

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Étude de la multi performance des
pratiques de réduction du travail du sol
en grandes cultures biologiques en Pays
de la Loire.

Vincent Passard

*Option Concevoir et Accompagner l'Innov'Action en
Agronomie*

Année universitaire 2023-2024

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Étude de la multi performance des
pratiques de réduction du travail du sol
en grandes cultures biologiques en Pays
de la Loire.

Tuteur entreprise : Thomas QUEUNIET
Tuteur école : Nicolas CARTON

Vincent Passard

Option Concevoir et Accompagner l'Innov'Action en
Agronomie
Année universitaire 2023-2024

« L’alternant conserve la qualité d’auteur ou d’inventeur au regard des dispositions du code de la propriété intellectuelle pour le contenu de son mémoire et assume l’intégralité de sa responsabilité civile, administrative et/ou pénale en cas de plagiat ou de toute autre faute administrative, civile ou pénale. Il ne saurait, en cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup. »

Remerciements

Merci aux administrateurs du CIVAM Bio 53 pour leur confiance pendant ces trois ans.

Merci aux agriculteurs du groupe d'échanges grandes cultures bio pour leur accueil, leur écoute, leur gentillesse, pendant ces trois années. Je remercie en particulier Germain pour son implication et son nécessaire regard de paysan dans mes travaux.

Merci à l'équipe du CIVAM Bio 53 pour ces 3 ans passées à leurs côtés à apprendre le métier d'animateur. Merci aux équipes du CIVAM AD 53 et de Synergies.

Un grand Merci à Thomas, pour ce que tu m'as appris, pour ton exigence au quotidien, pour ce que tu m'as apporté autant humainement que professionnellement.

Merci à Matthieu BABIARD et Nicolas CHARTIER (réseau DEPHY) pour leur aide dans l'appropriation du jeu de données, Harold DURUFLE (INRAe Tours) pour son aide sur les statistiques, Stéphane CORDEAU (INRAe Dijon) pour son aide pour la construction de la méthodologie, Marina Wendling (FiBL) et Marie Guitonneau (HEPIA) pour leur regard sur mon interprétation du STIR.

Merci à Nicolas CARTON pour l'accompagnement de mon travail de mémoire et à Adeline VEDRINE pour l'accompagnement sur les deux premières années d'apprentissage. Merci à l'équipe pédagogique de VetAgro Sup et particulièrement aux enseignants de l'option CALICE.

Merci à Papa et Maman de m'avoir donné la chance de pouvoir faire des études, de m'avoir donné ce goût d'apprendre et d'avoir éveillé ma curiosité. Merci maman pour ta relecture aiguisée. Merci à toi Clémence.

Merci Papi de m'avoir transmis cette passion pour la terre et pour les animaux.

Table des matières

Introduction.....	1
Partie 1 - Contexte de l'étude.....	2
1 Le travail du sol.....	2
1.1 Définition	2
1.2 Effets du travail du sol sur la fertilité des sols	3
1.3 La réduction du travail du sol en agriculture biologique ; présentation et enjeux	4
2 Les outils de caractérisation des itinéraires techniques.....	5
2.1 Caractériser l'intensité de travail du sol	5
2.2 Caractériser la performance	5
3 État des lieux de la performance des systèmes de grandes cultures biologiques	6
3.1 La performance du contexte de production	6
3.2 La performance des pratiques de réduction du travail du sol.....	7
3.2.1 Rendement.....	7
3.2.2 Marge	9
3.2.3 Temps de travail.....	10
3.2.4 Consommation de carburant.....	10
4 Le groupe « ecophyto dephy grandes cultures bio 53-72 » du CIVAM Bio 53	11
Partie 2 - Matériel et méthode	12
1. Présentation de la zone d'étude	12
1.1 Contexte pédoclimatique.....	12
1.2 Contexte sociotechnique et économique.....	12
2. Présentation des systèmes de culture étudiés.....	13
3. Collecte des données.....	14
3.1 Caractéristiques du système de culture	14
3.2 Itinéraires techniques.....	14
3.3 Pratiques de travail du sol	14
4. Construction des indicateurs.....	14
4.1 Performances économiques.....	15
4.1.1 Cas de la paille et des intrants organiques.....	15
4.2 Position de rendement	16
4.3 Date et position de semis.....	16
4.4 Intensité de travail du sol – STIR.....	16
4.5 Autres indicateurs de travail du sol	17
4.6 Consommation de carburant par hectare.....	17
4.7 Efficience de consommation de carburant	18
4.8 Temps de travail	18
4.9 Ratio entre les cultures d'hiver et les cultures de printemps.....	18
5. Analyse des données.....	18
Partie 3 - Résultats	21
1. Les composantes de l'intensité de travail du sol.....	21
1.1 A l'échelle du système	21
1.2 A l'échelle de la pratique de travail du sol.....	23
2. Relation entre le STIR et les performances des ITK	27
2.1 Présentation générale.....	27
2.2 Analyse par groupe de STIR.....	28
2.2.1 Présentation des groupes	28
2.2.2 Comparaison de la multi performance des groupes	29
3. Profil d'ITK ABC performants	30
Partie 4 - Discussion	34

1.	La méthodologie	34
1.1	Une méthodologie coconstruite avec un groupe d'agriculteurs	34
1.2	Une méthode basée sur des références	35
1.3	Tentative de définition de l'ABC	35
1.4	L'approche statistique	35
2.	La réduction du travail du sol est multi performante	35
2.1	L'intensité de travail du sol est le résultat d'une combinaison de pratiques.....	35
2.2	Le contexte de production n'influe pas l'intensité de travail du sol	36
2.3	Réduire le travail du sol n'est pas incompatible avec la multi performance.....	36
2.4	Tentative de détermination d'une typologie d'un ITK ABC performant.....	37
3.	Perspectives de recherche.....	38
Conclusion.....		40
<i>Références bibliographiques</i>		
<i>Annexes</i>		

Table des figures

Figure 1 – Classification des opérations de travail du sol.....	2
Figure 2 - Effets directs et indirects des actions mécaniques liées au travail du sol sur les états des sols cultivés.....	3
Figure 3 - Schéma conceptuel des effets du travail du sol sur les organismes vivants du sol, les fonctions et les services écosystémiques	4
Figure 4 – Rendement moyen des cultures en fonction du type de travail du sol	7
Figure 5 – Effet du travail du sol sur le rendement.....	8
Figure 6 – Mindmap représentant les composantes impactant le rendement et la marge des système de cultures biologiques.....	10
Figure 7 – Répartition géographique des systèmes de culture étudiés	12
Figure 8 - Schéma récapitulatif de la construction des indicateurs.....	18
Figure 9 - Histogramme du STIR	21
Figure 10 - Score de STIR selon le système de culture	22
Figure 11 – Profondeur de travail du sol en fonction du STIR.....	24
Figure 12 – Vitesse de travail du sol en fonction du STIR.....	24
Figure 13- Distribution des valeurs de STIR par outil.....	25
Figure 14 - STIR en fonction du nombre de labour.....	25
Figure 15 – STIR en fonction du nombre de passages de herse rotative	26
Figure 16 - Profil moyen des ITK par catégorie de STIR.....	28
Figure 17 - Marge directe en fonction du STIR.....	29
Figure 18 - Rendement par groupe de STIR	30

Table des tableaux

Tableau 1 – Synthèses non exhaustive des outils et indicateurs de la performance des systèmes agricoles	5
Tableau 2 – Synthèse des résultats d’essais sur la performance de rendement du travail du sol réduit comparé au labour.....	9
Tableau 3 - Caractéristiques des systèmes étudiés.....	13
Tableau 4 – Valeurs fertilisantes des matières organiques	16
Tableau 5 - Classement des outils en fonction de la typologie STIR	17
Tableau 6 - Synthèse de la littérature des valeurs de STIR associées aux pratiques de travail du sol	17
Tableau 7 - Règles de présentation de la significativité.....	19
Tableau 8 - Présentation des variables de l'analyse statistique	20
Tableau 9 - Statistique descriptive du STIR	21
Tableau 10 - Corrélation entre les indicateurs du système de culture et le score STIR.....	21
Tableau 11 - Résultat de test d'hypothèses entre le score de STIR et les variables	22
Tableau 12 - Corrélation entre les indicateurs du système de culture et le score STIR.....	23
Tableau 13 - Corrélation entre le STIR et les indicateurs de performance des ITK.....	27
Tableau 14- Résultats de tests d'hypothèses en fonction des groupes de STIR.....	29
Tableau 15 – Médiane des indicateurs de performances retenus.....	30
Tableau 16 – Indicateurs de performance par groupe.....	31
Tableau 17 – Proportion de type de précédent cultural par groupe	31
Tableau 18 – Proportion de cultures par groupe	32
Tableau 19 - Recours aux outils de travail du sol selon les groupes	32
Tableau 20 - Comparaison des modalités de semis AB et ABC.....	33

Table des abréviations

AB : agriculture biologique

ABC : agriculture biologique de conservation

ACS : agriculture de conservation des sols

Civam : centre d'initiative pour valoriser l'agriculture et le milieu rural

Dephy : démonstration, expérimentation et production de références sur des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires

FNAB : fédération nationale d'agriculture biologique

GC : grandes cultures

Inrae : institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

ITK : itinéraire technique

PE : polyculture élevage

Rusle2 : revised universal soil loss equation, version 2 (en français : équation universelle révisée de perte de sol)

SAU : surface agricole utile

SDC : système de culture

STIR : soil tillage intensity rating (en français : évaluation de l'intensité du travail du sol)

UGB : unité de gros bétail

Introduction

En 1987, le rapport Brundtland constate que les problèmes environnementaux sont principalement dus aux activités humaines et pose les bases du développement durable qui « répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leur propres besoins » (Brundtland 1987). Le rapport consacre un chapitre à la sécurité alimentaire en dénonçant les inégalités d'accès aux ressources alimentaires, le recours aux techniques agro-industrielles destructrices de l'environnement et préconise des « pratiques agricoles écologiquement rationnelles ». L'agriculture biologique (AB), par ses externalités positives comparées à l'agriculture conventionnelle est une réponse à ces enjeux (ITAB 2024).

En France, à la fin de la seconde guerre mondiale, des paysans, médecins, chercheurs et agronomes se réunissent pour défendre leur vision d'une agriculture naturelle. Ces pionniers sont influencés par différents mouvements et pratiques alternatives (biodynamie, homéopathie). L'agriculture biologique évolue en s'opposant à l'agriculture industrielle et s'institutionnalise (création de Nature et Progrès, de la FNAB) mais reste marginale (3 à 5K producteurs, 0,5% de la consommation en 1978). Dans les années 1980 à 2000, les scandales sanitaires (ESB, veaux aux hormones) renforcent cette opposition et suscite l'intérêt des consommateurs (Leroux 2015). En 1988, la mention « agriculture biologique » et le logo AB sont créés. En 1991, un cahier des charges européen encadre les pratiques (Agence Bio [sans date]). En 2023, la part de l'AB dans la surface agricole utile (SAU) française est de 10,4% (2 700K hectares) soit 14% des fermes. En Mayenne, l'AB représente 9,4% de la SAU (32K hectares) (Agence Bio 2023a). En 2022, la conjoncture économique a impacté l'AB. Les ventes ont baissé de 5% et les volumes produits de 9% par rapport à 2021 (Agence Bio 2023b).

L'AB fait face à un enjeu de maintien de la fertilité des sols en raison du recours au labour. L'agriculture biologique de conservation (ABC) se développe en réponse à cet enjeu. C'est une notion récente, issue de la contraction de l'AB et de l'agriculture de conservation (ACS). La première étant régie par un cahier des charges et la seconde, guidée par une définition citant la couverture permanente des sols, une perturbation mécanique minimale et la diversité des cultures (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture 2022). Sans définition officielle, l'ABC aspire à respecter les deux ensembles de pratiques. L'agriculteur possède aussi ses propres objectifs qui peuvent être environnementaux, sociaux, de qualité ou de rendement. La société fixe des objectifs aux systèmes de culture, au travers des aides publiques (Doré, Meynard 2006).

Le CIVAM Bio 53 est l'association des agriculteurs biologiques de la Mayenne (53). Elle est constituée par et pour les agriculteurs afin de répondre à leurs attentes techniques et économiques et défendre leurs intérêts. Au sein des adhérents, un groupe travaille sur les techniques liées à l'agronomie et aux grandes cultures. Le sujet de l'ABC est régulièrement discuté et est une source de motivation pour les participants. La question suivante est régulièrement posée : l'agriculture biologique de conservation est-elle performante ? La mission donnée par les agriculteurs à l'alternant a été de caractériser et mesurer la performance de leurs pratiques de réduction du travail du sol.

Dans un premier temps, un état de l'art des pratiques de travail du sol, des facteurs influant ces pratiques et leurs performances, et des méthodes d'évaluation sera présentés. Dans un second temps, la méthodologie de l'étude des pratiques de travail du sol sera exposée. Enfin les résultats seront présentés et discutés au regard des connaissances actuelles.

Partie 1 - Contexte de l'étude

Le contexte de l'étude est présenté de la manière suivante. Dans un premier temps le travail du sol, son impact sur la fertilité des sols et les enjeux de l'ABC sont définis et présentés (1). Dans un second temps, les différents indicateurs de performance sont détaillés (2). Ensuite, une revue de la littérature sur les composantes de la performance est présentée (3). Enfin, le contexte de l'étude et la problématique du travail sont posés (4).

1 Le travail du sol

1.1 Définition

Le travail du sol est une pratique culturale faisant partie de l'itinéraire technique (ITK). Sébillotte définit l'itinéraire technique comme étant une « combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de contrôler le milieu et d'en tirer une production donnée » (Sébillotte 1974). Les enjeux de l'itinéraire technique sont le maintien d'une bonne structure de sol pour assurer les fonctions de fertilité, la gestion des adventices et une alimentation en éléments nutritifs. L'ITK comprend les opérations culturales suivantes (Husson 2013) :

- Les travaux du sol
- Les actions de semis
- Les apports d'intrants
- Les actions de désherbage
- La récolte
- Les actions post-récolte (dans certains cas)

Le travail du sol est défini comme « l'ensemble des façons culturales, opérations mécaniques visant à maintenir ou à mettre un terrain (un champ, une parcelle) dans l'état physique considéré comme le plus favorable possible à la réussite d'une culture » (Morlon, Sigaut 2023). Le travail du sol et en particulier le labour, permet de contrôler les adventices, enfouir les résidus de culture et apports organiques, restructurer les sols (Védie 2009).

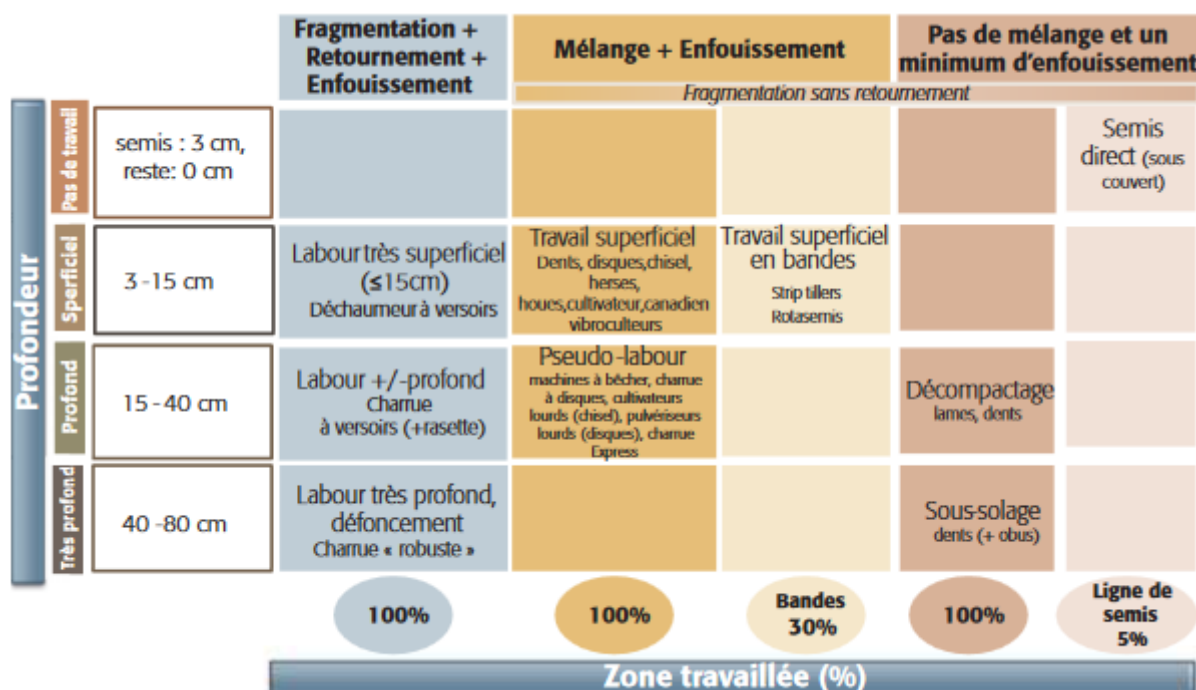


Figure 1 – Classification des opérations de travail du sol (Roger-Estrade, Labreuche, Boizard 2014)

Comme le montre la figure 1, les outils peuvent être classifiés en trois grandes classes en fonction de leur action sur le sol : les outils qui retournent le sol quelle que soit la profondeur (charrue à versoirs), les outils sans retournement mais qui mélangent et enfouissent et les outils qui ne mélangent pas et n'enfouissent que très peu.

Les outils sont discriminés en fonction de la profondeur de travail et de la proportion de zone travaillée. Au-delà de l'effet de l'outil, la vitesse, la profondeur et le réglage jouent un rôle dans la pratique du travail du sol (Morris et al. 2010). Cette pratique est intrusive pour les sols et modifie ses caractéristiques.

1.2 Effets du travail du sol sur la fertilité des sols

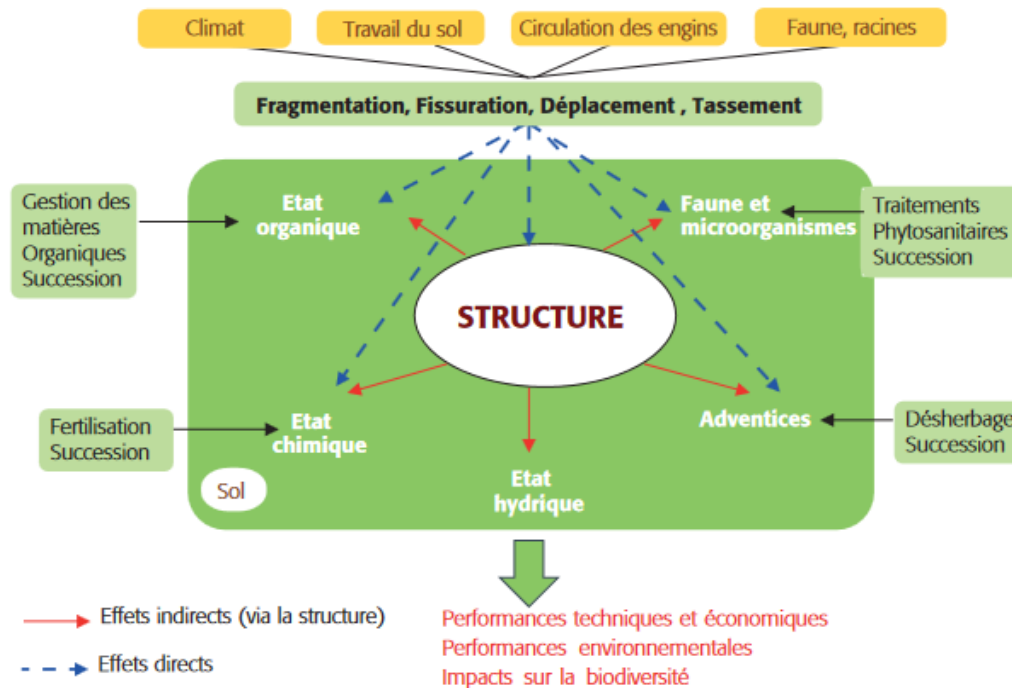


Figure 2 - Effets directs et indirects des actions mécaniques liées au travail du sol sur les états des sols cultivés ((Roger-Estrade, Labreuche, et Boizard 2014)

Comme le montre la figure 2, le travail du sol, par la modification de la structure, conditionne de nombreuses caractéristiques du sol : répartition des graines d'adventices, circulation de l'eau, dégradation de la matière organique, disponibilité des éléments. En comparaison, les autres facteurs ont une influence mineure sur la structure (cf. figure 2) (Roger-Estrade, Labreuche, Boizard 2014).

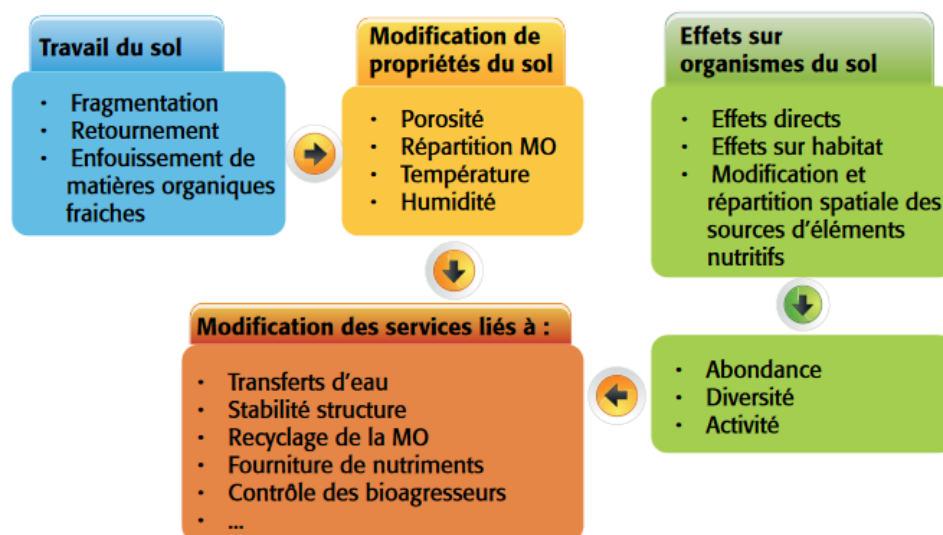


Figure 3 - Schéma conceptuel des effets du travail du sol sur les organismes vivants du sol, les fonctions et les services écosystémiques (Bouthier et al. 2014)

Le travail du sol modifie les propriétés physiques des sols (porosité, structure). Comme le montre la figure 3, cela entraîne une modification des caractéristiques biologiques en dégradant les habitats des microorganismes. Le travail du sol par retournement (labour) a pour conséquence de favoriser la biomasse bactérienne au détriment des populations fongiques. La réduction du travail du sol entraîne une augmentation de la quantité et diversité de la biomasse des microorganismes du sol (Bouthier et al. 2014).

En modifiant l'écosystème du sol, le travail du sol impacte les services rendus pour la production (recyclage de la matière organique, stockage de l'eau) et in fine la fertilité et les performances des agro-systèmes (Alabouvette, Cordier 2018). Cependant, l'étude de l'effet du travail du sol sur la fertilité des sols est complexe compte tenu de la variabilité des nombreuses interactions dans l'espace et le temps (Bouthier et al. 2014). Ces externalités négatives du travail du sol amènent certains agriculteurs à revoir l'intensité de leurs pratiques.

