



Rapport technique d'expérimentation - Arboriculture - 2022

# Influences des plantes couvre-sols sur le rang de plantation d'un verger de pommier en production

<b>Code Grab</b>	A22 PACA 02110
<b>Date</b>	Février 2023
<b>Auteurs</b>	Jacquot Maxime GRAB, Elsa Galiano GRAB
<b>Contributeurs</b>	
<b>Financeurs</b>	ANR et CR PACA
<b>Crédits Photo</b>	Jacquot Maxime
<b>Droit d'usage</b>	Tous les contenus de ce document sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons CC BY SA (Attribution et Partage dans les mêmes conditions). Cela signifie que ces contenus sont réutilisables et modifiables par quiconque et ce gratuitement, moyennant le fait qu'il mentionne le nom des auteurs et qu'il partage son œuvre sous les mêmes conditions (licence CC BY SA).
<b>Contact</b>	Maxime Jacquot - maxime.jacquot(a)grab.fr

## Pour citer ce document :

Jacquot M., Galiano E., 2023. Influences des plantes couvre-sols sur le rang de plantation d'un verger de pommier en production. Rapport technique d'expérimentation 2022 Grab. Avril 2023. 25 p.



## Résumé

Dans les vergers, les plantes couvre-sols représentent à la fois une alternative au désherbage des rangs et un levier agroécologique intéressant vis-à-vis de la fertilité du sol et de la biodiversité fonctionnelle. Trois espèces de plantes couvre-sols ont été testées selon tous ces critères dans une parcelle de pommiers : *Achillea Millefolium*, *Phuopsis stylosa* et *Thymus serpyllum*, et comparées à une modalité témoin avec travail du sol. Après un an et demi de croissance, l'Achillée et le Thym couvrent très peu le rang et ont laissé beaucoup d'adventices s'installer. Le *Phuopsis* a atteint 60 % de recouvrement en Août. Une perte de rendement de 6 t/ha a été observée pour cette modalité par rapport au témoin. Le *Phuopsis* semble avoir influencé la nutrition hydrique et azotée des arbres mais aucune significativité statistique ne peut le confirmer. Cette espèce a par contre favorisé la présence de campagnols de façon certaine. Malgré leur différence d'implantation sur le rang, les plantes couvre-sols ont toutes trois apporté plusieurs bénéfices vis-à-vis des pommiers, du sol et de la biodiversité : le calibre des pommes ainsi que la concentration foliaire en manganèse ont été améliorés, l'activité enzymatique du sol responsable de la décomposition de la matière était également meilleure, tout comme l'abondance, la richesse spécifique et la diversité des arthropodes présents sous les arbres.

## Mots clés :

Arboriculture – Désherbage – Couverts végétaux – Pomme – Biodiversité

## 1 – ENJEUX ET CONTEXTE

En arboriculture, la gestion de l'enherbement est un pan de la production économiquement et environnementalement important. L'espace naturellement enherbé représente la majorité de la surface au sol du verger, contrairement à d'autres types de productions de végétaux non-pérennes. Depuis l'intensification des pratiques agricoles, cette strate herbacée est considérée comme un élément de l'agrosystème à entretenir pour limiter la concurrence hydrique et minérale.

De façon générale, la gestion de l'enherbement est réfléchi en distinguant deux zones dans le verger : le rang de plantation, et l'inter-rang, c'est-à-dire l'allée séparant deux lignes d'arbres. Le rang est une zone de prospection dense des racines des fruitiers, elle est plus vulnérable aux effets de concurrence induits par les adventices (Hardy, 2019). C'est donc la zone qui est le plus souvent désherbée, et elle peut représenter de 25 à 50 % de la surface du verger selon l'espèce fruitière (Ctifl, 2019). Aujourd'hui, 84 % des surfaces françaises de pommiers sont désherbées sur le rang de plantation, au moins une fois dans l'année (Agreste, 2021), par pulvérisation d'herbicides ou bien via le travail mécanique du sol.

Une autre façon de gérer l'enherbement des rangs peut être d'entretenir un couvert, en laissant la végétation spontanée se développer, ou en implantant des espèces choisies. Ces couverts qui occupent le rang sont regroupés sous la dénomination de plantes couvre-sols (PCS), ou *living mulch*. Actuellement, peu de vergers maintiennent un enherbement permanent sur le rang (16 % des surfaces arboricoles françaises selon les données Agreste, 2021) alors que c'est l'alternative au désherbage chimique la moins coûteuse (Ctifl, 2019). Le surcoût estimé est de 62 €/ha à 206 €/ha lors de la transition du désherbage chimique à la tonte du rang, ce qui représente plus de deux fois moins que l'adoption du désherbage mécanique (Ctifl, 2019). En effet, plusieurs freins persistent à leur utilisation, dont le principal est la perte de rendement liée à la concurrence et aux ravageurs attirés par la présence de couverts. La recherche se focalise donc essentiellement sur la sélection d'espèces peu concurrentielles vis-à-vis des arbres, en évaluant leur impact sur la culture et leur capacité à couvrir le rang afin de limiter le développement des adventices. Jusqu'à aujourd'hui, beaucoup d'espèces de graminées et légumineuses ont été étudiées, selon des itinéraires techniques calqués sur le modèle des couverts végétaux et engrais verts en grandes cultures (avec ou sans destruction du couvert). Récemment, ce sont d'autres types de plantes qui sont davantage étudiées.

Il est également important d'évaluer l'influence de ces couverts sur l'ensemble de l'agroécosystème, avec une approche de gestion agroécologique du verger. En effet, l'intérêt d'implanter ces espèces sur le rang va au-delà de la simple gestion des adventices, celles-ci pouvant délivrer un grand nombre de services écosystémiques pour le sol et la biodiversité (Granatstein et al. 2016). L'observation et la quantification de ces services pourraient ainsi permettre d'évaluer l'impact global de ces pratiques, positif et négatif, en comparaison au désherbage mécanique ou chimique des arbres fruitiers.

## 2 – OBJECTIF

L'objectif de ce projet est de déterminer si les plantes couvre-sols peuvent représenter une solution agronomiquement et écologiquement avantageuse pour couvrir les rangs de fruitiers en verger adulte. Le Grab mène des essais sur cette thématique depuis les années 2000 et les résultats obtenus jusqu'à présent l'ont orienté vers trois espèces : l'Achillée millefeuille (*Achillea millefolium*), le Phuopsis (*Phuopsis stylosa*), et le Thym serpolet (*Thymus serpyllum*). Ces plantes semblent être les plus prometteuses dans le contexte de la Basse vallée du Rhône.

## 3 – METHODOLOGIE

### 3.1. Le dispositif expérimental dans un verger typique de la Basse-Durance

#### Lieu et matériel végétal

L'essai est situé sur la commune de Saint-Andiol (13), au sein de l'exploitation APPLE & CO. La parcelle qui l'accueille est composée de pommiers Brookfield (Mutant de Gala) greffés sur M9 Pajam 1 et plantés en 1997 avec un espacement de 3,5 x 1,25 m. Le verger dispose de deux systèmes d'irrigation : goutte-à-goutte et aspersion de la frondaison. Le sol a une texture sablo-argilo-limoneuse.

L'essai occupe trois rangs : les deux rangs aux extrémités nord et sud possèdent les modalités de plantes couvre-sols et le rang central est le témoin avec les pratiques habituelles du producteur (travail du sol). Le dispositif est composé de 4 blocs soit 4 répétitions par modalité. Une parcelle élémentaire est composée de 6 arbres.

#### Plan d'expérimentation

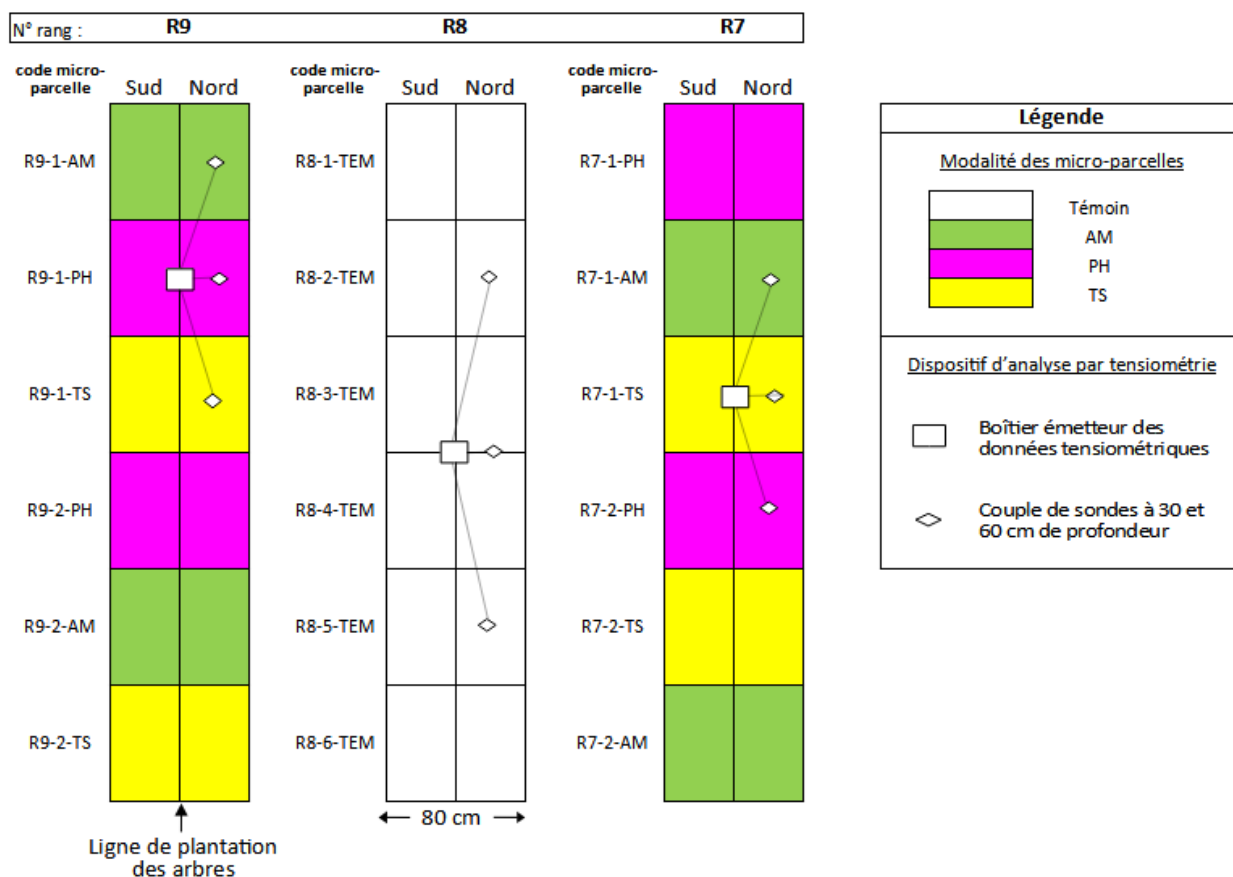
Nous comparons quatre modalités :

- Achillea millefolium (AM)
- Phuopsis stylosa (PH)
- Thymus serpyllum (TS)
- Témoin sol travaillé (TEM)

Les micro-parcelles avec PCS sont positionnées en alternance le long des rangs 9 et 7. Les micro-parcelles Témoin n'ont pas pu être « mélangées » aux autres modalités sur le plan expérimental, car le producteur ne pouvait pas réaliser le travail du sol sur des petites longueurs.

