



Réduction d'usage des phytosanitaires et émissions de gaz à effet de serre en systèmes de grande culture du Nord de la France (System-Eco+)

Célestin Valentin, Paul Belleville, Sébastien Darras, Fabien Ferchaud, Joël Leonard, Laure Mamy, Jérôme Pernel, Guillaume Vitte

► To cite this version:

Célestin Valentin, Paul Belleville, Sébastien Darras, Fabien Ferchaud, Joël Leonard, et al.. Réduction d'usage des phytosanitaires et émissions de gaz à effet de serre en systèmes de grande culture du Nord de la France (System-Eco+). *Innovations Agronomiques*, 2024, 98, pp.161-174. 10.17180/ciag-2024-vol98-art11 . hal-04816605

HAL Id: hal-04816605

<https://hal.inrae.fr/hal-04816605v1>

Submitted on 3 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



Réduction d'usage des phytosanitaires et émissions de gaz à effet de serre en systèmes de grande culture du Nord de la France (System-Eco+)

Célestin VALENTIN ¹, Paul BELLEVILLE ², Sébastien DARRAS ³, Fabien FERCHAUD ^{2,4},
Joël LEONARD ², Laure MAMY ⁵, Jérôme PERNEL ⁶, Guillaume VITTE ¹

¹ INRAE, UMR transfrontalière BioEcoAgro, Université de Liège, Université de Lille, Université de Picardie Jules Verne, 2 Chaussée de Brunehaut, F-80200 Estrées-Mons, France

² INRAE, UMR transfrontalière BioEcoAgro, Université de Liège, Université de Lille, Université de Picardie Jules Verne, 02000, Barenton-Bugny, France

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

⁴ INRAE, UMR Eco&Sols, Université de Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Institut Agro Montpellier, Montpellier, France

⁵ Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR ECOSYS, 91120 Palaiseau, France

⁶ Agro-Transfert Ressources et Territoires, 2 Chaussée de Brunehaut, F-80200 Estrées-Mons, France

Correspondance : sebastien.darras@inrae.fr ; joel.leonard@inrae.fr

Résumé

En contexte de grandes cultures céréalières et industrielles du nord de la France, 7 systèmes de culture mis en place sur la station agronomique d'Estrées-Mons (80) ont été suivis de 2018 à 2024 afin d'évaluer un gradient de réduction de la protection phytosanitaire via le recours à des leviers agronomiques compensateurs. L'expérimentation mise en place propose une approche transversale combinant la réduction de l'usage des produits phytosanitaires et l'amélioration du bilan des gaz à effet de serre (GES), notamment par la réduction de la fertilisation azotée. Les systèmes de culture conçus pour réduire l'usage des pesticides ont permis de réduire l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) de 70 à 100% sans nuire de façon significative aux rendements tout en assurant la maîtrise des adventices. Une réduction des résidus de fongicides et herbicides dans les sols a aussi été mesurée. Les leviers mobilisés pour réduire l'usage des produits phytosanitaires ont un effet neutre sur les émissions de GES, voire favorable lorsque des légumineuses ayant pour objectifs la couverture du sol et l'équilibrage du bilan azoté sont introduites dans la succession.

Mots-clés : Adventices, Pesticides, Fertilisation, Protoxyde d'azote, Carbone, Gaz à effet de serre.

Abstract: Reducing phytosanitary use and greenhouse gas emissions in large scale cropping systems from northern France (System-Eco+ project)

Crop protection and nitrogen fertilizers uses are the mainstays of large-scale cereal and industrial cropping systems in northern France. Biological and climatic effects call to design and evaluate cropping systems that cut the use of plant protection products by implementing counterbalancing agronomic levers aiming to maintain yields. An experimental set-up composed of 7 cropping systems located at the Estrées-Mons agronomic station (France) was monitored from 2018 to 2024. The experiment combined decrease in the use of plant protection products while improving the greenhouse gas (GHG) balance by reducing synthetic fertilization. The introduction of cropping systems designed to reduce the use of pesticides made it possible to achieve treatment frequency index (IFT) reductions of 70 to 100% without significantly affecting yields and while ensuring weed control. This also resulted in a significant reduction in fungicide and herbicide residues in the soil. The levers used to reduce the use of plant protection products have a neutral effect on greenhouse gas emissions, or even a favourable effect when leguminous crops are introduced into the succession to provide soil cover and balance the nitrogen balance.



Keywords: Weeds, Pesticides, Fertilization, Nitrous Oxide, Carbon storage, Greenhouse Gases.

1. Introduction

Les ambitions de réduction d'usage des produits phytosanitaires (communément appelés pesticides) sont partagées par les agriculteurs, scientifiques, citoyens et législateurs. Toutefois, la soutenabilité des systèmes se passant partiellement ou totalement des pesticides reste un défi. Dans le nord de la France en particulier, les cultures céréalières (blé tendre d'hiver, orge de printemps) et industrielles (betterave sucrière, colza d'hiver) peuvent en effet être soumises à de fortes pressions biotiques (Laporte et Travert, 2023). Au-delà de l'enjeu de réduction de l'usage des pesticides, la contribution de l'agriculture à l'atténuation du changement climatique est également un défi majeur, que ce soit à travers la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) ou via le maintien, voire l'accroissement, des stocks de carbone organique du sol (Pellerin et al., 2013).

En France, le réseau DEPHY (démonstration, expérimentation et production de références sur des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires) vise à expérimenter des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires pour différents types de production. Dans ce cadre, le projet System-Eco+ est centré sur deux types de systèmes de grande culture pour lesquels des alternatives réduisant ou supprimant l'usage des pesticides ont été mises en place : des systèmes betteraviers (blé tendre d'hiver, colza d'hiver, betterave sucrière en rotation de référence) et des systèmes céréaliers-oléoprotéagineux (pois de printemps, colza d'hiver, blé tendre d'hiver, maïs, orge de printemps). Dans le cas des systèmes céréaliers, ces objectifs ont été couplés avec des objectifs de réduction partielle ou totale de la fertilisation minérale azotée. Dans ce travail, ces systèmes sont évalués à la fois sur le plan de la réussite agronomique (gestion des maladies mais surtout des adventices, préservation des rendements, atteinte des objectifs de diminution d'usage des produits phytosanitaires) et sur celui des conséquences environnementales, en cherchant à identifier les synergies ou antagonismes entre les objectifs de réduction d'usage des pesticides et d'atténuation des émissions de GES.

2. Dispositifs expérimentaux et méthodes

2.1. Les essais Systèmes De Culture et Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité

Le projet System-Eco+ a été conduit à Estrées-Mons (80) sur deux dispositifs du domaine INRAE de Brunehaut (Figure 1, Tableau 1). Il s'agit d'un site représentatif des régions de grandes cultures du nord de la France, sur sols limoneux profonds, avec un historique long de grandes cultures et des teneurs en carbone organique du sol assez faibles (de l'ordre de 1 %). La variabilité des propriétés du sol est faible sur le site, avec en moyenne 75 % de limon et 20 % d'argile, et le pH est globalement élevé (7.8 à 8.2).

