



HAL
open science

Analyse de la durabilité socio-économique et environnementale d'un réseau de systèmes de culture zéro-pesticides (Rés0Pest) après 10 ans d'expérimentation

Vincent Cellier, Diana Ortiz-Vallejo, Caroline Colnenne-David, Caroline Colnenne-David, Sébastien Darras, Valentin Deremetz, Violaine Detieux, Antoine Savoie, Jean-Noël Aubertot

► To cite this version:

Vincent Cellier, Diana Ortiz-Vallejo, Caroline Colnenne-David, Caroline Colnenne-David, Sébastien Darras, et al.. Analyse de la durabilité socio-économique et environnementale d'un réseau de systèmes de culture zéro-pesticides (Rés0Pest) après 10 ans d'expérimentation. Innovations Agronomiques, 2024, 98, pp.300-318. 10.17180/ciag-2024-vol98-art20 . hal-04787329

HAL Id: hal-04787329

<https://hal.inrae.fr/hal-04787329v1>

Submitted on 17 Nov 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



Analyse de la durabilité socio-économique et environnementale d'un réseau de systèmes de culture zéro-pesticides (Rés0Pest) après 10 ans d'expérimentation

Vincent CELLIER¹, Diana ORTIZ⁵⁻¹⁰, Caroline COLNENNE-DAVID², Sébastien DARRAS³, Valentin DEREMETZ⁹, Violaine DETIEUX¹, Antoine SAVOIE⁴, Jean-Noël AUBERTOT⁵

Avec la collaboration de : Guillaume AUDEBERT⁷, Alain BERTHIER¹, Pascal COCANDEAU⁴, Rosemonde DEVAUX³, Brigitte MONTEGANO⁶, Jordan PIRAULT⁸, Ludivine PIRUS³, Marie-Hélène ROBIN⁹, Jean-Marc VALDRINI⁸

¹ INRAE - UE0115 U2E Unité Expérimentale du domaine d'Epoisses, 21110 Bretenière, France

² INRAE - UMR0211 UMR Agronomie Agronomie, 22 PLACE de l'Agronomie 91120 Palaiseau, France

³ INRAE, UE GCIE – Picardie, 2 Chaussée Brunehaut - Estrées-Mons, CS 50136, 80200 Estrées-Mons, France

⁴ INRAE - UE Physiologie Animale de l'Orfrasière, 37380 Nouzilly, France

⁵ INRAE - UMR AGIR, chemin de Borde-Rouge, BP52627, 31326 Castanet-Tolosan Cedex, France

⁶ INRAE – UE DIASCOPE, Domaine de Melgueil, 34130 Mauguio, France

⁷ INRAE - UE FERLUS, 150 route le Chêne, 86600 Lusignan, France

⁸ INRAE - Domaine de la Motte au Vicomte, BP 35327, 35653 Le Rheu Cedex, France

⁹ Ecole d'Ingénieurs de PURPAN, 75 voie du TOEC - BP 57611, 31076 Toulouse Cedex 3, France

¹⁰ INRAE – UMR ABSys, 2 Place Viala 34060 Montpellier CEDEX 2, France

Correspondance : vincent.cellier@inrae.fr

Résumé

Réduire la dépendance aux pesticides des systèmes agricoles est une priorité en raison de leurs impacts négatifs démontrés sur la santé des agroécosystèmes et la santé humaine. Nous présentons les résultats de dix ans d'expérimentation (2013-2022), évaluant la durabilité¹ de huit systèmes de culture sans pesticides en grande culture et en polyculture-élevage, dans différents contextes pédoclimatiques et socio-économiques en France. La contribution au développement durable des huit systèmes testés varie de « Moyenne à élevée » à « Très élevée ». La durabilité environnementale est « Très élevée » pour tous les systèmes. La rentabilité montre de fortes différences entre les systèmes, allant de « Très faible » à « Très élevée », dans un contexte où aucune valorisation économique particulière des récoltes produites sans pesticides n'a été prise en compte. Aucune dégradation de la capacité productive ou de la qualité sanitaire des récoltes n'a été observée à long terme et on montre qu'il est possible de se passer des pesticides si la préservation de l'environnement et de la santé humaine est compensée par une plus-value dans le prix de vente des récoltes obtenues. Ces résultats confirment que la diversification des cultures et des pratiques culturales sont des leviers efficaces pour assurer la durabilité des systèmes de culture.

Mots-clés : Système de culture, Réseau d'expérimentations ; Expérimentation système ; Agroécologie ; Conception ; Evaluation ; Régulations biologiques.

Analysis of the socio-economic and environmental sustainability of a network of zero-pesticides cropping systems (Rés0Pest) after 10 years of experimentation.

¹ L'évaluation de la durabilité a été conduite avec Criter 5.4 et MASC 2.0



Reducing dependence on pesticides in agricultural systems is a priority due to their proven negative impacts on agroecosystems and human health. We present here the results of a ten years of experimental network (2013-2022), assessing the sustainability of eight pesticide-free cropping systems in field and mixed cropping, in different pedoclimatic and socio-economic contexts in France. The contribution to sustainable development of the eight systems tested ranges from "medium to high" to "very high". Environmental sustainability is "very high" for all systems. Profitability varies widely from "very low" to "very high", in a context where no specific economic reward was considered for pesticide-free cropping systems preserving the environment and human health. No deterioration in the production capacity or sanitary quality of the crops was observed over the long term, and we show that it is possible to produce without pesticides if there is added value for harvest sold. These results confirm that crop diversification and cultivation practices are effective levers for ensuring the sustainability of cropping systems.

Keywords : Cropping system, Trial network; System experiment; Agroecology; Cropping system design; Cropping system assessment; Biological regulations.

1 Rés0Pest : un réseau d'essai systèmes de culture zéro-pesticides en grande culture et polyculture-élevage (2013-2022)

Les programmes DEPHY EXPE, menés sur la période 2012-2017 et 2018-2023, ont financé la mise en place d'un réseau de neuf essais de longue durée en France métropolitaine. Ces essais ont été réalisés à l'échelle de la parcelle agricole et visent à tester des systèmes de culture sans utilisation de pesticides et construits selon les principes de la protection intégrée des cultures afin de limiter les pressions biotiques. Le niveau de rupture étant très important par rapport aux pratiques agricoles conventionnelles, ces expérimentations sont positionnées en stations expérimentales. Les raisons justifiant l'intérêt d'un tel réseau expérimental, la description des systèmes de cultures, les objectifs poursuivis, le cahier des charges et la genèse de ce réseau original, ainsi qu'une première évaluation du réseau ont été détaillés dans un article publié à l'issue du premier projet DEPHY EXPE 2012-2017 (voir [Cellier et al. Innovations Agronomiques 70, 273-289](#)), dont la lecture est recommandée pour faciliter la compréhension des points qui seront présentés ici. Le projet et les sites Rés0Pest disposent également de pages de présentation sur le site EcophytoPIC (<https://ecophytopic.fr/dephy/conception-de-systeme-de-culture/projet-res0pest>)

1.1 Evolutions de la structure du réseau

Par rapport au premier projet DEPHY EXPE, le réseau s'est enrichi d'un site expérimental piloté par l'École d'Ingénieurs de PURPAN, qui est situé sur le domaine de Lamothe, situé à 20km de Toulouse et dont les principales caractéristiques sont détaillées dans l'annexe 1. Comme il n'a rejoint le réseau qu'en 2018 et que son système a dû être modifié dans les premières années, il n'a pas été possible de le prendre en compte dans l'évaluation multicritère. Le site d'Auzeville ayant quitté le réseau pour rejoindre le projet DEPHY EXPE REDUCE à partir de 2018, seuls les résultats des campagnes 2013 à 2017 seront présentés ici. Enfin, pour le site de Grignon, l'expérimentation a été arrêtée après la campagne 2020.

1.2 Evolutions des systèmes de culture de Rés0Pest

Au démarrage du projet Rés0Pest, en 2012, les systèmes de culture ont été construits en combinant des techniques alternatives, éprouvées ou suggérées par la bibliographie et les connaissances actuelles sur les cycles de vie des bioagresseurs, en vue de réduire leur risque de développement et de favoriser la mise en place de régulations biologiques. Ces combinaisons ont été conçues à l'échelle de chaque culture mais aussi à celle de la succession culturale dans son ensemble et en intégrant les abords des parcelles (voir [Cellier et al. Innovations Agronomiques 70, 273-289](#)).