Les plantes couvre-sols ont été plantées ou semées selon des lignes parallèles aux rangs, à 20 cm de part et d'autre du rang de plantation. La partie considérée comme le rang de plantation et qui n'est donc pas travaillée dans les modalités de PCS mesure donc 80 cm de largeur en tout, soit 40 cm de part et d'autre des arbres. Cette bande de même largeur est travaillée sur le rang Témoin n°8.

L'inter-rang est couvert d'un enherbement spontané.



**Figure 1| Plan d'essai**

Les arbres étant séparés de 1,25 m, chaque espèce testée cumule 30 m linéaire de plants. Le plan de l'essai montre la répartition des modalités, les micro-parcelles Témoin sont au nombre de 6, mais l'ensemble des protocoles a bien été réalisé sur 4 micro-parcelles pour avoir un traitement équivalent aux autres modalités. Ces quatre micro-parcelles « Témoin » sont celles les plus au centre du rang 8.

## Conduite culturale

Les plantes couvre-sols ont été plantées (PH et TS) ou semées (AM) tous les 12 cm (37 plants par micro-parcelle de chaque côté du rang) le 20 mai 2021 après un travail du sol du producteur. Seuls le PH s'est implanté, les conditions estivales ont été défavorables aux mini-mottes des TS et au semis d'AM, alors que le PH avait été planté en pots de 8x8x8cm. Une plantation d'AM et de TS a été réalisée le 28 octobre après un passage de motoculteur le 26 octobre 2021. Des plants de PH ont également été plantés en mars 2022 sur les micro-parcelles où un passage d'outil accidentel avait détruit certains plants à l'automne.

La parcelle est conduite en agriculture biologique. Habituellement sur l'exploitation, les rangs sont travaillés tous les 2 mois avec une bineuse à doigts KRESS – ALM sur 5 cm de profondeur. Depuis l'installation de sondes tensiométriques sur les rangs en mars empêchant le passage de la bineuse, le rang Témoin 8 a été travaillé le 15/04 puis le 19/07 au motoculteur sur 10 cm de profondeur. Le broyage des inter-rangs est réalisée une fois par mois ou tous les deux mois selon la hauteur du couvert. Les rangs 9 et 7 avec PCS ont été tondus début juin afin de limiter la montée en graine des adventices. Une fertilisation à base d'engrais organique 9-6-0 a été apportée en mars à raison de 300kg par hectare.

Concernant la protection des cultures, trois traitements contre le carpocapse (Carpovirusine à 1L/ha, avec ou sans Madexpo à 0,1L/ha selon les générations de ravageur) ont été réalisés sur la saison d'étude. La parcelle est également protégée par des filets Alt'Carpo et un dispositif de confusion sexuelle (diffuseurs mis en place en mai). Une application de bouillie bordelaise Manica a été effectuée au printemps contre tavelure et oïdium.

### 3.2. Les trois axes d'étude analysés selon plusieurs indicateurs

Axe d'étude	Objet d'étude	Indicateur
Capacité de recouvrement du rang	Plantes couvre-sols	Part de recouvrement de la PCS, des adventices et du sol nu.
Croissance et productivité de la culture	Pommiers	Circonférence du tronc
		Taux de nouaison
		Charge par arbre
		Calibre des fruits
		Estimation du rendement
Services écosystémiques	Pommiers	Statut de la nutrition azotée par analyse foliaire
		Analyse foliaire des éléments nutritifs
	Sol	Reliquats azotés
		Activité microbiologique du sol
		Statut hydrique
	Ravageurs et maladies	Présence de campagnols
		Présence de pucerons (cendré et lanigère)
		Présence et dégâts de carpocapse
		Dégâts hoplocampe
		Dégâts tavelure
	Arthropodes de différentes strates	Abondance, richesse spécifique, diversité et équitabilité de l'entomofaune des pommiers
		Abondance, richesse spécifique, diversité et équitabilité de l'entomofaune de la strate herbacée

Tableau 1 | Liste des indicateurs étudiés.

## Performances de gestion des adventices

Les pourcentages de recouvrement au sol sont mesurés avec un quadra de 0,25m<sup>2</sup>. Quatre mesures sont effectuées par micro-parcelle : le quadra est positionné deux fois aléatoirement sur l'orientation Nord des arbres puis deux fois sur l'orientation Sud. Pour chaque quadra, le pourcentage de recouvrement de l'espèce implantée, des adventices et du sol nu sont notés. Ces mesures sont effectuées une fois par mois.

## Croissance et productivité des arbres

### Mesure de la croissance des arbres via la circonférence du tronc

La circonférence de chaque tronc à 60 cm de hauteur a été mesurée le 01/06/2021 puis le 15/03/2022. La donnée a été convertie en pourcentage d'accroissement du tronc entre 2021 et 2022.

### Observation du taux de nouaison

Le nombre de fruits noués par rosette a été noté au moment de la nouaison, le 18/05. L'observation a été réalisée sur 20 inflorescences choisies de façon aléatoire sur les faces Nord et Sud (10 par face) de chaque arbre.

### Charge en fruits

L'ensemble des fruits ont été comptabilisés par arbre. Cette mesure a eu lieu trois semaines avant la récolte, le 21/07. Le protocole différait légèrement en 2021, seuls trois arbres par micro-parcelle avaient été observés (mesure réalisée le 29/07/2021).

### Calibre des fruits

Le calibre moyen par arbre a été approché par mesure du calibre de 20 fruits par arbre (10 côté Nord et 10 côté sud). Le calibre manuel utilisé a permis de distinguer 5 classes de calibres : 60-65, 65-70, 70-75, 75-80 et 80-85 mm de diamètre). L'opération a été réalisée le jour même de la première récolte, le 08/08.

### Estimation du rendement par arbre

L'estimation des rendements croise les deux indicateurs précédents via la formule :

$$R = \sum_i (N \cdot C_i \cdot P_i)$$

avec **R** le rendement estimé en kg par arbre, **N** le nombre de fruits par arbre, et **C<sub>i</sub>** la proportion du calibre **i** dans l'échantillon, et **P<sub>i</sub>** le poids du calibre **i** (Mathieu, 1996).

Le calcul du rendement massique lisse les différences d'éclaircissage entre les arbres, qui ont pu entraîner des écarts au niveau du nombre de fruits par bouquets se répercutant sur la taille des fruits. Cet indicateur permet ainsi d'avoir une représentation du niveau global de production de chaque arbre et donc de chaque modalité.

## Effets du mode gestion du sol sur l'agroécosystème

### Nutrition de la culture et fertilité du sol

#### Mesure de la teneur en azote des feuilles :

Avec le Fluoromètre de chlorophylle N-tester, le niveau d'azote des arbres a été mesuré une fois par mois, d'avril à août compris. Sur chaque arbre, la teneur en chlorophylle est mesurée sur 5 feuilles et sur les 6 arbres de la micro-parcelle, ce qui produit une valeur par micro-parcelle (l'outil N-tester ne renvoie une valeur moyenne qu'au bout de 30 mesures). A chaque date, différentes feuilles ont été mesurées (voir Tableau 2).

Date de mesure	Feuille ciblée
14 avril	Feuille de la rosette

10 mai	7 <sup>ème</sup> feuille depuis l'apex des rameaux de l'année
9 juin	7 <sup>ème</sup> feuille depuis l'apex des rameaux de l'année
13 juillet	9 <sup>ème</sup> feuille depuis l'apex des rameaux de l'année
16 août	9 <sup>ème</sup> feuille depuis l'apex des rameaux de l'année

**Tableau 2 | Détail des feuilles ciblées pour la mesure avec le N-tester selon la date de mesure.**

#### Teneurs foliaires en éléments nutritifs :

Une analyse chimique des feuilles de pommiers a été réalisée 100 jours après la pleine floraison, soit le 16/07/2022. Les concentrations en macroéléments et oligo-éléments ont ainsi été mesurées pour chaque micro-parcelle, en prélevant 10 feuilles par arbre.

#### Mesure des reliquats azotés du sol :

Trois prélèvements de sol sur l'horizon 0-15cm ont été effectués entre avril et juillet (le 05/04, 09/05, et 06/07). Environ 500g de sol étaient échantillonnés sur chaque micro-parcelle, au Nord et au Sud, puis après homogénéisation, nous avons conservé 300g par micro-parcelle pour cette analyse. Le laboratoire Auréa a dosé l'azote ammoniacal, l'azote nitrique et l'azote total des échantillons.

#### Analyse microbiologique du sol :

Deux prélèvements de sol ont été réalisés entre le printemps et l'automne. Les premiers 15cm de sol ont été échantillonnés sur chaque micro-parcelle, en même temps que les prélèvements pour les reliquats azotés. Parmi les 500g prélevés par micro-parcelle (voir paragraphe précédent), 100g étaient réservés à cette analyse.

Le laboratoire des partenaires du projet BioHortiTech situé en Pologne a réalisé des analyses selon trois indicateurs de l'activité microbiologique :

- La concentration en bactéries du genre *Pseudomonas*, groupe fonctionnel du sol particulièrement sensible aux variations de ses paramètres physico-chimiques. Ces bactéries jouent un rôle important dans la croissance des plantes (Hayat et al. 2010).
- La concentration en bactéries solubilisatrices de phosphate, un autre type de bactéries du sol intéressantes à observer pour leur rôle dans la minéralisation des nutriments ;
- Le niveau d'activité des enzymes déshydrogénases. L'oxydation de la matière organique implique une déshydrogénation des molécules. L'activité déshydrogénase du sol témoigne donc de la capacité du sol à minéraliser la matière organique et rendre les nutriments disponibles pour les végétaux (Tabatabai, 1994 ; Wolińska and Stępniewska, 2012).

