



Guide d'utilisation

Protocole et outil de comparaison technico-économique pour l'évaluation des technologies de désherbage dans les cultures maraîchères

Date : 31 décembre 2025

Responsable scientifique : Élise Smedbol, Ph. D.

Ce guide d'utilisation a été produit à l'attention de :
Association des producteurs maraîchers du Québec



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresses** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Élise Smedbol, Ph. D.

Chercheuse en malherbologie

Responsable scientifique et auteure principale

T : 450 653-7368 p.320

elise.smedbol@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Élise Smedbol, Ph. D., IRDA

Paulina Cholango Martinez, M. Sc.

Mick Wu, Ph. D., IRDA

Sandra Flores-Mejia, Ph. D., CEROM

Marc-Antoine Larrivée, M. Sc., Ag., CECPA

David Ouellet, Ph. D., CECPA

Collaborateurs

Izmir Hernandez, APMQ

Catherine Lessard, APMQ

Annabelle Firlej, Ph. D., IRDA

Merci à notre partenaire financier

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par l'Association des producteurs maraîchers du Québec.

Merci aux membres du comité scientifique

Pour la relecture d'une première version de la revue de littérature et les discussions sur les dispositifs expérimentaux.

Ce rapport peut être cité comme suit :

Smedbol, É., Wu, M., Cholango Martinez, P., Flores-Mejia, S., Larrivée, M-A., et Ouellet, D. 2025. Guide d'utilisation : Protocole et outil de comparaison technico-économique pour l'évaluation des technologies de désherbage dans les cultures maraîchères. IRDA, CECPA et CÉROM. 69 pages. © Institut de recherche et de développement en agroenvironnement Inc. (IRDA).

Résumé

Ce guide présente un protocole générique et un outil de comparaison technico-économique, sous forme de chiffrier Excel, permettant d'évaluer et de comparer objectivement différentes technologies de désherbage dans les cultures maraîchères du Québec. Il répond aux besoins exprimés par les producteurs, qui font face à plusieurs défis : rareté et coût de la main-d'œuvre, disponibilité limitée des herbicides, résistance des mauvaises herbes, risques de phytotoxicité et manque de validation locale des nouvelles technologies.

Objectifs du guide :

1. Accompagner chercheurs et conseillers dans la mise en œuvre d'essais au champ pour évaluer des technologies de désherbage.
2. Faciliter l'utilisation d'un outil Excel permettant de compiler les données, puis de comparer les performances techniques et économiques des technologies testées.

Le protocole repose sur trois critères techniques principaux pour évaluer les technologies, l'efficacité du désherbage, les dommages à la culture principale et le rendement commercialisable. Ces critères sont complétés par une analyse économique détaillée : coûts de possession (achat, amortissement, entretien), coûts d'opération (main-d'œuvre, carburant, intrants) et coût total par hectare. L'outil Excel génère automatiquement des tableaux de bord visuels permettant de comparer les technologies selon leur efficacité, leurs impacts sur la culture, leur temps d'opération et leur rentabilité.

Le guide décrit plusieurs dispositifs expérimentaux adaptables (blocs aléatoires complets, dispositifs mère-fille, parcelles partagées) ainsi que les étapes d'implantation : installation des quadrats, définition des zones de récolte, prise de données au champ et compilation dans l'outil Excel.

Un exemple fictif (technologie de désherbage mécanique de précision dans la betterave) illustre l'ensemble du processus, de la planification à l'interprétation des résultats.

En somme, ce guide fournit une méthode standardisée, rigoureuse et adaptée au contexte québécois pour évaluer les technologies de désherbage et soutenir des décisions d'investissement éclairées.

Table des matières

1	Défis et besoins des producteurs maraîchers du Québec en lien avec l'adoption des nouvelles technologies de désherbage.....	6
2	Introduction au guide d'utilisation.....	6
3	Éléments à considérer et justification des choix retenus pour le protocole générique	7
	Résumé de la revue de littérature.....	7
	3.1.1 Critères évalués dans la littérature scientifique pour comparer des méthodes de désherbage	7
	3.1.2 Critères retenus pour l'élaboration du protocole générique de comparaison des méthodes de désherbage ..	9
	3.1.3 Critères importants pour définir la méthodologie de réalisation des essais au champ.....	12
4	Protocole générique.....	16
	Implantation des parcelles expérimentales	17
	4.1.1 Installation des quadrats pour l'évaluation de l'efficacité du désherbage et des dommages à la culture principale	17
	4.1.2 Détermination de la zone de récolte pour l'évaluation des rendements.....	18
	Remplir la grille de compilation des données	19
	4.1.3 Onglet Aide-mémoire.....	19
	4.1.4 Onglet Techniques	19
	4.1.5 Onglet Entreprise	20
	4.1.6 Onglet Parcelles.....	21
	4.1.7 Onglet Carnet_champs.....	22
	4.1.8 Onglet Cal. champs.....	23
	Utiliser et interpréter les tableaux de bord	23
	4.1.9 Onglet Tbl_passages.....	23
	4.1.10 Onglet Tbl_économique.....	24
5	Exemple de l'application du protocole générique : L'exemple fictif d'un désherbeur mécanique de précision dans la betterave	25
	Mise en contexte.....	25
	Implantation des parcelles expérimentales	25
	5.1.1 Choix des éléments à comparer entre les techniques de désherbage : choix des variables, de la culture et des sites.....	25
	5.1.2 Dispositif expérimental	26
	Remplissage de la grille de compilation des données et interprétations des tableaux de bord	27
	5.1.3 Tbl_passages.....	27
	5.1.4 Tbl_eco	31
6	Conclusion.....	36
	Annexe 1 — Critères économiques.....	38
	Indicateurs économiques.....	38
	Indicateurs de capital	38
	Indicateurs long terme	39
	Analyse de sensibilité.....	39
	Annexe 2 — Concepts derrière l'élaboration des dispositifs expérimentaux	40
	Annexe 3 — Éléments fondamentaux des dispositifs expérimentaux.....	42
	Annexe 4 — Choix des technologies de désherbage	44
	Annexe 5 Matériel pour l'implantation du dispositif expérimental et la prise de données au champ.....	48
7	Références citées dans le guide d'utilisation	49
8	Liste complète des références retenues pour la revue de littérature	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples de paramètres pouvant être considérés afin de déterminer certains éléments du dispositif expérimental, tels que le nombre de parcelles, la grandeur des parcelles, la quantité de parcelles à évaluer ou encore les coûts liés à l'implantation du dispositif et au temps de la prise de mesure.....	15
Tableau 2 : Données technico-économiques à compiler pour l'ensemble des technologies qui seront comparées. Le tableau permet la comparaison de trois techniques de désherbage	20
Tableau 3 : Données de rendement à compiler pour les deux sites d'essai. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires.....	21
Tableau 4 : Le tableau dans lequel les données sur les intrants doivent être compilées. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires.....	21
Tableau 5 : Informations à compiler en lien avec le dispositif expérimental choisi. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires.....	22
Tableau 6 : Grille de compilation des données pour l'ensemble des parcelles sur chacun des sites. Le rendement vendable est calculé automatiquement à partir des autres informations compilées dans l'onglet Parcelles.....	22
Tableau 7 : Grille de compilation des données pour les dommages à la culture principale et l'efficacité du désherbage. .	23
Tableau 8 : Récapitulatif des variables qui sont représentées dans les différentes figures de l'onglet Tbl_passages.....	24
Tableau 9 : Résumé des variables représentées dans les figures de l'onglet Tbl_eco	24
Tableau 10 Tableau comparatif pour les techniques de désherbage, un maximum de trois techniques comparées dans un même tableau.	32
Tableau 11 : Spécification des exigences relatives à l'achat d'une nouvelle technologie de désherbage (cahier de charge d'achat). Les équipements concernés pour l'achat d'un nouvel équipement de désherbage doivent souscrire aux exigences listées ci-dessous. Il est fortement encouragé que ces exigences soient révisées et modifiées selon les besoins spécifiques à chaque ferme.	45
Tableau 12 : Comparaison des différentes technologies de désherbage selon les exigences du cahier de charge d'achat. Il y a trois réponses possibles (Oui ; Non ; Ne S'applique pas). Les réponses s'appliquent à un cas fictif, pour l'achat d'un nouvel équipement de désherbage dans une ferme maraîchère du Québec.	46

Liste des figures

Figure 1 : Exemple de quadrat de différentes tailles dans plusieurs cultures. Un quadrat est un cadre d'une superficie connue permettant de déterminer la pression des mauvaises herbes, par exemple le nombre de mauvaises herbes par m ²	10
Figure 2 : Schéma d'un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets dans une culture permettant la comparaison de trois techniques de désherbage. Chaque technique est testée quatre fois à l'intérieur de parcelles disposées de manière aléatoire au champ, et regroupées par bloc.....	13
Figure 3 Exemple d'un dispositif expérimental sur un site mère, qui comprend l'évaluation de six techniques répétées quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans une seule culture.	14
Figure 4 : Exemple d'un dispositif expérimental sur un site-fille, qui comprend l'évaluation de trois techniques, qui sont aussi testées sur le site mère, répété quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans la même culture que le site mère.	14
Figure 5 : Exemple d'un dispositif expérimental en parcelle partagée sur un site mère qui comprend l'évaluation de six techniques répétées quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans deux variétés d'une seule culture.	15
Figure 6 : Exemple d'un dispositif expérimental en parcelle partagée sur un site mère, mais dont le site-fille comprend l'évaluation de trois techniques, qui sont aussi testées sur le site mère, répété quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans une seule variété de la même culture, qui sera aussi testé sur le site mère.....	16

Figure 7 : Quelques options pour l'installation des quadrats dans une parcelle : Si la production est en rangs (A et B) ou si la production est sur buttes (C).....	18
Figure 8 : Deux options pour la détermination de la zone de récolte, sur un rang linéaire intérieur ou sur deux rangs intérieurs.....	19
Figure 9 : Exemple de dispositif expérimental réalisé sur le site mère (Plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA).....	26
Figure 10 : Exemple de dispositif expérimental réalisé sur le site-fille (Ferme Maraîchers L&L)	27
Figure 11 : A) Distribution et B) Moyenne des % de dommages à la culture dans les parcelles de betterave désherbées avec deux techniques.....	28
Figure : 12 A) Distribution et B) Moyenne du % d'efficacité du désherbage dans les parcelles de betterave désherbées avec deux techniques.....	29
Figure 13 : A) Valeur par parcelle et par site et B) Moyenne par technique pour les rendements vendables (kg/ha) obtenus dans les parcelles de betterave désherbées avec deux techniques	30
Figure 14 : A) Moyenne par passage en minutes, par technique et site, B) Moyenne du temps total en minutes par technique et site et C) Moyenne du temps d'un passage, par technique et par site en heure par hectare.	31
Figure 15 : Coûts de possession à l'achat et coûts de possession annuels pour les deux techniques ou technologies de désherbage comparées.....	34
Figure 16 : Frais d'opération moyens (A) ou totaux (B) par parcelle et par type de frais : salaires, intrants ou traction.	35
Figure 17 : Frais d'opération totaux pour les deux techniques de désherbage comparées, soit les frais moyens par passage (A), les frais totaux pour tous les passages (C) ou le détail des frais totaux par parcelle (B).....	35
Figure 18 : Comparaison des revenus entre les deux techniques de désherbage comparées.	36

1 Défis et besoins des producteurs maraîchers du Québec en lien avec l'adoption des nouvelles technologies de désherbage

Les producteurs maraîchers du Québec font face à plusieurs défis liés à la gestion des mauvaises herbes. En lien avec la lutte chimique, il s'agit de la **disponibilité des herbicides**, la **résistance des mauvaises herbes** à certaines molécules et la **fenêtre réduite pour l'application** des herbicides. En lien avec le désherbage manuel, il s'agit de la **rareté de la main-d'œuvre** et son **coût élevé**.

Les difficultés d'approvisionnement pour certains herbicides clés sont dues à une part de marché trop petite pour une culture donnée, au monopole d'une seule compagnie pour la production d'un herbicide (Ex. : Betamix®, dans la betterave) ou à des révisions au niveau des homologations. L'utilisation répétée d'un seul mode d'action herbicide peut aussi conduire à une réduction de son efficacité par le développement des mauvaises herbes résistantes (Ex. : Linuron, dans la carotte). Le moment de l'application des herbicides est aussi un défi, car ils sont nombreux à avoir un potentiel de phytotoxicité lorsqu'appliqués directement sur la culture principale. Ils doivent donc être appliqués en prélevée ou en post-levée tardive, ce qui réduit aussi l'efficacité du contrôle des mauvaises herbes. En effet, la période critique pour la compétition avec les mauvaises herbes est généralement aux stades les plus hâtifs de la culture principale, soit au moment de son établissement jusqu'à quelques semaines après le semis. C'est pendant cette période que les mauvaises herbes sont les plus susceptibles d'affecter le rendement de la culture (OMAFRA. 2025). Or, c'est précisément pour cette période critique de compétition avec les mauvaises herbes qu'il existe peu d'herbicides, et encore moins d'alternatives aux herbicides.

Le désherbage manuel reste le moyen le plus efficace pour le désherbage des cultures horticoles sur le rang, mais il est très coûteux, car il nécessite beaucoup de main-d'œuvre. Ce sont ces raisons qui peuvent mener à un intérêt vers l'adoption des technologies de désherbage et plus spécifiquement vers des technologies qui offrent une alternative au désherbage chimique ou qui proposent de réduire la phytotoxicité par un désherbage ciblé sur les mauvaises herbes seulement. Bien que plusieurs solutions technologiques soient déjà disponibles, leur adoption demeure lente dans le domaine horticole. Les travaux de consultation du Réseau d'expertise en innovation horticole (REIH) révèlent que le principal frein à l'adoption de technologies est leur manque de validation (APMQ. 2024). En plus d'être souvent coûteuses, ces technologies sont rarement adaptées ou n'ont pas été préalablement testées dans les conditions de production du Québec, ce qui représente un gros risque pour les futurs utilisateurs.

Suivant cette consultation du REIH, les besoins des producteurs sont donc d'obtenir de l'information objective sur les performances des technologies de désherbage dans un contexte québécois et d'être en mesure de comparer les technologies disponibles pour réaliser une même tâche, de manière à effectuer le choix le plus judicieux pour leur entreprise. C'est pour répondre à ce besoin qu'un protocole d'évaluation des technologies de désherbage dans les cultures maraîchères a été développé, ainsi qu'un outil de comparaison technico-économique.

2 Introduction au guide d'utilisation

La rédaction de ce guide d'utilisation vise deux objectifs principaux :

Le premier objectif est d'accompagner des chercheurs et conseillers dans la mise en œuvre d'un protocole d'évaluation des technologies de désherbage dans les cultures maraîchères, pour des essais au champ. Ce protocole d'évaluation correspond à la marche à suivre pour implanter un dispositif expérimental au champ et faire la prise de données (chapitre 4). Le protocole se veut générique, c'est-à-dire pouvant être employé avec n'importe quelle technologie de désherbage, dans n'importe quelle culture maraîchère.

Le deuxième objectif est d'accompagner des chercheurs et conseillers dans l'utilisation de l'outil de comparaison technico-économique. Cet outil est un chiffrier Excel complémentaire au protocole d'évaluation et comprend des grilles de compilation des données, ainsi que des tableaux de bord. Ces tableaux de bord sont des visualisations de l'efficacité du désherbage et des coûts associés aux technologies de désherbage évaluées. Les critères techniques et économiques choisis sont décrits au chapitre 3 de ce guide d'utilisation. Afin de mieux illustrer l'utilisation du protocole et de l'outil de comparaison technico-économique, un cas de figure fictif est aussi présenté. Il s'agit de l'évaluation d'une technologie de désherbage mécanique de précision, pour le désherbage sur le rang dans la culture de la betterave (chapitre 5).

Finalement, puisque le protocole d'évaluation des technologies de désherbage est un protocole générique, plusieurs choix doivent être effectués avant de pouvoir le mettre en œuvre. Tout d'abord, le choix des technologies à évaluer doit être fait en amont, par le centre de recherche, en collaboration avec des agronomes et des producteurs (voir Annexe 4). Le choix de la culture principale dans laquelle les essais seront réalisés doit aussi être effectué en amont par les mêmes intervenants. Il est aussi possible d'ajouter une variable supplémentaire optionnelle, ce qui doit aussi être choisi en amont.

