Analyse de données d'essais sur l'efficacité des méthodes alternatives de désherbage de la canne à sucre à La Réunion

Université Grenoble Alpes
Master 2 SSD
Année universitaire 2021 - 2022

Auteur
Elysé BARBAZA

Tuteurs
Sandrine AUZOUX, Marion SCHWARTZ, Benjamin HEUCLIN
Philippe LETOURMY, Aude RIPOCHE

Enseignant référent
Jean-Francois COEURJOLLY

Préambule

L'objectif de ce rapport est de présenter les travaux effectués lors de mon stage de fin d'études au sein du Master de Statistiques et de Sciences des données de l'Université Grenoble Alpes. Ce stage s'est effectué au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement). C'est un organisme français créé en 1984 dont le siège se trouve à Paris. Il opère à l'international, par l'intermédiaire d'actions de recherche, d'expérimentations et d'actions de formation dans le but de contribuer au développement rural des pays tropicaux et subtropicaux.

Le stage s'inscrit dans le cadre du projet « Territoires Durables » qui propose de développer, concevoir et mettre en œuvre avec les acteurs des territoires ultra marins, une démarche visant l'arrêt des pesticides dans le domaine agricole. Une des thématiques du projet est la protection de la ressource en eau via l'arrêt de l'utilisation des pesticides. En effet, l'île de La Réunion fait face à des enjeux forts liés à la qualité de l'eau potable. La majorité des pesticides retrouvés dans l'eau sont des herbicides. Aussi, le dépassement de la dose de produits phytosanitaires retrouvés dans l'eau a entraîné la classification de captages d'eau potable comme enjeux prioritaires, ou leur fermeture. Ainsi, des agroécosystèmes moins consommateurs d'herbicides pourraient permettre la préservation de la qualité de l'eau et de l'état environnemental et sanitaire de l'île. Même si des alternatives aux herbicides existent (désherbage mécanique, plantes de services, paillage, ...), celles ci sont peu adoptées par les agriculteurs du fait de fortes contraintes telles que le manque de main d'œuvre, coût et/ou temps de travail trop élevés, ou de parcellaire non adapté. De plus, il est important de pouvoir étudier et informer les agriculteurs des variations possibles de rendement lors de la mise en place de ces pratiques et de leur efficacité à maîtriser les adventices. Ces deux aspects constituent les principaux objectifs de ce stage.

L'encadrement durant ces six mois a été effectué par Philippe Letourmy et Benjamin Heuclin, deux chercheurs en biostatiques, ma tutrice principale Sandrine Auzoux, informaticienne spécialisée dans les bases de données, Marion Schwartz et Aude Ripoche, deux agronomes spécialisées dans la gestion de l'enherbement, . L'objectif principal du stage était d'étudier l'efficacité de différentes pratiques de désherbage alternatives aux herbicides, pour lutter contre les adventices de la canne à sucre. A partir de l'analyse de données d'essais, l'impact de ces pratiques alternatives sur le rendement, l'Indice de Fréquence de Traitement phytosanitaires et sur le recouvrement des adventices a pu être étudié.

Le stage s'est déroulé au sein des locaux du CIRAD de Saint-Denis, à La Réunion, de mars à septembre 2022. Je tiens à remercier particulièrement Benjamin et Philippe qui m'ont accompagné à distance tout au long de ce stage. Leur aide précieuse et leur disponibilité malgré ce contexte ont été primordiales. Je tiens également à saluer l'appui agronomique indispensable dans la compréhension des données et l'explication des résultats offerts par Marion et Aude. Je remercie vivement Sandrine de m'avoir donné l'opportunité d'effectuer ce stage, son appui en gestion des données, son suivi et sa bonne humeur. Je remercie fortement Mathias Christina, chercheur de l'unité Aida au Cirad et l'institut Ercane sans qui l'extraction des données n'a pu être possible. Finalement, je remercie Feder, Feader et la région La Réunion pour le financement de ce stage.

Table des matières

1 Introduction **1**

2 Matériel **2**

2.1 Description des données 2

2.2 Description des essais retenus 4

3 Méthodes **7**

4 Analyse du rendement, de l'utilisation d'IFTh et du recouvrement **10**

4.1 Effets des facteurs sur le rendement 10

4.2 Effets des facteurs sur l'utilisation d'herbicides 13

4.3 Effets des facteurs sur le recouvrement 16

5 Discussion **20**

6 Conclusions et perspectives **21**

7 Accessibilité des données et des codes **23**

A Annexe **26**

A.1 Divers 26

A.2 Tableaux et graphiques complétant les analyses des trois modèles 26

Rendement 26

Herbicide 28

Recouvrement 31

Glossaire

BIC Bayesian information criterion, Critère d'information bayésien. 8

bloc On entend classiquement "bloc" un ensemble de parcelles voisines et très semblables les unes aux autres, quant aux conditions de croissance et de végétation. Les blocs jouent le rôle de répétitions. 2

broyage Le broyage est l'action de supprimer les mauvaises herbes à l'aide d'un tondobroyeur ou un gyro-broyeur. 2

désherbage sélectif Désherbage manuel ayant pour objectif de sélectionner un certain type d'adventices. 3

essai Un essai au champ, ou « en champ » est une culture expérimentale réalisée en plein champ, c'est-à-dire en milieu non confiné physiquement, destinée à vérifier les informations acquises précédemment par des raisonnements théoriques ou grâce à des expériences en milieu confiné. 1

iid indépendants et identiquement distribués. 8

niveaux Les différents éléments qui constituent un facteur sont appelés niveaux ou modalités. 7

observation L'observation se traduit par des mesures (ou variables) de caractères quantitatifs ou qualitatifs associés à chaque unité expérimentale. 2

PDS (plantes de services) L'implantation d'une couverture végétale sur l'inter-rang d'un champ pour concurrencer les adventices. 2

REML Restricted Maximum Likelihood, Maximum de vraisemblance restreinte. 8

sarclage Le sarclage est l'action de supprimer les mauvaises herbes à l'aide d'un sarcloir ou d'enlever les adventices avec une binette, voire une houe si c'est à plus grande échelle. 2

TE (témoin enherbé) Parcelle non désherbée. 2

TP (témoin propre) Parcelle uniquement désherbée avec les herbicides. C'est le facteur de contrôle servant de référence de comparaison dans cette étude. 2

traitement On appelle traitement toute combinaison de niveaux ou de modalités de tous les facteurs étudiés. Si un seul facteur est étudié, il y a identité entre un traitement et un niveau. 8

unité expérimentale L'unité expérimentale est l'unité élémentaire qui reçoit un traitement et sur laquelle est faite chaque mesure (Par exemple, dans les essais au champ, cette unité est la parcelle expérimentale). 2

weedseeker Technologie permettant d'éliminer les mauvaises herbes grâce à un capteur. 3

1 Introduction

La culture de la canne à sucre est le pivot de l'agriculture réunionnaise et le principal pilier de l'économie de l'île. Elle constitue le premier secteur agro-industriel et représente plus de 50% des exportations de la Réunion. En dehors de la production de sucre et de rhum, elle joue également un rôle important dans l'aménagement du territoire et de l'environnement. En effet, elle représente plus de 60% des surfaces agricoles et fournit plus de 10% de la production d'électricité (Antoir et al. 2016 et Cambronne 2019).

Les mauvaises herbes appelées aussi "adventices" constituent une des principales contraintes de cette culture (Marion et Marnotte 1991). En effet, le climat tropical de la Réunion est profitable aux adventices. Mal gérées, elles peuvent se développer très rapidement et rentrer en compétition avec la canne à sucre pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs, faisant alors chuter drastiquement le rendement. La gestion de cette flore adventice est alors primordiale. Cependant, elle se fait majoritairement à l'aide d'herbicides. Cette voie est privilégiée par les planteurs car plus simple d'utilisation, nécessitant moins de main d'œuvre et de temps, ce qui la rend logiquement plus économique. C'est ainsi que la canne à sucre est la première production végétale de l'île en terme de consommation d'herbicides (Mansuy et al. 2019) (en ne ramenant pas la quantité d'herbicides utilisées à l'hectare).

Cependant ce modèle d'agriculture non durable est fortement remis en question, porté notamment par les voix de l'opinion publique. Les différents acteurs du monde agricole (pouvoirs publics, instituts techniques et de recherche, agriculteurs etc.) tentent de trouver des solutions alternatives pour réduire l'utilisation d'herbicides. Ainsi, depuis quelques années, il existe une importante réflexion quant à cette transition agroécologique. Il en résulte une volonté de la recherche agronomique d'étudier en profondeur la biologie et le comportement des adventices et leurs interactions avec les cultures pour proposer des modes de gestion alternatifs limitant l'usage des herbicides (Chabalier et al. 2012).

Dans ce contexte, depuis de nombreuses années, le CIRAD et eRcane (institut technique de la canne à sucre) mettent en place des *essais* sur l'ensemble de l'île afin d'étudier des méthodes de lutte alternatives aux herbicides. Toutefois, aucune étude n'a encore été menée sur l'ensemble des données récoltées, avec un objectif de compréhension de l'efficacité globale de ces différentes méthodes de lutte. Ainsi, l'objectif principal de ce travail est de réaliser ce regroupement qui s'apparente à une méta-analyse. Ces données ont pu être regroupées car elles ont le même objectif, des pratiques de désherbage alternatives similaires et des mesures dépendantes similaires.

La première partie du travail concernait l'extraction et l'homogénéisation des données à effectuer. En effet, ces expériences ont été menées localement, à différents endroits, années, par différentes personnes et avec des protocoles expérimentaux différents. De plus, ces études répondaient à des questions différentes ce qui occasionne forcément des divergences qui se répercutent sur les données. La deuxième partie du travail a été d'effectuer des analyses explicatives des données regroupées et homogénéisées avec pour objectif principal l'analyse de l'impact des méthodes alternatives sur le

rendement (en tonne par hectare), suivi par deux autres *s* dépendantes : le taux de recouvrement moyen des adventices (en %) et l'Indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFTh) qui correspond au nombre de doses de référence d'herbicide utilisées par hectare.

Les pratiques de désherbages alternatives analysées sont le *sarclage*, le *broyage* et les *PDS (plantes de services)* comparées à un *TP (témoin propre)* entretenu par désherbage chimique. Dans les essais, toutes les pratiques alternatives étaient couplées à l'usage d'herbicides. Pour étudier l'effet des différentes pratiques, il a été décidé de décomposer notre objectif principal en trois questions majeures.

1. Existe-t-il une différence de rendement de la canne à sucre entre les différentes pratiques de désherbage ?

2. Existe-t-il une différence d'IFTh entre les différentes pratiques de désherbage ?

3. Existe-t-il une différence de recouvrement moyen des adventices entre les différentes pratiques de désherbage ?

2 Matériel

2.1 Description des données

Les données proviennent d'essais menés par l'institut eRcane, étalés sur une dizaine d'années. Ces données représentent les caractéristiques de l'essai (année, parcelle, *bloc*...) et les mesures agronomiques réalisées au cours de l'essai (rendement de la canne à sucre, taux de recouvrement des adventices...). Tous ces essais avaient pour objectif d'étudier des pratiques alternatives aux herbicides. Pour cela, une parcelle expérimentale était découpée en parcelles élémentaires où 1 pratique de désherbage était testée par parcelle élémentaire. Ces pratiques correspondaient à des pratiques de désherbage alternatives aux herbicides, à un témoin de référence (TP) et dans certains essais, un *TE (témoin enherbé)*. Chaque pratique était répétée dans 2 à 4 blocs ou répétitions. La récolte de la canne à sucre une fois plantée se fait à chaque campagne culturale (une année). Un cycle correspond à une campagne culturale. La première année où l'essai est implanté est appelée "Cycle de plantation" et les autres années correspondent aux "Cycles de repousse". L'*unité expérimentale* correspond à une parcelle expérimentale d'un bloc donné et dans un essai particulier (les années successives sont des *observations* répétées dans les mêmes parcelles expérimentales (Letourmy 1999). Pour chaque essai, les données sont enregistrées sur plusieurs fichiers Excel (un par année). La structuration de ces fichiers est différente d'un essai à l'autre. Il y a parfois, d'une année à une autre, des noms différents pour une même variable, des unités différentes et des données manquantes. Il a donc d'abord fallu harmoniser les fichiers pour pouvoir en extraire les variables d'intérêt (rendement, IFTh, recouvrement global, recouvrement par espèce), les variables des paramètres des essais (bloc,parcelle,années et pratiques de désherbage), les données environnementales (altitude, température moyenne, pluviométrie moyenne, localisation etc.) et le nombre

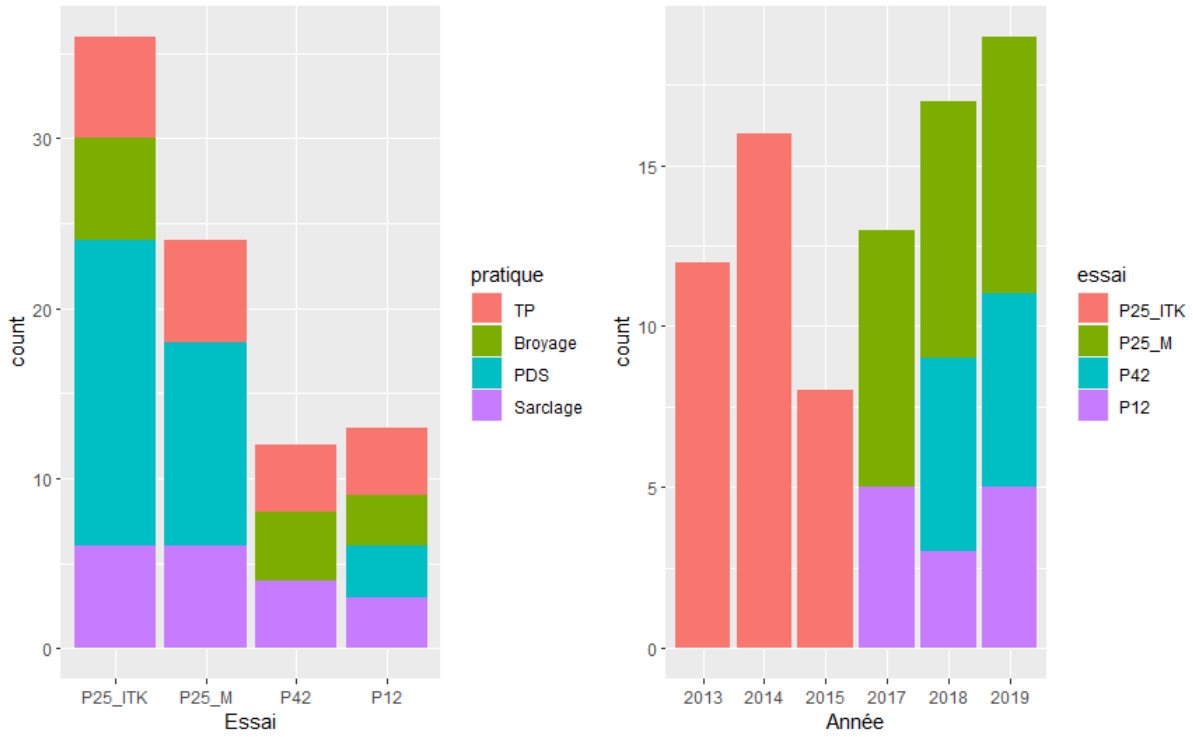


FIGURE 1 – Barplots montrant le nombre d'observation de chaque essai par pratique et par année.

d'interventions (chimiques, manuelles et/ou mécaniques).

