



HAL
open science

SEFerSol: Stratégies innovantes d'Entretien de la Fertilité du Sol en maraîchage biologique

Elie Langard, Christophe Barbot, Maryna Bogdanok, Guillaume Delaunay,
Clément Munier, Marie Nussbaumer, Najat Nassr

► To cite this version:

Elie Langard, Christophe Barbot, Maryna Bogdanok, Guillaume Delaunay, Clément Munier, et al..
SEFerSol: Stratégies innovantes d'Entretien de la Fertilité du Sol en maraîchage biologique. *Innovations Agronomiques*, 2024, 98, pp.125-140. 10.17180/ciag-2024-vol98-art09 . hal-04827630

HAL Id: hal-04827630

<https://hal.inrae.fr/hal-04827630v1>

Submitted on 9 Dec 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



SEFerSol : Stratégies innovantes d'Entretien de la Fertilité du Sol en maraîchage biologique

Elie LANGARD¹, Christophe BARBOT², Maryna BOGDANOK³, Guillaume DELAUNAY⁴, Clément MUNIER⁵, Marie NUSSBAUMER⁶, Najat NASSR⁷

¹EPLEFPA Les Sillons de Haute-Alsace, 8 Rue aux Remparts, 68250 Rouffach, France

²Chambre d'Agriculture d'Alsace, 2 Rue de Rome, 67300 Schiltigheim, France

³Bio en Grand-Est, 1 Avenue de l'Europe, 54520 Laxou, France

⁴l'Atelier Paysan, Zone artisanale Papeteries, -38140 Renage, France

⁵Chambre d'Agriculture du Grand-Est, Complexe agricole du Mont Bernard, Route de Suippes, 51000 Châlons-en-Champagne, France

⁶Planète Légumes Fleurs et Plantes, 11 Rue Jean Mermoz, 68127 Sainte-Croix-en-Plaine, France

⁷RITTMO Agroenvironnement, 37 Rue de Herrlisheim, 68000 Colmar, France

Correspondance : elie.langard@educagri.fr

Résumé

Le maraichage biologique diversifié repose sur un travail du sol répété, des apports de fertilisants organiques et une faible couverture du sol, entraînant baisse de fertilité, perte d'autonomie et dégradation de la qualité de l'eau. Sans herbicides, il implique de gérer autrement les adventices. SEFerSol compare deux systèmes de culture innovants (un système basé sur la systématisation des engrais verts, sans engrais organique ; un système en sol très peu travaillé et couvert en permanence) à un système de référence pour répondre à ces défis. Les résultats montrent une amélioration de l'autonomie et de la qualité de l'eau pour le premier système et une amélioration de la fertilité et de la gestion des adventices, mais une baisse de la qualité de l'eau et de l'autonomie pour le deuxième.

Mots-clés : Engrais verts, Conservation du sol, Adventices, Autonomie, Qualité de l'eau

Abstract : SEFerSol : Setting up Innovative Strategies to Enhance Soil Fertility in organic market gardening.

Organic market gardening relies on recurring soil preparation, the utilization of organic fertilizers, and minimal soil coverage, which can result in decreased fertility, reduced self-sufficiency, and compromised water quality. The absence of weed killers necessitates alternative weed control methods. SEFerSol is a comparative analysis of two innovative cultivation systems (one emphasizing the consistent use of green manure without organic fertilizers, while the other involves minimal soil disturbance and continuous ground cover), against a reference system. The findings indicate that the first system demonstrates improvements in self-sufficiency and water quality. Conversely, the second system displays enhanced fertility and weed management but suffers from lower water quality and a decrease in self-sufficiency.

Keywords : Green manure, soil conservation, weeds, self-sufficiency, water quality

1. Introduction

Au niveau de la filière légumes, l'indice de fréquence de traitement (IFT) hors biocontrôle moyen est très variable selon la culture étudiée. Par exemple, selon les chiffres de l'Agreste de 2018, l'IFT moyen de la carotte en France est de 7.1, tandis que pour la laitue, il est uniquement de 3.4. Cet IFT est déjà beaucoup



plus faible en bio : en moyenne générale, 0.6 IFT hors biocontrôle sur les systèmes plein champ sur 2017-2018-2019 (Synthèse DEPHY FERME, 2023).

La gestion des adventices en particulier est une problématique majeure au sein de la filière légumes. Si les herbicides présentent des IFT plus faibles que les fongicides et les insecticides, ils restent d'une part une problématique constante en plein champ, et d'autre part ils sont ceux qui sont les plus difficiles à diminuer selon la synthèse DEPHY FERME 2023 (18 % sur 10 ans, contre 44 % pour les fongicides et 57 % pour les insecticides), et dont il faut même s'affranchir pour obtenir la certification bio, là où des alternatives existent pour les insecticides et les fongicides.

Depuis plusieurs années, Guillaume Delaunay, chargé de mission maraîchage au lycée du Pflixbourg, à Wintzenheim, menait des essais sur les paillages et les engrais verts. En 2015, il décide d'intensifier ses efforts en intégrant les résultats de ses essais aux avancées récentes en matière de non-travail du sol, de fertilité, de gestion des adventices, ainsi qu'aux conseils avisés des experts locaux en maraîchage.

Le constat était le suivant : le maraîchage, en particulier le maraîchage diversifié, entraîne un usage intensif du sol, qui peut entraîner une baisse de fertilité importante (A.O.Aweto & G.M.Ogurie, 1992). Perte de fertilité qui doit être compensée par une surutilisation d'intrants, entraînant une perte d'autonomie et un risque potentiel pour la qualité de l'eau (M.Kopittke & al., 2019).

Ainsi, se pose la question suivante : est-il possible de concevoir un ou des systèmes de culture, permettant d'améliorer la fertilité du sol, de gérer les adventices, de limiter les intrants et de protéger la ressource en eau, tout en restant viable pour le maraîcher ?

C'est ainsi que le projet SEFerSol voit le jour, projet multipartenarial impliquant :

- L'EPLEFPA Les Sillons de Haute-Alsace
- La Chambre d'Agriculture d'Alsace
- La Chambre d'Agriculture du Grand-Est
- RITTMO Agroenvironnement
- Bio en Grand-Est, fédération des GAB pour la région Grand-Est
- Planète Légumes, association regroupant les conseillers en maraîchage pour la région Grand-Est
- L'Atelier Paysan, coopérative accompagnant les agriculteurs dans la conception et la fabrication de machines adaptées.

Le projet SEFerSol était centré sur 5 grands objectifs :

- Améliorer la fertilité du sol
- Améliorer la gestion des adventices
- Protéger la ressource en eau
- Augmenter l'indépendance en intrants (entendu ici comme l'ensemble des éléments n'étant pas produits sur la ferme, aussi bien les produits phytosanitaires que les engrais, le carburant ou encore les semences)
- Etre économiquement viable.

L'expérimentation se déroule exclusivement en maraîchage biologique, au sein de l'exploitation de l'EPLEFPA, « Les Jardins du Pflixbourg », sur un espace dédié.

Une particularité du projet est que la présence sur les parcelles du lycée entraîne une forte implication des apprenants et des enseignants. Cela apporte une main-d'œuvre précieuse, facilite la diffusion des connaissances, mais présente aussi certaines limites, notamment en ce qui concerne la rigueur de certains jeux de données ou le temps nécessaire pour les collecter ultérieurement. Par exemple, des mesures d'engrais verts n'ont pas pu être valorisées car certains élèves coupaient l'engrais verts trop



hauts, ou les déracinaient complètement. Cela dit, le bénéfice en termes d'appropriation des méthodes analytiques a pris le pas sur les limites ; le cas échéant, l'analyse était simplement refaite par l'équipe.

En 2018, le dispositif rejoint le réseau DEPHY EXPE.