L'essai Systèmes De Culture (SDC) intègre des systèmes betteraviers en prolongation d'un essai « systèmes de culture-travail du sol » implanté en 1989 (Lamichhane et al., 2021), qui a évolué dans le cadre du projet System-Eco-Puissance4 (2012-2018) afin de tester des systèmes alternatifs réduisant l'usage des pesticides (-50 % et -70 %).

L'essai Agroécosystèmes, Cycles Biogéochimiques et Biodiversité (ACBB) a été mis en place en 2010, en assolement céréaliier-oléoprotéagineux. Initialement orienté vers l'analyse de l'effet des pratiques agricoles sur les cycles biogéochimiques, ce dispositif intègre depuis 2016 deux nouveaux traitements visant à réduire de façon conjointe les apports d'azote de synthèse et de pesticides (de -65 % à -100 %). La combinaison de ces deux essais est utile car elle permet d'intégrer une large gamme de cultures et de croiser les problématiques de réduction de l'usage de produits phytosanitaires et de limitation des émissions de GES.

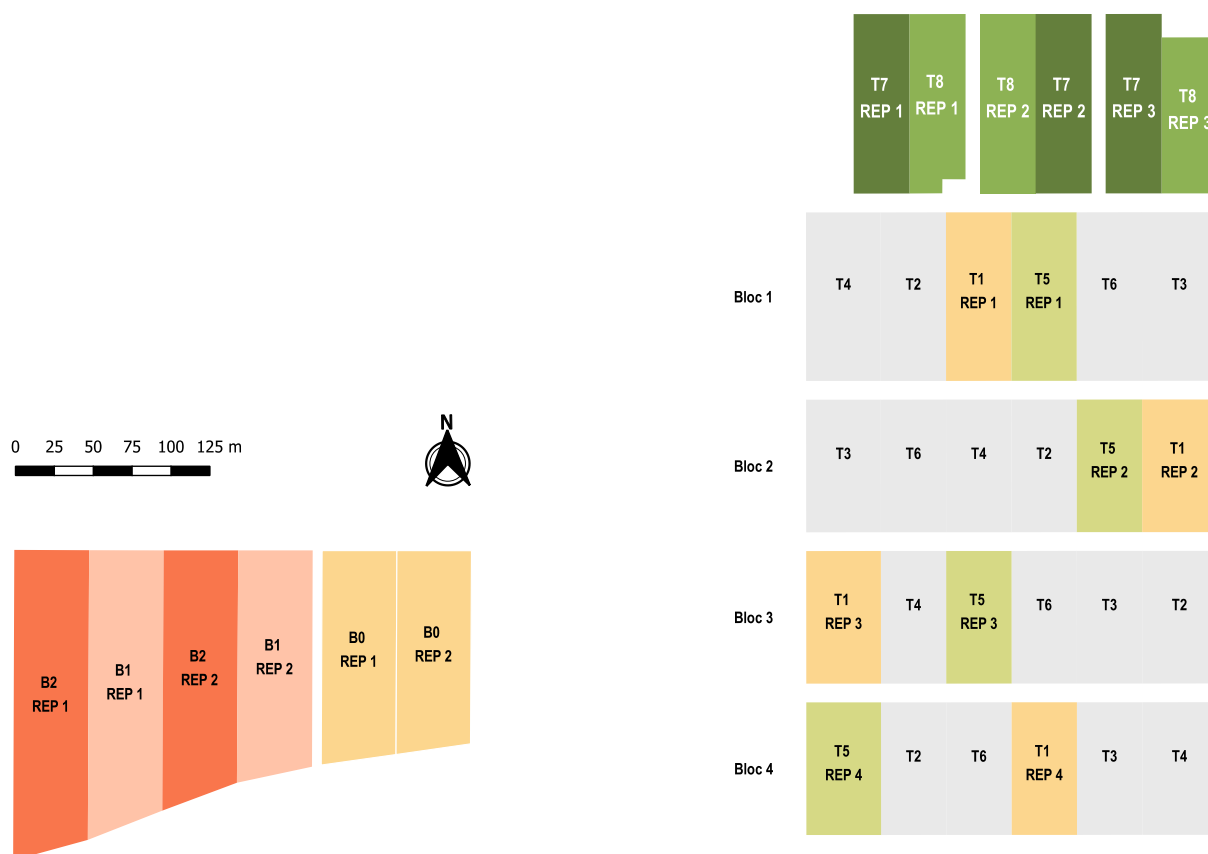


Figure 1 : Cartographie des dispositifs expérimentaux SDC et ACBB respectivement en parties gauche et droite. Les parcelles impliquées dans le projet sont distinguées en surbrillance.

Tableau 1 : Présentation des systèmes de culture des essais SDC et ACBB

ESSAI	SYSTEME	ESPECES CULTIVÉES	IFT CIBLE	FERTILISATION AZOTEE	PRINCIPAUX LEVIERS AGRONOMIQUES
SDC	Betteravier référence (B0)	Betterave, Blé, Colza	Raisonné régionalisé	158 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Protection chimique + alternance labour / non labour
	Betteravier Ecophyto I (B1)	Betterave, Blé, Pois, Colza, Orge, Maïs	-50 %	139 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Idem B0 + allongement et diversification de la rotation + faux semis répétés + désherbage alternatif + décalage dates de semis + choix variétal
	Betteravier Ecophyto II (B2)	Betterave, Blé, Colza, Luzerne, Orge, Maïs, Chanvre	-70 %	129 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Idem B1 + intégration de nouvelles cultures
ACBB	Céréaliér-Oléo-Protéagineux référence (T1)	Pois, Colza, Blé, Orge, Maïs	Raisonné régionalisé	141 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Protection chimique + faux semis
	Bas Intrants intensifié (T5)	Luzerne, Blé, Orge, Maïs, Trèfle	-70 %	51 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Réduction de la fertilisation (-64%) + implantation de légumineuses + désherbage mécanique
	AB (T7)	Pois, Colza, Blé, Orge, Maïs, Triticale	-100 %	9 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Choix variétal + stratégie de désherbage mécanique
	AB (T8)	Luzerne, Maïs, Triticale + Pois, Orge, Trèfle	-100 %	9 kg N ha ⁻¹ an ⁻¹	Idem T7 + stratégie de couverture du sol



L'essai SDC met en œuvre un système de référence (B0) avec une rotation de type betterave-blé-colza-blé et les systèmes B1 et B2 avec des cibles de réduction d'Indicateur de Fréquence de Traitement (IFT) de -50 % et -70 %, respectivement. Dans ces deux systèmes, la betterave sucrière est définie comme l'espèce phare à maintenir. Différents leviers agronomiques sont mis en place avec une intensification de leur utilisation : travail du sol (alternance labour/non labour, répétition des faux semis), désherbage mécanique, décalage des dates de semis, jusqu'à la reconception de la rotation (diversification et allongement).

L'essai ACBB met en œuvre un système de référence avec une rotation de six ans incluant pois, colza, blé, orge et maïs (T1). Le système T5 combine une réduction d'environ 65 % de la fertilisation azotée, l'introduction de légumineuses dans la rotation (en cultures principales et intermédiaires) et un objectif de réduction de l'IFT de 70 %. Les deux systèmes en agriculture biologique (T7 et T8) sont conduits sans apport d'azote minéral et sans pesticide de synthèse, depuis 2016. La rotation dans ces systèmes est proche de celle du T1, les mêmes leviers agronomiques que ceux mentionnés pour l'essai SDC y étant appliqués, avec en outre l'introduction de deux années de luzerne en T8.