1.3 La réduction du travail du sol en agriculture biologique ; présentation et enjeux

La limitation du travail du sol regroupe d'une part les techniques culturales simplifiées (TCS), qui comprennent les travaux du sol sans labour, préservant au minimum 30% des résidus de surface (Morris et al. 2010), le pseudo-labour (travail profond sans retournement) et le travail superficiel (8-15cm) qui enfouit les résidus de cultures. D'autre part, des techniques de travail très superficiel (3-15cm) et le semis direct sans enfouissement sont pratiqués. Le sous soulage et le décompactage sont des techniques sans retournement (donc non labour) mais qui ne sauraient être considérées comme du travail limité du sol (TCS) (Chenu 2013).

Au-delà de la diminution des effets sur l'écosystème et la fertilité des sols, la réduction du travail du sol a d'autres avantages. Certaines études montrent une diminution de l'érosion en raison de la diminution du travail du sol et de la présence de couverture végétale (Seitz et al. 2019), une tendance à une captation du carbone plus importante (Krauss et al. 2017) et une meilleure rétention en eau (Krauss et al. 2010).

La réduction du travail du sol en AB implique de se passer de ses avantages agronomiques associés. Il est donc nécessaire de mettre en place d'autres moyens pour assurer ces fonctions.

La réduction du travail du sol entraîne de meilleures conditions pour les adventices. Le raisonnement de la rotation, le faux-semis, le désherbage mécanique sont des pratiques à renforcer en cas de réduction du travail du sol. Cette problématique est un frein majeur à l'adoption des pratiques de conservation des sols en AB. Le travail intense du sol favorise la minéralisation de la matière organique et la disponibilité pour les plantes. En réduisant le travail du sol, les risques de compaction seraient plus importants, et pourraient impacter les cycles de l'azote. Les apports de matières organiques et les implantations et destruction de couverts sont donc à raisonner en ce sens (Peigné et al. 2007; Mäder, Berner 2011; Gruber, Claupein 2009).

2 Les outils de caractérisation des itinéraires techniques

2.1 Caractériser l'intensité de travail du sol

La caractérisation de l'intensité de travail du sol peut l'être selon plusieurs angles (Roger-Estrade, Labreuche, Boizard 2014) :

- Sur la base de l'outil le plus profond. Cela permet de renseigner sur la dilution des nutriments, le mélange des matières organiques, la fragmentation des couches profondes. Cette classification ne prend pas en compte la fréquence des passages d'outils, ni la diversité des outils et des pratiques, avec la limite de ne pas représenter l'intensité des passages (temps, consommation de carburants)
- Sur la base du nombre de passages d'outils. Cela permet de renseigner sur le risque de tassement et le temps de travail.

2.2 Caractériser la performance

Le concept de multi performance n'est pas clairement défini. La multi performance s'appuie sur l'étude de plusieurs indicateurs (avec leur propre échelle) et les agrège en un indicateur final. De nombreux outils existent : IDEA4 (Zahm, Girard 2023), diagnostic de durabilité CIVAM. En agriculture, les indicateurs observés sont principalement économiques, environnementaux et sociaux (Emonet, Coquet 2023; Bockstaller, Sabatier, Tchamitchian 2021).

Tableau 1 – Synthèses non exhaustive des outils et indicateurs de la performance des systèmes agricoles

	Performance économique	Performance sociale	Performance environnementale
Exploitation	IDEA4, diagnostic de durabilité CIVAM, MASC		Bilan CAP2R
	Système de culture	Revenu disponible, excédent brut d'exploitation, marge brute, marge nette	
ITK			

Comme le montre le tableau 1, la caractérisation de la multi performance est principalement développée à l'échelle de l'exploitation ou du système de culture. A l'échelle de l'itinéraire technique, il n'existe que des indicateurs pour mesurer les performances une à une. Pour la performance économique, la marge directe est utilisée dans de nombreux référentiels d'analyse

technico-économique agricole à l'échelle de l'ITK (Quere 2024; Plantier 2018; Garnier 2011). La performance environnementale est calculée par la méthode du bilan carbone, à l'échelle de l'exploitation ou du système de culture. La performance sociale est intégrée aux outils d'analyse de la multi performance (intégration dans la société, vente directe), le temps de travail semble être le seul indicateur social à l'échelle de l'ITK.

3 État des lieux de la performance des systèmes de grandes cultures biologiques

Les pratiques de travail du sol de l'itinéraire technique sont placées dans un ensemble de décisions et d'éléments appelé système de culture, prenant part à un ensemble plus vaste, le système d'exploitation, lui-même placé dans un bassin de production. Ces éléments jouent un rôle important sur les performances globales des pratiques culturales.

3.1 La performance du contexte de production

Le système de production

Le système de production est soumis à plusieurs variables externes, qu'elles soient économiques (présence d'entreprises à l'aval et à l'amont), structurelles (infrastructures) ou politiques (aides directes). Ces variables influent sur le système d'exploitation, et sur les décisions liées au système de culture (Papy 2013). Fontaine affirme que la rentabilité économique est fortement dépendante des prix de ventes et du système de production (Fontaine et al. 2012). En revanche, l'essai de la ferme de Boigneville (grandes cultures biologiques seules sans apport de matières azotées exogènes) montre une faible sensibilité du résultat économique à l'évolution des prix du marché, mais une sensibilité forte au niveau de rendement (2009-2022) (Pegues et al. 2023).

Les pratiques de travail du sol dépendent aussi de la perception que l'agriculteur fait de ses parcelles (Marie, Gouée 2008).

Le contexte d'exploitation

La présence d'un atelier d'élevage au sein du système d'exploitation joue un rôle sur les performances. Le système de polyculture élevage (PE) peut être défini comme « l'association de cultures et d'élevage dans un cadre coordonné, le plus souvent à l'échelle de l'exploitation agricole, mais aussi au niveau territorial » (van Keulen, Schiere 2004). La présence d'un atelier d'élevage couplé à un système de culture peut aller de la simple cohabitation à la mise en relation et complémentarité. Les études menées en AB ont montré une tendance à une meilleure marge pour les systèmes PE et une plus faible variabilité du rendement en comparaison avec les systèmes GC (Mischler et al. 2018; Ronceux, Fevrière 2017). La présence de ruminants serait un avantage économique permettant de valoriser les cultures ratées et les couverts d'intercultures (à dire d'agriculteurs).

Le contexte du système de culture

La recherche agronomique a conceptualisé le fonctionnement des exploitations agricoles de grandes cultures. Le système de culture est défini par Sébillotte comme étant « l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique » (Sébillotte 1974). Cette notion prend en compte les cultures et leurs successions et les éléments de l'itinéraire technique. C'est une vision d'agronome, une conceptualisation des pratiques de l'agriculteur. L'assolement, la succession des cultures font partie du système de culture.

Les rotations en grandes cultures biologiques ont plusieurs objectifs agronomiques. Il s'agit de casser le cycle des cultures (ainsi que les ravageurs et adventices associés), d'enrichir le sol par

la présence de légumineuses pérennes et d'améliorer la structure du sol. Bien que la littérature scientifique et technique ne présente que peu d'études portant sur les rotations biologiques, les rotations longues seraient celles qui présentent les meilleurs résultats économiques (Glandières 2015).

La présence de prairies comportant des légumineuses semble bénéfique aux performances des systèmes de cultures. Leurs avantages agronomiques (structuration du sol, captation de l'azote atmosphérique, modification du cycle des ravageurs) sont reconnus (Mangin, Cohan 2012). La présence de luzerne dans les rotations diminue la dépendance aux variations de prix des intrants et de vente en système AB (Ronceux et Fevrelière 2017). Dans certaines études, la présence d'une légumineuse améliore la marge en raison des avantages agronomiques (Garnier 2011; Mangin, Cohan 2012). Dans d'autres, la marge est dégradée par les charges mécaniques plus importantes (Mischler et al. 2018). Dans l'ensemble, les rotations biologiques sont rentables.

La performance d'un système de culture dépend de nombreux facteurs, à plusieurs échelles (bassin de production, exploitation, système de culture). Les opérations de travail du sol agissent à la plus petite échelle spatiale et temporelle.

3.2 La performance des pratiques de réduction du travail du sol

A l'échelle de l'itinéraire technique, les performances de travail du sol sont de plusieurs ordres : productif (rendement), économique (marge), temps de travail et consommation de carburants.

3.2.1 Rendement

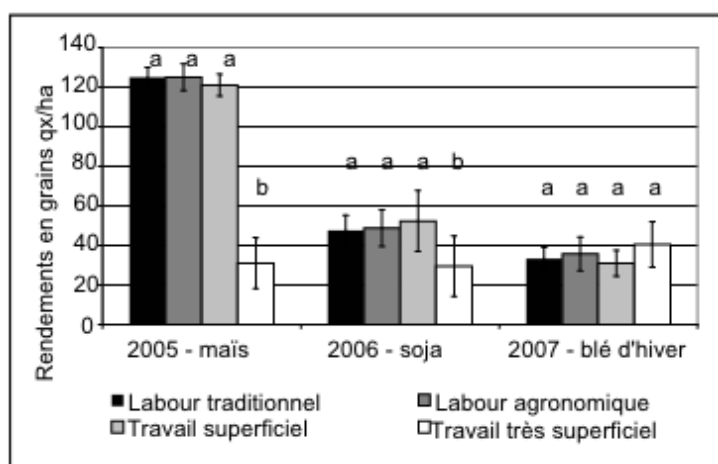


Figure 4 – Rendement moyen des cultures en fonction du type de travail du sol (Peigné et al, 2009)

Dans le cadre d'une expérimentation regroupant trois sites expérimentaux (Bretagne, Pays de la Loire et Rhône Alpes), il n'a été observé de différence significative de rendement que pour le travail superficiel comparé au labour, labour agronomique et travail superficiel comme le montre la figure 4. Sur un des 3 sites expérimentaux, une forte chute de rendement a été observée pour le travail superficiel, en raison de la forte présence d'adventices. La compétition a été contrôlée au bout de la 3^{ème} année (Peigné et al. 2009).

Dans le cadre du projet SolAB, il a été montré que la diminution du travail du sol est possible en AB mais entraîne l'augmentation du nombre d'adventices et de repousses des couverts précédents. Lorsque les adventices ne sont pas maîtrisées, cette concurrence impacte le rendement de la culture sur les modalités de travail simplifiées, en comparaison aux techniques avec labour. Si les adventices sont maîtrisées, les performances sont similaires. Bien que les

techniques culturales simplifiées aient tendance à faire augmenter le nombre d'adventices vivaces, les performances de rendement sont similaires (Peigné et al. 2012).

Le projet SUSTAIN n'a pas montré de différences significatives de rendement entre labour (25cm), labour agronomique (15cm), travail réduit (15cm) et travail superficiel (8cm) pour les cultures de colza et association trèfles graminées. Pour le blé, la modalité en semis direct a montré un rendement 10% inférieur comparé aux autres modalités (ARAD2 2022).

Plusieurs essais menés en Suisse par le FiBL pendant 3ans sur 9 fermes biologiques ont montré de fortes différences de rendements entre le labour et le travail simplifié (maximum 10cm) parmi les exploitations. Il a été observé une baisse de 8% des rendements en moyenne. Une minéralisation plus lente et une augmentation des adventices à graines sont les hypothèses émises pour expliquer la baisse de rendement (Mäder 2012).

L'essai biologique long terme de Frick (Suisse), comparant travail du sol conventionnel (charrue à 15cm et rototiller à 5cm) au travail du sol réduit (chisel à 15cm et rototiller à 5cm) a montré que le travail réduit atteint 97% du rendement de la modalité labourée (céréales et tournesol) (Berner et al. 2008). Une étude sur ce même essai pour la période 2003 à 2018 a montré des rendements moyens supérieurs de 2% (-4% pour les cultures d'hiver et +8% pour les cultures de printemps) pour la modalité travail réduit comparé au travail conventionnel (Krauss et al. 2020). Une autre étude sur cet essai montre que si les adventices sont correctement gérées et que la nutrition est assurée, le potentiel de rendement est plus important dans la modalité de travail réduit (Hofmeijer et al. 2019).

Globalement, les travaux menés par le FiBL sur la réduction du travail du sol montrent des rendements moyens plus faibles pour les cultures de rente, équivalents pour les cultures fourragères et dans l'ensemble plus variables (Krauss 2021).

L'essai DLD-GCB mené au Québec par le CETAB+ a montré une diminution de 5% de rendement pour la modalité de travail au chisel (18-20cm) comparé à la modalité du labour (18-20cm), sur 3 campagnes (2020 à 2022) (Gagné, Wilkinson 2023).

En France, l'essai « Thil » n'a pas montré de différences de rendements entre les modalités de labour classique, labour agronomique, outils à dents superficiel et outils à dents ou rotatif très superficiel (Peigné et al. 2018).

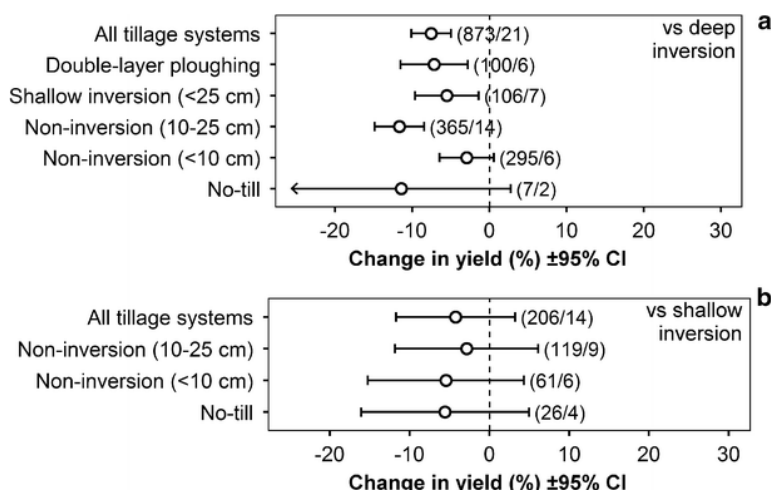


Figure 5 – Effet du travail du sol sur le rendement, comparé au labour profond (a) et au labour superficiel < 25cm (b) d'après Cooper et Al, 2016

Une méta-analyse a montré que les rendements moyens sont inférieurs de 7,6% dans les modalités de travail réduit comparé aux modalités de labour profond (Figure 5.a). Cependant, comme le montre la figure 5, le travail sans retournement profond a montré une baisse de rendement (11,6%) par rapport au labour profond, alors que le travail superficiel sans retournement n'a pas montré de différence.

Les modalités comparées au labour superficiel (Figure 5.b) n'ont pas montré de différences significatives (rendement inférieur de 4,2%). Cette méta-analyse conclut que le travail du sol superficiel sans inversion maintient les rendements, comparé au labour (Cooper et al. 2016).

Tableau 2 – Synthèse des résultats d'essais sur la performance de rendement du travail du sol réduit comparé au labour

Programme	Performance du travail du sol réduit comparé au labour	Références
	Rendements moins importants pour le maïs et soja en travail très simplifié	(Peigné et al. 2009)
SolAB	Rendement moindre si adventices non maîtrisées, rendement identique si maîtrise des adventices	(Peigné et al. 2012)
SUSTAIN	Pas de différences	(ARAD2 2022)
Essai en fermes – FiBL	-8% de rendement, très forte variabilité des rendements	(STROESSER [sans date])
Essai long terme de Frick – FiBL	+ 2% de rendement	(Mäder 2012)
DLD-GCB – CETAB+	-5% de rendement	(Gagné, Wilkinson 2023)
Essai « Thil »	Pas de différence de rendements après 10 d'adoption de pratiques	(Peigné et al. 2018)
	Comparaison au labour profond :	
	-7,6% de rendement pour le travail réduit comparé au labour profond	
	-11,6% de rendement pour le travail profond (sans retournement)	
Méta-analyse	Pas de différence pour le travail superficiel	(Cooper et al. 2016)
	Comparaison au labour superficiel :	
	Pas de différence significative	

Les différents essais menés en stations expérimentales ou en réseaux de parcelles chez des agriculteurs, synthétisés dans le tableau 2, montrent une tendance à une baisse de rendement pour le travail du sol simplifié, comparé au labour. Certains essais montrent que la densité d'adventices impacte négativement le rendement. Si les adventices sont maîtrisées, il ne semble pas y avoir d'impact de la diminution du travail du sol sur le rendement. La littérature scientifique et technique ne présente que très peu d'analyses technico-économiques de comparaison d'itinéraires techniques avec labour comparé au travail du sol réduit. En agriculture conventionnelle, la différence entre les systèmes est 4,5% inférieur pour les systèmes sans labour comparé aux systèmes labour (Roger-Estrade, Labreuche, Boizard 2014).

3.2.2 Marge

Le programme « Reine Mathilde » a observé une baisse de 13% de la marge semi-nette pour le travail du sol simplifié en comparaison avec la rotation avec labour. La baisse de la marge est fortement liée aux charges mécaniques de la destruction sans labour de la prairie, en été avec des passages successifs et l'implantation d'un couvert avant le semis de maïs. L'étude précise que les charges de destruction auraient été moindres dans le cas d'une destruction de printemps sans implantation de couvert (Metivier et al. 2022).

Au Royaume Uni, les systèmes conventionnels de labour ont montré des charges mécaniques de travail du sol plus importantes pour les systèmes labourés que pour les systèmes de travail sans labour profond, superficiel et semis direct (Bailey 2007 cité par Morris et al. 2010).

3.2.3 Temps de travail

En agriculture conventionnelle, l'essai de Boigneville a montré en 2007 une diminution du temps de travail avec la baisse de l'intensité de travail du sol et du nombre de passages d'outils (-24% en TCS, -38% en semis direct comparé au labour) (Crochet, Labreuche, Couture 2007).

3.2.4 Consommation de carburant

Une étude menée par les chambres d'agriculture estime que la consommation de GNR par centimètres de sol travaillé est de 0,5 à 1 litre. Cette même étude estime que le potentiel de gain de consommation concernerait les outils de travail du sol intenses (ameublissement, labour, sous solage, déchaumage profond, préparation de semis) (Walter et al. 2022).

Il n'existe pas de littérature scientifique ou technique sur le lien entre pratiques de travail du sol et consommation de carburants en agriculture biologique.

En agriculture conventionnelle, l'essai de Boigneville a montré en 2007 une diminution de la consommation de carburant avec la baisse de l'intensité de travail du sol (-23% en TCS, -35% en semis direct comparé au labour) (Crochet, Labreuche, Couture 2007).

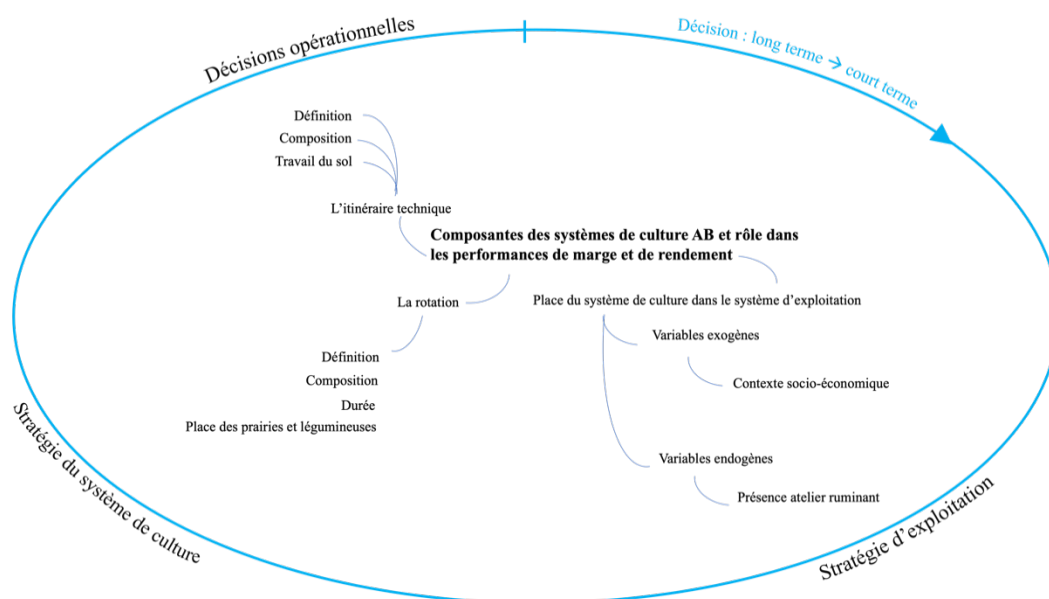


Figure 6 – Mindmap représentant les composantes impactant le rendement et la marge des système de cultures biologiques (création personnelle)

Au global, l'ensemble des systèmes de grandes cultures en AB sont rentables, quelles que soient les pratiques et les typologies de systèmes. Comme le montre la figure 6, les pratiques de travail du sol ne sont qu'une part de la performance globale des systèmes de cultures. Des facteurs plus importants à l'échelle du bassin de production (contexte socioéconomique), du système d'exploitation (présence d'un atelier d'élevage), du système de culture (rotation, présence de légumineuses) viennent impacter les performances globales, et in fine les performances liées au travail du sol.

4 Le groupe « ecophyto dephy grandes cultures bio 53-72 » du CIVAM Bio 53

Depuis 2008, le groupe d'échange « ecophyto dephy grandes cultures bio 53-72 » travaille sur des thématiques techniques liées aux grandes cultures biologiques. Depuis 2017, le groupe s'attarde sur la réduction de l'intensité du travail du sol dans ses travaux. Cet intérêt est variable selon les membres (volonté de réduire le temps de travail, de préserver l'intégrité des sols) et guide de manière plus ou moins importante leurs choix de pratiques. Cette thématique est au centre des échanges. Sans pour autant exclure le recours au labour de leurs itinéraires techniques, les agriculteurs testent des situations sans labour. La technique est opportuniste. En effet, si les conditions pédoclimatiques le permettent, si la structure du sol est correcte et que la présence d'adventices est maîtrisable par le désherbage mécanique, le labour est prohibé. En parallèle, le groupe a développé une approche technico-économique de ses ITK. A chaque fin de campagne, les membres du groupe comparent leurs pratiques et leurs performances (rendement, marge, temps de travail, consommation de carburants). La diminution du travail du sol étant un sujet central, limiter les comparaisons au seul labour/non labour est trop réducteur. Ce constat a amené le groupe à trouver une approche permettant de mesurer finement l'intensité de travail du sol de leurs pratiques et de comparer leurs performances sur cette base.

La problématique et les hypothèses qui en découlent sont issues des réflexions et des intuitions des agriculteurs. Il s'agit d'affirmer ou non ces idées. La question principale est la suivante :

L'agriculture biologique de conservation est-elle multi-performante ? Analyse des pratiques de travail du sol en grandes cultures en Mayenne.

Hypothèse 1 : L'intensité de travail du sol est une combinaison de plusieurs facteurs : choix de l'outil, vitesse, profondeur, typologie du système.

Sous hypothèse : le recours au labour n'est pas compatible avec l'ABC.

Sous hypothèse : le recours à la herse rotative n'est pas compatible avec l'ABC.