Le fichier final regroupe 9 essais (752 observations et 185 variables) pour permettre de répondre aux questions agronomiques posées en introduction. Parmi ces variables, 160 correspondent à des notes de recouvrement pour différentes espèces. Ces dernières ont été récupérées dans l'objectif d'analyser précisément le recouvrement de certaines espèces réputées pour être plus abondantes que les autres. Cependant tous ces essais ne sont pas pertinents pour l'analyse. En effet, ce sont les pratiques alternatives tels que le broyage et le sarclage qui nous intéressent principalement et que l'on souhaite comparer au TP. Il a donc été décidé de sélectionner uniquement les essais contenant au minimum une de ces deux pratiques. La pratique de gestion des adventices par l'intermédiaire de PDS a déjà été l'objet d'analyses quant à son efficacité (SOULÉ et al. 2021). L'explication de son effet n'est donc pas prioritaire, les essais contenant uniquement cette pratique ne sont donc pas retenus. D'autres pratiques de désherbage n'ont pas été incluses au final (eg. *weedseeker*,*désherbage sélectif*, *TE* etc.) du fait d'un manque d'observations, d'un manque de répétitions ou encore de non inclusion dans le protocole expérimental (eg. TE).

De cette sélection, seulement quatre essais sur neuf ont été retenus : P12, P42, P25 ITK et P25 Montagne. Le jeu de données est réduit à 119 observations et les essais s'étalent sur sept années, allant de 2012 à 2019 (voir figure 1). Les données par essai sont à peu près équilibrées, mais pas celles de l'ensemble du regroupement. Il est à noter également qu'il subsiste des problèmes de

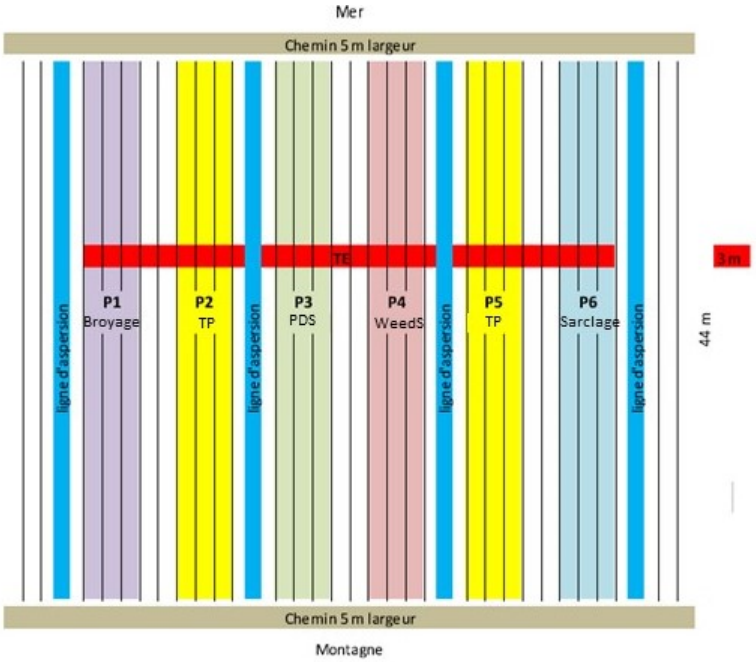


FIGURE 2 – Schéma du protocole expérimental de l'essai P12.

confusion d'effets pour l'essai P42 (3,4). Les essais sont tous implantés sur la station de la Mare (Sainte-Marie [1]). Les espèces de PDS utilisées sur les différents essais/années sont disponibles dans l'annexe A.1.

2.2 Description des essais retenus

L'essai P12 a été mené sur trois campagnes culturales, de la plantation en 2017 à la deuxième repousse en 2019. Il contient un unique bloc et 6 parcelles. C'est un plan en randomisation totale avec deux répétitions du TP et une répétition des pratiques de broyage, sarclage, PDS et weedseeker (non retenue). De plus, le TE n'est pas positionné sur une parcelle expérimentale mais est en bande à travers les parcelles (indiqué en rouge sur la figure 2). Cet essai ne peut être analysé individuellement car il n'y a pas de répétitions pour les pratiques de broyage, sarclage et PDS.

L'essai P42 a été mené sur deux campagnes culturales, en 2018 en plantation et en 2019 en repousse. Il contient 2 blocs contenant chacun 4 parcelles. C'est un plan en bloc complet. Sur la première campagne culturale, les pratiques des TP et sarclage ont été testées tandis que sur la deuxième campagne culturale, la pratique du sarclage a été remplacée par du broyage (voir figures 3 et 4). Ainsi, les facteurs "Année", "Cycle" et "Pratique" sont confondus sur cet essai. De plus,

1. Latitude : 20°54'S ; Longitude : 55°31E.

il est à noter que les PDS ne sont pas présentes sur cet essai. Comme la P12, le TE est en bande à travers les parcelles.

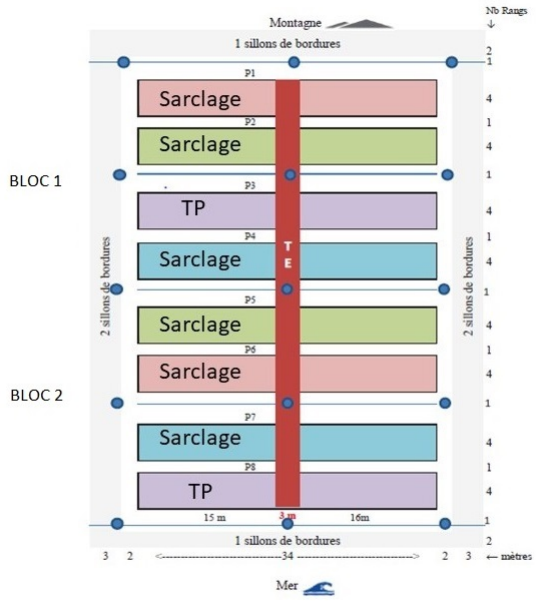


FIGURE 3 – Schéma du protocole expérimental de l'essai P42 lors de l'année de plantation.

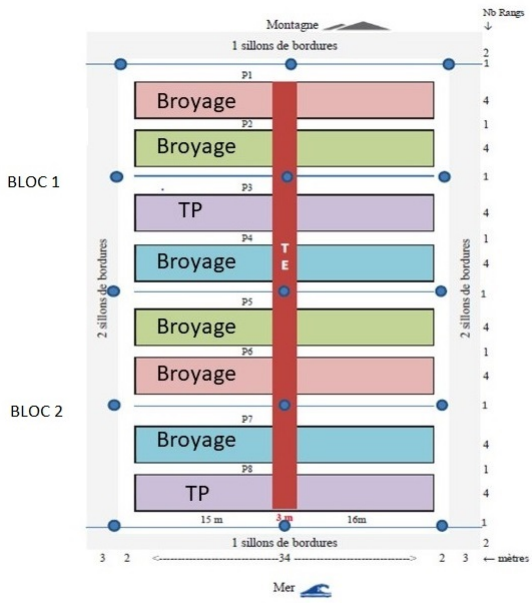


FIGURE 4 – Schéma du protocole expérimental de l'essai P42 lors de la première année de repousse.

L'essai P25 ITK a lui été mené sur 5 campagnes culturales de 2012 à 2017 en repousse uniquement. Il contient quatre blocs contenant chacun six parcelles. C'est un plan en bloc complet de quatre répétitions, mais la dernière année de repousse ne contient que deux répétitions. Les pratiques présentes sur cet essai sont : le TP, les PDS, le sarclage, le broyage et le TE. Ce dernier traitement est inclus dans le protocole expérimental à la différence des autres essais (voir figure 5).

						HAUT		Montagne
		Bloc 1		Bloc 2		Bloc 3		Bloc 4
Maille		10	2	10	2	10	2	10
1	1	TE	20	PDS	21	TP	40	Sarclage
1	2	TP	19	Broyage	22	Sarclage	39	TE
2	3	PDS	18	TP	23	PDS	38	PDS
2	4	Sarclage	17	PDS	24	M5	37	Broyage
3	5	Broyage	16	TE	25	Broyage	36	TP
3	6	PDS	15	Sarclage	26	TE	35	PDS

FIGURE 5 – Schéma du protocole expérimental de l'essai P25 ITK.

Le P25 montagne a été mené sur trois campagnes culturales, de la plantation en 2017 jusqu'à la deuxième repousse en 2019. Il contient ainsi deux blocs contenant chacun 4 parcelles. C'est également un plan en bloc complet. Les pratiques présentes sur cet essai sont le sarclage, les PDS et le TP. Encore ici, le TE est en bande à travers les parcelles (voir figure 6).

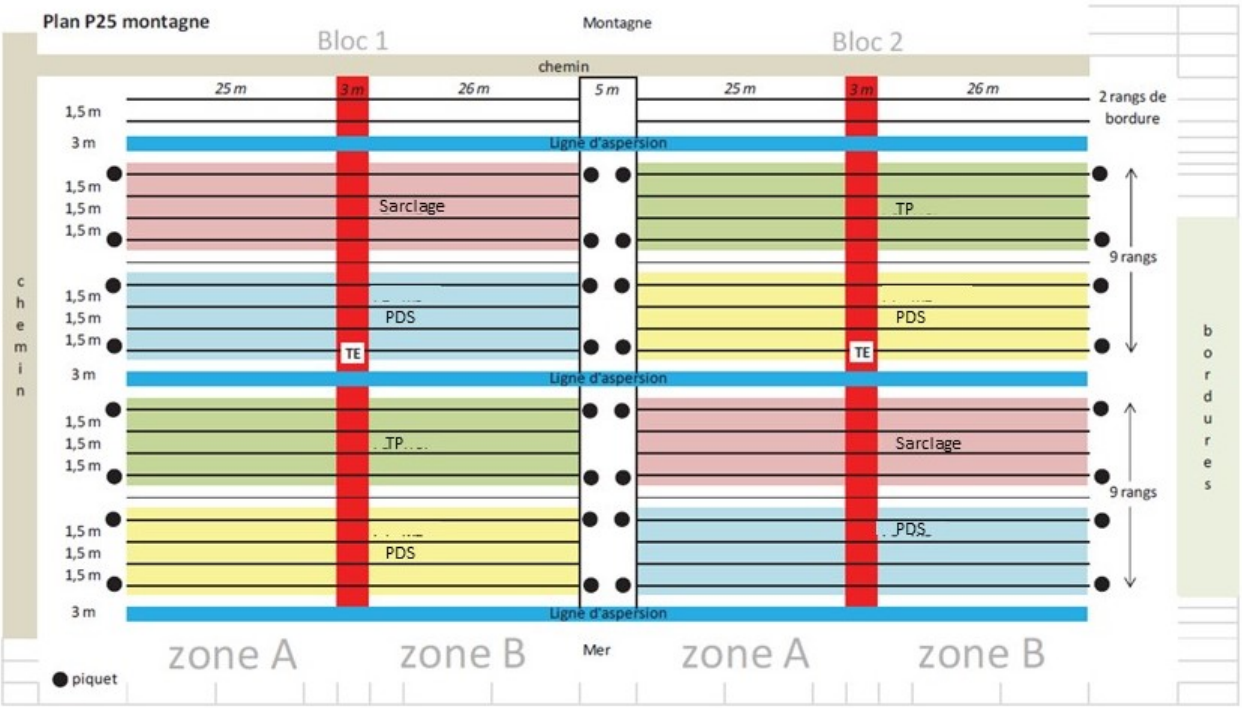


FIGURE 6 – Schéma du protocole expérimental de l'essai P25 montagne.

La même variété de canne à sucre, "R587", a été utilisée pour les essais P12 et P42 tandis que pour les essais P25 ITK et P25 Montagne, il s'agissait de la "R579".

On résume sur le tableau ci-dessous les protocoles et spécificités de chaque essai :

	P12	P42	P25 ITK	P25 Montagne
PLAN	Bloc complet	Bloc complet	Bloc complet	Bloc complet
ANNEES	2017-2019	2018-2019	2012-2015	2017-2019
CYCLES	R	P/R	R	P/R
NB BLOCS	1	2	4 (2)	2
NB PARCELLES	6	8	24	8
VARIÉTÉ	R587	R587	R579	R579
PRATIQUE ABSENTES	/	Pds	/	Broyage

TABLE 1 – Récapitulatif des protocoles des différents essais.

3 Méthodes

Les analyses statistiques de l'effet des pratiques de désherbage sur le rendement, l'IFTh et le recouvrement global ont été réalisées en utilisant des modèles linéaires mixtes combinés à une sélection de variables. Pour chacune des 3 questions de recherche, nous avons tout d'abord analysé les essais séparément avant une analyse conjointe (seule l'analyse globale sera cependant présentée dans ce rapport). Pour cette dernière, plusieurs facteurs ont été incorporés dans la partie fixe du modèle. Nous avons considéré le facteur cycle car il est connu qu'une perte de rendement, un plus haut taux de recouvrement et donc une plus grande valeur d'IFTh peuvent être observés lors de la plantation en comparaison des cycles de repousse suivants (Marnotte 2008). Le nombre d'interventions chimiques a aussi été considéré dans la structure fixe car ce dernier devrait logiquement avoir un impact sur le taux d'herbicides. De plus, un nombre élevé d'interventions pourrait indiquer un recouvrement assez élevé des adventices. Enfin, le facteur essai a été considéré comme fixe car nous souhaitons connaître les effets de chaque essai. De plus, nous souhaitons étudier l'effet d'une pratique de désherbage dans des situations très diverses ce qui revient à étudier l'interaction entre la pratique et l'essai. Les interactions entre les facteurs pratique et cycle, et les facteurs nombre d'interventions chimiques et essai ont également été prises en compte. En outre, nous avons considéré les facteurs parcelle, bloc et année en effets aléatoires pour pouvoir prendre en compte la corrélation présente entre les observations issus d'une même parcelle et d'un même bloc ou d'une même année, car ce sont donc des données non indépendantes. Cela nous permettait également de pouvoir généraliser nos résultats en dehors du cadre des essais (station La Mare de 2012 à 2019). Notons que la considération du facteur année comme aléatoire permettait de capturer toutes les variabilités dues aux conditions environnementales que nous ne cherchions pas à étudier ici. Les *niveaux* de référence pour les comparaisons dans le modèle sont : la pratique TP, le cycle de plantation et l'essai P25 ITK. Cet essai a été choisi car il contient toutes les pratiques de désherbage.

La structure du modèle avant sélection pour les trois analyses globales prenait ainsi cette même forme :

$$Y_{i,j,k,l,m,n} = \mu + P_i + E_j + C_k + \beta_j X_l + PE_{i,j} + PC_{i,k} + b_{j,n} + u_{j,n,l} + v_m + \varepsilon_{i,j,k,l,m,n} \tag{1}$$

avec i l'indice des pratiques ($i = 1, \ldots, 4$),
j l'indice des essais ($j = 1, \ldots, 4$),
k l'indice des cycles ($k = 1, 2$),
l l'indice de la parcelle emboîté dans le bloc, lui même emboîté dans l'essai ($l = 1, \ldots, np_j$ avec np_j le nombre de parcelles de l'essai j,
m l'indice des années ($m = 1, \ldots, 7$) et n l'indice de la répétition.
$Y_{i,j,k,l,m,n}$ est le rendement de l'observation i, j, k, l, m, n,
μ est l'intercept,
P_i est l'effet de la pratique i,
E_j est l'effet de l'essai j,

C_k est l'effet du cycle k,
X_l est le nombre d'intervention chimique sur la parcelle l,
β_j est l'effet du nombre d'interventions chimiques en interaction avec l'essai,
$PE_{i,j}$ est l'effet d'interaction entre la pratique i et l'essai j,
$PC_{i,k}$ est l'effet d'interaction entre la pratique i et le cycle k.
$b_{j,n}$ est l'effet aléatoire du bloc n de l'essai j supposé suivre une loi normale *iid* $N(0, \sigma_b^2)$ avec σ_b^2 un paramètre de variance inconnu.
$u_{j,n,l}$ est l'effet aléatoire de la parcelle l du bloc n de l'essai j supposé suivre une loi normale *iid* $N(0, \sigma_u^2)$ avec σ_u^2 un paramètre de variance inconnu.
v_m est l'effet aléatoire de l'année m supposé suivre une loi normale *iid* $N(0, \sigma_v^2)$ avec σ_v^2 un paramètre de variance inconnu.
$\varepsilon_{i,j,k,l,m,n}$ est le résidu associé à l'observation i, j, k, l, m, n supposé suivre une loi normale *iid* $N(0, \sigma_e^2)$ avec σ_e^2 un paramètre de variance inconnu.

