nitrogen", *Global Change Biology*

- Wiens, M. J., Entz, M. H., Martin, R. C., Hammermeister, A. M., 2006, "Agronomic benefits of alfalfa mulch applied to organically managed spring wheat", *Canadian Journal of Plant Science*, 01 Vol. 86; Iss. 1
- Willey, R.W., Osiru, D.S.O., 1972, "Studies on mixtures of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular reference to plant population", *J. Agric. Sci.* 79, 517– 529.
- Xiao Xuemei, Cheng Zhihui, Meng Huanwen, Khan Muhammad Azam, Li Hezi, 2012, "Intercropping with garlic alleviated continuous cropping obstacle of cucumber in plastic tunnel", *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 11 Vol. 62; Iss. 8
- Xingang Zhou, Gaobo Yu, Fengzhi Wu, 2011, "Effects of intercropping cucumber with onion or garlic on soil enzyme activities, microbial communities and cucumber yield", *European Journal of Soil Biology* 47 (2011) 279e287
- Yin W, Feng F, Zhao C, Yu A, Hu F, Chai Q, Gan Y, Guo Y., 2016, "Integrated double mulching practices optimizes soil temperature and improves soil water utilization in arid environments." *Int. J. Biometeorol.*
- Francis C. A., Youngberg G., 1990. Sustainable agriculture - an overview. In: C.A. Francis, C.B. Flora, L.D. King (Eds.) *Sustainable Agriculture in Temperate Zones*, John Wiley & Sons, New York, 1-23.
- F Zahm, A. Alonso Ugaglia, H. Boureau, B. d'Homme, J.M. Barbier, et al.. *Agriculture et exploitation agricole durables : état de l'art et proposition de définitions revisitées à l'aune des valeurs, des propriétés et des frontières de la durabilité en agriculture. Innovations Agronomiques*, INRA, 2015, 46, pp.105-125. fahal-01243583f
- Zribi W, R. Aragués, E. Medina, and J. M. Faci. 2015. "Efficiency of Inorganic and Organic Mulching Materials for Soil Evaporation Control." *Soil and Tillage Research* 148: 40–45.

Annexes

Annexe 1 : résultats du suivi des population d'auxiliaires sur les bandes fleuries du tunnel 5 dans le cadre du projet PLACHOB : « Suivi des essais de gestion agroécologique des pucerons : aménager les cultures pour favoriser les ennemis naturels » (2019).



Annexe 2 : analyse du foin de luzerne effectué avant utilisation en 2019

ANALYSE DE VEGETAUX



ORGANISME

GRAB

Site Agroparc-BP 11283

84911 AVIGNON CEDEX 9

ANALYSE RÉALISÉE POUR

GRAB - VEDIE HELENE

SITE AGROPARC
84000 AVIGNON

Date de prélèvement : Technicien : **Hélène VEDIE**
Date d'arrivée : **08/04/2019** Préleveur :
Date d'édition : **26/04/2019** N° client : **2355672**
Délai : **18 jours**

N° RAPPORT	11689726	RÉFÉRENCE PARCELLE	FOIN T5	Feuilles
STADE	Générique	ESPÈCE / VARIÉTÉ	NON RENSEIGNE	

		FAIBLE	NORMAL	ELEVE	
RESULTATS	Matière sèche (%)				
	Poids de 1000 feuilles en g				
	<small>Macroéléments : mg/g MS - Oligo-éléments : mg/kg MS</small>				
	Azote	17.46			
	Phosphore	2.15			
	Potassium	21.60			
	Calcium	7.61			
	Magnésium	3.29			
	Fer				
	Manganèse				
Zinc					
Cuivre					
Bore					
EQUILIBRES	N / P	8.12			
	N / K	0.81			
	N / Ca	2.29			
	Ca / P	3.54			
	K / P	10.05			
	K / Mg	6.57			
	K / Ca	2.84			
	Ca / Mg	2.31			
	Complément Sodium (g/kg MS)	0.14			

CLÉS DE LECTURE CONSEILS

Espèce sensible au manque de :

AUREA
270 Allée de la Pomme de Pin
45160 Ardon
Tél. 01.44.31.40.40
Fax. 01.44.31.40.41
contact@aurea.eu
vegetaux@aurea.eu

Annexe 3 : composition de l'engrais AB flor 4 - 8 - 10

AB'FLOR®

Gamme entièrement constituée de matières fertilisantes animales, végétales & minérales.

4-8-10 S

+ 3 MgO soluble

ENGRAIS ORGANO-MINÉRAL NPK
NF U42-001



✓ Matière organique stabilisée avec la base MAZOR®.	<p>COMPOSITION :</p> <p>4,00 % AZOTE (N) total organique du MAZOR® (tourteaux végétaux de plantes médicinales, pulpes de raisins et d'olives, marc de café COMPOSTÉS), des protéines animales stérilisées, des poudres d'os stérilisées</p> <p>8,00 % ANHYDRIDE PHOSPHORIQUE (P₂O₅) total des produits organiques ci-dessus et du phosphate naturel finement moulu</p> <p>10,00 % OXYDE de POTASSIUM (K₂O) total soluble dans l'eau du sulfate de potassium (pauvre en Chlore)</p> <p>3,00 % OXYDE de MAGNÉSIUM (MgO) total soluble dans l'eau de la Kiésérite</p> <p>14,00 % ANHYDRIDE SULFURIQUE (SO₃) soluble dans l'eau</p> <p style="text-align: right;">12,00 % CaO total</p>
✓ Forte teneur en carbone humifié, pour une meilleure fertilité des sols.	
✓ Nutrition complète et disponibilité des éléments.	
✓ Agrément Composteur et Entreposeur-Mélangeur n° FR 81021129.	