Suite aux résultats du premier projet DEPHY EXPE Rés0Pest (2012-2017), des évolutions ont été apportées aux successions expérimentées sur les sites, afin de tenir compte de certaines difficultés



rencontrées et de tenter d'améliorer la performance des systèmes de culture testés. Les principales adaptations ainsi que leurs justifications sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : Principales adaptations des systèmes de culture Rés0Pest au cours de l'expérimentation

SITE	ADAPTATION REALISEE	JUSTIFICATION
BRETENIERE	Remplacement du chanvre par du tournesol en fin d'essai	Accroître le domaine de validité du système en l'absence de débouché local pour le chanvre
ESTREES-MONS	Introduction de la culture de pommes de terre de consommation	Intégration d'une culture de printemps entre deux cultures d'hiver, demande d'agriculteurs du secteur en raison de la présence fréquente de pommes de terre dans les successions de la région
MAUGUIO	Passage de la culture de luzerne pour le fourrage (foin) à la culture en porte-graines	Augmenter les résultats économiques, les cultures porte-graines sont assez répandues dans la petite région et justifient l'irrigation
NOUZILLY	Interversion du maïs ensilage et du blé tendre d'hiver après prairie temporaire	Limitation du lessivage d'azote lié au retournement si destruction au printemps, plus de possibilité de lutter contre le rumex présent dans la prairie (interculture longue), possibilité de biner les repousses de graminées prairiales
PURPAN	Remplacement de la luzerne par du Sainfoin	Sol trop acide pour une bonne croissance de la luzerne

La figure 1 ci-dessous présente les successions culturales des différents sites Rés0Pest sur la période 2018-2023, après application des modifications présentées ci-dessus.

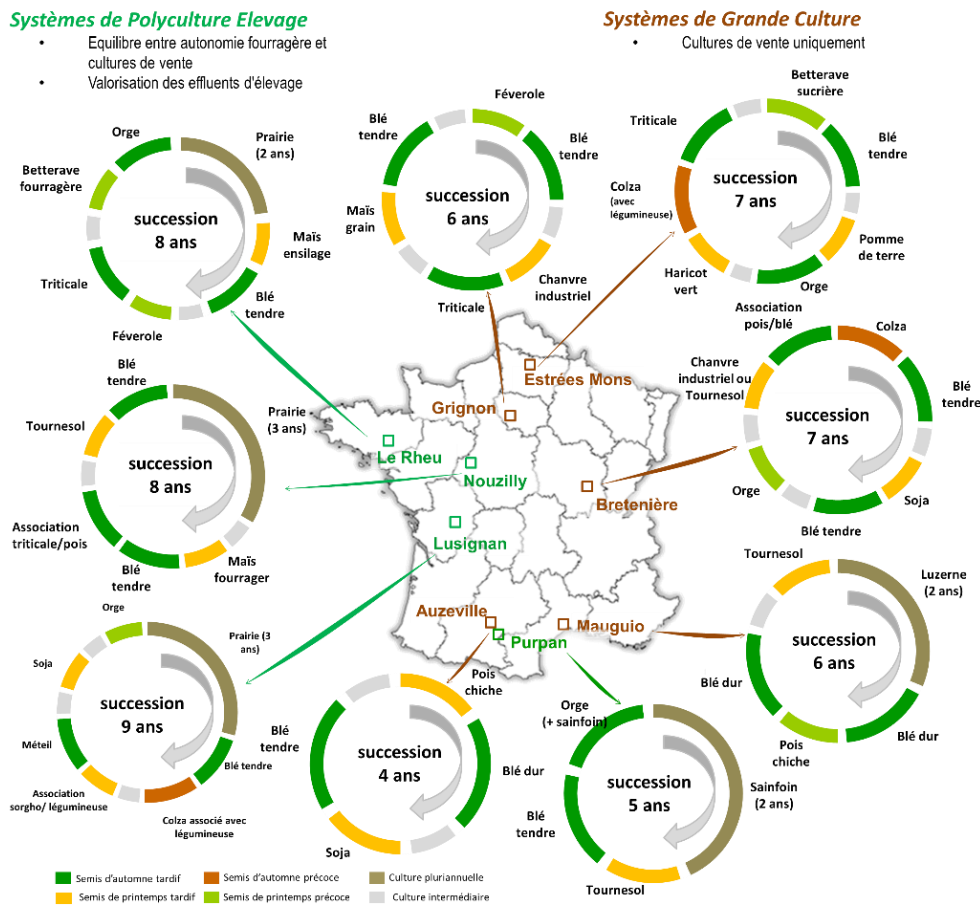


Figure 1 : successions culturales des différents sites Rés0Pest sur la période 2018-2023



2 Evaluation multicritère de la durabilité

L'analyse des données des systèmes Rés0Pest avec les outils Criter 5.4 et MASC 2.0² permet de connaître leurs niveaux de contribution au développement durable selon chacun des trois piliers classiquement considérés (piliers social, environnemental et économique), avec des échelles génériques ordinales représentées par un gradient de couleur (Figure 2).

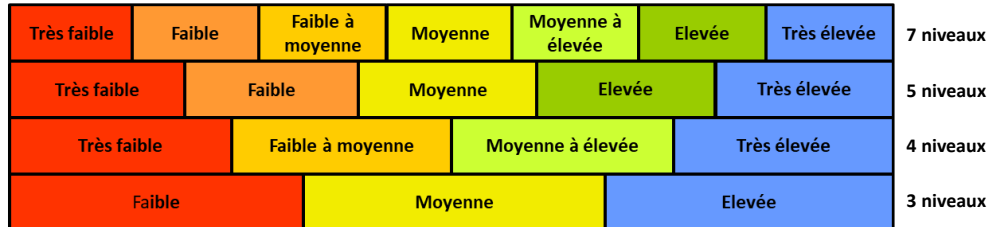


Figure 2 : échelles génériques ordinales pour caractériser la durabilité selon 3, 4, 5 ou 7 niveaux.

Dans la présentation des résultats de l'évaluation multicritère, les pondérations attribuées à chaque attribut de la durabilité sont indiquées en rouge et le nombre de niveaux de l'échelle utilisée figure à droite du libellé. Le remplissage des cadres correspond à la couleur des échelles génériques ordinales de notation de la durabilité MASC 2.0 (Figure 2). Le nom des sites est abrégé de la façon suivante : Auzeville (Au), Mauguio (Ma), Bretenière (Br), Grignon (Gr), Estrées-Mons (Mo), Lusignan (Lu), Nouzilly (No), Le Rheu (Rh). L'arborescence complète de l'évaluation est disponible en annexe 5.

2.1 Contribution au développement durable

Après dix campagnes – sauf pour Auzeville (5) et Grignon (8) – la durabilité globale est « moyenne à élevée » à « très élevée » selon les systèmes (Figure 3). Deux systèmes sur huit présentent une durabilité « très élevée », trois autres présentent une durabilité « Elevée » et les trois derniers une durabilité « Moyenne à élevée ». Ce sont les contributions de la dimension économique et de la dimension sociale, qui présentent le plus de différences entre systèmes, tous les systèmes ayant une contribution « très élevée » à la durabilité pour la dimension environnementale.

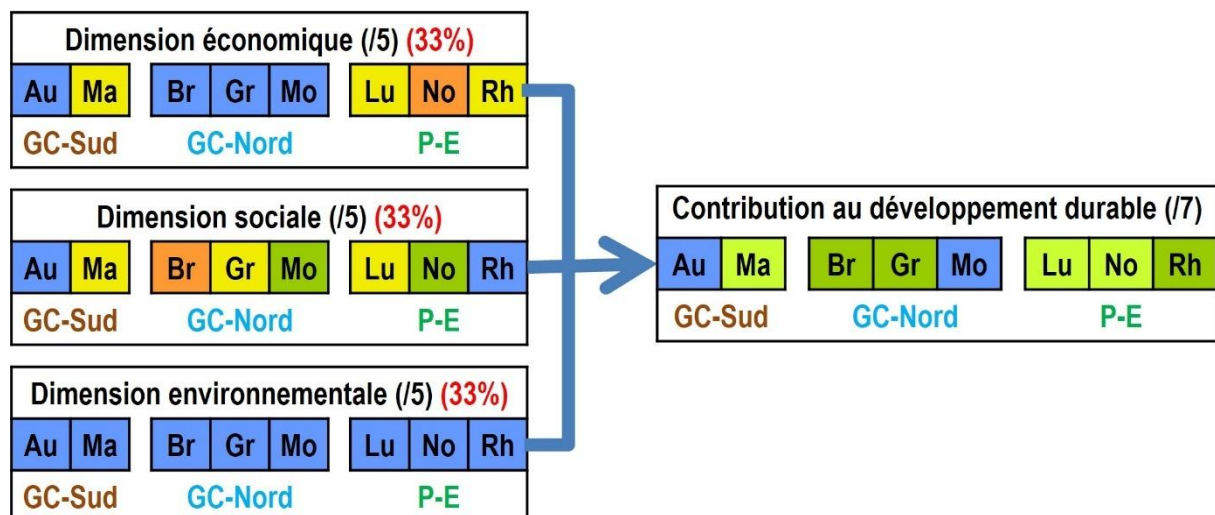


Figure 3 : Contribution globale au développement durable de huit systèmes de culture Rés0Pest (2013-2022).