La sélection de la meilleure structure aléatoire a été faite selon une comparaison de modèles via le *BIC* (Schwarz 1978) donné par la formule :

$$BIC = -2\ln(L) \ + \ k\ln(n)$$

avec L la vraisemblance du modèle estimée, n le nombre d'observations dans l'échantillon, k le nombre de paramètres libres du modèle.

Le critère BIC a été choisi car il donne, en général, des modèles plus parcimonieux comparé à un autre critère comme l'AIC (Critère d'information d'Akaike). Ainsi, nous partions d'un modèle contenant toutes les variables fixes et leurs interactions. De ce modèle, nous effectuions alors la comparaison par le critère BIC décrit juste ci-dessus afin de trouver la structure optimale pour les effets aléatoires. Les modèles comparés ont été calculés grâce à la méthode *REML* (Corbeil et Searle 1976).

En gardant cette meilleure structure aléatoire, nous effectuions alors la sélection de la meilleure structure fixe. Deux stratégies ont été utilisées en parallèle :

— La stratégie "Top-down" (P. Diggle et al. 2002). Nous partions de toutes les variables sélectionnées par la structure fixe ainsi que les interactions. Ensuite une analyse de variance a été effectuée sur le modèle calculé par la méthode REML, pour retirer un par un les facteurs non significatifs au seuil de 0.05 (F-test).
— Une comparaison de différents modèles calculés avec la méthode ML (maximum de vraisemblance, Harville 1977) via le critère BIC.

Le modèle finalement choisi fut celui qui comprenait la structure la plus parcimonieuse et la plus pertinente par rapport à l'objectif de l'analyse effectuée. Il a été calculé via les estimations REML, et les p-valeurs pour les effets fixes ont été sorties grâce à la méthode d'approximation de Satterthwaite dans une analyse de variance de type 2 ou 3 (pour tenir compte du déséquilibre induit par des *traitements* manquants dans un ou deux essais).

Pour chaque modèle, les hypothèses d'homoscédasticité, de normalité et d'indépendance des résidus devaient être validées. Ainsi, pour ce faire, nous avons combiné l'analyse graphique de ces derniers avec des Q-Q plots et des histogrammes pour la normalité, des boxplots et des nuages de points (les valeurs ajustées contre les résidus) pour l'homoscédasticité, et nous avons effectué des tests Shapiro-Wilk et Kolgomorov-Smirnov pour la normalité (Razali, Wah et al. 2011) et le test de Bartlett pour l'homogénéité des variances (Hartley 1940). Ces tests étant cependant réputés être très sensibles, nous les avons utilisés avec précaution et nous nous sommes fiés en dernière analyse à l'analyse graphique. Les analyses post-hoc ont alors été effectuées sur le modèle. Nous avons affiché les estimations des variances des effets aléatoires,les moyennes marginales estimées ainsi que les comparaisons multiples ajustées par la méthode de Tukey (Dunn 1961). Afin de réaliser la première tâche d'harmonisation des données, et dans un souci de reproduction, il a été choisi d'effectuer cette première partie avec le logiciel R (version 4.2.0), notamment à travers la collection de package Tidyverse (version 1.3.2) qui réunit tous les outils de traitement de données et de visualisation nécessaire à l'analyse. Pour construire les différents modèles, les packages "lme4" (version 1.1-30), "nlme" (version 3.1-159) ont été choisis. Le package lme4 a permis de construire les trois modèles "beyond optimal" de l'analyse globale car elle permettait de construire une structure aléatoire ayant des facteurs croisés (contrairement au package nlme). Le package nlme lui a été utilisé lors des analyses individuelles quand les facteurs aléatoires des modèles n'étaient pas croisés. En effet, cela permettait de comparer (via le critère BIC) des modèles "beyond optimal" ayant uniquement une structure fixe avec des modèles ayant une structure aléatoire. Le package "emmean" a permis de calculer les moyennes des moindres carrés estimées. Le niveau de significativité statistique a été fixé à 0.05. Le travail présenté dans ce rapport ainsi que les jeux de données et lignes de codes sont disponibles sur Gitlab.cirad.fr (voir section 7).

4 Analyse du rendement, de l'utilisation d'IFTh et du recouvrement

4.1 Effets des facteurs sur le rendement

Pour mieux comprendre les effets des variables explicatives (pratique, cycle, nombre d'interventions chimiques) ainsi que des variables de paramètres des essais (essai, année), nous avons commencé par une analyse descriptive des graphiques. Visuellement, nous n'avons pas observé de réelles différences de rendement entre les pratiques (voir figure 7-A). Le nombre d'interventions chimiques ne semblait pas avoir d'effet sur le rendement non plus (voir figure 7-D). A l'inverse, nous avons observé de fortes différences de rendement entre les cycles de plantation et de repousse. Comme attendu, le rendement était bien supérieur en repousse (voir figure 7-C). Nous avons également observé des différences de rendement en fonction des essais. L'essai P25 Montagne donnait des rendements bien supérieurs par rapport aux trois autres essais (voir figure 7-B). Pour finir, nous avons observé une forte variabilité de rendement en fonction des saisons due à des conditions climatiques différentes (voir figure 7-E). La procédure de sélection précédemment décrite nous a permis de retenir les effets aléatoires saison et bloc ainsi que les effets fixes cycle, essai et pratique. L'effet fixe nombre d'interventions chimiques n'a pas été sélectionné ainsi que les interactions. Il est à noter que l'essai était significatif à 10% avec un test de Fisher, nous avons cependant décidé de conserver cette variable (voir la table 2 anova). En effet, il a été constaté que lorsque ce dernier n'était pas dans la structure fixe, la variance expliquée par l'effet aléatoire saison était surestimée par le modèle.

Nous avons obtenu alors le modèle suivant :

$$RDT_{i,j,k,l,m,n} = \mu + P_i + E_j + C_k + b_{j,n} + v_m + \varepsilon_{i,j,k,l,m,n}. \tag{2}$$

La notation reste inchangée par rapport au modèle général introduit dans la section précédente (voir équation (1)). La table 2 anova donne l'analyse de variance de type III avec les p-valeurs des effets fixes retenus. La pratique et le cycle étaient significatifs.

	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)
pratique	7192.69	2397.56	3	101.82	9.25	0.0000
essai	2797.49	932.50	3	8.25	3.60	0.0638
cycle	8405.70	8405.70	1	96.49	32.42	0.0000

Table 2 – Tableau d'analyse de variance (anova) de type III du modèle final du rendement.

Le diagnostic des résidus confirme visuellement les hypothèses du modèle (indépendance et normalité des résidus ainsi que l'homogénéité de la variance résiduelle). L'homogénéité de la variance résiduelle et l'hypothèse de normalité ont été confirmées par différents tests (voir annexe A.2).

Les estimations des niveaux de chaque facteur sont données dans le tableau 3. Concernant la pratique, seule la différence d'effet entre les pratiques PDS et désherbage chimique était significative.

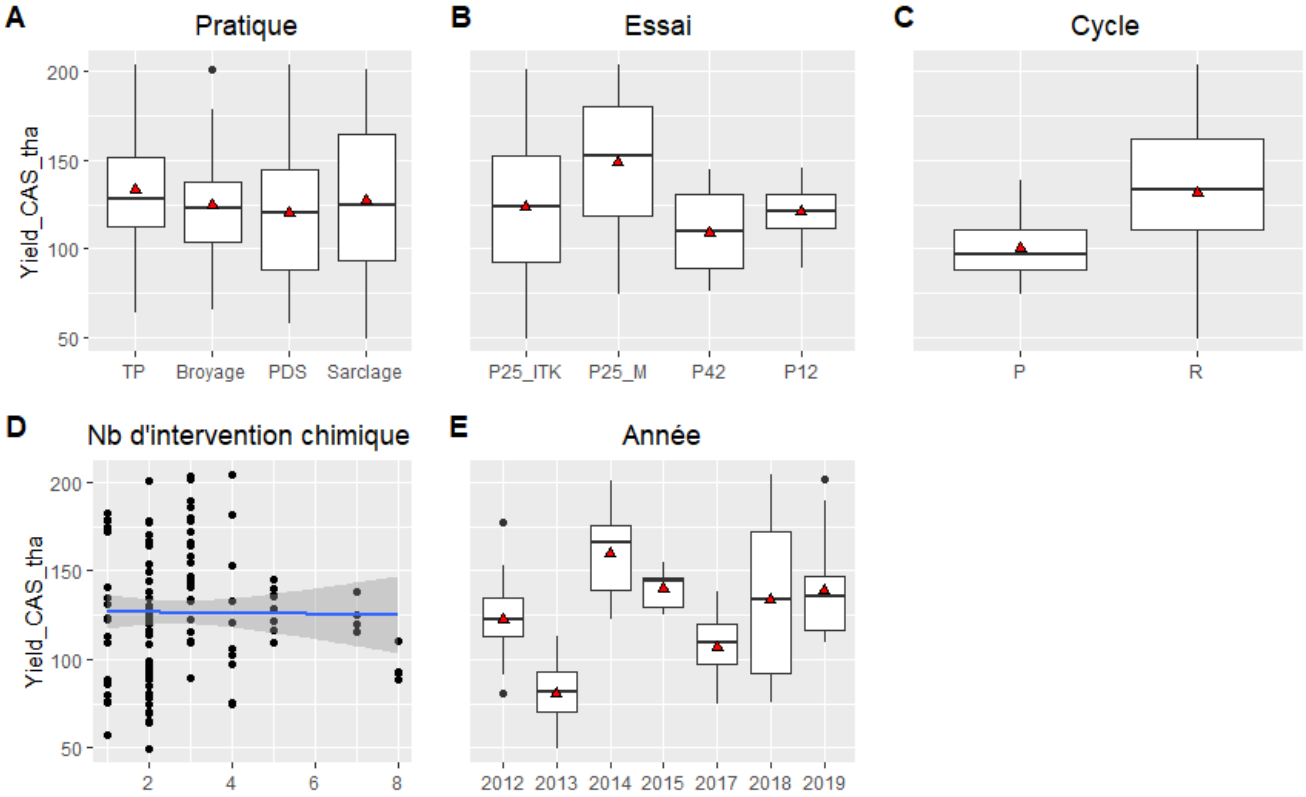


FIGURE 7 – Boxplots du rendement en fonction des pratiques (A), essais (B), cycles (C), années (E) et nuage de points du rendement en fonction du nombre d'intervention (D). La courbe bleu représente la tendance linaire accompagné de l'intervalle de confiance à 95%. Les triangles rouges représentent les moyennes.

	Estimate	Std. Error	df	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	72.59	17.76	13.90	4.09	0.00
pratiqueBroyage	-6.61	4.78	103.01	-1.38	0.17
pratiquePDS	-18.99	4.10	101.18	-4.63	0.00
pratiqueSarclage	-0.68	4.37	102.61	-0.16	0.88
essaiP25_M	46.65	22.54	7.45	2.07	0.07
essaiP42	14.01	23.47	8.61	0.60	0.57
essaiP12	14.49	23.93	8.78	0.61	0.56
cycleR	58.61	10.29	96.49	5.69	0.00

TABLE 3 – Tableau affichant les estimations des niveaux des facteurs significatifs du modèle du rendement.

Celle-ci, comme vu dans les essais analysés individuellement, influençait négativement le rendement d'environ -20 t/ha. Pour aller plus loin dans l'interprétation, nous avons calculé les moyennes ajustées du rendement en fonction des différentes pratiques (voir tableau 8 en annexe) et les avons comparées deux à deux (voir tableau 9 en annexe). Ainsi nous avons pu regrouper les pratiques de désherbage chimique, broyage et sarclage ensemble, celles-ci donnant des rendements homogènes.

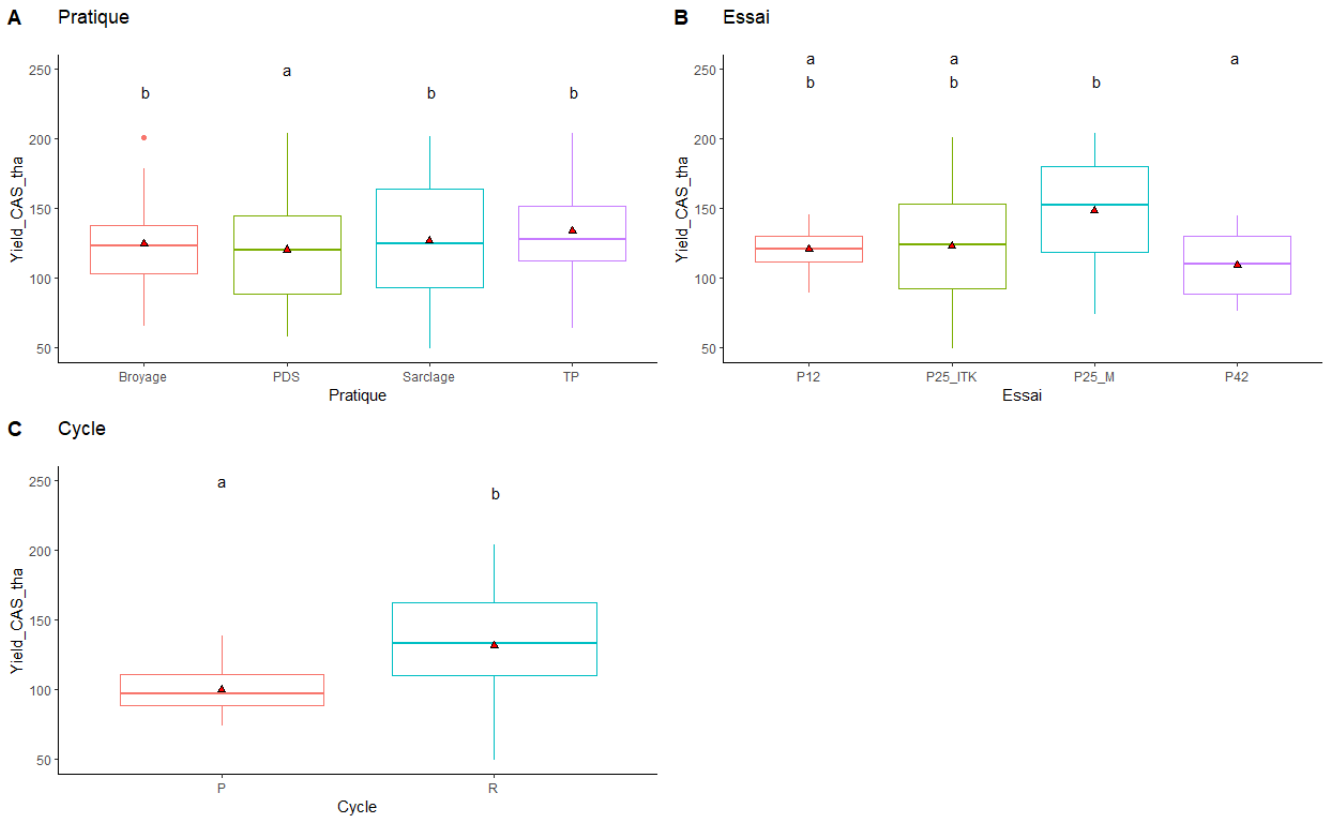


FIGURE 8 – Moyennes ajustées du rendement en fonction des pratiques (A), des essais (B) et du cycle (C).