Le recours au labour et l'utilisation de la herse rotative sont présentés couramment comme des outils antagonistes à la réduction du travail du sol. L'objectif est de comprendre dans quelle mesure ces pratiques sont incompatibles avec l'ABC.

Hypothèse 2 : L'ABC est plus performante dans les systèmes PE que GC.

Les systèmes polyculture élevage présenteraient des avantages agronomiques liés à la présence de prairies et de ruminants valorisant les déchets de cultures. L'objectif est de mesurer ce lien.

Hypothèse 3 : La réduction du travail du sol n'impacte pas les performances économiques.

Cette hypothèse permet de vérifier la fiabilité économique des pratiques de travail du sol. L'objectif est de connaître s'il existe des seuils de travail du sol entraînant des pertes ou des gains économiques.

Hypothèse 4 : La réduction du travail du sol n'impacte pas le rendement.

Hypothèse 5 : La réduction du travail du sol permet de diminuer le temps de travail et la consommation de carburants.

Hypothèse 6 : Il existe une typologie d'ITK ABC performants.

Les pratiques ABC sont complexes et incertaines, il s'agit de faire ressortir des points communs entre les pratiques ABC performantes.

Partie 2 - Matériel et méthode

La méthodologie mise en place dans cette étude a pour objectif de répondre aux questionnements posés par les agriculteurs du groupe. Dans un premier temps, la zone d'étude (1) et les systèmes de culture étudiés (2) sont présentés. Ensuite, la méthodologie de collecte des données (3), la construction des indicateurs (4) et l'analyse statistique (5) sont expliquées.

1. Présentation de la zone d'étude



Figure 7 – Répartition géographique des systèmes de culture étudiés

La zone d'étude est le département de la Mayenne et départements limitrophes. Comme le montre la figure 7, les systèmes étudiés sont répartis de façon homogène en Mayenne. Deux systèmes sont excentrés en Sarthe.

1.1 Contexte pédoclimatique

La région étudiée est située à la jointure entre le Massif armoricain et le Bassin parisien. Le territoire est influencé par le climat océanique, la température moyenne est de 11,5°C, le cumul annuel de précipitations est de 750mm. Les sols de type limono-argileux à bon potentiel sont majoritaires. Certains sols ont une part limoneuse plus importante et sont plus difficiles à travailler (Olivier 2022).

1.2 Contexte sociotechnique et économique

En 2020, l'agriculture occupe 77% de la surface du département et 7% des emplois. L'activité la plus importante est la production animale (68% du temps de travail agricole), principalement l'élevage bovin laitier (38% du temps de travail agricole). La production céréalière représente 9% de la production totale (% en valeur, 2020). En 2020, 528 exploitations agricoles étaient engagées ou en conversion vers l'agriculture biologique, soit 8,1% de la SAU départementale (Olivier 2022). Les opérateurs technico-économiques sont nombreux et divers. Les systèmes étudiés ont accès aux mêmes entités.

Les systèmes de culture étudiés font ou ont fait partie du groupe DEPHY grandes cultures bio 53-72. Parmi les agriculteurs du groupe, certains se revendiquent comme pratiquants ou aspirants à l'ABC tandis que d'autres n'ont pas la diminution du travail du sol comme objectif principal. Les agriculteurs des systèmes étudiés sont donc engagés dans une démarche de progression, de remise en cause de leurs pratiques et d'expérimentation. Ils prennent des risques dans leurs pratiques.

2. Présentation des systèmes de culture étudiés

Tableau 3 - Caractéristiques des systèmes étudiés

Identifiant	Surface de la rotation	Proportion de prairies dans la rotation	Intrants organiques	Irrigation	Paille récoltée	Atelier d'élevage	Présence de ruminants
	ha	%	t/ha		%		ugb/ha
1	30,0	0,0	15,0	oui	0,0	Bovin viande	2,3
2	30,0	0,0	1,3	non	0,0	Non	0,0
3	84,0	12,0	10,0	non	12,0	Bovin viande	0,2
4	125,0	12,0	0,4	oui	12,0	Non	0,0
5	25,0	32,0	10,6	oui	32,0	Bovin viande et volailles	4,0
6	33,0	24,0	10,6	non	24,0	Bovin viande et volaille	3,0
7	15,0	00,0	5,0	non	0,0	Volaille	0,0
8	50,0	36,0	10,0	non	36,0	Bovin viande et porcs	0,8
9	70,0	20,0	5,7	non	20,0	Bovin viande et porc	0,3
10	75,0	0,0	5,3	non	0,0	Volailles	1,6
11	55,0	22,0	3,6	non	22,0	Volailles	0,9
12	50,0	0,0	19,8	non	0,0	Volailles et porcs	0,0
13	67,0	30,0	1,2	non	30,0	Bovin viande	0,9
14	55,0	36,0	0,0	non	36,0	Non	0,0
15	48,0	38,0	8,0	non	38,0	Bovin viande	1,9
16	75,0	23,0	0,8	non	23,0	Volailles	0,0
18	45,0	0,0	10,6	non	0,0	Volailles	0,0
21	73,0	0,0	21,8	non	0,0	Non	na

Le tableau 3 présente les caractéristiques des systèmes étudiés. Ils sont divers, avec des gradients importants pour les caractéristiques observées. Chaque système de culture est piloté par un agriculteur. Seuls les systèmes 5 et 6 sont pilotés par le même agriculteur (un SDC avec irrigation et l'autre sans). Les surfaces de rotation vont de 25 à 125 hectares. Certains systèmes ont accès à l'irrigation. Il y a des systèmes de polyculture élevage et de grandes cultures seules. La complémentarité entre les ateliers d'élevage et de cultures diffère selon les systèmes. Il y a des systèmes ayant jusqu'à 40% de prairies multi-espèces dans la rotation et d'autres à 10%. Quant à la présence de ruminants, cela va de 0,2 à 4 UGB ruminants par hectares de rotation. Certains systèmes n'ont ni prairies ni ruminants dans la rotation. Les apports de matières organiques (toutes natures confondues) sont aussi assez hétérogènes entre les systèmes (de 0 à 21,8 t/ha). Les cultures majoritaires dans ces systèmes sont : blé tendre d'hiver, blé tendre d'hiver associé à la féverole, maïs, colza, tournesol. Certains agriculteurs testent des cultures comme le lin, la lentille, les courges, etc.

3. Collecte des données

3.1 Caractéristiques du système de culture

Les caractéristiques des systèmes de culture ont été collectés au moyen d'une enquête téléphonique. Plusieurs indicateurs ont été relevés, grâce à la littérature existante (Deytieux et al. 2012; Froger et al. 2015; Colomb, Aveline, Carof [sans date]) :

- SAU de la rotation
- % moyen de prairies multi-espèces (intégrant des légumineuses) dans la rotation
- Nombre d'UGB ruminants
- Parcelles irrigables
- Estimation de l'azote extérieur apporté par hectares

Les systèmes étudiés étant divers, il s'est avéré complexe de définir des typologies de systèmes (polyculture élevage, grandes cultures seules). La proportion de prairies multi-espèces et le nombre d'UGB ruminants sont les indicateurs qui ont permis d'observer ces différences de systèmes.

3.2 Itinéraires techniques

Les données concernant les itinéraires techniques ont été collectées via le système d'information « agrosyt » développé par l'INRAE (INRAE 2015). Cet outil en ligne permet la saisie des itinéraires techniques des systèmes de culture engagés dans un groupe « ecophyto dephy ferme ». Les données relatives à 452 itinéraires techniques ont été extraites. Des données collectées parallèlement par les animateurs du groupe d'agriculteurs dans une base de données annexe ont été ajoutées. Seuls les itinéraires techniques liés à une culture de vente sont sélectionnés (pas de fourrages). Un travail de traitement des données a été nécessaire pour faire correspondre les deux bases de données avec le logiciel Rstudio (RStudio Team 2020) et le package dplyr (Wickam et al. 2023). Une enquête téléphonique a permis de préciser et compléter certaines données. L'ensemble des opérations culturales de la moisson N-1 à la moisson N réalisées sur la parcelle a été saisi. Il s'agit des passages d'outils, des intrants, du rendement et des dates associées. Des indications sur la nature de la culture, sa typologie (céréales, protéagineux), le nom de l'agriculteur, la campagne, le nom de la parcelle sont renseignés. Après manipulation des données, 452 ITK ont été considérés comme analysables.

3.3 Pratiques de travail du sol

L'enquête téléphonique a permis de collecter les pratiques liées au travail du sol (description de l'outil, profondeur et vitesse de travail) pour chacun des agriculteurs.

4. Construction des indicateurs

Les performances sont mesurées à l'échelle de l'itinéraire technique. Un ITK multi performant est supérieur à la médiane pour la marge directe, inférieur à la médiane pour le temps de travail et la consommation de carburant.

4.1 Performances économiques

Le calcul de la marge provient d'une co-construction avec le groupe d'agriculteurs. Dans cette formule, plusieurs hypothèses sont formulées :

- Coût des outils standardisés provenant d'un barème d'entraide (Chambre d'agriculture France 2023), ajusté pour chaque campagne selon l'inflation (INSEE 2024a) (les outils et coûts sont disponibles en annexe du document)
- Références de prix (vente et achat d'intrants, irrigation) provenant d'un croisement entre une enquête auprès des agriculteurs et des données internes du CIVAM Bio 53 (disponibles en annexe du document)
- Coût standardisé des fertilisants organiques et de la paille
- Pas de prise en compte des amortissements, impôts, taxes, charges sociales, primes, subventions et autres charges de structures

La marge est calculée grâce aux informations de la base de données d'ITK selon cette formule :

$$Marge_{ha} = (rendement/ha \times prix\ de\ vente/t + coproduit) - (\sum(quantité/ha_{intransant} \times coût/t_{intransant}) + \sum(passage\ outil \times coût\ outil) + tours\ irrigation \times 0,3\ euros))$$

4.1.1 Cas de la paille et des intrants organiques

L'étude des pratiques montre que certains agriculteurs récoltent la paille et d'autres la broient. La paille est riche en éléments fertilisants (Gagnaire et al. 2006) et l'exporter revient à devoir compenser par l'apport d'amendement. La paille peut aussi être vendue. La valeur économique de la paille est donc prise en compte dans le calcul de la marge (sous forme de co-produits si elle est récoltée). Le tableau 4 montre les valeurs retenues.

Un ratio établi à dire d'expert et par la littérature permet d'estimer le rendement de paille produit par rapport au rendement de grain. Les machines de récolte ne permettant pas de récolter l'ensemble de la tige, un ratio de 0,8 est appliqué, considérant la paille récoltable, (Agro Transfert, Arvalis 2008).

Les apports de matières organiques sont de deux ordres : les matières organiques de ferme, issues de cession interne et celles achetées à l'extérieur. Le choix a été fait de comptabiliser les matières organiques de la même manière. La revue de plusieurs barèmes a permis de produire un barème de teneurs fertilisantes des différentes matières organiques (tableau 4).

Tableau 4 – Valeurs fertilisantes des matières organiques (d'après (Bize, Evenat, Tisserand 2023; Gigot 2023; Arvalis 2013))

Type de matières organiques	Azote	Phosphore	Potassium	Humus
	Unité/ha	Unité/ha	Unité/ha	Unité/ha
Fumier ovin	6,7	4,0	12,0	1,00
Fumier volailles	21,9	14,7	19,0	1,00
Fumier cheval	8,2	3,2	9,0	1,00
Lisier bovin	1,3	1,5	3,6	0,00
Fientes volailles	39,5	37,8	25,7	0,00
Fumier bovin	6,0	3,0	9,0	1,00
Lisier porc	3,0	2,0	2,0	0,00
Compost bovin	6,0	3,0	11,0	0,00
Paille de céréale	6	1	12,3	1

Source : (Gagnaire et al. 2006; Bize, Evenat, Tisserand 2023)

Pour calculer la valeur économique de la paille et des intrants organiques, les valeurs fertilisantes présentées dans le tableau 4 sont multipliées à la valeur (euros) de l'élément selon le marché conventionnel (Pagnot, Dupont, Perissat 2022). Pour cette étude, nous ne retiendrons que les éléments N, P, K et la valeur de l'humus (estimation de la valeur de la matière organique). La valeur est ajustée à l'indice des prix d'achat des moyens de productions agricoles (Ipampa – matières organiques) pour chacune des campagnes étudiées (INSEE 2024b).

4.2 Position de rendement

Le rendement est exprimé en tonnes par hectare. Afin de comparer les cultures entre elles, et leurs niveaux de rendement moyens différents, un indicateur de positionnement a été calculé. Il s'agit d'un percentile du rendement par culture et par campagne. Cet indicateur permet de s'affranchir de l'effet de la culture et de l'année culturale. Il est exprimé entre 0 et 1 (0 étant le plus faible rendement et 1 le plus élevé).

4.3 Date et position de semis

La date de semis est exprimée en numéro de jour. Un indicateur de positionnement est calculé. Il s'agit du percentile du numéro du jour par culture et par campagne. Cet indicateur permet de s'affranchir de l'effet de la culture et de l'année culturale. Il est exprimé entre 0 et 1 (0 étant le jour le plus précoce et 1 le plus tardif).

4.4 Intensité de travail du sol – STIR

L'intensité de travail du sol a été calculée avec la formule STIR (Soil Tillage Intensity Rate). Le calcul prend en compte la typologie, la vitesse, la profondeur et la surface de travail de l'outil de travail du sol et est basé sur la base de données du RUSLE2, développé pour prédire les risques d'érosion des sols agricoles par les outils de travail du sol (Lightle [sans date]; USDA NRCS 2018; USDA-Natural Resources Conservation Service 2006; McCool, Foster, Yoder 2004). L'équation du STIR pour un outil est la suivante :

$$STIR = (vitesse (mph) \times 0.5) \times (type de travail de sol \times 3.25) \\ \times (profondeur travaillée(po) \times 1) \times ((surface travaillée) / 100 \times 1)$$

La somme des scores de STIR des outils de l'ITK donne le score STIR de l'ITK. Les différents types de travail du sol sont les suivants : inversion et faible mélange, mélange et faible inversion, levage et fracturation, mélange, compression (Kucera 2017).

Afin de tenir compte de l'hétérogénéité des appellations pour un seul outil, une reclassification des outils a été réalisée au moyen d'une enquête pour faire correspondre le nom de l'outil à un outil de la base référencé (FiBL) selon le tableau 5.

Tableau 5 - Classement des outils en fonction de la typologie STIR

Valeur STIR	Type de travail du sol	Outils
1	Inversion et faible mélange	Charrue classique, charrue déchaumeuse
0,8	Mélange et faible inversion	Bineuse, chisel, vibroculteur, houe rotative, outils à disques, autres outils à dents, décompacteur
0,4	Levage et fracturation	Semoir, sous soleur
0,7	Mélange	Herse étrille, roto étrille

Dans cette étude, le calculateur élaboré par le FiBL a été utilisé (Charles, Wendling 2022). Les équations du RUSLE2 ne prennent pas en compte les outils animés (type herse rotative), après échanges avec les chercheurs du FiBL, la valeur de 50 a été retenue (Wendling 2024).

Tableau 6 - Synthèse de la littérature des valeurs de STIR associées aux pratiques de travail du sol

Score STIR	Référence
STIR>80 : travail du sol conventionnel	(Heatherly 2020)
STIR<80 : travail du sol de conservation (labour sans versoir compris)	
STIR<30 : semis direct	(USDA NRCS 2008)
STIR<60 : travail du sol de conservation	
STIR<40 : ACS (semis direct)	(Boivin 2021)
STIR>80 : travail du sol conventionnel	(Claassen et al. 2018)
STIR<80 : travail du sol de conservation (labour sans versoir compris)	
STIR > 140 : travail du sol conventionnel	(Dupla et al. 2021)
80 < STIR < 140 : travail du sol de conservation	
STIR<30 : non travail du sol	

L'attribution d'un type de travail du sol au score STIR n'est pas strictement définie par la littérature (tableau 6). La valeur seuil maximale se situe entre 40 et 140. Selon les études, le calcul du STIR est basé sur l'ITK annuel tandis que d'autres prennent en compte le STIR de la rotation, pouvant prendre en compte les prairies. Le choix est fait de retenir la valeur seuil de 80 pour définir le score STIR maximum de l'ABC.

4.5 Autres indicateurs de travail du sol

En plus du STIR, des indicateurs de travail du sol sont calculés pour chaque ITK : la vitesse maximum de travail, la profondeur maximale, le nombre total de passages de travail du sol, le nombre total de passage de désherbage.

4.6 Consommation de carburant par hectare

Les consommations de carburant sont calculées par hectare, issues d'un barème des coûts des opérations culturales (Chambre d'agriculture France 2023) et ne concerne que les actions liées aux passages d'outils.

4.7 Efficience de consommation de carburant

Un ratio entre la production à l'hectare et la consommation de carburant est calculé pour mesurer l'efficience de la consommation d'intrants fossiles.

$$\text{efficience carburant} = \frac{\text{consommation de carburant (L/ha)}}{\text{rendement (t/ha)}}$$

4.8 Temps de travail

Les temps de travail sont calculés par hectares, issus d'un barème des coûts des opérations culturales (Chambre d'agriculture France 2023) et ne concerne que les actions liées aux passages d'outils.

4.9 Ratio entre les cultures d'hiver et les cultures de printemps

Les cultures de printemps (semis avant le 18 juin) prennent la valeur 0, les cultures d'hiver (semis après le 18 juin) prennent la valeur 1. Le ratio est la moyenne de ces valeurs.

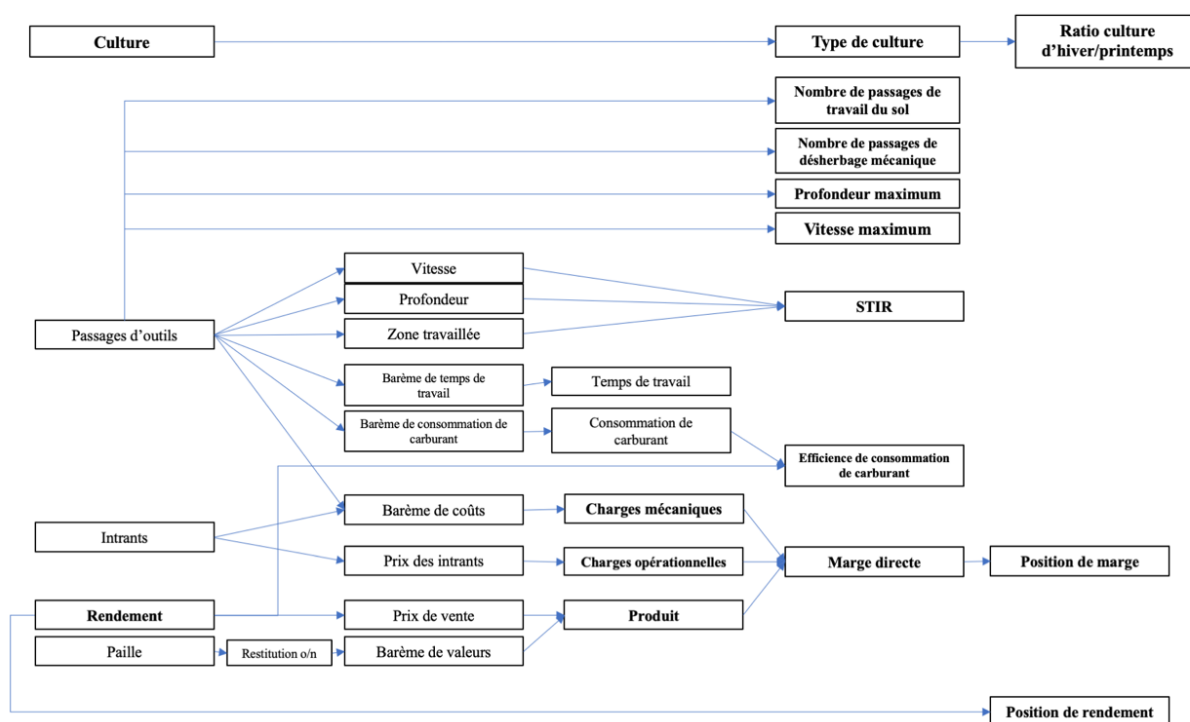


Figure 8 - Schéma récapitulatif de la construction des indicateurs (échelle ITK)

La figure 8 présente la construction des indicateurs à partir des données récoltées. Les indicateurs qui entrent dans l'analyse sont en gras.

5. Analyse des données

L'individu statistique est la parcelle (un itinéraire technique, une parcelle, une campagne). La variabilité des données n'a pas permis de faire une typologie statistique des exploitations et une approche par le système de culture. Les comparaisons et tests d'hypothèses ont été réalisés à l'échelle parcelle.

Le logiciel Rstudio (RStudio Team 2020) avec le package « FactoMinR » est utilisé pour l'approche statistique (Lê, Josse, Husson 2008). ChatGPT a été utilisé comme aide au codage du script (OpenAI 2024). La distribution des données ne présentant pas strictement une distribution normale (test de Shapiro Wilk, $p = 1,75 \times 10^{-05}$), des tests de Kruskal Wallis ont été utilisés pour les approches catégorielles. L'épsilon au carré (epsilon squared) est utilisé pour observer la taille de l'effet (Tomczak, Tomczak 2014). Le test post hoc non paramétrique (utilisé si l'effet est significatif) est Wilcoxon Mann Whitney avec ajustement de Bonferroni (en raison de la récurrence des tests). Le test de coefficient de Spearman est utilisé pour observer le lien entre les variables continues. Le package FactoMinR est utilisé pour les tests statistiques (Lê, Josse, Husson 2008).

La significativité des résultats est exprimée par une ou plusieurs astérisques selon le tableau 7.

Tableau 7 - Règles de présentation de la significativité

Légende	Valeur de p
ns	$p > 0,05$
*	$0,05 > p > 0,01$
**	$0,01 > p > 0,001$
***	$0,001 > p$

Le tableau 8 présente les variables retenues dans l'analyse des données.

Tableau 8 - Présentation des variables de l'analyse statistique

Nom de la variable	Signification	Nature
Agriculteur	Nom de l'agriculteur	Variable catégorielle
Campagne	Campagne (année)	Variable catégorielle
Charges mécaniques	Charges liées aux passages d'outils mécaniques	Variable continue
Charges opérationnelles	Charges liées aux achats d'intrants (semence, fertilisants)	Variable continue
Carburant/ha	Consommation de carburant (l/ha) liée aux passages d'outils mécaniques	Variable continue
Rendement	Rendement de la culture principale(t/ha)	Variable continue
Temps de travail	Temps de travail (h/ha) lié aux passages d'outils mécaniques	Variable continue
Passage de herse rotative	Nombre de passage de herse rotative (seule ou combinée à un semoir	Variable continue
Jour de semis	Numéro du jour de semis	Variable continue
Nombre total de labour	Nombre total de passage de labour	Variable continue
Marge directe	Marge directe	Variable continue
Parcelle	Nom de la parcelle	
Passages de travail du sol	Nombre de passage d'outils de travail du sol	Variable continue
Position de rendement	Position du rendement par culture et par campagne	Variable continue
Position de semis	Précocité de semis par culture et par campagne	Variable continue
% prairies dans la rotation	Pourcentage de prairies par hectares de rotation	Variable continue
Produit	Produit financier de la culture de vente	Variable continue
SDC	Numéro du système de culture	Variable catégorielle
STIR	STIR	Variable continue
STIR précédent	Valeur STIR de la culture précédente	Variable continue
Typo espèce	Typologie (famille) de la culture	Variable catégorielle
UGB ruminants	Pourcentage d'UGB par hectare de rotation	Variable continue
uN/ha	Apport moyen estimé d'unités d'azote par hectare de roation	Variable continue

La méthodologie employée dans cette étude est le fruit d'une co-construction avec le groupe d'agriculteurs afin de caractériser leurs pratiques du travail du sol grâce au STIR, et de les comparer grâce aux indicateurs technico économiques.