² Plus d'informations sur Criter 5.4 et MASC 2.0 : <http://wiki.inra.fr/wiki/deximasc/Main/WebHome>



2.2 Dimension économique

La durabilité économique est « très élevée » pour quatre systèmes de culture, « moyenne » pour trois autres et « faible » pour le dernier (Figure 4). Il n'y a pas de dégradation de la capacité productive à long-terme après dix années d'expérimentation et il n'y a pas de dégradation de la qualité des produits récoltés (voir 2.2.1 Rendement et qualité des principales cultures, ci-dessous).

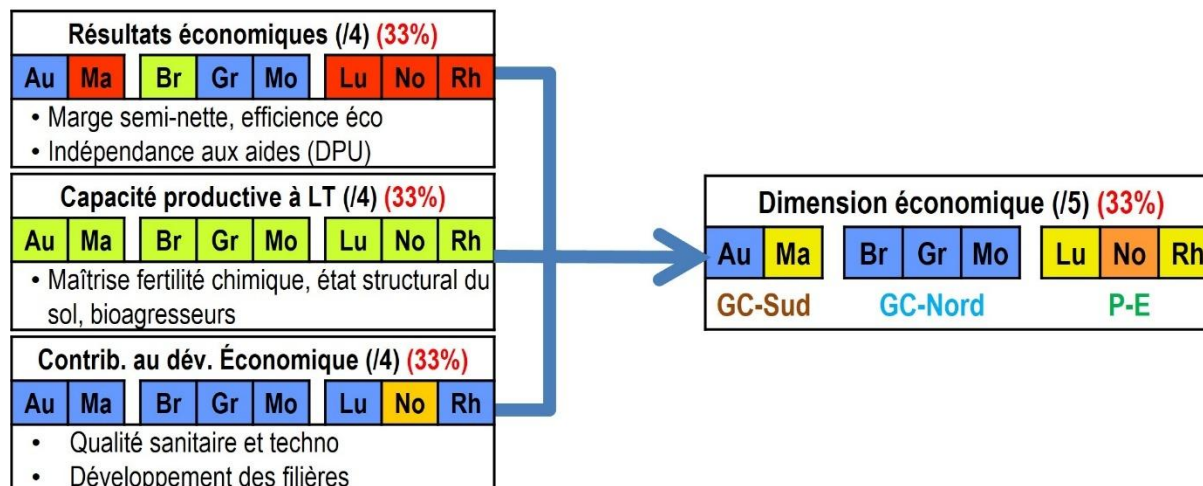


Figure 4 : Contribution à la dimension économique de huit systèmes de culture Rés0Pest (2013-2022).

2.2.1 Rendement et qualité des principales cultures

Le rendement de chacune des cultures des systèmes Rés0Pest **ne doit pas être interprété seul car ce sont les performances du système de culture qu'il faut considérer**. Néanmoins, il permet de constater le niveau de production atteint et de le comparer à l'objectif que s'était fixé l'expérimentateur et aux rendements observés en agriculture conventionnelle dans la petite région agricole où le système de culture a été testé.

En céréales, colza et betteraves, le rendement est souvent inférieur à celui des conduites conventionnelles mais il est supérieur à ce qui était attendu au début du projet pour des productions conduites sans pesticides (voir tableau 2 ci-dessous). Cela constitue en soi un résultat très important de cette expérimentation. Les rendements constatés en colza sont d'un niveau élevé, d'autant plus que le colza 2013 d'Estrées-Mons a subi des dégâts de grêle estimés à au moins 5.0 q.ha⁻¹. Sur le site de Bretenière, le colza a été détruit à deux reprises par les ravageurs d'automne mais il a été remplacé par une orge de printemps (50 q.ha⁻¹) la première fois ; et par une cameline (9.4 q.ha⁻¹) la seconde fois. Ces adaptations de la succession des cultures ont limité les pertes économiques. La pomme de terre de consommation, introduite sur le site d'Estrées-Mons à partir de 2019, a donné également de bons résultats, même si les lots sont parfois déclassés en raison de critères visuels. De bons résultats ont également été observés pour les betteraves sucrières dont le désherbage manuel s'est stabilisé autour de 20h.ha⁻¹.



Tableau 2 : Niveaux de rendements des principales cultures (q.ha⁻¹) et niveaux de satisfaction des expérimentateurs. Entre parenthèses, rendement en conventionnel dans la petite région ou sur le domaine expérimental si disponible. Le code couleur indique le niveau de satisfaction de l'expérimentateur (atteinte de l'objectif de rendement ou rendement équivalent à ceux de la petite région) Les cultures ne sont pas toutes présentes sur un site une année donnée. Au : Auzeville ; Ma : Mauguio ; Br : Bretenièrre ; Gr : Grignon ; Mo : Estrées-Mons ; Lu : Lusignan ; No : Nouzilly ; Rh : Le Rheu ; Pu : Purpan. MS : matière sèche.

Culture	Objectif de rdt* q.ha ⁻¹	Site	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Blé dur d'hiver	55	Au	37,6 (51)	34,8 (56)	42,4 (65)	28,8 (50)	48,7 (65)	37,8 (48)	37,7	28	31,6	-
	40	Ma	47	16,5	-	33,8	59	51	54	51,4	-	44
Blé tendre d'hiver	65	Au	46,2 (85)	48,5 (83)	55,8 (86)	43,8 (84)	53,0 (83)	52,8	46,7	41	46,9	-
	70	Br	56,1 (70)	56,1 (56)	68,6 (72)	-	61,8 (75)	65 (79)	61,9	37,6	50,5	60,1
	70	Mo	-	-	64,2 (112)	44,3 (56)	-	67	-	-	78,5	75,4
	55	Gr	-	71,7 (86)	81,5 (87)	42,5 (50)	57,8 (80)	54,3	-	46,1	-	-
	45	Lu	-	-	51,2 (75)	10,4 (40)	-	48,9	-	38,8	-	-
	60	No	53,6 (63)	36,4 (82)	61,0 (85)	-	76,3 (91)	45,2	52,7	56,1	57,7	-
	40	Pu	-	-	-	-	-	0	26	14 sorgho	-	-
	60	Rh	-	51,4	-	29,9	-	37,5	52,6	-	-	52
Triticale	70	Mo	70,7	82,2	-	40,3	-	-	70,6	89	-	-
	50	Gr	58,6 (65)	39,8 (65)	-	-	-	55,3	86,6	65,9	-	-
	65	Rh	33,1	-	-	67,7	-	21,9	-	26	49	-
Orge d'hiver	65	Mo	69,5	-	-	45,1	59,7	-	-	75,8	-	-
	35	Pu	-	-	-	-	-	-	40	9	37,5	-
	50	Rh	-	46	67,5	-	-	56,7	-	55	-	57
Orge de Printemps	50	Br	-	38,7 (38)	58,6 (37)	25,0 (39)	-	46,0 (57)	55	-	61	53,8
	30	Lu	-	30,0 (45)	-	19,9 (30)	-	-	-	0	12,8	-
Colza d'hiver	30	Br	-	30,7 (40)	-	-	35,8 (44)	23,0 (29)	-	16,7	9,4 cameline	-
	30	Mo	23,3 (40)	-	40,7 (43)	-	-	28	34	-	-	55,4
	20	Lu	-	-	-	18,8 (33)	17,0 (40)	-	8,7 tMS**	-	28,1	-
Tournesol	22	Au	26,2 (21)	25,2 (25)	29,1 (21)	18,2 (25)	36,8 (29)	-	-	-	-	-
	25	Br	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,8
	20	Ma	8,5 (20)***	13,0 (22)***	13,8 (21)***	-	7,7 (12,3)***	-	-	-	14,6 (26)***	-
	30	No	-	13,6 (29)	-	-	-	-	-	-	-	-
	15-20	Pu	-	-	-	-	-	13 (22)	13,5	-	-	-
Soja	20	Au	24,1 (26)	43,2 (37)	33,0 (35)	20,9 (29)	31,2 (30)	-	-	-	-	-



Culture	Objectif de rdt* q.ha ⁻¹	Site	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	25	Br	25,0 (36)	25,3 (25)	-	28,7 (30)	-	-	17,7	5,2	-	12,5
	20	Lu	70 (MS)**	*	50 (MS)*	*	-	-	Non réc. (15,5q/ha)	8,9	-	-
Betterave sucrière	500	Mo	-	1120 (1000)	726 (990)	-	993 (1010)	-	-	327	896	-
Betterave fourragère	150 (MS)	Rh	124	147	-	-	115	-	145	-	148	115
Pomme de terre	300	Mo							359	-	-	404

Satisfaction : Satisfaisant Moyennement satisfaisant Non satisfaisant
Essai terminé/non commencé ou culture absente de la succession sur cette campagne

* L'objectif de rendement est déterminé par l'expérimentateur en fonction des caractéristiques pédoclimatiques de l'essai et du potentiel des parcelles, du niveau des pressions biotiques (maladies, ravageurs et adventices) et en tenant compte du non recours aux pesticides.