La pratique PDS donnait un rendement significativement plus faible (voir figure 8-A et tableau 8). Comme attendu, le cycle de repousse influençait significativement le rendement de +58 t/ha comparé à la plantation. Les moyennes ajustées du rendement en fonction des cycles sont présentées à la figure 8-C.

Le tableau 4 donne les paramètres de la variance du modèle, la part de variance du facteur aléatoire année. La variance du facteur aléatoire année est élevée comparé au facteur "Bloc" car elle permet de capter les variations dues à l'évolution des conditions climatiques.

Factors	VarCov	SdCorr
Bloc	114.2720	10.68981
Year	677.9421	26.03732
Residual	259.2905	16.10250

TABLE 4 – Estimations des variances des effets aléatoires du modèle de rendement.

4.2 Effets des facteurs sur l'utilisation d'herbicides

Les données concernant l'IFTh souffraient de quelques données manquantes. Le nombre d'observations a été réduit à 85 en comparaison des 119 observations des deux autres variables à expliquer. A l'instar de l'analyse du rendement, nous avons commencé par tracer quelques graphiques afin d'obtenir une première appréciation des effets des variables explicatives et de paramètres. (figure 9).

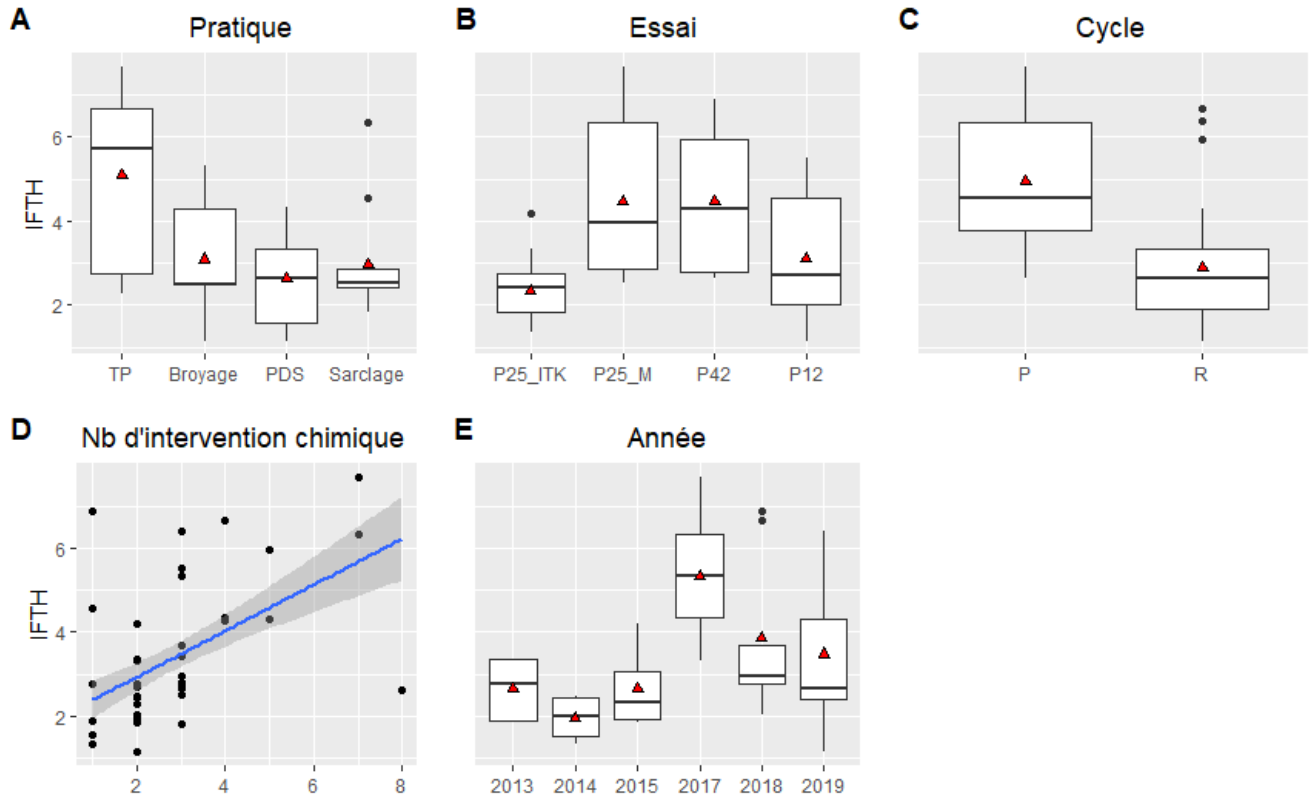


FIGURE 9 – Boxplots de la valeur d'IFTh en fonction des pratiques (A), essais (B), cycles (C), années (E) et nuage de points du rendement en fonction du nombre d'interventions (D). La courbe bleue représente la tendance linaire accompagnée de l'intervalle de confiance à 95%. Les triangles rouges représentent les moyennes.

Nous avons observé une différence de valeur d'IFTh entre les trois pratiques alternatives et le TP qui avait une moyenne bien plus élevée (voir figure 9-A). Le nombre d'interventions chimiques semblait influencer positivement l'IFTh (voir figure 9-D). De plus, nous avons également observé de fortes différences d'IFTh entre les cycles de plantation et de repousse. Comme attendu, l'IFTh était bien inférieur en repousse (voir figure 9-C). Nous avons également observé des différences d'IFTh en fonction des essais. L'essai P25 ITK donnait des valeurs moyennes d'IFTh assez inférieures par rapport aux trois autres essais. De plus, les trois autres essais avaient des valeurs d'IFTh

plus hétérogènes (voir figure 9-B). Pour finir, à l'instar des données de rendement, nous avons encore observé ici une assez forte variabilité d'IFTh en fonction des saisons due à des conditions climatiques différentes, notamment pour l'année 2017, qui avait une moyenne bien plus élevée que les autres années (voir figure 9-E).

Concernant la construction des modèles à sélectionner, il a été remarqué que les variances résiduelles des essais analysés individuellement sont assez différentes entre elles. Nous avons donc choisi d'ajouter une pondération au modèle afin de valider les hypothèses usuelles (homoscédasticité, indépendance et normalité). La procédure de sélection ici nous a permis de retenir la saison comme unique effet aléatoire ainsi que tous les effets fixes et les interactions. C'est-à-dire : la pratique, l'essai, le cycle, l'interaction entre la pratique et le cycle, entre la pratique et l'essai et entre le nombre d'interventions chimiques et l'essai.

Nous avons donc la formule du modèle 3 dont la notation reste toujours inchangée :

$$IFT_{i,j,k,l,m,n} = \mu + P_i + E_j + C_k + \beta_j X_l + PE_{i,j} + PC_{i,k} + v_m + \varepsilon_{i,j,k,l,m,n}. \tag{3}$$

	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)
pratique	11.87	3.96	3	61.55	98.24	0.0000
essai	1.35	0.45	3	9.02	11.16	0.0022
cycle	0.19	0.19	1	10.01	4.82	0.0528
pratique : essai	10.82	1.55	7	60.65	38.38	0.0000
pratique : cycle	14.06	4.69	3	58.75	116.32	0.0000
essai : nb_chimique	2.08	0.52	4	58.13	12.88	0.0000

Table 5 – Tableau d'analyse de variance de type II du modèle final de l'IFT.

Le tableau 5 donne l'analyse de variance de type II (présence de données manquantes pour le nombre d'interventions chimiques) avec les p-valeurs. Tous les facteurs hormis le cycle étaient significatifs. Le détail des estimations de chaque variable peut être retrouvé en annexe (voir tableau 11). Les interprétations sur ce modèle sont à prendre avec précaution compte tenu de la présence des trois interactions. Hormis le broyage, toutes les pratiques étaient significativement différentes du TP. La PDS permettait de diminuer la valeur d'IFTh en comparaison avec le TP d'environ -1.06, tandis que le sarclage l'augmentait de 1.73. La valeur de l'IFTh était significativement plus élevée sur les essais P25 Montagne et P42 comparée au P25 ITK (resp. 6.28 et 4.92).

Concernant le diagnostic des résidus (voir figure 17 en annexe), la normalité est visuellement respectée (cf histogramme et qqplot), bien que rejetée par les deux tests de Shapiro et Kolgomorov. Les variances semblent également être graphiquement homogènes, même si cette hypothèse est également rejetée par le test de Bartlett ici. Au niveau des boxplots, les quatre effets cycle, pratique, saison et essai sont globalement homogènes.

Les estimations des variances des effets aléatoires du modèle peuvent être retrouvées en annexe (tableau10).

Les moyennes ajustées pour les différentes interactions peuvent être trouvées en annexe (voir tableaux 12,13,14,15,16,17). Beaucoup de ces estimations n'ont pu être calculées du fait de la présence de ces interactions.

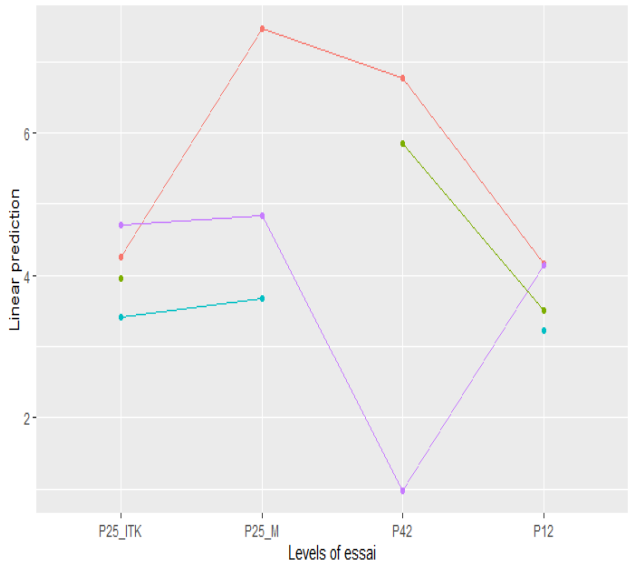


FIGURE 10 – Moyennes ajustées de l'IFTh en fonction de l'interaction pratique x essai

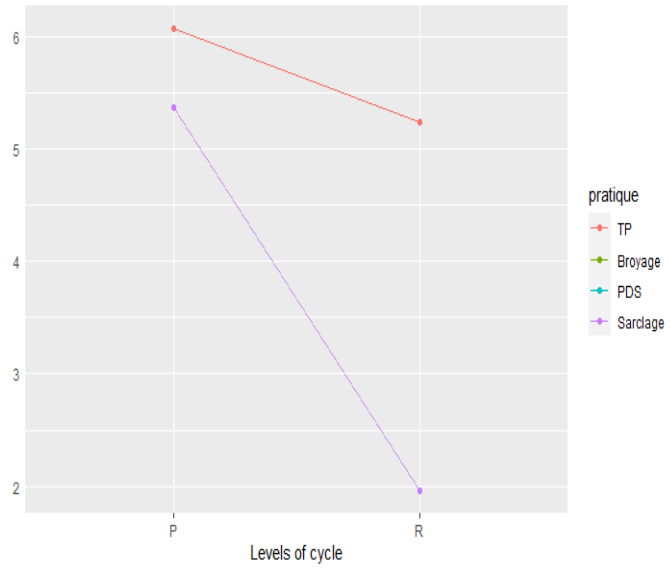


FIGURE 11 – Moyennes ajustées de l'IFTh en fonction de l'interaction pratique x cycle

Les pratiques les moins utilisatrices d'herbicides en fonction des essais étaient la PDS et le sarclage (valeur d'IFTh à environ 4). La PDS était la seule pratique aux résultats assez homogènes quel que soit l'essai.

Les essais P25 ITK et P12 semblaient avoir des valeurs similaires d'IFTh quelle que soit la pratique considérée. L'essai P42 montrait un contraste assez fort entre le TP et le broyage (IFTh à environ 5) et le sarclage (IFTh inférieur à 2), de même pour l'essai P25 Montagne où le TP avait une valeur supérieure à 5.5 et le sarclage et la PDS avaient une valeur autour de 4 (voir figure 10).

Concernant l'interaction entre la pratique et le cycle : nous avons noté une baisse bien plus importante de l'IFTh en cas de repousse dans le cas du sarclage en comparaison du TP. Cependant, le graphique n'affichait pas les droites des pratiques de PDS et de Broyage à cause du manque de ces pratiques dans les protocoles des essais P42 et P25 Montagne (voir figure 11).

L'interaction entre l'essai et le nombre d'interventions chimiques peut être visualisée par l'intermédiaire de la figure 12. En effet, en raison de certaines données manquantes, les comparaisons multiples n'ont pu être affichées de la même manière que les deux autres interactions. Nous avons alors affiché les valeurs observées des deux facteurs où on a pu ainsi remarquer que l'essai P42 dénotait une corrélation négative entre l'IFTh et le nombre d'interventions contrairement aux trois autres essais qui montraient une corrélation positive.

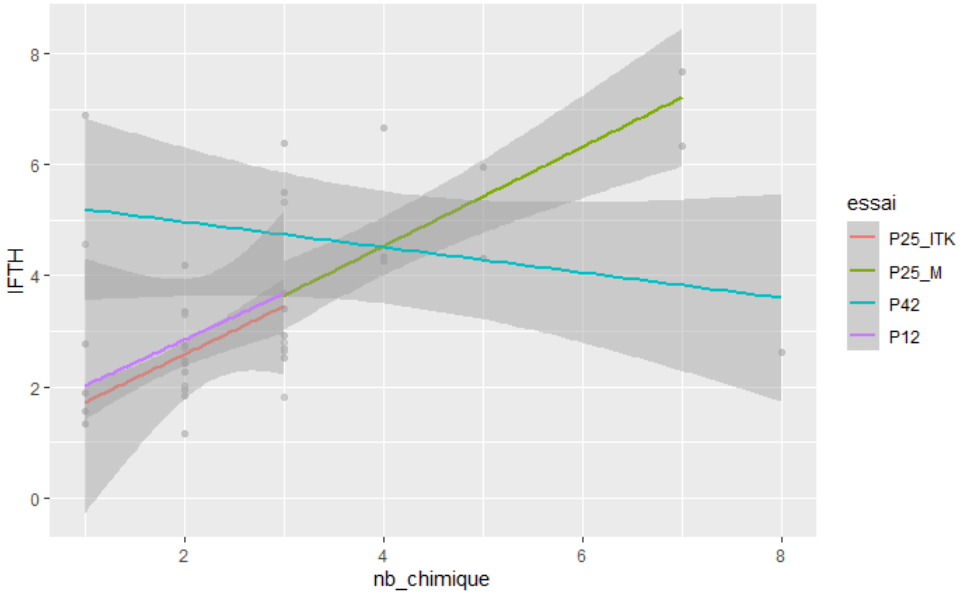


FIGURE 12 – Moyennes de l'IFTh en fonction de l'interaction essai x nombre d'interventions chimiques

4.3 Effets des facteurs sur le recouvrement

Comme les deux analyses précédentes, nous avons commencé l'analyse du recouvrement en dessinant les graphiques de cette variable en fonction des variables explicatives.

Il semblait y avoir une différence entre les essais et les saisons et des corrélations positives entre le nombre d'interventions chimiques et le recouvrement (sauf pour le TP) (voir figures 13).

Nous avons observé que le broyage possédait une moyenne légèrement inférieure à celle des autres pratiques (voir figure 13-A). Le nombre d'interventions chimiques semblait lui avoir une corrélation positive avec le recouvrement (voir figure 13-D). De plus, nous avons également observé une forte différence de recouvrement entre les cycles de plantation et de repousse. Le taux de recouvrement est bien inférieur en repousse (voir figure 13-C). Nous avons également observé des différences de recouvrement en fonction des essais. L'essai P25 ITK et l'essai P12 donnaient des valeurs moyennes de recouvrement inférieures à celles des deux autres essais (voir figure 13-B). Pour finir, à l'instar des données de rendement et d'IFTh, nous avons encore observé ici une assez forte variabilité du taux de recouvrement en fonction des saisons sans doute due à des conditions climatiques différentes (voir figure 13-E). Ainsi nous avons remarqué que de 2012 à 2015, les moyennes étaient inférieures à 20%, tandis qu'ensuite les moyennes étaient toutes supérieures à 20%.