Partie 3 - Résultats

Trois parties organisent la présentation des résultats. La première détaille les composantes de l'intensité du travail du sol (1) et réfère aux hypothèses 1 et 2, la seconde partie expose les relations entre le STIR et les performances (2) et réfère aux hypothèses 3, 4 et 5. La troisième partie correspond à l'hypothèse 6 et présente les caractéristiques des ITK ABC performants (3).

1. Les composantes de l'intensité de travail du sol

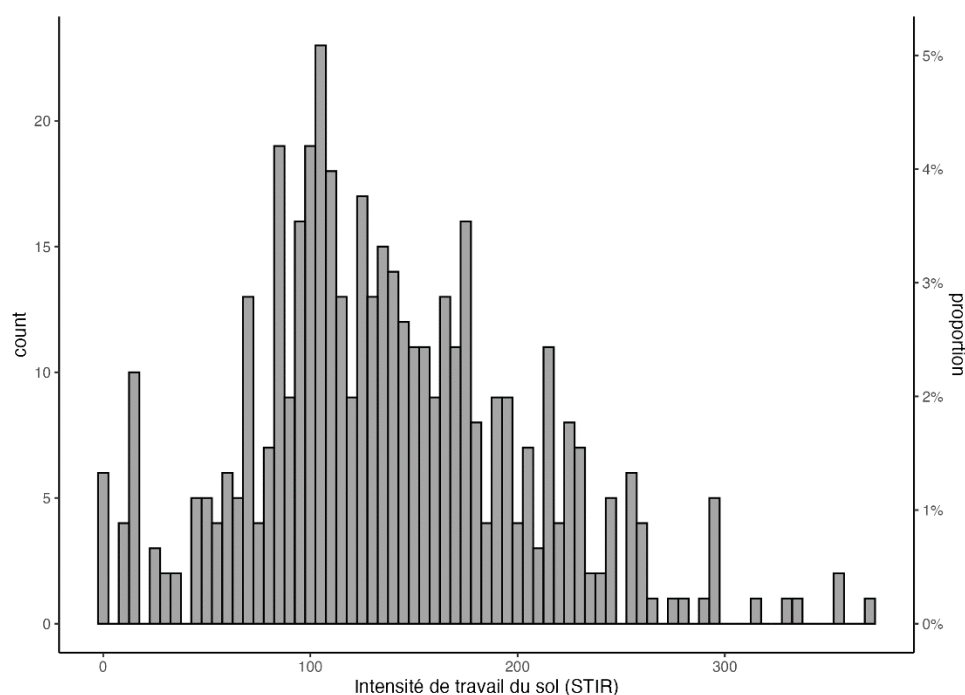


Figure 9 - Histogramme du STIR (n = 452)

Tableau 9 - Statistique descriptive du STIR

	Moyenne	Écart-type	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^{ème} quartile	Minimum	Maximum
STIR	137,27	65,92	95,51	129,44	175,19	2,29	372,08

La figure 9 et le tableau 9 montrent une forte variabilité de la distribution du STIR, avec une distribution proche de la normalité mais avec des valeurs extrêmes. La moyenne et la médiane sont proches, fiabilisant l'analyse statistique des données.

1.1 A l'échelle du système

Tableau 10 - Corrélation (Spearman) entre les indicateurs du système de culture et le score STIR (n=453)

Variable	Corrélation (toutes cultures)	Corrélation (céréales hiver)	Corrélation (maïs)
UGB ruminants	-0,17 (ns)	0,16 (ns)	-0,31 (ns)
% prairies dans la rotation	-0,20 **	0,16 (ns)	-0,45 (ns)
Apport d'azote estimé (uN)	0,10 (ns)	-0,12 (ns)	0,21 (ns)

Le tableau 10 montre des corrélations positives faibles entre les indicateurs liés aux systèmes de culture et le score de STIR. Les diagrammes de dispersion sont disponibles en annexe du document.

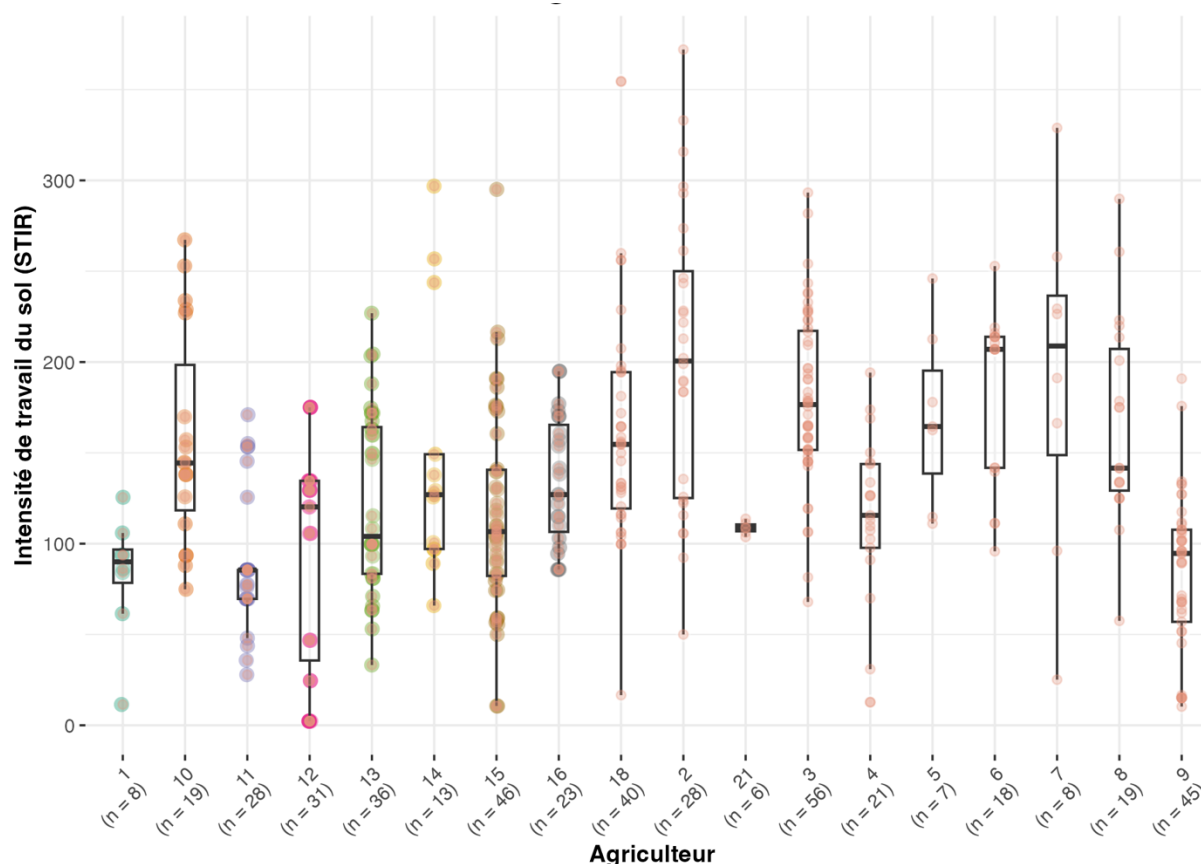


Figure 10 - Score de STIR selon le système de culture

L'agriculteur joue un rôle important dans le score de STIR. 16 systèmes sur les 18 présentent des ITK avec un STIR inférieur à 80. Il n'existe pas de système ayant uniquement des ITK avec un STIR inférieur à 80. 14 systèmes sur 15 avec des STIR inférieurs à 80 présentent aussi des ITK avec des STIR élevés (supérieurs à 150) (figure 10).

Tableau 11 - Résultat de test d'hypothèses entre le score de STIR et les variables (test de Kruskal Wallis) (n=452)

Variable	Toutes cultures confondues		Céréales hiver		Maïs	
	Statistique de test	Epsilon Squared %	Statistique de test	Epsilon Squared %	Statistique de test	Epsilon Squared %
Agriculteur	162,74 ***	34,00	64.18 ***	39,00	38.33 **	39,00
Système de culture	162,21 ***	33,00	64,25 ***	39,00	37,19 **	38,00
Parcelle	223,73 ***	24,0	101.71 (ns)	18,00	54.25 (ns)	70,00
Campagne	15,88 (ns)	10,00	25.6 **	12,00	10.81 (ns)	1,00
Type de culture	68,36 ***	12,00	/	/	/	/

Les tests d'hypothèses rassemblés dans le tableau 11 montrent que les variables agriculteur, système de culture, parcelle et typologie d'espèce ont un effet significatif sur la valeur du STIR.

Les variables agriculteur et système de culture sont similaires. La campagne n'a pas d'effet significatif sur le score de STIR. Il n'est pas observé de différences de résultats de test entre le groupe et les sous-groupes testés (céréales à paille d'hiver et maïs).

1.2 A l'échelle de la pratique de travail du sol

Tableau 12 - Corrélation (Spearman) entre les indicateurs du système de culture et le score STIR (n=453)

Variable	Corrélation (toutes cultures)	Corrélation (céréales hiver)	Corrélation (maïs)
Nombre total de labour	0,45 ***	0,36 *	0,28 (ns)
Précocité de semis	-0,02 (ns)	-0,02 (ns)	-0,12 (ns)
Jour de semis	-0,39 ***	-0,21 *	-0,11 (ns)
Passages totaux de travail du sol	0,71 ***	0,69 ***	0,60 ***
STIR du précédent	0,25 ***	0,20 *	0,28 *
Passages de herse rotative	0,52 ***	0,33 ***	0,69 ***
Outils (type STIR)		/	/
Moyenne	0,02 ***	/	/
Maximum	0,37 ***	/	/
Profondeur		/	/
Moyenne	0,26 ***	/	/
Maximum	0,49 ***	/	/
Minimum	-0,12 **	/	/
Vitesse		/	/
Moyenne	0,27 ***	/	/
Maximum	0,37 ***	/	/
Minimum	-0,00 (ns)	/	/
Surface travaillée		/	/
Moyenne	0,04 *	/	/
Maximum	0,20 ***	/	/

Comme le montre le tableau 12, le nombre de passages de travail du sol est fortement corrélé au STIR ; le nombre de labours, de herse rotative ainsi que le score STIR du précédent cultural sont moyennement corrélés au score de STIR. Le jour de semis est faiblement corrélé négativement au STIR (le graphique de dispersion est disponible en annexe). La position de semis n'est pas corrélée au STIR.

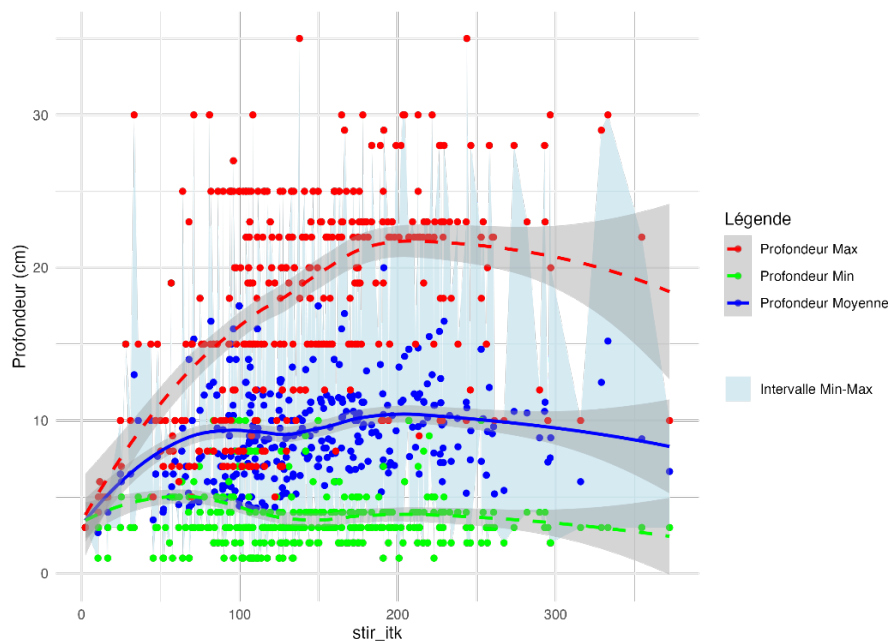


Figure 11 – Profondeur de travail du sol en fonction du STIR

Comme le montre le tableau 12, les valeurs de profondeur maximale de travail sont moyennement corrélées au score de STIR. La figure 11 montre des valeurs élevées (30cm) de profondeur correspondant à des STIR faibles (inférieurs à 80, et inversement (profondeur maximum de 10cm pour un STIR supérieur à 300). La valeur moyenne de profondeur n'est corrélée que faiblement au score de STIR.

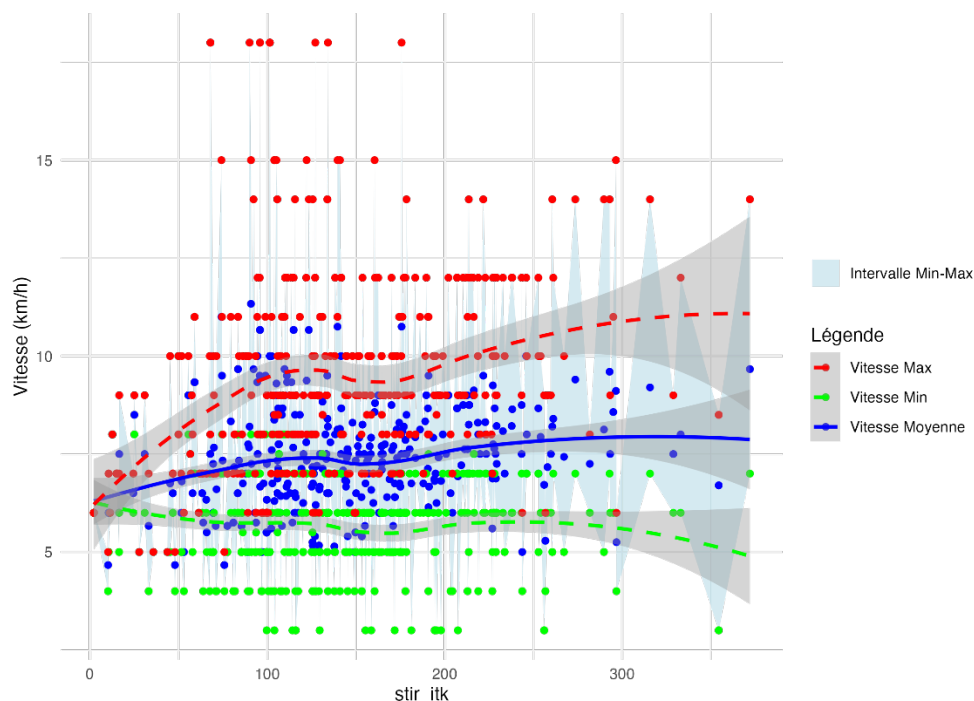


Figure 12 – Vitesse de travail du sol en fonction du STIR

Comme le montre le tableau 12, la vitesse maximale de travail est moyennement corrélée au score de STIR et la figure 12 montre qu'il existe des vitesses faibles (7km/h) avec un score STIR

élevé (300), et inversement (15km/h pour un STIR de 75). La vitesse moyenne est faiblement corrélée.

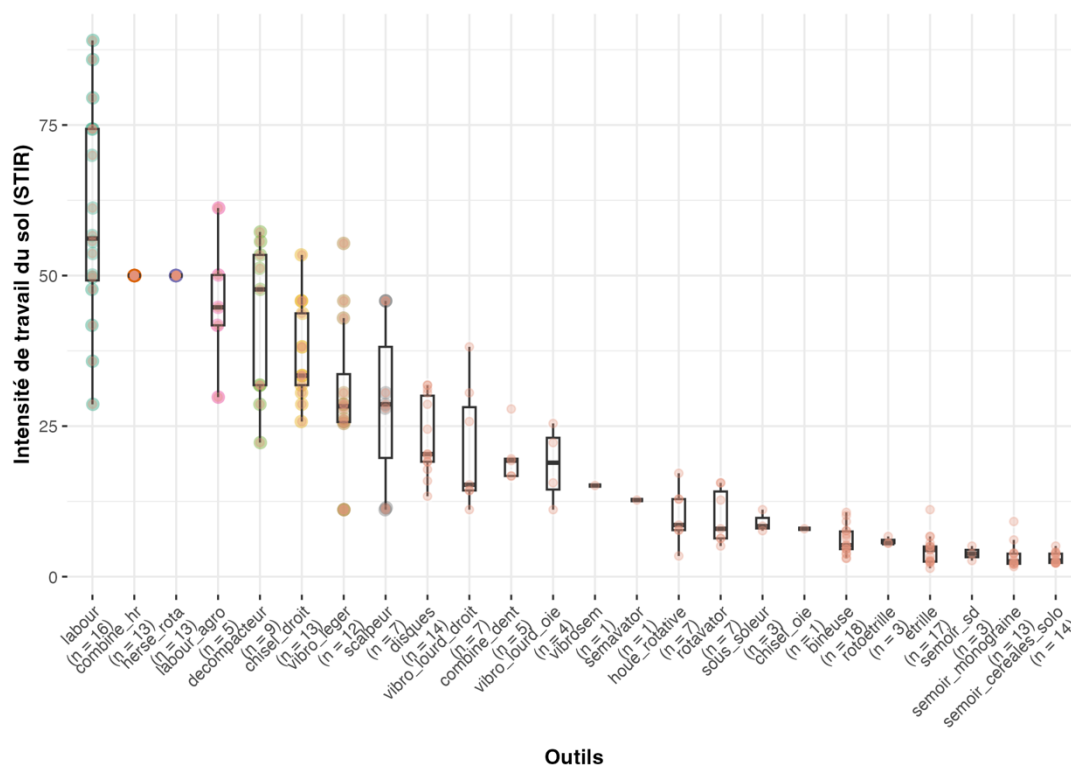


Figure 13- Distribution des valeurs de STIR par outil

Les outils qui ont les scores de STIR les plus élevés sont le labour (moyenne = 53), la herse rotative (moyenne = 50) et le combiné de semis avec herse rotative (moyenne = 50), le labour agronomique (moyenne = 33) suivi des outils à dents (figure 13). Pour ces outils, le score STIR présente une forte variabilité des pratiques, il existe des labours avec des scores de STIR entre 28 et 80. Les outils avec des STIR faibles présentent une faible dispersion des valeurs STIR.

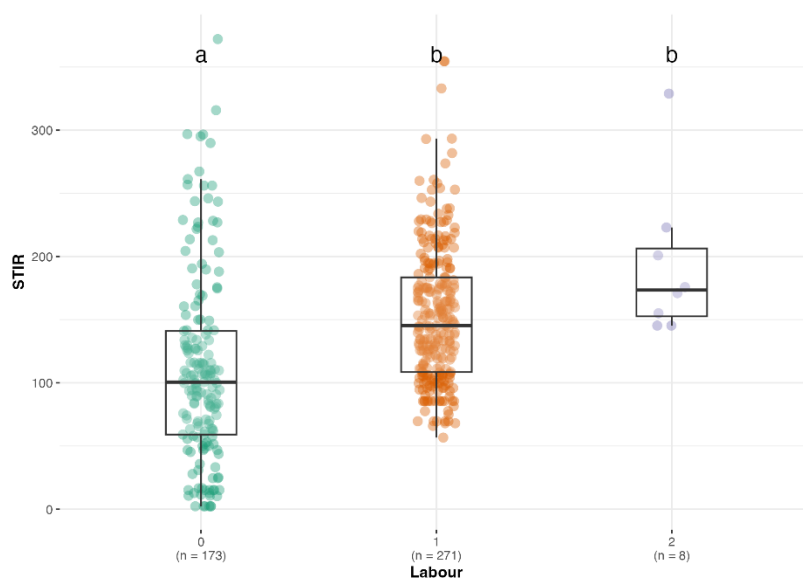


Figure 14 - STIR en fonction du nombre de labour (test post hoc de Wilcoxon Mann Whitney avec ajustement de Bonferroni)

Les ITK avec labour présentent un score STIR plus élevé que le groupe sans labour (figure 14), les groupes sont significativement différents (test de Kruskal Wallis, $p = 1,7 \times 10^{-13}$). En

observant la distribution des données, il est remarqué un score minimum de 52 pour les ITK avec labour, tandis que sans labour, le minimum est de 4. Le maximum est proche pour les deux groupes.

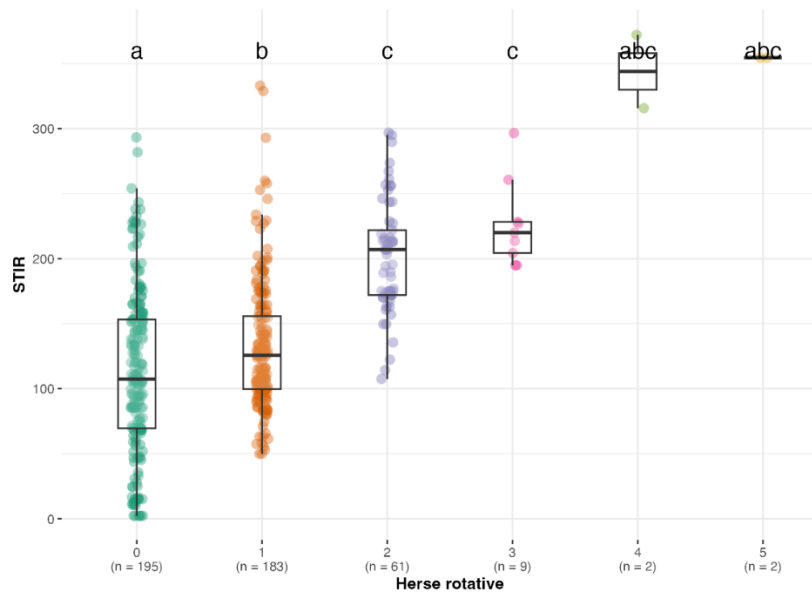


Figure 15 – STIR en fonction du nombre de passages de herse rotative (test post hoc de Wilcoxon Mann Whitney avec ajustement de Bonferroni)

La distribution du score STIR selon le nombre de passage d’outils rotatifs (herse rotative et/ou combiné de semis avec herse rotative) montre une différence significative entre les groupes (test de Kruskal Wallis, $p = 2,2 \times 10^{-16}$) (figure 15).