#### Analyse du statut hydrique du sol par tensiométrie :

A partir de Mars 2021, les données tensiométriques ont été récoltées via des sondes et boîtiers connectés. Trois dispositifs contenant chacun un boîtier et trois couples de sondes ont été placés sur la parcelle d'essai, un sur chaque rang (voir Figure 4).

Les données tensiométriques exprimées en centibars sont un indicateur de la tension de l'eau dans le sol et donc de sa disponibilité pour les végétaux. Plus le sol est sec, plus la tension qu'il exerce sur l'eau est élevée, et plus les racines devront fournir d'énergie pour absorber cette eau.

#### Bioagresseurs

##### Observation des dégâts liés au campagnol :

Le nombre de tumuli à la surface a été noté à deux dates : le 22/03/22 et le 17/06/22.

##### Observation des principaux ravageurs du pommier :

La présence et les éventuels dégâts des pucerons, carpocapse, hoplocampe du pommier et tavelure ont été observés. Aucun de ces bioagresseurs n'était présent de façon significative sur la parcelle d'essai entre mars et août 2022.



## Biodiversité

### Entomofaune des pommiers :

Afin d'évaluer les communautés d'arthropodes vivant dans les pommiers, nous avons utilisé la méthode des bandes cartonnées. Les bandes constituent un refuge pour la faune des strates arborée, faune qui sera dénombré lors du retrait de la bande. Elles ont été placées au niveau du troisième arbre de chaque micro-parcelle de l'essai. Le dispositif a été pensé de façon à faciliter le piégeage des arthropodes lorsque le carton est récupéré pour l'inventaire : une bande de carton ondulé de dimension 7,5 x 62 cm est enroulée sur elle-même puis placée dans un pot en plastique refermable (rayon bas 5,5cm, hauteur 8,3 cm). Le pot retourné est fixé sur la face Est de chaque tronc, à une hauteur de 160 cm. Les bandes sont récupérées au bout de 15 jours puis congelées (sauf à partir de l'apparition des carpocapses, les bandes sont simplement mises au réfrigérateur afin de préserver les futures pupes). Les individus présents dans le carton sont identifiés (forficules, araignées et carpocapses) puis comptabilisés. Ce protocole a été réalisé une fois par mois, d'avril à juillet, soit 5 fois au total.

### Entomofaune de la strate herbacée :

La faune présente au niveau des plantes couvre-sols a été inventoriée à l'aide d'un aspirateur à feuilles Makita (DUB363ZV). Chaque micro-parcelle a été aspirée sur une longueur de 2,50 mètres (entre le 3<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> arbre) en positionnant la bouche de l'aspirateur équipée d'un filet sur les plantes de l'essai, à une hauteur de 20cm. La même distance aux arbres a été respectée pour les parcelles témoin. Les individus présents dans les filets ont par la suite été identifiés à différents niveaux taxonomiques (sous-ordre, genre ou famille) et comptabilisés. Quatre sessions d'aspiration ont eu lieu au total, environ une par mois.

A partir des données collectées avec ces deux derniers protocoles sur la biodiversité, plusieurs indicateurs écologiques ont été calculés à l'aide du logiciel R afin de caractériser l'écologie des populations d'arthropodes piégées (Oksanen, 2017) :

- L'abondance qui est la somme totale des individus.

- La richesse spécifique, c'est-à-dire le nombre total de taxons représentés (car nous ne sommes pas allés jusqu'à l'identification de l'espèce). Elle est calculée grâce à la fonction `specnumber()` du package « `vegan` ».

$$H = - \sum_{i=1}^S p_i \log_b p_i$$
 - L'indice de diversité de Shannon-Weaver  $H'$  qui est un des plus couramment utilisés (Hill, 1973). Il peut être vu comme la mesure de la variance de l'abondance d'espèces (ou taxons) au sein de l'échantillon :

avec  $p_i$  la proportion de chaque taxon dans l'échantillon, et  $S$  le nombre total de taxons (c'est-à-dire la richesse spécifique). La base logarithmique  $b$  utilisée dans la fonction `diversity()` de « `vegan` » est  $e$  (logarithme népérien). Plus l'échantillon présente d'espèces différentes, plus  $H'$  augmente de façon logarithmique.

- L'équitabilité  $J$  selon Pielou représente l'abondance relative de chaque taxon. Elle est calculée à partir de la diversité et de la richesse spécifique tel que :

$$J = H' / \log(S)$$

Si  $J$  tend vers 1, alors les taxons présents dans l'échantillon ont des abondances équitables.

## 3.3. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R, version 4.1.3 (2022-03-10). L'ensemble des tests et analyses a eu pour but de comparer les quatre modalités de gestion du rang entre elles, chacune étant composée de 4 micro-parcelles soit 24 arbres au total.

Pour chaque indicateur, une analyse de variance via le test de Kruskal-Wallis a été réalisée pour tester l'effet de la modalité sur la variable mesurée (à l'exception de la circonférence du tronc, testée avec une Anova). La fonction `kruskal()` du package « `agricolae` » indique l'existence d'une différence significative entre les distributions des variables comparées au risque  $\alpha$  de 5 %. Si la p-value est inférieure à 0,05, un test post-hoc de Fisher (LSD) intégré à la fonction `kruskal()` permet de connaître les groupes dont la distribution est effectivement différente.



Des analyses multivariées ont également permis de synthétiser l'ensemble des données à l'échelle des micro-parcelles. Pour cela, ce sont la fonction `PCA()` du package « FactoMineR » ainsi que le package « factoextra » qui ont été utilisés. L'objectif en analysant toutes les variables est d'étudier les tendances générales pouvant différencier les comportements des 4 modalités à partir des indicateurs les plus contributifs aux composantes principales. Le plan expérimental comprenant seulement 16 individus (les micro-parcelles), il était plus fiable de sélectionner uniquement les variables (c'est-à-dire les indicateurs) les plus pertinentes, en fonction des résultats observés et de leur contribution aux dimensions de l'ACP. La fonction `fviz_pca_biplot()` de « factoextra » nous a permis de représenter les individus et les variables finales sur le même graphique.

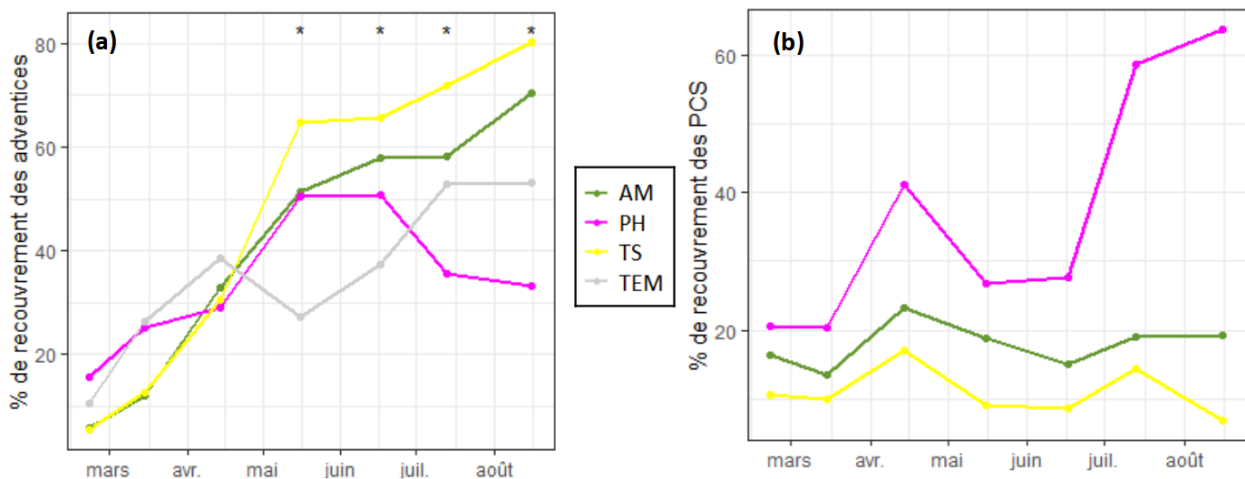
## 4 – RESULTATS

### 4.1. Performances de gestion des adventices

La part de recouvrement des adventices sur le rang a été analysée en parallèle du développement des PCS. En début d'année, la part d'adventices augmente de façon globale sur toutes les modalités avec la période de végétation printanière (voir Figure 2a). En Mars et Avril, leur développement est similaire sur toutes les modalités, et ce n'est qu'à partir de Mai que les moyennes sont significativement différentes. Pour les micro-parcelles Témoin, les variations du recouvrement des adventices correspondent aux deux passages d'outil en Avril et Juillet qui ont limité leur développement. Sur les modalités couvertes par le PH la part d'adventices diminue également, au moment où celui-ci connaît un pic de croissance en Juillet (voir Figure 2b). Celui-ci va jusqu'à atteindre 80 % de recouvrement dans certains quadras, ce qui reflète bien l'aspect global des micro-parcelles au nord et au sud (les données ne sont pas affichées).

Le TS et l'AM quant à eux stagnent tout le long de la saison, montrant entre 10 et 20 % de recouvrement en moyenne. Il faut noter que le développement de l'AM a en partie été freiné par des escargots qui ont consommé une grande partie des hampes florales sur la totalité des micro-parcelles concernées.

Il semble que les trois PCS ont été concurrencées par les adventices au printemps, car leur développement a été nettement freiné entre Avril et Mai. Seul le PH a pu à nouveau prendre le dessus, probablement au moment où les adventices ont commencé à souffrir du stress hydrique en bord de rang (à distance du goutte-à-goutte).



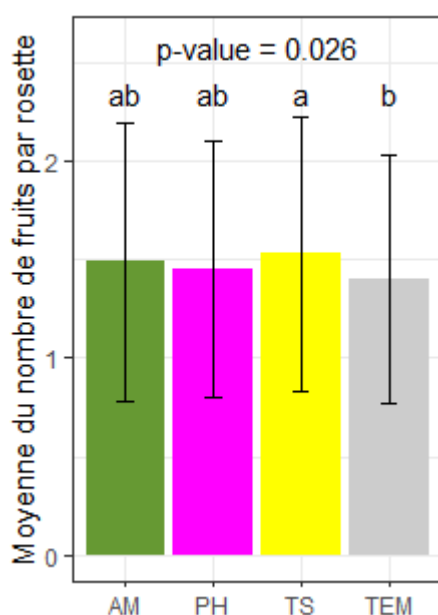
**Figure 2 | Evolution de la part de recouvrement des adventices (a) et des PCS (b).** Les étoiles indiquent une ou plusieurs différences significatives entre les modalités pour la date située en abscisses (voir Tableau 3 pour les p-values et groupes).