Là encore, après avoir analysé les données par essai, nous avons observé des variances résiduelles éloignées les unes des autres. Ainsi, pour l'analyse conjointe, nous avons choisi d'introduire des poids pour chaque observation inversement proportionnels aux variances résiduelles obtenues lors de l'analyse par essai. Cela a permis de contrôler l'hétéroscédasticité inter essai. La procédure de

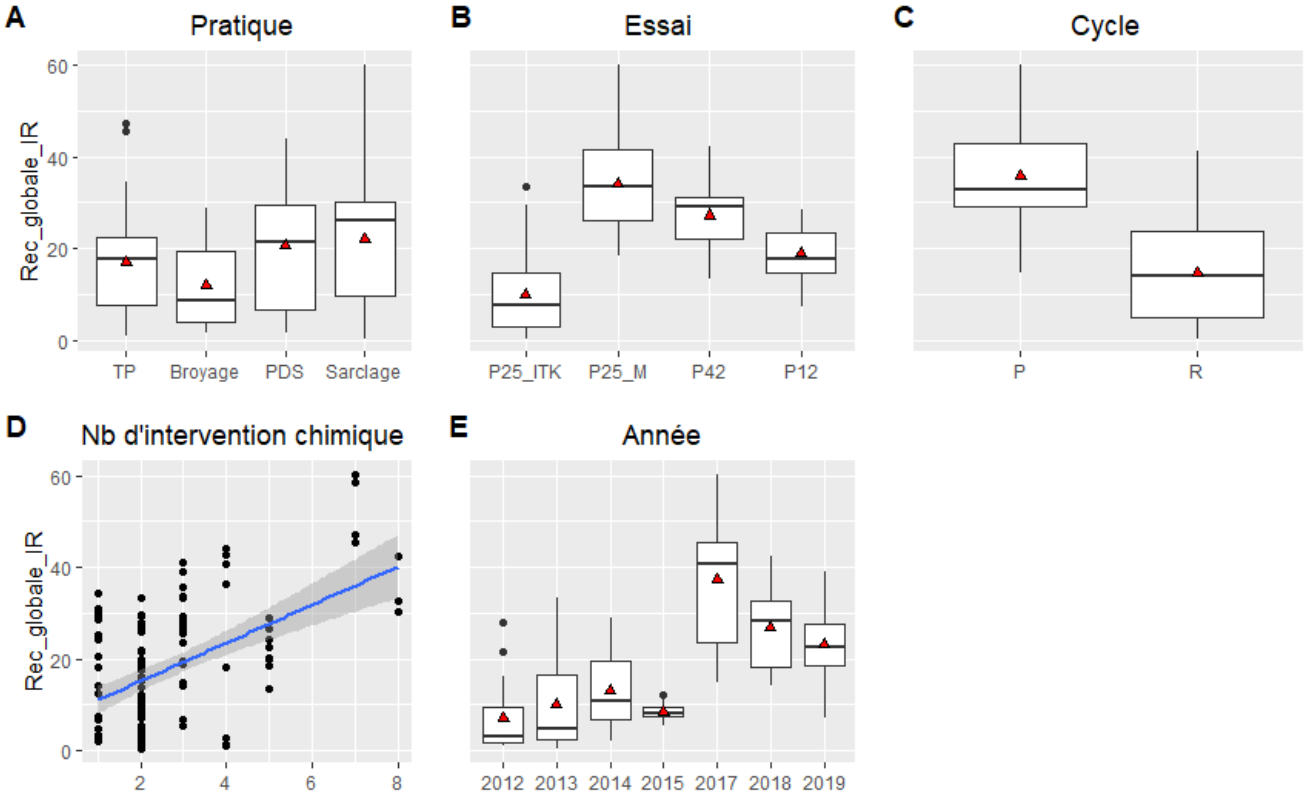


FIGURE 13 – Boxplots du taux de recouvrement en fonction des pratiques (A), essais (B), cycles (C), années (E) et nuage de points du rendement en fonction du nombre d'interventions chimiques (D). La courbe bleue représente la tendance linaire accompagnée de l'intervalle de confiance à 95%. Les triangles rouges représentent les moyennes.

sélection ici nous a permis de retenir la parcelle comme unique effet aléatoire ainsi que tous les effets fixes et les interactions. La formule finale du modèle 4 s'écrit ainsi :

$$REC_{i,j,k,l,n} = \mu + P_i + E_j + C_k + \beta_j X_l + PE_{i,j} + PC_{i,k} + u_{j,n,l} + \varepsilon_{i,j,k,l,n}. \quad (4)$$

Le tableau 6 donne l'analyse de variance de type *II* (présence de données manquantes également pour le nombre d'interventions chimiques) avec les p-valeurs. Tous les facteurs étaient significatifs (voir tableau 6). Le tableau détaillé des estimations des facteurs du modèle peut être retrouvé en annexe (tableau19).

Le diagnostic des résidus confirme visuellement les hypothèses du modèle (indépendance et normalité des résidus ainsi que l'homogénéité de la variance résiduelle) (voir annexe A.2). L'hypothèse de normalité a été confirmée par différents tests (voir annexe, contrairement à l'homogénéité des variances A.2.

	Sum Sq	Mean Sq	NumDF	DenDF	F value	Pr(>F)
pratique	165.98	55.33	3	80.91	2.04	0.1150
essai	109.05	36.35	3	88.66	1.34	0.2668
cycle	517.97	517.97	1	75.34	19.08	0.0000
pratique : essai	517.59	73.94	7	38.20	2.72	0.0215
pratique : cycle	307.08	102.36	3	72.39	3.77	0.0142
essai : nb_chimique	654.38	163.59	4	79.62	6.03	0.0003

TABLE 6 – Tableau d'analyse de variance de type *III* du modèle final du recouvrement.

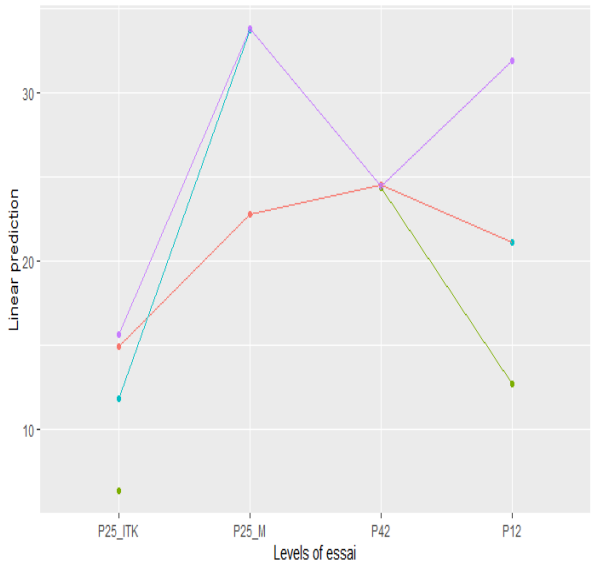


FIGURE 14 – Moyennes ajustées du recouvrement en fonction de l'interaction pratique x essai.

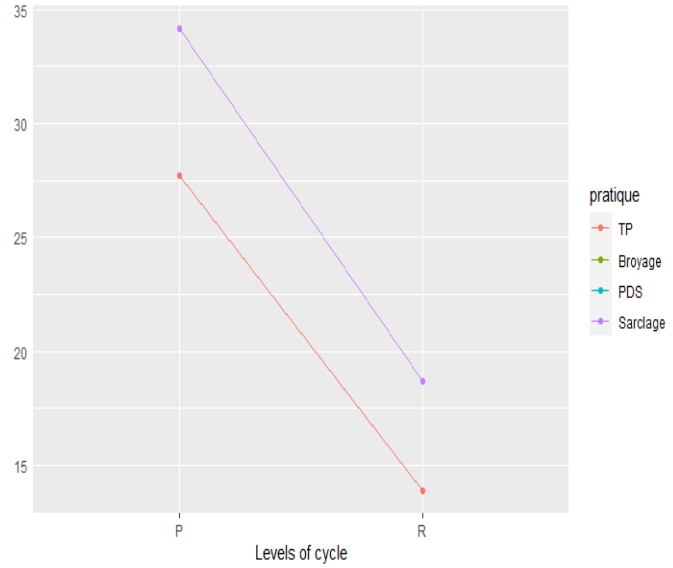


FIGURE 15 – Moyennes ajustées du recouvrement en fonction de l'interaction pratique x cycle.

Les estimations des variances des effets aléatoires du modèle peuvent être retrouvées en annexe (tableau18).

De même que pour l'analyse de l'IFTh, les moyennes ajustées pour les différentes combinaisons de facteurs peuvent être retrouvées en annexe (voir tableaux 20,21,22,23,24 et 25). La figure 14 donne les moyennes ajustées du recouvrement en fonction de l'interaction pratique x essai. Dans les quatre essais, nous avons remarqué que le sarclage semblait être la pratique possédant le plus haut taux de recouvrement, notamment pour les essais P25 Montagne et P12 (>30%). La pratique du broyage avait l'estimation la plus faible dans les essais où l'on avait recourt à son utilisation (notamment un recouvrement inférieur à 15% pour le P12 et le P25 ITK). Le TP avait des taux de recouvrement assez similaires entre chaque essai contrairement aux autres, notamment la PDS qui avait un des taux les plus faibles pour P25 ITK mais le taux le plus élevé pour P25 Montagne. Les essais P42 et P25 ITK étaient ceux où les taux de recouvrement étaient similaires pour chaque pratique tandis que l'essai le plus hétérogène était le P12 (pourcentages compris entre 10 et 35). La figure 15 donne les moyennes ajustées du recouvrement en fonction de l'interaction pratique x

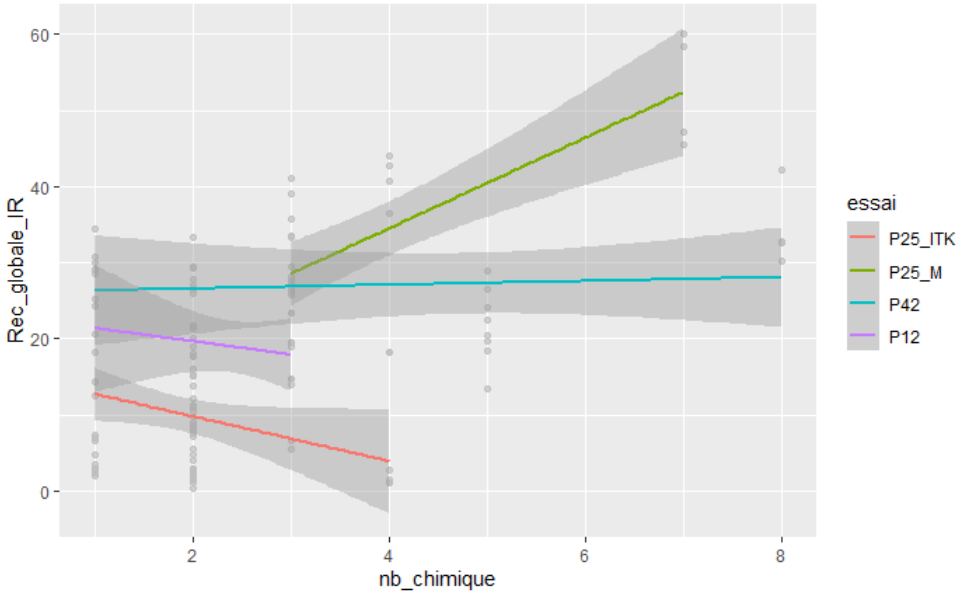


FIGURE 16 – Moyennes du recouvrement en fonction de l'interaction essai x nombre d'interventions chimiques

cycle. Les données concernant le cycle étaient accessibles uniquement pour les pratiques du sarclage et du TP. Pour ces deux dernières, nous avons bien remarqué la différence significative entre la plantation et la repousse. Cependant, du fait des données manquantes, nous n'avons pu observer graphiquement l'interaction entre le cycle et la pratique.

A l'instar de l'analyse de l'IFTh, la visualisation de l'interaction entre l'essai et le nombre d'interventions chimiques pour le recouvrement s'est faite avec les valeurs non ajustées 16. Nous avons ainsi remarqué que seul l'essai P25 Montagne dénotait une corrélation positive entre le taux de recouvrement et le nombre d'interventions chimiques. Contrairement au P12 et au P25 ITK qui dénotait une corrélation négative entre les deux variables. Le P42 lui ne montrait pas de tendance particulière.

5 Discussion

Les facteurs influençant significativement le rendement étaient la pratique culturale et le cycle de la canne à sucre. Le rendement entre le TP, le sarclage et le broyage n'étaient pas significativement différents (en repousse et en plantation). Ainsi, les modalités de sarclage et de broyage permettaient de maintenir un rendement similaire au TP, où seulement des herbicides étaient utilisés. Il est à rappeler que dans ces modalités, le sarclage et le broyage, sont couplées à l'utilisation d'herbicides et remplacent un passage d'herbicide, ce qui peut expliquer que le rendement n'était pas différent du tout chimique (TP). Cependant, l'utilisation de PDS tendait à réduire le rendement (en repousse et en plantation) par rapport au témoin propre. Dans la bibliographie, l'impact des PDS sur le rendement des cultures est très variable. Dans la méta-analyse de Viaud et al. 2022 sur l'utilisation de PDS en canne à sucre dans le monde, les variations de rendement peuvent aller de -47% à +65%. Concernant le cycle de la culture, le rendement en repousse était plus élevé qu'en plantation (toutes pratiques confondues). Ces résultats sont semblables à ceux trouvés par Marnotte et al. 2008. Cela peut s'expliquer tout d'abord par un taux de recouvrement significativement plus faible en repousse qu'en plantation. De plus, la canne en repousse a un développement plus rapide, particulièrement de sa biomasse foliaire, ce qui permet de concurrencer rapidement les adventices (Xu et al. 2021). D'autre part, son système racinaire est déjà formé, ce qui lui permet d'obtenir les ressources nécessaires à son développement plus rapidement que de la canne en plantation, qui doit commencer par créer des racines (Pissolato et al. 2021). Enfin, la canne en repousse bénéficie du paillage de feuilles mortes laissées à la surface du sol lors de la récolte de la canne précédente, ce qui permet une meilleure gestion de certaines espèces d'adventices (Hoshino et al. 2017).