2. Matériel et méthodes

Les caractéristiques du terrain où se déroulaient les expérimentations sont les suivantes :

Au niveau pédoclimatique, la pluviométrie moyenne est plutôt faible (600mm/an en moyenne selon Météo France), avec un ensoleillement important (1800 h/an). La présence d'un forage, relié à une sous-nappe de la nappe rhénane, assure de l'eau en quantité.

Le sol est sablo-limoneux (60 % Sable, 30 Limon, 10 Argile), avec une très forte teneur en cailloux issus d'anciennes moraines glacières.

L'expérimentation prend place sur une ancienne prairie permanente, retournée juste avant la mise en place.

Pour répondre aux objectifs du projet, deux systèmes innovants ont été mis en place.

- **Système Engrais Verts MAX**

Le premier, baptisé **Engrais Verts Max** (résumé dans la suite de l'article à **EVMAX**) est centré sur la maximisation de l'usage des engrais verts. L'idée est ici de pouvoir s'affranchir totalement de la fertilisation organique, a minima de la fertilisation azotée, et d'utiliser les engrais verts comme moyen de limiter les adventices par la concurrence, d'apporter de la matière organique au sol, de capter les nitrates et de limiter le travail du sol. Le risque envisagé au départ était le cycle de l'azote qui risquait, d'après les connaissances, d'être trop ralenti pour les besoins des plantes, en particulier les cycles courts comme la laitue (« Les engrais verts en maraîchage, le guide », 2007).

Aussi, deux règles fondamentales ont été établies sur ce système :

- Pas de fertilisation organique, si possible uniquement des apports par les engrais verts avec un apport de compost en complément en cas de besoin avéré.
- Un travail du sol limité à des outils tractés, sans outils animés par la prise de force, pour un travail du sol plus superficiel.

Par ailleurs, pour des raisons de praticités, le système est cultivé en planches permanentes.

Techniquement, des engrais verts sont présents dès que cela est possible en interculture, soit en engrais verts hivernaux, soit en engrais verts estivaux entre la culture de laitue et de chou (cf « Rotation et pratiques spécifiques »).

Les mélanges d'engrais verts ne sont pas exactement les mêmes chaque année, ils varient selon la disponibilité et les résultats observés lors des années précédentes. Si dans les premières années, c'était la diversité des engrais verts qui était recherchée, la décision s'est au fil du temps orientée vers la proximité géographique, avec dans l'idéal des engrais verts issus directement des départements alsaciens.

En outre, des engrais verts sont également présents en intercalaires, entre les rangs de culture, dès que cela est possible, à savoir entre les laitues, entre les choux, entre les pommes de terre et entre les poireaux. Ces engrais verts intercalaires sont majoritairement, ou uniquement selon les cas, des fabacées (trèfle, féverole ou vesce). Ils ont pour but de limiter un peu plus le salissement mais surtout d'apporter un surplus d'azote sans gêner la culture.

- **Système Conservation du sol**



Le deuxième système est appelé **Conservation du sol** (ci-après **CONSV**). Celui-ci a pour fondement le non-travail du sol ainsi que la couverture permanente de celui-ci, par le moyen de couverts végétaux vivants, de mulch ou de bâche plastique, selon les moments et les besoins. La fertilisation organique est possible, basée sur un bilan azoté prenant en compte les reliquats, la minéralisation et les apports.

L'objectif de ce système est de favoriser la fertilité du sol, en particulier en y laissant se développer la biologie, que ce soit les macros ou les micro-organismes, de limiter au maximum le développement des adventices et de favoriser la résistance des plantes contre les ravageurs et les maladies par le biais de la diversité fonctionnelle.

Le mulch (dans le cadre de l'expérimentation SEFerSol, le mulch est défini comme un mélange de « déchets organiques » mélangés, par exemple tonte, feuilles, broyat, ...) présent combine plusieurs fonctions : lutte contre les adventices, protection thermique du sol face à la chaleur d'été et lutte contre l'évaporation.

- **Référence**

Ces deux systèmes, **EVMAX** et **CONSV**, ont été comparés à un système maraîcher de **référence** (**REF** ci-après). Ce système maraîcher a été établi en se basant sur les pratiques les plus représentées au niveau alsacien. Ainsi, au commencement du projet, une enquête a été réalisée par Bio en Grand Est, partenaire du projet, auprès des maraîchers bio de la région.

Il en est ressorti un système en sol travaillé, avec utilisation d'outils rotatifs en cas de besoin, notamment lors de la culture de pomme de terre, une fertilisation adaptée aux besoins de la plante mais ne prenant pas en compte les stocks du sol, et une présence d'engrais verts en période hivernale lorsque cela est possible.

- **Rotation et pratiques spécifiques**

Sur ces trois systèmes, **REF**, **EVMAX** et **CONSV**, une même rotation culturale est suivie, une rotation longue, sur 5 ans : Pomme de terre, Laitue/Chou, Courges, Poireau, Carotte. Le but de cette rotation longue est de limiter l'impact des maladies et ravageurs en allongeant le temps entre deux retours de la même culture dans la rotation, de diversifier les familles de légumes et d'être représentatif des espèces les plus, ou parmi les plus, cultivées en Alsace.

Pour chaque système et pour chaque culture, des pratiques particulières ont été mises en place selon les besoins.

Ainsi, sur les pommes de terre, si elles ont été conduites classiquement sur le système **EVMAX**, au niveau du système **CONSV**, elles n'ont pas été butées. Elles ont simplement été placées à la surface du sol et recouvertes de paillage.

Au niveau des laitues et des choux, deux espèces de laitues, la batavia et la feuille de chêne, et 3 espèces de choux, choux fleurs, brocoli et romanesco, étaient cultivées (sur une même planche). Sur le système **EVMAX**, des engrais verts intercalaires ont été positionnés. Sur une planche de 1.5m de large, il y avait ainsi 3 lignes de légumes, entre lesquels venaient s'insérer des fabacées, trèfles ou féverole. Ceci afin à la fois de limiter la présence des adventices dans l'interligne mais surtout de venir fournir un apport d'appoint en termes d'azote pour la culture suivante, et de favoriser la biodiversité du sol à cet endroit.

Pour les courges, 3 variétés étaient cultivées sur chacun des systèmes : Butternut, Potimarron et Sucrine du Berry. Là où le système de référence était bâché classiquement à l'aide d'une bâche plastique déroulable, les deux systèmes innovants étaient bâchés à l'aide de toiles tissées percées. L'objectif était de limiter l'enherbement des passe-pieds, et de limiter également les résidus de plastique pouvant se retrouver dans le sol, en contrepartie d'un temps de mise en place plus important. En outre, sur le système de conservation du sol, la toile tissée est plus adaptée à la présence de mulch sous le paillage, car moins fragile par rapport à la bâche plastique déroulable qui peut facilement se trouer sous la pression des résidus (BRF ou autres ligneux).

Pour les poireaux, un peu à l'image des pommes de terre, un buttage classique a été effectué sur le système **EVMAX**, tandis que sur le système **CONSV**, aucun buttage n'a été effectué. En revanche, un ajout de paillage a été réalisé, afin d'atteindre une épaisseur d'une vingtaine de centimètre pour venir directement planter le poireau à l'intérieur. En complément, sur le système **EVMAX**, du trèfle a été implanté entre les lignes de poireaux afin, comme dans le cas des laitues et des courges, de couvrir le sol et d'apporter un bénéfice en termes d'azote.

Enfin pour ce qui est des carottes, le système **EVMAX** a été conduit de manière classique, tandis que sur le système **CONSV**, les carottes étaient semées au sein du mulch par le biais d'un strip-till, outil développé par l'Atelier Paysan, partenaire du projet, permettant d'ouvrir la ligne de semis sous un mulch, dans un objectif de culture en sol non travaillé.