		AM	PH	TS	TEM	P-value
2022-02-21	Moyennes	5,88	15,63	5,50	10,60	0,248
	Écart-types	2,75	18,41	3,07	9,44	
2022-03-15	Moyennes	12,00	25,25	12,75	26,25	0,134
	Écart-types	6,41	23,31	6,67	20,66	
2022-04-14	Moyennes	32,81	29,06	30,38	38,44	0,137
	Écart-types	18,97	17,82	15,82	12,34	
2022-05-16	Moyennes	51,38	50,31	64,69	27,25	6,05E-05
	Écart-types	21,10	19,77	17,94	15,09	
	Groupes	ab	b	a	c	
2022-06-17	Moyennes	57,75	50,75	65,56	37,50	5,51E-03
	Écart-types	20,48	21,93	19,85	21,24	
	Groupes	ab	bc	a	c	
2022-07-13	Moyennes	58,13	35,63	71,88	52,81	5,50E-03
	Écart-types	33,36	23,23	28,63	24,90	
	Groupes	ab	c	a	bc	
2022-08-16	Moyennes	70,38	33,13	80,13	53,13	9,90E-06
	Écart-types	27,12	24,96	14,83	21,44	
	Groupes	a	c	a	b	
2022	Moyennes	46,56	36,55	53,63	37,37	1,45E-04
	Écart-types	30,06	23,69	31,09	22,71	
	Groupes	ab	c	a	bc	

**Tableau 3 | Analyse statistique de la part de recouvrement des adventices selon les modalités testées.** La ligne « 2022 » correspond aux moyennes calculées sur la saison (issues des 7 mesures réalisées de Février à Août). Les p-values sont issues de tests de KW. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.

		AM	PH	TS	TEM	P-value
Circonférence (en cm)	Moyennes	25,37	26,44	26,23	25,55	0,404
	Écart-types	2,28	2,31	3,05	2,40	

**Tableau 4 | Analyse statistique de la circonférence des troncs.** La p-value correspond à une Anova réalisée avec la fonction aov() de la librairie « agricolae ».



**Figure 3 | Analyse statistique du taux de nouaison.** La p-value correspond à un test de KW. Les barres d'erreur représentent les écart-types. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.

## 4.2. Croissance et productivité des arbres

La mesure de la croissance des arbres par la circonférence du tronc ne montre pas d'effet des modalités de gestion du rang car les moyennes ne sont pas significativement différentes (voir Tableau 4).

Le taux de nouaison est exprimé en nombre de fruits par rosette sur la figure 3. Les rosettes de la modalité TS serpolet ont présenté en moyenne plus de fruits que celles des arbres Témoin. Cette différence est significative, elle semble représenter un faible écart de moyenne en termes de nombre de fruits par rosette : 1,53 contre 1,4 fruits en moyenne pour le Témoin, soit 10 % de moins. A l'échelle d'un arbre ou d'une parcelle, cet écart peut néanmoins entraîner des différences de rendement non négligeables.

Concernant la productivité des arbres, le nombre fruits par arbre est significativement plus élevé pour la modalité Témoin (voir Tableau 5). La tendance est inverse pour le calibre, ce dernier ayant une part beaucoup plus importante de fruits de diamètre entre 60 et 65 mm (voir Figure 4). Les trois modalités PCS montrent des distributions similaires entre elles pour la charge en fruits et leurs calibres.

L'estimation du rendement montre un écart significatif des moyennes, d'environ 2 kg par arbre entre la modalité avec travail du rang et les modalités TS et PH. Cela représente une baisse de rendement de 5,5 t/ha pour le TS, et 6,1 t/ha pour le PH. L'AM se démarque des autres PCS avec cet indicateur de rendement puisque sa moyenne est équivalente à celle du rendement Témoin. En effet, le calibre des fruits AM est en moyenne supérieur au Témoin, ce qui semble compenser un nombre de fruits légèrement inférieur (différence de charge avec le Témoin de 14 %, alors que le TH et le PH présentaient de plus gros écarts de 23 et 27 % respectivement avec le Témoin).

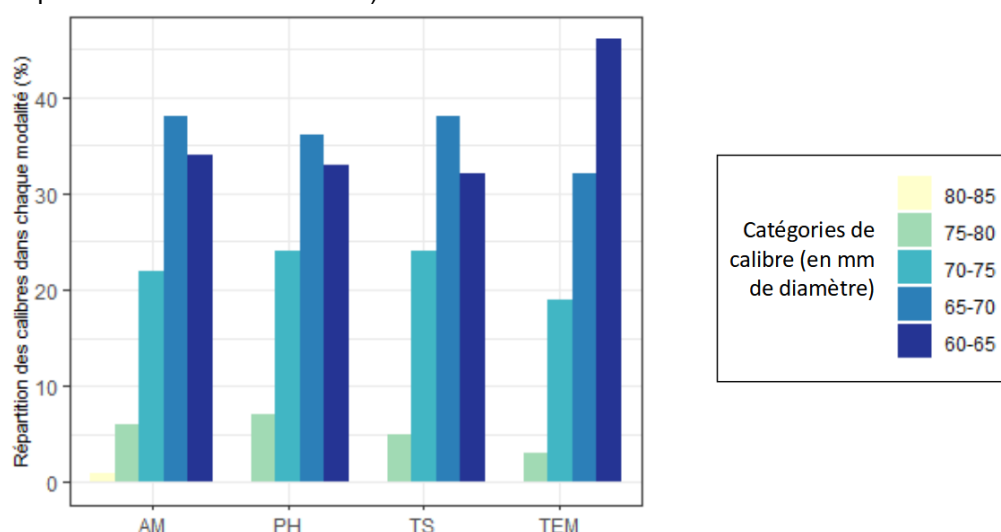
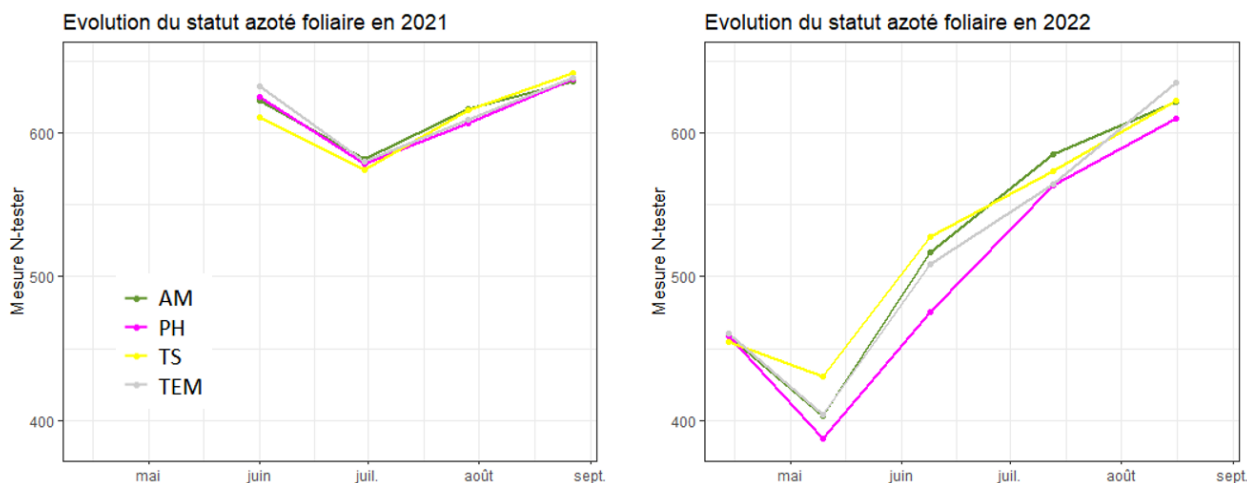


Figure 4 | Distribution des différentes catégories de calibres selon les modalités étudiées.

		AM	PH	TS	TEM	P-value
<b>Charge (nombre de fruits/arbre)</b>	Moyennes	82,58	69,63	73,50	95,71	1,11E-02
	Écart-types	35,19	24,68	27,51	27,22	
	Groupes	b	b	b	a	
<b>Calibre (mm de diamètre)</b>	Moyennes	67,53	67,79	67,48	66,40	5,86E-06
	Écart-types	4,57	4,68	4,36	4,23	
	Groupes	a	a	a	b	
<b>Rendement (kg/arbre)</b>	Moyennes	10,43	9,00	9,25	11,67	1,50E-02
	Écart-types	3,84	2,70	3,36	2,63	
	Groupes	ab	b	b	a	

Tableau 5 | Analyses statistiques des trois indicateurs de productivité de la culture. Les p-values correspondent à des tests de KW. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.



**Figure 5 | Evolution du statut azoté foliaire en (a) 2021 et (b) 2022.** L'indicateur de teneur azotée proposé par l'outil N-tester est sans unité.

### 4.3. Effets du mode gestion du sol sur l'agroécosystème

#### Nutrition de la culture et fertilité du sol

Les mesures sur feuilles grâce au N-Tester montrent que la nutrition azotée des arbres a tendance à se différencier entre les modalités en 2022, ce qui n'était pas le cas en 2021. Le PH a des résultats légèrement inférieurs aux autres PCS et au travail du sol (voir Figure 8b). Les tests statistiques ne montrent cependant pas de différence significative entre les modalités pour les deux années.

Les analyses foliaires réalisées en Juillet (voir Tableau 6) nous indiquent que les modalités ont peu d'effet sur la nutrition des pommiers, si ce n'est pour le manganèse et le cuivre : tous deux ont des teneurs plus élevées pour les modalités TS et PH par rapport au Témoin.

Les reliquats azotés ( $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ) qui ont été dosés lors de trois prélèvements ont été regroupés dans une seule moyenne (voir Tableau 6). La teneur totale en azote est légèrement supérieure dans la modalité Témoin, et c'est le PH qui en présente le moins. Ces différences ne sont cependant pas significatives.

Les résultats de l'analyse microbiologique des échantillons sont aussi présentés dans le tableau 7. La concentration en bactéries *Pseudomonas* semble largement supérieure dans la modalité TS mais montre une grande variabilité (écart-type élevé). Pour les bactéries solubilisatrices de phosphore, c'est le Témoin qui montre les grandes concentrations en moyenne, mais également avec une forte variabilité qui fait que la p-value est proche du seuil de risque mais indique que les différences entre modalités ne sont malgré tout pas significatives. Il n'y a que pour l'indicateur « Activité déshydrogénase » que l'effet des modalités est plus net : PH et TS ont tous deux des niveaux d'activité supérieurs au Témoin.