3 Éléments à considérer et justification des choix retenus pour le protocole générique

Résumé de la revue de littérature

Une revue de la littérature scientifique a été réalisée pour décrire différents éléments méthodologiques à considérer pour l'élaboration d'un protocole visant à comparer des technologies de désherbage. Ceci, afin de faire des choix en lien avec le dispositif expérimental le plus approprié, ainsi que les critères techniques et économiques à évaluer. Un résumé des différents éléments méthodologiques est rapporté dans cette section, ainsi que la justification des choix retenus pour le protocole générique. Des détails pourront être retrouvés en annexe de ce guide, de même que la liste complète des références pour consultation. Bien qu'il s'agisse principalement d'une démarche scientifique, des consultations avec l'Association des producteurs maraîchers du Québec (APMQ), le REIH et des producteurs maraîchers ont eu lieu afin de bien cibler les critères d'intérêt pour les producteurs.

La recherche bibliographique a été effectuée à l'aide de trois moteurs de recherche : *Google Scholar*, *PubMed* et le journal *Weed Technology*, avec plusieurs mots clés et périodes de recherche. Tout d'abord, les mots clés suivants ont été employés pour définir les nouvelles technologies de désherbage, ainsi que les critères techniques : « *weeding technologies* », « *precision weeding* », « *weeding methodology* », « *weeding efficiency* », « *weed management* ». Les mots clés suivants ont quant à eux été employés pour déterminer les critères économiques : « *weed losses* », « *weeding cost benefits* », « *weeding economic comparison* », « *weeding economics* », « *weeding machinery economics* ». Finalement, les mots clés suivants ont été employés pour la littérature sur les plans d'expérimentation : « *design and analysis of experiments* », « *design of experiment* », « *experimental design* », « *experimental plan* », « dispositif expéri* », « plan expéri* » AND statisti* OR agric* OR crop OR hortic* OR weed* OR « mauvaises herbes » OR désherb*.

Le type de publication a été filtré pour conserver les livres, les articles scientifiques, les guides techniques, les revues de littérature et les rapports techniques. Ces documents ont été triés par titre ou par résumé en fonction de leur pertinence, de l'objet de la recherche et des applications sur le terrain. Un critère basé sur l'année a été appliqué pour certains sujets. Les documents sur les technologies de désherbage ont été inclus s'ils avaient été publiés à partir de 2019, tandis qu'aucune restriction d'année n'a été appliquée pour les autres sujets. Les sujets intégrés tels que les cultures de couverture, la résistance aux herbicides, les études réalisées uniquement en laboratoire ou uniquement sur le développement des algorithmes, ainsi que les doublons, ont été exclus de l'analyse, pour un total de 319 documents retenus datant de 1980 à 2025, présentés dans la liste des références de ce guide.

3.1.1 Critères évalués dans la littérature scientifique pour comparer des méthodes de désherbage

La littérature scientifique a permis de faire ressortir de nombreux critères permettant de comparer des technologies de désherbage et pouvant se diviser en quatre sections : critères techniques, opérationnels, économiques et environnementaux, énumérés ci-dessous.

Les **critères techniques**, qui mesurent l'impact d'une technologie de désherbage sur les mauvaises herbes et sur la culture principale :

- Efficacité du désherbage : Mortalité des mauvaises herbes exprimée en pourcentage de réduction de la biomasse ou du nombre de mauvaises herbes après le désherbage. Elle peut être mesurée pour l'ensemble des mauvaises herbes dans un champ ou plus spécifiquement pour différents types de mauvaises herbes (annuelles, vivaces, graminées, feuilles larges, etc.) ou différents stades de croissance de la culture principale ou des mauvaises herbes, selon l'objectif de l'étude.

- **Domage à la culture principale** : Il s'agit d'une mesure de la sélectivité d'une méthode de désherbage, c'est-à-dire de la capacité de la technologie à éliminer les mauvaises herbes sans endommager la culture principale.
- **Durée de l'effet (Rémanence)** : Période pendant laquelle la zone traitée reste exempte de mauvaises herbes ou avec une suppression significative.
- **Rendement commercialisable de la culture** : Poids ou volume de la récolte par unité de surface après l'application du traitement. Ce poids ou volume inclut seulement la proportion de la récolte qui remplit les exigences de qualité commercialisable (grade). Il s'agit d'une mesure de la qualité de la récolte qui exprime l'impact d'une technique de désherbage sur les caractéristiques physiques et chimiques du produit récolté.

Les **critères opérationnels** évaluent la faisabilité, la facilité d'utilisation et les contraintes liées à la technologie. Ces critères peuvent être qualitatifs, en fonction des conditions propres à la main-d'œuvre, aux types de champs, aux conditions pédoclimatiques, etc. Il s'agit des critères suivants :

- **Vitesse d'application** : Surface traitée par unité de temps (ex. : hectares par heure) : crucial pour les grandes exploitations.
- **Exigence en énergie** : Consommation de carburant, d'électricité, ou autre énergie par hectare.
- **Maniabilité de l'équipement** : Facilité à opérer dans les champs, les rangs étroits, et lors des virages en bout de champ.
- **Compatibilité avec les équipements existants** : Nécessité d'acquérir de nouveaux tracteurs ou outils.
- **Résistance aux conditions climatiques et conditions du sol** : Capacité à opérer dans des conditions humides, sèches, venteuses, etc.
- **Sécurité de l'opérateur** : Risques physiques en lien avec l'exposition chimique (le cas échéant), le bruit et les vibrations.
- **Facilité d'entretien ou fiabilité** : Nombre et coût des réparations nécessaires, complexité de l'entretien.
- **Temps de préparation et de nettoyage** : Temps nécessaire pour calibrer l'équipement, remplir les réservoirs, et nettoyer après utilisation.
- **Compétences requises** : Niveau de formation ou d'expertise nécessaire pour opérer et entretenir la technologie.
- **Logistique** (p. ex., désherbage électrique) : Disponibilité de la ressource (ex. : eau pour vapeur, électricité, etc.) et capacité de l'équipement à la générer ou la stocker.

Les **critères économiques** déterminent la viabilité économique de la technologie pour l'exploitation. Ce sont les coûts d'investissement et de fonctionnement puis le calcul de la rentabilité. Ces critères sont étroitement liés au *business case* du producteur, mais aussi à la technologie elle-même. Il s'agit des critères suivants :

- **Coût d'acquisition** : Prix d'achat initial de la nouvelle machine ou du système.
- **Amortissement** : Répartition du coût d'acquisition sur la durée de vie utile de l'équipement.
- **Coût des intrants** : Coût des produits chimiques (herbicides), de l'eau, ou de l'énergie (électricité, propane, carburants) par hectare.
- **Coût de la main-d'œuvre** : Salaire de l'opérateur et du personnel d'entretien, calculé par hectare ou par heure.
- **Coût de l'entretien et des réparations** : Dépenses annuelles pour les pièces de rechange et les services.
- **Coût total par hectare (\$/ha)** : La somme de tous les coûts (investissement, main-d'œuvre, intrants, entretien) divisée par la surface traitée annuellement.
- **Seuil de rentabilité** : Surface minimale requise pour que l'investissement devienne rentable.
- **Délai de récupération** : Période nécessaire pour que les économies ou l'augmentation de rendement couvrent le coût initial de la technologie.

Enfin, les **critères environnementaux** qui déterminent le gain environnemental d'une nouvelle technologie. Ces critères sont :

- **Émissions de gaz à effet de serre (GES)** : Calculées à partir de la consommation de carburant ou d'électricité (Analyse du cycle de vie).
- **Potentiel de réduction de contaminants** : particulièrement pertinent pour les herbicides et la pollution des cours d'eau.
- **Impact sur la biodiversité** : Effet sur les insectes utiles (pollinisateurs) et la faune (ex. : effet de l'électricité sur les insectes du sol)

- Acceptabilité sociale : Perception par le public et les consommateurs (important pour l'image de marque de l'entreprise agricole)
- Compaction du sol : Mesure de la densité apparente ou de la résistance à la pénétration après le passage de l'équipement.
- Santé du sol et vie microbienne : Effet sur les organismes du sol (vers de terre, activité microbienne, etc.).

Le choix de critères à évaluer a été effectué pour développer un protocole rigoureux, réalisable et pragmatique par rapport aux priorités des producteurs et il est décrit dans la section suivante. Le choix de ces critères repose sur un équilibre entre la **performance agronomique** et la **viabilité financière** des entreprises.

3.1.2 Critères retenus pour l'élaboration du protocole générique de comparaison des méthodes de désherbage

Tel qu'énoncé ci-dessus, les producteurs maraîchers du Québec doivent composer avec la rareté et le coût élevé de la main-d'œuvre, la disponibilité limitée des herbicides, ainsi qu'un manque de validation locale des nouvelles technologies de désherbage, ce qui rend leurs décisions d'investissement particulièrement complexes. Les critères retenus dans le protocole ont été choisis précisément pour répondre à ces préoccupations et offrir une évaluation objective, adaptée aux réalités québécoises, afin de soutenir une adoption éclairée et sécuritaire des technologies émergentes.

Critères techniques retenus : L'efficacité du désherbage constitue l'indicateur prioritaire, puisqu'elle permet de vérifier objectivement, grâce à des mesures avant/après dans un quadrat, si une technologie peut réellement réduire la pression des mauvaises herbes et potentiellement remplacer ou compléter les herbicides. L'évaluation des dommages à la culture principale est tout aussi essentielle pour s'assurer que la technologie n'entraîne pas de pertes de rendement supplémentaires, comme peuvent le faire certains herbicides (phytotoxicité) ou équipements mécaniques. Enfin, le rendement commercialisable, qui intègre l'effet combiné du contrôle des mauvaises herbes, des dommages, des conditions de culture et météorologiques, permet de déterminer si la technologie améliore réellement la rentabilité de la production. Le rendement commercialisable est intégré dans l'outil de calcul économique.

Critères opérationnels retenus : Le temps d'opération et le nombre de passages sont les critères opérationnels retenus puisqu'ils influencent directement les coûts et la capacité d'adoption d'une technologie de désherbage. Ceux-ci sont directement liés au coût de main-d'œuvre, ce qui est un enjeu majeur. Les producteurs veulent réduire le temps passé au champ et optimiser l'utilisation de la main-d'œuvre. Tout comme pour le rendement commercialisable, le temps d'opération et le nombre de passage, sont des critères qui ont été intégrés dans l'outil de calcul économique.

Critères économiques retenus : Ils visent à fournir aux producteurs les informations objectives dont ils ont besoin pour évaluer la pertinence d'un investissement dans une nouvelle technologie de désherbage. En considérant à la fois les coûts de possession (achat, amortissement, entretien), les coûts d'opération (main-d'œuvre, carburant, intrants) et le coût total par hectare, par passage ou annuel, le protocole permet de comparer équitablement des technologies très différentes, qu'il s'agisse d'équipements coûteux ou de solutions plus simples. Cette approche répond directement à la volonté des producteurs de réduire leurs coûts tout en évitant des investissements risqués dans des technologies qui ne seraient pas adaptées aux conditions de production québécoises, en leur offrant une vision complète et réaliste du coût réel d'utilisation.

Les critères environnementaux n'ont pas été retenus puisque le protocole vise à être réalisable au champ, et aligné sur les préoccupations identifiées par les producteurs : efficacité, coûts, risques. La mesure des indicateurs environnementaux, tels que le dégagement de gaz à effet de serre ou la vie microbienne du sol, est coûteuse et ne répond pas aux défis identifiés par les producteurs maraîchers du Québec en lien avec l'adoption des nouvelles technologies, soit la rareté et le coût de la main-d'œuvre, la disponibilité limitée des herbicides et le manque de validation locale des nouvelles technologies. Les critères retenus sont détaillés dans les sections suivantes du document.

3.1.2.1 Efficacité du désherbage

L'efficacité du désherbage est le principal critère évalué lorsque des méthodes de désherbage sont comparées dans des essais expérimentaux en champ et c'est un critère identifié comme étant prioritaire par les producteurs maraîchers consultés. Ce critère se définit comme la capacité d'un équipement de désherbage à réduire le nombre de mauvaises herbes

(Weed control efficacy [WCE] ou efficacité du contrôle des mauvaises herbes [ECMH], en français). Cette efficacité est généralement évaluée en pourcentage selon l'équation ci-dessous (Allmendinger, Spaeth et al. 2024) :

$$ECMH = 100 \left(1 - \frac{\text{mauvaises herbes après le traitement}}{\text{mauvaises herbes avant le traitement}} \right)$$

L'évaluation des mauvaises herbes se fait avant et après le désherbage, à l'intérieur d'un même quadrat. Un quadrat est un cadre d'une superficie connue permettant de déterminer la pression des mauvaises herbes par m² (Figure 1).



Figure 1 : Exemple de quadrat de différentes tailles dans plusieurs cultures. Un quadrat est un cadre d'une superficie connue permettant de déterminer la pression des mauvaises herbes, par exemple le nombre de mauvaises herbes par m².

La meilleure méthode d'évaluation des mauvaises herbes consiste en **un comptage** du nombre de plants par m⁻² (densité des mauvaises herbes) (Farooq, Zaman et al. 2019); (Kouame, Butts et collab. 2023). La quantité totale de mauvaises herbes (abondance totale) peut être divisée par espèce ou par groupe fonctionnel (dicotylédones et monocotylédones par exemple), en fonction de l'objectif de l'étude (Genna, Gourlie et al. 2021); (Buzanini, Schumann et collab. 2023). Si l'objectif est de connaître l'efficacité du désherbage sur toutes les espèces de mauvaises herbes présentes, il est préférable de compter l'abondance totale.

La deuxième méthode consiste en une **évaluation visuelle** du contrôle des mauvaises herbes. Elle est souvent réalisée à l'aide d'une échelle allant de 0, s'il n'y a pas de contrôle visible des mauvaises herbes, à 100 s'il n'y a aucune mauvaise herbe présente (Smith, Soltani et collab. 2019); (Moore, Jennings et collab. 2023). Cette méthode est souvent employée pour une évaluation du recouvrement des mauvaises herbes, c'est-à-dire du % de sol couvert par les mauvaises herbes à l'intérieur d'un quadrat. Or, les évaluations visuelles peuvent produire des résultats biaisés, puisqu'il s'agit d'une mesure qualitative et qu'elle est sujette à une interprétation différente entre les évaluateurs. Par exemple, l'évaluateur 1 pourrait avoir tendance à surestimer la superficie de sol couverte par les mauvaises herbes de 10 % par rapport à l'évaluateur 2. Cela réduit la qualité de la prise de données en amenant une plus grande variabilité dans les observations, due à la différence entre les évaluateurs et non pas à la différence dans l'efficacité du désherbage, réduisant ainsi le potentiel d'analyse des résultats.

La troisième méthode d'évaluation des mauvaises herbes consiste en **un comptage et une récolte suivie de l'évaluation de la biomasse** plusieurs semaines après les traitements de désherbage des mauvaises herbes. Après la récolte, les mauvaises herbes sont séchées à ± 60 C jusqu'à l'obtention d'un poids constant et pesées pour obtenir la biomasse relative des mauvaises herbes par espèce (Smith, Soltani et collab. 2019); (Soltani, Willemse et collab. 2024). Cette mesure permet d'évaluer l'effet d'ensemble des opérations de désherbage sur une saison, plutôt que de mesurer l'efficacité du désherbage d'un équipement à un passage donné. Puisque l'outil de comparaison est conçu pour détailler l'efficacité du désherbage et les coûts par passage, cette mesure n'est pas retenue.