2.1 Plan des parcelles expérimentales

Concernant la mise en place concrète de ces systèmes, l'aire d'expérimentation était agencée comme suit (Figure 1) :

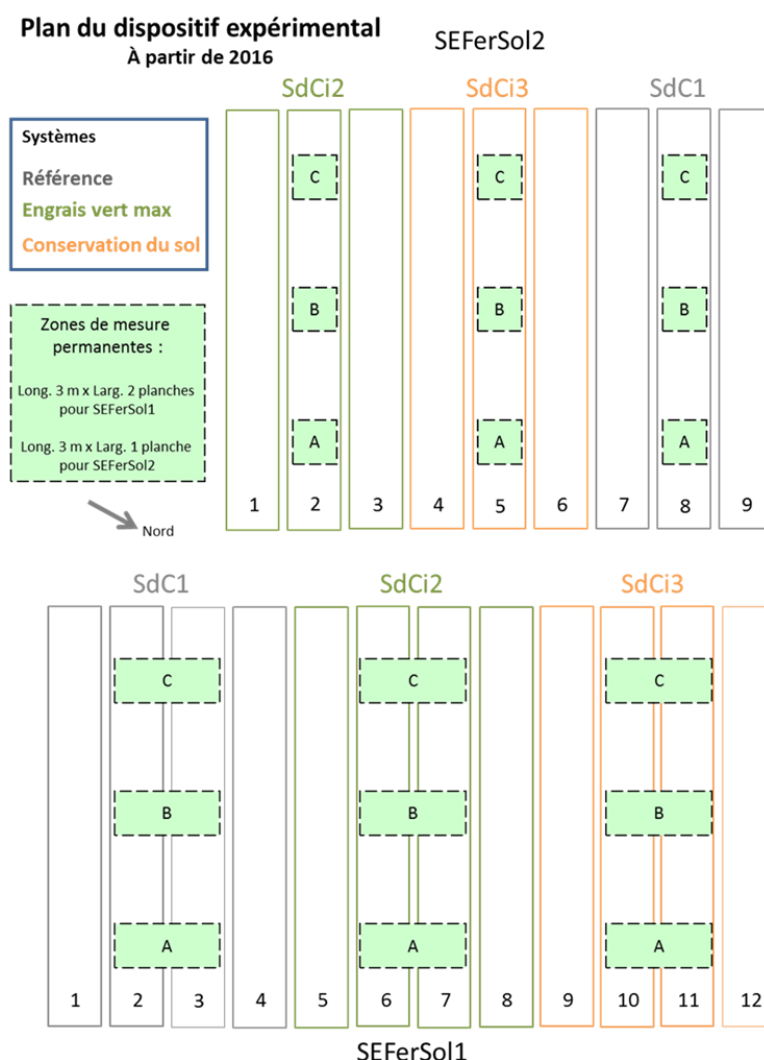


Figure 1 : Plan du dispositif expérimental SEFerSol

Deux parcelles, SEFerSol1 et SEFerSol2, subdivisée en planches mesurant chacune 50m de long et 1.8m de large, 1 passe pied inclus. Ainsi, SEFerSol1 mesure environ 12 ares, et SEFerSol2 mesure environ 9 ares, nous avons donc respectivement 12 et 9 planches, réparties équitablement entre les trois systèmes. Des zones de mesures (A, B et C) sont établies sur les ou la planche centrale, trois zones de



mesures de 3m de long par système, permettant une validité statistique des données mesurées. Ces zones de mesures se trouvent uniquement sur les planches centrales afin d'éviter les effets de bordure, la « contamination » d'un système par un autre.

L'intérêt de subdiviser l'essai en deux parcelles est de limiter les effets annuels, liés en particulier à des conditions climatiques extrêmes, qui pourraient fausser les résultats si les cultures n'étaient présentes qu'une fois sur une parcelle. Etant pour des raisons logistiques impossible d'avoir toutes les cultures présentes en même temps, il s'agit du compromis qui a été trouvé à ce stade.

2.2 Indicateurs

Afin de valider l'atteinte des objectifs présentés plus haut, un grand nombre d'indicateurs ont été mesurés.

2.2.1 Indicateurs de la fertilité du sol

Au niveau de la fertilité, nous avons travaillé avec les laboratoires de la SADEF et d'AUREA, afin d'obtenir des bilans annuels chimiques prenant en compte P,K,Mg,Ca,Na,B,Cu,Mn,Fe,Zn, ainsi que la composition du complexe argilo-humique, le taux de matière organique et le pH du sol. Ces éléments avaient pour objectif de conclure si les systèmes répondaient correctement aux besoins des plantes, en particulier le système **EVMAX** pour lequel aucun apport de fertilisation n'était effectué.

En complément de cela, le laboratoire SADEF nous fournissait toutes les deux semaines les valeurs des concentrations en nitrate et en ammonium dans le sol, afin d'avoir un aperçu des reliquats non consommés par les plantes, et potentiellement lessivés. Inclus dans la mesure, le taux d'humidité, qui en l'absence de sondes tensiométriques nous servait d'outil pour étudier les différences hydriques entre les systèmes.

Un focus plus spécifique a également été effectué via des analyses effectuées par CELESTA LAB, portant sur les dynamiques de minéralisation de la matière organique, plus particulièrement du carbone et de l'azote organique, avec pour but à la fois d'observer les différences entre systèmes et d'estimer les mises à disposition pour la plante sur la période de culture. En outre, afin de caractériser les dynamiques, nous avons observé les différences en termes de rapport C/N et de granulométrie, différenciant Matière Organique Libre et Matière Organique Liée.

Deux fois par an, au printemps et à l'automne, des tests à la bêche étaient réalisés en présence d'une plante active (culture ou engrais vert dont les racines étaient suffisamment développées), afin de vérifier la présence éventuelle de compaction du sol. Ces tests, effectués selon la méthode Görbing (adaptée par C.Barbot, conseiller à la Chambre d'Agriculture d'Alsace), consistent à prélever une bêchée de sol, sur une quarantaine de centimètres, et à l'évaluer selon 8 critères, en attribuant pour chaque critère une note de 1 à 5, 1 étant la meilleure note et 5 la moins bonne. Ces critères portent sur la granulométrie, la forme des agrégats, la porosité, l'hydromorphie, la transition d'horizon ou encore l'état de surface. En cumulant ces critères, on obtient donc une note de 8 à 40, permettant une comparaison entre les systèmes.) (« Test à la bêche », C.Barbot, 2012)

Dans ce même objectif d'évaluer le sol, des mesures d'infiltrométrie ont été réalisées selon la méthode Beerkan (« Vademecum des méthodes de diagnostic de sol », C.Chapron, 2023), et des mesures de stabilité structurale ont été réalisées par le laboratoire RITMO, partenaire du projet.

Des mesures de Biomasse ont également été effectuées afin de connaître plus en détails la vie du sol dans nos systèmes. Des mesures de biomasse par fumigation ont ainsi été réalisées par CELESTA LAB, tandis que RITMO a réalisé des mesures de biomasse microbienne et fongique via des mesures d'ARN 18 et 16S.

Enfin, sur les parcelles, ont également été effectués des comptages de vers de terre avec les élèves, via des tests moutarde.