2.2. Mesures des performances des systèmes

2.2.1. Performances agronomiques

La réussite agronomique des systèmes étudiés est mesurée par quatre principaux critères :

- les IFT obtenus, qui permettent de mesurer la réussite de la réduction d'usage des pesticides notamment au regard des objectifs assignés aux différents systèmes. L'ensemble des produits utilisés est considéré, en séparant les différentes catégories de produits (herbicides, fongicides, insecticides, régulateurs, produits de biocontrôle) ;
- la présence d'adventices (abondance, biomasse, diversité botanique) qui mesure l'efficacité des stratégies de réduction des herbicides. Des relevés suivent aussi l'évolution des maladies, mais la réduction des herbicides est plus difficile, dans les systèmes de grande culture étudiés, que celle des fongicides ou insecticides, et les échecs ont des conséquences plus fortes et plus durables. Nous focalisons donc plutôt ici sur le suivi des adventices. Les relevés ont été effectués chaque année au stade de la floraison de la culture, considéré comme le plus critique, sur 4 pseudo-répétitions par parcelle d'une surface minimale de 0.25 m² (allant jusqu'à un 1 m² selon l'espèce implantée), et ce pour chacune des parcelles ;
- le rendement exporté lors de la récolte machine, car il correspond à la partie valorisée de la culture et peut être aisément mis en comparaison à des références ;
- les difficultés rencontrées, contextualisées (facteurs climatiques, disponibilité de main d'œuvre, étalement ou surcharge ponctuelle de travail, etc.) par le pilote de projet, permettant d'établir une appréciation globale de faisabilité.

2.2.2. Performances environnementales

Les performances environnementales sont mesurées dans deux directions.

La première est centrée sur la pollution des eaux et des sols. Il s'agit d'évaluer si la réduction d'usage des produits phytosanitaires (mesurée par la réduction de l'IFT) se traduit par des réductions de présence de résidus de pesticides (ensemble des substances actives) dans l'environnement. Pour cela, des prélèvements d'eau ont été effectués à l'aide de bougies poreuses (-45 cm, -200 cm) par pompage bimensuel en saison de drainage. Les faibles volumes pompés ont posé des difficultés méthodologiques : longs temps de pompage, nécessité de grouper les échantillons mensuellement, difficulté à atteindre le volume de 500 ml nécessaire pour permettre une bonne précision d'analyse. En complément, des prélèvements dans le sol ont été réalisés sur l'horizon de surface (0-5 cm) et plus profondément (40-50 cm) à trois dates, pour évaluer la présence de substances actives.

La seconde est centrée sur le bilan GES, incluant l'évolution du stock de carbone organique du sol et les émissions de protoxyde d'azote (N_2O). Les variations de stock de carbone ont été mesurées sur les différents systèmes. Les concentrations en carbone organique et les masses volumiques du sol ont été mesurées pour différents horizons, en 2021 pour ACBB et en 2022 pour SDC, avec respectivement 4 et 6 répétitions par parcelle. Un point initial avait été effectué au préalable (2009 et 2015 pour ACBB, 2007 pour SDC), ce qui permet de réellement mesurer l'évolution associée aux pratiques mises en place. Sur l'essai ACBB, les mesures ont été réalisées sur les mêmes points géoréférencés lors des différentes dates, ce qui permet d'accroître la précision de la mesure de l'évolution de stock. Les stocks et évolutions de stocks ont été calculés à masse de sol équivalente (pour éviter les biais induits par les évolutions de masse volumique), pour $4900 \text{ t de sol ha}^{-1}$ ($\sim 0\text{-}35 \text{ cm}$) sur ACBB et 4144 t ha^{-1} ($\sim 0\text{-}30 \text{ cm}$) sur SDC. Les émissions de N_2O ont été mesurées uniquement sur le dispositif ACBB, à l'aide de chambres automatiques, quasiment en continu. L'intensité du suivi, limité à une parcelle par traitement au départ, s'est fortement accrue au fil du temps pour permettre la mesure sur l'ensemble des traitements et sur plusieurs parcelles par traitement (vraies répétitions). L'analyse des résultats s'est concentrée sur la seconde rotation où les 4 traitements étudiés ici sont présents. Pour les rares périodes sans mesure, un modèle statistique construit sur les données du site a permis de réaliser des estimations afin d'obtenir des cumuls d'émissions sur l'ensemble de la succession.

3. Résultats et discussion

3.1. Des réductions d'IFT conformes aux objectifs

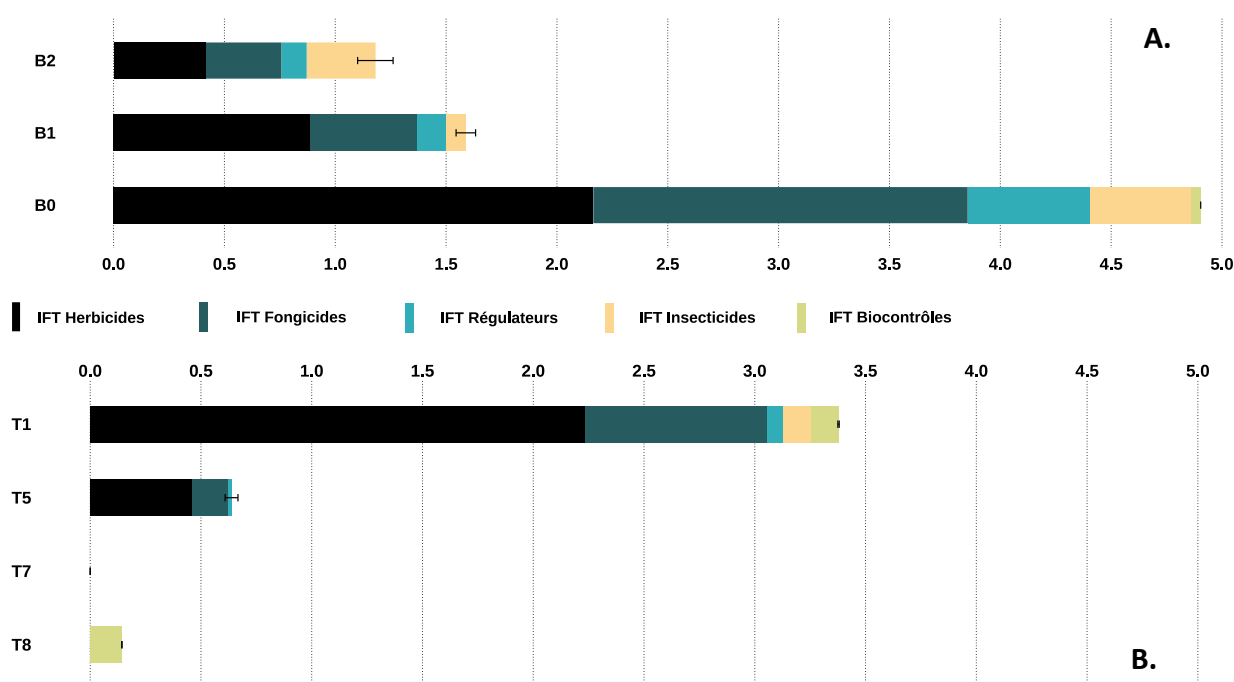


Figure 2 : Comparaison des IFT (par catégorie d'usage) des systèmes de culture des dispositifs A) SDC, en haut, et B) ACBB, en bas. Les barres d'erreurs représentent les écarts types entre parcelles pour l'IFT total.