MATIÈRE ORGANIQUE sur POIDS BRUT : 39 %

PRODUIT D'ORIGINE ORGANIQUE : 57 %

PRODUIT D'ORIGINE MINÉRALE : 43 %

Type 1 > 8
Type 2 > 8
Type 3 > 3



C/N
4,8

Conformément à la directive nitrate n°91/676 CEE







Produit certifié conforme au référentiel IFOST par Bureau Veritas Certification Le Galliumer 80049 PARIS la Région Centre

Produit utilisable en Agriculture Biologique conformément au règlement (CE) n° 834/2007

NOP

National Organic Program

➤ **MAZOR®** : 100 % végétal composté grâce à un procédé exclusif créé par GERMIFLOR et servant de base à toutes nos productions.

Les PLUS de notre Base Organique le MAZOR® :

- Compostage aérobie de minimum 6 mois qui garantit un niveau élevé d'humus stable exempt d'agents pathogènes, de graines de plantes adventices et de contaminations.
- Augmente la flore microbienne
- Améliore l'état sanitaire
- A une action hygiénisante et désinfectante
- Augmente la capacité de rétention en eau
- Améliore la structure du sol dans la Rhizosphère : agrégat et porosité
- Enrichit en éléments fertilisants
- Restitue des oligo-éléments
- Améliore le complexe argilo-humique

➤ Contrôle rigoureux de la qualité, traçabilité des matières premières ainsi que du produit fini, garantissant la précision des nutriments. Tous les échantillons sont classés et stockés durant 18 mois, sous température contrôlée.

➤ Chaque lot de production est analysé, échantillonné et envoyé à un laboratoire indépendant certifié COFRAC qui garantit que notre Entreprise vérifie toute la qualité agronomique du produit.

➤ GERMIFLOR travaille avec les laboratoires MICROHUMUS, RITTMO, SADEF, L.CA.



SAS Ets Marcel LAUTIER & Cie - 27 Les Vacants - BP 67 - 81202 MAZAMET Cedex - France
 Tél : + 33 (0)5.63.61.06.59 - Fax : + 33 (0)5.63.98.64.21 - E-mail : germiflor@orange.fr - Site Web : www.germiflor.com
 SAS au Capital de 750 000 Euros - 716 020 219 RCS Castres - EORI FR 716 020 219 000 11 - Code APE 2015 Z - FR 34 716 020 219

Annexe 4 : protocole de dosage des nitrates dans le sol

Chaque échantillon est homogénéisé puis tamisé. Puis, 100 grammes de sol et 100 grammes d'eau sont mélangés avant d'être filtré par filtration inverse. Une mesure de la concentration de nitrate est ensuite effectuée à l'aide du Nitrachek.

Parallèlement, la mesure du taux d'humidité est effectuée en mesurant la perte de poids d'échantillons du sol après passage à l'étuve (48 heures à 105°C).

La formule suivante permet de convertir les concentration de nitrate obtenue à l'aide du nitrachek en quantité d'azote (kg/ha) : $N = C \cdot (100+H) / (100-H) \cdot 14/62 \cdot d_a \cdot p \cdot 10 \cdot t_f$

Avec:

- C : concentration mesurée
- N : la quantité d'azote nitrique en kilogramme par hectare
- H : l'humidité de l'échantillon en %
- 14/62 : le ratio de conversion de l'azote sous forme NO₃ à la forme N (on considère que l'azote sous forme NH₄ est négligeable)
- d_a : densité apparente sèche du sol. Pour l'expérimentation d_a = 1,4
- p : profondeur du prélèvement
- t_f : pourcentage en volume de terre fine. Sur la station du GRAB t_f = 1.



Figure 19 : Prélèvement de sol à la sonde 0-25cm

Annexe 5 : le protocole du Tea Bag Index (TBI)

Matériel nécessaire

- Thé vert : utiliser les sachets de thé disponibles sur
- Thé rooibos : utiliser les sachets de thé disponibles sur
- Marqueur permanent
- Pelle
- Bâton ou baguette
- Etuve
- Balance au millième de gramme résolution

Protocole

- Prendre une paire de sachets de thé de chaque espèce (thé vert et rooibos) et les peser, y compris l'étiquette et la ficelle. Afin de connaître le poids du sac en nylon, de la ficelle et de l'étiquette, ouvrir au moins 10 sachets de chaque type et les peser séparément. Les sacs contiennent 1,6 à 1,8 grammes de thé.
- Utiliser cinq paires de sachets de thé vert et de thé rooibos comme répétitions minimales pour obtenir meilleures estimations, et marquer leurs étiquettes avec un marqueur permanent.
- Enterrer les sachets par paires (rooibos et thé vert), dans des trous voisins à proximité les uns des autres à 8-10 cm de profondeur.
- Vous pouvez utiliser un carottier de 30 mm. Ne pas compacter le sol et maintenir la perturbation aussi faible que possible. Remplissez les trous avec le sol du carottage de sol.
- Garder les étiquettes visibles à la surface du sol.
- Marquez le site avec une baguette facilement visible.
- Enregistrez la date, la position géographique (GPS ou carte de terrain) et les informations importantes sur le site (type de sol, culture, utilisation d'engrais, travail du sol, etc.)
- Sortez les sachets de thé après 90 jours. Dans un climat plus chaud, ce temps peut être plus court. Enregistrer la date et toute information supplémentaire.
- Retirer le sol adhérent et sécher les sachets de thé soigneusement au soleil ou à 60 ° C (maximum) dans un poêle.
- Peser les sachets de thé après le séchage.

Pour connaître les détails de calcul du facteur de minéralisation k et taux de saturation S :

Keuskamp, J.A., Dingemans, B.J.J., Lehtinen, T., Sarneel, J.M., Hef-ting, M.M. (2013) : Tea Bag Index : a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems. *Methods in Ecology and Evolution* 4, 1070- 1075. https://www.researchgate.net/publication/264475521_Tea_Bag_Index_A_novel_approach_to_collect_uniform_decomposition_data_across_ecosystems

Annexe 6 : protocole de la méthode PILazo

La méthode Pilazo consiste à prélever le pétiole de la dernière feuille ayant atteint sa taille adulte, puis d'en extraire la sève à l'aide d'un presse ail et de la diluer au 1/10^{ème} ou 1/20^{ème} pour effectuer une mesure au Nitrachek.