Les pratiques qui sont le plus corrélées avec le score de STIR sont le nombre de passages d’outils, la profondeur maximum (corrélation moyenne), la vitesse maximum (corrélation moyenne) et l’outil le plus intensif (corrélation moyenne). Les autres pratiques ont une corrélation faible avec le score STIR. Les graphiques de dispersion montrent une forte variabilité des valeurs (moyenne, minimum et maximum). Il existe des pratiques élevées (vitesse, profondeur) à la fois pour des STIR faibles et élevés. Les valeurs de typologie d’outils maximum sont réparties de façon homogène pour toutes les valeurs de STIR. Le nombre de passages d’outils est fortement corrélé au STIR.

2. Relation entre le STIR et les performances des ITK

2.1 Présentation générale

Tableau 13 - Corrélation (Spearman) entre le STIR et les indicateurs de performance des ITK

Variable	Toutes cultures	Céréales d'hiver	Maïs
Marge directe	-0.08 (ns)	0.04 (ns)	0.23 (ns)
Charges opérationnelles	0.28 ***	0.20 (ns)	-1.2 (ns)
Charges mécaniques	0.72 ***	0.76 ***	0.06 ***
Rendement	0.20 *	0.20 (ns)	0.15 (ns)
Produit	0.15 **	0.18 (ns)	0.07 (ns)
Consommation de carburant	0.74 ***	0.70 ***	0.1 (ns)
Temps de travail	0.7 ***	0.62 ***	-0.02 **
Position de rendement	0.06 (ns)	0.12 *	0.22 (ns)

Comme le montre le tableau 13 des résultats de corrélation de Spearman, il n'y a pas de relation significative entre le STIR et la marge directe. Les indicateurs les plus corrélés avec le STIR sont les charges mécaniques, la consommation de carburant et le temps de travail (forte corrélation). Les charges opérationnelles, rendement et produit sont faiblement corrélés. La position de rendement n'est pas corrélée au STIR. Les céréales d'hiver montrent les mêmes corrélations entre le STIR et les indicateurs de performance. Pour la culture de maïs grain, les relations ne sont pas significatives sauf pour les charges mécaniques et temps de travail qui ne montrent pas de corrélations. Les graphiques de dispersion sont disponibles en annexe.

2.2 Analyse par groupe de STIR

Dans cette analyse, les scores de STIR ont été divisés en 6 groupes grâce à la littérature existante et à dire d'expert.

2.2.1 Présentation des groupes

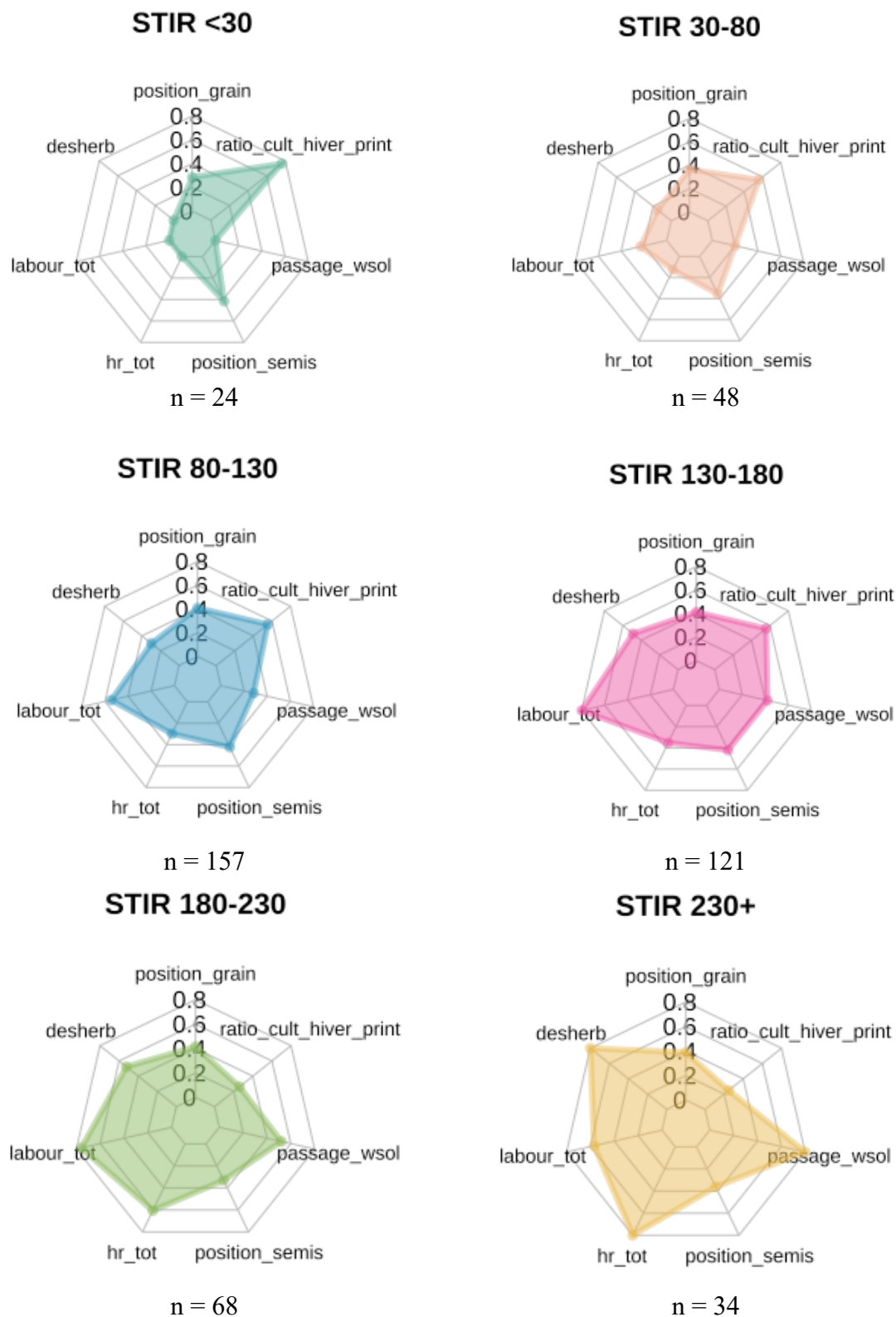


Figure 16 - Profil moyen des ITK par catégorie de STIR (valeurs standardisées)

Comme le montre la figure 16, l'ensemble des indicateurs de travail du sol et de désherbage mécanique sont d'autant plus élevés que le groupe STIR est élevé. Le recours au labour et à la herse rotative est nul pour le groupe STIR inférieur à 30. Pour le groupe STIR supérieur à 230, le recours au labour est plus faible (0,61) que pour le groupe 180 à 230 (0,82). La position moyenne de semis est similaire dans tous les groupes (moyennes entre 0,45 et 0,52). La position de rendement est similaire pour tous les groupes (moyennes entre 0,36 et 0,52). Les indicateurs suivants n'ont pas pu être calculés pour tous les ITK en raison de données manquantes : 77% des ITK sont compris dans le calcul pour la position de rendement (position_grain), 58% des ITK pour position_semis (précocité de semis) et 71% pour ratio cult_hiver_print.

2.2.2 Comparaison de la multi performance des groupes

Tableau 14- Résultats de tests d'hypothèses (Kruskal Wallis) en fonction des groupes de STIR

Variable	Statistique de test	Epsilon Squared
Marge directe	7.58 (ns)	0.01
Position de rendement	5.38 (ns)	0,00
Consommation de carburants	218.57 ***	0.48
Temps de travail	200.89 ***	0.44
Efficience de consommation de carburant	50.73 ***	0.10

Comme le montre le tableau 14, les groupes STIR sont significativement différents pour les variables de consommation de carburant, de temps de travail et l'efficacité de consommation de carburants. Les graphiques disponibles en annexes montrent des valeurs d'autant plus faibles que le groupe STIR est faible. La marge et le rendement ne sont pas significativement différents selon les groupes de STIR.

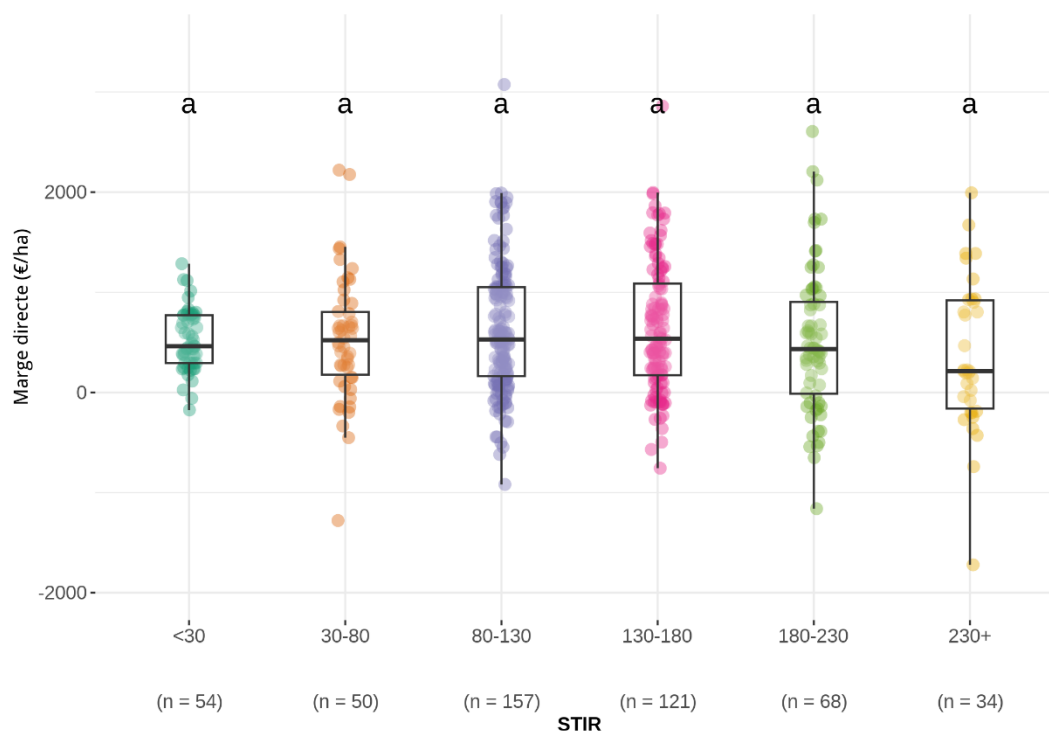


Figure 17 - Marge directe en fonction du STIR (test post hoc de Wilcoxon Mann Whitney avec ajustement de Bonferroni)

Comme le montre la figure 17, la distribution des marges les plus élevées (marges supérieures à 1500 euros) sont dans les groupes ayant un STIR supérieur à 80. En revanche, les STIR inférieurs à 30 ne présentent que 2 marges négatives. Plus le STIR est important, plus les valeurs sont dispersées autour de la médiane. Il est observé une tendance à des marges plus faibles dans le groupe STIR supérieur à 230 (médiane = 211 pour le groupe supérieur à 230 contre 432 à 544 pour les autres groupes). Le graphique des positions de marge (cf. annexe) montre un résultat similaire à ces observations.

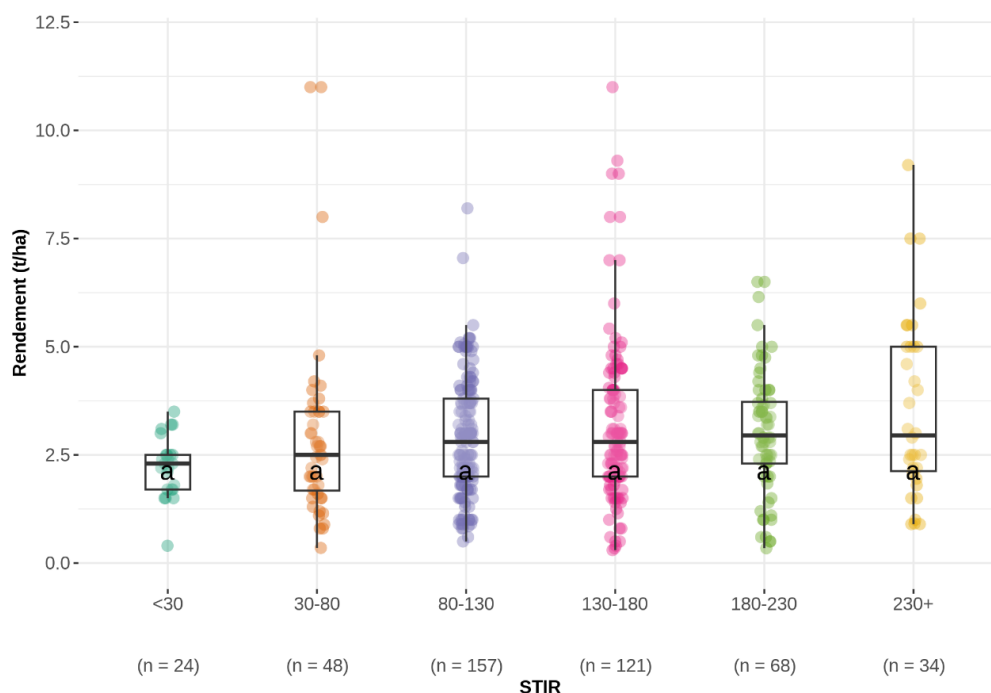


Figure 18 - Rendement par groupe de STIR (test post hoc de Wilcoxon Mann Whitney avec ajustement de Bonferroni)

La figure 18 montre que la dispersion des valeurs de rendement est différente selon les groupes. Les minimums sont similaires (entre 0,34 et 0,90t), et les maximums (11t) se situent dans les groupes de STIR de 30 à 80 et 130 à 180. Les médianes sont similaires (entre 2,24t et 3,60t). Les positions de rendements montrent des dispersions similaires entre les groupes (cf. graphique en annexe).

3. Profil d'ITK ABC performants

Tableau 15 – Médiane des indicateurs de performances retenus

Indicateur	Médiane
Marge directe (€/ha)	507,34
Temps de travail (h/ha)	4,13
Consommation de carburant (L/ha)	83,22

Tableau 16 – Indicateurs de performance par groupe

Groupe	Marge directe		Consommation de carburant		Temps de travail	
	€/ha		L/ha		h/ha	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
ABC performant (n=34)	837,85	274,82	47,79	13,84	2,32	0,69
ABC (n=72)	534,82	543,60	55,63	25,29	2,75	1,24
AB performant (n=112)	1061,48	463,21	57,89	12,67	2,74	0,67
AB (n=452)	580,04	653,87	86,43	35,99	4,30	1,63

L'ABC performante a une marge moyenne plus faible que l'AB performante, mais plus élevée que l'ABC et l'AB. Le temps de travail moyen de l'ABC performante est similaire à celui de l'ABC et de l'AB performante. La consommation de carburant de l'ABC performante est inférieure à tous les autres groupes (tableau 16).

Tableau 17 – Proportion de type de précédent cultural par groupe

Groupe	Culture d'hiver	Culture de printemps	na	STIR	
	%	%	%	Moyenne	Écart-type
ABC performant (n=34)	35,00	44,00	21,00	108,67	51,05
ABC (n=72)	40,00	40,00	20,00	110,41	44,79
AB performant (n=112)	28,00	42,00	30,00,	114,91	60,87
AB (n=452)	43,00	29,00	28,00	137,97	64,99

Les ITK ABC performants n'ont pas de précédent cultural spécifique entre culture de printemps et d'hiver. Le STIR du précédent ABC performant est similaire au groupe ABC, mais plus faible que le groupe AB (tableau 17).

Tableau 18 – Proportion de cultures par groupe

Groupe	Culture d'hiver	Culture de printemps	Céréales à paille hiver	Céréales à paille hiver et protéagineux	Colza	Protéagineux hiver	Protéagineux printemps	Céréales à paille de printemps	Autre culture de printemps	Céréales à paille printemps et protéagineux	Maïs/ Tournesol	na
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
ABC performant (n=34)	85	15	29	35	9	11	6	6	3	1	0	0
ABC (n=72)	76	24	18	33	10	15	6	7	5	0	8	0
AB performant (n=112)	87	10	41	27	12	8	3	4	1	0	3	3
AB (n=452)	65	32	31	17	8	8	3	6	3	0	20	3

Les ITK ABC performants sont majoritairement des cultures d'hiver, comme pour les ITK AB performants. Les céréales d'hiver associées à un protéagineux sont majoritaires en ABC performante, comme en ABC. En AB, les proportions sont inverses. Il n'y a pas de cultures de printemps sarclées (maïs et tournesol) en ABC performante (tableau 18).

Tableau 19 - Recours aux outils de travail du sol selon les groupes

Groupe	Passages		Labour	Sous soleur	Décompacteur	Dents lourd	Vibrocul teur	Scalpeur	Disques	Rotavator	Herse rotative	Vitesse maximum		Profondeur maximum	
	Moyenne	Écart-type										Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
			%	%	%	%	%	%	%	%	%	km/h		cm	
ABC performant (n=34)	1,60	0,89	15	0	12	18	0	9	15	9	0	7,46	1,92	9,24	4,32
ABC (n=72)	1,80	0,11	17	3	13	24	0	4	24	10	1	7,87	2,48	9,85	5,94
AB performant (n=112)	2,24	0,67	46	0	7	23	7	8	26	5	6	9,13	2,95	14,66	6,90
AB (n=452)	3,67	1,78	62	2	21	44	12	7	35	10	20	9,35	2,58	17,51	6,93

L'ITK ABC performant se démarque des ITK ABC et AB par un recours plus faible au labour et globalement aux outils de travail du sol. L'ABC performante présente moins de passages d'outils que l'ABC. Le décompacteur est utilisé de façon relativement similaire en ABC et AB. Les profondeur et vitesse maximum entre l'ABC performant et le groupe ABC sont similaires. En revanche, les valeurs sont plus élevées pour le groupe AB que ABC (tableau 19).

Tableau 20 - Comparaison des modalités de semis AB et ABC (% d'utilisation de l'outils)

Groupe	Position semis		Combiné herse rotative	Combiné dents	Semoir solo	Vibrosem	Semavator	Semoir SD	Semoir volée	Semoir mono- graine
	Moyenne	Ecart-type	%	%	%	%	%	%	%	%
ABC performant (n=34)	0,40724206	0,27985229	20	21	29	12	9	0	0	0
ABC (n=72)	0,47655844	0,28300573	17	18	26	25	4	0	0	6
AB performant (n=112)	0,47824527	0,31611475	63	8	20	5	3	0	0	1
AB (n=452)	0,5	0,32801331	42	20	21	9	1	1	1	11

Les ITK ABC performants ont une précocité de semis similaire aux autres groupes. Le recours au combiné herse rotative est moins important en ABC qu'en AB. Le semavator et le vibrosem sont plus utilisés en ABC. L'ABC performante et l'ABC ont des pratiques de semis similaires (tableau 20).

La présentation des résultats de l'étude a fait ressortir l'effet des différentes composantes du travail du sol sur le score de STIR. Le nombre de passages d'outils est l'indicateur le plus corrélé, suivi du choix de l'outil et des pratiques (vitesse et profondeur) qui sont corrélés de façon similaire au STIR. L'analyse statistique n'a pas fait ressortir de lien avec les caractéristiques du système. Les performances de rendement et de marge n'ont pas de lien avec le STIR. En revanche, la consommation de carburant et le temps de travail sont fortement corrélés. L'étude des ITK ABC performant fait ressortir une typologie d'ITK : principalement une culture d'hiver, une céréale associée à un protéagineux, avec un plus faible nombre de passages de travail du sol. Le recours au labour et la herse rotative est plus faible que dans les autres groupes.

Partie 4 - Discussion

La discussion s'organise en trois parties. La méthode d'analyse est critiquée (1), puis les résultats et les hypothèses avancées sont discutés au regard de la littérature (2). Enfin des perspectives de recherche sont proposées (3).

1. La méthodologie

1.1 Une méthodologie coconstruite avec un groupe d'agriculteurs

L'approche adoptée pour l'étude est issue d'une co-construction avec un groupe d'agriculteurs.

Le principal angle mort de l'analyse est qu'elle se limite à l'échelle annuelle et ne permet pas de prendre en compte les opérations culturales des années précédentes. Par exemple, un score STIR faible peut être dû à un score élevé du précédent. La méthodologie du STIR permet de calculer le score à l'échelle de la rotation. La présence de prairies temporaires, sans intervention de travail du sol permettrait de diminuer le score moyen. Dans notre étude, les opérations culturales des implantations de prairies ne sont pas prises en compte, ne permettant pas d'étudier l'effet des prairies.

A l'échelle de la rotation, les informations sont partielles et se limitent à la proportion de prairies dans la rotation, au nombre d'UGB par hectares, et à une estimation des apports d'azote par hectares et par an. D'autres indicateurs permettraient de mieux caractériser les systèmes de culture (ratio de culture de printemps et culture d'hiver, durée moyenne de la rotation). Ces estimations sont extrapolées à l'ensemble des campagnes des ITK présents dans le jeu de données, rendant ces indicateurs moins fiables.

La collecte des données a été réalisée par plusieurs techniciens différents, entraînant des biais liés à l'expérimentateur et à la rigueur apportée à la saisie des données. Le niveau de rigueur des agriculteurs dans la notation de leurs pratiques et la fiabilité de leurs transferts peuvent être à l'origine d'erreurs dans le jeu de données. Le système d'information « agrosyt » n'a pas été conçu pour analyser ce genre de données. Certains données manquantes ont impliqués que certains indicateurs ont été calculés sur des populations différentes, ceux-ci sont donc moins fiables.

Les ITK étudiés proviennent de systèmes de culture engagés dans une démarche de progrès et d'échanges. La pratique de travail du sol est fortement liée à la perception que l'agriculteur a de son sol. Leurs performances ne sauraient être représentatives des ITK de grandes cultures biologiques.

L'un des principaux manquements de cette méthode est le lien avec les caractéristiques physico-chimiques des sols. Cependant, la connaissance empirique des sols de Mayenne et les sols associés aux systèmes de culture étudiés permettent de comprendre certaines données et de formuler des hypothèses.

L'indicateur de STIR a été conçu aux États Unis où le machinisme et les pratiques agricoles sont différentes de celles de l'Europe de l'Ouest. Le calcul du STIR a été développé en prenant en compte une valeur standard par machine pour la vitesse et la profondeur selon les préconisations des constructeurs. Dans cette étude, la vitesse et la profondeur sont personnalisées à la pratique, en contradiction avec la méthode originale. Un biais important est qu'un seul outil peut être associé à des pratiques différentes chez le même agriculteur

(profondeur et vitesse différentes). Les moyens engagés dans cette étude ne permettent pas d'atteindre ce niveau de précision.

1.2 Une méthode basée sur des références

Le recours aux références de barèmes d'entraides permet de standardiser les charges mécaniques mais ne prend pas en compte les choix de stratégie d'exploitation qui pourraient interférer sur les choix agronomiques (par exemple, l'utilisation forcée d'un matériel car largement amorti). Le calcul du produit est basé sur des données empiriques. Il n'existe pas de données régionales ou nationales fiables des prix de ventes de cultures biologiques. Les prix de vente des cultures sont issus d'une enquête auprès des agriculteurs du groupe.

Les indicateurs de temps de travail et de consommation du carburant sont uniquement liés aux pratiques mécanisées au champ. Les actions en dehors de la parcelle (trajets) ne sont pas prises en compte.