Les systèmes mis en place ont permis de fortes réductions d'usage des pesticides. Les objectifs initiaux des systèmes sont atteints et même dépassés : le système B1 atteint -70 % de réduction de l'IFT, soit l'objectif assigné au système B2 qui lui atteint -80 % en comparaison à la référence B0 (Figure 2A). L'utilisation des herbicides, même à faible dose, est cependant encore très complémentaire des leviers mis en œuvre notamment sur les espèces céréalières, non sarclées. Aller plus loin vers un usage en ultime recours nécessiterait une prise de risque plus grande. Par ailleurs, une reconception plus importante des systèmes risquerait aussi de questionner la place des cultures industrielles dans les



successions. Alors que la diminution des herbicides relève d'une stratégie globale, les maladies sont plus aisément gérées par la voie génétique (résistances variétales) et les ravageurs par la gestion des itinéraires (dates d'implantations), exception faite du colza pour lequel l'application d'insecticides s'est révélée équivalente à la référence notamment pour le système B2. Sur les systèmes en agriculture biologique du dispositif ACBB (Figure 2B), les traitements phytosanitaires ont été supprimés hormis une application d'un produit de biocontrôle sur T8.

3.2. Maîtrise des adventices et rendements

L'analyse de l'abondance des adventices (Figure 3) montre des niveaux de présence du même ordre de grandeur que ceux observés sur les systèmes conventionnels de référence, avec des valeurs maximales de 20 à 25 adventices par mètre carré, sachant qu'on peut facilement atteindre 100 en cas de développement de vulpin ou raygrass, ce qui n'est pas le cas ici. Les faibles présences des vulpins des champs et des chénopodes blancs, présents ailleurs sur le site, révèlent un bon niveau de maîtrise, qui a permis d'éviter toute multiplication.

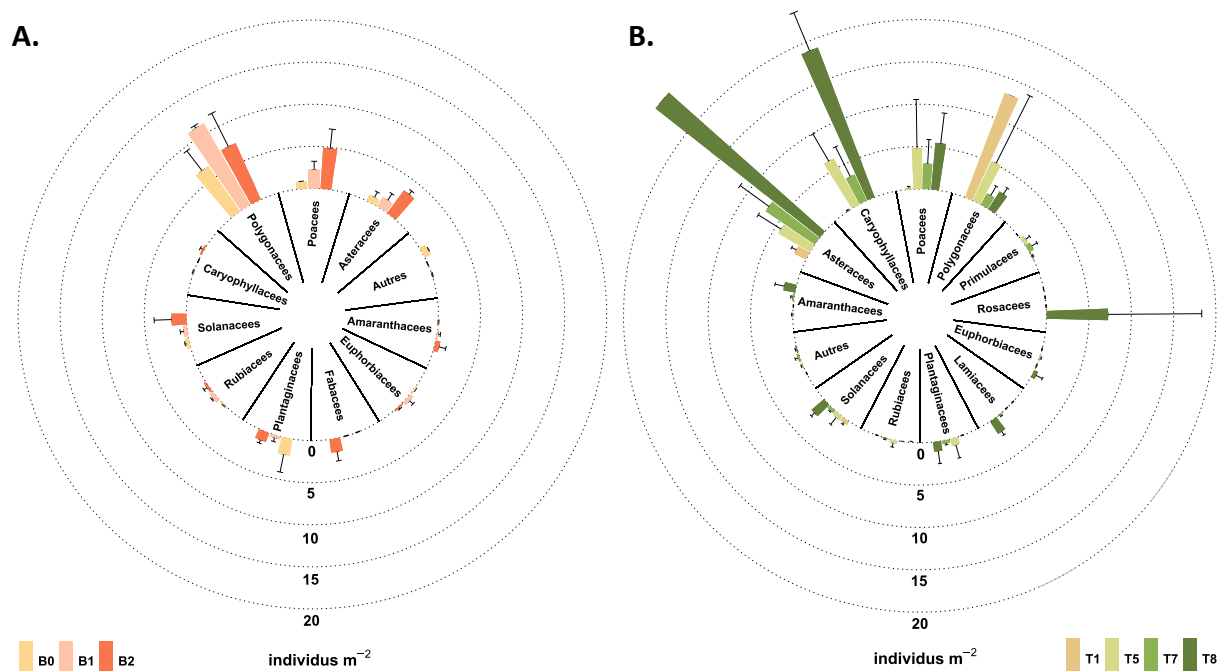


Figure 3 : Moyennes des abondances d'adventices au stade de la floraison des cultures (nombre d'individus par m²) dans les systèmes de culture pour **A**) le dispositif SDC sur la période 2013 à 2023 et **B**) le dispositif ACBB sur 2019-2023. Les barres d'erreurs représentent les écarts types entre parcelles.

Malgré des variations temporelles en fonction des cultures, la diversité des familles botaniques observée est stable entre systèmes (Figures 3A et 3B) sur les périodes étudiées. Les 3 familles d'adventices les plus abondantes sur le dispositif SDC sont les polygonacées (renouées liseron et oiseaux), poacées (agrostis jouet du vent et vulpin des champs) ainsi que les astéracées (chardon des champs et laitersons). La famille des caryophyllacées est également présente sur le dispositif ACBB. Autre particularité, dans la famille des astéracées, l'armoise commune constitue une espèce ponctuellement très représentée dans le système T8.

Au cours du temps, l'abondance globale des adventices est restée pour les systèmes betteraviers dans des ordres de grandeur proches. Cela révèle un succès des stratégies mises en place, et ce malgré des pressions initiales qui étaient fortes (moyenne de 58 adventices m² au lancement de l'essai SDC).

Les résultats en termes de rendement sont illustrés dans le Tableau 2, pour les systèmes betteraviers qui sont plus proches des systèmes régionaux et transférables sur le plan agricole. Les rendements obtenus pour les cultures principales (blé, et betterave notamment) ne montrent pas de différences notables entre



les systèmes de référence et les systèmes où l'usage des pesticides est réduit. On peut noter également les très faibles biomasses d'adventices mesurées chaque année au stade de floraison des cultures. On peut donc considérer que les systèmes économes en pesticides mis en place dans cet essai et mobilisant différents leviers agronomiques (travail du sol avec alternance labour/non labour, répétition des faux semis, désherbage mécanique, décalage des dates de semis, reconception de la rotation en la diversifiant et en l'allongeant) atteignent leurs objectifs sans nuire à la production. C'est la complémentarité de l'ensemble des leviers mis en place qui permet d'atteindre ces niveaux de maîtrise de la flore adventice. La reconception et l'allongement de la rotation permettent de casser les cycles des bioagresseurs et constituent notamment des leviers majeurs de gestion des adventices. Les autres leviers, plus spécifiques, restent toutefois nécessaires à la bonne maîtrise des systèmes testés.