Ces différents éléments sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 1) :

Tableau 1 : Résumé des indicateurs de fertilité et méthodes de collecte

Quoi ?	Qui ?	Méthode De Prélèvement	Commentaire
Bilan Chimique, CEC, Matière Organique, Minéralisation, C/N, Granulométrie	SADEF et Celesta LAB	1x/an sur tous les systèmes, 3 zones de prélèvements homogénéisées, 30cm de profondeur	Sur les premières années, les 3 zones n'étaient pas homogénéisées
Tests A La Bèche	Christophe Barbot, CAA	2x/an sur tous les systèmes. 8 critères, note allant de 8 (meilleure note) à 40 (pire note)	Méthode Görbing adaptée par C.Barbot
Beerkan, Comptages De Vers De Terre	Classes du lycée	1x/an, 3 zones de mesure par système, tests moutarde pour les vers de terre	Vers de terre uniquement sur 3 ans, pour cause de COVID puis de pénurie de moutarde
Mesure De Biomasse Bactérienne Et Fongique, Stabilité Structurale, Respirométrie	RITTMO Agroenvironnement	1x/an, 3 zones de mesure par système. Les mesures de biomasse ont été réalisées via des décomptes d'ARN 18 et 16S, 30cm de profondeur	Les prélèvements de sol des 3 zones n'étaient pas homogénéisées.

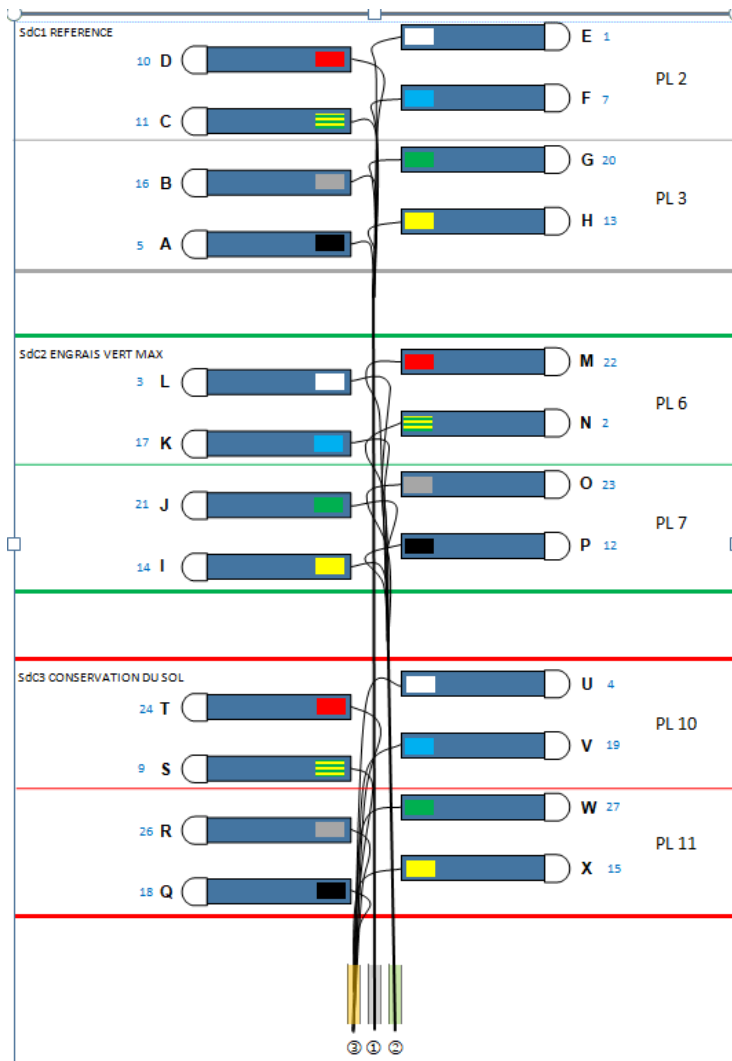
2.2.2 Gestion des adventices

Pour ce qui est de la gestion des adventices, nous avons réalisé des mesures via notre partenaire Planètes Légumes, consistant en des comptages d'avertices dans une zone de mesure d'1m², à trois reprises par culture : une fois avant la plantation, une fois après le dernier désherbage et une fois avant la récolte. L'idée est d'avoir à la fois le nombre d'avertices, afin de pouvoir établir l'efficacité des méthodes de gestion appliquées dans le système, mais également leur diversité spécifique, ici uniquement évaluée sous l'angle du nombre d'espèces représentées, pour avoir une idée de l'évolution des espèces présentes selon les systèmes.

En complément, le stock semencier a été quantifié en laboratoire par notre partenaire RITTMO. Ces mesures ont été effectuées deux fois, une fois au début et une fois à la fin du projet, afin d'établir si les pratiques ont permis de diminuer la pression des adventices sur le long terme.



2.2.3 Qualité de l'eau



Sur la ressource en eau, nous nous sommes concentrés sur la thématique de la pollution par rejet de nitrates. Le but était de vérifier si les systèmes innovants étaient plus respectueux de la qualité de l'eau. Pour ce faire, nous avons mis en place un système de bougies poreuses en argile, à 80cm de profondeur, afin de récupérer l'eau là où ne descendent pas les racines des légumes de notre rotation. Ainsi, nous avons 8 bougies par système, pour pallier les potentiels problèmes de porosité et avoir des répétitions. L'eau récupérée était ensuite envoyée chez SADEF afin de connaître les concentrations en nitrates de ces échantillons.

Ces bougies poreuses étaient relevées toutes les deux semaines durant toute l'année, exception faite de la période Juillet-Août.

Figure 2 : Plan du dispositif de bougies poreuses

2.2.4 Indicateurs technico-économiques

Enfin, sur les aspects technico-économiques, nous avons mesuré : le temps de travail, dont le temps de travail pénible (selon les facteurs présentés en Figure 3), les rendements, les intrants (entendus dans le sens de l'ensemble des consommables achetés pour les itinéraires techniques de l'expérimentation), et en avons déduit les chiffres d'affaires et les marges afin de valider (ou non) la viabilité du système.

Facteurs de pénibilité	Manutention	Postures	Vibration	Bruit	Température	Produit Chimique	Nuit	Equipe	Répétitif	Hyperbarre
Activité(s)										
COTATION DES ACTIVITES PAR FACTEUR DE PENIBILITE										
PARTICIPATION AUX TACHES DE CULTURE										

Figure 3 : Facteurs de pénibilité



2.3 Outils spécifiques

Afin de mener à bien les systèmes expérimentaux, des outils ont été autoconstruits avec l'aide et le partenariat de l'Atelier Paysan. Nous avons déjà parlé du strip-till. Ont également été construits :

- Un roloflex : rouleau faca flexible afin de pouvoir s'adapter à la culture en planches permanentes, pratiquée sur SEFerSol.
- Un cultibutte : des dents de cultivateur complétées par une paire de disques. Il permet le travail en butte et en planches permanentes pour la reprise d'un labour ou d'une fin de culture. Il est conçu pour façonner ou entretenir les buttes.
- Une butteuse large : pour établir les buttes permanentes utilisées pour la culture.

3. Résultats et discussion

Pour présenter les résultats, nous allons partir d'analyses multicritères reprenant les objectifs initiaux du projet et comparant chacun des systèmes innovants au système de référence.

3.1 Comparaison EVMAX/REF

Dans un premier temps, comparons le système **EVMAX** au système **REF** (Figure 4).