** Culture mal levée et envahie par des adventices → récoltée en ensilage.

** entre parenthèses, le rendement hors dégâts d'oiseaux dus à la situation périurbaine de l'essai de Mauguio.

Tous les échantillons de céréales à paille récoltés dans les essais Rés0Pest ont été analysés par l'UR MycSA d'INRAE-Bordeaux, pour déterminer leur teneur en mycotoxines (voir tableaux 3 et 4 ci-dessous). En France, parmi les mycotoxines réglementées par l'UE, celle qui est la plus fréquemment retrouvée sur blé est le Déoxynivalénol, suivie de la Zéaralénone. La présence de Nivalénol reste plus occasionnelle. Les formes acétylées sont présentes à de très faibles niveaux et c'est pratiquement essentiellement du 15-Acétildéoxynivalénol (ADON). Les toxines T-2 et HT-2 sont quantifiées beaucoup moins fréquemment avec une occurrence plus importante chez l'orge³.

Tableau 3 : Résultats d'analyses mycotoxines pour Déoxynivalénol, ADON et Nivalénol

	Déoxynivalénol	ADON*	Nivalénol
Campagnes 2013 et 2014, seuil de quantification = 500 ng.g⁻¹ (HPLC-DAD)			
Nb analyses	58	58	34
<=500 ng.g ⁻¹	54 (93%)	58 (100%)	34 (100%)
>500 ng.g ⁻¹	4 (7%)	0	0
Teneur maxi	1271 ng.g ⁻¹	<500 ng.g ⁻¹	<500 ng.g ⁻¹
Campagnes 2015 à 2023, seuil de quantification = 50 ng.g⁻¹ (HPLC-MS)			
Nb analyses	318	318	318
<=50 ng.g ⁻¹	235 (74%)	317 (99,7%)	310 (97%)
>50 et <=500 ng.g ⁻¹	59 (19%)	1 (0,3%)	8 (3%)
>500 et <= 1000 ng.g ⁻¹	17 (5%)	0	0
>1000 et <= 2000 ng.g ⁻¹	5 (2%)	0	0
> 2000 ng.g ⁻¹	2 (1%)	0	0
Teneur maxi observée	2629 ng.g ⁻¹	58 ng.g ⁻¹	158 ng.g ⁻¹

* acétyldéoxynivalénol, somme des formes 3 et 15

³ Source Florence FORGET, UR MycSA - INRAE



Tableau 4 : Résultats d'analyses mycotoxines pour Zéaralénone Fusarénone X, et les toxines T2 et HT2, campagnes 2015 à 2023, seuil de quantification = 10 ng.g⁻¹ (HPLC-MS)

	Zéaralénone	Fusarénone X **	Toxine HT-2	Toxine T2 ***
Nb analyses	318	290	156	120
<=10 ng.g ⁻¹	316 (99%)	282 (97%)	156 (100%)	120 (100%)
10-100 ng.g ⁻¹	2 (1%)	8 (3%)	0	0
Teneur maxi	17 ng.g ⁻¹	22 ng.g ⁻¹	<10 ng.g ⁻¹	<10 ng.g ⁻¹

** forme acétylée de la nivalénol *** forme acétylée de la toxine HT-2

Les résultats témoignent d'une bonne qualité sanitaire des récoltes puisque sur la période 2013-2022, très peu de lots dépassent une teneur de 50 ng.g⁻¹ pour Déoxynivalénol, ADON et Nivalénol (tableau 3). Pour la mycotoxine Déoxynivalénol (voir annexe 4), un seul lot a dépassé la norme pour l'alimentation humaine en raison du durcissement de celle-ci depuis avril 2024 : (1000 ng.g⁻¹ pour blé tendre et orge brassicole et 1500 ng.g⁻¹ pour le blé dur⁴. Pour la Zéaralénone et les toxines T2 et HT2, aucun lot ne dépasse la norme pour l'alimentation humaine⁵. Pour l'alimentation animale aucun lot ne dépasse la recommandation (8000 ng.g⁻¹ pour orge d'hiver et triticales. **On constate donc qu'il est généralement possible d'utiliser des céréales produites sans traitements fongicides dans les filières de l'alimentation humaine et animale.**

2.2.2 Rentabilité des systèmes de culture

Dans MASC 2.0, la rentabilité est estimée par la marge semi-nette du système de culture :

Marge Semi-Nette = (Produit Brut + Aides⁶) - (Charges Opérationnelles + Charges de Mécanisation)

La note MASC 2.0 est attribuée avec la méthode du RMT SdCi, selon le nombre de SMIC dégagés par le système de culture pour une Unité Travailleur Humain (UTH) :

$$Seuil_{Nb} = \frac{Nb * SMIC \text{ brut annuel par UTH}}{\text{Surface Agricole Utile par UTH}} + \frac{\text{Fermage}}{\text{ha}} + \text{Charges de structure/ha}$$

La marge semi-nette sera :

1. « **Très faible** » si elle est inférieure au seuil1 (moins d'un SMIC/UTH dégagé) ;
2. « **Faible à moyenne** » si elle se situe entre le seuil1 et le seuil2 (entre un et deux SMIC/UTH dégagés) ;
3. « **Moyenne à élevée** » si elle se situe entre le seuil2 et le seuil3 (entre deux et trois SMIC/UTH dégagés) ;
4. « **Très élevée** » si elle est supérieure au seuil3 (plus de trois SMIC/UTH dégagés).

Les seuils sont donc propres à chaque système et la marge semi-nette est calculée selon différents scénarios de prix, communs à tous les systèmes (Tableau 5).

Par rapport à la méthode utilisée dans Cellier et al (2018), avec les scénarios de prix mis au point par le RMT Systèmes de Culture innovants, **nous avons choisi d'utiliser les indices de prix IPPAP et IPAMPA publiés par FranceAgriMer** pour analyser comment évoluait la rentabilité des systèmes de

⁴ Règlement (UE) 2024/1022 de la Commission du 8 avril 2024 modifiant le règlement (UE) 2023/915 en ce qui concerne les teneurs maximales en déoxynivalénol des denrées alimentaires

⁵ RÈGLEMENT (UE) 2024/1038 DE LA COMMISSION du 9 avril 2024 modifiant le règlement (UE) 2023/915 en ce qui concerne les teneurs maximales en toxines T-2 et HT-2 des denrées alimentaires.

⁶ Les aides prises en compte ici sont celles qui étaient en vigueur au début de l'essai RésOPest, c'est-à-dire avant la mise en œuvre de la réforme de 2023.



culture en fonction de l'évolution des prix sur la période 2013-2022. La valeur du SMIC annuel utilisé est issue des données de l'INSEE⁷. La valeur du fermage fournie par les expérimentateurs au début du projet Rés0Pest (2013) et les charges de structure ont été fixées à 100 €.ha⁻¹ (source Arvalis). Les données utilisées figurent dans les annexes 2, 3.

Pour cela nous avons :

1. Calculé les résultats techniques du système de culture (rendement, intrants, charges de mécanisation...) à partir de **la moyenne de toutes les conduites (parcelles) du système de culture** (la période d'expérimentation est précisée dans le nom du système de culture) ;
2. Calculé les résultats économiques d'une campagne à partir des résultats techniques du SdC (calculé en 1-), **en prenant en compte les données économiques de la campagne considérée** (ex. Marge Semi-Nette du SdC Bretenière 2013-2022 évaluée avec les prix (intrants et vente des cultures) de la campagne 2022 = 610 €.ha⁻¹).

Le tableau 5 montre la marge semi-nette des systèmes de culture selon les scénarios de prix avec indication du niveau de revenu/UTH associé par un code couleur. La rentabilité moyenne des systèmes Rés0pest est très variable d'un système à un autre : de 59 €.ha⁻¹.an⁻¹ au Rheu à 885 €.ha⁻¹.an⁻¹ à Estrées-Mons. Il est possible d'obtenir une bonne rentabilité pour des systèmes de culture sans pesticides au moins dans certaines situations de production (Estrées-Mons, Auzeville, Grignon, et dans une moindre mesure Bretenière) et ceci sans compensation économique dans le prix de vente des produits récoltés.