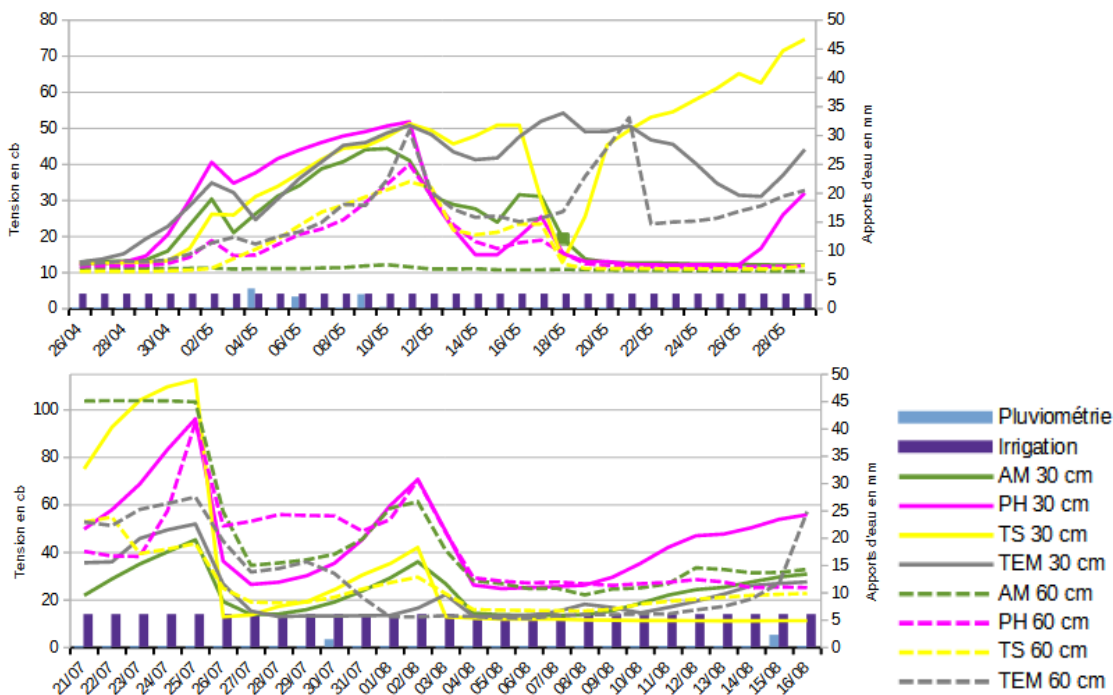
unité	x	donnée	AM	PH	TS	TEM	P-value
mg / g MS	N	$\bar{x}$	22,1	22,2	22,0	22,2	0,991
		$\sigma$	1,5	1,1	1,6	0,5	
	P	$\bar{x}$	2,0	2,2	2,0	2,1	0,981
		$\sigma$	0,2	0,5	0,5	0,3	
	K	$\bar{x}$	14,3	14,4	14,0	13,2	0,787
$\sigma$		2,2	1,8	2,4	1,3		
Ca	$\bar{x}$	17,5	17,4	18,1	18,0	0,708	
	$\sigma$	0,9	1,1	1,5	0,8		
Mg	$\bar{x}$	3,4	3,5	3,5	3,6	0,649	
	$\sigma$	0,2	0,3	0,3	0,2		
mg / Kg MS	Fe	$\bar{x}$	59,5	59,8	64,3	61,5	0,268
		$\sigma$	4,7	3,3	4,3	3,1	
	Mn	$\bar{x}$	54,5	57,8	63,8	46,8	0,046
		$\sigma$	5,8	5,4	13,0	4,9	
	Zn	$\bar{x}$	11,5	12,0	13,8	11,8	0,341
$\sigma$		0,6	0,8	3,5	0,5		
Cu	$\bar{x}$	72,5	84,8	87,5	67,3	0,050	
	$\sigma$	8,3	8,4	16,4	8,1		
B	$\bar{x}$	24,5	26,5	26,5	25,3	0,424	
	$\sigma$	1,7	3,1	3,0	0,5		

**Tableau 6 | Statistiques des analyses chimiques de feuilles de pommiers.** x est la moyenne,  $\sigma$  est l'écart-type. Les p-values correspondent à des tests de KW. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.

indicateur	donnée	AM	PH	TS	TEM	P-value
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (kg / ha)	$\bar{x}$	20,78	16,44	18,00	25,67	0,099
	$\sigma$	9,69	8,29	7,23	6,82	
Pseudomonas (CFUx10 <sup>5</sup> / g MS)	$\bar{x}$	2,84	2,26	5,04	2,95	0,739
	$\sigma$	1,52	1,22	3,67	2,03	
Bactéries P-solubilisatrices (CFUx10 <sup>6</sup> / g MS)	$\bar{x}$	1,06	0,65	0,26	1,65	0,066
	$\sigma$	0,34	0,22	0,11	1,47	
Activité déshydrogénase ( $\mu$ mol TPF / g MS)	$\bar{x}$	0,36	0,44	0,38	0,29	0,039
	$\sigma$	0,04	0,07	0,06	0,04	
	Groupe	ab	a	a	b	

**Tableau 7 | Analyse statistique des reliquats azotés du sol et des variables liées à la microbiologie.** x est la moyenne,  $\sigma$  est l'écart-type. Les p-values correspondent à des tests de KW. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.

Le statut hydrique des sols évalué par tensiométrie est représenté sur la figure 6 pour deux périodes distinctes pendant lesquelles le plus de sondes étaient opérationnelles. Globalement sur les deux périodes, les modalités montrent peu de différence de comportement entre elles. Le graphique de la période estivale indique des valeurs de tensiométrie légèrement plus élevées pour la modalité PH à 30 et 60 cm de profondeur.



**Figure 6 | Analyse du statut hydrique du sol par tensiométrie au printemps (a) et à l'été (b).** Les données du Témoin sont une moyenne représentative des 3 micro-parcelles où sont placées les sondes. Les données des PCS entre Avril et Mai (Figure 6(a)) sont celles du rang Nord 7 tandis que pour la période estival (Figure 6(b)), les courbes sont des moyennes des données des rangs 7 et 9.

## Bioagresseurs

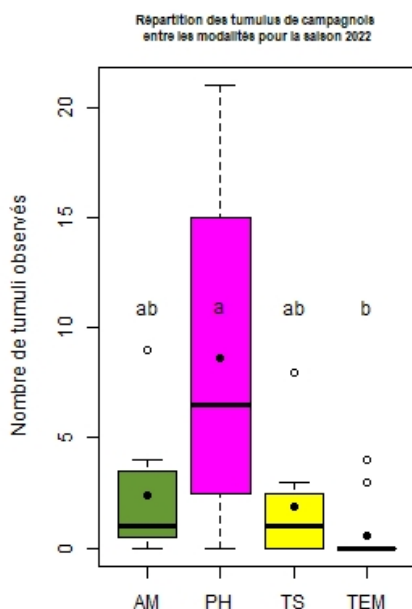
Le premier effet des modalités sur la biodiversité était net avec la mesure de l'activité des campagnols. Les couverts, et particulièrement le PH qui se démarque par une différence significative avec le Témoin, ont favorisé l'installation du ravageur (voir Figure 7). Huit tumuli étaient en moyenne comptabilisés par micro-parcelle contre 0,58 pour le Témoin.

Les autres bioagresseurs communs du pommier ont été très peu observés sur la parcelle de Mars à Septembre.

## Biodiversité

Les résultats de l'observation de la biodiversité sont assez différents selon les deux protocoles utilisés (voir Figure 9). Les bandes cartonnées placées pour piéger l'entomofaune des arbres montre que le nombre d'individus total capturé est très variable pour la modalité avec travail du sol (voir Figure 8). La variabilité de ces résultats est sûrement due au faible nombre d'arthropodes piégés globalement (63 individus sur 5 sessions).

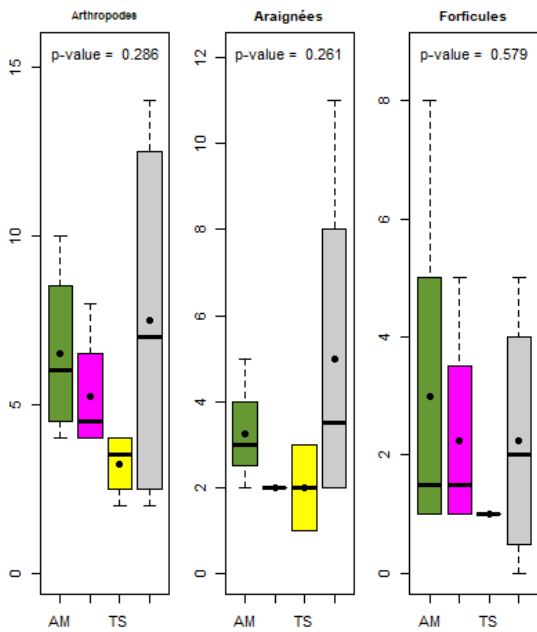
Bien que la moyenne de l'abondance soit ainsi légèrement supérieure, les différences entre modalités ne sont pas significatives. Les taxons d'araignées et forficules, qui étaient majoritairement présents dans les bandes ont été analysés séparément et ne montrent pas davantage d'effet notable du mode de gestion du rang. L'AM semble avoir des moyennes légèrement plus élevées que les autres PCS pour tous les groupes analysés mais les différences sont non significatives.



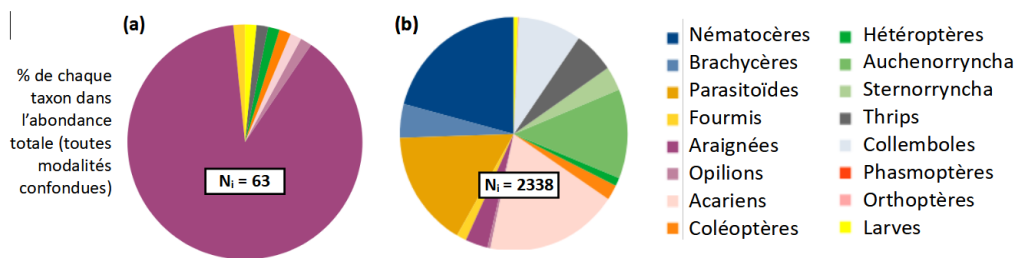
**Figure 7 | Boîte à moustache du nombre de tumuli de campagnols observés (cumul de deux notations en Mai et Juin).** La p-value correspond à un test de KW. Les



modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.