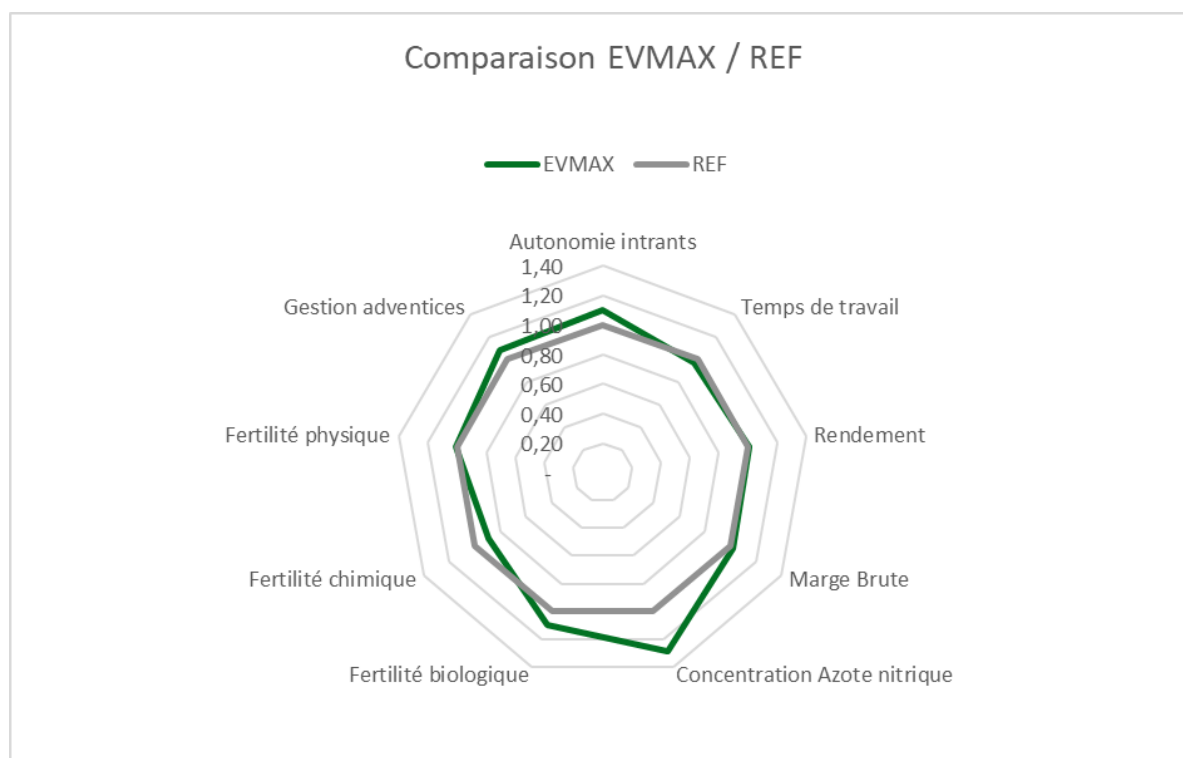


Figure 4 : Comparaison multicritère EVMAX/REF

Pour lire cette figure, chaque sommet est la moyenne de la différence de valeurs d'un ensemble d'indicateurs de la thématique, moyenne passée au logarithme pour rendre les écarts visuellement lisibles (en particulier pour le système **CONSV**, dont nous parlerons après).

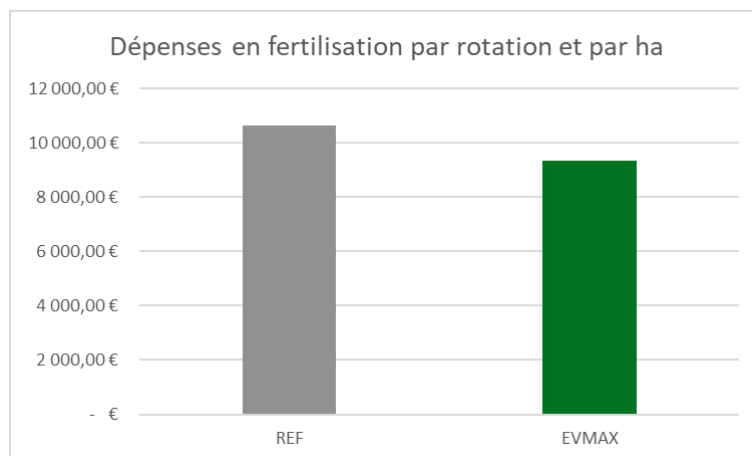


Pour simplifier, la formule employée pour chacun des critères présents sur un des sommets du diagramme radar est la suivante :

$$1 + \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_{\text{Inn},i} - I_{\text{Réf},i}) \right)$$

Ce qui ressort de la lecture de ce diagramme radar, c'est que le système **EVMAX** a des performances technico-économiques quasiment équivalentes au système de référence. En entrant dans le détail légume par légume, les rendements sont équivalents pour tous les légumes sauf les courges et les choux : ils sont tendanciellement meilleurs pour les courges, et tendanciellement inférieurs pour les choux. L'hypothèse la plus probable pour les courges est la plus-value apportée par la toile tissée, permettant de rouler les engrais verts en évitant les relevées et limitant la concurrence pour l'eau avec les adventices d'inter-rang. Le fait que les adventices présentes en inter-rang soient ainsi couvertes et ne doivent donc pas être désherbées compense le temps lié à la pose de la toile tissée, entraînant un temps de travail identique à celui de **REF**. Au niveau des choux, le manque d'éléments nutritifs rapidement disponibles, malgré le broyage des engrais verts, a probablement joué un rôle décisif. On peut également supposer que certains engrais verts ont fait des repousses, entraînant une concurrence à l'eau, problématique sur des choux d'automne.

Au niveau de l'autonomie en intrants, on peut constater que le système **EVMAX** semble plus performant que le système de référence, même si la plus-value est faible (2000 € environ, par ha et par rotation, soit sur 5 ans, Figure 5). Pas de différence au niveau du carburant, ni au niveau de l'irrigation. La différence se fait au niveau des éléments fertilisants. En effet, le système de référence reçoit de l'engrais organique



ainsi que des engrais verts en période hivernale. Le système **EVMAX** reçoit des engrais verts à plus haute densité et également en intercalaire, mais aucun engrais organique. Au global, le système engrais vert est donc plus performant à l'échelle d'une rotation, même si la différence est faible (Figure 4)

Pour ce qui est des produits phytosanitaires, aucune différence n'a été relevée :

Figure 5 : Comparaison des dépenses en fertilisation entre EVMAX et REF par rotation (5 ans)

Pour ce qui est de la fertilité du sol, le système **EVMAX** a de meilleurs résultats en termes de fertilité biologique, majoritairement au niveau de l'abondance de vers de terre, résultats toutefois à nuancer car cette mesure n'a été effectuée que durant deux années du projet (pour cause de COVID puis de pénurie de moutarde.) Plus intéressant en revanche, la différence en termes de fertilité chimique.

Le système **EVMAX** présente des concentrations en phosphore et en potassium inférieures au système de référence. En particulier, le potassium pose un problème agronomique, car son taux est en diminution constante sur le projet, au point de passer en 2022 sous la barre des 0.2g/kg, seuil indiqué par le laboratoire SADEF comme optimal, après avoir connu un pic à 0.29g/kg en 2018. En 2023, cela n'a pas eu d'impact négatif sur le rendement des courges, possiblement parce qu'il s'agit de la culture de la

rotation la moins demandeuse en potassium, mais dans un système réel, un complément serait sans doute à apporter.

Pour ce qui est du temps de travail, l'égalité est presque parfaite entre le système **EVMAX** et **REF** est explicable par le temps très limité d'utilisation des outils, comparativement à d'autres temps de travail (plantation, désherbage, récolte). Ainsi, d'un côté, en positif, moins de désherbage sur **EVMAX**, de l'autre plus de passages pour la destruction des engrais verts : les deux se compensent.