Tableau 5 : Evolution de la marge semi-nette à l'hectare selon les scénarios de prix.

Département, site et période d'expérimentation	Scénarios de prix										Moyenne scénarios
	Sc1 (2013)	Sc2 (2014)	Sc3 (2015)	Sc4 (2016)	Sc5 (2017)	Sc6 (2018)	Sc7 (2019)	Sc8 (2020)	Sc9 (2021)	Sc10 (2022)	
31 Auzeville 2013-2017	914	714	663	725	614	572	630	660	690	945	713
21 Bretenière 2013-2022	688	525	430	466	417	394	491	464	482	610	497
34 Mauguio 2013-2022	267	187	271	319	174	157	159	217	232	388	237
78 Grignon 2013-2020	849	669	570	609	556	544	656	631	663	784	653
80 Estrées-Mons 2013-2022	1106	839	772	868	786	724	808	830	883	1148	876
37 Nouzilly 2013-2022	543	413	350	385	355	325	401	386	402	516	408
35 Le Rheu 2013-2022	199	92	40	75	32	17	92	89	76	115	83
86 Lusignan 2013-2022	438	373	351	378	365	342	371	386	367	400	377

Code couleur revenu / UTH : ■ < 1 Smic ■ 1 à 2 Smic ■ 2 à 3 Smic ■ > 3 Smic

Les systèmes de polyculture-élevage ont plus de mal à dégager une bonne rentabilité même si, par rapport à la première évaluation réalisée en 2018, on a choisi une surface cultivable/UTH plus élevée (passage de 70 à 100 ha.UTH⁻¹, uniquement pour la conduite du système de culture), mais cela reste à resituer dans le cadre du système d'élevage auquel il fournit une partie des ressources alimentaires et qui dégage aussi un revenu pour l'agriculteur. Le site du Rheu a des performances particulièrement basses, cependant, ces mauvaises performances économiques sont dues principalement au test d'une méthode d'implantation de la betterave fourragère en mini-mottes qui permet d'assurer un bon démarrage de la culture et de limiter les opérations de désherbage manuel, mais qui n'est pas viable économiquement : 3000 €.ha⁻¹ de plants et 90 h.ha⁻¹ de main d'œuvre (1500 €.ha⁻¹). Dans la précédente évaluation (2013-2017, donc avant l'adoption de ce mode d'implantation des betteraves fourragères), la marge semi-nette du site du Rheu (469 €.ha⁻¹) était supérieure à celles de Lusignan (410 €.ha⁻¹) et de Nouzilly (434 €.ha⁻¹).

Pour les systèmes de grande culture, la mauvaise performance du site de Mauguio est due aux échecs de la culture du pois chiche qui était une culture nouvelle sur le site, aux problèmes de dégâts d'oiseaux sur tournesol (le site est situé en zone périurbaine favorable à ce genre de dégâts dont on estime la perte économique à environ 200 €.ha⁻¹), ainsi qu'aux déficits hydriques de certaines années, non compensés

⁷ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1375188>



par l'irrigation qui n'est pas autorisée sur ce système car peu réaliste (sauf dans le cas de production de semences).

Dans ces calculs, **aucune valorisation économique particulière des récoltes produites sans pesticides, n'a été appliquée** alors qu'il serait normal que ces productions soient mieux valorisées. Une reconnaissance des services de préservation de la biodiversité et de la protection de la santé humaine, via une compensation économique dans le prix de vente, permettrait d'améliorer la rentabilité de ces systèmes de culture. A partir de ces résultats, on peut estimer qu'en dehors des sites de polyculture-élevage et du site de Mauguio dont la rentabilité est très faible, une meilleure valorisation des productions, de l'ordre de 20 à 30%, permettrait d'atteindre une rentabilité satisfaisante. Ce « surcoût » est à mettre en regard des coûts cachés de l'utilisation des produits phytopharmaceutiques (impacts sur la biodiversité et différents services écosystémiques, impacts sur la santé humaine, coût de dépollution de l'eau notamment ; Bourguet et Guillemaud, 2016).

En ce qui concerne la variabilité des performances économiques, il est difficile de les mettre en évidence dans la mesure où, sauf pour le site d'Auzeville, tous les termes de la succession ne sont pas présents chaque année. On peut néanmoins penser que des systèmes diversifiés peuvent être assez robustes en cas de conditions défavorables. Par exemple, sur le site de Bretenière en 2016 (année fortement défavorable aux céréales à paille), la contreperformance des céréales (orge de printemps (25 q/ha) et dans une moindre mesure association blé-pois (38,7 q/ha)) a été compensée par de bonnes performances des cultures de printemps (Chanvre industriel et Soja).

2.3 Dimension sociale

La durabilité sociale est très disparate entre les sites puisqu'elle va de « Faible » à « Très élevée » (figure 5). Globalement, les attentes des agriculteurs sont plutôt bien prises en compte avec un niveau « Moyen à élevé » à « Très élevé » avec peu de risques pour la santé (pas de produits dangereux utilisés) mais plus de complexité dans les interventions et de surcharges de travail.

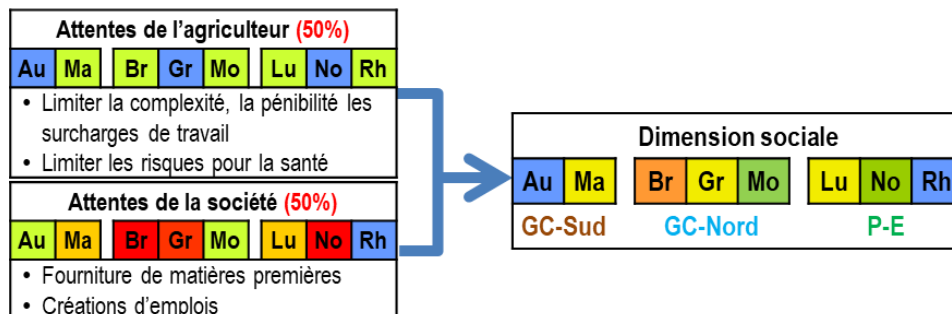


Figure 5 : Contribution à la dimension sociale de huit systèmes de culture Rés0Pest (2013-2022).

Les attentes de la Société sont moins bien prises en compte, tant au niveau de la fourniture de matières première qui est en retrait quantitatif par rapport au potentiel de production en culture intensive, que de la contribution à l'emploi. Ce critère d'évaluation est favorable pour la durabilité sociale mais pénalisant pour les résultats économiques car la main d'œuvre est comptabilisée dans les charges. Il faut également souligner qu'il ne correspond pas aux objectifs visés lors de la conception, les systèmes de grande culture étant généralement peu générateurs d'emplois. De plus, on peut se poser la question de savoir si ce besoin en main d'œuvre très ponctuel, voire aléatoire en fonction d'éventuels « accidents de culture », peut être facilement satisfait et s'il présente un réel intérêt pour la Société au vu de son caractère très précaire.



2.4 Dimension environnementale

La durabilité environnementale a été « très élevée » pour tous les systèmes de culture (Figure 6). Le bilan est plus nuancé en ce qui concerne la qualité du sol, en raison d'une maîtrise du statut organique « faible » ou « faible à moyenne » sur certains sites avec un recours important au travail du sol.

Cet effet du travail du sol se retrouve également sur la conservation de biodiversité, en particulier en raison de son effet négatif sur la conservation de la macrofaune du sol où six sites ont une note « Faible à moyenne » pour ce critère.

La non-utilisation de pesticides a eu un effet positif sur les indicateurs de qualité du milieu (eau et air), ainsi que sur la conservation de la biodiversité.

En raison d'une utilisation réduite de la fertilisation minérale, les indicateurs correspondants (maîtrise des pertes de P et de NO₃ dans l'eau, maîtrise des émissions de NH₃ et de N₂O dans l'air) sont « moyens à élevés » ou « très élevés », sauf pour la maîtrise des émissions de NH₃ dans l'air sur le site de Nouzilly qui utilise beaucoup d'engrais organiques. Sur le site d'Estrées-Mons, la consommation d'énergie est

importante en raison de nombreuses interventions de travail du sol comme le désherbage mécanique.