1.3 Tentative de définition de l'ABC

En se basant strictement sur l'évaluation du travail du sol par l'outil STIR et ses critères fixés par ses concepteurs, l'agriculture biologique de conservation des sols n'existe pas dans le groupe étudié. Le STIR est un outil développé aux États-Unis dans un contexte économique et pédo climatique différent du contexte européen. Dans quelle mesure le score limite de 20 est-il pertinent pour qualifier les pratiques agricoles mayennaises ? Le contexte technique de l'agriculture biologique est différent de celui du conventionnel. Le non-recours aux produits de synthèse oblige à un travail du sol plus important. Une revue de la littérature a montré des scores retenus entre 30 et 140. En l'absence de références en agriculture biologique pour cet indicateur, le choix a été fait de prendre le score de 80 pour déterminer un score ABC. Au-delà du score, l'étude menée ici a pour objectif de comparer les itinéraires techniques entre eux sur la base de cet indicateur. En comparant les statistiques descriptives du STIR de l'étude, les valeurs sont similaires à une étude suisse (agriculteurs en AB et conventionnel) avec une moyenne de 110,10 une médiane de 121,43 (Dupla et al. 2021).

1.4 L'approche statistique

Les données étudiées présentent une grande variabilité et n'ont pas permis d'appliquer des tests statistiques complexes. Des tests non paramétriques ont été appliqués. Les tests de régressions linéaires permettent de révéler des tendances, qui ne peuvent pas être affirmées statistiquement par manque de fiabilité des régressions (conformité à la loi normale). La forte variabilité des données ne permet pas d'utiliser des modèles de modélisation (type glm).

En revanche, cette forte variabilité traduit une représentativité des systèmes de production au sein du groupe étudié.

2. La réduction du travail du sol est multi performante

2.1 L'intensité de travail du sol est le résultat d'une combinaison de pratiques

Le choix des outils et leur utilisation font varier le STIR mais c'est le nombre de passages qui est le plus corrélé. Les outils de travail du sol intenses (charrues, dents profondes), avec des scores STIR élevés pourraient être utilisés différemment pour diminuer l'intensité. Selon les agriculteurs, la vitesse et la profondeur de travail viennent expliquer la variabilité du STIR de ces outils. Ces deux caractéristiques jouent un rôle important dans le STIR mais c'est bien la combinaison des 4 composantes qui forme le STIR. Pour diminuer l'intensité de travail du sol, les 4 critères doivent être raisonnés.

Le labour et la herse rotative sont des pratiques de travail du sol emblématiques, et placées comme opposées au travail du sol réduit. Ce sont des outils seuils. A l'échelle de l'ITK, leur utilisation conditionne un score STIR minimum (autour de 50) mais ne conditionne pas le score maximum. Dans la majorité des cas, le labour est un frein à la réduction du travail du sol mais peut être compatible avec un ITK ABC. En revanche, l'utilisation du labour et de la herse rotative dans le même ITK n'est pas compatible avec l'ABC. Dans le cas contraire, il existe des ITK intensifs en travail du sol sans recours à ces outils.

A dire d'expert, certains agriculteurs se revendiquant pratiquer l'ABC présentent des STIR élevés. A contrario, certains agriculteurs ont des scores STIR faibles comparé au groupe, alors qu'ils n'ont pas d'objectif de réduction du travail du sol. Une des hypothèses est la suivante : dans certains cas, un agriculteur peut se retrouver à labourer en raison des conditions pédoclimatiques, bien qu'ayant préparé son sol dans un objectif ABC (passages successifs d'outils à dents). Il se retrouve avec un score STIR plus élevé qu'un agriculteur ayant labouré en premier objectif, et sans autre passage. Finalement, dans certains cas, les itinéraires techniques prévus sans labour sont plus intenses en travail du sol que certains itinéraires prévus avec labour. Le recours au labour peut être gage de réduction de l'intensité de travail du sol. Cette hypothèse rejoint la démonstration que le score STIR, bien que lié aux passages de labour, atteint des maximums avec ou sans labour. Cela nous enseigne que le dogme du labour/non labour semble être un débat biaisé et simpliste.

Dans un objectif de réduction du travail du sol, il est donc important de considérer les opérations de travail du sol dans leur ensemble (nombre de passages, choix des outils, vitesse, profondeur) et d'aboutir à une réflexion cohérente des pratiques de travail du sol. Les pratiques d'utilisation des outils semblent venir dans un second temps dans la dynamique de diminution de l'intensité de travail du sol.

2.2 Le contexte de production n'influe pas l'intensité de travail du sol

D'après les indicateurs des systèmes de culture étudiés, aucune caractéristique n'est corrélée significativement au score de STIR. La proportion de prairies dans la rotation montre une légère corrélation positive au score de STIR, mais non significative. Une étude menée en Suisse renforce cette idée et a montré une corrélation positive entre le STIR moyen des cultures et le ratio de prairies temporaires dans la rotation (Pearson = 0,26 ; $p = 0,004$). En revanche, le STIR à l'échelle de la rotation a montré une relation négative avec le ratio de prairies (Pearson = -0,24 ; $p = 0,009$). L'hypothèse est que l'intensité du travail du sol est influencée par le type de systèmes (PE ou GC) (Dupla et al. 2021). Cette différence relativise les résultats de cette étude sur l'effet des prairies sur l'intensité du travail du sol. Au-delà des caractéristiques techniques du système, c'est la (super) variable agriculteur qui impacte le score de STIR. En ciblant l'analyse sur les cultures principales, les résultats sont similaires au groupe. Les décisions de pratiques de travail du sol seraient-elles donc sensiblement les mêmes ? La qualité de la construction des indicateurs et leur faible fiabilité pour les appliquer à l'échelle pluriannuelle sont des facteurs pouvant expliquer la non-significativité des relations.

2.3 Réduire le travail du sol n'est pas incompatible avec la multi performance

La marge et le rendement ne sont pas corrélés au STIR. Il n'existe pas d'autres études corrélant le STIR aux performances de marge en AB. La méta-analyse de Cooper montre que les rendements sont légèrement plus faibles en travail simplifié (-11,6 à -7,6%) et dans certains cas il n'y a pas de différences avec le labour (Cooper et al. 2016). Il est donc possible, au vu des

résultats du groupe étudié, de diminuer l'intensité de travail du sol tout en gardant des performances économiques et de rendement similaire aux pratiques intensives. En revanche, les charges mécaniques sont fortement corrélées au STIR. Cela confirme que la performance économique n'est pas corrélée aux charges mécaniques et aux actions de travail du sol. L'intensité de travail du sol ne semble pas perturber la fertilité des sols à court terme. Les études menées sur la performance de systèmes AB montrent que c'est le contexte socioéconomique qui est le facteur de variation le plus important (Fontaine et al. 2012). Les groupes présentent les mêmes performances de marges et de rendement jusqu'au groupe STIR>230. Il peut y avoir plusieurs hypothèses : pour chaque groupe, les performances ont été atteintes grâce à ce niveau d'intensité de travail du sol (en raison des conditions pédoclimatiques) mais il existerait une intensité seuil de STIR (a priori 230) au-delà de laquelle les performances seraient réduites ; ou bien il existe un optimum de travail du sol inférieur, et l'intensité supplémentaire serait fortuite, les performances auraient pu être atteintes avec un niveau de STIR plus faible.

Le score de STIR n'influe ni la marge ni la position de rendement à l'échelle annuelle. Bien que les groupes ne soient pas différents, il est possible de dire que réduire le travail du sol n'affecte pas la marge. Cependant, le travail du sol semble permettre les marges les plus élevées. A l'inverse, le non-travail du sol (STIR<20) ne présente pas de marges négatives et semble moins risqué (peu de moyens engagés) mais n'atteint pas les meilleures marges.

2.4 Tentative de détermination d'une typologie d'un ITK ABC performant

L'ensemble des groupes de STIR présente une marge moyenne positive. Il est rentable de cultiver en agriculture biologique au sein du groupe étudié. Les ITK ABC performants sont peu nombreux. Cela s'explique par la présence mineure des ITK ABC dans le jeu de données, et par l'absence des marges maximum dans ce groupe. Le profil type de l'ITK ABC est complexe. Il s'agit de comprendre si les pratiques performantes en ABC sont liées aux pratiques ABC ou bien à des pratiques performantes AB.

La culture du STIR performant est principalement une céréale d'hiver (idem que pour l'AB performant), et associée à un protéagineux (moins présent en AB performant). Il n'y a pas de cultures de printemps sarclées. Un état des lieux des pratiques ABC en Suisse et Belgique montre une forte prédominance des cultures de printemps dans les systèmes ABC pour lutter contre les adventices et introduire des couverts (Lecrosnier 2022). Aux Etats-Unis, ce sont principalement le blé (67% en 2017), le maïs (65% en 2016) et le soja (70% en 2012) qui correspondent aux critères de l'agriculture de conservation (STIR inférieur à 80) (Claassen et al. 2018). Dans notre cas, la prédominance des cultures d'hiver s'explique par le fait que les cultures de printemps supportent le travail du sol lié à l'implantation des couverts hivernaux. L'ITK est donc plus intense en travail du sol et moins performant économiquement. Les cultures de printemps ne rentreraient donc pas dans la catégorie ABC et performant mais seraient indispensables dans une rotation ABC. Une solution serait d'implanter les couverts avec la culture précédente, évitant des passages d'outils supplémentaires et donc réduire l'intensité de travail du sol. La corrélation négative moyenne entre le STIR et le numéro du jour confirme cette idée. Cette tendance est affirmée par une étude en Suisse qui a montré une corrélation positive (Pearson = 0,25 ; p = 0,006) entre le STIR et le taux de cultures de printemps dans la rotation (Dupla et al. 2021).

Le précédent cultural n'est pas spécifique (hiver/printemps) mais on observe une tendance à une proportion plus importante de cultures de printemps que les autres groupes. L'hypothèse

est que le travail du sol de printemps est bénéfique à la mise en place d'une culture ABC par la suite (pas de reprise en masse des sols l'hiver) ; le désherbage de printemps permet d'avoir moins d'adventices pour le semis suivant et le cortège d'adventices est différent du cortège d'hiver. Le STIR du précédent ABC performant est plus faible que le groupe AB. L'hypothèse est que les agriculteurs sont dans une démarche de réduction du travail du sol et que les autres ITK de leurs rotations sont moins intenses.

Le recours aux outils de travail du sol est moins important pour l'ABC performant que pour les autres groupes. A noter que le groupe AB performant présente un recours moyen moins important au travail du sol que le groupe AB. Les vitesses et profondeurs maximum d'utilisation des outils sont en moyenne plus faibles pour le groupe ABC (pas de différence entre ABC performant et ABC). Les différences de pratiques de travail du sol sont observables entre le groupe ABC et AB ; il n'est pas observé de différences entre le groupe ABC performant et le groupe ABC. A première vue, la différence de performance au sein du groupe ABC n'est donc pas liée aux pratiques de travail du sol.

L'ITK ABC n'a pas de précocité de semis spécifique. Les modalités de semis avec ou sans herse rotative est ce qui différencie le groupe ABC du groupe AB. En revanche, il n'y a pas de différence entre le groupe ABC performant et ABC. Une hypothèse est que les semoirs combinés ont un coût plus élevé et font baisser la marge et sont donc moins performants.

Au global, la différence entre ABC et AB réside dans les pratiques de travail du sol et de choix de cultures. Entre ABC performant et ABC, c'est le choix de la culture qui semble faire la différence. Le faible nombre d'individus et les écarts-types élevés pour certains indicateurs invitent à relativiser ces conclusions. Est-ce que ces quelques exemples sont le fruit du hasard ou bien ce sont les prémices de techniques robustes ?

3. Perspectives de recherche

Des études ont montré le lien entre STIR et indicateurs physico-chimiques des sols. En Suisse, une étude menée sur un réseau de parcelles a montré que le STIR est corrélé négativement avec l'évolution annuelle du taux de matière organique des sols (Pearson = -0,27 ; $p = 0,002$). L'étude a montré qu'il n'était possible de séquestrer du carbone avec des STIR moyens à élevés mais uniquement pour les STIR inférieurs à 40 au-delà de 17% de matières organiques par rapport à l'argile (Dupla et al. 2021; Boivin et al. 2021). Un groupe d'agriculteurs des Deux Sèvres a montré que les scores STIR (calculés à l'échelle de la rotation, en prenant en compte les prairies) sont d'autant plus élevés que le rapport entre la matière organique et l'argile est faible (Ronin, Piton 2021). Confronter des analyses de terre des parcelles étudiées dans le jeu de données serait intéressant.

La présente étude se concentre sur la performance des ITK. Cependant, l'intensité de travail du sol pourrait être raisonnée à l'échelle de la rotation (prise en compte des prairies, des couverts d'intercultures). Cela permettrait de mieux prendre en compte les 3 piliers de l'ACS au-delà de la seule intensité de travail du sol.

Une approche statistique de modélisation pourrait être travaillée, afin de mieux comprendre le recours au travail du sol et les facteurs qui influent la prise de décision des agriculteurs. Une analyse statistique des ITK ABC performant permettrait de renforcer la fiabilité du profil dégagé. En revanche, un nombre plus important d'ITK serait nécessaire. Cette approche se doit

d'être complétée par une approche qualitative, pour connaître les freins et les motivations des agriculteurs dans leurs prises de décisions.

Le groupe étudié étant dans une constante démarche de progrès, un travail d'analyse temporelle des pratiques de travail du sol serait intéressant. Cela permettrait d'observer à long terme les changements de pratiques des agriculteurs et la transition de leurs systèmes.

Conclusion

Afin de répondre aux enjeux de développement durable en agriculture, et plus particulièrement au maintien de la fertilité des sols cultivés, les agriculteurs en grandes cultures biologiques du groupe du CIVAM Bio 53 travaillent à la réduction du travail du sol.

L'étude des pratiques de travail du sol de ce groupe a montré qu'il existe des itinéraires techniques performants relevant de l'agriculture biologique de conservation. L'utilisation de l'indicateur STIR a permis de préciser la caractérisation des pratiques de travail du sol : fréquence, type d'outils, vitesse, profondeur et surface travaillée. L'analyse a fait ressortir que le nombre de passages d'outils est l'indicateur le plus corrélé à l'intensité de travail du sol. Focaliser l'analyse uniquement sur le type d'outils ou sur la profondeur travaillée est incomplet. Le recours au labour et à la herse rotative est un frein à la réduction du travail du sol sans pour autant discriminer ces pratiques et les considérer hors du champ de l'ABC. A l'échelle du système de culture, l'analyse n'a pas fait ressortir de système type qui aurait un effet sur les pratiques de l'agriculteur. En revanche, les choix de l'agriculteur, sa perception du champ cultivé et son rapport au travail du sol semblent être des facteurs importants dans les prises de décisions du travail du sol. Les performances de marge et de rendement ne sont pas corrélées au score d'intensité de travail du sol. Les performances de temps de travail et de consommation de carburant sont corrélées à l'intensité de travail du sol, confirmant l'idée que la diminution du travail du sol permet de libérer du temps à l'agriculteur et de faire des économies de carburant et in facto d'émission de gaz à effet de serre. Enfin le travail mené a permis d'esquisser une typologie des ITK ABC performants, principalement des céréales d'hiver, associées à un protéagineux, avec un faible recours au labour et à la herse rotative

Les résultats observés sont à nuancer et à interpréter dans le contexte du groupe et du bassin de production étudié (avec ses conditions socioéconomiques et pédoclimatiques spécifiques). Cependant les logiques et réflexions des agriculteurs en ABC performante pourraient être transférables à d'autres agriculteurs, d'où l'importance des échanges en groupe dans la montée en compétence et la progression des agriculteurs.

La réduction des pratiques de travail du sol en agriculture biologique est une thématique complexe, encore trop peu documentée par la recherche scientifique et technique. L'innovation des agriculteurs est primordiale pour développer de nouvelles approches. Au-delà du travail du sol, la réussite des grandes cultures biologiques nécessite une approche systémique, embrassant toutes les échelles d'action de l'agriculteur. De nombreux défis se posent encore, comme la stabilité et l'augmentation des rendements par une meilleure connaissance des cycles des cultures en AB. En démontrant que leurs pratiques sont performantes sur différents plans, les agriculteurs biologiques engagés dans ce groupe montrent que leurs pratiques sont des pistes sérieuses pour l'adaptation des systèmes agricoles face aux enjeux du développement durable.

Références bibliographiques

AGENCE BIO, [sans date]. Le bio en quelques mots. *Agence Bio* [en ligne]. [Consulté le 21 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.agencebio.org/decouvrir-le-bio/quest-ce-que-lagriculture-biologique/>

AGENCE BIO (éd.), 2023a. *Les chiffres du BIO Panorama 2023*. 2023. Agence Bio.

AGENCE BIO, 2023b. *Le marché alimentaire bio en 2022* [en ligne]. Évaluation de la consommation alimentaire biologique Edition 2023 données 2022. Agence Bio. [Consulté le 25 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.agencebio.org/wp-content/uploads/2023/11/RAPPORT-2023-donne%CC%81es-2022-FINAL-nov23-1.pdf>

AGRO TRANSFERT et ARVALIS, 2008. *Exportation des pailles en Picardie*. mai 2008.

ALABOUVETTE, Claude et CORDIER, Christelle, 2018. Fertilité biologique des sols : des microorganismes utiles à la croissance des plantes. *Innovations Agronomiques*. 2018. N° 69, pp. 61-70. DOI 10.15454/UIJG8L.

ARAD2, 2022. Effets du non labour en systèmes Agriculture Biologique. *L'ARAD2* [en ligne]. 23 novembre 2022. [Consulté le 12 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://normandiemaine.cerfrance.fr/arad2/effets-non-labour-en-systemes-agriculture-biologique/>

ARVALIS, 2013. Les Essentiels d'ARVALIS - Fertilisation / Qu'est-ce que les produits résiduels organiques ? [en ligne]. 8 octobre 2013. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/fertilisation-quest-ce-que-les-produits-residuels-organiques>

BERNER, Alfred, HILDERMANN, Isabel, FLIESBACH, Andrea, PFIFFNER, Lukas, NIGGLI, Urs et MÄDER, Paul, 2008. Crop yield and soil fertility response to reduced tillage under organic management. *Soil and Tillage Research*. septembre 2008. Vol. 101, n° 1-2, pp. 89-96. DOI 10.1016/j.still.2008.07.012.

BIZE, Nils, EVENAT, Yves et TISSERAND, Antoine, 2023. *Fiche technique échange paille fumier* [en ligne]. 2023. FRAB Bretagne. Disponible à l'adresse : https://www.agrobio-bretagne.org/voy_content/uploads/2024/04/FICHE_TK_PAILLE_FUMIER_WEB.pdf

BOCKSTALLER, Christian, SABATIER, Rodolphe et TCHAMITCHIAN, Marc, 2021. Evaluation de la multi-performance des systèmes agricoles engagés dans une transition agroécologique. . 2021.

BOIVIN, Pascal, 2021. ACS et teneur en matières organiques. Quelques enseignements tirés de la région lémanique. *AGRONOMIE, ÉCOLOGIE ET INNOVATION. TCS*. 2021. N° 111, pp. 22-25.

BOIVIN, Pascal, GONDRET, Karine, DUPLA, Xavier et LEMAÎTRE, Téo, 2021. *ETUDE DU DEFICIT DE CARBONE ORGANIQUE DES SOLS VAUDOIS, TAUX D'ÉVOLUTION ET RELATION AVEC LES PRATIQUES AGRICOLES*. HEPIA.

BOUTHIER, Alain, CORTET, Jérôme, BISPO, Antonio, PIRON, Damien, PELOSI, Céline, VILLENAVE, Cécile, PERES, Guénola, HEDDE, Mickael, RANJARD, Lionel, VIAN, Jean

Francois et PEIGNÉ, Josephine, 2014. Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. . 2014.

BRUNDTLAND, Gro Harlem, 1987. *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development*. Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'Organisation des Nations Unies.

CHAMBRE D'AGRICULTURE FRANCE, 2023. *Coûts des opérations culturales* [en ligne]. 2023. Disponible à l'adresse : https://chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/National/cout_operation_culturales_2023.pdf

CHARLES, Raphaël et WENDLING, Marina, 2022. Progrès Sol - Ajouter un nouveau calcul du STIR. [en ligne]. 2022. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.progres-sol.ch/stir/ajouter-un-nouveau-calcul-du-stir.html>

CHENU, Claire, 2013. Développer les techniques culturales sans labour pour stocker du carbone dans les sols. In : *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?* INRA. pp. 160.

CLAASSEN, Roger, BOWMAN, Maria, MCFADDEN, SMITH, David et WALLANDER, Steven, 2018. *Tillage Intensity and Conservation Cropping in the United States*. septembre 2018. USDA.

COLOMB, Bruno, AVELINE, Anne et CAROF, Matthieu, [sans date]. Une évaluation multicritère qualitative de la durabilité de systèmes de grandes cultures biologiques, Quels enseignements? .

COOPER, Julia, BARANSKI, Marcin, STEWART, Gavin, NOBEL-DE LANGE, Majimcha, BÀRBERI, Paolo, FLIESSBACH, Andreas, PEIGNÉ, Josephine, BERNER, Alfred, BROCK, Christopher, CASAGRANDE, Marion, CROWLEY, Oliver, DAVID, Christophe, DE VliegHER, Alex, DÖRING, Thomas F., DUPONT, Aurélien, ENTZ, Martin, GROSSE, Meike, HAASE, Thorsten, HALDE, Caroline, HAMMERL, Verena, HUITING, Hilfred, LEITHOLD, Günter, MESSMER, Monika, SCHLOTER, Michael, SUKKEL, Wijnand, VAN DER HEIJDEN, Marcel G. A., WILLEKENS, Koen, WITTWER, Raphaël et MÄDER, Paul, 2016. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*. 3 mars 2016. Vol. 36, n° 1, pp. 22. DOI 10.1007/s13593-016-0354-1.

CROCHET, Florian, LABREUCHE, Jérôme et COUTURE, Daniel, 2007. Réduire ses coûts d'implantation dans le Gâtinais. *Perspectives agricoles*. juin 2007. N° 335, pp. 50-52.

DEYTIEUX, Violaine, VIVIER, C., MINETTE, Sebastien, NOLOT, Jean, PIAUD, S., SCHAUB, A., LANDE, Nathalie, PETIT, Marie-Sophie, REAU, Raymond, LAETITIA, Fourrié et FONTAINE, Laurence, 2012. Expérimentation de systèmes de culture innovants : avancées méthodologiques et mise en réseau opérationnelle. . 1 janvier 2012.

DORÉ, Thierry et MEYNARD, Jean-Marc, 2006. Introduction générale à la partie I de "L'agronomie aujourd'hui". In : *L'agronomie aujourd'hui*. QUAE. pp. 33-41.

DUPLA, Xavier, GONDRET, Karine, SAUZET, Ophélie, VERRECCHIA, Eric et BOIVIN, Pascal, 2021. Changes in topsoil organic carbon content in the Swiss leman region cropland

from 1993 to present. Insights from large scale on-farm study. *Geoderma*. octobre 2021. Vol. 400, pp. 115125. DOI 10.1016/j.geoderma.2021.115125.