La quantité d'herbicides utilisée, représentée par l'IFTh, était assez variable selon les essais et les pratiques. La différence entre essais peut s'expliquer par le fait que l'analyse montre que le taux de recouvrement des adventices en général était dépendant des essais. De plus, la composition de la communauté d'adventices pouvait varier entre les parcelles d'essais, liée à une différence de stock semencier et d'historique des pratiques sur la parcelle, ce qui pouvait sélectionner certaines espèces d'adventices (Fried, Norton et Reboud 2008). Or, les produits herbicides utilisés ont une efficacité différente en fonction des espèces d'adventices (Esther 2021). Ainsi, une flore diversifiée implique d'utiliser plusieurs produits herbicides et donc parfois d'augmenter le nombre de passages d'herbicides. Dans tous les essais, l'IFTh entre le broyage et le TP n'était pas significativement différent. Pourtant, la modalité broyage avait des taux de recouvrement d'adventices inférieurs au TP dans chaque essai. Or dans plusieurs études sur la vigne, le recouvrement des adventices dans l'inter-rang est plus important dans les parcelles gérées par broyage que par l'utilisation d'herbicides ou du labour (MacLaren, Bennett et Dehnen-Schmutz 2019). En effet, en coupant les parties aériennes des adventices et en laissant les racines, le broyage favorise les adventices à croissance rapide, qui peuvent repousser rapidement à partir de leur tige, racines ou organes végétatifs, comme les plantes vivaces et les petits ligneux (Lawrence, Shornick et Kornbluth 2019). La gestion de cette flore particulière implique peut-être donc un passage supplémentaire d'herbicide dans la modalité broyage. La PDS est la seule pratique dont l'IFTh était assez homogène quel que soit l'essai et inférieur au TP. Cela s'explique par le fait que les modalités PDS ne bénéficient

que d'un traitement d'herbicides de pré-levée, avant le semis des PDS et ne sont plus désherbées chimiquement ensuite pour ne pas détruire le couvert. On retrouve également ces résultats sur PDS dans l'étude de (Soulé et al. 2021). Dans seulement 2 essais, l'utilisation de la PDS permettait de réduire le taux de recouvrement. L'efficacité des PDS à limiter le recouvrement des adventices est très variable (Blanco-Canqui et al. 2015).

Dans certains essais, le sarclage a permis de réduire l'IFTh. Pourtant, la modalité sarclage présentait des taux de recouvrement des adventices toujours supérieurs au TP. Cette méthode reste peu efficace sur certaines espèces d'adventices, et notamment sur les espèces vivaces, dont les organes végétatifs se coupent au passage de l'outil, leur permettant de se multiplier (Chauvel et al. 2018). De même que pour le rendement, le cycle de la canne influence l'IFTh. Toutes pratiques confondues, l'IFTh en plantation était plus élevé qu'en repousse, pour les mêmes raisons que celles avancées pour la variation de rendement : un recouvrement significativement plus faible en repousse qu'en plantation, l'absence de paillage et une canne qui concurrence moins les adventices en plantation. Enfin, l'interaction entre le nombre d'interventions chimiques et l'essai conforte les résultats de l'analyse montrant que le taux de recouvrement des adventices était dépendant des essais. De plus, le nombre d'interventions chimiques était corrélé positivement au taux de recouvrement des adventices. Ainsi, une présence plus forte des adventices dans certains essais se traduisait par un nombre d'interventions de désherbage chimique plus élevé.

6 Conclusions et perspectives

Bien que l'enjeu du projet Territoire Durable reste l'arrêt total des herbicides dans le domaine agricole, cette étude apporte une première réponse aux agriculteurs s'inscrivant dans une démarche de réduction de l'usage des herbicides sur les variations de rendement et sur l'efficacité de maîtrise des adventices de ces pratiques alternatives.

Effectivement, tandis que l'utilisation de plantes de services comme pratique alternative, permette de significativement baisser l'IFTh, il n'est pas clair qu'elle permette de mieux maîtriser l'enherbement. De plus, elle ne permet pas d'obtenir des rendements aussi élevés qu'avec l'utilisation du désherbage chimique total, certainement du fait de la compétition pour les ressources qu'il peut y avoir avec la canne. Les pratiques alternatives du sarclage et du broyage permettaient quant à elles de maintenir un rendement similaire par rapport au désherbage chimique total. Cependant, leur efficacité en termes de réduction de l'enherbement et d'utilisation d'herbicides n'est pas si évidente. Tandis que la pratique du broyage donne un recouvrement global plus faible par rapport au désherbage chimique total, elle ne permet pas de réduire l'IFTh. En effet, cette pratique à tendance à favoriser la repousse rapide de certaines espèces d'adventices comme les vivaces ou les petits ligneux. Cette pratique étant couplée à des passages chimiques, il est alors nécessaire d'appliquer des herbicides spécifiques pour ces adventices. Pour la pratique du sarclage, elle semble peu efficace sur les espèces d'adventices vivaces et donne ainsi un recouvrement global systéma-

tiquement supérieur par rapport au désherbage chimique total, mais elle permet un IFTh plus faible. Cette différence d'efficacité des pratiques alternatives en fonction des différentes espèces d'adventices est observée à dire d'expert (Chauvel et al. 2018). Ainsi, une des perspectives de l'étude pourrait être d'analyser l'efficacité de ces différentes pratiques alternatives sur les espèces les plus abondantes et/ou nuisibles.

Ce travail nous a permis d'avoir une vision plus globale sur l'efficacité des pratiques alternatives au désherbage chimique total sur la culture de la canne à sucre à la Réunion. Cela a été permis grâce à la réutilisation de données d'expérimentations déjà disponibles, et qui n'ont pas été planifiées pour être analysées conjointement. Cela ouvre la voie vers la valorisation des nombreuses données d'expérimentation récoltées au sein du CIRAD et de ses partenaires depuis des années. Cette démarche montre la volonté du CIRAD d'aller vers la science ouverte et de s'inscrire dans une démarche FAIR (Wilkinson et al. 2016). Ainsi, une des perspectives principales de ce travail serait de continuer à rassembler un plus grand nombre de données d'expérimentations déjà réalisés pour répondre à de nouvelles questions agronomiques à moindre coût tout en ayant un grand nombre d'observations, dans différentes conditions. Cependant, nous avons été confrontés à la difficulté d'uniformiser les jeux de données pour une analyse conjointe. Ce travail laborieux pourrait être facilité à l'avenir avec la mise en place d'un protocole de collecte de données pour les futurs essais eRcane/CIRAD. Une autre solution, plus générique, serait de développer un programme permettant d'uniformiser les jeux de données automatiquement et de les sauvegarder dans une base de données. Un premier travail expérimental a été mené en ce sens par Ngaba et al. 2022 qui propose une méthode de fouille de texte pour aider à la standardisation des noms de variables. Cette dernière approche est particulièrement intéressante puisqu'elle permettrait de valoriser un grand nombre de données d'essais passés et à venir, et ce sans rajouter de contrainte supplémentaire pour les personnes réalisant la collecte.
Notons également que les jeux de données comportaient un certain nombre de données manquantes. Nous avons alors éliminé les observations concernées. Ainsi, dans la perspective de développer un programme d'uniformisation des données, il serait intéressant d'y intégrer une étape d'imputation des données (Grund, Lüdtke et Robitzsch 2016,Bentler et Yuan 1999 et Ginkel et Kroonenberg 2014).
Une autre difficulté majeure que nous avons rencontrée concerne les limites en termes de structuration des données qu'offrent les packages "nlme" et "lmer", largement répandus pour ajuster des modèles mixtes. Ce problème sera d'autant plus crucial en travaillant avec un plus grand nombre d'essais. En effet, dans notre cas, nous avons une variance résiduelle hétérogène en fonction des essais, des données répétées dans le temps et des effets aléatoires croisés (les effets bloc et parcelle sont croisés avec l'effet saison). Or, le package lmer ne permet que de supposer des résidus *iid* (bien qu'on puisse prendre en compte des poids permettant de modéliser une variance résiduelle hétérogène en fonction des essais après avoir estimé la variance résiduelle par essai) mais permet des effets aléatoires croisés tandis que le package nlme permet de modéliser une structure de corrélation sur les résidus mais ne permet que des effets aléatoires emboîtés. Nous sommes donc limités par ces deux packages. Une alternative serait d'utiliser le package "BRMS" (Bürkner 2017) sous R. Ce dernier permet d'ajuster un modèle linéaire en bayésien facilement sans avoir à construire

l'algorithme d'échantillonnage MCMC manuellement et offre une grande flexibilité dans la structuration des données. Il y a cependant un problème supplémentaire car l'effet aléatoire individuel de la parcelle permet de prendre en compte une corrélation constante entre les observations répétées d'une saison à une autre d'un même individu (la parcelle), mais pas de tester une structure de corrélation plus complexe. Une autre alternative serait alors d'utiliser la procédure "PROC MIXED" du logiciel "SAS" mais ce logiciel n'est pas libre.
Pour finir, nos trois variables d'intérêt présentent des relations complexes entre elles. En effet, le recouvrement est ici une réponse mais il pourrait être une variable explicative pour le rendement ou l'IFTh. Pour mieux les comprendre, une perspective intéressante serait de mettre en œuvre des modèles d'équations structurelles (Shipley 2016). Ces modèles permettent d'étudier des variables qui peuvent être à la fois expliquées ou explicatives dans un seul réseau d'équations causales que l'on peut représenter à l'aide d'un graphe orienté acyclique. Il est alors possible de tester la causalité d'une variable sur une autre. Cette approche pourrait être mise en œuvre avec R à l'aide du package "piecewiseSEM" qui permet de prendre en compte des effets aléatoires et des structures de corrélations autorégressives (Lefcheck 2016).

7 Accessibilité des données et des codes

Les jeux de données sources provenant des essais P12, P42, P25 ITK et P25 Montagne sont mis à disposition dans un sous-dataverse dédié aux pratiques alternatives de désherbage, intitulé "APEEDAIS", à l'adresse suivante : `https://dataverse.cirad.fr/dataverse/APEEDAIS`

Les données de l'analyse finale des quatre essais (Barbaza et al. 2022) sont également disponibles sur le dataverse du Cirad à l'adresse suivante : `https://doi.org/10.18167/DVN1/548YLT`

Les scripts R sont accessibles à l'adresse suivante : `https://github.com/ElyBarbaza/CIRAD_Internship`.

Références

Antoir, J et al. (2016). *Les bonnes pratiques de désherbage de la canne à sucre-Ile de la Réunion 2016*.

Barbaza, Elysé et al. (2022). *Analysis of alternative weed control techniques for sugarcane*. Version V1. doi : 10.18167/DVN1/548YLT. url : https://doi.org/10.18167/DVN1/548YLT.

Bentler, Peter M et Ke-Hai Yuan (1999). "Structural equation modeling with small samples : Test statistics". In : *Multivariate behavioral research* 34.2, p. 181-197.

Blanco-Canqui, Humberto et al. (2015). "Cover crops and ecosystem services : Insights from studies in temperate soils". In : *Agronomy journal* 107.6, p. 2449-2474.

Bürkner, Paul-Christian (2017). "brms : An R Package for Bayesian Multilevel Models Using Stan". In : *Journal of Statistical Software* 80.1, p. 1-28. doi : 10.18637/jss.v080.i01.

Cambronne, Nicolas (2019). "Présentation de la filière Canne-Sucre-Rhum-Energie à la Réunion". In.

Chabalier, Maxime et al. (2012). "Essais de désherbage d'une repousse de canne à sucre après une coupe manuelle à La Réunion". In.

Chauvel, Bruno et al. (2018). *Gestion durable de la flore adventice des cultures*. Editions Quae.

Corbeil, Robert R et Shayle R Searle (1976). "Restricted maximum likelihood (REML) estimation of variance components in the mixed model". In : *Technometrics* 18.1, p. 31-38.

Diggle, Peter et al. (2002). *Analysis of longitudinal data*. Oxford university press.

Dunn, Olive Jean (1961). "Multiple comparisons among means". In : *Journal of the American statistical association* 56.293, p. 52-64.

Esther, J-J (2021). "Projet TraproH : Traitements Raisonnés en Produits Herbicides – Poster des journées transfert désherbage du RITA canne". In.

Fried, Guillaume, Lisa R Norton et Xavier Reboud (2008). "Environmental and management factors determining weed species composition and diversity in France". In : *Agriculture, ecosystems & environment* 128.1-2, p. 68-76.

Ginkel, Joost R van et Pieter M Kroonenberg (2014). "Analysis of variance of multiply imputed data". In : *Multivariate behavioral research* 49.1, p. 78-91.

Grund, Simon, Oliver Lüdtke et Alexander Robitzsch (2016). "Pooling ANOVA results from multiply imputed datasets : A simulation study." In : *Methodology : European Journal of Research Methods for the Behavioral and Social Sciences* 12.3, p. 75.

Hartley, HO (1940). "Testing the homogeneity of a set of variances". In : *Biometrika* 31.3/4, p. 249-255.

Harville, David A (1977). "Maximum likelihood approaches to variance component estimation and to related problems". In : *Journal of the American statistical association* 72.358, p. 320-338.

Hoshino, Adriano Thibes et al. (2017). "Mulching with sugarcane straw reduces weed density in sugarcane field". In : *International Journal of Agriculture and Biology* 19.1.

Lawrence, Donald W, Laurie P Shornick et Jacki Kornbluth (2019). "Mice deficient in NKLAM have attenuated inflammatory cytokine production in a Sendai virus pneumonia model". In : *PloS one* 14.9, e0222802.

Lefcheck, Jonathan S (2016). "piecewiseSEM : Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics". In : *Methods in Ecology and Evolution* 7.5, p. 573-579.

Letourmy, Philippe (1999). "Expérimentation agronomique planifiée". In : *CIRAD, Montpelier, France* 50.

MacLaren, C, James Bennett et Katharina Dehnen-Schmutz (2019). "Management practices influence the competitive potential of weed communities and their value to biodiversity in South African vineyards". In : *Weed Research* 59.2, p. 93-106.

Mansuy, Alizé et al. (2019). "CanécoH : mise au point de leviers pour une Canne à sucre économe en Herbicide à La Réunion." In : *Innovations Agronomiques* 76, p. 103-119.

Marion, Daniel et Pascal Marnotte (1991). "Nuisibilité de l'enherbement sur une culture de canne à sucre". In : AFCAS.

Marnotte, Pascal (2008). "La gestion des enherbements en culture de canne à sucre : améliorer le désherbage dans le respect de l'environnement". In.

Marnotte, Pascal et al. (2008). "Nuisibilité de l'enherbement en culture de canne à sucre : rapport d'essais, campagnes sucrières 2005-2006 et 2006-2007". In.

Ngaba, Billy et al. (2022). *Couplage d'un modèle de culture avec une plate-forme de capitalisation de données issues d'agroécosystèmes à La Réunion.*

Pissolato, Maria Dolores et al. (2021). "Sugarcane regrowth is dependent on root system size : an approach using young plants grown in nutrient solution". In : *Bragantia* 80.

Razali, Nornadiah Mohd, Yap Bee Wah et al. (2011). "Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests". In : *Journal of statistical modeling and analytics* 2.1, p. 21-33.

Schwarz, Gideon (1978). "Estimating the dimension of a model". In : *The annals of statistics*, p. 461-464.

Shipley, Bill (2016). *Cause and correlation in biology : a user's guide to path analysis, structural equations and causal inference with R.* Cambridge University Press.

Soulé, M et al. (2021). "Weed control by cover crop in sugarcane intercropping system, in press". In.

Viaud, P et al. (2022). "Sugarcane yield response to legume intercropped : a meta-analysis. Field Crops Research, under review". In.

Wilkinson, Mark D et al. (2016). "The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship". In : *Scientific data* 3.1, p. 1-9.

Xu, Fu et al. (2021). "Sugarcane ratooning ability : research status, shortcomings, and prospects". In : *Biology* 10.10, p. 1052.

A Annexe

A.1 Divers

Cycles	P12	P25 ITK	P25 Montagne
P	NA	/	C. ensiformis, G. abyssinica et C. spectabilis
R1	V. unguiculata	V. unguiculata	C. ensiformis, G. abyssinica et V. unguiculata
R2	V. unguiculata	V. unguiculata, D. intortum et C. ensiformis	C. ensiformis, G. abyssinica et V. unguiculata
R3	/	C. ensiformis,B. juncea, et V. unguiculata	/
R4	/	V. unguiculata et C. spectabilis	/

Table 7 – Récapitulatif des espèces de plantes de services utilisées sur les différents essais par cycles

A.2 Tableaux et graphiques complétant les analyses des trois modèles

Rendement

pratique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
TP	120.6861	12.7844	6.30	89.7641	151.6082
Broyage	114.0800	13.0823	6.86	83.0211	145.1389
PDS	101.6924	12.7823	6.30	70.7756	132.6093
Sarclage	120.0065	12.7500	6.25	89.1111	150.9020

Results are averaged over the levels of : essai, cycle
Degrees-of-freedom method : kenward-roger
Confidence level used : 0.95

Table 8 – Moyennes du modèle de rendement ajustées par la méthode de Tukey.