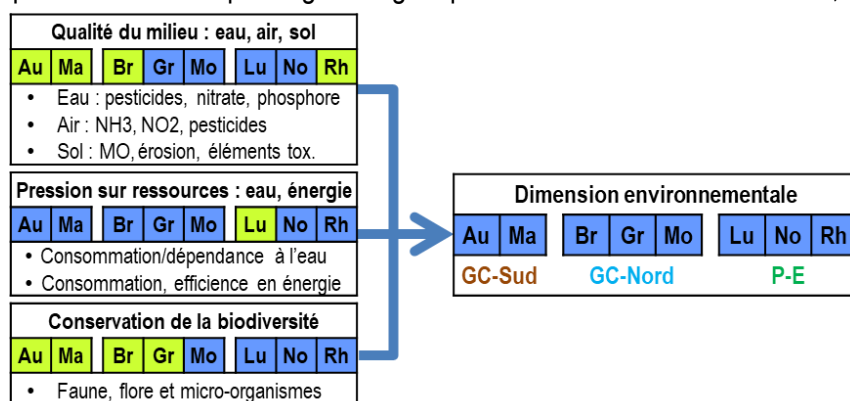


Figure 6 : Contribution à la dimension environnementale de huit systèmes de culture Rés0Pest (2013-2022).

3 Apprentissages et dynamique de réseau

Dans le réseau, la formation et le partage d'expérience ont permis de progresser ensemble dans la maîtrise des systèmes de culture sans pesticides. Début 2022, un bilan des apprentissages a été réalisé lors d'un séminaire des expérimentateurs.

La question posée aux expérimentateurs était de donner trois exemples de réussites, d'apprentissages ou de difficultés qu'ils avaient rencontrés aux cours de la conduite de leurs systèmes. Les points essentiels mentionnés sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Réussites, apprentissages et difficultés mentionnés par les expérimentateurs Rés0Pest.

NIVEAU DE MAITRISE DES ADVENTICES	<ul style="list-style-type: none"> « Importance du désherbage mécanique dans la gestion des adventices » « Beaucoup d'apprentissages dans ces techniques de désherbage mécanique, ne pas hésiter à attaquer tôt ! » « La maîtrise est difficile sur le rang » « Importance d'alterner les périodes de semis » « Maîtrise des vivaces délicate mais possible, peut-être aussi apprendre à vivre avec »
NIVEAU DE MAITRISE DES RAVAGEURS	<ul style="list-style-type: none"> « Problématiques sur colza, pois chiches, betteraves... » « Peu de problèmes de limaces »
MAITRISE DES MALADIES	<ul style="list-style-type: none"> « Peu de problèmes de maladies dans le réseau »
CHOIX DES CULTURES ET SUCCESSION	<ul style="list-style-type: none"> « Élément clé des successions » « Le chanvre est reconnu pour son effet d'étouffement » (2 sites)
CHOIX VARIETAL	<ul style="list-style-type: none"> « Des difficultés à trouver des variétés adaptées ET non traitées »



COUVERTURE DU SOL	<ul style="list-style-type: none"> - « Essentielle pour lutter contre les adventices » - « Mais difficulté pour réussir les couverts en conditions sèches » - « Coût non négligeable des semences »
PHASE D'IMPLANTATION DES CULTURES	<ul style="list-style-type: none"> - « Essentielle pour assurer une bonne couverture du sol et permettre un désherbage mécanique précoce » - « Beaucoup d'apprentissages sur le choix de la date de semis, en particulier pour les cultures de printemps »
FERTILISATION AZOTEE	<ul style="list-style-type: none"> - « Difficile à gérer, en particulier sur céréales » - « Il faut adapter la dose au potentiel de rendement en cours de campagne » - « Veiller à ne pas favoriser les adventices »
TEMPS DE TRAVAIL	<ul style="list-style-type: none"> - « Surcharge de travail peu mentionnée dans les retours » - « Manque de créneaux de désherbages à l'automne »
TRAVAIL DU SOL	<ul style="list-style-type: none"> - « Les systèmes de culture Rés0Pest sont dépendants du travail du sol »

4 La gestion des plantes adventices dans Rés0Pest

La gestion des plantes adventices est un exemple de l'évolution de la maîtrise technique des systèmes de culture sans pesticides, en particulier en raison des conséquences que peut avoir une mauvaise gestion ponctuelle des plantes adventices sur le long-terme, en contribuant à l'enrichissement du stock semencier des parcelles. Dans la publication de 2018, on trouve une classification faite par les expérimentateurs, de l'importance relative des leviers au sein de la stratégie de gestion des plantes adventices mise en œuvre dans leur système de culture ([Innovations Agronomiques 70, 273-289](#)).

4.1 Perception de la maîtrise des plantes adventices par les expérimentateurs

La note de maîtrise des plantes adventices utilisée dans l'évaluation multicritère des systèmes de culture Rés0Pest est donnée « à dire d'expert » par l'expérimentateur en fonction des résultats qu'il obtient et des difficultés rencontrées. Après une période de mise au point en début de projet (2013-2015), les expérimentateurs considèrent qu'ils maîtrisent mieux les plantes adventices (2017) et qu'elles n'impactent pas le potentiel de production (voir tableau 7 ci-dessous). Pour les deux sites où le potentiel de production reste un peu dégradé, il s'agit principalement de problèmes de gestion des rumex dans les prairies temporaires. En 2022, cette perception est confirmée, sauf pour le site d'Estrées-Mons.

	2015	2017	2022
Auzeville	Orange	Vert	Vert
Mauguio	Orange	Vert	Vert
Bretonnière	Orange	Vert	Vert
Grignon	Orange	Vert	Vert
Estrées-Mons	Orange	Vert	Orange
Lusignan	Orange	Vert	Vert
Nouzilly	Orange	Vert	Vert
Le Rheu	Orange	Vert	Vert
Purpan	--	--	Vert

Tableau 7 : Evolution de la note de maîtrise des plantes adventices attribuée par les expérimentateurs aux systèmes Rés0Pest entre 2015 (2018 pour Purpan) et 2022. La couleur indique si le potentiel de production s'est un peu dégradé du fait de la présence de plantes adventices (orange) ou s'il est maintenu (vert).

4.2 Evolution du rapport biomasse adventice/biomasse totale

Les données recueillies dans les essais Rés0Pest, en particulier les mesures de biomasse culture et plantes adventices, permettent de disposer d'un jugement plus objectif sur l'évolution de la flore adventice dans ces systèmes de culture sans pesticides (faute de relevés quantitatifs, le site de Mauguio n'est pas représenté).

Dans les expérimentations Rés0Pest, des prélèvements de biomasse culture et plantes adventices ont été réalisés dans les parcelles au moment de la fermeture du rang (qui correspond à peu près à la



floraison pour les céréales). Ces prélèvements ont été réalisés sur 4 à 8 placettes / parcelle et ils ont été séchés et pesés pour calculer le rapport suivant :

$$R_{adv} = \frac{\text{Biomasse adventices}}{\text{Biomasse adventice} + \text{Biomasse culture}}$$

Par construction, ce rapport évolue entre 0 (aucune plante adventice) et 1 (la biomasse prélevée correspondant alors uniquement à des plantes adventices). Cet indicateur est considéré comme un indicateur des pertes de rendement⁸.

En l'absence de prélèvements, la donnée est indiquée manquante, mais dans quelques rares cas où l'expérimentateur a clairement noté que les plantes adventices étaient quasiment absentes et qu'il n'y avait donc pas eu de prélèvements, elle a été mise à zéro.

Les graphiques présentés ci-dessous montrent l'évolution dans le temps de ces rapports et donc de la capacité des systèmes de culture à maîtriser les adventices. Etant donné que la population d'adventices est inféodée à l'historique de la parcelle, **il est important de considérer l'évolution du rapport sur une même parcelle**. Dans les graphiques, en cas de donnée manquante, la ligne reliant les points d'une même parcelle est interrompue.

Les graphiques de la figure 7 montrent (i) qu'il n'y a pas d'évolution flagrante des populations d'adventices (ni en positif, ni en négatif), (ii) qu'il peut y avoir une mauvaise maîtrise des adventices certaines années mais que les populations d'adventices peuvent être régulées les campagnes suivantes, montrant ainsi la résilience de ces systèmes de culture.