Enfin, terminons avec la qualité de l'eau en faisant le lien avec le système **CONSV**. Le système **EVMAX** est plus performant que le système **REF**, et le système **CONSV** moins performant (Figure 6 et 7)

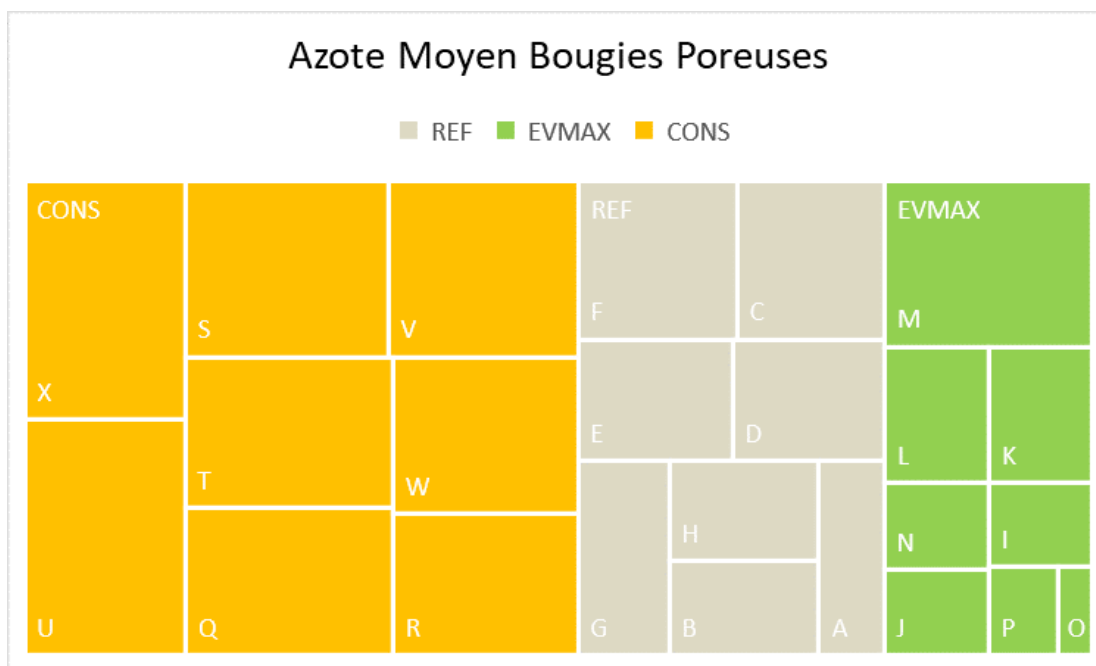


Figure 6 : Comparaison de la concentration moyenne en nitrates dans les bougies (mg/l)

Sur la Figure 6, chaque rectangle associé à une lettre correspond à l'une des bougies poreuses (Figure 2). L'aire du rectangle correspond quant à elle à la concentration moyenne en nitrate, de 2018 à 2023. On observe alors que la concentration moyenne du système **CONSV** est approximativement équivalente à la somme des concentrations moyennes des systèmes **REF** et **EVMAX**, tandis que l'aire totale du système **EVMAX** est inférieure à l'aire totale du système **REF**. Ainsi, quand le seuil de potabilité est situé autour de 50 mgNO₃/L, selon la réglementation nitrates. Sur le système **CONSV**, la valeur de concentration moyenne est d'environ 100 mgNO₃/L.

La cause est à chercher du côté des plantes actives : en effet, sur le système **EVMAX**, des plantes actives, c'est-à-dire des plantes vivantes, présentant un système racinaire actif, sont présentes en permanence, qu'il s'agisse de cultures ou d'engrais verts. Ces plantes actives viennent capter une grande quantité de l'azote présent dans le sol, là où sur le système **REF**, les moindres densités, voire le sol nu, ne permettent pas une telle captation. Sur le système **CONSV** en revanche, il arrive que le système présente un mulch résiduel sans plante active, notamment en hiver. La minéralisation peut en outre s'effectuer plus efficacement car le sol sous mulch refroidit plus lentement et conserve des conditions correctes pendant plus longtemps pour les organismes minéralisateurs. Par ailleurs, même en présence de plante active, l'activité biologique étant largement plus intense sur ce système (voir paragraphe suivant), la minéralisation est elle aussi renforcée et donc, l'azote est présent en trop grande quantité pour les besoins des plantes, et se retrouve soumis au lessivage dans nos sols sablo-limoneux.

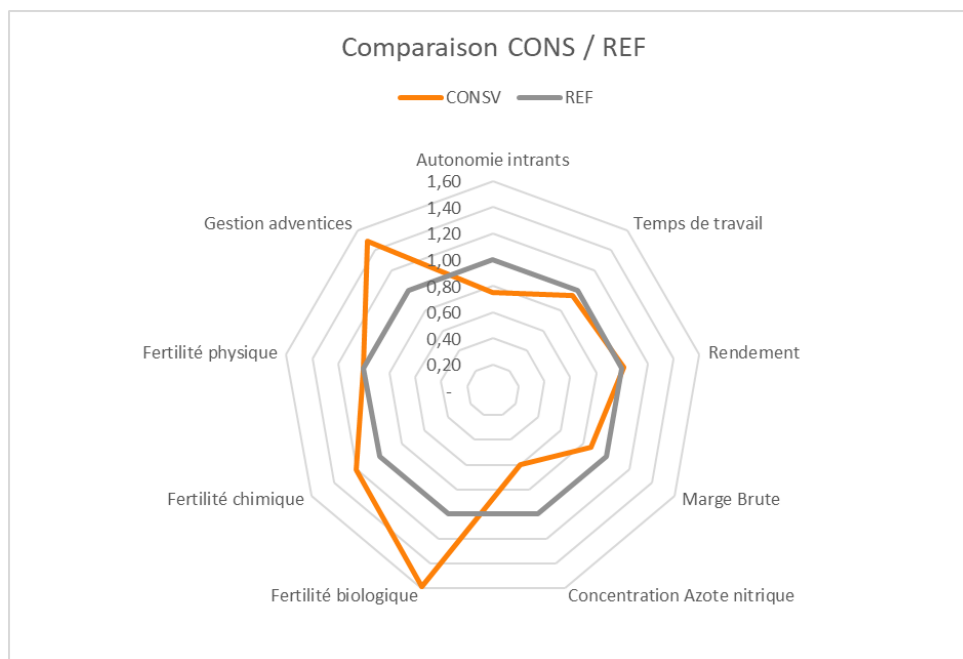


Figure 7 : Comparaison multicritère CONSV/REF

Au niveau de la fertilité justement, nous avons mentionné précédemment la différence importante en termes d'activité biologique. Ainsi, le système **CONSV** présente un nombre de vers de terre en moyenne 6 fois plus important que le système de référence, une quantité d'ARN bactérien 2 fois plus importante et d'ARN fongique 3 fois plus importante. On voit ici de manière très claire l'impact du non-travail du sol, telle que l'avait relevé (Zuber & Villamil, 2016). Ce non-travail du sol ne se ressent pas négativement au niveau de la structure du sol, celle-ci étant au niveau du système de référence.

En revanche, cette abondance biologique a un impact très important sur la fertilité chimique du sol. Si au cours des 3 dernières années, aucun engrais organique n'a été utilisé, les concentrations en différents éléments sont largement suffisantes pour couvrir les besoins et continuent d'augmenter. En cause : la dégradation très rapide du mulch présent en couverture en surface.