Le Nitrachek est un réflectomètre mesurant la concentration en nitrate (NO_3^-) par une lecture optique de bandelettes réactives. La dilution de la sève est réalisée afin d'entrer dans la gamme de lecture du Nitrachek qui est de 0 à 500 mg/L. Deux mesures par échantillon sont réalisées afin d'obtenir une. Cette moyenne est ensuite multipliée par le coefficient de dilution afin d'obtenir la concentration totale de nitrates dans la sève de l'échantillon (en mg/L).



Figure 20 : Photo du découpage et de l'extraction de la sève de pétiole de concombre dans le cadre du protocole PILazo







Annexe 8: photos des différents types de déchets de concombres (prise le 27 juillet)



Figure 21 : Photo des différents types de déchets de concombres : en haut à gauche un concombre dont le poids est supérieur à 600g, en haut à droite un concombre ayant subi des dégâts de chenilles, en bas un concombre tordu.

Annexe 9 : les différents types d'insectes prédateurs et leurs propriétés

Table 1: Propriétés et taxons des groupes fonctionnels.

Groupe Fonctionnel	Propriétés	Taxons
Prédateurs Aphidiphages 	Insectes reconnus comme se nourrissant, durant au moins un stade de leur existence, préférentiellement de pucerons. Ces prédateurs ont tendance à pondre leurs œufs dans les colonies de pucerons les plus peuplées. Ce groupe fonctionnel peut donc potentiellement jouer un rôle important dans la régulation des foyers de pucerons.	<i>Adalia</i> , <i>Coccinella</i> , Chrysopidae, Hemerobiidae, <i>Hippodamia</i> , <i>Propylea</i> , Scymninae, Syrphidae.
Prédateurs Généralistes 	Arthropodes dont le régime alimentaire est, durant au moins un stade de leur existence, insectivore ou zoophytophages.	Aeolothripidae, Anthocoridae, Carabidae, <i>Deraeocoris</i> , <i>Dicyphus</i> , Forficulidae, <i>Geocoris</i> , <i>Macrolophus</i> , Nabidae, <i>Nesidiocoris</i> , Opiliones, Reduviidae, Staphylinidae.
Parasitoïdes de pucerons 	Hyménoptères endo-parasitoïdes primaires de pucerons. Ces micro-hyménoptères sont capables de repérer des pucerons dispersés dans les cultures, et ainsi potentiellement prévenir l'apparition de foyer de pucerons.	Aphelinidae, <i>Aphidius</i> , <i>Ephedrus</i> , <i>Praon</i> .
Parasitoïdes 	Hyménoptères parasitoïdes dont les hôtes n'ont pas été déterminés. Le rôle écologique que joue ce groupe fonctionnel dans la régulation des ravageurs ne peut pas être clairement établi, ces hyménoptères pouvant aussi bien être des parasitoïdes de phytophages que d'ennemis naturels.	Tenebrantes
Araignées Tisseuses 	Araignées construisant des toiles pour capturer leurs proies. Les proies ainsi piégées sont généralement des insectes volants, ce qui fait des araignées tisseuses des potentielles prédatrices des pucerons lors de leur stade ailé.	Agelenidae, Araneidae, Linyphiidae, Segestriidae, Theridiidae, Uloboridae.
Araignées Chasseuses 	Araignées chassant leurs proies à l'affût ou en parcourant la végétation, sans tisser de piège passif. Les araignées chasseuses sont de potentielles prédatrices des pucerons, y compris lors de leur stade aptère.	Clubionidae, Corinnidae, Gnaphosidae, Liocranidae, Lycosidae, Oxyopidae, Philodromidae, Pisauridae, Salticidae, Thomisidae.

Annexe 10 : listes des packages utilisés pour réaliser les tests statistiques

Car pour les tests statistiques : John Fox and Sanford Weisberg (2019). An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL:

<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

Dplyr pour la manipulation de tableaux : Hadley Wickham, Romain François, Lionel Henry and Kirill Müller (2019). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 0.8.3.

<https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

Ggplot2 pour les réalisations graphiques : H. Wickham. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.

Lubridate pour la gestion des dates : Garrett Golemund, Hadley Wickham (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. Journal of Statistical Software, 40(3), 1-25. URL:

<http://www.jstatsoft.org/v40/i03/>.

Stringr pour la manipulation de chaînes de caractères : Hadley Wickham (2019). stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations. R package version 1.4.0.

<https://CRAN.R-project.org/package=stringr>

Tidyverse pour : Hadley Wickham (2017). tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'. R package version 1.2.1. <https://CRAN.R-project.org/package=tidyverse>

Agricolae pour les tests du Tukey HD (2020), Felipe de Mendiburu, "A statistical analysis tool for agricultural research", R package version 1.3-3. <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu>

Annexe 11 : tableau des données brutes de quantité de nitrate (kg/ha) dans les horizons 0-30cm et 30-60cm à deux dates de prélèvement.

Parcelle Agro	Hz	Système Green	Placettes green	système Agro	Dénomination syst Agro	Bloc	Tunnel	01/04/2020	08/07/2020
2.1	0-30	2	21+23	1	PU	1	5	128,1	136,2
2.1	30-60	2		1	PU	1	5	0,0	82,5
2.2	0-30	2	22+24	1	PU	2	5	124,1	140,2
2.2	30-60	2		1	PU	2	5	0,0	36,0
1.3	0-30	1	11+13	1	PU	3	6	177,4	48,4
1.3	30-60	1		1	PU	3	6	0,0	12,0
1.4	0-30	1	12+14	1	PU	4	6	122,0	19,8
1.4	30-60	1		1	PU	4	6	0,0	20,8
4.1	0-30	4	41+42	2	ASSOMulc	1	6	152,0	63,8
4.1	30-60	4		2	ASSOMulc	1	6	0,0	20,3
4.2	0-30	4	43+44	2	ASSOMulc	2	6	203,1	158,2
4.2	30-60	4		2	ASSOMulc	2	6	0,0	115,4
6.3	0-30	6	61+62	2	ASSOMulc	3	5	169,4	298,2
6.3	30-60	6		2	ASSOMulc	3	5	0,0	72,2
6.4	0-30	6	63+64	2	ASSOMulc	4	5	161,7	144,0
6.4	30-60	6		2	ASSOMulc	4	5	0,0	109,9
3.1	0-30	3	31+32	3	ASSO	1	6	89,4	73,6
3.1	30-60	3		3	ASSO	1	6	0,0	22,3
3.2	0-30	3	33+34	3	ASSO	2	6	176,9	39,5
3.2	30-60	3		3	ASSO	2	6	0,0	11,9
5.3	0-30	5	51+52	3	ASSO	3	5	129,7	21,9
5.3	30-60	5		3	ASSO	3	5	0,0	9,4
5.4	0-30	5	53+54	3	ASSO	4	5	155,7	13,6
5.4	30-60	5		3	ASSO	4	5	0,0	10,5

Annexe 12 : rendement commercialisable de concombres produit entre le 8 juin et le 6 août.