Tableau 2 : Rendements des cultures et biomasses d'adventices à la floraison de 2013 à 2023 en systèmes betteraviers (dispositif SDC).

ANNEE	BETTERAVIER REFERENCE (B0)			BETTERAVIER -50% IFT (B1)			BETTERAVIER -70% IFT (B2)		
	Biomasse (t MS ha ⁻¹)			Biomasse (t MS ha ⁻¹)			Biomasse (t MS ha ⁻¹)		
	Culture	Rendement	Adventices	Culture	Rendement	Adventices	Culture	Rendement	Adventices
2013	Blé	7.76	0.04	Blé	8.21	0.01	Blé	7.92	0.05
2014	Betterave	24.1	0.00	Betterave	21.9	0.04	Betterave	23.0	0.02
2015	Blé	7.66	0.00	Blé	7.91	0.04	Blé	7.63	0.09
2016	Colza	2.93	0.00	Pois	2.15	NA	Colza	3.24	0.03
2017	Blé	7.70	0.00	Colza	3.99	0.00	Luzerne	9.87	0.06
2018	Betterave	23.7	0.00	Orge	5.85	0.01	Luzerne	13.7	0.00
2019	Blé	8.35	0.00	Blé	8.48	0.08	Blé	8.58	0.05
2020	Colza	-	-	Mais	-	-	Mais	-	-
2021	Blé	7.51	0.00	Blé	8.08	0.00	Orge	4.69	0.02
2022	Betterave	20.2	0.04	Pois	5.71	0.00	Colza	4.76	0.06
2023	Blé	8.80	0.00	Colza	4.08	0.01	Chanvre	3.40	0.02
2013-2023		118.7			76.4			86.8	

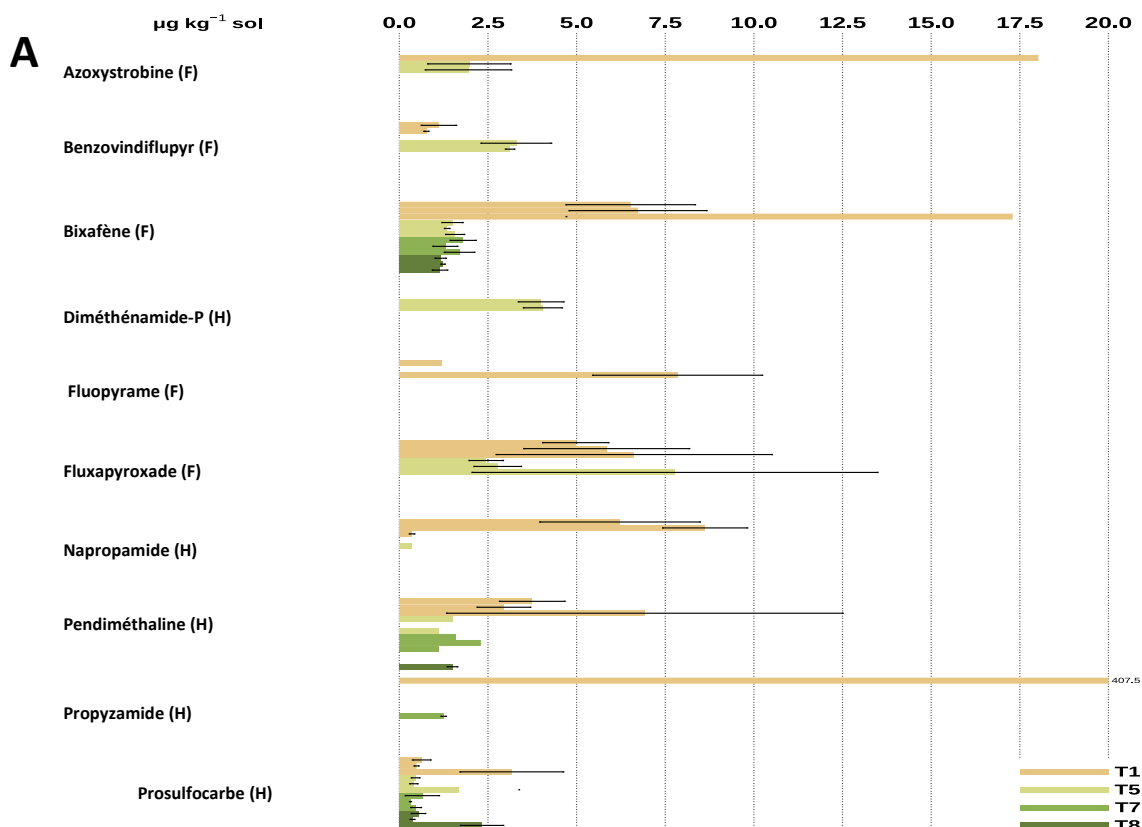
Sur l'essai ACBB les écarts de rendement par rapport au système de référence sont plus importants (résultats non présentés ici), mais sont probablement plus en lien avec la réduction de la fertilisation azotée qu'avec la réduction des pesticides. Cette hypothèse est soutenue par l'observation d'indices de nutrition azotée (INN) sous-optimaux à la floraison des cultures dans les traitements peu ou pas fertilisés de l'essai ACBB (Jacques et al., 2022). Ces INN à floraison étaient d'ailleurs souvent bien corrélés à la biomasse de grains mesurée à la récolte.

3.3. Un effet avéré des réductions d'IFT sur la présence des pesticides dans l'environnement

Au-delà de la réduction d'usage des produits phytosanitaires, il est utile de mesurer les conséquences effectives en termes de présence de résidus de produits phytosanitaires dans l'environnement (eau et sol, toutes substances actives).



Les difficultés méthodologiques liées aux faibles volumes d'eau prélevés n'ont pas permis de tirer de conclusion quant aux teneurs mesurées dans l'eau. En revanche, les mesures dans le sol montrent des résultats cohérents avec les réductions d'usage : les substances actives (majoritairement des herbicides et des fongicides persistants) sont retrouvées en nombre et en concentrations plus importantes en système conventionnel T1 que dans les autres systèmes (même en faisant abstraction des dates de prélèvement suivant immédiatement une application comme le propyzamide dont la concentration mesurée atteignait $407.5 \mu\text{g kg}^{-1}$ dix jours après une application). Aux dates des prélèvements (décembre 2021, décembre 2023 et février 2024), on observe une forte réduction du nombre de substances actives détectées sur T7 et T8, pourtant conduits de façon conventionnelle jusque fin 2015.