Point intéressant, la dégradation du mulch est désormais suffisamment rapide pour que les plantes n'aient pas à subir des faims d'azote, et ce même sur des cultures à cycle court comme des laitues. Si celles-ci subissent bien un retard de croissance, cela pourrait être dû au réchauffement plus lent du sol couvert et

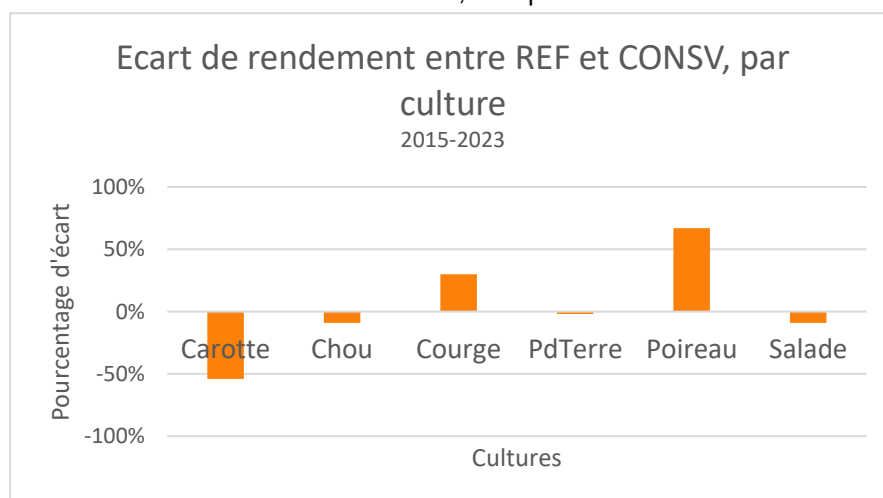


Figure 8 : Ecart moyen de rendement entre REF et CONSV

Au niveau de la pomme de terre, le rendement moindre s'explique par une mauvaise gestion technique. En effet, la couche de paillage apportée au-dessus des pommes de terre n'était pas suffisante, et cela a

pas au manque d'éléments nutritifs. Ainsi, elles refont leur retard et terminent avec des poids à la pièce plus importants que dans les autres systèmes. De manière générale, la Figure 8 nous montre les tendances par rapport au système de référence en termes de rendement.

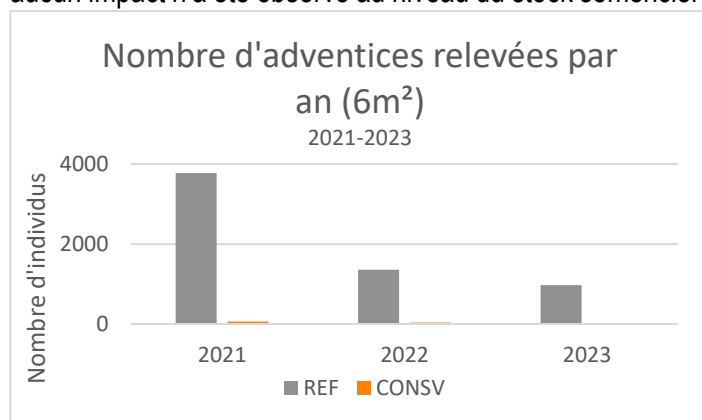


entraîné des verdissements. Au niveau des laitues, le retard vient de la deuxième année du programme, où le système n'était pas encore en place et la faim d'azote s'est exprimée, mais le problème n'existe plus sur les années suivantes. La différence au niveau du chou est anecdotique. Elle est en revanche plus prononcée pour le potimarron et le poireau, deux cultures longues qui profitent très bien du sol non travaillé et du paillage. En revanche, sur la carotte, la pratique n'est pas maîtrisée. En particulier, le strip-till, dans sa version présente sur l'essai, avait tendance à bourrer en présence d'une couche de mulch trop importante, et une fois le sillon tracé, le mulch tendait à se refermer par endroit, entraînant des problèmes de levée. Si en moyenne des différentes cultures, les rendements sont équivalents, on observe bien d'importantes fluctuations, et, en particulier, le fait que les rendements en carotte soit affaiblis joue de manière importante sur la marge, car la carotte est la culture à plus forte valeur ajoutée de la rotation.

Autre facteur jouant sur la marge, les intrants. Plus spécifiquement, le mulch, qui est utilisé en grandes quantités. Précisons que dans le cadre de l'expérimentation, la plupart du mulch nous était fournie gratuitement par des paysagistes voisins. Seules les bottes de pailles, le BRF et les bâches plastiques ont été comptabilisées. Le résultat aurait donc été encore pire en attribuant un prix à l'ensemble du mulch utilisé.

Argument qui n'a pas été validé scientifiquement car l'expérimentation ne disposait pas d'un matériel d'irrigation différencié entre système, le système **CONSV** paraît très nettement plus économe en eau, et également plus adapté pour résister aux sécheresses car il maintient le sol au frais pendant les périodes les plus chaudes. On a même pu observer un bénéfice du retard de croissance printanier, avec des courges développant un feuillage plus tardif, ce qui a permis de diminuer, en 2022, l'impact des coups de soleil sur le système **CONSV**, tandis qu'ils ont causé d'importants dégâts sur les deux autres

Enfin, au niveau des adventices, la conclusion est sans appel : le sol paillé et non travaillé permet une réduction à l'extrême des adventices (Figure 8). A noter toutefois deux choses : si l'expression est limitée, aucun impact n'a été observé au niveau du stock semencier, en termes de nombre. Sur **CONSV**, la quasi



intégralité des adventices présentes dans le stock sont des pourpriers, moyennement persistantes et pouvant rester environ 7 ans dans le sol (Serail, 2017), tandis que sur les deux autres systèmes, les adventices sont partagées entre pourpier et galinsoga. Par ailleurs, les adventices tendent à se spécialiser vers des vivaces problématiques, en l'occurrence du liseron et du chiendent, entraînant des besoins de gestion spécifiques.

Figure 9 : Nombre d'adventices relevées par système et par an entre 2021 et 2023

Conclusion

En préambule de la conclusion, rappelons que cet essai s'inscrit dans le cadre du plan Ecophyto et que nous avons peu traité des produits phytosanitaires dans les résultats. Aucun produit hors biocontrôle n'a été utilisé dans le cadre de l'expérimentation, et sur la dernière rotation, seul de l'antilmace a été utilisé en préventif et sur les 3 systèmes. Il est ainsi compliqué d'arriver à une conclusion quant à l'impact de nos systèmes sur la pression sanitaire, car aucun de nos trois systèmes n'a subi de pression biotique importante nécessitant un traitement durant l'expérimentation.

Il convient alors de parler des autres objectifs, et des perspectives qu'ils ouvrent pour la suite. Au niveau de la fertilité, qui était le point central des mesures effectuées sur l'essai, le système **CONSV** est clairement plus performant que les deux autres, qui sont à un niveau assez similaire. Néanmoins, cette



fertilité est obtenue au prix de l'autonomie : de grandes quantités de mulch sont utilisées, et ces quantités sont produites en dehors de la ferme. Quand bien même le coût ne serait pas prohibitif, on est en droit de s'interroger sur la pérennité du système : si tous les maraichers venaient à l'utiliser, où trouverait-on assez de matière pour fournir tout le monde ? Un maraicher a un jour déclaré, lors d'une visite sur le site expérimental : « Ce système est un système de voleur, votre sol ne s'enrichit que de ce que vous prenez ailleurs ». Une remarque dure, mais juste ?

Quant à l'impact sur l'eau, il n'est pas négligeable. Comme nous l'avons vu, le système **CONSV** dépasse régulièrement les limites de potabilité, en termes de concentration. Si le volume drainant n'est pas exactement connu, à cause de l'irrigation, cela doit quand même nous questionner.

Par ailleurs, les rendements sont bons, sauf erreurs techniques, voire très bons. Seule la carotte pose problème, mais ce problème pourrait être réglé en découvrant le sol avant la carotte, en améliorant l'ouverture du sillon avec des outils plus puissants ou encore en semant sous bâche. Le système cherchait à pousser le concept à l'extrême pour mettre en lumière les défauts potentiels, toutefois, des méthodes d'adaptation peuvent être développées.

La biodiversité se trouve très favorisée par le non-travail du sol. Comme nous l'avons vu ci-dessus, à la fois la diversité et la quantité d'individus présents dans le système **CONSV** sont sans commune mesure avec les deux autres systèmes.