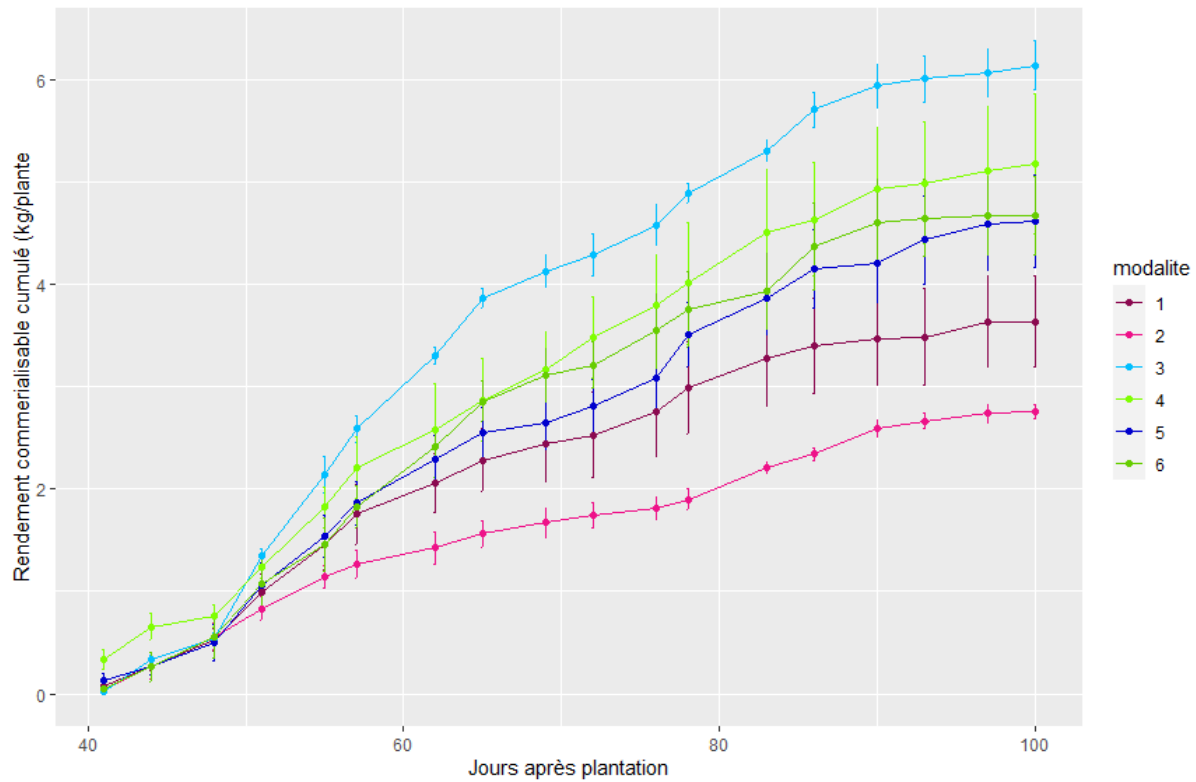


Figure 22 : Evolution du rendement de concombres commercialisables cumulé en fonction du temps des diverses modalités (1 : BAU, 6 : INN, 2 : culture pure avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Annexe 13 : rendement commercialisable de tomates produit entre le 2 juillet et le 6 août.