De nombreux facteurs ont un effet sur l'efficacité du désherbage, dont les conditions du sol (en motte, sec, humide, compacté, etc.), le stade de croissance des mauvaises herbes, le stade de croissance de la culture principale, l'ajustement des outils de désherbage mécanique, le type de buse pour la pulvérisation, la vitesse d'avancement, etc. Afin de s'assurer d'avoir les meilleurs résultats possibles, l'efficacité du désherbage doit être mesurée dans les meilleures conditions possibles : vitesse de passage optimale pour l'équipement, bon stade de croissance des mauvaises herbes, bon ajustement des outils, calibration des buses, etc. Il est conseillé de tester ces paramètres préalablement au déroulement de l'expérimentation, en parcelles de pratique au besoin, afin de s'assurer d'avoir les meilleures conditions d'utilisation de

l'équipement lors de la réalisation de l'essai au champ. Il est aussi possible de les ajouter comme variable supplémentaire, ce qui sera discuté plus loin dans le texte à la section sur les variables supplémentaires (3.1.3.3 — Ajout d'une variable supplémentaire — Parcelle partagée [*split plot*]).

3.1.2.2 Dommages à la culture principale

Les dommages à la culture principale sont le deuxième critère d'importance évalué lorsque des méthodes de désherbage sont comparées. La phytotoxicité, dans le cas d'une application d'herbicide, ou l'utilisation d'outils de désherbage mécanique trop agressifs, peuvent causer des pertes de rendement en réduisant la population de plants sur le rang. Il s'agit d'un critère important puisqu'un des défis de la production maraîchère est la phytotoxicité et que plusieurs technologies de désherbage se proposent de réduire la phytotoxicité par des applications ciblées d'herbicides sur les mauvaises herbes seulement.

Les dommages causés à la culture principale après le passage d'un équipement de désherbage sont généralement évalués sur le même principe que la densité de mauvaises herbes à l'intérieur d'un quadrat. Ce critère se définit comme l'impact d'un équipement de désherbage sur la réduction du nombre de plants de la culture principale (*Crop stand loss* [CL]). Cet impact est généralement évalué en pourcentage selon l'équation ci-dessous (Allmendinger, Spaeth et al. 2024):

$$CL = 100 \left(1 - \frac{\text{nombre de plantes de la culture après le traitement}}{\text{Nombre de plantes de la culture avant le traitement}} \right)$$

L'évaluation se fait par **un comptage** du nombre de plants cultivés par m² (densité de la culture). Cette densité ne peut être évaluée dans certaines cultures ou à certains stades de croissance où il est difficile de compter le nombre de plants (ex. : nombreuses tiges entremêlées à partir du sol comme dans le cas de la pomme de terre ou tallage dans le cas du blé). Dans ce cas, il faut choisir le bon moment pour faire l'évaluation au champ, c'est-à-dire à un stade hâtif de la culture. Si ce n'est pas possible, dans le cas où l'équipement est utilisé à un stade plus tardif de la culture principale, une **évaluation visuelle** des dommages aux cultures est généralement réalisée à l'aide d'une échelle allant de 0, s'il n'y a pas de dommage visible aux cultures, à 100, s'il y a une mortalité totale des cultures (Eberlein, Guttieri et al. 2017); (Smith, Soltani et collab. 2019); (Lyu, McKenzie-Gopsill et al. 2022). L'utilisation d'un outil pour évaluer le recouvrement des cultures, tel que Canopeo® ([Canopeo](#)), au lieu d'une estimation visuelle peut être utile pour éviter les biais des évaluateurs.

3.1.2.3 Les coûts et les revenus

Les différents éléments de coûts et de revenus sont les derniers critères retenus pour faire une analyse économique comparant les différentes méthodes de désherbage (voir Annexe 1 pour les détails). Les **coûts de possessions** incluent le coût à l'achat, le transport, les subventions à l'achat ainsi qu'un temps de formation initial. Ces coûts sont ensuite répartis sur la durée de vie de l'équipement afin d'obtenir un coût de possession annuel. Il s'ajoute ensuite à ces coûts annuels, des frais de possession récurrents, soit l'achat ou la location de logiciel, le temps de formation annuel, les frais d'intérêt à long terme, les frais d'entretien, les frais d'entreposage, les coûts administratifs, les amortissements ainsi que les subventions récurrentes. La somme de ces coûts de possession annuels est ensuite répartie sur la superficie d'utilisation prévue afin d'obtenir un coût de possession annuel par hectare.

Les **coûts d'opération** découlant des tests effectués sont calculés et présentés sur la base d'un passage et sur une base annuelle. La somme des coûts de possession et d'opération forme les coûts totaux. Afin de faciliter l'analyse, les temps d'opération sont présentés pour un passage, pour l'année et en capacité effective (h/ha).

Advenant que des prix soient fournis par l'utilisateur, il est possible d'estimer les **revenus potentiels** et donc d'obtenir des indicateurs de rentabilité. Dans un premier temps, le gain ou la perte de revenus est estimé en comparant les rendements observés lors du test aux rendements normaux déclarés par l'entreprise. Dans un second temps, le coût total est soustrait du gain ou de la perte de revenu, ce qui permet d'obtenir la marge résiduelle observée lors des tests. Il est attendu que cette marge soit négative puisque les technologies de désherbage affectent peu le rendement.

Puisque la comparaison est généralement effectuée entre différentes techniques de désherbage, une dernière section permet de calculer une marge par rapport à une technique désignée comme référence. Advenant que cette marge soit positive, le délai de récupération ainsi que le seuil de rentabilité sont calculés.

3.1.3 Critères importants pour définir la méthodologie de réalisation des essais au champ

La conception d'un dispositif expérimental repose sur quatre critères essentiels pour garantir la validité des résultats d'une expérimentation. Du détail sur ces concepts est fourni à l'Annexe 2.

- La **représentativité**, qui exige que les expérimentations couvrent une diversité de conditions (géographiques, climatiques, pédologiques, culturelles) afin d'éviter des extrapolations risquées;
- L'**absence de biais**, obtenue en contrôlant les variables confondantes et en évitant la colinéarité entre facteurs indépendants, afin que les résultats reflètent fidèlement les effets étudiés. Une variable confondante serait par exemple l'année de l'essai, le cultivar, le type de sol, le moment de l'application ou encore l'évaluateur. La colinéarité serait l'évaluation de deux technologies de désherbage, chacune testée sur un cultivar différent, ce qui ne permettrait pas de déterminer l'effet de la technologie;
- Enfin la **robustesse** et la **précision**, assurées par une taille d'échantillon suffisante et une puissance statistique adéquate, permettent de réduire l'incertitude et de produire des conclusions fiables et applicables en pratique.

Il existe de nombreux types de dispositifs expérimentaux permettant de produire des résultats représentatifs, non biaisés, robustes et précis. Ces dispositifs incluent des éléments qui constituent les bases de tout plan d'expérience. Il s'agit des unités expérimentales, de la réplication, de la randomisation et du groupement par bloc, qui sont résumés ci-dessous. Des détails sur ces éléments sont fournis à l'Annexe 3.

- **Les unités expérimentales**, par exemple une parcelle dans un champ dans laquelle on applique différentes méthodes de désherbage;
- La **réplication**, qui consiste à multiplier les observations dans un champ, plusieurs champs ou sur plusieurs années afin de mesurer la variabilité et de généraliser les résultats;
- La **randomisation**, qui attribue les traitements de manière aléatoire pour éviter les biais liés à des variables confondantes;
- Le **groupement par bloc**, qui regroupe les unités dans des zones homogènes afin de neutraliser l'effet de l'hétérogénéité du champ sur les traitements.

Généralement, les essais agronomiques doivent comporter au minimum des répétitions sur **deux années** et sur **deux sites** pour être considérés pour la publication dans des revues scientifiques. Les essais effectués sur un seul site ou sur une seule année sont considérés comme des études préliminaires, des projets pilotes ou des études de cas et ne permettent pas de produire des résultats représentatifs, non biaisés, robustes et précis.

Concrètement, plusieurs dispositifs expérimentaux peuvent s'appliquer à la comparaison des technologies de désherbage en champ. Trois options de dispositifs seront présentées dans les sections suivantes. L'outil de comparaison est conçu de manière à pouvoir considérer n'importe lequel de ces dispositifs. De plus, il est important de mentionner que l'outil de comparaison peut aussi inclure la comparaison d'une technologie de désherbage avec d'autres techniques de désherbage qui ne sont pas considérées comme des nouvelles technologies. Par exemple, un producteur pourrait vouloir comparer une technologie de désherbage avec sa pratique de désherbage habituelle ou voir si la technologie permet de réduire le temps de désherbage manuel. Le désherbage mécanique et la pratique habituelle de pulvérisation, par exemple, ne sont pas des nouvelles technologies de désherbage. Pour cette raison, le terme « technique de désherbage » sera donc employé dans la suite du texte, ainsi que dans l'outil de comparaison technico-économique (chiffrier Excel).

3.1.3.1 Dispositif en blocs aléatoires complets

Un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets dans une seule culture, répété sur deux sites, incluant le site d'un producteur, et sur deux années, est le dispositif le plus simple avec assez de robustesse pour faire la comparaison de techniques de désherbage. La figure 2 représente un schéma de ce type de dispositif pour la comparaison de trois

techniques de désherbage dans une culture. Le nombre minimal de techniques de désherbage à comparer est deux. Il n'y a pas de nombre maximal, celui-ci dépendra plutôt des contraintes liées au fait de tester plusieurs équipements (augmentation du nombre de parcelles et du temps pour la prise de données au champ, tailles différentes de l'équipement complexifiant le piquetage des parcelles, disponibilité des équipements à tester, etc.) et des besoins.

Ce type de dispositif respecte les conditions expérimentales permettant de produire des résultats représentatifs, non biaisés, robustes et précis. En effet, la réplication des essais dans au moins deux régions, sur deux types de sol et deux contextes de production différents assurent que les résultats obtenus suivant l'expérimentation s'appliquent bien aux techniques testées et non pas au type de sol ou à une autre variable confondante. Effectuer les essais sur deux années permet aussi de répéter l'expérimentation dans des conditions météorologiques différentes, l'année étant aussi une variable confondante.

Un autre élément important dans le fait que l'un des sites soit géré de manière commerciale est l'applicabilité des résultats de la recherche. Les résultats d'essais produits en centre de recherche seulement peuvent ne pas tenir compte de certains éléments qui sont importants en contexte de production commerciale. L'apport des producteurs à la recherche est inestimable et permet aux centres de recherche de réaliser des essais en appliquant une régie de culture équivalente à ce qui est fait en production (espacement entre les rangs, date et taux de semis, variétés, taux de fertilisation, irrigation, etc.). L'équipement employé dans les centres de recherche est aussi différent des équipements utilisés en contexte de production, puisqu'il est spécifiquement conçu pour de petites parcelles de recherche, en général d'une largeur de trois mètres.

Finalement, les essais à la ferme ont été identifiés comme l'activité favorisant le plus l'adoption de différentes pratiques et technologies innovantes par les producteurs maraîchers sondés dans le dernier rapport sur les priorités de recherche de l'APMQ (APMQ. 2025). Ce type d'essai permet aussi au producteur de comparer sa pratique de désherbage actuelle avec la nouvelle technologie de désherbage.

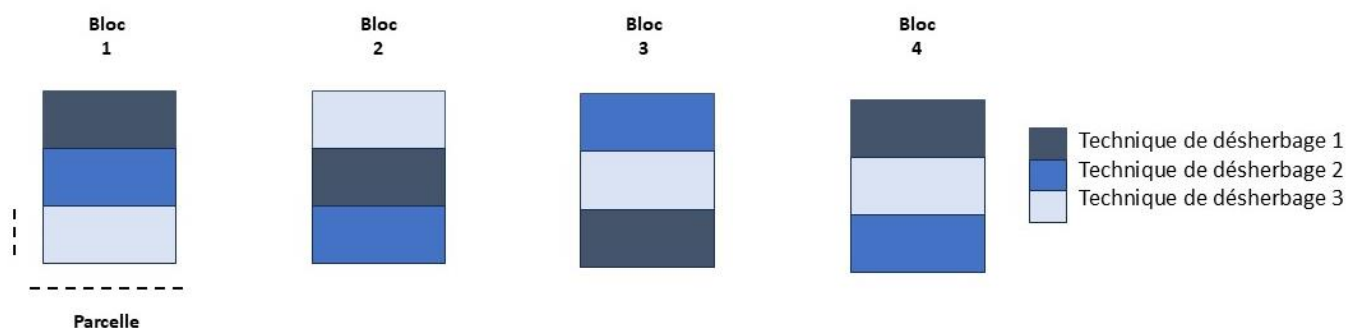


Figure 2 : Schéma d'un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets dans une culture permettant la comparaison de trois techniques de désherbage. Chaque technique est testée quatre fois à l'intérieur de parcelles disposées de manière aléatoire au champ, et regroupées par bloc.

3.1.3.2 Dispositif expérimental mère-fille

Ce dispositif permet d'évaluer un plus grand nombre de paramètres sur un seul site (site mère), tout en produisant des résultats représentatifs, non biaisés, robustes et précis pour un nombre limité de paramètres sur deux sites au minimum (site mère et site-fille). Sur le site mère, un dispositif expérimental plus complexe est mis en place, avec l'évaluation de plusieurs techniques de désherbage par exemple, tel qu'illustré dans la figure 3. À cause de cette complexité, le site mère est plus facilement implanté dans un centre de recherche ou dans une station expérimentale. En effet, l'implantation d'un dispositif expérimental complexe en contexte de production commerciale n'est pas l'idéal. En général, les équipements à la ferme sont optimisés pour une régie de culture spécifique et toute modification à l'équipement exige du temps et est risquée pour l'entreprise advenant que l'essai ne s'avère pas concluant. Il est préférable que le risque soit pris par le centre de recherche.

Les sites-filles sont des sites d'essais, généralement chez les producteurs, qui ont un dispositif plus simple comparé au site mère. Certains paramètres au choix, évalués dans les sites-filles, sont également testés dans le site mère. Comme l'exemple

de la figure 4, où trois des six techniques testées au centre de recherche seront aussi évaluées en contexte de production commerciale.

La taille des parcelles expérimentales dépend du nombre de techniques de désherbage comparées ou de l'ajout d'autres paramètres à évaluer. Chaque parcelle devra avoir une longueur minimale de 10 m et une largeur minimale de 3 m pour inclure au moins quatre rangs de la culture principale (Figure 3). Les différentes évaluations prises au champ, telles que le nombre de mauvaises herbes ou les rendements, doivent se faire sur les deux rangs intérieurs, les deux rangs extérieurs étant la bordure de la parcelle (voir figures 7 et 9). Une bande tampon de dix mètres entre les parcelles est suggérée, pour mettre à l'équipement de circuler entre les parcelles, mais pourra être ajustée en fonction de l'équipement de désherbage choisi et de la superficie disponible pour l'essai. Des parcelles plus larges ou plus longues pourraient aussi être implantées, au besoin (c.-à-d. une parcelle plus longue pour permettre à la machine d'arriver à une vitesse X avant d'y commencer l'évaluation). Un bloc aura autant des parcelles que des paramètres évalués, et celles-ci doivent être distribuées au hasard à l'intérieur d'un même bloc. Un minimum de quatre blocs (répétitions) est nécessaire pour chaque évaluation.

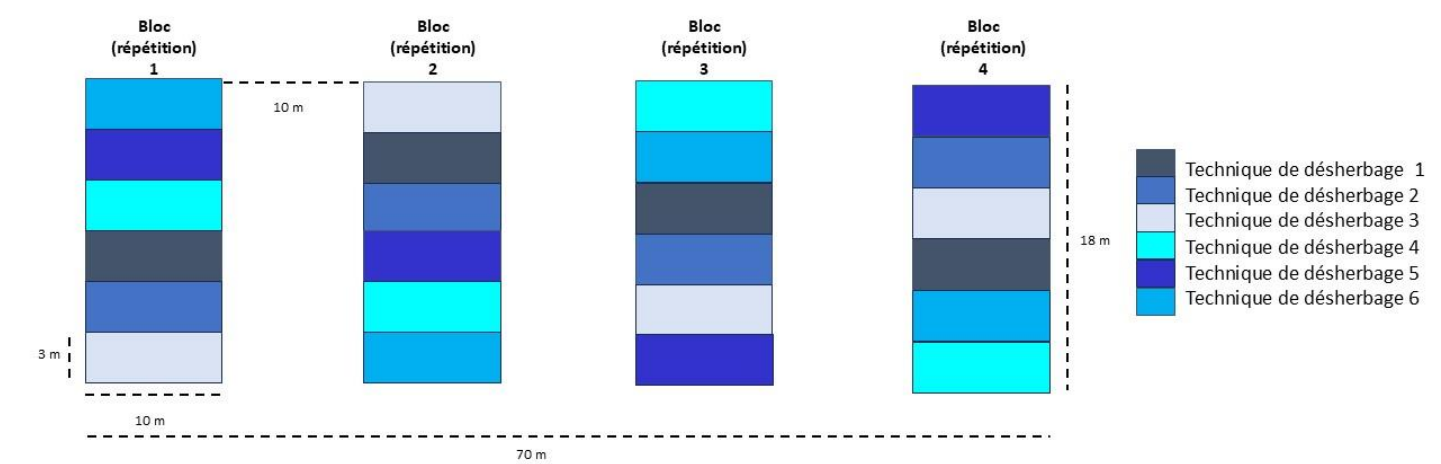


Figure 3 Exemple d'un dispositif expérimental sur un site mère, qui comprend l'évaluation de six techniques répétées quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans une seule culture.