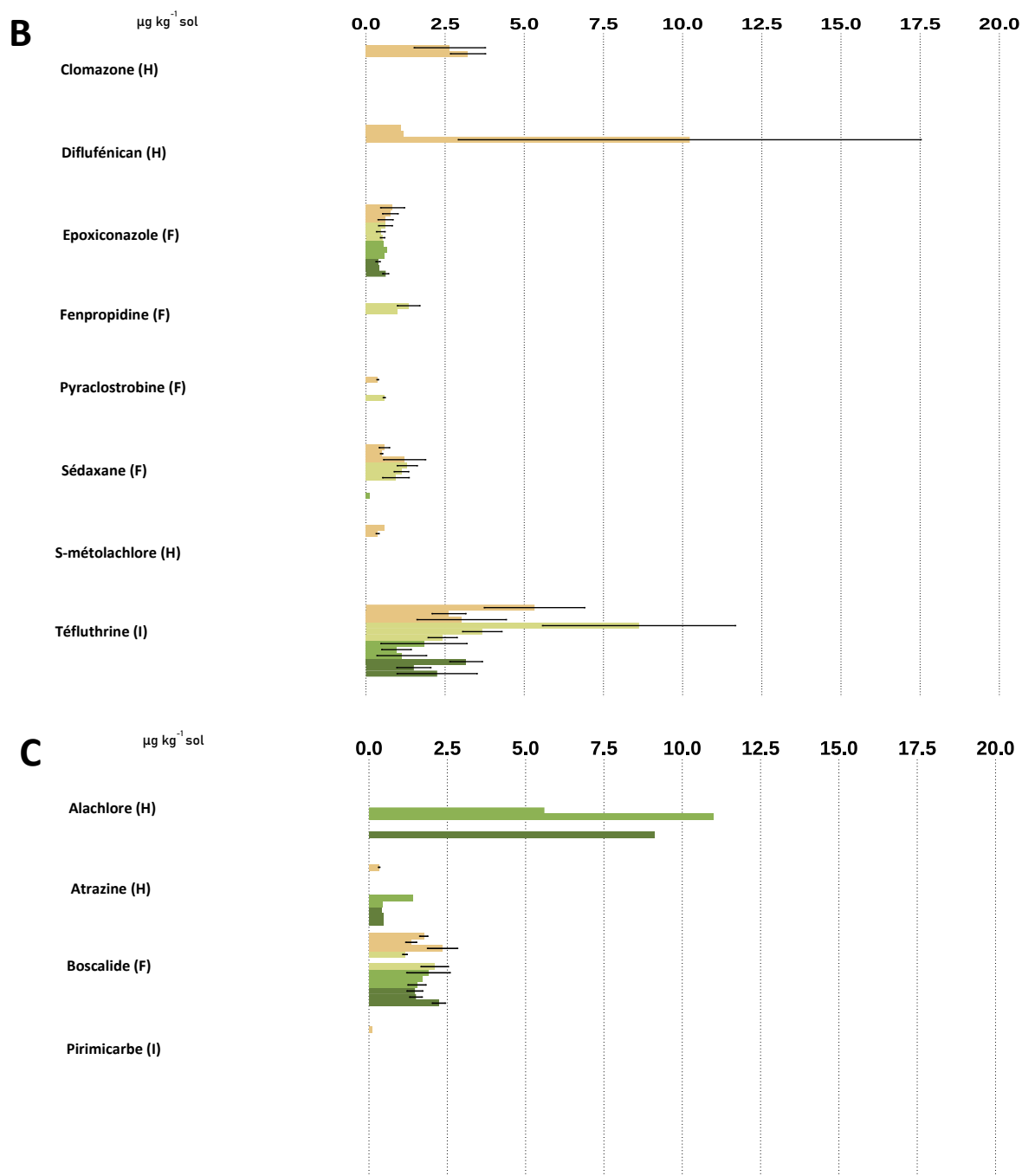


Figure 4 : Concentrations des substances actives mesurées dans le sol sur l'horizon 0-5 cm du dispositif ACBB pour **A)** les substances appliquées moins d'un an avant les mesures, **B)** celles appliquées entre 1 et 5 ans avant les mesures et **C)** celles appliquées plus de 5 ans avant les mesures. Les barres d'erreurs représentent les écarts types entre parcelles. H : Herbicide, F : Fongicide, I : Insecticide

L'effet de la réduction d'usage de pesticides peut donc se traduire par des évolutions des teneurs dans le sol en quelques années. Certaines molécules peuvent toutefois être retrouvées dans le sol plus de 20 ans après leur application. Ceci est particulièrement marqué pour l'atrazine, appliquée historiquement avant les années 2000 (jusqu'au retrait d'usage en 2003), et qui est encore quantifiée dans plusieurs échantillons. Des traces de trois substances actives, méthabenzthiazuron (herbicide), méthoxychlore (insecticide) et trichloronate (insecticide), ont également été retrouvées alors qu'elles n'ont pas été appliquées d'après les enregistrements dont nous disposons depuis 1996 sur les parcelles étudiées. Ces



résultats suggèrent de potentiels transferts entre parcelles, soit par volatilisation ou par dérive lors de la pulvérisation, soit par des défauts de nettoyage du matériel d'application (le triallate, herbicide, a été détecté alors qu'il n'a pas été appliqué sur les parcelles, mais l'a été au sein de la station expérimentale), ou encore par des pollutions aériennes en provenance de parcelle plus éloignées (cas des substances retrouvées alors qu'elles n'ont jamais été employées sur la station expérimentale).

3.4. Un effet neutre à bénéfique en termes d'émissions de GES

La Figure 5 présente l'évolution moyenne annuelle des stocks de carbone organique du sol calculée pour les différents traitements. Une distinction des différentes périodes pour lesquelles ces variations ont été mesurées est faite : P1 = 2009 à 2015 (6 ans) ; P2 = 2015 à 2021 (6 ans) ; P1+2 = 2009 à 2021 (12 ans) ; P3 = 2007 à 2022 (15,5 ans). Globalement, la tendance observée est au déstockage ou à la stabilité des stocks, avec peu de différences significatives entre systèmes et des évolutions contrastées selon les périodes pour un même système. On distingue deux cas particuliers dont les stocks de carbone augmentent de manière significative : le traitement T5 de l'essai ACBB sur la seconde rotation, et le traitement B2 de l'essai SDC. La présence de luzerne dans la rotation de ces deux systèmes est commune sur les périodes en question, ce qui pourrait expliquer ces dynamiques d'évolution. En effet, l'inclusion de légumineuses pérennes comme la luzerne a été identifiée comme un facteur favorisant le stockage de carbone dans différents essais initialement en grandes cultures (Ferchaud et al., 2016 ; Autret et al., 2016). Toutefois, le traitement T8, qui inclut également de la luzerne, n'affiche pas la même évolution. L'évolution des systèmes de culture pour limiter l'usage des pesticides impacte donc faiblement le stockage de carbone, mais certaines des évolutions observées suggèrent de possibles synergies entre ces deux objectifs plutôt que des antagonismes.