Au niveau des adventices, la différence est bien évidemment flagrante, et ce d'autant plus que l'on se trouve dans un système de petite taille où l'essentiel du désherbage est fait à la main. Le gain en termes de temps de travail est marginal, car le paillage doit lui aussi être étendu à la main, mais le travail n'est pas le même. Une spécialisation des adventices est d'ailleurs observée, comme mentionné dans la partie résultat, mais une méthode de couverture longue du sol (toile tissée laissée en place des courges au début du poireau) a a priori permis de le gérer correctement.

Pour récapituler, le système **CONSV** n'est pas plus autonome en intrants que le système de Référence, ne gère pas le lessivage et est très gourmand en matière organique, mais apporte une grande satisfaction écologique (au sens premier du terme), de bons rendements pour la majorité des légumes, moins de désherbage et de belles perspectives en termes de résilience face au changement climatique.

Le système **EVMAX**, quant à lui, est très similaire au système de Référence. Là où **CONSV** est très variable, alternant les points positifs et les points négatifs, le système **EVMAX** est beaucoup plus stable. Il souffre d'un manque léger au niveau chimique, mais un apport tous les 5 ans suffirait à compenser le manque. Pourquoi pas sur l'année du chou, car comme nous l'avons vu, le chou semble aussi manquer d'énergie rapidement disponible.

Ce système semble pourtant être celui de l'optimisation. Il est très similaire à **REF** en termes technico-économique, en coûtant moins et en protégeant mieux la ressource en eau.

Ce serait oublier un peu vite que l'expérimentation SEFerSol dispose de l'irrigation et ne s'est pas privé pour l'utiliser. Ce système pourrait-il fonctionner dans un autre contexte ?

Pour le savoir, il faudrait l'essayer. C'est dans cette direction que souhaite aller l'EPL pour continuer dans la lignée du projet, voir du pays, et propager ces systèmes, en adaptant les points définitivement inefficaces, pour pouvoir les mettre à l'épreuve dans d'autres contextes pédoclimatiques.

Avec des résultats aussi prometteurs, les agriculteurs se sont-ils emparés des systèmes, ou du moins des techniques ? Pas vraiment.

L'intérêt est là, pas l'engouement. Il faut dire que les systèmes font peur. Le travail manuel, en particulier ; s'il peut s'appliquer sans trop de problèmes aux petites exploitations, les grosses sont plus frileuses. Tous nos résultats économiques ont été extrapolés à l'hectare, la rentabilité serait en théorie possible, mais plus de travail manuel implique plus de main d'œuvre, compliqué actuellement



Un second frein au déploiement de ces pratiques est le contexte. Précédemment, nous parlions de l'irrigation, dont nous disposons mais qui n'est pas forcément généralisable. Il en va de même pour le sol. Beaucoup arguent que ce qui a fonctionné dans notre sol sablo-limoneux ne serait pas efficace chez eux. Peut-être à raison ? Nous n'avons pas pu le tester dans le cadre de SEFerSol, et envisageons donc de l'évaluer dans le cadre d'un futur projet.

Un autre frein à la diffusion de ces pratiques est l'aspect commercial. Ainsi, le système **CONSV** a, pour plusieurs légumes, des charges plus élevées pour des rendements plus élevés. Mais ces légumes supplémentaires, ou plus gros, encore faut-il pouvoir les vendre. La situation régionale est particulièrement concurrentielle, surtout au niveau de l'agriculture biologique. Aussi, il y a une crainte de la part des maraichers de ne pas pouvoir écouler les productions.

Enfin, il y a la complexité, réelle ou supposée, des systèmes. Voir que cela fonctionne sur une expérimentation ne suffit pas. Ils ont besoin de le voir chez un confrère pour être véritablement convaincus. C'est aussi quelque chose que nous souhaiterions mettre en place dans la suite envisagée du projet.

Il y a néanmoins de nombreux points positifs. À commencer par l'intérêt porté au projet. Des maraichers sont venus de toute la France pour voir l'essai, et sont toujours (à notre connaissance) repartis satisfaits. Aussi, si les systèmes ne sont pas directement transposés, ils nourrissent assurément la réflexion des maraichers autant que des futurs maraichers. Car être un projet expérimental au sein d'un lycée agricole est une force très importante. Les jeunes interviennent sur tous les aspects de l'expérimentation. Plus encore que leurs aînés, ils se l'approprient et voient au quotidien le fonctionnement des pratiques. Ils les gardent à l'esprit lorsqu'ils se mettent à leur compte, ou rejoignent un collègue en tant que salarié. C'est sans doute là la plus grande force du projet SEFerSol en termes de diffusion.

Le projet SEFerSol a permis d'aboutir à de nombreux résultats agronomiques. Si aucun des systèmes n'est parfait, plusieurs pratiques issues de ces systèmes innovants se sont révélées très intéressantes, ont pu être montrées, testées et diffusées auprès d'un public nombreux et diversifié, représentant tous les maillons de la filière.

Il y a maintenant trois objectifs à poursuivre pour valoriser pleinement les leçons de cette expérimentation : corriger les faiblesses résiduelles, pourquoi pas en imaginant une fusion entre les systèmes innovants. Tester ces systèmes revisités à grande échelle, pour pouvoir lever les doutes (ou non, mais au moins pour trancher sur) la faisabilité des systèmes dans différents contextes. Impliquer directement des maraichers dans l'expérimentation pour favoriser la diffusion.

Cela, et d'autres chose encore, nous espérons avoir l'occasion de le mettre en pratique dans le cadre d'une prochaine expérimentation système, afin d'être toujours plus robuste dans les solutions proposées aux maraichers.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.

Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.



Contributions des auteurs

Christophe BARBOT : réalisation des analyses de sols, en particulier test à la bêche

Maryna BOGDANOK : lien avec les agriculteurs, diffusion des résultats et des pratiques

Guillaume DELAUNAY : réalisation du matériel spécifique utilisé pour l'expérimentation, diffusion des acquis

Clément MUNIER : appui à la mise en place des bougies poreuses, appui sur l'analyse des données, en particulier l'analyse multicritère

Najat NASSR : réalisation des analyses microbiologiques, diffusion des résultats vers la recherche

Marie NUSSBAUMER : suivi des adventices

Elie LANGARD : mise en place de l'expérimentation, réalisation des analyses de données, rédaction de l'article

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne conseiller, ne pas posséder de parts, ne pas recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Les auteurs remercient l'OFB, via le réseau DEPHY EXPE II, et l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse pour leur soutien financier. Ils remercient également le Campus EPLEFPA Les Sillons de Haute-Alsace pour l'appui logistique et le soutien financier.

Références bibliographiques :

Agreste, 2023. Chiffres & données : Pratiques phytosanitaires en production légumière en 2018, IFT et nombre de traitement - Correctif

Aprel, CA Vaucluse & Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, 2007. Les engrais verts en maraîchage, le guide.

Aweto A.O. and OGURIE G.M., 1992. Impact of intensive market gardening on the nutrient status of hydromorphic soil in the Ojo area of Lagos metropolis, Nigeria. *Environmentalist* 12, 223–230

Barbot C., 2012. Test à la bêche et le profil rapide sur culture ou couvert en place. *Chambre d'Agriculture d'Alsace*

Barbot C., 2003. Grille d'évaluation des agrégats au champ (Test à la bêche selon Görbing) [En ligne] URL : https://www.soin-de-la-terre.org/wp-content/uploads/Grille_notation_diez_2018.pdf

Chapron C., 2023. *Vademecum des méthodes de diagnostic des sols*. La Bergerie Nationale

Kopittke P.M., Menzies N.W., Wang P., Mckenna B.A., Lombi E., 2019. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International* 132.

Zuber S.M. And Villamil M.B., 2016. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil, Biology and Biochemistry* 97, 176-187



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.