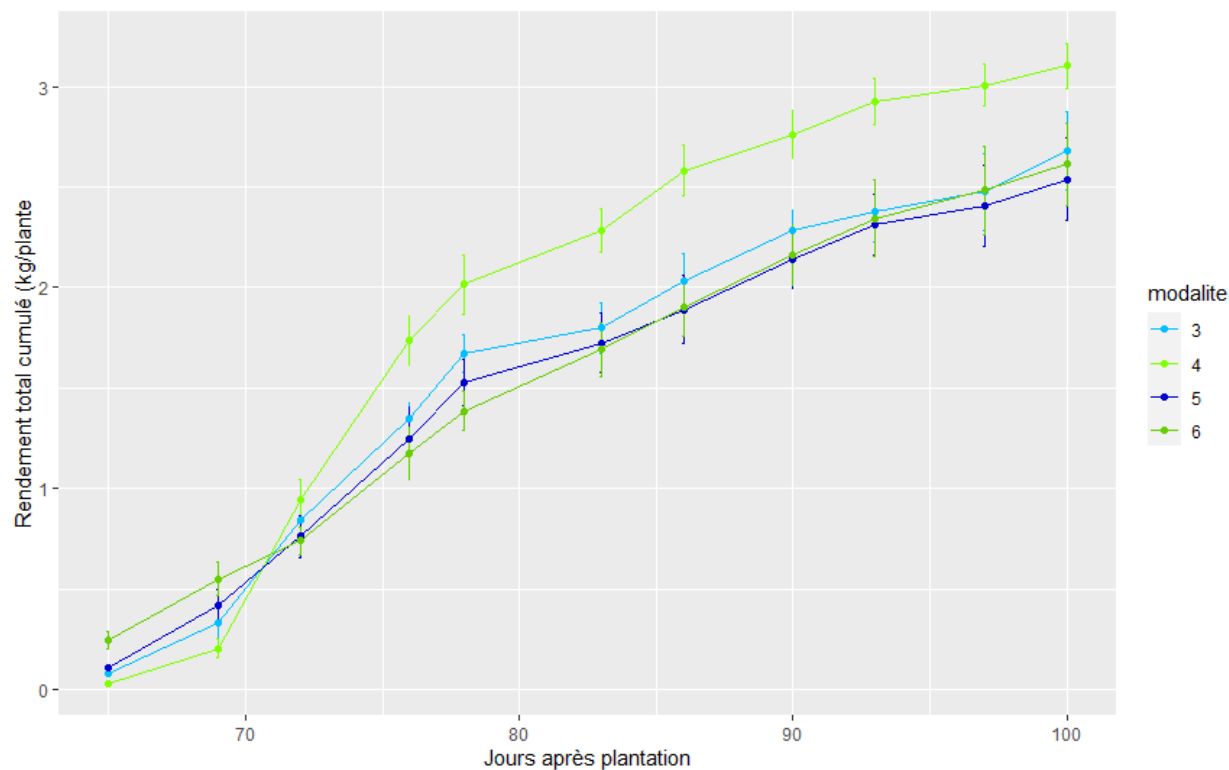


Figure 23 : Evolution du rendement de tomates commercialisables cumulé en fonction du temps des diverses modalités (1 : BAU, 6 : INN, 2 : culture pure avec bandes fleuries, 3 : cultures associées, 4 : cultures associées et précédent foin de luzerne, 5 : cultures associées et bandes fleuries). Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard de la moyenne.

Annexe 14 : détail de l'évolution des ravageurs sur concombres

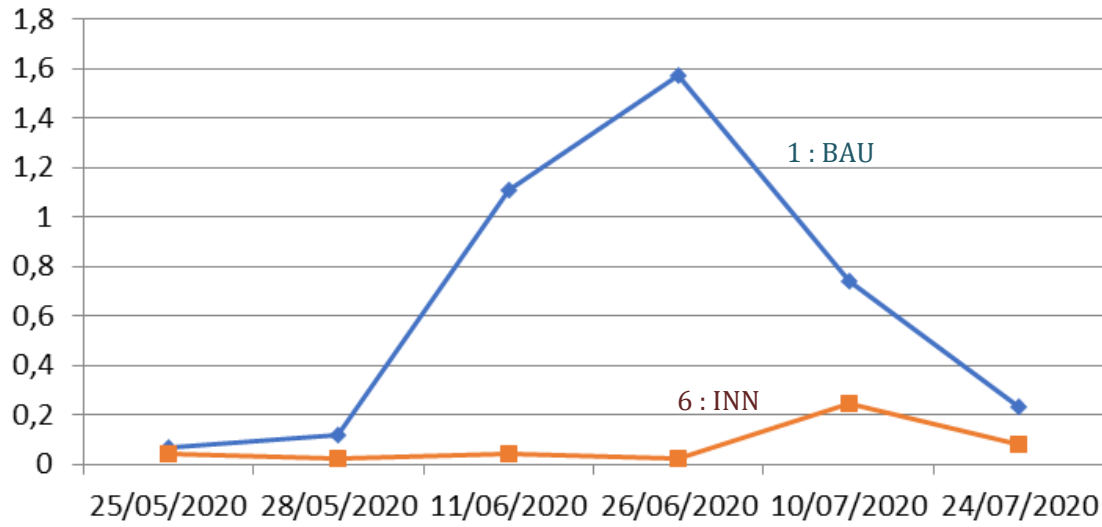


Figure 24 : Graphique représentant l'évolution de la moyenne de classe d'acaridés observés sur concombres en fonction du temps

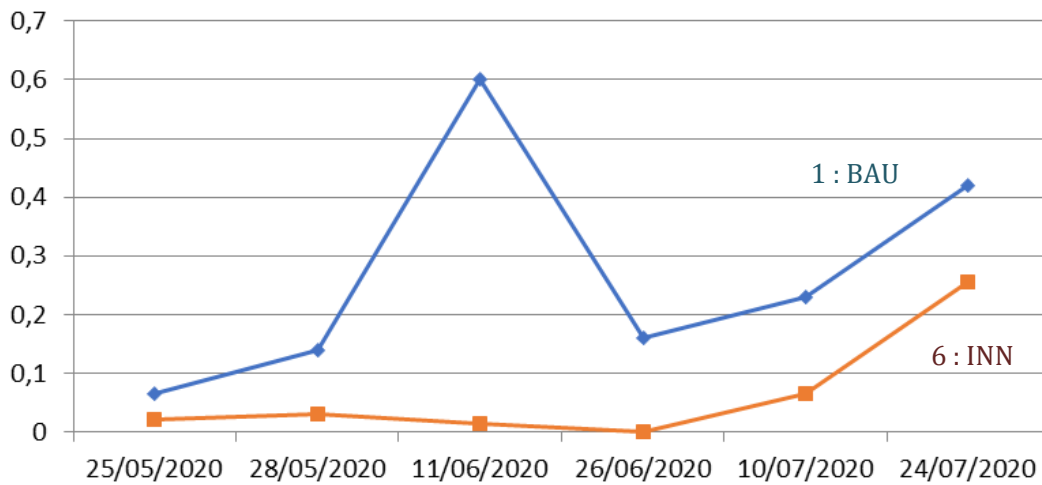


Figure 25 : Graphique représentant l'évolution de la moyenne de classe de pucerons observés sur concombres en fonction du temps

Annexe 15 : somme des captures par types d'insectes en fonction des deux modalités (barber)