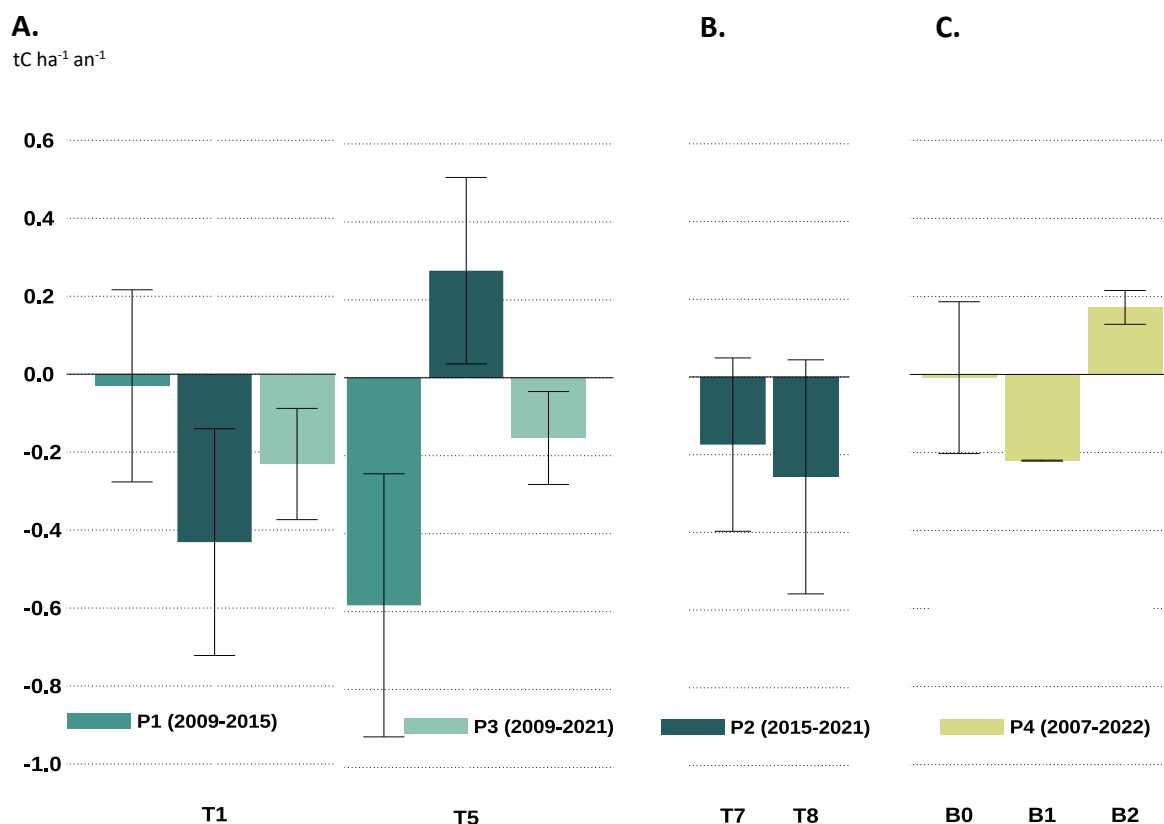


Figure 5 : Evolutions moyennes annuelles des stocks de carbone dans l'horizon de sol travaillé pour les différents systèmes et périodes considérées. Mesures réalisées dans les essais du projet System-Eco+ : **A)** T1 et T5 (ACBB), **B)** T7 et T8 conduits en agriculture biologique depuis 2016 (ACBB) et **C)** B0, B1 et B2 (SDC). Les barres d'erreurs représentent les écarts types entre parcelles.



L'analyse des cumuls d'émissions de N_2O mesurés sur le dispositif ACBB au cours de la seconde rotation (Figure 5) montre, d'une part, des émissions globalement faibles, ce qui est lié notamment aux forts pH mesurés sur le site qui favorisent la réduction du N_2O en N_2 et, d'autre part, peu de différenciation entre les systèmes étudiés en termes d'émissions de N_2O , malgré de fortes variations en matière d'entrées d'azote. Seuls les traitements T5 et T8 semblent se différencier (les intervalles de confiance ne se recoupant pas), avec des émissions plus basses pour T5 et plus hautes pour T8, bien que dans chaque cas ces émissions ne se différencient significativement pas des émissions sur T1 et T7. Sur le traitement T8, les émissions ont été particulièrement élevées l'année suivant la destruction de la luzerne (colza détruit en sortie d'hiver car il n'avait pas poussé, puis maïs), celle-ci ayant eu lieu en été. Sur le traitement T5, la luzerne a été détruite plus tard en automne et suivie d'un blé, ce qui a occasionné de plus faibles émissions.

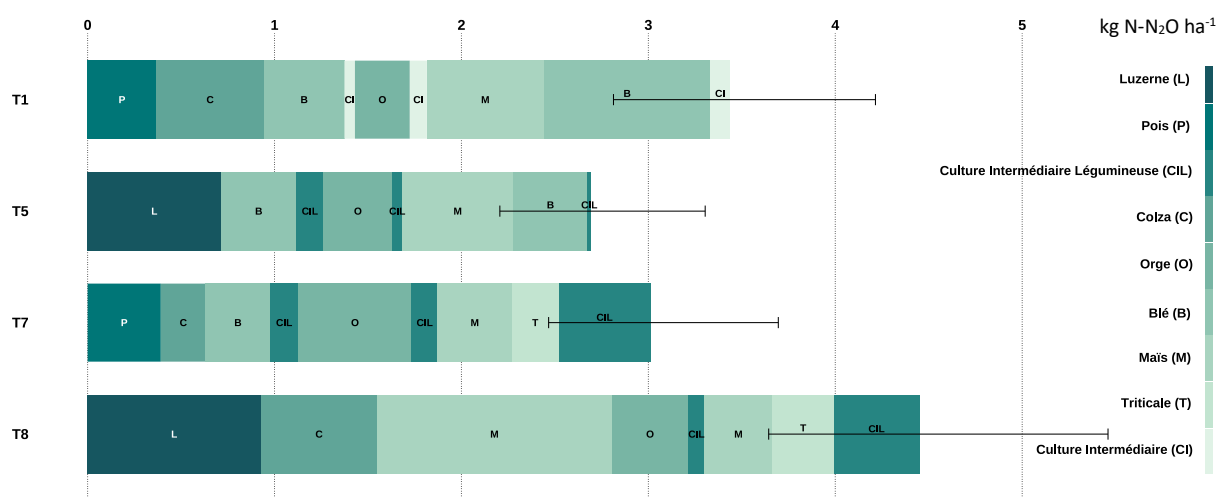


Figure 6 : Émissions de N_2O cumulées sur les 4 systèmes de culture du dispositif ACBB pour la période 2016-2021. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95% pour les émissions totales.

Ces mesures vont à l'encontre des résultats auxquels on pourrait s'attendre si on appliquait des calculs de type Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), qui dépendent fortement des entrées d'azote minéral. La substitution des entrées d'azote de synthèse par la fixation symbiotique via des légumineuses ne se traduit donc pas forcément par une réduction des émissions, comme cela avait déjà été observé sur l'essai bas intrants d'Auzeville (Peyrard et al., 2016), malgré des dynamiques d'émission qui peuvent être très différentes. La phase suivant la destruction d'une luzerne apparaît par ailleurs comme une période à risque pour les émissions de N_2O , en accord avec des observations précédentes (Autret et al., 2019 ; Ferchaud et al., 2020).