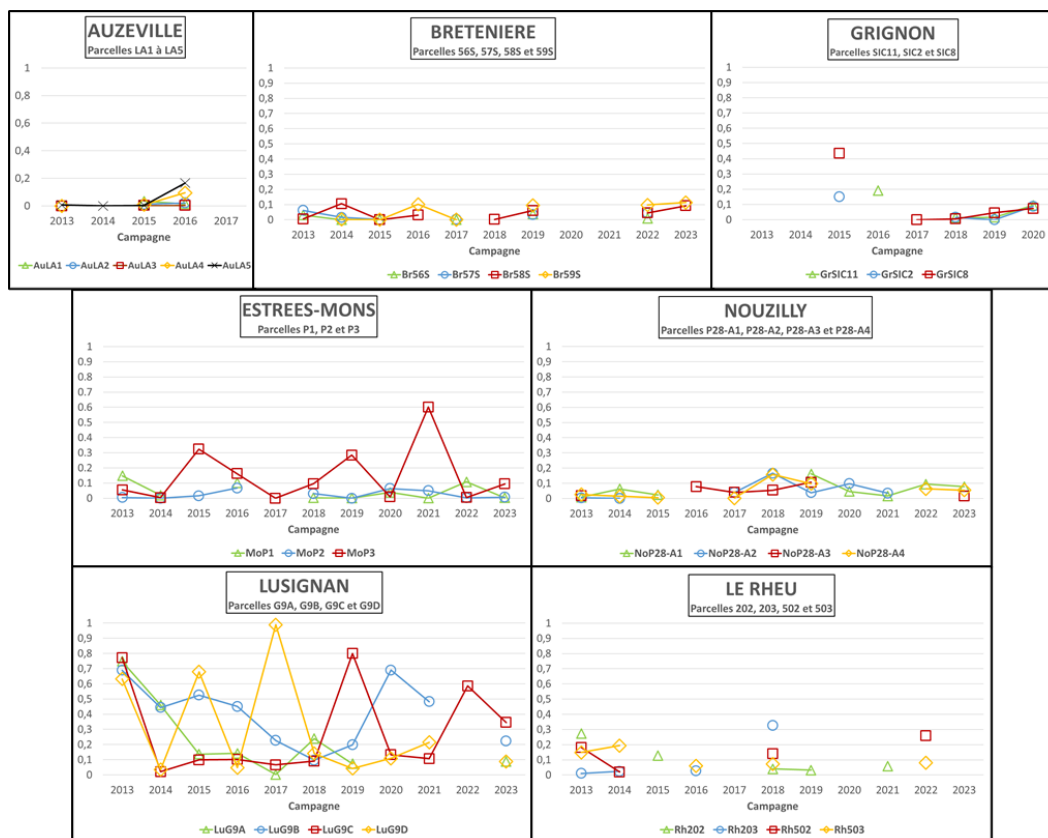


Figure 7 : Evolution des rapports biomasse adventices / biomasse totale dans les parcelles Rés0Pest entre 2013 et 2023.

⁸ Nicolas Munier-Jolain, Maiwen Abgrall, Guillaume Adeux, Lionel Alletto, Catherine Bonnet, et al., Projet SYSTEM-ECO4 : Évaluation de systèmes de grandes cultures à faible usage de pesticides. Innovations Agronomiques, INRA, 2018, 70, pp.257-271. hal-02105004



4.3 Une gestion originale des infestation de plantes adventices dans les systèmes de polyculture-élevage : exemple du site de Lusignan

Le site de Lusignan est celui où il y a eu le plus de fluctuations du rapport biomasse adventice / biomasse totale. Dans le cadre d'un essai système de culture, il y a un fort intérêt à aller au-delà du seul résultat obtenu afin : (i) de comprendre précisément les raisons d'un échec ou d'une réussite ; (ii) de déterminer si la cause dépend ou non du système de culture tel qu'il a été conçu ; et (iii) dans l'affirmative, d'envisager des adaptations du système.

Lusignan est un site en polyculture-élevage et, à ce titre, il dispose de leviers supplémentaires pour gérer les plantes adventices puisqu'il est possible de récolter certaines cultures en fourrage dans le cas d'un développement très important d'adventices. A ce titre, l'exemple du colza de la campagne 2019 est intéressant à considérer.

- La mauvaise levée des colzas a été générale dans la petite région agricole et n'est donc pas spécifique au système Rés0Pest ;
- Dans le système Rés0Pest de Lusignan, au lieu de ressemer une culture, la récolte a pu être faite en ensilage avec un rendement de 63 q.ha⁻¹ (MS), assez proche d'un objectif de rendement d'une prairie ;
- Cette option a permis de gérer les plantes adventices et d'éviter leur multiplication comme le montre l'évolution du rapport biomasse adventices / biomasse totale qui est passé de 0,8 (colza 2019) à 0,13 (sorgho 2020) ;
- Au niveau économique, il n'y a pas eu de frais d'implantation d'une culture de remplacement.

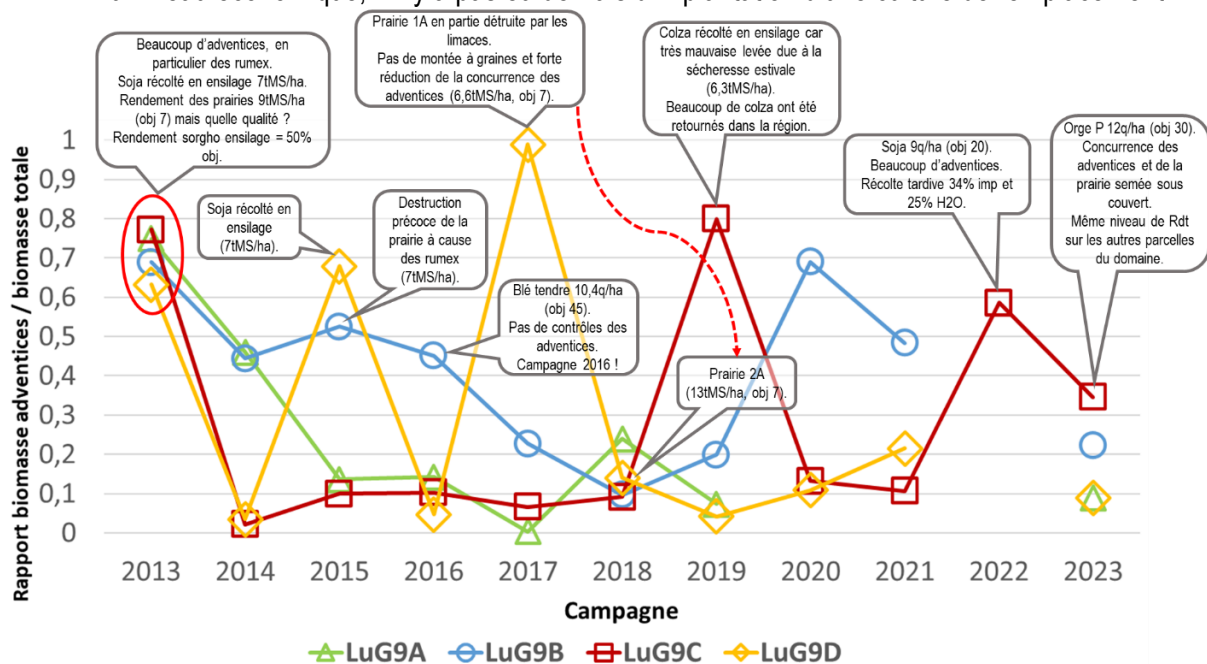


Figure 8 : Evolution du rapport biomasse adventice / biomasse totale sur les parcelles du site de Lusignan (parcelles G9A à G9D), avec les commentaires de l'expérimentateur.

5 Conclusions et perspectives

Même s'il ne faut pas occulter certains échecs rencontrés par ces systèmes de culture, les niveaux de production atteints (quantité et qualité), le maintien de la capacité productive à long-terme (fertilité physico-chimique et maîtrise des bioagresseurs), et dans une moindre mesure les résultats économiques obtenus, sont très encourageants pour des systèmes de culture **avec un tel niveau de rupture vis-à-vis de l'utilisation des pesticides**. Ces résultats sont originaux et constituent des références importantes, d'autant plus qu'ils bénéficient d'un recul de dix années d'expérimentation. Les systèmes



ont pu être améliorés au fur et à mesure et les expérimentateurs ont pu progresser dans l'apprentissage de la conduite des essais systèmes de culture.

Une des clés de la rentabilité de ces systèmes de culture réside sans doute dans la possibilité de mieux valoriser les récoltes issues de culture non traitées et qui ont donc un impact moindre sur l'environnement et la santé. L'étude d'un cahier des charges aboutissant à un label particulier dépasse largement le cadre de cette étude et nécessite d'autres moyens et compétences. Par ailleurs, on peut aussi penser que dans l'avenir on pourra disposer de variétés plus adaptées à ce type de système de culture (rusticité, pouvoir couvrant...).

L'expérimentation Rés0Pest va s'arrêter dans certains sites (Grignon, depuis 2020 ; Mauguio et Bretenièrre – mais la plateforme CA-SYS comporte un système de culture très proche de celui de Rés0Pest – le site de Purpan est d'ores et déjà engagé dans un projet de la région Occitanie. Un projet, appelé « 0Phyto », sera déposé à l'appel à projet DEPHY EXPE 3, sur la base des résultats obtenus par Rés0Pest afin de continuer à valoriser ces dispositifs originaux et à acquérir des références. Cette poursuite de l'expérimentation sera l'occasion de se rapprocher de l'Agriculture Biologique.