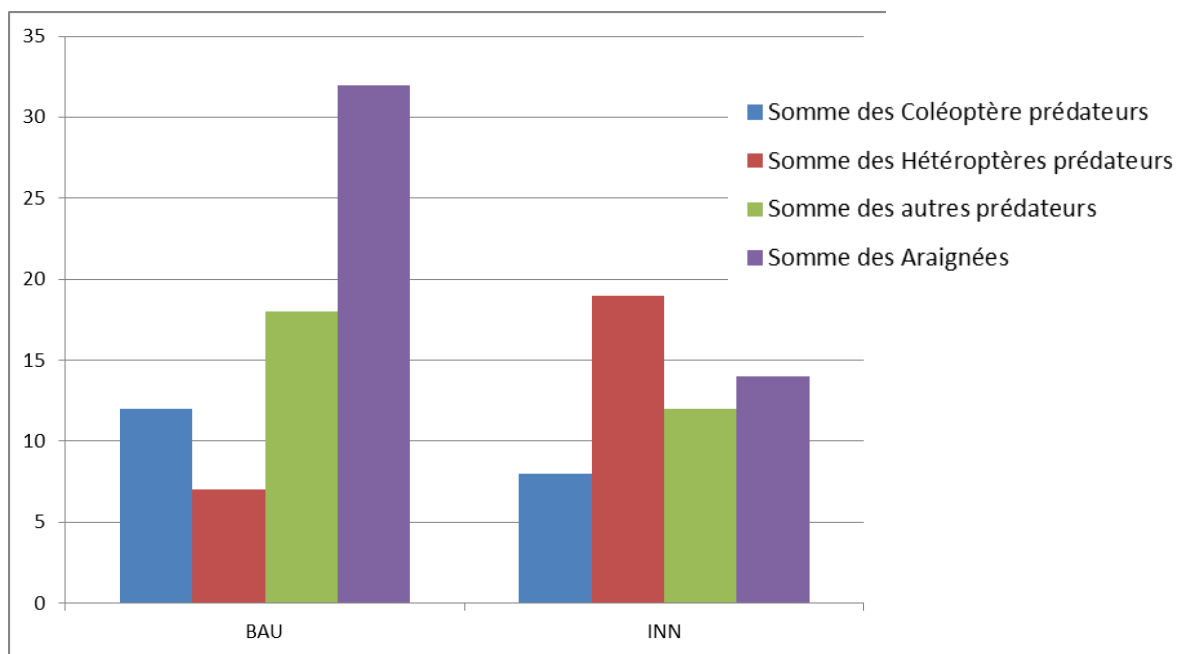


Figure 26 : Détail du total des auxiliaires décomptés dans les bols jaunes aux trois dates d'observation

Annexe 16 : somme des captures par types d'insectes en fonction des deux modalités (bols jaunes)

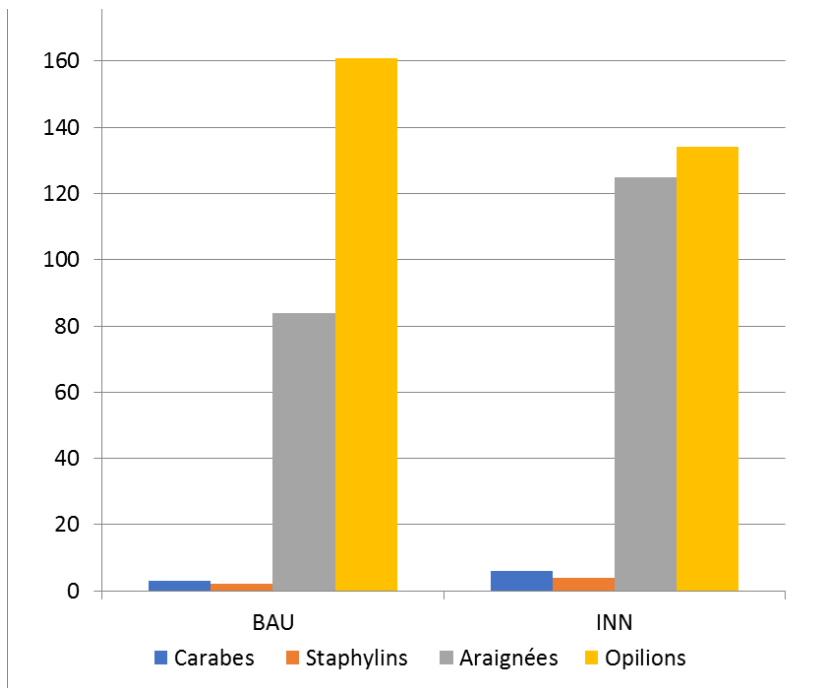


Figure 27 : Détail du total des auxiliaires décomptés dans les pièges barber aux trois dates d'observation

Annexe17 : résultats des analyses de sol effectué en début de projet Greenresilient



Vos résultats d'analyses
TERRE

DEMANDEUR / PRESCRIPTEUR

GRAB
Site Agroparc-BP 11283
84911 AVIGNON CEDEX 9

DESTINATAIRE

GRAB - M. VEDIE HELENE
SITE AGROPARC
84000 AVIGNON

Technicien : VEDIE Héléne

PARCELLE

N° ilot :

Référence **GRAB 1.2**

Surface

X/Long

Y/Lat

Coordonnées GPS

CARACTERISTIQUES DU SOL

Type de sol	LIMON CALCAIRE	
Densité apparente (T/m3)	1.3	
Masse du sol (T/ha)	3200	Sol humide
Profondeur de prélèvement (cm)	25 cm	Sol sec
Sol / Sous-sol	SOL	Réserve Facilement utilisable estimée



N° RAPPORT

11619627

Date de prélèvement 10/04/2018

Date de réception 29/05/2018

Date d'édition 12/06/2018

Préleveur

N° bon de commande NR

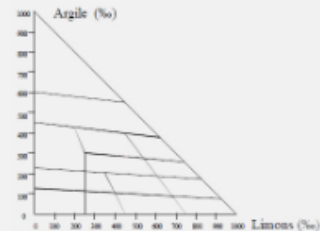
ETAT PHYSIQUE

Granulométrie (pour mille)

Argiles (< 2 µm) :	<input type="checkbox"/>
Limons fins (2 à 20 µm) :	<input type="checkbox"/>
Limons grossiers (20 à 50 µm) :	<input type="checkbox"/>
Sables fins (50 à 200 µm) :	<input type="checkbox"/>
Sables grossiers (200 à 2000 µm) :	<input type="checkbox"/>

Texture selon le triangle GEPPA :

Indice de battance :
Indice de porosité :
Refus (%) :



ETAT ORGANIQUE

Matière organique (%)* **2.9** **2.2** Elevé

* MO-carb.org × 1.72

souhaitable

Azote total (%) : **0.192**

Rapport C/N **8.7** **8-12** Satisfaisant

Décomposition de la MO: Rapide Lente souhaitable

Estimation du coefficient k2 (%) :

0.90

Estimation de l'azote minéralisable en kg/ha :

55 kg/ha

Estimation des pertes annuelles en MO :

829 kg/ha

Stock minimal souhaitable en MO :

70 t/ha

Stock en matières organiques (MO) :

92 t/ha

Potentiel biologique : Faible

95

Rapport C/N normal, transformation de la matière organique satisfaisante.