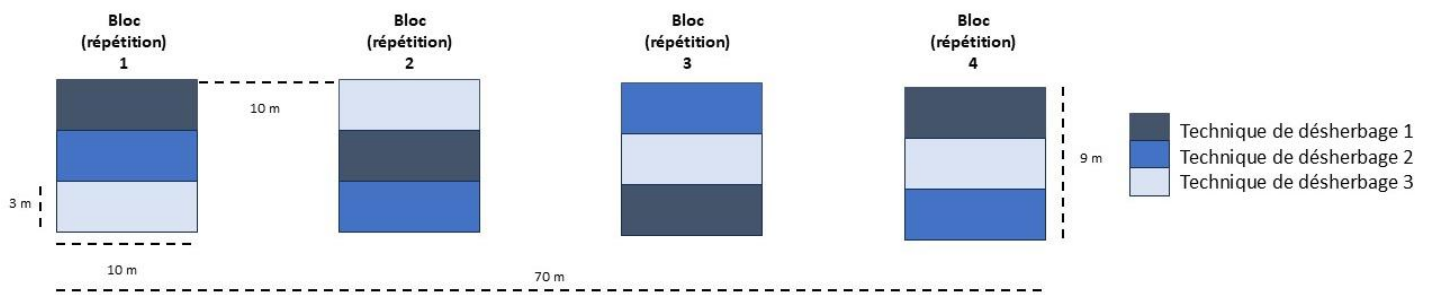


Figure 4 : Exemple d'un dispositif expérimental sur un site-fille, qui comprend l'évaluation de trois techniques, qui sont aussi testées sur le site mère, répété quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans la même culture que le site mère.

3.1.3.3 Ajout d'une variable supplémentaire — parcelle partagée (split plot)

L'outil de comparaison technico-économique permet aussi l'ajout de variables supplémentaires, de manière optionnelle. Plusieurs types de paramètres peuvent être évalués, soit en lien avec la régie de la culture (variables de production), et celles en lien avec l'utilisation de la nouvelle technologie, et qui servira notamment à optimiser l'utilisation de la machinerie (paramètres d'optimisation). Le tableau 1 montre des exemples pour ces paramètres.

S'ils sont ajoutés dans le dispositif expérimental, c'est qu'ils doivent répondre à une question de recherche spécifique et d'intérêt. Par exemple, il pourrait être intéressant de comparer deux technologies de désherbage, en faisant varier un paramètre de la régie de culture (variété, taux de semis, espacement des rangs) ou un paramètre d'optimisation de la

technologie (taille de la zone tampon autour de la mauvaise herbe lors de la pulvérisation de précision). Ces paramètres ont tous un potentiel effet sur les critères techniques retenus, soit l’efficacité du désherbage et les dommages aux plants, de même que sur le rendement des cultures.

Tableau 1 : Exemples de paramètres pouvant être considérés afin de déterminer certains éléments du dispositif expérimental, tels que le nombre de parcelles, la grandeur des parcelles, la quantité de parcelles à évaluer ou encore les coûts liés à l’implantation du dispositif et au temps de la prise de mesure.

Paramètres de production	Paramètres d’optimisation
Type de variété	Vitesse d’avancement
Nombre de plantes par hectare	Nombre de passages
Espacement entre les plantes	Moment de l’intervention par rapport à la culture
Espacement entre les rangs	Moment de l’intervention par rapport aux mauvaises herbes
Type de sol	Taille de la zone tampon autour de la culture dans un cas de pulvérisation de précision
(Autres)	(Autres)

Dans le site mère, il serait possible d’évaluer une combinaison de technologies de désherbage et de paramètres de production ou d’optimisation, afin d’identifier la combinaison de variables offrant le meilleur contrôle des mauvaises herbes. La figure 5 illustre un exemple de dispositif expérimental en parcelle partagée (*split plot*) pour des essais réalisés avec six techniques de désherbage dans deux variétés de la même culture. La figure 6 illustre un exemple de dispositif expérimental en parcelle partagé pour un site-fille, avec une seule variété et un nombre réduit de techniques de désherbage testé.

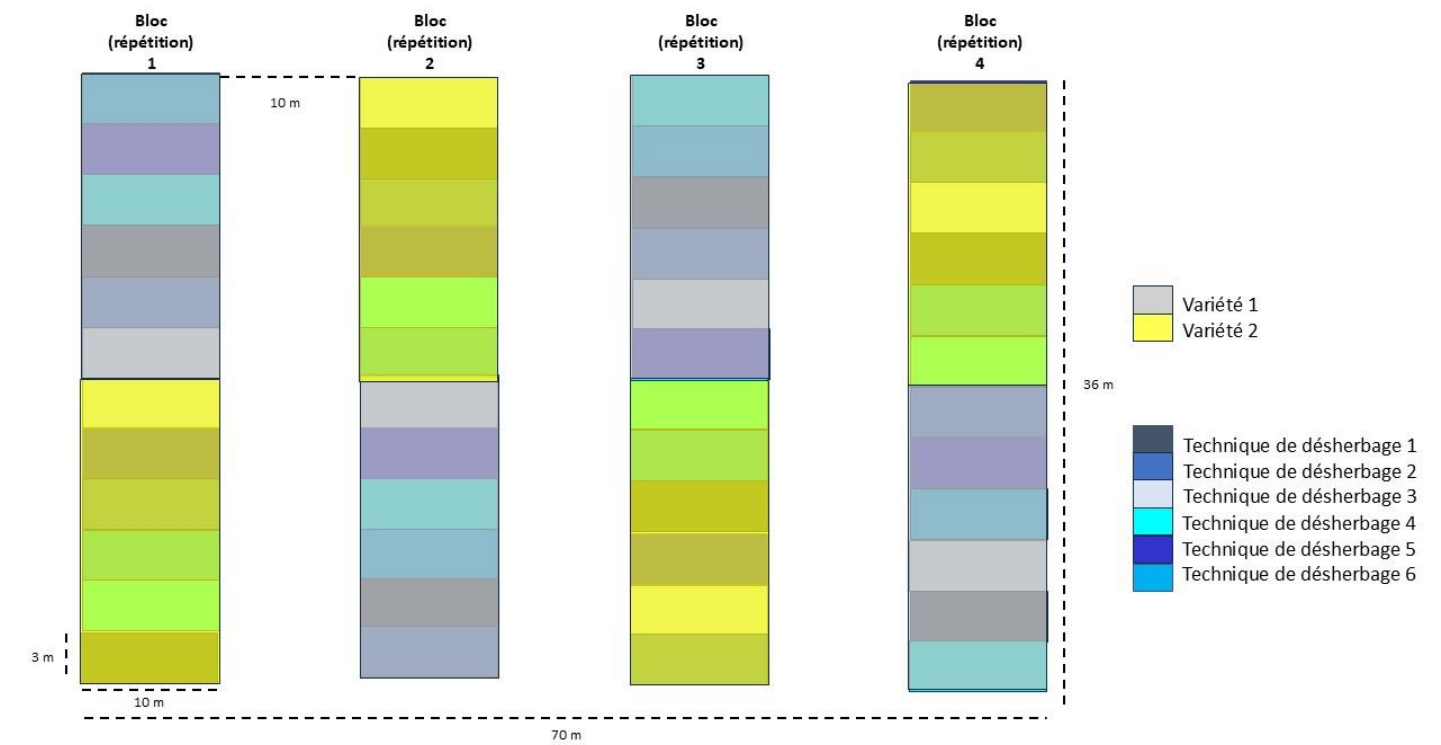


Figure 5 : Exemple d’un dispositif expérimental en parcelle partagée sur un site mère qui comprend l’évaluation de six techniques répétées quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans deux variétés d’une seule culture.

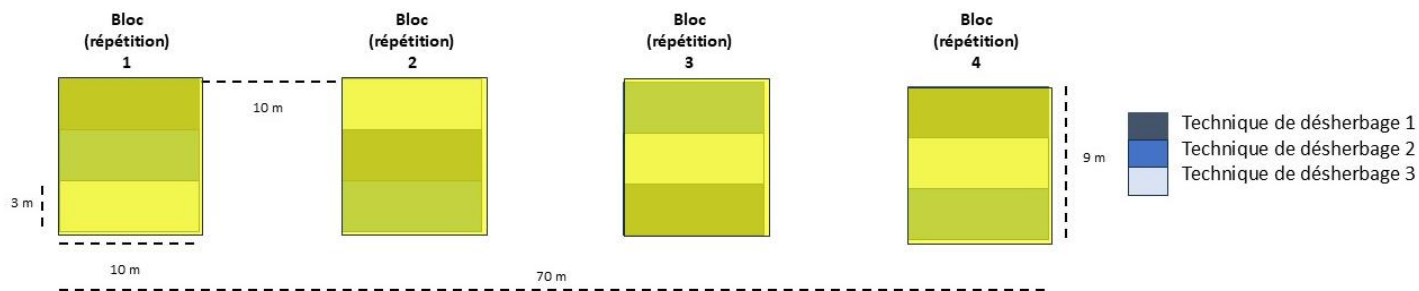


Figure 6 : Exemple d'un dispositif expérimental en parcelle partagée sur un site mère, mais dont le site-fille comprend l'évaluation de trois techniques, qui sont aussi testées sur le site mère, répété quatre fois, dans des parcelles regroupées par bloc, dans une seule variété de la même culture, qui sera aussi testé sur le site mère.

Les techniques et les variétés testées dans le site-fille doivent aussi se retrouver aussi dans le site mère. Globalement, si ce type de dispositif est choisi, il est très important que les paramètres choisis soient les mêmes entre les techniques qui seront évaluées. De plus, toutes les opérations agricoles effectuées dans un même essai sur un même site doivent être effectuées au même moment, telles que la date de semis, la date du traitement, la date de la fertilisation et le taux, etc. Il est aussi important que les traitements et les évaluations au champ soient réalisés la même journée et idéalement par le même opérateur. Il est également indispensable que l'opérateur de l'équipement ait suivi une formation pour l'utilisation de la machinerie au préalable. Puis, une zone de pratique devra être désignée en dehors de la zone du dispositif expérimental, afin de calibrer l'équipement et pratiquer les opérations qui devront être réalisées dans le dispositif. Finalement, c'est important que l'opérateur de l'équipement ait une carte du dispositif expérimental et qu'il y ait une double vérification du traitement à réaliser dans chaque parcelle, afin d'éviter des erreurs.

4 Protocole générique

Comme mentionné dans les sections précédentes, il est nécessaire de faire un choix de dispositif et un plan d'implantation de parcelles pour être en mesure d'appliquer le protocole et d'utiliser l'outil de comparaison technico-économique. Pour ce faire, certains éléments doivent être définis en amont, dont : 1. Le choix obligatoire des techniques de désherbage à comparer, ainsi que leur nombre ; 2. Le choix obligatoire de la culture dans laquelle les essais au champ seront réalisés ; 3. Le choix optionnel de l'ajout d'une variable supplémentaire.

Ces éléments sont importants puisqu'ils détermineront le nombre de parcelles à implanter et la taille des parcelles en fonction de la largeur des équipements de désherbage choisis. Ces éléments détermineront aussi le moment du passage avec l'équipement de désherbage, puisque ce moment dépend du stade de croissance de la culture principale. Les conditions optimales, particulièrement concernant le stade phénologique de la culture ou la mauvaise herbe, pourront être obtenues selon le guide d'utilisation de chaque équipement. Par exemple, pour certaines technologies il faudra que les mauvaises herbes aient une certaine taille minimale pour être identifiées par les algorithmes de reconnaissance, tandis que pour d'autres technologies, les mauvaises herbes ne doivent pas dépasser une certaine taille (ex. Au maximum dix centimètres de hauteur) pour que la méthode de contrôle soit efficace. Dans le cas de l'utilisation des herbicides, il faudra toujours suivre les instructions de l'étiquette du produit.

Ces choix devront être effectués par le centre de recherche, idéalement en collaboration avec des agronomes et des producteurs afin de bien cibler les besoins du secteur et les défis du désherbage dans la culture choisie. Puisque le protocole et l'outil de comparaison technico-économique sont génériques, il est possible de choisir n'importe quelle combinaison de technologies de désherbage, de culture et de variables supplémentaires. Le plan d'expérimentation (dispositif) devra être déterminé en fonction de ces choix, et les analyses statistiques réalisées par le centre de recherche découleront aussi du choix du plan d'expérimentation.

Implantation des parcelles expérimentales

Le piquetage de l'essai et sa réalisation devront être effectués dans des conditions météorologiques optimales (c.-à-d. sans pluie, pas en cas de sécheresse, etc.), comme de production (c.-à-d. selon le bon stade phénologique de la culture et des mauvaises herbes).

Le site choisi pour l'implantation des parcelles devra être le plus représentatif possible des conditions dans lesquelles le nouvel équipement sera utilisé. Ainsi, l'emplacement du dispositif expérimental devra avoir un taux d'infestation des mauvaises herbes le plus homogène possible à travers les parcelles expérimentales. De préférence, éviter des zones avec des îlots fortement infestés qui ne seraient présentes que dans quelques sous-parcelles.

De même, il faudra éviter l'implantation du dispositif dans une zone accidentée, avec des roches ou autres obstacles qui peuvent empêcher le fonctionnement normal de l'équipement. Pour ce faire, il est conseillé de consulter des cartes des sols, l'historique de dépistage de la ferme (ou du champ) et des images satellites ou prises par drone, afin de bien choisir l'emplacement le plus indiqué.

Les sites sur lesquels le dispositif expérimental sera implanté doivent être repérés au champ et les superficies qui seront occupées par chacun des blocs de l'essai devront être délimitées à l'aide de piquets ou de drapeaux pour éviter que des personnes ou des équipements autres que celui appartenant à l'essai circulent sur cet endroit. Pour les détails et des astuces pour réaliser le piquetage, il est possible de consulter le document : [Procédures de piquetage de la Coordination services-conseils](#).

Ainsi, il sera nécessaire de prendre des coordonnées GPS de :

- les quatre coins de l'ensemble du dispositif ;
- les quatre coins de chaque bloc ;
- les quatre coins de chaque parcelle ;
- l'emplacement de chaque quadrat.

Chaque bloc et parcelle devront être dûment identifiés avec le numéro du bloc, le numéro du traitement, le type de traitement, etc. Le moment du piquetage va dépendre du moment auquel l'essai sera réalisé (ex. avant ou après le semis ou la plantation). Néanmoins, il est impératif qu'il soit fait avant la réalisation des traitements, afin de minimiser le risque d'erreurs.

4.1.1 Installation des quadrats pour l'évaluation de l'efficacité du désherbage et des dommages à la culture principale

À l'intérieur de chacune des parcelles du dispositif expérimental, un quadrat de 1 m de long sur 0,5 m de large doit être installé. La superficie du quadrat est ajustable en fonction de la pression des mauvaises herbes. L'important est de noter la taille du quadrat, car celle-ci permet d'évaluer la densité de mauvaises herbes avant et après (nombre de plants par m²), et donc l'efficacité du désherbage. La disposition du quadrat à l'intérieur de la parcelle dépend de la culture principale choisie, soit une production en rangs ou sur buttes, comme montré dans la figure 7. Dans le cas d'une production en rangs, le quadrat doit être installé de façon d'inclure au moins un entre-rang (figures 7A et 7B). En contrepartie, en production en butte, le quadrat doit être installé sur la butte, soit la partie qui sera désherbée avec le nouvel équipement, plutôt que dans l'espace entre les buttes (figures 7C).