Il est important de souligner la force que représente un réseau expérimental de neuf sites pour analyser les résultats de systèmes de culture différents, tous conçus selon les principes de la protection intégrée des cultures avec un cahier des charges commun. Les enseignements qui pourront être tirés de ces expérimentations seront plus robustes s'il s'avère qu'ils sont communs à tous les sites ou pourront être nuancés selon leur adaptation à certaines situations de production.

Un des résultats importants de Rés0Pest est d'avoir bâti une communauté d'expérimentateurs système de culture dans les unités expérimentales participantes.

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.

ORCID des auteurs

Jean-Noël AUBERTOT ([0000-0001-6048-1553](https://orcid.org/0000-0001-6048-1553)), Vincent CELLIER ([0009-0007-5182-2230](https://orcid.org/0009-0007-5182-2230)), Diana ORTIZ ([0000-0001-6120-5788](https://orcid.org/0000-0001-6120-5788)), Marie-Hélène ROBIN ([0000-0002-3108-3908](https://orcid.org/0000-0002-3108-3908)), Antoine SAVOIE ([0000-0002-1606-4020](https://orcid.org/0000-0002-1606-4020)).



Contributions des auteurs

		Conceptualization	Data curation	Formal analysis	Funding acquisition	Investigation	Methodology	Project administration	Resources	Software	Supervision	Validation	Visualization	Writing – original draft	Writing – review & editing
Authors	Vincent CELLIER	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X
	Diana ORTIZ			X			X		X			X	X	X	X
	Caroline COLNENNE-DAVID	X			X	X	X				X	X			
	Sébastien DARRAS	X			X	X	X				X	X			X
	Valentin DEREMETZ					X	X				X	X			X
	Violaine DETIEUX	X		X	X		X		X		X				
	Antoine SAVOIE	X			X	X	X				X	X			X
	Jean-Noël AUBERTOT	X		X	X		X				X				X
Contributors	Guillaume AUDEBERT					X									
	Alain BERTHIER					X									
	Pascal COCANDEAU					X									
	Rosemonde DEVAUX					X									
	Brigitte MONTEGANO					X									
	Jordan PIRAULT					X									
	Ludivine PIRUS					X									
	Marie-Hélène ROBIN	X					X								X
	Jean-Marc VALDRINI					X									X

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ne pas 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.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier tous les agents des unités expérimentales INRAE, du lycée agricole d'Auzeville et de l'École d'Ingénieurs de PURPAN (domaine de Lamothe) qui ont mis leurs compétences au service des essais RésOPest. Merci également à Florence FORGET, Marie-Noëlle VERDAL-BONNIN, Sylvain CHEREAU et Stéphane BERNILLON de l'UR MycSA pour la réalisation des analyses mycotoxines et leur aide dans l'interprétation des résultats.

Déclaration de soutien financier



Action du plan Ecophyto piloté par les ministères en charge de l'agriculture, de l'écologie, de la santé et de la recherche, avec l'appui technique et financier de l'Office français de la Biodiversité.




Références bibliographiques :

Adeux G., 2020. Thèse. Highlighting the role of diversity in driving weed community dynamics and weed:crop interactions (<https://hal.inrae.fr/tel-03211016>).

Bourguet D., Guillemaud T., 2016. The hidden and external costs of pesticide use. Sustainable Agriculture Reviews, 19, Springer International Publishing, pp.35-120, 2016, Sustainable Agriculture Reviews, 978-3-319-26776-0.

Munier-Jolain N., Abgrall M., Adeux G., Alletto L., Bonnet C., et al.. Projet SYSTEM-ECO4 : Évaluation de systèmes de grandes cultures à faible usage de pesticides. Innovations Agronomiques, INRA, 2018, 70, pp.257-271. hal-02105004

Voir aussi les références bibliographiques figurant dans [Innovations Agronomiques 70, 273-289](#).



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.

ANNEXES

Annexe 1 : Principales caractéristiques du site expérimental du domaine de Lamothe (El Purpan) qui a rejoint le réseau Rés0Pest en 2018.

CLIMAT (SOURCE METEO FRANCE)	Océanique dégradé sous influence méditerranéenne (650 mm/an) : - Température : mini = 9,4°C, moyenne = 13,9°C, Maxi = 18,5°C - Précipitation moyenne : 625,6 mm.an-1 (moyenne 1981-2010)
TYPE DE SOL	Limono-argilo-sableux avec présence de galets (sol boubène), la texture varie fortement sur le site Profondeur du sol : environ 30 cm, réserve utile : environ 60 mm Hydromorphie hivernale et sécheresse estivale fréquentes, limitent le potentiel des cultures
PARCELLES	4 parcelles de 0,4 ha.
INFRASTRUCTURES AGROECOLOGIQUES	Différents types d'éléments paysagers sont présents autour de la parcelle : lac arboré, haies, zone humide et berge douce (Depuis 2020), bandes enherbées et bandes fleuries et fossé.
CULTURES REPRESENTATIVES	Cultures fourragères, blé tendre et orge
ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX	Le site expérimental se situe en zone vulnérable nitrate, à moins de 2 km d'un affluent de la Garonne et à 7 km de cette dernière (nappe phréatique très superficielle) Des zones résidentielles sont également présentes à moins d'un kilomètre du site


Annexe 2 : Données propres aux sites, utilisées dans les calculs de l'évaluation multicritère

DEPARTEMENT, SITE ET PERIODE	HA/UTH	CH. STRUCTURE (€.HA ⁻¹)	FERMAGE (€.HA ⁻¹)	AIDES (€.HA ⁻¹)
31 AUZEVILLE 2013-2017	120	100	200	307
21 BRETENIERE 2013-2022	150	100	157	274
34 MAUGUIO 2013-2022	120	100	170	129
78 GRIGNON 2013-2020	110	100	108	325
80 ESTREES-MONS 2013-2022	110	100	150	413
37 NOUZILLY 2013-2022	100	100	110	294
35 LE RHEU 2013-2022	100	100	155	388
86 LUSIGNAN 2013-2022	100	100	200	297

Annexe 3 : Prix des unités fertilisantes, du carburant (GNR) et valeur du SMIC annuel pris en compte dans l'évaluation économique des systèmes de culture

		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
PRIX UNITES FERTILISANTES (€/KG)	N	1,04	1,02	1,03	0,86	0,85	0,90	0,92	0,84	1,23	2,40
	Ammonitrate										
	N Liquide	0,80	0,79	0,80	0,66	0,66	0,69	0,71	0,65	0,95	1,86
	N Urée	0,91	0,86	0,84	0,67	0,70	0,74	0,77	0,71	1,13	1,99
	Phosphore	0,95	0,88	0,96	0,87	0,82	0,87	0,90	0,80	1,07	1,85
	KCL60	0,68	0,62	0,65	0,62	0,58	0,60	0,63	0,59	0,71	1,26
	KCL40	0,69	0,62	0,65	0,63	0,59	0,61	0,63	0,60	0,72	1,27
Soufre	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
CARBURANT (€.L ⁻¹)	0,76	0,71	0,54	0,47	0,55	0,67	0,65	0,49	0,66	1,09	
SMIC ANNUEL (€.UTH ^{-1*})	17163	17345	17490	17599	17763	17982	18255	18473	19074	19237	

* UTH = Unité Travailleur Humain

Annexe 4 : Teneur maximale en Déoxynivalénol dans les échantillons de récolte (moyenne de deux mesures).

ANNEE	MAX DON (NG.G ⁻¹)	CULTURE ET SITE CONCERNES, REMARQUE
2013	1251	Triticale, Grignon
2014	<500	Seuil de quantification
2015	94	Blé dur Auzeville
2016	1204	Blé tendre hiver, Grignon
2017	682	Triticale, Nouzilly
2018	659	Blé tendre hiver, Nouzilly
2019	2550	Triticale, Nouzilly
2019	721	Blé tendre hiver, Nouzilly
2020	669	Blé dur Auzeville
2021	15	Blé tendre hiver, Nouzilly
2022	0	Aucune détection



Annexe 5 : Arbre MASC de l'évaluation multicritère Rés0Pest sur la période 2013-2022. les pondérations attribuées à chaque attribut de la durabilité sont indiquées en rouge et le nombre de niveaux de l'échelle utilisée figure à droite du libellé. Le remplissage des cadres correspond à la couleur des échelles génériques ordinales de notation de la durabilité MASC 2.0. Le nom des sites est abrégé de la façon suivante : Auzeville (Au), Mauguio (Ma), Bretenière (Br), Grignon (Gr), Estrées-Mons (Mo), Lusignan (Lu), Nouzilly (No), Le Rheu (Rh)