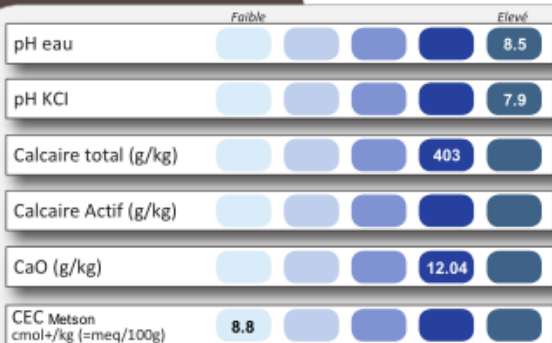
Les résultats d'analyses sont rendus sur terre fine sèche

Les analyses sont réalisées sur le site d'Auréa Ardon : 270 Allée de la Pomme de Pin, 45160 Ardon
Tél. 01.44.31.40.40 - Fax. 01.44.31.40.41 - contact@aurea.eu - www.aurea.eu

FERTI_SOLS_V1_ER_08/08/2017



STATUT ACIDO-BASIQUE



Taux d'occupation de la CEC (%)



Taux de saturation S/CEC (%) * :

Actuel : >150
Optimal : >95

* S = Somme des cations échangeables

POTENTIEL NUTRITIF

Éléments majeurs assimilables ou échangeables

Éléments	faible	Elevé	Souhaitable
P ₂ O ₅ (g/kg) <i>Méthode Joret Hébert</i>			
P ₂ O ₅ (g/kg) <i>Méthode Olsen</i>	0.044		0.145 à 0.21
K ₂ O (g/kg)		0.274	0.20 à 0.40
MgO (g/kg)		0.537	0.12 à 0.17

K / Mg : 0.22
Souhaitable : 0.86

K₂O / MgO : 0.5
Souhaitable : 2.0

Oligo-éléments (unité mg/kg)

	Risque de déficit	Risque d'excès	Référence
Bore soluble			
Manganèse échangeable			
Cuivre échangeable			
Cuivre EDTA			
Manganèse EDTA			
Fer EDTA			
Zinc EDTA			

Autres résultats et calculs

	Souhaitable
Conductivité (mS/cm)	
Fer oxalate (mg/kg)	
IPC *	
Sodium (Na ₂ O g/kg)	0.102 < 0.1
Potentiel REDOX (mV)	
P ₂ O ₅ Dyer (g/kg)	
Sulfates (mg/kg)	

* Calculé à partir du fer EDTA

Normes utilisées : Humidité résiduelle : NF ISO 11465 / pH : Méthode interne / Calcaire total : Méthode interne selon NF ISO 10693 / Calcaire actif : NF X 31-106 / Granulométrie : X31-107 / Cations échangeables : méthode interne selon NF X 31-108 / Carbone organique : Méthode interne selon NF ISO 14235 / Azote total : Méthode interne selon NF ISO 13878 / Conductivité électrique : NF ISO 11265 / Phosphore Dyer : NF X 31-160 / Phosphore Joret-Hébert : Méthode interne selon NF X 31-161 / Phosphore Olsen : Méthode interne selon NF ISO 11263 / Cuivre, manganèse et zinc : Méthode interne selon NF X31-120 / Bore : Méthode interne selon NF X 31-122 / CEC Metson : Méthode interne selon NF X 31-130 / CEC Cobalthexammine corrigée : Méthode interne selon NF ISO 23470 + calcul / Mise en solution métaux lourds : Méthode interne selon NF ISO 11466 / Dosage métaux lourds : NF EN ISO 22036 / Fer actif : FD X 31-146.

Annexe 18 : présence de mildiou en fonction des modalités.

Classe	0	1	2	3	4	5
Pourcentage de surface de plante atteinte	Pas de présence de la maladie	Traces	2-10% de surface touchée	10-20% de surface touchée	20-30% de surface touchée	plus de 30% de surface touchée