EMONET, Emeric et COQUET, Marie, 2023. SYSTERRE® : l'outil d'évaluation de la multiperformance des systèmes. *acta.asso.fr* [en ligne]. 29 mars 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.acta.asso.fr/realisations/systerre-outil-evaluation-mutliperformances-des-systemes/>

FONTAINE, Laurence et BONTE, Jean Baptise, 2011. *Rotations en grandes cultures biologiques sans élevage 8 fermes-types, 11 rotations. Repères agronomiques, économiques, techniques et environnementaux*. [en ligne]. avril 2011. ITAB. [Consulté le 11 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.itab.asso.fr/downloads/rotab/rotab-cas-types-avril2011.pdf>

FONTAINE, Laurence, FOURRIÉ, Laurence, GARNIER, Jean François, MANGIN, Michel, COLOMB, Bruno, CAROF, Matthieu, AVELINE, A., PRIEUR, Loic, QUIRIN, Thierry, CHAREYRON, Bertrand, MAURICE, R. et GOURAUD, Jean Pierre, 2012. Connaître, caractériser et évaluer les rotations en systèmes de grandes cultures biologiques. *Innovations Agronomiques*. 2012. Vol. 25, pp. 27-40.

FROGER, Morgane, CELLIER, Vincent, FONTAINE, Laurence, GUILLEMIN, Jean-Philippe, RODRÍGUEZ, Alain et CORDEAU, Stéphane, 2015. Accompagner les réseaux DEPHY-FERME et DEPHY EXPE dans la caractérisation de l'effet des systèmes de culture sur la flore adventice. In : *Les rencontres 2015 GIS GC HP2E et RMT Florad* [en ligne]. 15 décembre 2015. [Consulté le 20 mars 2024]. Disponible à l'adresse : <https://institut-agro-dijon.hal.science/hal-01873618>

GAGNAIRE, Nathalie, GABRIELLE, Benoit, DA SILVEIRA, Jeanne, SOURIE, Jean Claude et BAMIERE, Laure, 2006. *Une approche économique, énergétique et environnementale du gisement et de la collecte des pailles et d'une utilisation pour les filières éthanol*. mai 2006. Ademe, Inra.

GAGNÉ, Gilles et WILKINSON, Julie Anne, 2023. Résultats des essais de longue durée en grandes cultures bio : labour vs travail réduit - CETAB+. *Colloque Bio pour tous ! 2023*.

GARNIER, Jean-François, 2011. ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE DE ROTATIONS EN GRANDES CULTURES BIOLOGIQUES SANS ÉLEVAGE. In : *Conception et évaluation des systèmes de grande culture en AB - Restitution des programmes RotAB et CitodAB*. ITAB - Arvalis institut du végétal. 2011.

GIGOT, Carole, 2023. Effluents d'élevage : une mine d'or à valoriser. . Sommet de l'élevage. 2023.

GLANDIÈRES, Anne, 2015. *GRANDES CULTURES BIOLOGIQUES Quelles rotations-types en Midi-Pyrénées ?* [en ligne]. décembre 2015. Chambre d'agriculture de Midi-Pyrénées. [Consulté le 11 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://occitanie.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/National/FAL_commun/publications/Occitanie/rotations_bio_2015.pdf

GRUBER, Sabine et CLAUPEIN, Wilhelm, 2009. Effect of tillage intensity on weed infestation in organic farming. *Soil and Tillage Research*. septembre 2009. Vol. 105, n° 1, pp. 104-111. DOI 10.1016/j.still.2009.06.001.

HEATHERLY, Larry G., 2020. *SOIL TILLAGE INTENSITY RATINGS (STIR) FOR CONSERVATION CROPPING SYSTEMS*. mai 2020. MSPB Missisipi soybean promotion board.

HOFMEIJER, Merel A. J., KRAUSS, Maike, BERNER, Alfred, PEIGNÉ, Joséphine, MÄDER, Paul et ARMENGOT, Laura, 2019. Effects of Reduced Tillage on Weed Pressure, Nitrogen Availability and Winter Wheat Yields under Organic Management. *Agronomy*. avril 2019. Vol. 9, n° 4, pp. 180. DOI 10.3390/agronomy9040180.

HUSSON, Olivier, 2013. Manuel pratique du semis direct sur couverture végétale permanente (SCV). *huved-scv.cirad.fr* [en ligne]. 2013. [Consulté le 12 mai 2024]. Disponible à l'adresse : http://uved-scv.cirad.fr/co/3_3_3_GammeITK.html

INRAE, 2015. *Système d'information Agrosyst* [en ligne]. août 2015. INRAE. [Consulté le 1 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://hal.inrae.fr/hal-02800677v1/document>

INSEE, 2024a. *Indice annuel des prix d'achat des moyens de production agricole (IPAMPA) - Matériel* [en ligne]. 30 avril 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010777087#Telechargement>

INSEE, 2024b. *Indice annuel des prix d'achat des moyens de production agricole (IPAMPA) - Amendements organiques (fumier, compost, autres amendements organiques) - Série arrêtée* [en ligne]. 30 avril 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/serie/010776945>

ITAB, 2024. *QUANTIFICATION DES EXTERNALITES DE L'AGRICULTURE BIOLOGIQUE* [en ligne]. [Consulté le 5 août 2024]. Disponible à l'adresse : https://itab.bio/sites/default/files/medias/fichier/2024/06/Quantification_Externalites_AB_Note_4p_0.pdf

KRAUSS, M., BERNER, A., BURGER, D., WIEMKEN, A., NIGGLI, U. et MÄDER, P., 2010. Reduced tillage in temperate organic farming: implications for crop management and forage production: Reduced tillage in temperate organic farming. *Soil Use and Management*. mars 2010. Vol. 26, n° 1, pp. 12-20. DOI 10.1111/j.1475-2743.2009.00253.x.

KRAUSS, Maike, 2021. Moins, c'est plus – Essais de culture bio sans labour - FiBL. [en ligne]. 4 octobre 2021. [Consulté le 14 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.fibl.org/fr/infotheque/message/moins-cest-plus-essais-de-culture-bio-sans-labour>

KRAUSS, Maike, BERNER, Alfred, PERROCHET, Frédéric, FREI, Robert, NIGGLI, Urs et MÄDER, Paul, 2020. Enhanced soil quality with reduced tillage and solid manures in organic farming – a synthesis of 15 years. *Scientific Reports*. 10 mars 2020. Vol. 10, n° 1, pp. 4403. DOI 10.1038/s41598-020-61320-8.

KRAUSS, Maike, PERROCHET, Frédéric, LORI, Martina, RUSER, Reiner, MÜLLER, Torsten, ZIKELI, Sabine, GRUBER, Sabine, CLAUPEIN, Wilhelm, MÄDER, Paul et GATTINGER, Andreas, 2017. Travail réduit du sol en agriculture biologique: aspects climatiques. *Recherche Agronomique Suisse*. 2017. Vol. 6, n° 8, pp. 226-231.

KUCERA, Mickael, 2017. https://www.climatesmartsc.org/_pdf/leafy-greens-cps-docs.pdf [en ligne]. octobre 2017. Natural Resources Conservation Service.

[Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse :
https://www.climatesmartsc.org/_pdf/leafy-greens-cps-docs.pdf

LÊ, Sébastien, JOSSE, Julie et HUSSON, François, 2008. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software* [en ligne]. 2008. Vol. 25, n° 1. [Consulté le 4 juillet 2024]. DOI 10.18637/jss.v025.i01. Disponible à l'adresse : <http://www.jstatsoft.org/v25/i01/>

LECROSNIER, Jonas, 2022. Agriculture Traque Agriculture Biologique de Conservation de Conservation. *L'ARAD2* [en ligne]. 14 septembre 2022. [Consulté le 4 août 2024]. Disponible à l'adresse : <https://normandiemaine.cerfrance.fr/arad2/agriculture-biologique-de-conservation-suisse-belgique/>

LEROUX, Benoît, 2015. L'émergence de l'agriculture biologique en France : 1950-1990. *Pour*. 2015. Vol. 227, n° 3, pp. 59-66. DOI 10.3917/pour.227.0059.

LIGHTLE, David T., [sans date]. *Soil Tillage Intensity Rating STIR*. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service.

MÄDER, Paul, 2012. Travail réduit du sol pour grandes cultures respectueuses du climat. *bioactualités*. 2012. pp. 8-12.

MÄDER, Paul et BERNER, Alfred, 2011. Development of reduced tillage systems in organic farming in Europe. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 11 octobre 2011. Vol. 1, n° 27, pp. 7-11.

MANGIN, M. et COHAN, Jean-Pierre, 2012. FLUX D'AZOTE ET IMPACT SUR LA PRODUCTION DE BLE TENDRE COMPARAISON PRECEDENT LUZERNE ET FEVEROLE Premières études, réflexions, enseignements. In : *La luzerne, incontournable en grandes cultures ?* Bergerie de Villarceaux (95) : ITAB - Arvalis institut du végétal. 2012.

MARIE, M et GOUÉE, Patrick, 2008. De la terre au sol : des logiques de représentations individuelles aux pratiques agricoles. *De la*. 2008.

MCCOOL, D K, FOSTER, G R et YODER, D C, 2004. THE REVISED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION, VERSION 2. . 2004. N° 665.

METIVIER, Thierry, GIRARD, Jacques, GUIMAS, Amandine et TOSTAIN, Caroline, 2022. *Bio et non labour, est-ce possible ? ESSAI SYSTEME PLURI-ANNUEL. Synthèse de 3 années 2019 à 2021. Programme Reine Mathilde* [en ligne]. juin 2022. [Consulté le 12 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/reine-mathilde/?eID=cmis_download&oID=workspace%3A%2F%2FSpacesStore%2F61db699c-4c0e-40ef-a2a8-a6d663c6ee01&cHash=d948a8b6fb5a8b74017d74490ed0add8

MISCHLER, P, TRESCH, P, JOUSSEINS, C, CHAMBAUT, H et DURANT, D, 2018. Savoir caractériser les complémentarités entre cultures et élevage pour accompagner la reconception des systèmes de polyculture-élevage dans leurs transitions agroécologiques. In : *Rencontres Recherches Ruminants (3R)* [en ligne]. Paris. 2018. [Consulté le 10 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://idele.fr/fileadmin/medias/Documents/RMT_SPYCE/3r2018_session_1_reconception_complet-2-16-25.pdf

MORLON, Pierre et SIGAUT, François, 2023. Travail du sol — Les Mots de l'agronomie. *Les Mots de l'agronomie* [en ligne]. 5 janvier 2023. [Consulté le 15 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://mots-agronomie.inrae.fr/index.php/Travail_du_sol

MORRIS, N.L., MILLER, P.C.H., J.H. ORSON et FROUD-WILLIAMS, R.J., 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil and Tillage Research*. mai 2010. Vol. 108, n° 1-2, pp. 1-15. DOI 10.1016/j.still.2010.03.004.

OLIVIER, Jean, 2022. *DOSSIER TERRITORIAL DEPARTEMENTAL - Mayenne* [en ligne]. mars 2022. DRAAF Pays de la Loire. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : https://draaf.pays-de-la-loire.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/Essentiel_2022_03_DT53_cle01d98c.pdf

OPENAI, 2024. *ChatGPT* [en ligne]. 2024. Disponible à l'adresse : <https://www.openai.com/chatgpt>

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, 2022. *L'agriculture de conservation*. 2022.

PAGNOT, Olivier, DUPONT, François et PERISSAT, François, 2022. *Évaluation de la valeur économique de la paille et des échanges paille/fumier* [en ligne]. 2022. Chambre d'agriculture de la Vienne. [Consulté le 26 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://vienne.chambre-agriculture.fr/actualites/toutes-les-actualites/detail-de-lactualite/actualites/evaluation-de-la-valeur-economique-de-la-paille-et-des-echanges-paillefumier/>

PAPY, François, 2013. Système de culture. *Les Mots de l'agronomie* [en ligne]. 8 novembre 2013. [Consulté le 10 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://mots-agronomie.inra.fr/index.php/Syst%C3%A8me_de_culture

PEGUES, Audrey, CAREL, Yannick, BOUTTET, Delphine et PESOU, Romain, 2023. Système de grandes cultures bio : zoom sur les performances économiques et environnementales de l'essai de Boigneville. *ARVALIS* [en ligne]. 25 mai 2023. [Consulté le 11 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.arvalis.fr/infos-techniques/systeme-de-grandes-cultures-bio-zoom-sur-les-performances-economiques-et>

PEIGNÉ, Josephine, BALL, Bruce, ROGER-ESTRADE, Jean et DAVID, Christophe, 2007. Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management*. juin 2007. Vol. 23, n° 2, pp. 129-144. DOI 10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x.

PEIGNÉ, Joséphine, DUPONT, Aurélien, ETIENNE, Clément, COQUIL, Xavier, GOURAUD, J.P. et QUIRIN, T., 2012. Travail sans labour en grandes cultures bio : une technique intéressante mais risquée. *AlterAgri*. 2012. N° 116, pp. 11-14.

PEIGNÉ, Josephine, VEDIE, Helene, DEMEUSY, Jackie, GERBER, Mathilde, VIAN, Jean Francois, GAUTRONNEAU, Yves, CANNAVACCUIOLO, Mario, AVELINE, GITEAU et BERRY, 2009. Techniques sans labour en agriculture biologique. *Innovations Agronomiques*. 2009. N° 4, pp. 23-23.

PEIGNÉ, Joséphine, VIAN, Jean-François, PAYET, Vincent et SABY, Nicolas P. A., 2018. Soil fertility after 10 years of conservation tillage in organic farming. *Soil and Tillage Research*. 1 janvier 2018. Vol. 175, pp. 194-204. DOI 10.1016/j.still.2017.09.008.

PLANTIER, Emmanuel, 2018. Dossier spécial grandes cultures. *ProFilBio*. juin 2018. N° 3, pp. 13-16.

QUERE, Lionel, 2024. Les marges des cultures bio en 2023. *bretagne.chambres-agriculture.fr* [en ligne]. 16 janvier 2024. Disponible à l'adresse : <https://bretagne.chambres-agriculture.fr/mes-actus/toutes-les-actus-agricoles-bretonnes/detail-de-lactualite/actualites/les-marges-des-cultures-bio-en-2023/>

ROGER-ESTRADE, Jean J, LABREUCHE, J et BOIZARD, Hubert H, 2014. Importance du travail du sol: typologie des modes de mise en œuvre et effet sur le rendement des cultures. In : *Faut-il travailler le sol ?* Quae. Quae. Savoir faire.

RONCEUX, Aicha et FEVRELIÈRE, Elise, 2017. *DES SYSTÈMES DE CULTURE BIOLOGIQUES POUR GÉRER LES ADVENTICES ET L'AZOTE EN RÉGION HAUTS-DE-FRANCE - Quelles performances de différents systèmes de culture ?* [en ligne]. mai 2017. Agro transfert rt. [Consulté le 11 mai 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2018/02/synthese-performances-web.pdf>

RONIN, Antoine et PITON, Lucille, 2021. *Liens entre fonctionnement du sol et pratiques culturales* [en ligne]. novembre 2021. CIVAM Haut Bocage. [Consulté le 14 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <https://ecophytopic.fr/sites/default/files/2022-08/CIVAM%20HB%202021%20-%20Liens%20entre%20fonctionnement%20du%20sol%20et%20pratiques%20culturales.pdf>

RSTUDIO TEAM, 2020. *RStudio: Integrated Development for R*. *RStudio* [en ligne]. 2020. Boston, MA : RStudio, PBC. [Consulté le 4 juillet 2024]. Disponible à l'adresse : <http://www.rstudio.com/>

SÉBILLOTTE, Michel, 1974. Agronomie et agriculture : essai d'analyse des tâches de l'agronome. *Cahiers ORSTOM.Série Biologie*. 1974. N° 24, pp. 3-25.

SEITZ, Steffen, GOEBES, Philipp, PUERTA, Viviana Loaiza, PEREIRA, Engil Isadora Pujol, WITTEWER, Raphaël, SIX, Johan, VAN DER HEIJDEN, Marcel G. A. et SCHOLTEN, Thomas, 2019. Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development*. février 2019. Vol. 39, n° 1, pp. 4. DOI 10.1007/s13593-018-0545-z.

STROESSER, Laetitia, [sans date]. Les Réseaux Sociotechniques - 2.1. Une entrée par les concepts agronomiques. *supagro.fr* [en ligne]. [Consulté le 12 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.supagro.fr/ress-pépites/ReseauxSocioTechniques/co/2_2_1_concepts_agronomiques.html

TOMCZAK, Maciej et TOMCZAK, Ewa, 2014. The need to report effect size estimates revisited. An overview of some recommended measures of effect size. *Trend in sport sciences*. 2014. Vol. 1, n° 21, pp. 19-25.

USDA NRCS, 2008. *Soil Tillage Intensity Rating (STIR)* [en ligne]. mai 2008. [Consulté le 26 avril 2024]. Disponible à l'adresse : <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/CEAP-Croplands-2008-Methodology-SoilTillageIntensityRating.pdf>

USDA NRCS, 2018. *Soil Tillage Intensity Rating (STIR)*. janvier 2018. USDA NRCS.

USDA-NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, 2006. *TECHNICAL NOTES -The Soil Tillage Intensity Rating (STIR)*. 28 août 2006.

VAN KEULEN, Herman et SCHIERE, Hans, 2004. Crop-livestock systems: old wine in new bottles? . 2004.

VÉDIE, Helene, 2009. *Fiche n°3 Cultiver sans labour en agriculture biologique* [en ligne]. juin 2009. RMT DévAB. [Consulté le 11 mai 2024]. Disponible à l'adresse : https://ecophytopic.fr/sites/default/files/Agronomie_Fiche3_Cultiver%20sans%20labour_MD.pdf

WALTER, Nicolas, BESNIER, Gerard, DEBROIZE, Didier, DESEAU, Sylvain, GRAND, Stéphane, LANGLOIS, Didier, LEPAGE, Aymeric, SAVARY, Christian et WYLLEMAN, Richard, 2022. *Economies de carburant en agroéquipement, des pratiques simples pour diminuer sa consommation de GNR*. mai 2022. Chambre d'agriculture France.

WENDLING, Marina, 2024. *Echange informel sur le STIR*. 2 juillet 2024.

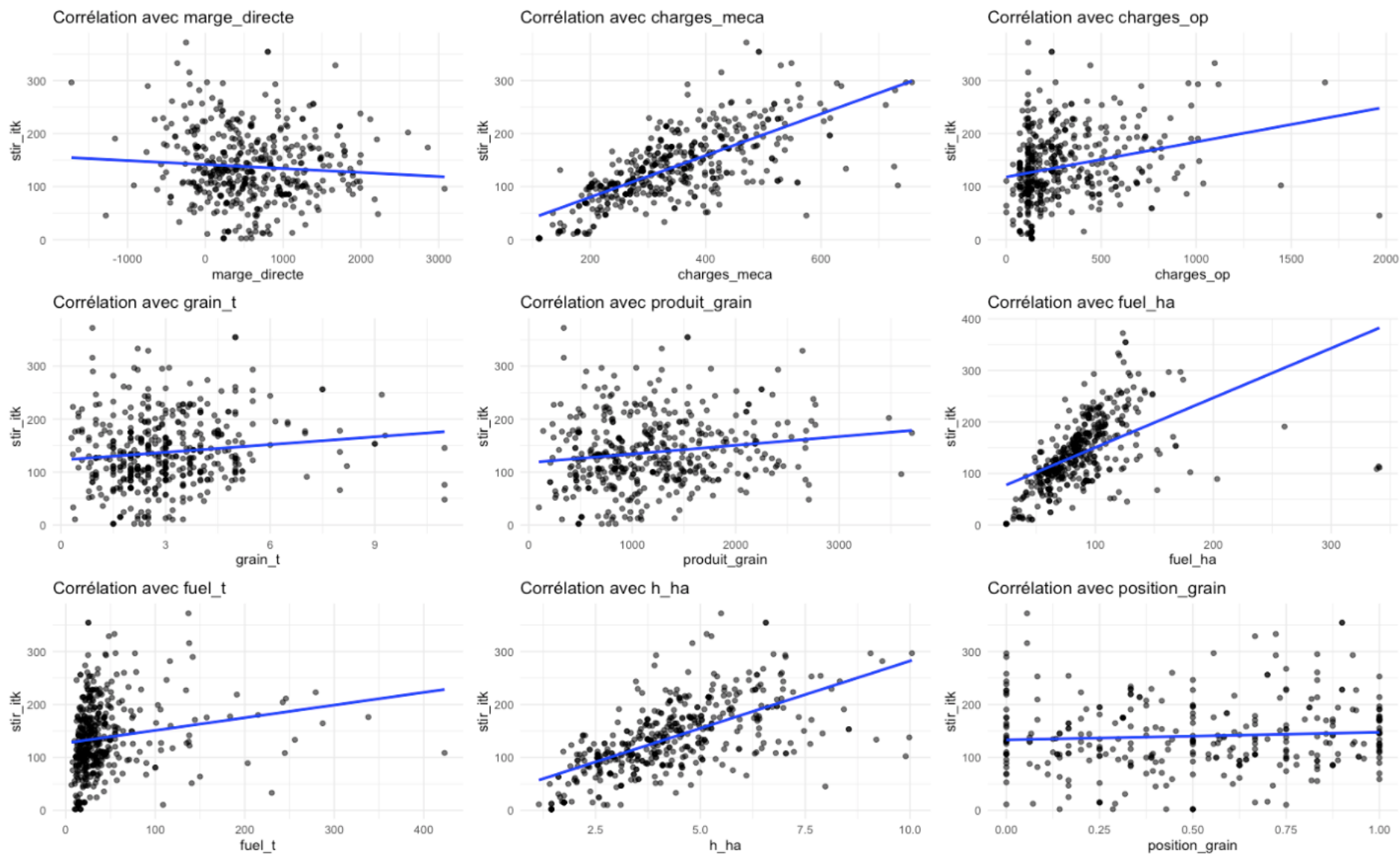
WICKAM, Hadley, FRANÇOIS, Romain, HENRY, Lionel, MULLER, Kirill et VAUGHAN, Davis, 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation* [en ligne]. [R package]. 2023. Disponible à l'adresse : <https://dplyr.tidyverse.org><https://github.com/tidyverse/dplyr>

ZAHM, Frédéric et GIRARD, Sydney, 2023. *La méthode IDEA 4: indicateurs de durabilité des exploitations agricoles principes & guide d'utilisation évaluer la durabilité des exploitations agricoles*. Dijon : Educagri éditions. ISBN 979-10-275-0544-9. 630.68