**Figure 8 | Boîtes à moustaches des résultats des bandes cartonnées cumulés sur 4 sessions. Les p-values correspondent à des tests de KW.**

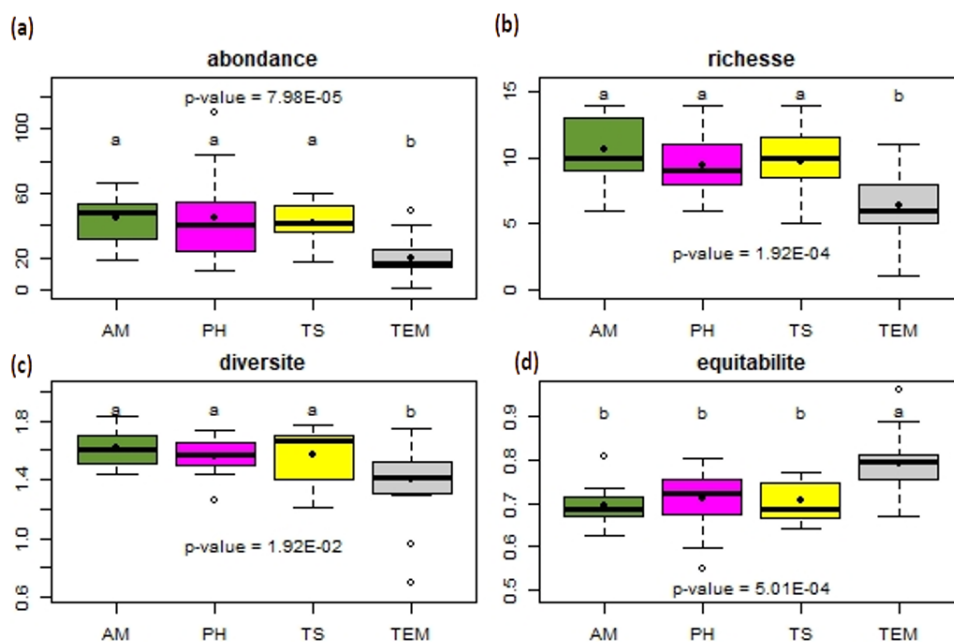


**Figure 9 | Comparaison des protocoles d'observation de la biodiversité : les bandes cartonnées (a) et les aspirations (b). N<sub>i</sub> = Nombre total d'individus piégés sur la saison.**

Les sessions d'inventaire au niveau de la strate herbacée ont permis de piéger davantage d'individus, et fournissent ainsi des données plus riches, avec près de 40 taxons identifiés. Les quatre indicateurs calculés montrent une différence notable entre les modalités PCS et le Témoin (voir Figure 10). Ce dernier présente des valeurs d'abondance, de richesse et diversité spécifiques inférieures aux modalités testées. L'équitabilité des échantillons Témoin est cependant meilleure pour le Témoin.

Sur l'ensemble de l'entomofaune piégée lors des aspirations, environ 20% sont des auxiliaires de culture. Parmi eux : des micro-hyménoptères parasitoïdes, des coléoptères et punaises prédatrices ainsi que des arachnides (8 groupes d'araignées et les opilions). L'effet des modalités de gestion du sol sur ces taxons spécifiques a également été analysé (voir Tableau 8). Le pool d'auxiliaires est plus important et varié en termes d'espèces pour les trois PCS. Il y a notamment les parasitoïdes qui sont plus nombreux dans ces modalités par rapport au Témoin. Dans ce groupe, 7 taxons ont pu être identifiés. Pour les arachnides, l'abondance n'est pas significativement différente entre les modalités (voir Figure 11), mais elles ont un léger effet sur la richesse spécifique et la diversité, supérieure pour AM et PH par rapport au Témoin.

Les quelques autres auxiliaires prédateurs comme des coccinelles, des staphylins, ou encore des hétéroptères (anthocoridae, nabidae) étaient présents dans les filets, mais en nombre trop peu important pour faire l'objet d'une analyse statistique.



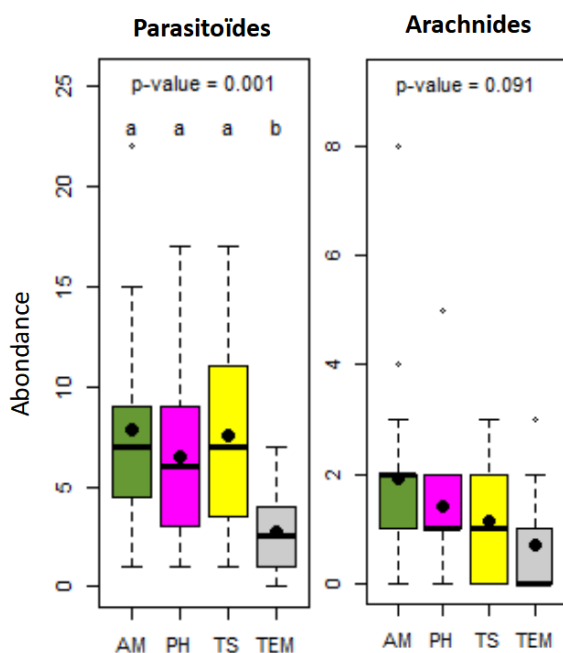
**Figure 10 | Boîtes à moustaches sur les indicateurs de la communauté d'arthropodes de la strate herbacée.** Les p-values correspondent à des tests de KW. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.

	$\bar{x}$	AM	PH	TS	TEM	P-value
<b>Arthropodes</b>	Ab	44,2 a	44,9 a	41,0 a	19,5 b	7,99E-05
	Ric	10,7 a	9,4 a	9,7 a	6,3 b	1,92E-04
	Div	1,6 a	1,6 a	1,6 a	1,4 b	0,019
	Equi	0,7 b	0,7 b	0,7 b	0,8 a	0,001
<b>Auxiliaires</b>	Ab	9,7 a	7,9 a	8,9 a	3,5 b	0,001
	Ric	3,3 a	3,1 a	3 a	2 b	0,047
	Div	1,1 a	1,1 a	1,1 a	0,9 b	0,327
<b>Parasitoïdes</b>	Ab	7,8 a	6,4 a	7,3 a	2,7 b	0,001
	Ric	2 a	1,7 a	1,7 a	1,4 b	0,173
	Div	0,9 a	0,8 a	0,9 a	0,8 b	0,581
<b>Arachnides</b>	Ab	1,9 a	1,4 a	1,1 ab	0,7 b	0,091
	Ric	1,4 a	1,3 a	0,9 ab	0,6 b	0,041
	Div	0,7 a	0,7 a	0,5 ab	0,3 b	0,027

ont des distributions significativement différentes.

**Tableau 8 | Analyses statistiques des indicateurs écologiques pour différents groupes.** Ab = abondance ; Ric = richesse ; Div = diversité ; Equi =

équité. La moyenne  $\bar{x}$  de chaque variable est indiquée avec les groupes si la p-value du KW est inférieure à 0,05. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.



**Figure 11 | Boîtes à moustaches de l'abondance de deux groupes d'auxiliaires.** Les p-values correspondent à des tests de KW. Les modalités n'ayant pas de lettre en commun ont des distributions significativement différentes.

#### 4.4. Analyse multivariée des indicateurs

Tout d'abord, ont été incluses dans l'analyse les variables les moins redondantes (par exemple le rendement qui résume les indicateurs « calibre » et « charge ») et les plus intéressantes dans chaque « thématique » étudiée (concernant la biodiversité, les inventaires par bandes cartonnées ne montraient pas de différence significative, ce sont donc uniquement les résultats des aspirations qui ont été utilisés).

Après sélection des variables les plus importantes et qui contribuaient le plus aux premières dimensions de l'ACP, le résultat final de l'analyse est présenté à la figure 12. Les dimensions 1 et 2 expliquent 71,5 % de la variabilité totale des données, ce qui est un seuil correct nous permettant d'observer les individus et variables sur le plan composé de ces deux axes.

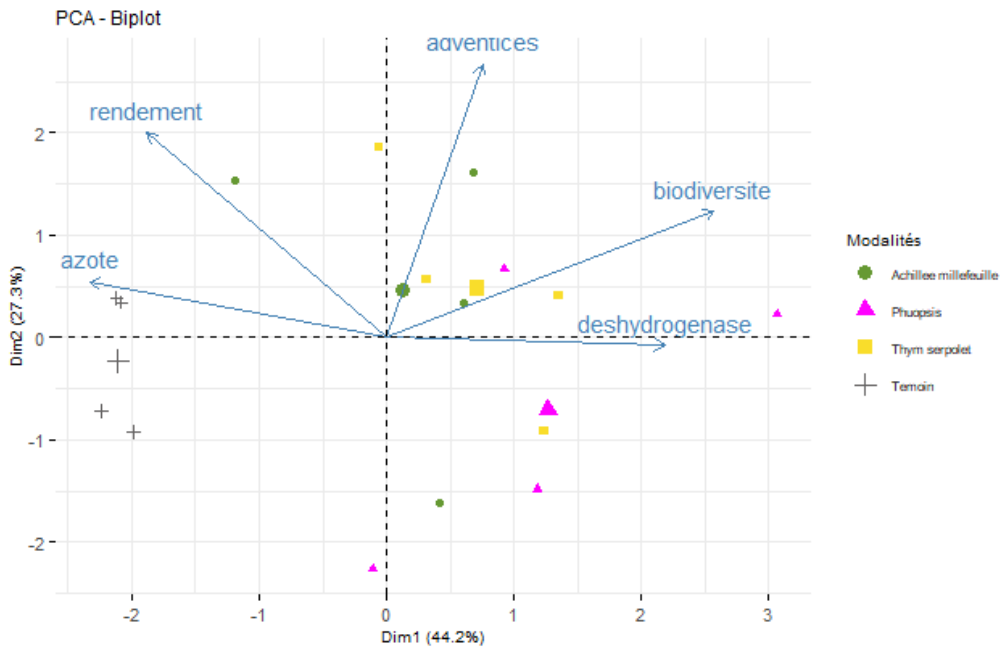
Cinq indicateurs ont donc été utilisés pour construire l'ACP finale :

- « adventices » : la part de recouvrement en adventices (moyennée sur 2022);
- « rendement » : le rendement en kg/arbre ;
- « azote » : la teneur en azote du sol (moyennée sur les trois prélèvements);
- « déshydrogénase » : le niveau d'activité déshydrogénase du sol ;
- « biodiversité » : l'abondance de l'entomofaune de la strate herbacée (moyennée sur les 4 sessions d'inventaire).