L'installation du quadrat doit être permanente, pendant la durée de l'expérimentation, afin de toujours évaluer le même endroit (avant-après). L'évaluation des mauvaises herbes sera une évaluation de la densité des mauvaises herbes dans ce quadrat (nombre de plants par m²). Les évaluations sont faites à deux moments différents : 24 h avant le traitement ; sept jours après le traitement. L'évaluation avant le traitement va servir de barème de référence pour obtenir le % d'efficacité du contrôle des mauvaises herbes (ECMH).

L'évaluation sept jours après le traitement servira à déterminer l'efficacité du traitement et déterminer également si un deuxième passage ou un autre type d'intervention de désherbage seront nécessaires. Le nombre de MH avant et après le

traitement sera la métrique employée pour compilation dans l'outil de comparaison technico-économique, pour le calcul automatique de l'efficacité du désherbage.

Les dommages causés aux cultures après le passage des équipements de désherbage (*Crop stand loss* [CL], formule 2) seront obtenus en faisant le décompte du nombre de plants de la culture principale dans le quadrat (plantes par m²) avant et après le passage avec l'équipement. Comme dans le cas des MH, les valeurs des évaluations de 24 h avant et 7 jours après le traitement seront compilées directement dans l'outil de comparaison technico-économique, pour un calcul automatique du CL (formule 2).

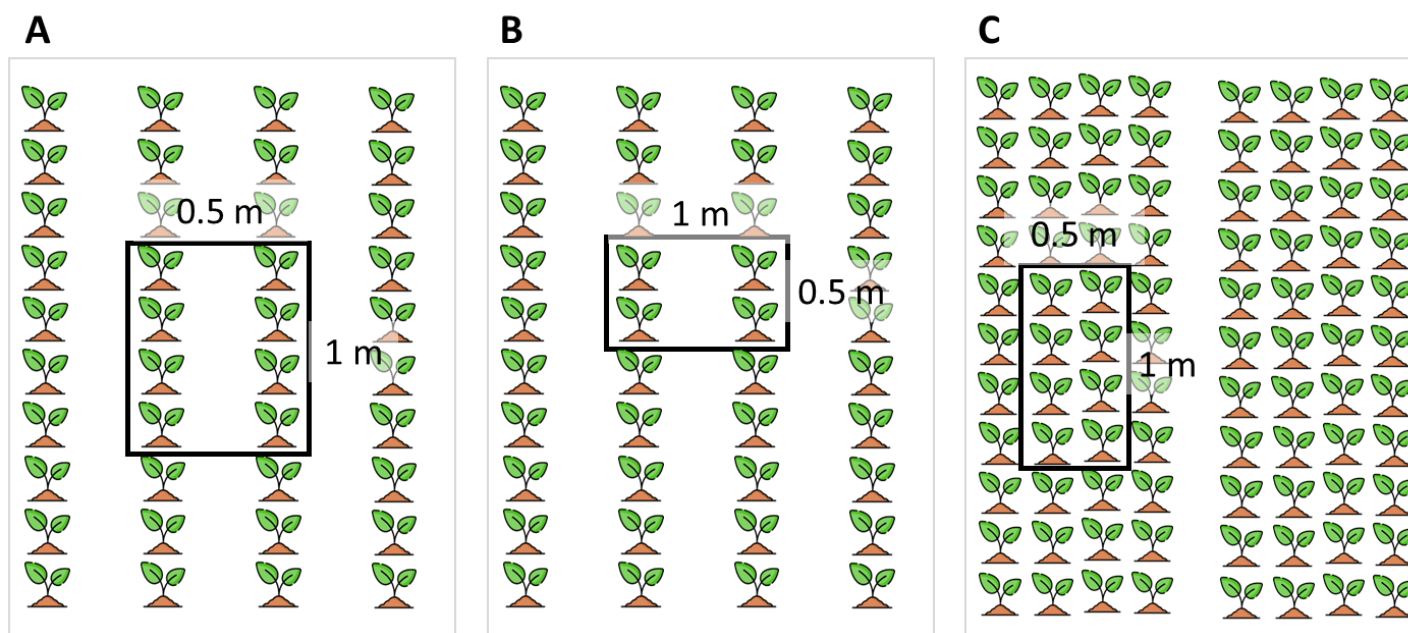


Figure 7 : Quelques options pour l'installation des quadrats dans une parcelle : Si la production est en rangs (A et B) ou si la production est sur buttes (C).

4.1.2 Détermination de la zone de récolte pour l'évaluation des rendements

Afin d'éviter l'effet de bordure lors de l'évaluation des rendements de la culture principale, la zone de récolte choisie doit se trouver sur les rangs intérieurs de la parcelle. Il est possible de faire la récolte sur une largeur d'un rang (figure 8B) ou de deux rangs (figure 8A). La longueur de la zone de récolte doit être plus faible que celle de la parcelle complète. La longueur de la zone de récolte doit être la même dans toutes les parcelles. Une évaluation de la qualité de la récolte devra aussi être effectuée, selon les grades de la culture principale choisie, puisque c'est le rendement commercialisable (vendable) qui est considéré dans le calcul économique.

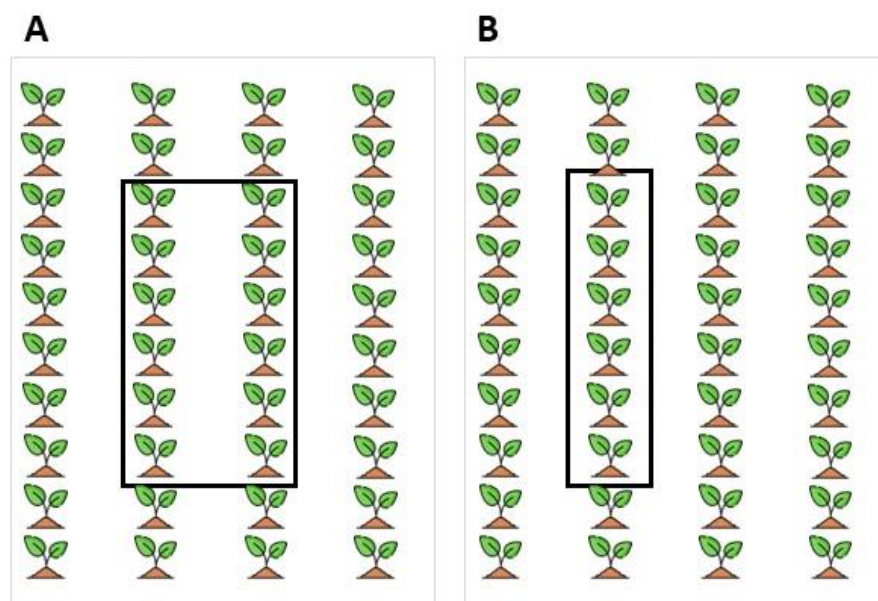


Figure 8 : Deux options pour la détermination de la zone de récolte, sur un rang linéaire intérieur ou sur deux rangs intérieurs.

Remplir la grille de compilation des données

L'outil de comparaison technico-économique, présenté sous forme d'un chiffrier Excel, permet d'évaluer de manière structurée plusieurs scénarios ou options à partir des indicateurs techniques et économiques choisis. L'utilisateur y renseigne uniquement les cellules actives de la grille de compilation des résultats, tandis que les colonnes et lignes grisées sont verrouillées ou réservées à des calculs automatisés et ne doivent pas être modifiées. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires, puisque des calculs sont effectués à partir de ces données pour la production des tableaux de bord. Une fois les données saisies, les tableaux de bord intégrés génèrent automatiquement des visualisations, facilitant la comparaison des performances relatives de chaque technique de désherbage choisie. L'outil comporte plusieurs onglets, qui sont présentés ci-dessous. Une table de données complète est aussi produite, pouvant être exportée et employée à des fins d'analyses statistiques. En effet, les tableaux de bord ne sont qu'une visualisation des résultats, ne permettant pas l'analyse de différences significatives entre les techniques de désherbage testées.

4.1.3 Onglet Aide-mémoire

L'information entrée dans cet onglet est un aide-mémoire pour l'utilisation de l'ensemble du fichier Excel (outil technico-économique). Il inclut l'information à compiler dans chacun des onglets, afin de comparer les techniques de désherbage.

4.1.4 Onglet Techniques

L'information entrée dans cet onglet sert à comparer les différentes techniques de désherbage, selon les choix effectués par les chercheurs, les conseillers et les producteurs concernés. Il peut s'agir d'une comparaison entre une technique de désherbage actuellement employée chez un producteur et une nouvelle technologie d'intérêt. Ou encore, cela pourrait être la comparaison de trois nouvelles technologies de désherbage dans une culture donnée. Si plusieurs désherbages sont prévus dans une même parcelle avec des techniques différentes, par exemple de la pulvérisation puis du désherbage manuel, ces techniques doivent être toutes listées ici (voir tableau 2). En effet, les techniques indiquées dans cet onglet seront proposées dans le menu déroulant de l'onglet Carnet_champ, dans lequel sont mesurés l'efficacité du désherbage et les dommages à la culture principale. Ceux-ci seront évalués par passage.

Pour les données sur les coûts, une partie peut être obtenue au moment d'effectuer la recherche des technologies à comparer, comme le coût des différents équipements, le coût des logiciels, le coût des locations ou des entretiens, etc. (voir Annexe 4). D'autres données devront être estimées, telles que les frais de bâtiment, des subventions, le taux horaire de l'opérateur, la consommation du carburant par hectare, etc. Certains coûts sont optionnels, alors que d'autres éléments sont obligatoires, tels que les sections sur la traction de l'outil. Les coûts obligatoires sont utilisés pour les calculs économiques

et la production des tableaux de bord. Si les cases obligatoires sont laissées vides, les calculs et visualisations ne pourront se faire.

Tableau 2 : Données technico-économiques à compiler pour l'ensemble des technologies qui seront comparées. Le tableau permet la comparaison de trois techniques de désherbage

Technique				
Coûts à l'achat				
Coût d'achat (\$) *				
Coût de transport à l'achat (\$)				
Subvention unique (\$)				
Temps de formation (h)				
Coûts de possession annuels (récurrents)				
Coût de logiciel (\$/an)				
Coût de location annuelle (\$/an)				
Temps de formation récurrent (h)				
Autres coûts annuels (\$/an)				
Frais d'intérêt à long terme (\$/an) *				
Frais d'entretien de l'outil (\$/an) *				
Frais d'entreposage (\$/an)				
Coût administratif (\$/an)				
Amortissements (calculés)	0	0	0	0
Subventions récurrentes (\$/an)	0	0		
Traction de l'outil				
Nécessite un tracteur ? *				
Si tracteur, HP au PTO. *				
Type carburant*				
Consommation carburant (l/h) *	0,0	0,0	0,0	0,0
Coût en traction (\$/h)	0,0	0,0	0,0	0,0
Autres éléments				
Taux horaire (\$/h) *				
Durée de vie de l'équipement (an) *				
Valeur en fin de vie (\$) *				
Utilisation prévue (ha/année) *				

4.1.5 Onglet Entreprise

L'information entrée dans cet onglet est utilisée pour le calcul des rendements et la comparaison des sites entre eux (Tableau 3). L'information présentée peut s'avérer utile également pour l'interprétation des résultats, comme pour l'interprétation des différences de rendement entre deux sites situés dans deux régions différentes. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires, puisque des calculs sont effectués à partir de ces données pour la production des tableaux de bord. L'outil convertisseur peut être utilisé si pertinent. Il permet de convertir les acres en hectares, puisque l'unité de mesure employée pour les calculs est l'hectare. Les intrants entrés dans le tableau 4 apparaîtront comme choix dans les autres onglets (Carnet_champs et parcelles). Les intrants employés pour toutes les techniques de désherbage comparées dans l'onglet précédent (Techniques) doivent être compilés dans ce tableau. Il est possible d'en ajouter si nécessaire.

Tableau 3 : Données de rendement à compiler pour les deux sites d'essai. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires.

Nom du site*		
Type de site*		
Région UTM		
Nom de la culture*		
Hectares en production*		
Rdt brut total annuel/ha	0,0	0,0
Rdt QI no.1/ha*		
Rdt QI no.2/ha		
Rdt QI no.3/ha		
Rdt QI no.4/ha		
Récolté non vendu/ha		
Non récolté/ha		
Prix QI no.1*		
Prix QI no.2		
Prix QI no.3		
Prix QI no.4		
Revenu moyen	– \$	– \$

Tableau 4 : Le tableau dans lequel les données sur les intrants doivent être compilées. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires.

Intrants	
Nom	Coût/unité
Diesel*	
Essence	
Propane	
Pesticide	

4.1.6 Onglet Parcelles

L'information retrouvée dans cet onglet correspond au dispositif expérimental choisi et précise le nombre de parcelles, leur taille, la taille du quadrat pour évaluer les dommages à la culture et l'efficacité du désherbage, de même que la superficie de récolte choisie pour calculer les rendements (tableaux 5 et 6). Cet onglet doit être rempli selon les paramètres qui seront évalués dans l'étude, soit les techniques de désherbage qui seront évaluées :

- Les numéros de parcelle considérant que chaque technique de désherbage est répétée 4 fois. Donc, si on compare deux techniques de désherbage, il y aura un total de 8 parcelles (numéro de parcelles : a1, a2, a3, a4, b1, b2, b3, b4).
- Les superficies des parcelles (la dimension totale de la parcelle) et la taille du quadrat.
- Les superficies de récolte (la dimension de la superficie récoltée à l'intérieur de la parcelle) et la quantité récoltée.
- Un facteur supplémentaire mesuré s'il y en a un (par exemple : l'espacement entre les rangs).

La colonne du numéro de la parcelle doit être remplie ici, afin qu'elle apparaisse dans l'onglet suivant, Carnet de champs.

Tableau 5 : Informations à compiler en lien avec le dispositif expérimental choisi. Les cases avec un astérisque (*) sont obligatoires.

Nom du site*	
Type de site*	
Type de sol*	
Numéro de champ*	
Longueur des parcelles (m)*	
Largeur des parcelles (m)*	
Superficie des parcelles (m²)	0
Largeur du quadrat (m)	
Longueur du quadrat (m)	

Tableau 6 : Grille de compilation des données pour l'ensemble des parcelles sur chacun des sites. Le rendement vendable est calculé automatiquement à partir des autres informations compilées dans l'onglet Parcelles.

Saisie des données du carnet de champs								
No parcelle	Technique	Superficie parcelle (m²)	Variable supplémentaire (optionnel)	Type de sol	Site	Superficie de récolte (m²)	Quantité récoltée (kg)	Rdt vendable (kg/ha)
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!
		0		0				#DIV/O!

4.1.7 Onglet Carnet_champs

Cet onglet est la grille de prise de données au champ visant à évaluer les dommages à la culture principale et l'efficacité du désherbage, qui seront calculés automatiquement. Il doit être rempli pour chacun des passages avec l'équipement, s'il y a plusieurs passages (tableau 7). Cet onglet inclut les observations suivantes :

- Le numéro de la parcelle (rempli automatiquement lorsque les données sont mises dans l'onglet Parcelles).
- La date de l'essai.
- Le numéro du passage avec l'équipement : les informations doivent être compilées pour chacun des passages.
- Le temps de désherbage (nombre de minutes pour réaliser le désherbage de la parcelle).
- Le type d'intrant ainsi que la quantité utilisée s'il y en a, sinon laisser vide
- Le nombre de plants de la culture principale à l'intérieur du quadrat, 24 h avant le désherbage.
- Le nombre de plants de la culture principale à l'intérieur du quadrat, sept jours après le désherbage.
- Le nombre de mauvaises herbes à l'intérieur du quadrat, 24 h avant le désherbage.
- Le nombre de mauvaises herbes à l'intérieur du quadrat, sept jours après le désherbage

Tableau 7 : Grille de compilation des données pour les dommages à la culture principale et l'efficacité du désherbage.