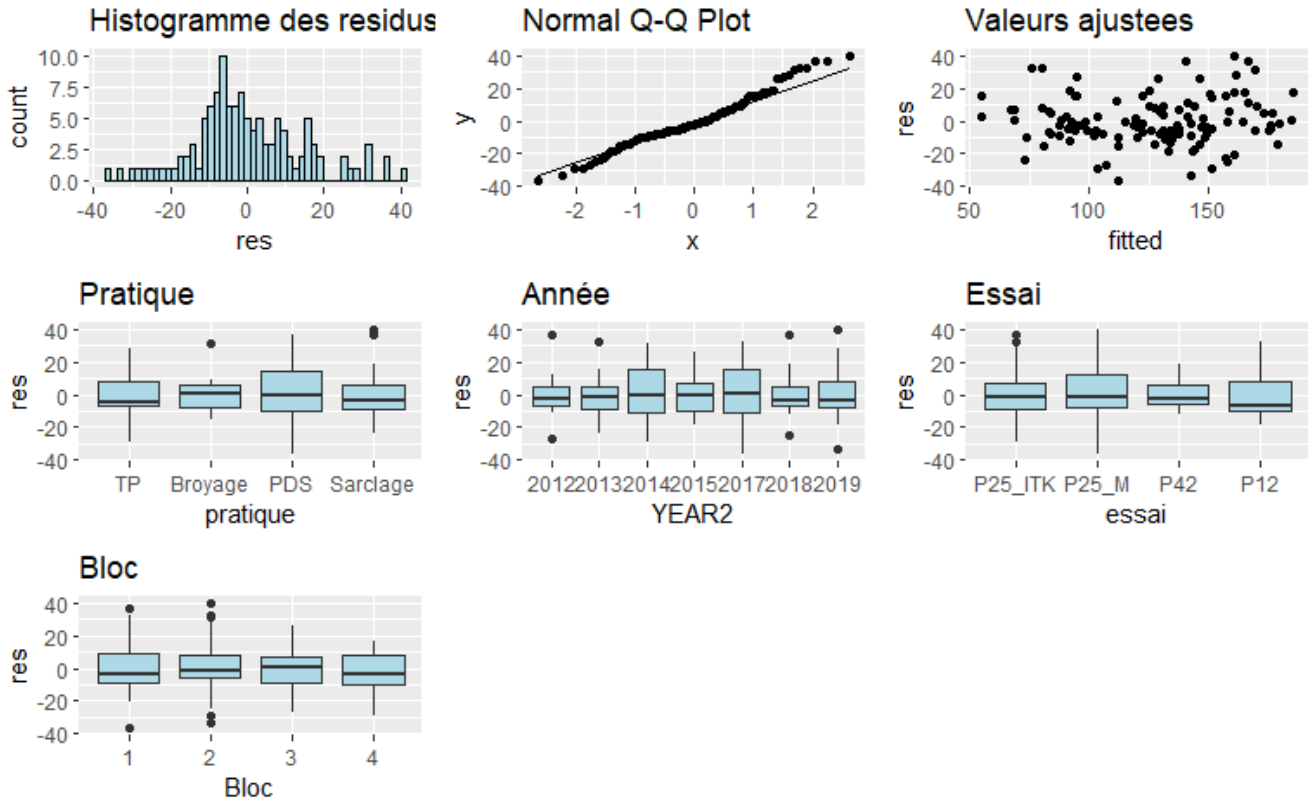
contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
TP - Broyage	6.6062	4.8038	102.22	1.375	0.5177
TP - PDS	18.9937	4.1095	100.21	4.622	0.0001
TP - Sarclage	0.6796	4.3841	101.79	0.155	0.9987
Broyage - PDS	12.3876	4.7810	100.54	2.591	0.0528
Broyage - Sarclage	-5.9266	5.0395	101.23	-1.176	0.6433
PDS - Sarclage	-18.3141	4.2364	100.03	-4.323	0.0002

Results are averaged over the levels of : essai, cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

P value adjustment : tukey method for comparing a family of 4 estimates

TABLE 9 – Contrastes du modèle de rendement ajustés par la méthode de Tukey.



Tests de normalité :

One-sample Kolmogorov-Smirnov test :
D = 0.081119, p-value = 0.4139
alternative hypothesis : two-sided

Shapiro-Wilk normality test :

W = 0.9769, p-value = 0.03809

Test d'homogénéité des variances :

Bartlett test of homogeneity of variances :
Bartlett's K-squared = 10.107, df = 3, p-value = 0.01768

Herbicide

Factors	VarCov	SdCorr
Year	0.3095467	0.5563692
Residual	0.0402822	0.2007043

Table 10 – Estimations des variances des effets aléatoires du modèle de l'IFT.

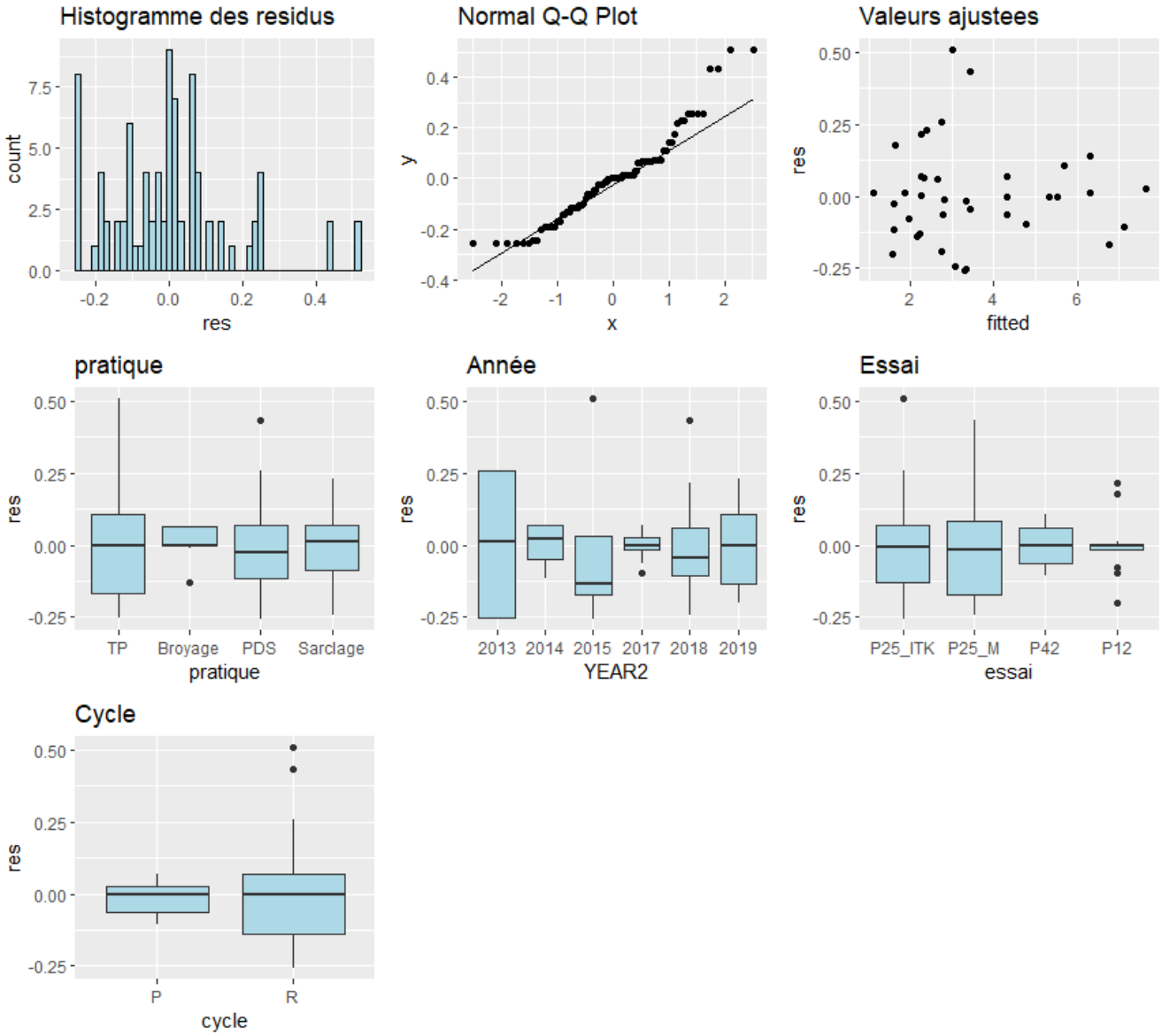


FIGURE 17 – Graphiques diagnostiquant le modèle d'analyse de l'IFTh

Tests de normalité :

One-sample Kolmogorov-Smirnov test :
D = 0.14988, p-value = 0.04391
alternative hypothesis : two-sided

Shapiro-Wilk normality test :
W = 0.93293, p-value = 0.0002637

Test d'homogénéité des variances : Bartlett test of homogeneity of variances :
Bartlett's K-squared = 16.971, df = 3, p-value = 0.0007163

Ici nous avons les tables décrivant les analyses post hoc pour l'herbicide. Notamment les moyennes et contrastes ajustées par Tukey pour chaque interaction significatif sur le modèle final.

En premier lieu voici le résultat de la fonction summary de ce modèle :

	Estimate	Std. Error	df	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	2.20	0.67	11.78	3.27	0.01
pratiqueBroyage	0.19	0.65	58.15	0.28	0.78
pratiquePDS	-1.06	0.31	59.91	-3.40	0.00
pratiqueSarclage	1.73	0.34	58.47	5.14	0.00
essaiP25_M	6.28	0.69	6.75	9.05	0.00
essaiP42	4.92	0.80	8.21	6.15	0.00
essaiP12	-0.44	0.87	18.72	-0.50	0.62
cycleR	-0.83	0.43	15.23	-1.91	0.08
pratiquePDS :essaiP25_M	-2.95	0.25	56.26	-11.59	0.00
pratiqueSarclage :essaiP25_M	-3.07	0.32	58.86	-9.68	0.00
pratiqueBroyage :essaiP42	-0.61	0.49	62.38	-1.25	0.22
pratiqueSarclage :essaiP42	-6.22	0.54	62.17	-11.42	0.00
pratiqueBroyage :essaiP12	-0.37	0.49	57.74	-0.75	0.46
pratiquePDS :essaiP12	-0.10	0.43	56.44	-0.24	0.81
pratiqueSarclage :essaiP12	-0.46	0.46	57.30	-1.00	0.32
pratiqueBroyage :cycleR	-0.97	0.58	57.88	-1.67	0.10
pratiquePDS :cycleR	0.46	0.20	62.86	2.33	0.02
pratiqueSarclage :cycleR	-2.58	0.15	55.65	-17.71	0.00
essaiP25_ITK :nb_chimique	0.89	0.19	60.12	4.79	0.00
essaiP25_M :nb_chimique	-0.22	0.07	62.88	-3.16	0.00
essaiP42 :nb_chimique	0.02	0.06	62.99	0.30	0.77
essaiP12 :nb_chimique	1.01	0.23	55.64	4.45	0.00

Table 11 – Estimations des niveaux des facteurs de l'analyse de l'herbicide

Les interprétations sont à faire avec prudence, en effet il y a des interactions.

pratique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
cycle = P					
TP	6.0713	0.3951	8.39	5.1675	6.9752
Broyage					
PDS					
Sarclage	5.3684	0.3684	8.49	4.5274	6.2093
cycle = R					
TP	5.2452	0.3204	5.30	4.4355	6.0549
Broyage					
PDS					
Sarclage	1.9636	0.3646	6.68	1.0929	2.8343

Results are averaged over the levels of : essai
Degrees-of-freedom method : kenward-roger
Confidence level used : 0.95

TABLE 12 – Moyennes ajustées par Tukey de l'analyse de l'herbicide pour l'interaction entre la pratique et le cycle

Recouvrement

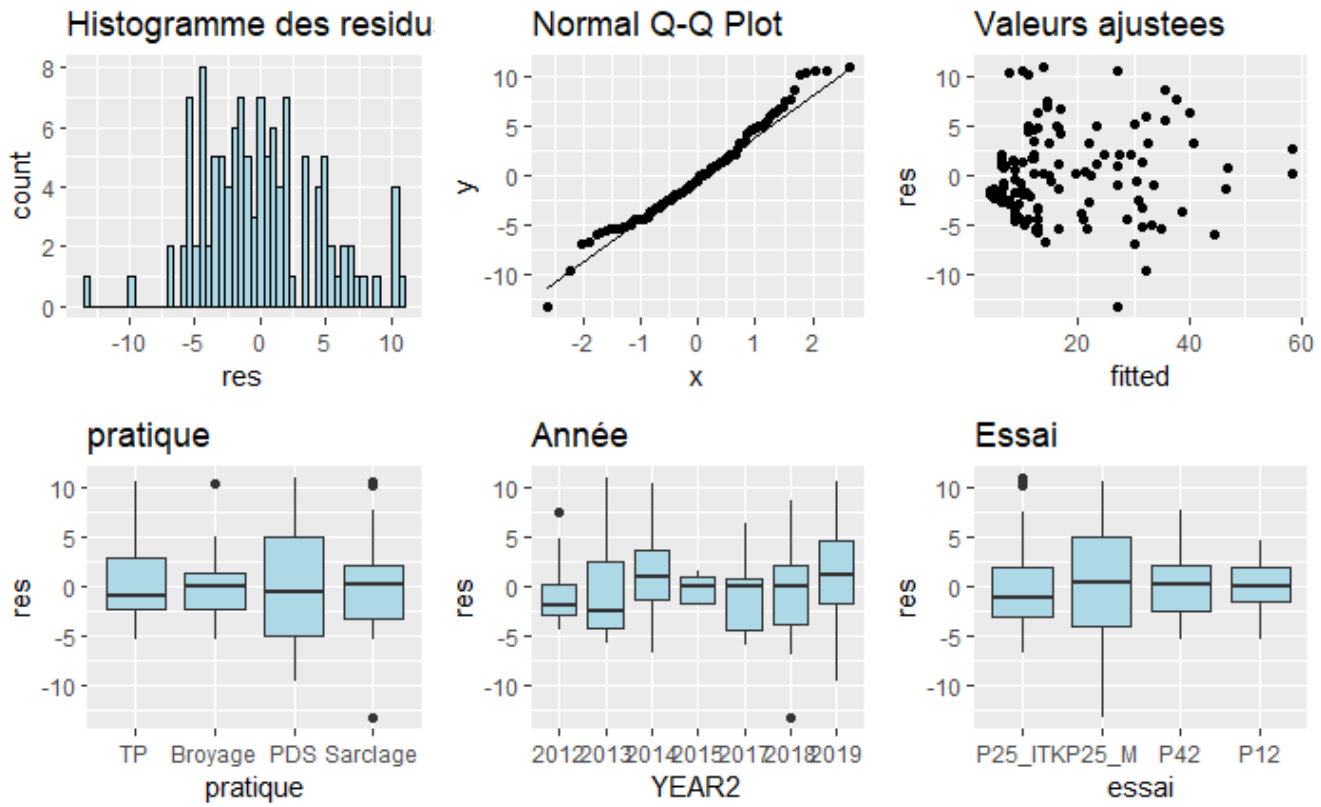


FIGURE 18 – Graphiques diagnostiquant le modèle d'analyse du recouvrement

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
cycle = P					
TP - Broyage					NA
TP - PDS					NA
TP - Sarclage	0.7030	0.1642	19.85	4.281	0.0019
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage					NA
PDS - Sarclage					NA
cycle = R					
TP - Broyage					NA
TP - PDS					NA
TP - Sarclage	3.2816	0.1500	14.94	21.880	<.0001
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage					NA
PDS - Sarclage					NA