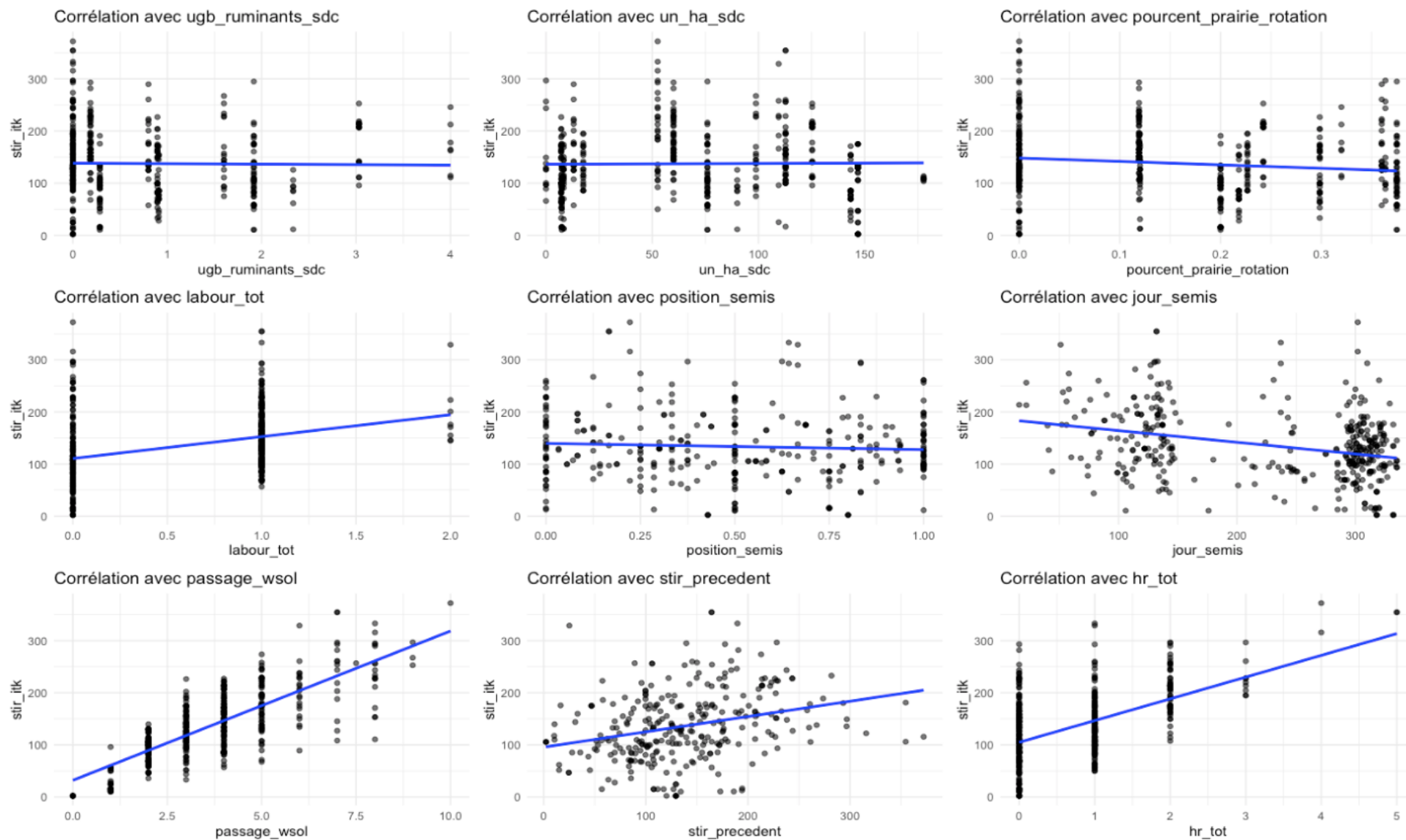
Annexes

Table des annexes

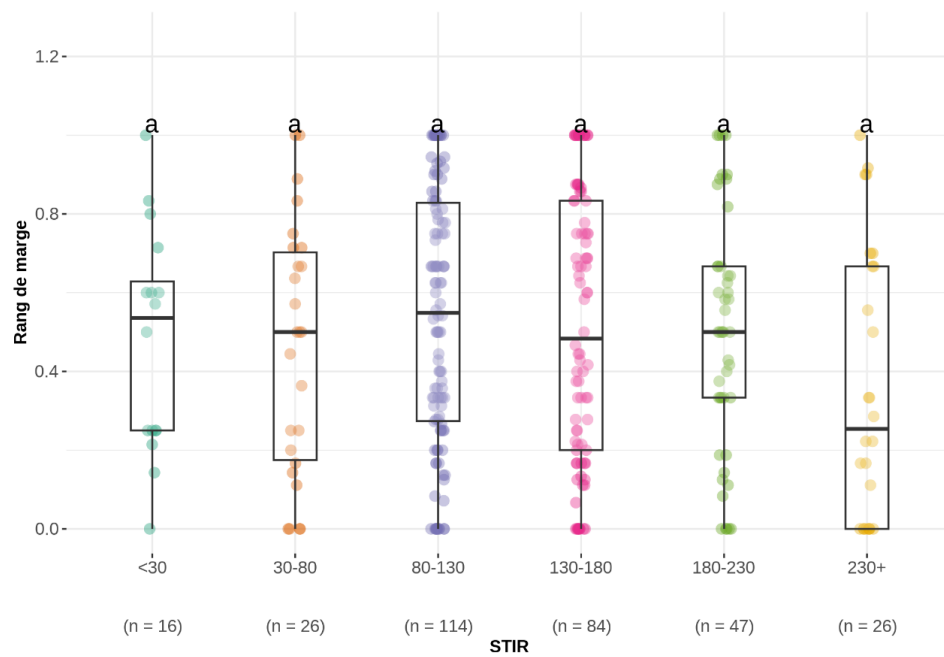
Annexe 1 - Graphiques de dispersion des indicateurs technico-économiques en fonction du STIR	2
Annexe 2 - Graphique de dispersion des indicateurs techniques en fonction du STIR	3
Annexe 3 – Position de marge en fonction du groupe STIR.....	4
Annexe 4 – Position de rendement en fonction du groupe STIR.....	4
Annexe 5 – Consommation de carburant en fonction du groupe STIR	5
Annexe 6 – Efficience du carburant en fonction du groupe STIR	5
Annexe 7 – Temps de travail en fonction du groupe STIR.....	6
Annexe 8 - Valeurs de prix de vente et de semence pour les cultures	7
Annexe 9 - Valeurs de coûts, temps de travail et consommation de carburants pour les intrants choisis.....	7
Annexe 10 - Valeurs de coûts, temps de travail et consommation de carburants pour les outils choisis.....	8



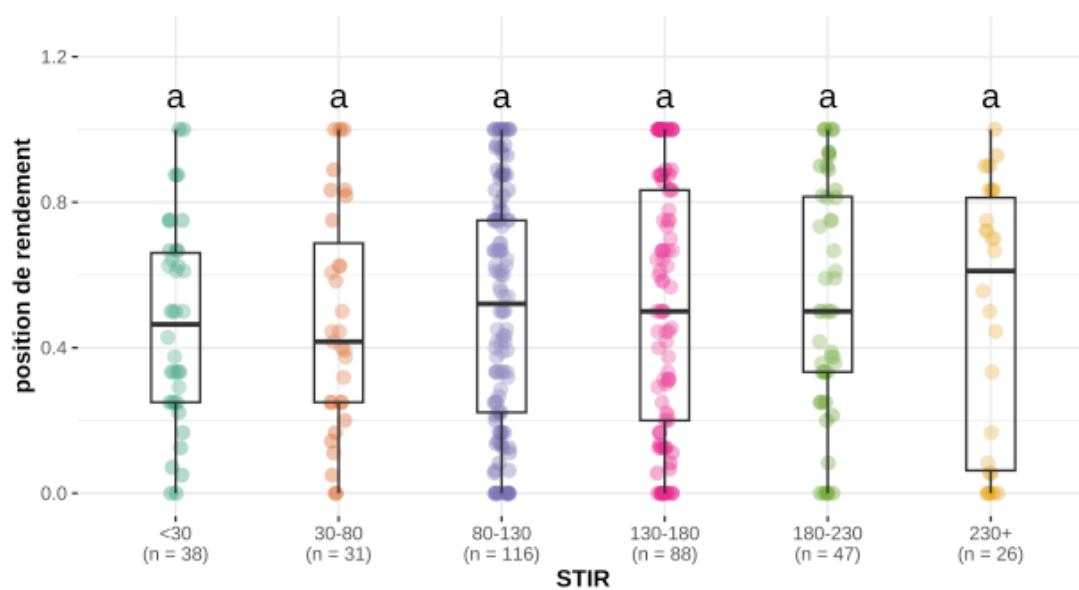
Annexe 1 - Graphiques de dispersion des indicateurs technico-économiques en fonction du STIR



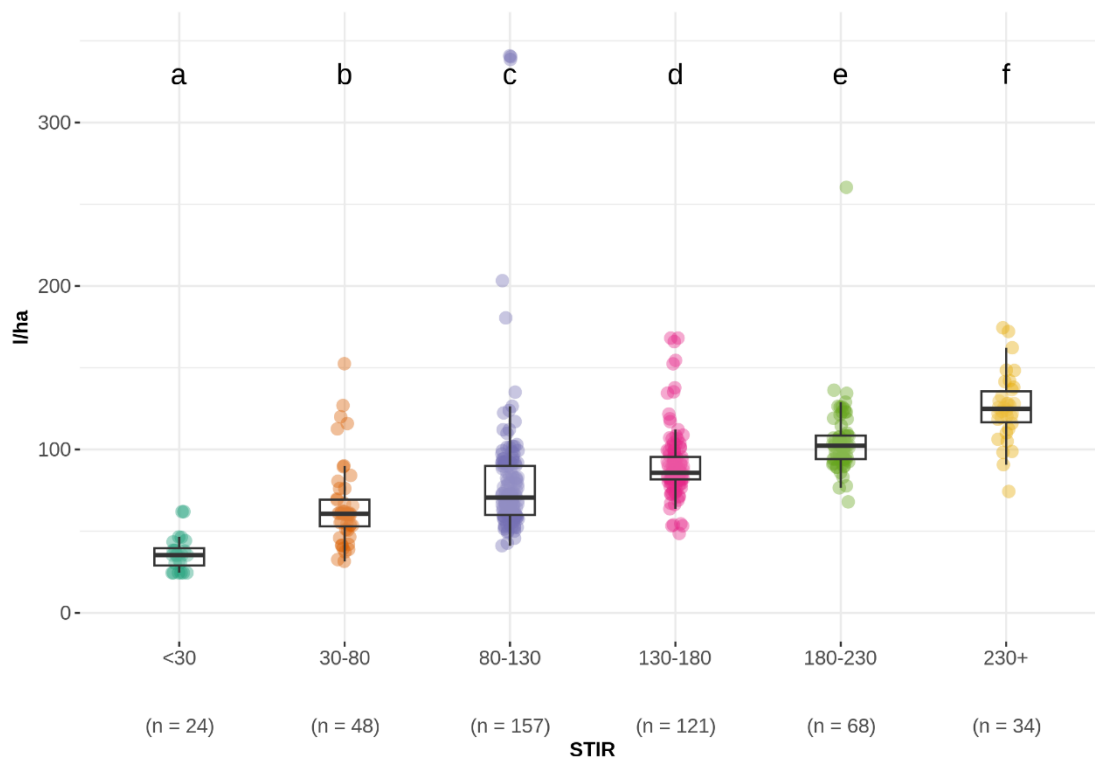
Annexe 2 - Graphique de dispersion des indicateurs techniques en fonction du STIR



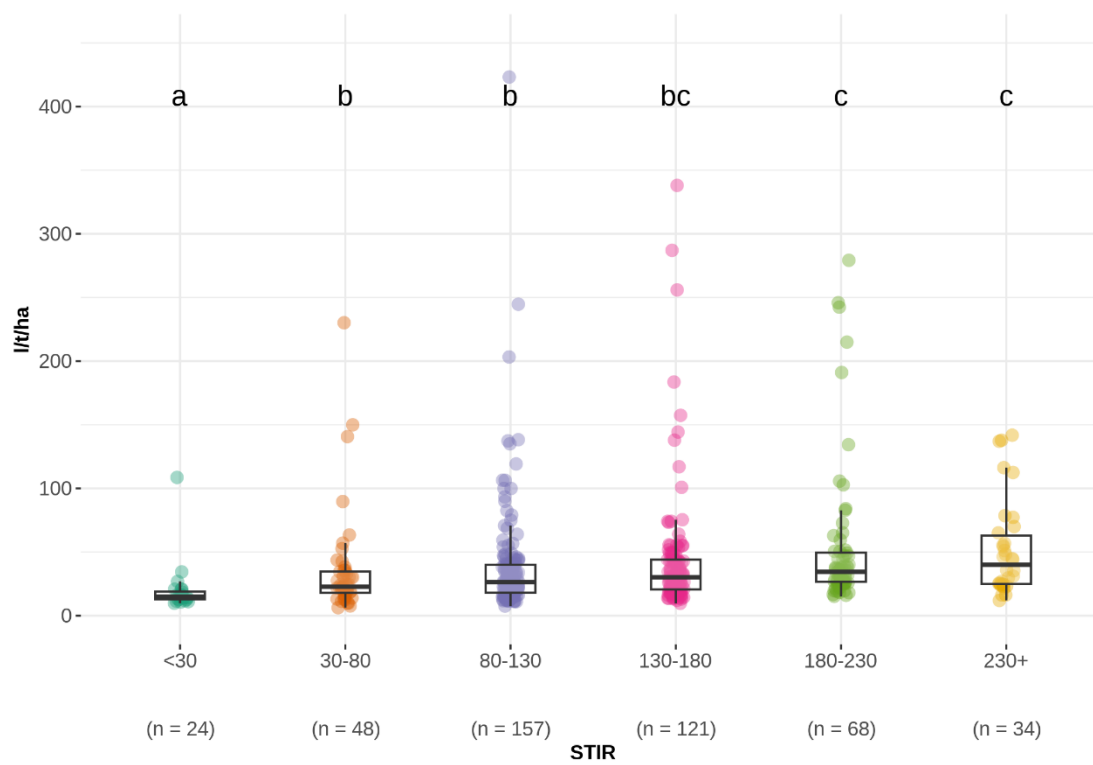
Annexe 3 – Position de marge en fonction du groupe STIR



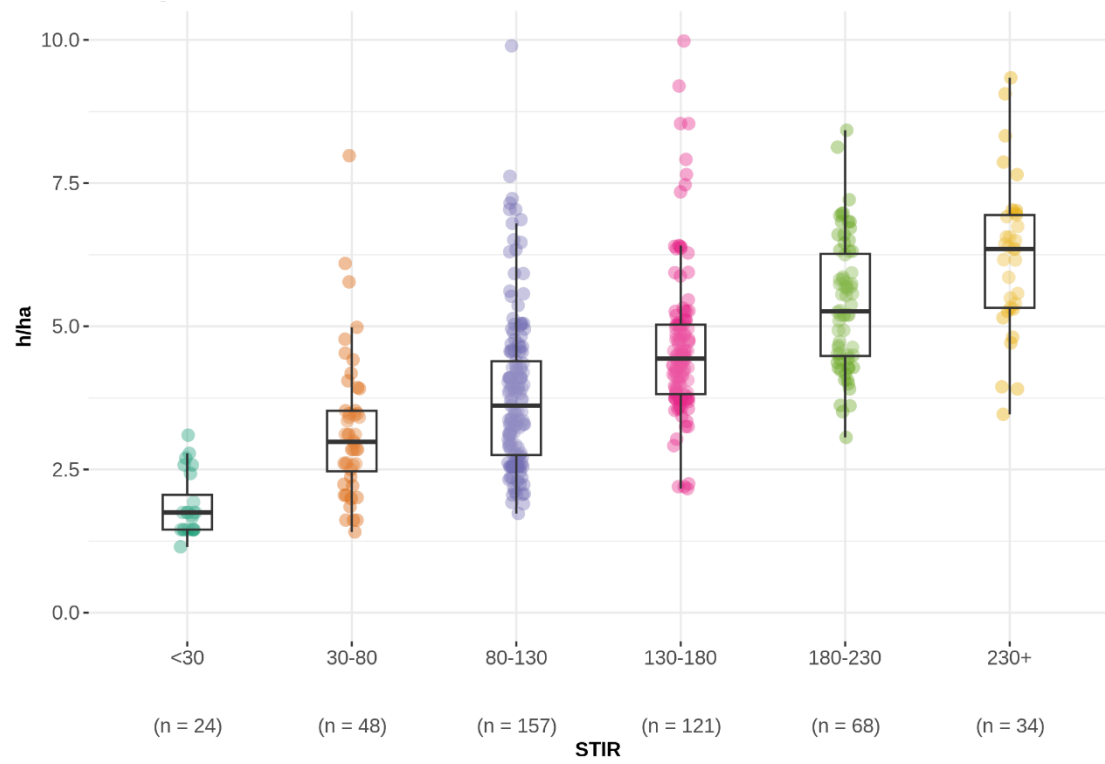
Annexe 4 – Position de rendement en fonction du groupe STIR



Annexe 5 – Consommation de carburant en fonction du groupe STIR



Annexe 6 – Efficacité du carburant en fonction du groupe STIR



Annexe 7 – Temps de travail en fonction du groupe STIR

Annexe 8 - Valeurs de prix de vente et de semence pour les cultures

Culture	Prix de vente (euros/t)	Prix de semence (euros/ha)
avoine_feverole	376	115
avoine_hiver	319	66
avoine_pois	299	114
ble_feverole	428	132
ble_hiver	420	116
ble_printemps	420	116
chanvre	1900	200
colza	690	36
couvert	na	64
epeautre	280	200
feverole_hiver	368	135
feverole_printemps	368	104
lentille	1500	250
lin_printemps	1000	150
lupin_orge	1107	253
lupin_printemps	1107	253
maïs_grain	280	240
melo	334	112
orge_hiver	267	91
orge_pois	279	115
orge_printemps	230	81
pois	300	180
pois_printemps	300	180
sarrasin	802	125
seigle	280	70
seigle_feverole	280	107
soja	320	1
tournesol	625	156
triticale	303	72
triticale_feverole	296	101
triticale_pois	340	120

Annexe 9 - Valeurs de coûts, temps de travail et consommation de carburants pour les intrants choisis (Chambre d'agriculture France 2023)

Outils	Temps de travail (h/unité)	Consommation de carburants (L/unité)	Coût à l'hectare (€/unité)
Épandage lisier (m ³)	0,01	4,50	4,00
Épandage fientes (t)	0,04	0,52	3,00
Épandage fumier (t)	0,04	0,52	3,00
Épandage déchets verts (t)	0,04	0,52	3,00
Épandage autre matière organique (t)	0,04	0,52	3,00
Épandage compost (t)	0,04	0,52	3,00
Épandage de chaux (t)	0,04	0,52	3,00
Irrigation (mm)	0,00	0,00	0,40

Annexe 10 - Valeurs de coûts, temps de travail et consommation de carburants pour les outils choisis (Chambre d'agriculture France 2023)

Outils	Temps de travail (h/ha)	Consommation de carburants (L/Ha)	Coût à l'hectare (€/ha)
Labour	1,10	25,00	75,00
Labour agronomique	1,10	18,00	60,00
Décompacteur	0,83	18,20	75,00
Sous soleur	0,80	18,20	75,00
Chisel droit	0,63	15,75	48,00
Chisel patte d'oie	0,63	15,75	48,00
Vibroculteur droit	0,25	6,30	42,00
Vibroculteur patte d'oie	0,25	6,30	42,00
Vibroculteur léger	0,25	6,30	27,00
Scalpeur	0,40	10,08	35,00
Outil à disques	0,17	7,00	31,00
Herse rotative	0,66	12,30	54,00
Cultivateur rotatif/Rotavator	1,25	18,90	66,00
Semoir combiné à une herse rotative	0,70	14,00	66,00
Vibrosem	1,00	15,00	58,00
Semoir combiné à un outil à dent	1,00	15,00	55,00
Semoir mécanique seul	0,70	4,20	24,00
Semoir monograine	0,50	4,20	32,00
Semoir semis direct	0,37	8,09	47,00
Semavator	0,70	18,00	70,00
Rouleau	0,25	2,80	18,00
Herse étrille	0,18	2,52	24,00
Rotoétrille	0,20	2,02	24,00
Houe rotative	0,17	1,68	20,00
Bineuse	0,60	4,50	38,00
Pulvérisateur	0,20	1,51	13,00
Semoir volée	0,20	1,51	9,00
Broyeur gyro	0,30	19,20	50,00
Faucheuse andaineuse	0,25	8,00	88,00
Faucheuse conditionneuse	0,50	8,40	40,00
Moissoneuse	0,75	20,35	120,00

PASSARD, Vincent, 2024, Étude de la multi performance des pratiques de réduction du travail du sol en grandes cultures biologiques en Pays de la Loire, 40 pages, mémoire de fin d'études, VETAGROSUP Campus agronomique Clermont-Ferrand, 2024.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES :

- ♦ Centre d'initiative pour valoriser l'agriculture et le milieu rural bio 53 (CIVAM Bio 53)

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : QUEUNIET, Thomas (CIVAM Bio 53)
- ♦ Tuteur pédagogique : CARTON, Nicolas

OPTION : Concevoir et accompagner l'innov'action en agronomie

RESUMÉ

L'agriculture biologique de conservation des sols (ABC) est une réponse aux enjeux de maintien de la fertilité des sols en agriculture biologique (AB). Le groupe « Ecophyto Dephy grandes cultures bio 53-72 » travaille à réduire le travail du sol et à tendre vers des pratiques pouvant relever de l'ABC. L'indicateur STIR (Soil Tillage Intensity Rating) est utilisé pour caractériser les pratiques de 452 itinéraires techniques (ITK) de 2013 à 2023. Des indicateurs techniques (rendements, consommation de carburant, précocité de semis), économiques (produit, marge, charges) sont calculés. L'analyse statistique ne montre pas de lien entre intensité de travail du sol et la marge et le rendement. Un lien de corrélation négatif significatif existe entre STIR et les charges mécaniques, le temps de travail et la consommation de carburant. Le labour et l'utilisation de la herse rotative ne conditionnent pas l'intensité de travail du sol. Un profil type d'ITK performant en marge, temps de travail et consommation de carburant est esquissé : principalement une céréale d'hiver, de préférence associée à un protéagineux, semé dans 80% des cas sans herse rotative, avec un faible nombre de passage de travail du sol (1,6 en moyenne), moins profond et moins rapide que le groupe AB. Les cultures de printemps ne sont pas considérées dans l'ABC performantes car elles supportent le travail du sol du couvert et les charges mécaniques associées.

Mots clés : agriculture biologique, grandes cultures, travail du sol, agriculture biologique de conservation, multi-performance, STIR, ABC

ABSTRACT

Organic soil conservation agriculture is a response to the challenges of maintaining soil fertility in organic farming. The "Ecophyto Dephy grandes cultures bio 53-72" group works to reduce tillage intensity and move towards practices that can be covered by organic conservation tillage. The STIR (Soil Tillage Intensity Rating) indicator is used to characterize the practices of 452 technical itineraries from 2013 to 2023. Technical indicators (yields, fuel consumption, sowing time) and economic indicators (product, margin, costs) are calculated. Statistical analysis does not show a link between tillage intensity and margin and yield. A significant negative correlation exists between STIR and mechanical loads, working time and fuel consumption. Plowing with inversion and the use of the rotary harrow do not condition tillage intensity. A typical profile of ITK performing in terms of margin, working time and fuel consumption is outlined: mainly a winter cereal, preferably associated with a protein crop, sown in 80% of cases without a rotary harrow, with a low number of tillages passes (1.6 on average), less deep and less fast than the organic group. Spring crops are not considered in the conservation tillage as performing because they support the tillage of the cover crop and the associated mechanical loads.

Key words : organic farming, crops, tillage, organic conservation farming, multi-performance, STIR