Dans ce contexte, avec de faibles émissions de N_2O et des différences limitées d'émissions entre systèmes, le poids de la fabrication et du transport des fertilisants azotés, et dans une moindre mesure celui du CO_2 émis par la consommation de carburant des machines agricoles, devient important et du même ordre que les émissions annuelles de N_2O (Autret et al., 2019). Cela redonne un avantage aux systèmes basés sur la substitution par rapport à ceux s'appuyant sur l'apport d'azote minéral. La tendance est donc plutôt à un effet synergique entre réduction de l'usage des produits phytosanitaires et réduction des émissions de GES.

4. Conclusion

Les résultats obtenus permettent de tirer une conclusion à deux niveaux. D'une part, il semble possible de réduire fortement l'usage des produits phytosanitaires (y compris des herbicides) dans des systèmes de grandes cultures sans remettre significativement en cause les performances agronomiques, que ce soit au niveau de la gestion des adventices et autres bioagresseurs ou au niveau des rendements



obtenus. Cette réduction est rendue possible par la reconception de la rotation (allongement et diversification) en combinaison avec d'autres leviers agronomiques : travail du sol (alternance labour/non labour, répétition des faux semis), désherbage mécanique, décalage des dates de semis, choix variétal. L'intégration de cultures étouffantes peut être nécessaire pour atteindre une forte diminution des herbicides. Cette évolution se traduit par une diminution de la présence de substances actives de produits phytosanitaires dans le sol, même si la très forte rémanence dans le temps de certaines substances est confirmée. D'autre part, on n'observe pas de différence très marquée entre systèmes de culture en matière d'évolution des stocks de carbone organique du sol et d'émissions de N_2O , ce qui est plutôt positif du fait que cela ne génère pas d'antagonisme. Dans certains cas, on a plutôt un effet bénéfique additionnel, qui semble apparaître sur des systèmes où la réduction des phytosanitaires et des apports azotés de synthèse est réalisée en passant par une reconception du système. La prise en compte des effets amont (fabrication de l'engrais notamment) fait toutefois pencher la balance en faveur des systèmes bas intrants ou en agriculture biologique, avec une forte réduction ou suppression des pesticides et de la fertilisation azotée, liant ces deux enjeux, avec toutefois des rendements réduits.

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 des auteurs 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.

ORCIDs des auteurs

<https://orcid.org/0009-0003-2221-6283> Sébastien DARRAS

<https://orcid.org/0000-0002-2078-3570> Fabien FERCHAUD

<https://orcid.org/0000-0002-9907-9104> Joël LEONARD

<https://orcid.org/0009-0006-6473-2472> Paul Belleville

<https://orcid.org/0000-0003-0851-4172> Laure MAMY

<https://orcid.org/0009-0009-5565-9578> Célestin VALENTIN

<https://orcid.org/0009-0009-8809-3216> Guillaume VITTE

Contribution des auteurs

Paul BELLEVILLE a contribué à la validation, au traitement et permis la mise à disposition de données nécessaires aux calculs d'émissions de protoxyde d'azote des sols.

Sébastien DARRAS a assuré la collecte des jeux de données, a contribué au choix et pertinence des figures, l'interprétation et discussions des résultats.

Fabien FERCHAUD a assuré la validation de jeux de données et leur traitement statistique, ainsi que contribué à l'interprétation des résultats des stocks de carbone organique des sols.

Joël LEONARD a défini les finalités de cet article en sa structuration, contribué au traitement de données, production de graphiques et la rédaction de cet article.

Laure MAMY a assuré le traitement des données de résidus de pesticides dans l'eau et les sols et a participé aux interprétations.

Jérôme PERNEL a contribué aux échanges d'interprétation, de présentation des résultats et de relecture.

Célestin VALENTIN a contribué au traitement des données et concouru à la rédaction des résultats et interprétations.



Guillaume VITTE a assuré la collecte des jeux de données, leur mise à disposition et contribué à la discussion des résultats.

Tous les auteurs et autrices ont lu et approuvé le manuscrit final.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, ni conseiller, ni posséder de parts, ni 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 personnes contributrices à ce travail de recherche sont nombreuses, et nous auteurs, sommes reconnaissants du travail de collecte de données assuré par Rosemonde DEVAUX, Frédéric MAHU, Anita TEIXEIRA, Eric GREHAN, Bernadette FRANCOIS, Nicolas COLLANGES, Caroline DOMINIARCZYK, Bertrand CHAUCHARD, Ludivine PIRUS, Valentin TATE.

La mise à disposition des données, permise par Jérôme DUVAL ainsi que les travaux préalables de Romario JACQUES et Paul BELLEVILLE ont été d'un précieux recours. Frida KEUPER est remerciée pour ses relectures et conseils en phase de finalisation de ce projet, de même que Pierre BENOIT pour sa participation aux réunions au cours du projet et sa contribution à la réflexion.

L'unité expérimentale Grandes Cultures Innovation et Environnement (doi: 10.15454/1.5572425838988464E12) est remerciée pour la conduite des conduites dispositifs et en particulier Maxime DEVAUX, Elodie HAUWELLE, Jean-Luc SAUVAGE pour l'implantation des expérimentations et les interventions techniques.

Déclaration de soutien financier

Le projet System-Eco+ est issu d'une action pilotée par le ministère chargé de l'agriculture et le ministère chargé de l'environnement, avec l'appui financier de l'Agence Française pour la Biodiversité, par des crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto.

L'étude a bénéficié dans le cadre du projet EJPSoil Sommit de financements du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la convention de subvention N°862695.

L'infrastructure de recherche ACBB bénéficie d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-11-INBS-0001 AnaEE France.

Références bibliographiques :

Autret B., Mary B., Chenu C., Balabane M., Girardin C., Bertrand M., Grandeau G., Beaudoin N., 2016. Alternative arable cropping systems: A key to increase soil organic carbon storage? Results from a 16 year field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 232, 150–164. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.008>

Autret B., Beaudoin N., Rakotovololona L., Bertrand M., Grandeau G., Gréhan E., Ferchaud F., Mary B., 2019. Can alternative cropping systems mitigate nitrogen losses and improve GHG balance? Results from a 19-yr experiment in Northern France. *Geoderma* 342, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.039>

Ferchaud F., Vitte G., Mary B., 2016. Changes in soil carbon stocks under perennial and annual bioenergy crops. *Global Change Biology Bioenergy* 8, 290–306. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12249>

Ferchaud F., Peyrard C., Léonard J., Gréhan E., Mary B., 2020. Large Variations in N₂O Fluxes from Bioenergy Crops According to Management Practices and Crop Type. *Atmosphere* 11, 675. <https://doi.org/10.3390/atmos11060675>



Jacques R.A.C., Vitte G., Ferchaud F., 2022. Analyses de la performance agronomique des systèmes de culture innovants. AgroParisTech - Université de Lorraine. <https://hal.inrae.fr/hal-04607119>

Lamichhane J.R., Boizard H., Dürr C., Richard G., Boiffin J., 2021. Effect of cropping systems and climate on soil physical characteristics, field crop emergence and yield: A dataset from a 19-year field experiment. Data in Brief 39, 107581. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107581>

Laporte H., Travert S., 2023. Rapport d'information n°1530 de la Commission des Affaires Economiques (No. 1530). Assemblée Nationale, Paris.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p.



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.