Results are averaged over the levels of : essai
Degrees-of-freedom method : kenward-roger
P value adjustment : tukey method for comparing a family of 4 estimates

Table 13 – Contrastes ajustées par Tukey de l'analyse de l'herbicide pour l'interaction entre la pratique et le cycle

Test de normalité :

One-sample Kolmogorov-Smirnov test
alternative hypothesis : two-sided

Shapiro-Wilk normality test
W = 0.97819, p-value = 0.05008

Test d'homogénéité des variances :

Bartlett test of homogeneity of variances
Bartlett's K-squared = 8.0322, df = 3, p-value = 0.04535

pratique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
essai = P25$_{ITK}$					
TP	4.2514	0.4443	7.75	3.2210	5.2818
Broyage	3.9552	0.5058	10.19	2.8310	5.0793
PDS	3.4195	0.4486	7.50	2.3728	4.4662
Sarclage	4.6970	0.4395	7.60	3.6741	5.7200
essai = P25$_{M}$					
TP	7.4599	0.3571	5.07	6.5455	8.3742
Broyage					
PDS	3.6794	0.3306	3.54	2.7125	4.6464
Sarclage	4.8372	0.3522	4.75	3.9177	5.7567
essai = P42					
TP	6.7612	0.4130	6.65	5.7744	7.7481
Broyage	5.8506	0.4551	11.45	4.8536	6.8476
PDS					
Sarclage	0.9824	0.5812	9.27	-0.3266	2.2914
essai = P12					
TP	4.1606	0.3845	6.04	3.2212	5.1000
Broyage	3.4987	0.4024	7.28	2.5548	4.4427
PDS	3.2275	0.4245	9.06	2.2682	4.1868
Sarclage	4.1473	0.4260	9.23	3.1873	5.1072

Results are averaged over the levels of : cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

Confidence level used : 0.95

Table 14 – Moyennes ajustées par Tukey de l'analyse de l'herbicide pour l'interaction entre la pratique et l'essai

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
essai = P25$_{ITK}$					
TP - Broyage	0.2962	0.3610	11.78	0.820	0.8437
TP - PDS	0.8319	0.2162	10.84	3.848	0.0123
TP - Sarclage	-0.4457	0.2593	10.20	-1.719	0.3638
Broyage - PDS	0.5357	0.3176	11.88	1.686	0.3717
Broyage - Sarclage	-0.7419	0.3475	12.50	-2.135	0.1932
PDS - Sarclage	-1.2775	0.2380	11.43	-5.368	0.0011
essai = P25$_{M}$					
TP - Broyage					NA
TP - PDS	3.7804	0.1313	64.14	28.789	<.0001
TP - Sarclage	2.6227	0.0722	1285.13	36.321	<.0001
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage					NA
PDS - Sarclage	-1.1578	0.1176	73.69	-9.848	<.0001
essai = P42					
TP - Broyage	0.9106	0.4193	12.21	2.172	0.1863
TP - PDS					NA
TP - Sarclage	5.7788	0.3902	11.73	14.809	<.0001
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage	4.8682	0.5819	13.97	8.367	<.0001
PDS - Sarclage					NA
essai = P12					
TP - Broyage	0.6618	0.2966	14.14	2.231	0.1625
TP - PDS	0.9331	0.3017	14.64	3.093	0.0335
TP - Sarclage	0.0133	0.3058	14.99	0.044	1.0000
Broyage - PDS	0.2712	0.3461	14.21	0.784	0.8606
Broyage - Sarclage	-0.6485	0.3504	14.48	-1.851	0.2920
PDS - Sarclage	-0.9198	0.3034	14.11	-3.031	0.0397

Results are averaged over the levels of : cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

P value adjustment : tukey method for comparing a family of 4 estimates

TABLE 15 – Contrastes ajustées par Tukey de l'analyse de l'herbicide pour l'interaction entre la pratique et l'essai

nb_chimique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
essai = $P25_{ITK}$					
2.7765	4.0808	0.4234	5.94	3.0421	5.1194
essai = $P25_{M}$					
2.7765					
essai = P42					
2.7765					
essai = P12					
2.7765	3.7585	0.3604	4.53	2.8025	4.7145

Results are averaged over the levels of : pratique, cycle
Degrees-of-freedom method : kenward-roger
Confidence level used : 0.95

Table 16 – Moyennes ajustées par Tukey de l'analyse de l'herbicide pour l'interaction entre le nombre d'interventions chimiques et l'essai

contrast	estimate	SE	df	z.ratio	p.value
essai = $P25_{ITK}$					
(nothing)					NA
essai = $P25_{M}$					
(nothing)					NA
essai = P42					
(nothing)					NA
essai = P12					
(nothing)					NA

Results are averaged over the levels of : pratique, cycle
Degrees-of-freedom method : kenward-roger

Table 17 – Contrastes ajustées par Tukey de l'analyse de l'herbicide pour l'interaction entre le nombre d'interventions chimiques et l'essai

Factors	VarCov	SdCorr
Parcelle	7.006127	2.646909
Residual	27.144156	5.210005

Table 18 – Estimations des variances des effets aléatoires du modèle analysant le recouvrement.

	Estimate	Std. Error	df	t value	Pr(>|t|)
(Intercept)	28.86	5.65	88.31	5.10	0.00
pratiqueBroyage	-14.03	9.10	80.11	-1.54	0.13
pratiquePDS	-7.59	4.73	92.31	-1.60	0.11
pratiqueSarclage	1.56	5.48	93.47	0.28	0.78
essaiP25_M	-10.13	6.76	96.97	-1.50	0.14
essaiP42	1.93	5.96	90.71	0.32	0.75
essaiP12	-8.28	10.65	85.89	-0.78	0.44
cycleR	-13.83	2.75	79.33	-5.02	0.00
pratiquePDS :essaiP25_M	14.00	4.83	48.97	2.90	0.01
pratiqueSarclage :essaiP25_M	10.31	5.28	38.08	1.95	0.06
pratiqueBroyage :essaiP42	8.34	5.07	56.21	1.65	0.11
pratiqueSarclage :essaiP42	-0.87	6.46	85.75	-0.13	0.89
pratiqueBroyage :essaiP12	0.12	7.22	62.80	0.02	0.99
pratiquePDS :essaiP12	3.01	6.99	61.61	0.43	0.67
pratiqueSarclage :essaiP12	10.00	7.05	57.73	1.42	0.16
pratiqueBroyage :cycleR	10.97	8.23	71.79	1.33	0.19
pratiquePDS :cycleR	9.09	2.95	75.35	3.09	0.00
pratiqueSarclage :cycleR	-1.63	3.83	70.91	-0.42	0.67
essaiP25_ITK :nb_chimique	-2.56	1.80	79.97	-1.42	0.16
essaiP25_M :nb_chimique	3.97	0.98	74.55	4.06	0.00
essaiP42 :nb_chimique	0.24	0.44	91.64	0.54	0.59
essaiP12 :nb_chimique	2.71	3.31	70.80	0.82	0.42

Table 19 – Estimations des niveaux des facteurs de l'analyse du recouvrement

pratique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
cycle = P					
TP	27.7371	2.6475	129.18	22.4990	32.9752
Broyage					
PDS					
Sarclage	34.1610	3.4357	143.12	27.3697	40.9522
cycle = R					
TP	13.9104	1.4646	37.56	10.9443	16.8765
Broyage					
PDS					
Sarclage	18.7071	2.1819	75.95	14.3615	23.0527

Results are averaged over the levels of : essai

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

Confidence level used : 0.95

Table 20 – Moyennes ajustées par Tukey de l'analyse du recouvrement pour l'interaction entre la pratique et le cycle

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
cycle = P					
TP - Broyage					NA
TP - PDS					NA
TP - Sarclage	-6.4239	3.2145	129.05	-1.998	0.1939
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage					NA
PDS - Sarclage					NA
cycle = R					
TP - Broyage					NA
TP - PDS					NA
TP - Sarclage	-4.7967	2.5405	59.17	-1.888	0.2442
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage					NA
PDS - Sarclage					NA

Results are averaged over the levels of : essai

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

P value adjustment : tukey method for comparing a family of 4 estimates

Table 21 – Contrastes ajustées par Tukey de l'analyse du recouvrement pour l'interaction entre pratique et cycle

pratique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
essai = P25$_{ITK}$					
TP	14.8788	2.9788	15.83	8.5586	21.1990
Broyage	6.3386	4.6348	32.93	-3.0916	15.7689
PDS	11.8400	2.8712	16.44	5.7666	17.9133
Sarclage	15.6255	3.5790	23.79	8.2353	23.0158
essai = P25$_{M}$					
TP	22.7590	3.2033	199.36	16.4423	29.0757
Broyage					
PDS	33.7173	1.8194	107.37	30.1108	37.3238
Sarclage	33.8206	3.1906	199.83	27.5290	40.1122
essai = P42					
TP	24.5264	2.4849	142.46	19.6144	29.4385
Broyage	24.3274	4.2890	50.90	15.7164	32.9384
PDS					
Sarclage	24.4080	3.2843	220.71	17.9354	30.8805
essai = P12					
TP	21.1306	3.1270	20.64	14.6208	27.6404
Broyage	12.7125	4.5248	22.93	3.3507	22.0743
PDS	21.1043	5.0275	34.96	10.8974	31.3112
Sarclage	31.8821	5.1572	38.36	21.4451	42.3191

Results are averaged over the levels of : cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

Confidence level used : 0.95

Table 22 – Moyennes ajustées par Tukey de l'analyse du recouvrement pour l'interaction entre pratique et essai

contrast	estimate	SE	df	t.ratio	p.value
essai = $P25_{ITK}$					
TP - Broyage	8.5402	5.4066	29.68	1.580	0.4051
TP - PDS	3.0389	3.7672	17.49	0.807	0.8504
TP - Sarclage	-0.7467	4.1320	15.02	-0.181	0.9978
Broyage - PDS	-5.5014	5.0721	31.12	-1.085	0.7013
Broyage - Sarclage	-9.2869	5.6839	34.45	-1.634	0.3738
PDS - Sarclage	-3.7856	3.9704	22.66	-0.953	0.7766
essai = $P25_M$					
TP - Broyage					NA
TP - PDS	-10.9583	3.2290	117.45	-3.394	0.0051
TP - Sarclage	-11.0615	3.3297	73.55	-3.322	0.0074
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage					NA
PDS - Sarclage	-0.1033	3.2248	117.45	-0.032	1.0000
essai = P42					
TP - Broyage	0.1991	4.9347	81.93	0.040	1.0000
TP - PDS					NA
TP - Sarclage	0.1185	4.0718	270.33	0.029	1.0000
Broyage - PDS					NA
Broyage - Sarclage	-0.0806	4.7136	53.86	-0.017	1.0000
PDS - Sarclage					NA
essai = P12					
TP - Broyage	8.4181	5.4990	22.14	1.531	0.4370
TP - PDS	0.0263	5.7812	27.30	0.005	1.0000
TP - Sarclage	-10.7514	5.8631	28.83	-1.834	0.2786
Broyage - PDS	-8.3918	6.7563	28.70	-1.242	0.6059
Broyage - Sarclage	-19.1695	6.8528	30.30	-2.797	0.0419
PDS - Sarclage	-10.7777	6.1950	19.84	-1.740	0.3304

Results are averaged over the levels of : cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

P value adjustment : tukey method for comparing a family of 4 estimates

TABLE 23 – Contrastes ajustées par Tukey de l'analyse du recouvrement pour l'interaction entre pratique et essai

nb_chimique	emmean	SE	df	lower.CL	upper.CL
essai = $P25_{ITK}$					
2.7563	12.1707	2.1115	22.03	7.7921	16.5494
essai = $P25_{M}$					
2.7563					
essai = P42					
2.7563					
essai = P12					
2.7563	21.7074	2.4934	42.91	16.6785	26.7362

Results are averaged over the levels of : pratique, cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

Confidence level used : 0.95

TABLE 24 – Moyennes ajustées par Tukey de l'analyse du recouvrement pour l'interaction entre le nombre d'interventions chimiques et l'essai

contrast	estimate	SE	df	z.ratio	p.value
essai = $P25_{ITK}$					
(nothing)					NA
essai = $P25_{M}$					
(nothing)					NA
essai = P42					
(nothing)					NA
essai = P12					
(nothing)					NA

Results are averaged over the levels of : pratique, cycle

Degrees-of-freedom method : kenward-roger

TABLE 25 – Contrastes ajustées par Tukey de l'analyse du recouvrement pour l'interaction entre le nombre d'interventions chimiques et l'essai

Résumé

La gestion de la flore adventice à la Réunion se fait majoritairement à l'aide d'herbicides du fait de leur efficacité et de leur faible coût.. Cependant ce modèle d'agriculture non durable est remis en cause. Ainsi, depuis quelques années, il résulte une volonté de la recherche agronomique d'étudier en profondeur ce domaine, pour proposer des modes de gestion alternatifs aux herbicides. Depuis de nombreuses années, le CIRAD et eRcane mettent en place des essais dans ce sens. Toutefois, aucune étude n'a encore été menée sur l'ensemble des données récoltées. Ainsi, l'objectif principal de ce travail est de réaliser ce regroupement qui s'apparente à une méta-analyse.
Pour effectuer cette analyse, il a fallu dans une première étape, extraire puis homogénéiser les données des différents essais. La deuxième partie du travail a été d'effectuer des analyses explicatives des données regroupées à l'aide de modèles linéaires mixtes afin de pouvoir analyser l'impact des méthodes alternatives sur le rendement, le taux de recouvrement des adventices et l'indicateur de Fréquence de Traitements phytosanitaires (IFTh).

Les résultats de ces analyses ont montré que l'essai, la pratique et le cycle ont une influence significative sur les trois variables étudiées ainsi que certaines interactions. Concernant le rendement, le sarclage et le broyage permettent de maintenir un rendement similaire au Témoin Propre (TP) contrairement à l'utilisation de Plante de Service (PDS). Le rendement de cette modalité est significativement inférieur au TP. On retrouve également le résultat connu du facteur cycle, avec un rendement toujours supérieur en repousse toutes pratiques confondues. Concernant l'IFTh et le recouvrement, de nombreuses interactions viennent compliquer l'interprétation. En effet les résultats sont assez variables selon les essais et les pratiques. Ces différences pour ces deux variables étudiées pourraient s'expliquer par la différence de communautés d'adventices observées dans les parcelles d'essais.

Abstract

Weed management in Réunion is mainly carried out using herbicides because of their effectiveness and low cost. However, this unsustainable agricultural model is being questioned. Thus, for several years now, agricultural research has been studying this field in depth, in order to propose alternative management methods to herbicides. For many years, CIRAD and eRcane have been setting up trials in this area. However, no study has yet been conducted on all the data collected. Thus, the main objective of this work is to carry out this pooling which is similar to a meta-analysis.
In order to carry out this analysis, it was first necessary to extract and then homogenise the data from the various trials. The second part of the work was to carry out explanatory analyses of the pooled data using linear mixed models. The main objective was to analyse the impact of alternative methods on yield, weed cover rate and the Treatment Frequency Indicator (IFTh).

The results of these analyses showed that the trial, the practice and the cycle have a significant influence on the three variables studied as well as some interactions. Regarding yield, weeding and crushing maintain a yield similar to the control (T)P, while Cover Crop (PDS) does not. The latter is significantly lower than TP. We also find an expected result considering the cycle effect where regrowth showed higher yields whatever the practices. Concerning IFTh and cover, numerous interactions complicate the interpretation, as the results are quite variable according to the trials and practices. These differences for these two variables studied could be explained by the difference in weed community observed in the plots.