Le graphique de la figure 12 met en évidence la répartition des modalités sur les deux axes principaux de l'ACP. Les micro-parcelles « Témoin » sont celles qui sont le plus regroupées entre elles, et séparées des autres modalités. La dimension 1 est expliquée en grande partie par l'indicateur « biodiversité », puis

« azote » et « déshydrogénase » qui sont tous deux anti-corrélés. Les individus Témoin ont donc de fortes concentrations en azote et des résultats plus faibles concernant l'abondance de la biodiversité faunistique et l'activité déshydrogénase du sol. La dimension 2 est plutôt définie par le recouvrement des adventices, et dans un second temps par le rendement qui contribue également à la dimension 1.

Les micro-parcelles des modalités PCS sont assez dispersées selon cet axe 2 et ne mettent pas en évidence de réelles tendances par espèce de PCS. De façon globale, elles sont plutôt expliquées par les variables biodiversité et déshydrogénase.



**Figure 12 | Représentation des variables et individus dans les deux premières dimensions de l'ACP.** Résultat de la fonction `fviz_pca_biplot()`. Les points des micro-parcelles sont classés par modalités (quatre par modalité donc un cinquième point de plus grande taille qui représente une moyenne des 4 individus). La longueur des flèches bleues indique la qualité de représentation des variables par l'ACP et leur position par rapport aux axes témoigne de la corrélation de la variable aux dimensions principales. Ainsi, la variable « azote » est fortement corrélée à la dimension 2 par exemple.

## 5 – DISCUSSION

### 5.1. Discussion des résultats

#### Performances de gestion des adventices

Le développement des plantes couvre-sols en 2021 a été assez inégal entre les espèces testées, et malgré de nouvelles plantations, les écarts ont continué de se creuser en 2022. Il est possible de formuler plusieurs hypothèses concernant le manque de reprise de l'AM et du TS au printemps :

- Les conditions de culture sur le rang semblent être peu favorables à la croissance du TS. Dans les essais précédents du Grab, il avait été implanté soit au pied de jeunes arbres, soit dans des vergers de 4 ou 5 ans mais qui étaient plus espacés. Ils bénéficiaient ainsi de davantage de lumière et avaient pu atteindre 60 % de recouvrement en fin d'été (Ondet, 2019). Sur la parcelle d'essai BioHortiTech, l'atmosphère humide due au goutte-à-goutte et l'ombre des arbres a pu être délétère pour cette espèce qui apprécie les terrains secs (Coste cité par Tela Botanica, 2011).
- La croissance de l'AM a été largement freinée par les escargots.
- Les adventices dont certaines pérennes qui se développent depuis un an (notamment des liserons) concurrencent fortement l'AM et le TS.

Ajoutons que l'importance notable des adventices dans les modalités AM et TS sera à prendre en compte dans toute la discussion des résultats car l'effet des deux PCS est largement dilué.

En plus du manque de reprise, il faut noter que les trois espèces testées n'ont pas les mêmes capacités biologiques de reproduction. Le TS est le seul à se multiplier uniquement par reproduction sexuée, alors que l'AM et le PH peuvent drageonner. Cela pourrait donc expliquer le fait qu'il ait pu s'implanter sur près de 60 % de la surface du rang en seulement un an. En moyenne sur l'année, il a permis de limiter le développement d'adventices autant que le travail du rang. D'après la bibliographie, certaines PCS et conditions de culture peuvent contrôler encore davantage leur développement (entre 1 et 10 % de recouvrement des adventices avec Trèfle blanc dans l'essai de Granatstein and Mullinix, 2008), mais les performances du PH représentent déjà bien ce que l'on attend des PCS après une première année d'installation. C'est d'ailleurs la même évolution d'implantation qui avait été observée dans de précédents essais du Grab où elle atteignait jusqu'à 90% de recouvrement (Ondet, 2019). On perçoit donc une certaine adaptabilité du PH, ou du moins une stabilité de ses performances de recouvrement contrairement aux autres PCS dont les performances varient davantage en fonction des conditions de culture.

#### Croissance et productivité des arbres

La croissance des arbres ne semble pas être influencée par les PCS ou le travail du rang. Les différentes études citées dans la première partie montraient des réponses très variables de la culture selon l'âge des arbres et le type de couvert. Sachant que les arbres de la parcelle ont 25 ans, on peut imaginer que la proportion d'accroissement du diamètre des troncs est faible.

La productivité des arbres est par contre influencée à plusieurs niveaux. L'observation du taux de nouaison montre une légère supériorité pour la modalité TS. En analysant les résultats plus en détail, on peut noter que la modalité TS comprend davantage d'arbres ayant eu un faible nombre de rosettes (données non affichées). On peut donc supposer que les arbres ont compensé ce déficit en produisant plus de fleurs par rosette, ce qui a pu se répercuter sur le taux de nouaison. Ce dernier dépend aussi de la qualité de la pollinisation des arbres, qui aurait pu être influencée par la floraison des PCS pouvant attirer davantage d'insectes pollinisateurs dans le verger. Ce critère n'a pas fait l'objet d'une mesure, mais aucune différence visuelle nette n'a été observée entre la floraison des différentes PCS (en termes de quantité, de qualité et de temporalité). Il est donc difficile de conclure sur le facteur expliquant la différence de taux de nouaison. La mesure de cet indicateur en 2023 permettra sûrement de mieux comprendre ce phénomène. Pour ce qui est du calibre des fruits, il a été favorisé par les PCS et surtout le PH qui montre le calibre moyen le plus important. Ce résultat est d'autant plus intéressant que de très petits calibres ont été mesurés chez le Témoin. Sachant que des pommes de moins de 60 mm de diamètre sont moins facilement commercialisables et sont moins rentables, l'effet des PCS peut être un argument très intéressant s'il est vérifié sur le long terme. L'impact du mode de gestion des rangs sur le calibre est donc un résultat important. Le rendement total du Témoin est par contre supérieur à certaines PCS, avec notamment une différence de plus de 6 t/ha avec la modalité PH. Cette donnée est du même ordre de grandeur que ce qui a pu être observé dans d'autres essais avec des légumineuses ou des graminées (Hogue et al. 2010), mais sur de

jeunes arbres. Elle ne correspond donc pas aux conclusions du projet SolAB selon lesquelles les rendements avec rangs enherbés sont équivalents à ceux avec travail du sol sur arbres adultes (Garcin et al. 2012). Il nous faudra discuter chaque indicateur pour tenter de mieux comprendre les rendements observés.

## Effets du mode gestion du sol sur l'agroécosystème

### *Nutrition de la culture et fertilité du sol*

Les effets du mode de gestion du sol n'ont pas été si marqués sur la nutrition du pommier, ni sur la fertilité du sol. Les concentrations foliaires en azote mesurées par N-tester ou par analyse en laboratoire des feuilles ne montre pas de différence significative. Une légère concurrence azotée du PH peut néanmoins être suspectée au regard des moyennes pour ces deux indicateurs, mais devra être creusée pour la dernière année du projet. Des différences sur la teneur des feuilles en oligoéléments sont notables mais mettent surtout en lumière la carence en manganèse du Témoin par rapport à la référence de 50mg/kg donnée par le laboratoire Auréa qui a réalisé les mesures. La disponibilité du manganèse est souvent liée à un pH bas (Hoyt, cité par Neilsen and Neilsen, 2003). Cette influence des PCS sur le manganèse a également été observée dans un essai (Hogue et al. 2010) avec le Trèfle blanc. Les auteurs attribuent l'augmentation de la teneur foliaire du Mn à des changements de dynamiques de minéralisation de l'azote qui auraient modifié le pH du sol et rendu cet oligoélément plus disponible. La nutrition en manganèse chez le pommier est surtout liée à la qualité du feuillage (Larrieu, 2019).

Concernant les analyses de sol, les reliquats azotés viennent confirmer l'effet légèrement plus délétère du PH par rapport aux autres modalités, sans pour autant que la différence soit significative. Toutes les PCS ont par contre amélioré l'activité déshydrogénase du sol par rapport aux pratiques habituelles, et confirment donc l'intérêt des couverts pour assurer un meilleur fonctionnement biologique sol, les réactions de déshydrogénation et donc d'oxydo-réduction étant à la base de la décomposition de la matière organique.

Pour le statut hydrique du sol, les valeurs de tensiométrie mesurées sont variables selon le rang et la période prise en compte. L'irrigation par goutte-à-goutte était quantitativement très importante pour éviter tout stress hydrique des pommiers, ce qui ne permet pas de distinguer clairement les effets des modalités. Les travaux présentés en première partie montraient une certaine variabilité de l'impact des PCS sur la nutrition hydrique en fonction des espèces et des conditions de culture. Le PH ayant entraîné ici des tensions légèrement supérieures en Juillet, l'interaction entre le couvert et la culture serait plutôt concurrentielle. Si l'on met en parallèle l'évolution de la phénologie du couvert, celui-ci s'est nettement plus développé à partir de juin, à une période où les températures et la sécheresse estivales ont commencé à diminuer les réserves en eau du sol (hors des bulbes d'humidité formés par le goutte-à-goutte). Il paraît donc cohérent que celui-ci ait exercé une légère concurrence hydrique sur les pommiers, surtout à 30 cm de profondeur d'après les mesures des sondes.

### *Bioagresseurs*

Les campagnols ont été favorisés comme il était prévisible par la présence des couverts, en particulier le tapis dense formé par le PH. C'est donc le dysservice le plus nettement imputable à cette PCS sur l'ensemble de l'essai. Comme nous l'avons vu dans la première partie, c'est une conséquence du non-travail du sol de la présence du couvert qui est courante et ce résultat montre que le PH n'a apparemment pas d'effet allélopathique ou répulsif sur le campagnol, ou en tous cas pas plus que les deux autres PCS. Nous pouvons d'ailleurs supposer que l'installation des campagnols aurait pu être plus importante sur les deux autres PCS si un travail du rang n'avait pas été réalisé lors de la plantation de nouveaux plants à l'automne 2021. Les variations de l'itinéraire cultural entre PCS constituent donc un biais dans l'étude, mais les diverses replantations paraissent nécessaires pour mener l'essai sur les trois années du projet.

Concernant l'absence d'autres bioagresseurs dans le verger, plusieurs explications peuvent être proposées. Tout d'abord, c'était une année particulièrement sèche avec une faible pluviométrie pendant la période de fructification des arbres, les conditions étaient donc peu propices au développement de maladies cryptogamiques. De plus, la parcelle est sous filets et a été traitée plusieurs fois, ce qui limite de fait la présence de ravageurs, maladies et de faune de façon générale. On voit donc ici les limites de l'essai en conditions réelles de production, où il pourrait être difficile de mesurer un effet du mode de gestion du rang sur la régulation des bioagresseurs puisqu'ils sont contrôlés par les interventions agricoles.