No Parcelle	Date	No Passage	Minutes	Intrant	Qt	Culture principale			Mauvaises herbes		
						Avant passage	Après passage	Dommages à la culture (%)	Avant passage	Après passage	Efficacité du désherbage (%)
						Nbre de plants par quadrat avant*	Nbre de plants par quadrat après*		Nbre de m-h par quadrat avant*	Nbre de m-h par quadrat après*	

4.1.8 Onglet Cal. champs

Cet onglet n'est pas à remplir. Ceci est une feuille de calcul, qui prend en considération les données et les paramètres compilés dans les onglets précédents pour réaliser les calculs de l'efficacité des différentes techniques de désherbage et qui produira les tableaux de bord (Tbl_passages et Tbl_eco). Il s'agit du fichier avec l'ensemble des données compilées qui peut aussi être employé pour des analyses statistiques avec d'autres logiciels. Puisque les variables sont uniformisées, les données compilées de différents essais de technologies de désherbage sur plusieurs sites pourraient aussi être compilées dans une base de données et analysées ultérieurement.

Utiliser et interpréter les tableaux de bord

Les tableaux de bord présentent de l'information technique et agronomique issue des essais réalisés. Les résultats reposent sur plusieurs hypothèses pouvant ne pas convenir à l'utilisateur, et ceux-ci ne remplacent aucunement l'avis d'un professionnel (agronome).

Les figures présentées devraient être suffisantes pour visualiser les résultats. Pour les utilisateurs avertis ayant de bonnes connaissances Excel et Python, il est possible de modifier ou ajouter des variables sélectionnées. Il est important de mentionner que les données peuvent être extraites et analysées statistiquement selon le plan d'expérimentation qui sera choisi, avec un logiciel d'analyse statistique. Les figures sont des visualisations, mais aucune analyse statistique n'est effectuée. Il n'est donc pas possible de déterminer de différences significatives entre les technologies de désherbage, par exemple. Il est fortement recommandé que les données soient analysées dans les règles de l'art par les chercheurs et conseillers responsables de la comparaison des techniques de désherbage.

4.1.9 Onglet Tbl_passages

Cet onglet n'est pas à remplir. Il contient les différentes figures produites suivant la collecte de données sur l'efficacité du désherbage, les dommages à la culture et les rendements.

Un tableau récapitulatif des variables qui sont utilisées dans les différentes figures proposées est inclus au début de cet onglet (voir tableau 8). Ces variables peuvent changer, selon les objectifs de l'étude, mais elles ont été définies dans les onglets précédents. Les variables utilisées pour les axes X et Y des graphiques sont listées dans ce tableau. Pour chaque figure, des variables par défaut sont proposées pour les axes X et Y afin de faciliter la comparaison (couleur ou *facet*), mais il est possible de les modifier dans la liste déroulante de chacune des figures. Lors de la sélection d'une autre variable dans la liste déroulante, il peut être nécessaire d'ajuster la taille des figures, qui peuvent grossir ou se superposer. Toutes les figures produites par défaut dans l'onglet Tbl_passages sont expliquées dans la section sur le protocole spécifique de l'utilisation du désherbeur mécanique de précision dans la betterave, avec des données fictives (figures 11, 12, 13 et 14).

Tableau 8 : Récapitulatif des variables qui sont représentées dans les différentes figures de l'onglet Tbl_passages

Variables en x	Variables en y	Variables en couleur et facet
NoParcelle	Minutes	Technique
Date	Dommages à la culture (%)	Superficie de récolte (m2)
NoPassage	Efficacité du désherbage (%)	NoParcelle
Technique	Type de sol	NoPassage
Site	Superficie de récolte (m2)	Espacement entre les rangs (pouces)

Un total de huit figures sont proposées :

1. Boîte à moustache avec la distribution des dommages à la culture par technique et par site.
2. Boîte à moustache avec l'efficacité du désherbage par technique et par site.
3. Graphique à barres avec la moyenne du temps par passage, par technique et par site avec intervalle de confiance (95 %).
4. Graphique à barres de la moyenne des dommages à la culture par technique.
5. Graphique à barres de la moyenne de l'efficacité du désherbage par technique.
6. Graphique à barres de la moyenne du temps total, par technique et par site avec intervalle de confiance (95 %).
7. Graphique à barres de la comparaison de la moyenne des rendements par numéro de la parcelle et site, en comparaison de la valeur de référence (ligne horizontale).
8. Graphique à barres de la comparaison de la moyenne des rendements par technique de désherbage, en comparaison de la valeur de référence (ligne horizontale).

4.1.10 Onglet Tbl_économique

Cet onglet n'est pas à remplir. Il contient les différentes figures produites suivant la collecte de données économiques. Un tableau récapitulatif des variables qui sont utilisées dans les différentes figures proposées est inclus au début de cet onglet (voir le tableau 9).

Tableau 9 : Résumé des variables représentées dans les figures de l'onglet Tbl_eco

Variables en x	Variables en y	Variables en couleur et facet
Variables	Valeurs	Technique
Technique		Superficie de récolte (m2)
NoParcelle		Variables

Un tableau sommaire comparatif des différentes techniques évaluées est produit, regroupant les valeurs en trois catégories principales : coûts de possession, frais d'opération moyens par passage/ha et rendement et revenus. Le tableau inclut également un coût d'opération total par ha, la marge résiduelle sur le rendement observé (\$/ha) et la marge résiduelle sur le rendement de référence (\$/ha).

Un total de neuf graphiques sont produits :

1. Graphique à barres empilées des coûts de possession de chaque technologie.
2. Graphique à barres de la comparaison des rendements selon le type de technologie évaluée.
3. Graphique à barres des frais d'opération moyen par type de frais (salaires, intrants et traction) par parcelle (moyenne des passages).
4. Graphique à barres des frais d'opération totaux par type de frais (salaires, intrants et traction) par parcelle (somme des passages).
5. Graphique à barres de la comparaison de l'estimation des revenus (observés versus la valeur de référence).
6. Graphique à barres de la comparaison de l'estimation des revenus (marge résiduelle sur le rendement observé versus la marge résiduelle sur le rendement de référence).
7. Graphique à barres des frais d'opération totaux par parcelle.

8. Graphique à barres des frais d'opération totaux moyens par technique (tous les passages).
9. Graphique à barres des frais d'opération moyen par passage.

5 Exemple de l'application du protocole générique : L'exemple fictif d'un désherbeur mécanique de précision dans la betterave

Mise en contexte

Le cas de figure de la culture de la betterave ici présenté a été élaboré après consultation avec la ferme Maraîchers L&L à Saint-Michel. La régie de culture actuelle de la betterave à la ferme Maraîchers L&L inclut une plantation en rang double sur buttes avec un espacement de 2,5 pouces (6,35 cm) entre les deux rangs. Le désherbage mécanique est habituellement effectué dans les entre-rangs avec une grande efficacité à l'aide d'un sarcler. L'espacement actuel de 2,5 pouces entre les deux rangs sur la butte est trop étroit pour permettre le passage d'un équipement de désherbage mécanique. C'est pourquoi le désherbage chimique était auparavant effectué sur le rang, en combinaison avec le sarclage de l'entre-rang. Les herbicides homologués pour le désherbage de la betterave sur le rang ne sont plus disponibles sur le marché et les coûts en désherbage manuel sont trop élevés, ce qui justifie d'identifier une technologie de désherbage avec les nouveaux outils de précision pour le désherbage sur la butte. Idéalement, la nouvelle technologie de désherbage mécanique de précision devrait pouvoir être employée sans modifier la régie de culture actuelle, c'est-à-dire le rang double sur buttes avec un espacement de 2,5 pouces.

Cet exemple avec une technologie désherbage mécanique dans la betterave est un cas de figure **théorique** de l'application du protocole générique et de l'outil de comparaison technico-économique pour l'évaluation des technologies de désherbage et n'a jamais été mis en application sur le terrain. L'objectif de ce cas de figure est d'offrir un exemple des visualisations pouvant être obtenues à la suite de l'utilisation de l'outil Excel. Tous les éléments du cas de figure peuvent être modifiés dans l'outil.

Implantation des parcelles expérimentales

5.1.1 Choix des éléments à comparer entre les techniques de désherbage : choix des variables, de la culture et des sites

L'efficacité du désherbage sur le rang avec le désherbeur mécanique de précision sera évaluée dans la culture de la betterave var. *Red Ace*, sur deux sites expérimentaux en régie biologique et conventionnelle : À la plateforme d'innovation en agriculture biologique (PIAB) de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville et sur une ferme en production commerciale, la ferme Maraîchers L&L à Saint-Michel.

Deux dispositifs expérimentaux seront implantés. Le premier sera implanté en sol minéral (Sable loameux, série Aston) sur le site de la PIAB, et le deuxième en sol sableux ou sablo-argileux (à définir) à la ferme Maraîchers L&L.

Les principaux facteurs à évaluer pour comparer l'efficacité du désherbage sont : l'espacement entre les rangs sur la butte et le type de désherbage tardif (avec le désherbeur mécanique de précision, du désherbage manuel sur le rang ou un autre équipement de désherbage mécanique au choix du producteur). Le Guide sur le désherbage mécanique dans la betterave offre plusieurs alternatives d'équipements de désherbage mécanique pouvant être comparées (ITB. 2025).

Les opérations suivantes seront effectuées dans toutes les parcelles, pour suivre les pratiques habituelles de l'entreprise ainsi que les pratiques employées en régie de culture biologique sur le site de la PIAB :

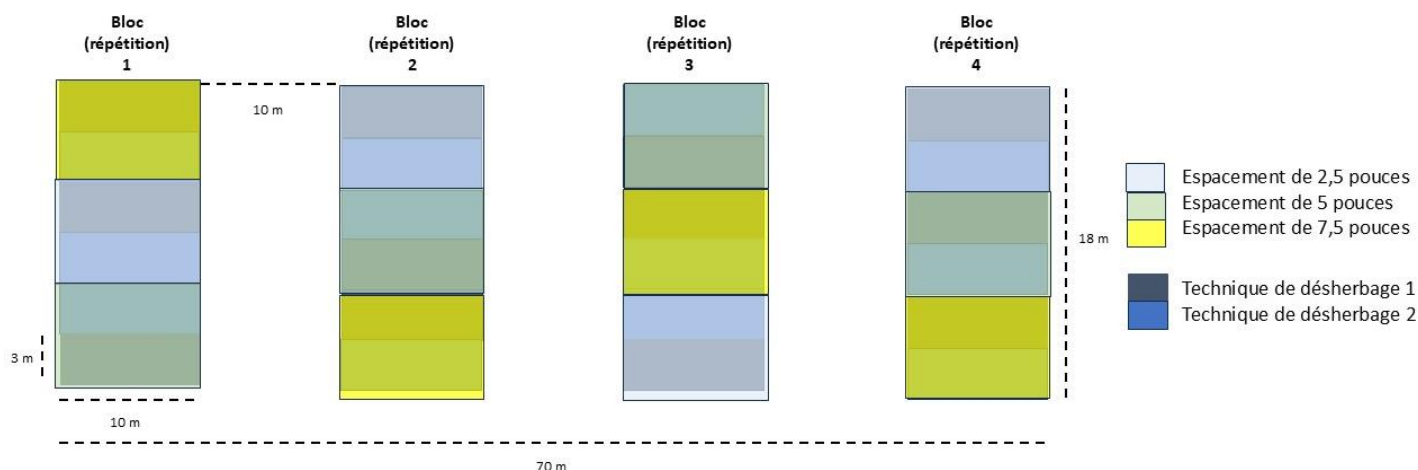
- Buttage 1 semaine avant le semis
- Faux semis : Herse étrille ou autre outil de préparation du sol juste avant le semis (la journée du semis)
- Fertilisation au semis (80 unités d'azote [90-0-80])
- Semis tardif à la fin-juin/début juillet (population visée au semis de 30 plants au mètre)
- Désherbage hâtif de pleine surface sur la butte en prélevée avec la herse étrille (sol organique) ou le pyrodésherbeur (sol minéral)
- Fertilisation en post-levée

5.1.2 Dispositif expérimental

Les évaluations terrain seront réalisées selon un essai de type mère-fille et sont décrites dans les sections précédentes du document.

5.1.2.1 Site mère (PIAB — IRDA)

Le site de la PIAB sera le site mère, où le désherbeur mécanique de précision sera comparé à d'autres méthodes de désherbage mécanique ou manuel, dans des parcelles avec divers espacements de rangs sur la butte. Le dispositif réalisé sera un dispositif en blocs aléatoires randomisés de type split-plot avec deux facteurs (voir Figure 9).



Le premier facteur étant l'espacement entre les deux rangs sur la butte, avec une population visée au semis de 30 plants au mètre (9 plants/pied) : 2,5 pouces, 5 pouces ou 7,5 pouces.

Le deuxième facteur étant le type de désherbage tardif. Voici un exemple pour illustrer les différents passages et équipement pour le désherbage tardif qu'il pourrait y avoir dans les parcelles, en fonction de la pression des mauvaises herbes :

1. Premier passage :
 - a. Désherbage mécanique sur la butte avec la herse étrille, combiné avec un sarclage de l'entre-rang (disque)
 - b. Désherbage mécanique sur la butte avec le désherbeur mécanique de précision, combiné avec un sarclage de l'entre-rang (disque)
2. Deuxième passage :
 - a. Désherbage mécanique sur la butte (renchaussage) combiné avec un sarclage de l'entre-rang (disque)
 - b. Désherbage mécanique sur la butte avec le désherbeur mécanique de précision, combiné avec un sarclage de l'entre-rang (disque)
3. Troisième passage :
 - a. Désherbage manuel, au besoin, ou un second passage mécanique sur la butte (renchaussage), combiné avec un sarclage de l'entre-rang (disque)
 - b. Désherbage mécanique sur la butte avec le désherbeur mécanique de précision, combiné avec un sarclage de l'entre-rang (disque)

Il y aura 24 parcelles implantées sur le site mère : 3 espacements de rangs x 2 types de désherbage tardif x 4 répétitions.

5.1.2.2 Site fille (Ferme Maraîchers L&L)

Le site de la ferme Maraîchers L&L sera le site-fille avec un dispositif réduit où le désherbeur mécanique de précision sera comparé avec la régie actuelle de la ferme, avec un seul espacement de rang (2,5 pouces) (Figure 10).

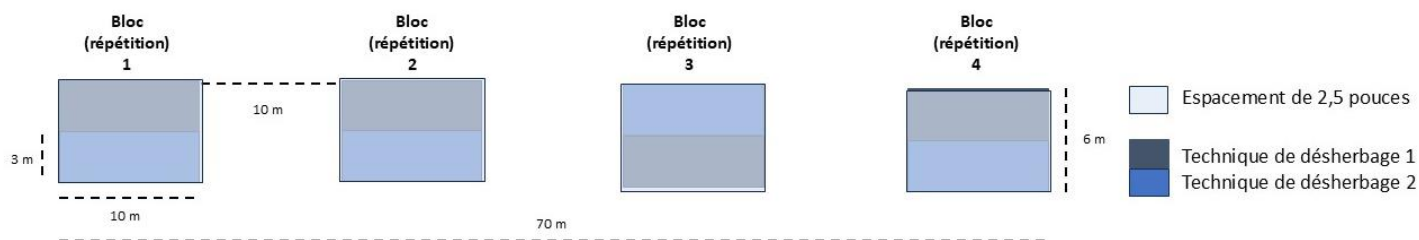


Figure 10 : Exemple de dispositif expérimental réalisé sur le site-fille (Ferme Maraîchers L&L)

Remplissage de la grille de compilation des données et interprétations des tableaux de bord

Les différents onglets de l'outil technico-économique pour la version Protocole spécifique (fichier Excel) ont été remplis, avec des données fictives et à titre indicatif seulement puisque les tests au champ n'ont pas été effectués. Bien que les résultats soient fictifs, ils servent à montrer un exemple des tableaux de bord obtenus avec l'utilisation de l'outil Excel. Il s'agit du type de données qu'un centre de recherche aurait compilées lors de la réalisation des essais au champ et qui pourraient être présentées à un agronome et un producteur pour leur permettre d'évaluer le potentiel d'une technologie de désherbage. Ces résultats fictifs n'impliquent ni ne suggère aucune approbation, recommandation ou désapprobation d'un produit, d'un fabricant ou d'une organisation de la part des auteurs ou de leurs institutions affiliées.