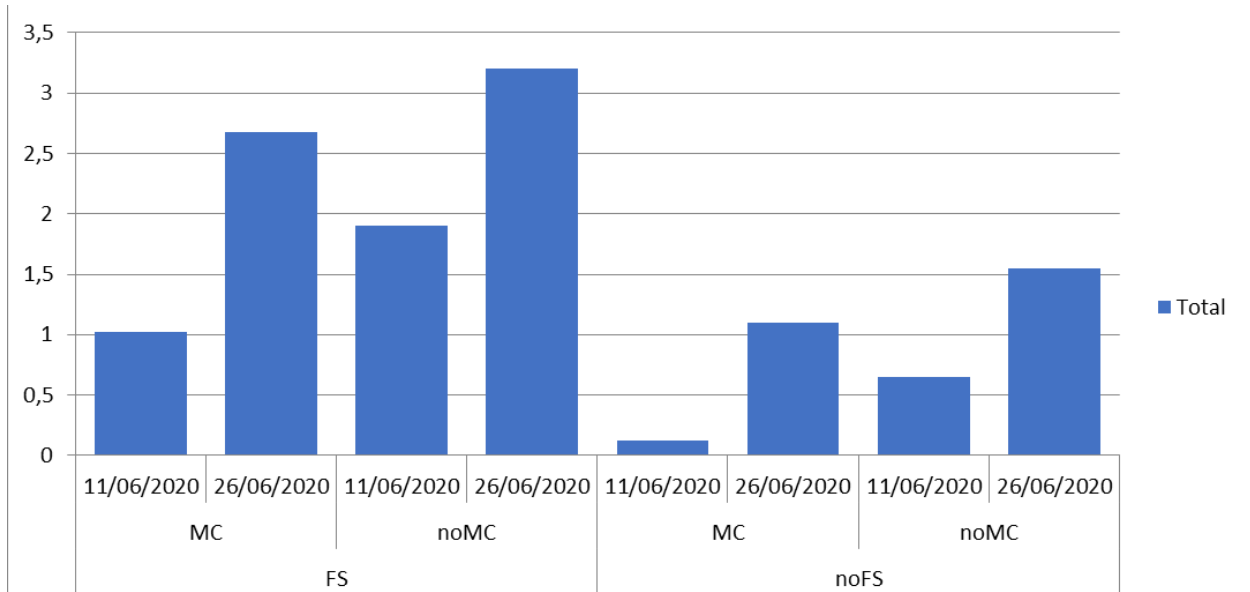


Figure 28 : Moyenne des classes de mildiou déterminé dans les différentes modalités à deux dates de mesures

Résumé

Titre : Amélioration de la durabilité des systèmes maraîchers biologiques sous abris : le projet Greenresilient.

Face à l'augmentation de l'attractivité du maraîchage bio (AgenceBio, 2019), nous assistons à une intensification des productions notamment pour les systèmes sous abris. Pour maximiser la production, des rotations culturales très courtes parfois avec des espèces de la même famille sont pratiquées, entraînant une dégradation de la fertilité des sols et de l'état sanitaire des parcelles. Pour pallier à cela, une augmentation de l'utilisation de produits fertilisants, de produits phytosanitaires et de plastiques (H. Kirchmann et al, 2008) est souvent nécessaire ce qui vient mettre en danger l'autonomie des systèmes agricoles. Face à ce constat, l'amélioration des pratiques permettant d'augmenter la durabilité de ces systèmes est primordiale. C'est l'ambition du projet Greenresilient, qui a fédéré des expérimentateurs de tout l'Europe pour améliorer la durabilité des systèmes maraîchers sous abris via des systèmes de culture plus résilients.

Durant trois années, sur la station expérimentale du Grab d'Avignon, des systèmes différents nous ont permis d'analyser les effets de trois leviers : la présence de bandes fleuries en bordure interne de tunnel, l'association culturale et l'utilisation de paillage organique (foin de luzerne). Au total, six systèmes ont été étudiés dont quatre dit "intermédiaires" présentant différentes combinaisons de leviers, un système témoin et un système innovant combinant l'ensemble des leviers . Plusieurs indicateurs ont été étudiés afin d'avoir une appréciation de la durabilité des divers systèmes : la quantité de nitrate, l'humidité, la température du sol, le tea bag index (un indicateur de l'activité biologique du sol), le suivi de la croissance des cultures, le rendement et la nutrition azotée des cultures. Enfin, le dénombrement des populations de ravageurs ainsi qu'un suivi des insectes et arthropodes capturés dans des bols jaunes et pièges barbers nous ont permis de déterminer les impacts des leviers sur la biodiversité fonctionnelle.

En 2020, les bandes fleuries ont permis de minimiser l'impact des acariens tétranyques (*Tetranychidae*) sur le système. L'association culturale a permis d'augmenter le rendement de la culture de concombres ainsi qu'augmenter la présence d'auxiliaires offrant une meilleure régulation des ravageurs. L'arrière effet du paillage organique a permis d'augmenter les quantités de nitrate dans le sol malgré une diminution de la fertilisation aboutissant à une légère augmentation de la nutrition azotée des cultures.

Les résultats des trois années nous permettent de déterminer que le système innovant étudié peut être considéré comme plus durable d'un point de vue environnemental, car il favorise une meilleure diversité fonctionnelle, une amélioration de la fertilité du sol, une moindre dépendance aux intrants ainsi qu'une meilleure productivité.

Mots clés : maraîchage, agriculture biologique, durabilité, bandes fleuries, associations culturales, paillage organique, innovation.

Abstract

Title : Increasing the sustainability of organic greenhouse vegetable production through the Greenresilient project.

Nowadays, the increase of organic vegetable attractivity (AgenceBio, 2019) leads to an intensification of the production, especially in greenhouses systems. This intensification have huge consequences for the environment because it necessarily leads to an increase of farm inputs (H. Kirchmann et al 2008) that can pollute soil and groundwater. In order to maximize the production, time between crop rotation is decreased and often vegetable from the same family are cultivated successively. This phenomenon has a negative impact on soil fertility and sanitary state of the crops. To remedy this situation, farmers are using more fertilizers, crop protection produces and plastics that jeopardize the self-sufficiency of agricultural systems. In light of these problems, the European Greenresilient project was born in 2018 with the ambition of improving the greenhouse organic vegetable production sustainability.

During three years, the experimental station of the Grab in Avignon studied several systems to understand the effect of three levers: flowers strips in the inner edge of the greenhouse, mixed crops and organic mulch (lucerne's hay). A total of six systems was studied : four which combines different levers, one witness without any lever and an innovative system (with all three levers). Many indicators concerning the soil were monitored such as nitrogen quantity, tea bag index, soil humidity and temperature. Concerning plants development, their growth, nitrogen nutrition and yield were monitored. At last, a count of pest and insects caught in yellow bowls or barber's traps gave us information about the functional diversity of our systems.

In 2020, results have shown that flowers strips have allowed a better natural regulation of pests such as predator mites (*Tetranychidae*). Mixed crops shown to have a better yield and higher auxiliary population leading to a lower pests presence. The residual effect of organic mulch leads to an increase of nitrogen in the soil and a small increase of nitrogen nutrition in the plants

The end result of the experimentation allow us to say that the innovative system is the most environmentally sustainable. It has a better functional diversity, a higher soil fertility, a smaller dependency on farm input and a better production. An analysis of the social and economical dimension of this system could complete our understanding of the general sustainability of this innovative system.

Key words : vegetable production, organic farming, sustainability, flower strips, mixed crop, organic mulch, innovative.