### *Biodiversité*

L'entomofaune piégée dans les bandes cartonnées a donné des résultats assez faibles en termes d'abondance par rapport à ce qui était attendu. Le manque de données ne permet donc pas d'établir de



différence significative entre modalités, bien que l'AM soit la PCS ayant les moyennes les plus élevées dans les groupes analysés. Sur l'ensemble des résultats, beaucoup de bandes cartonnées étaient vides ce qui fait chuter la moyenne à 1,13 individus par bande cartonnée (toutes dates et modalités confondues). Il est difficile de comparer cette donnée à d'autres études ayant utilisé ce dispositif (Horton et al. 2002 ; Salman et al. 2020) à cause de la variabilité de la taille de la bande cartonnée, du positionnement sur l'arbre (plus ou moins proche du sol) et de la fréquence d'échantillonnage. La faune qui était observée dans la strate arborée de la parcelle paraissait de façon générale bien moins riche et abondante que celle de la strate herbacée, ce qui est normal mais peut aussi mettre en évidence le manque de continuité verticale dans l'écosystème du verger (Simon et al. 2010). Les PCS peuvent être un atout en ce sens, quand ce sont des espèces arbustives qui viennent compléter cette continuité écologique. Mais les 3 espèces testées dans cet essai sont herbacées et sont restées assez basses tout le long de la saison, mise à part lors de la floraison de l'AM. Les tiges florales pouvaient atteindre 50 cm de hauteur et être en contact avec les branches de pommier les plus basses, ce qui expliquerait que davantage d'arthropodes aient pu atteindre les arbres et que la moyenne des abondances pour l'AM soit légèrement supérieure. Le TS et PH ont atteint au maximum 10 et 30 cm respectivement lors de leur floraison.

Concernant l'entomofaune de la strate herbacée, l'effet positif des trois PCS est net. Les indicateurs écologiques sont supérieurs dans ces modalités pour tous les groupes considérés, sauf l'équitabilité pour lequel le Témoin montre de meilleurs résultats. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que le Témoin montrait en général une diversité taxonomique modérée et que chaque taxon était bien représenté (majoritairement des nématocères, acariens, cicadelles, etc), tandis que les PCS avaient une diversité taxonomique plus importante, dont certains qui étaient représentés par quelques individus plus rares notamment certaines familles de parasitoïdes et d'araignées plus « rares », ce qui fait chuter l'indice d'équitabilité.

Pour ce qui est de l'abondance globale en arthropodes, l'effet positif des PCS était attendu car il est systématiquement observé dans les essais qui s'intéressent à ce type de service écosystémique (Porcel et al. 2017 ; Jacquot et al. 2019 ; Las Casas et al. 2022). Il est aussi mis en évidence par les résultats encore plus significatifs de la dernière session d'inventaire (du 21/07) réalisée juste après le désherbage du rang témoin. On peut imaginer que si le rang Témoin avait été mieux entretenu, comme dans la plupart des vergers professionnels (car sur l'essai, la présence des sondes tensiométriques sur le rang a entraîné la diminution de la fréquence de désherbage du rang), les bénéfices des PCS sur la biodiversité seraient encore plus marqués. L'analyse des auxiliaires qui a été réalisée va plus loin et donne des informations très intéressantes sur les potentialités de ces plantes en termes de régulation des ravageurs. Les différences observées avec le Témoin sont en effet très marquées et témoignent du bénéfice important des trois espèces testées. Il y a une petite différence entre TS et les deux autres PCS au niveau des populations d'arachnides piégées, les indicateurs n'étant pas différents du Témoin alors qu'ils sont meilleurs pour AM et PH. Cette différence peut être due au niveau de développement global du couvert puisque le TS est la PCS qui a le moins recouvert le rang. Dans tous les cas, la part d'influence des adventices est là aussi mélangée avec celles des PCS pour TS et AM ce qui limite les possibilités d'interprétation. Les résultats confirment globalement l'intérêt des PCS concernant la biodiversité fonctionnelles des vergers.

## **Analyse multivariée des indicateurs**

L'ACP résume quelques tendances observées dans la discussion ci-dessus :

- Les micro-parcelles Témoin montrent des similitudes concernant les 5 indicateurs étudiés, et sont notamment caractérisées par des concentrations plus élevées du sol en azote mais une activité déshydrogénase plus faible, ainsi qu'une abondance moindre de l'entomofaune au niveau de la strate herbacée. Le rendement contribuant également en partie à la dimension 1, on retrouve aussi le fait que les micro-parcelles Témoin ont été en moyenne plus productives.
- Les micro-parcelles des modalités PCS ne montrent pas de réelle tendance permettant de distinguer les 3 espèces testées, mais vont globalement avoir des caractéristiques inverses de celles du Témoin. On peut espérer que l'importante hétérogénéité des résultats se réduira après deux années d'installation et que l'influence de chaque espèce sera plus marquée.

C'est donc le fonctionnement biologique du sol et la biodiversité qui semblent avoir été améliorés par les modes de gestion avec enherbement permanent du rang. Concernant les dysservices et notamment la concurrence azotée, l'ACP confirme que les données mesurées sur l'azote influencent en partie les comportements des individus (contribution importante au premier axe).



## Réflexions sur la perte de rendement

L'analyse multivariée confirme un lien potentiel entre la nutrition azotée et la distribution du rendement en fonction des micro-parcelles. La concurrence du couvert en azote et en eau est donc l'explication la plus probable pour expliquer les rendements plus faibles du PH. D'autant plus que le pic de croissance du PH a lieu au moment où les besoins du pommier augmentent.

Cet impact négatif des PCS est assez inattendu car tous les travaux énoncés dans la première partie mettaient en évidence ces effets de concurrence sur de jeunes arbres, alors que ceux de l'essai sont des arbres adultes. On peut supposer que les pommiers commencent au contraire à être en fin de vie puisqu'ils ont 25 ans et que les pommiers se renouvellent généralement après de 20 ou 25 années de production (CA Tarn-et-Garonne, 2018). En effet, certains signes de faiblesse et de carences ont pu être observés sur d'autres rangs de la parcelle. Cela pourrait expliquer leur vulnérabilité face au changement du mode de gestion des rangs. Les travaux cités ayant testé les PCS sur des arbres adultes de 4 ans et 8 ans ne montraient pas de réduction de croissance ou de productivité (Granatstein and Mullinix, 2008 ; Granatstein, 2010). Les porte-greffes étaient à chaque fois du M26, connu pour être de même classe de vigueur que le Pajam 1 (Masseron, 1989). La différence de réponse des arbres pourrait donc bien venir de leur âge et des faiblesses accumulées tout au long de leur vie, même si l'état sanitaire général de la parcelle reste correct.

Malgré ce biais de l'essai, la dynamique de croissance estivale du PH et les dysservices observés indiquent qu'elle n'est peut-être pas une espèce couvre-sols idéale pour les objectifs agronomiques recherchés.

## Synthèse des résultats

Afin d'avoir une vue d'ensemble des comportements de chaque modalité, le tableau 12 présente une synthèse selon chaque thématique étudiée. L'élément essentiel à prendre en compte pour conclure sur les résultats, c'est que le PH est la seule PCS à s'être « correctement » développée sur le rang et à avoir rempli le premier objectif des PCS qui est le contrôle des adventices. C'est donc la seule modalité qui peut être considérée et analysée comme véritable PCS. La synthèse graphique (Tableau 12) montre que la modalité Témoin et la modalité PH ont eu autant d'effets positifs sur l'ensemble des indicateurs mesurés. L'objectif de l'essai était d'évaluer les avantages agronomiques et écologiques des PCS, on peut donc conclure qu'elles apportent des bénéfices écologiques certains, mais que les performances agronomiques de la culture avec PCS ne serait peut-être pas viable économiquement dans les conditions de l'essai.

Thématique	AM	PH	TS	TEM	Test
Gestion des adventices	+	++++	+	++++	oui
Calibre des fruits	+++	++++	+++	+	oui
Rendement	+++	++	++	++++	oui
Nutrition azotée	++++	+++	++++	++++	non
Nutrition globale	++++	++++	++++	+++	oui
Activité du sol (décomposition MQ)	+++	++++	++++	+	oui
Hydropédologie	++++	+++	++++	++++	non
Contrôle des campagnols	++	+	+++	++++	oui
Biodiversité fonctionnelle	++++	++++	+++	+	oui

**Légende :**

Effet le moins positif    +    ++    +++    ++++    Effet le plus positif

4 catégories classant les effets des modalités entre elles

**Tableau 12 | Synthèse des effets des modalités testées sur les indicateurs les plus pertinents.**

Synthèse établie sur la base des moyennes des indicateurs les plus déterminants mesurés en 2022. Il a été choisi de représenter le calibre même si le rendement résume déjà en partie ces données, car c'est un critère important dans la production et la commercialisation. La moyenne la plus importante est classée comme ayant l'effet le plus fort, plus ou moins positif selon l'indicateur étudié et les objectifs de production.

*Exemple : le nombre de tumuli supérieur observé pour la modalité PH la classe dans « Effet le moins positif » pour la catégorie « Contrôle des campagnols ».*

## 6 – CONCLUSION

Un an après la mise en place de l'essai, *Phuopsis stylosa* est l'espèce qui montre les meilleures capacités de « couvre-sols » par rapport au *Thym serpolet* et l'*Achillée millefeuille*. La perte de rendement due au *Phuopsis* est cependant moins encourageante. Les trois facteurs en cause seraient les dégâts de campagnols sur les racines de pommiers, ainsi que la concurrence azotée et hydrique. Il est possible que la phénologie de cette espèce ne corresponde pas aux caractéristiques recherchées chez les plantes couvre-sols. Cela montre à quel point la sélection de plantes adaptées à ces multiples critères est un objectif majeur. Les résultats de la dernière année du projet seront déterminants pour éclaircir ces aspects.

Les trois plantes couvre-sols testées ont également agit comme « plantes de service » en améliorant des caractéristiques du sol et la biodiversité fonctionnelle aux abords des pommiers. Des services écosystémiques inattendus de la part des PCS ont pu être observés concernant le taux de nouaison (pour le *Thym serpolet*), le calibre des fruits, ainsi que la disponibilité dans le sol de certains oligoéléments, et mériteraient d'être davantage étudiés.

Enfin, l'essai a démontré que les plantes couvre-sols apportent des bénéfices écologiques au verger, mais que les performances agronomiques de la culture avec enherbement du rang ne seraient peut-être pas viables économiquement dans les conditions de l'essai.

---

## REMERCIEMENTS

Nous remercions Sébastien Gaillet et Jean-Philippe Poisot pour la mise à disposition d'un verger sur l'exploitation Apple & Co.

**Cette action a reçu le soutien financier de :**

ANR