Les données compilées sont des données de performance et d'efficacité, telles que la vitesse d'avancement, l'efficacité du désherbage, l'absence de dommages à la culture principale et des données technico-économiques. Il est nécessaire de déterminer si l'efficacité des différentes technologies évaluées présente des écarts suffisants pour identifier celle qui se démarque nettement, ou si, au contraire, leurs performances sont similaires. Ensuite, il faudra comparer les paramètres technico-économiques pour déterminer si les coûts et frais d'opération justifient l'achat de la machinerie la plus performante ou si la machinerie la plus compatible avec le budget disponible offre un niveau de contrôle des mauvaises herbes acceptable. Dans tous les cas, il est fortement recommandé d'évaluer les équipements avec un agronome expert en gestion ou en financement.

5.1.3 Tbl_passages

Comme mentionné ci-dessus, dans la section sur le protocole générique, cet onglet n'est pas à remplir. Il contient les différentes figures produites suivant la collecte de données sur l'efficacité du désherbage, les dommages à la culture et les rendements. Un tableau récapitulatif des variables qui sont utilisées dans les différentes figures proposées est inclus au début de cet onglet (voir le tableau 7). Ces variables peuvent changer, selon les objectifs de l'étude, mais elles ont été définies dans les onglets précédents.

Un total de huit figures sont proposées :

1. Boîte à moustache avec la distribution des dommages à la culture par technique et par site (figure 11A).
2. Boîte à moustache avec l'efficacité du désherbage par technique et par site (figure 12A).
3. Graphique à barres avec la moyenne du temps par passage, par technique et par site avec intervalle de confiance (95 %) (figure 14A).
4. Graphique à barres de la moyenne des dommages à la culture par technique (figure 11B).
5. Graphique à barres de la moyenne de l'efficacité du désherbage par technique (figure 12B).
6. Graphique à barres de la moyenne du temps total, par technique et par site avec intervalle de confiance (95 %) (figure 14B).
7. Graphique à barres de la comparaison de la moyenne des rendements par numéro de la parcelle et site, en comparaison de la valeur de référence (ligne horizontale) (figure 13A).
8. Graphique à barres de la comparaison de la moyenne des rendements par technologie de désherbage, en comparaison de la valeur de référence (ligne horizontale) (figure 13B).

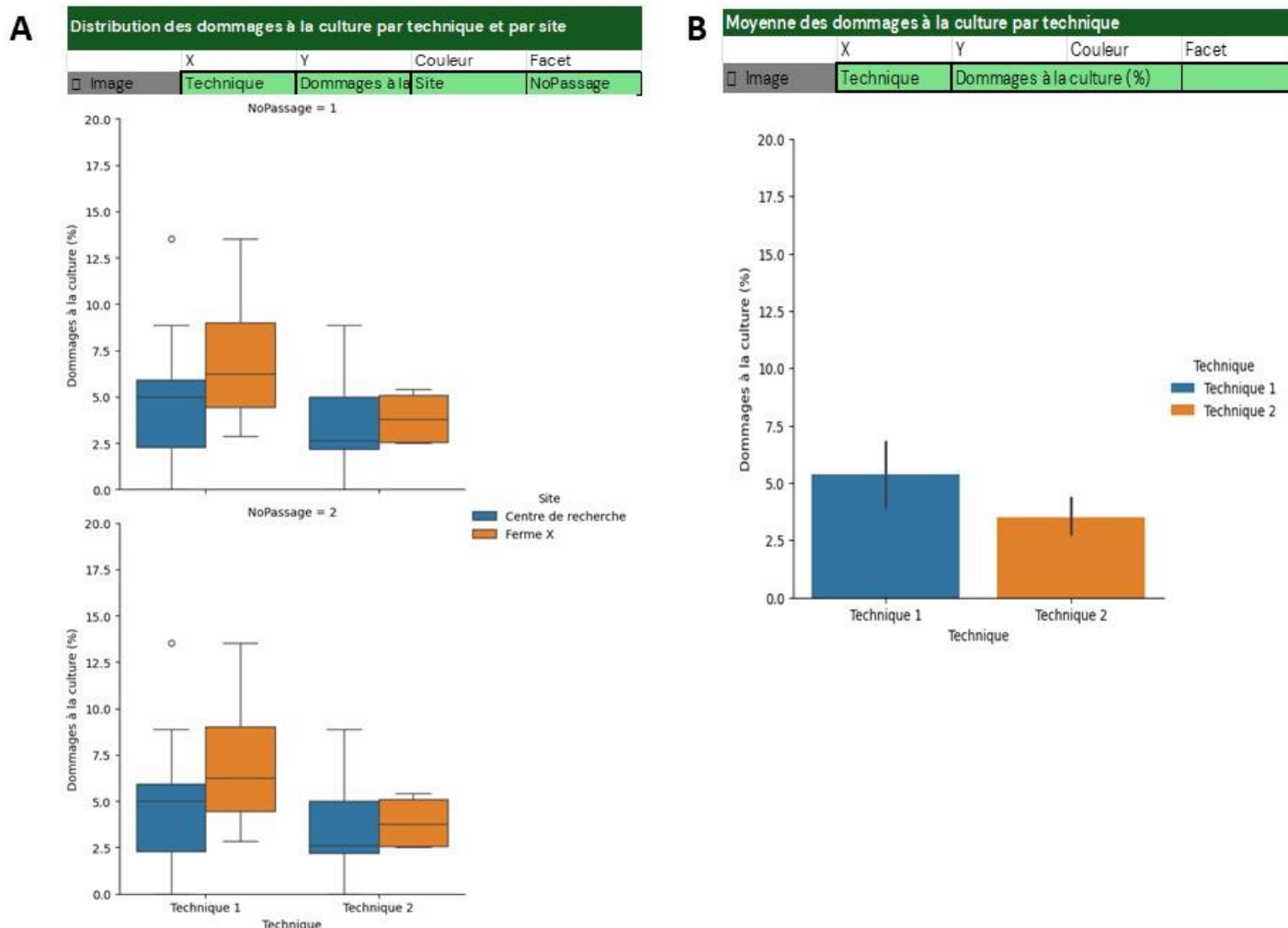


Figure 11 : A) Distribution et B) Moyenne des % de dommages à la culture dans les parcelles de betterave désherbées avec deux techniques

La figure 11 présente les résultats fictifs pour le % de dommages à la culture principale pour deux techniques de désherbage comparées. Dans la figure 11A, ce résultat est visualisé sous forme de boîte à moustache (*box plot*) pour chacun des sites et chacun des passages d'équipement. Dans la figure 11B, il s'agit d'une moyenne et d'un intervalle de confiance de 95 %, tous site et passage confondus. Le % des dommages à la culture a été calculé dans l'onglet *Carnet_champs* du chiffrier Excel, suivant la prise de données sur le terrain du nombre de plants de la culture principale avant et après le passage de l'équipement. Cette visualisation peut donner une idée des différences entre les deux techniques, mais il n'y a pas d'analyse statistique. Par exemple, la technique de désherbage 2 semble moins endommager les plants de la culture principale, mais la différence n'est peut-être pas significative et des analyses complémentaires devront être effectuées. Idéalement, une technique de désherbage efficace serait aussi très spécifique aux mauvaises herbes et endommagerait le moins possible les plants de la culture principale. En complément de cette figure, les visualisations en lien avec l'efficacité du désherbage et les rendements doivent aussi être comparés.

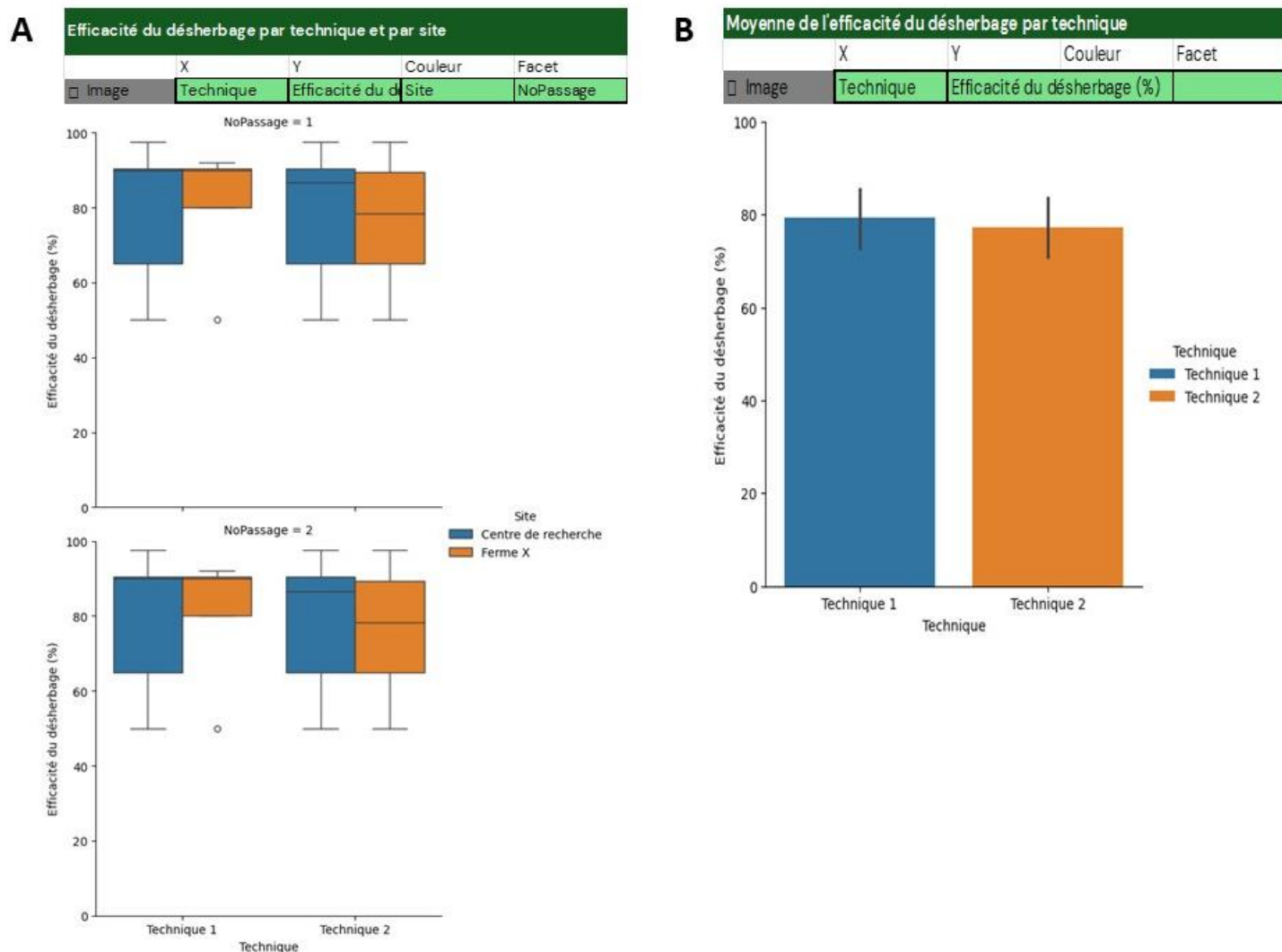


Figure : 12 A) Distribution et B) Moyenne du % d'efficacité du désherbage dans les parcelles de betterave désherbées avec deux techniques

La figure 12 présente les résultats fictifs pour le % d'efficacité du désherbage pour deux techniques de désherbage comparées. Dans la figure 12A, ce résultat est visualisé sous forme de boîte à moustache (*box plot*) pour chacun des sites et chacun des passages d'équipement. Dans la figure 12B, il s'agit d'une moyenne et d'un intervalle de confiance de 95 %, tous site et passage confondus. Le % d'efficacité du désherbage a été calculé dans l'onglet *Carnet_champs* du chiffrier Excel, suivant la prise de données sur le terrain du nombre de plants de mauvaise herbe avant et après le passage de l'équipement. Cette visualisation peut donner une idée des différences entre les deux techniques, mais il n'y a pas d'analyse statistique. Dans ce cas fictif, les deux techniques de désherbage comparées semblent donner une efficacité de désherbage similaire globalement, et pour chacun des passages, mais des analyses complémentaires pourraient être effectuées.

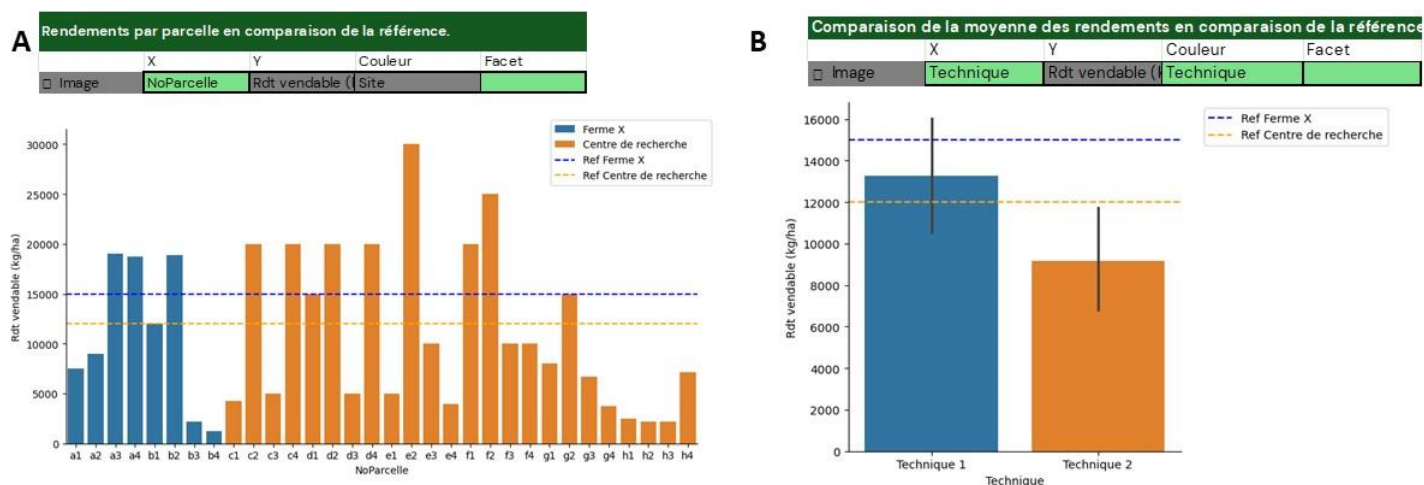


Figure 13 : A) Valeur par parcelle et par site et B) Moyenne par technique pour les rendements vendables (kg/ha) obtenus dans les parcelles de betterave désherbées avec deux techniques

La figure 13 présente les résultats fictifs pour les rendements vendables pour deux techniques de désherbage comparées. Dans la figure 13A, ce résultat est visualisé sous forme d'histogramme pour chacune des parcelles. Dans la figure 13B, il s'agit d'une moyenne et d'un intervalle de confiance de 95 %, tous site et passage confondus. Le % d'efficacité du désherbage a été calculé dans l'onglet Carnet_champs du chiffrier Excel, suivant la prise de données sur le terrain du nombre de plants de mauvaise herbe avant et après le passage de l'équipement. Cette visualisation peut donner une idée des différences entre les deux techniques, mais il n'y a pas d'analyse statistique. Dans ce cas fictif, les deux techniques de désherbage comparées semblent donner une efficacité de désherbage similaire globalement, et pour chacun des passages, mais des analyses complémentaires pourraient être effectuées.

La figure 14 présente les résultats fictifs pour le temps d'un passage pour deux techniques de désherbage comparées. Dans la figure 14A, ce résultat est visualisé sous forme d'histogrammes dans chacun des sites et chacun des passages d'équipement. Dans la figure 14B, il s'agit de la moyenne du temps total par technique et d'un intervalle de confiance de 95 %, pour l'ensemble des passages. La figure 14C, représente le temps moyen d'un passage en heures par hectare. Le temps de passage a été chronométré et l'entrée de données a été effectuée dans l'onglet Carnet_champs du chiffrier Excel. Cette visualisation peut donner une idée des différences entre les deux techniques, mais il n'y a pas d'analyse statistique. Il peut être intéressant de visualiser le temps de passage, mais son intérêt principal est d'être considéré dans l'outil de calcul économique qui sera décrit dans la section suivante.

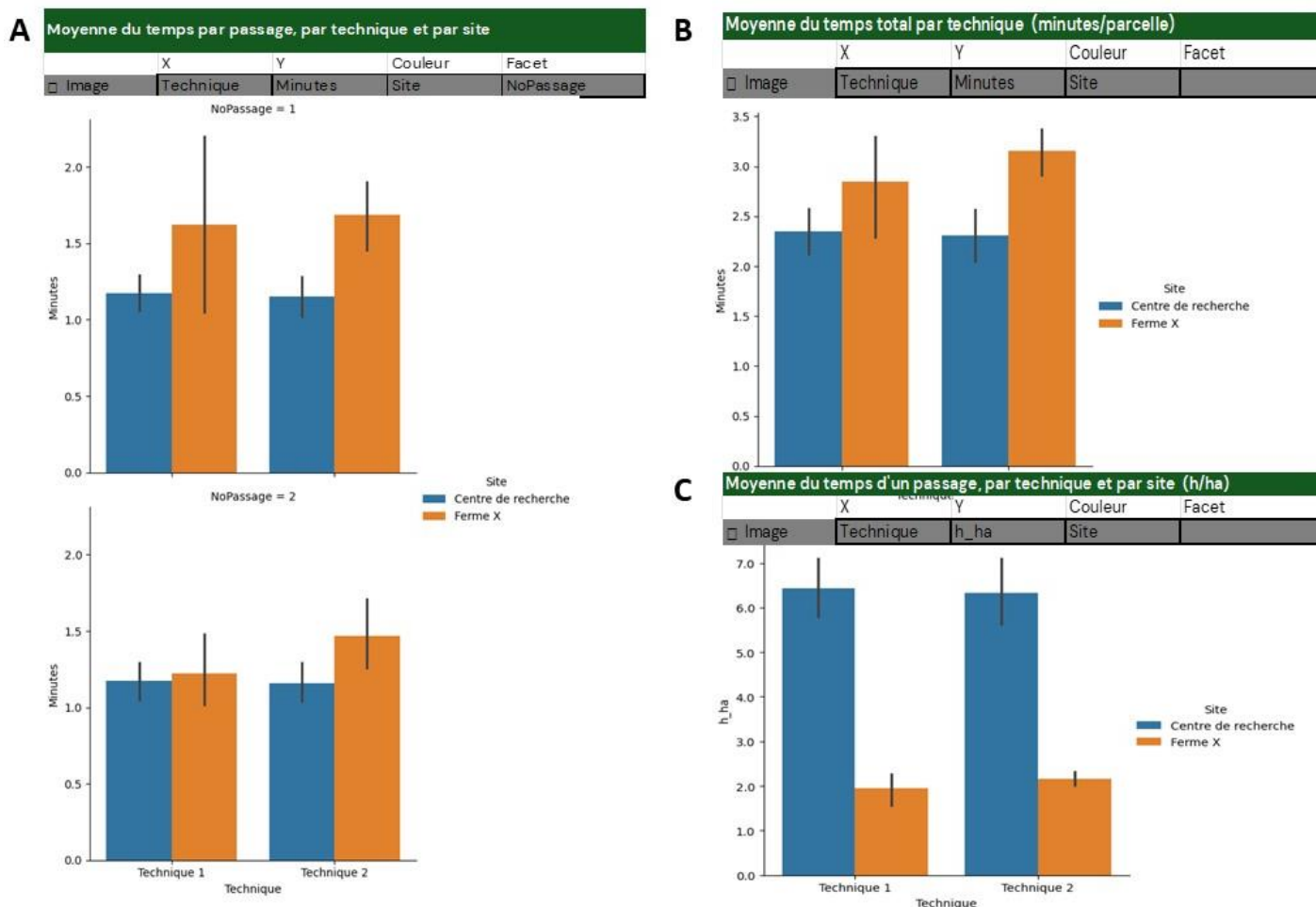


Figure 14 : A) Moyenne par passage en minutes, par technique et site, B) Moyenne du temps total en minutes par technique et site et C) Moyenne du temps d'un passage, par technique et par site en heure par hectare.

5.1.4 Tbl_eco

Tout comme pour l'onglet Tbl_passages, l'onglet Tbl_eco ne nécessite pas d'actions de la part de l'utilisateur à moins de faire une comparaison intermodèle. Dans ce cas, un choix doit être effectué dans le tableau 10 dans la liste déroulante de la ligne 51 (Excel) afin de déterminer quelle technique est la référence et quelles techniques sont testées.

Un total d'un tableau et de neuf figures sont proposés :

- Tableau comparatif (tableau 9)
- Graphique à barres empilées des coûts de possession de chaque technologie.
- Graphique à barres de la comparaison des rendements selon le type de technologie évaluée.
- Graphique à barres des frais d'opération moyen par type de frais (salaires, intrants et traction) par parcelle (moyenne des passages).
- Graphique à barres des frais d'opération totaux par type de frais (salaires, intrants et traction) par parcelle (somme des passages).
- Graphique à barres de la comparaison de l'estimation des revenus (observés versus la valeur de référence).
- Graphique à barres de la comparaison de l'estimation des revenus (marge résiduelle sur le rendement observé versus la marge résiduelle sur le rendement de référence).
- Graphique à barres des frais d'opération totaux par parcelle.
- Graphique à barres des frais d'opération totaux moyens par technique (tous les passages).
- Graphique à barres des frais d'opération moyen par passage.

Tableau 10 Tableau comparatif pour les techniques de désherbage, un maximum de trois techniques comparées dans un même tableau.

Technique	Technique 1	Technique 2	Aucune
Coûts de possession			
Coût d'achat (\$)	40 000	50 000	
Ensemble des coûts à l'achat (\$)	41 250	40 125	
Coûts à l'achat (\$/an)	4 125	5 016	
Coûts à l'achat (\$/an/ha prévu)	206	418	
Coûts de possession annuels (\$/an)	6 900	9 425	
Coûts de possession annuels (\$/an/ha prévu)	345	785	
Total des coûts de possession (\$/an)	11 025	14 441	
Total des coûts de possession (\$/an/ha prévu)	551	1 203	
Coûts d'opération moyens			
Salaire (\$/passage/ha)	133	132	
Intrants (\$/passage/ha)	-	6 314	
Frais en traction (\$/passage/ha)	3 287	7 088	
Total des coûts d'opération (\$/passage/ha)	3 420	13 535	
Nombre de passages	2	2	
Salaire (\$/ha)	266	265	
Intrants (\$/ha)	-	12 628	
Frais en traction (\$/ha)	6 575	14 176	
Total des coûts d'opération (\$/ha)	6 840	27 069	
Coût total / ha	7 392	28 272	
Temps d'opération			
Temps d'un passage (h/ha)	5,3	5,3	
Temps d'opération annuel (h/ha)	10,6	10,6	
Capacité effective (ha/h)	0,19	0,19	
Analyse de rentabilité (nécessite les rendements, les revenus et les prix)			
Rdt vendable moyen observé (unité/ha)	13 283	9 179	
Rdt normaux de : Ferme X	15 000	15 000	
Revenu estimé sur les observations (\$/ha)	6 642	4 590	
Revenu estimé sur rdt normaux (\$/ha)	7 500	7 500	
Gain (perte) de revenus observés (\$/ha)	(858)	(2 910)	
Marge résiduelle observée (\$/ha)	(8 250)	(31 183)	
Comparaison intermodèle			
	Référence	Test	
Différence de revenu avec la référence (\$/ha)	-	(2 052)	
Différence de coût avec la référence (\$/ha)	-	20 881	
Marge avec la référence (\$/ha)	-	(22 933)	
Délai de récupération (an)	-	-	
Seuil de rentabilité (ha/an)	-	-	

Ce tableau permet une comparaison rapide des principaux éléments économiques liés aux techniques testées. À noter que les éléments liés au financement ne font pas partie du cadre du projet, même s'ils sont importants à considérer lors de l'évaluation d'un scénario d'achat pour une entreprise donnée.

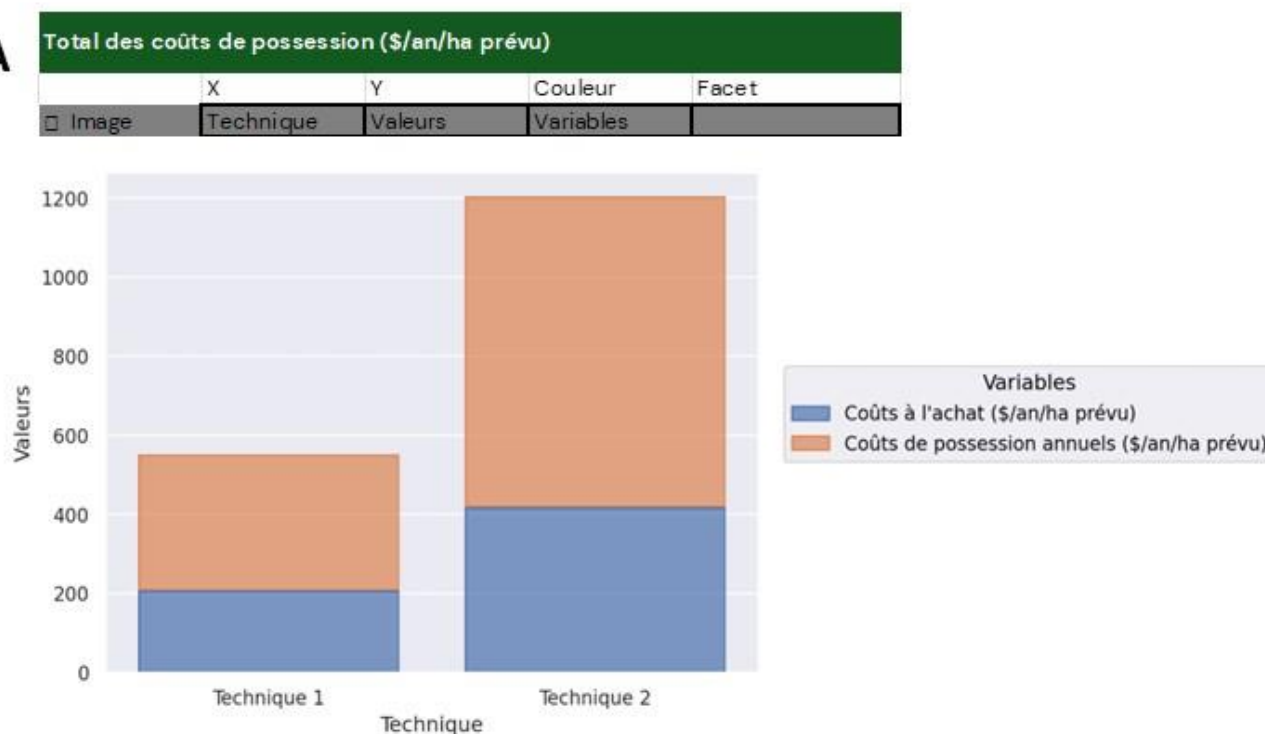
Des notes (en gris, dans la colonne I) fournissent des informations supplémentaires sur le contenu du tableau. Certaines lignes présentent des informations similaires, mais exprimées selon différentes unités. Par exemple, la ligne 15 (Excel) présente l'ensemble des coûts à l'achat répartis sur la durée de vie, alors que la ligne 16 exprime cette valeur par superficie d'opération prévue. Ainsi, le tableau offre une perspective à la fois sur les coûts annuels et sur les coûts par hectare. La majorité des valeurs du tableau sont calculées dans l'onglet *Cal. Champs*, afin d'être exportées et traitées selon les besoins des utilisateurs.

Les deux dernières sections du tableau nécessitent la saisie des données de rendement, de revenu et de prix; en l'absence de ces données, elles demeurent vides. L'analyse de rentabilité présente d'abord une comparaison des rendements, ce qui facilite l'interprétation de la section suivante portant sur les revenus estimés. L'écart entre ces revenus indique le gain ou la perte de revenus observés durant l'étude. Ce gain/perte est ensuite comparé aux coûts d'opération associés à la technique évaluée.

Une note précise que cette dernière valeur prend en compte l'ensemble des coûts de désherbage, mais seulement le gain marginal de revenu. Cette ligne doit être utilisée uniquement lorsqu'un témoin enherbé est présent, ce qui permet de déterminer s'il est rentable d'effectuer un désherbage.

Finalement, la dernière section du tableau présente la comparaison intermodèle. Elle permet une comparaison directe entre deux techniques. Par exemple, dans le tableau 10, la valeur -2 052 indique que le revenu est plus élevé pour la technique de référence 1 que pour la technique de test 2.

A



B

Technique	Technique 1	Technique 2	Aucune
Coûts de possession			
Coût d'achat (\$)	40 000	50 000	
Ensemble des coûts à l'achat (\$)	41 250	40 125	
Coûts à l'achat (\$/an)	4 125	5 016	
16 Coûts à l'achat (\$/an/ha prévu)	206	418	
Coûts de possession annuels (\$/an)	6 900	9 425	
18 Coûts de possession annuels (\$/an/ha prévu)	345	785	
Total des coûts de possession (\$/an)	11 025	14 441	
20 Total des coûts de possession (\$/an/ha prévu)	551	1 203	

Figure 15 : Coûts de possession à l'achat et coûts de possession annuels pour les deux techniques ou technologies de désherbage comparées.

La figure 15 illustre la ligne 20 du tableau précédent (figure 15B), soit la somme des coûts à l'achat par superficie (ligne 16) et des coûts de possession annuels par superficie (ligne 18) afin d'offrir une comparaison visuelle.

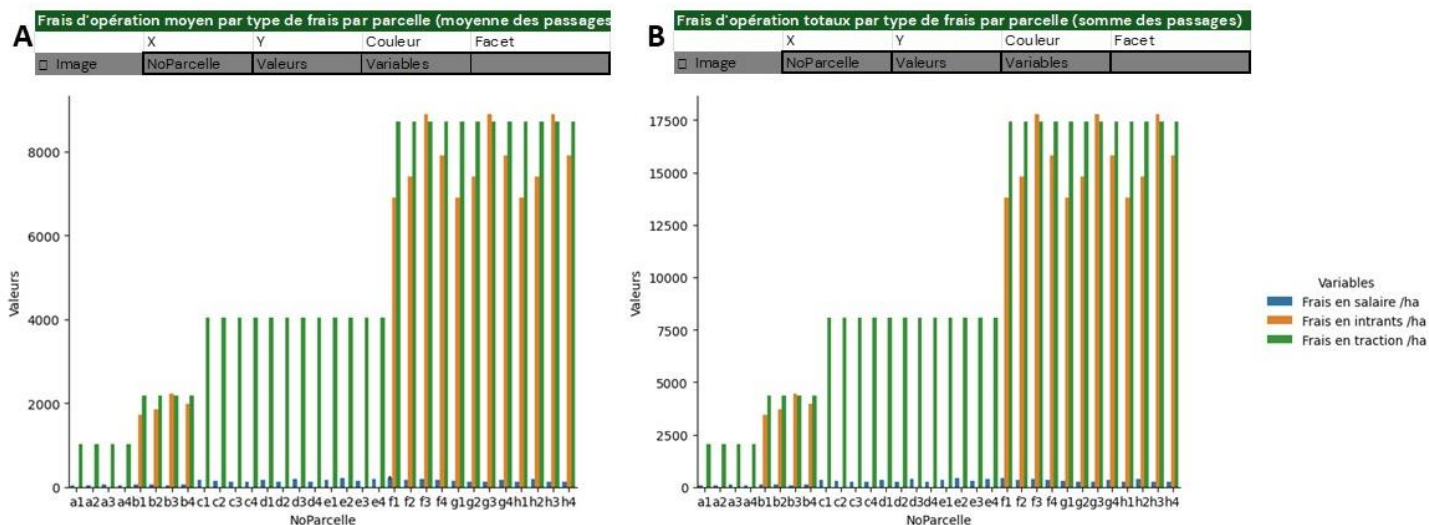


Figure 16 : Frais d'opération moyens (A) ou totaux (B) par parcelle et par type de frais : salaires, intrants ou traction.

Alors que les lignes 23 à 31 du tableau (Excel) présentent des valeurs moyennes des frais d'opération pour chaque technique, les figures 16A et 16B permettent de visualiser le détail par parcelle, ce qui aide à comprendre les variations observées.

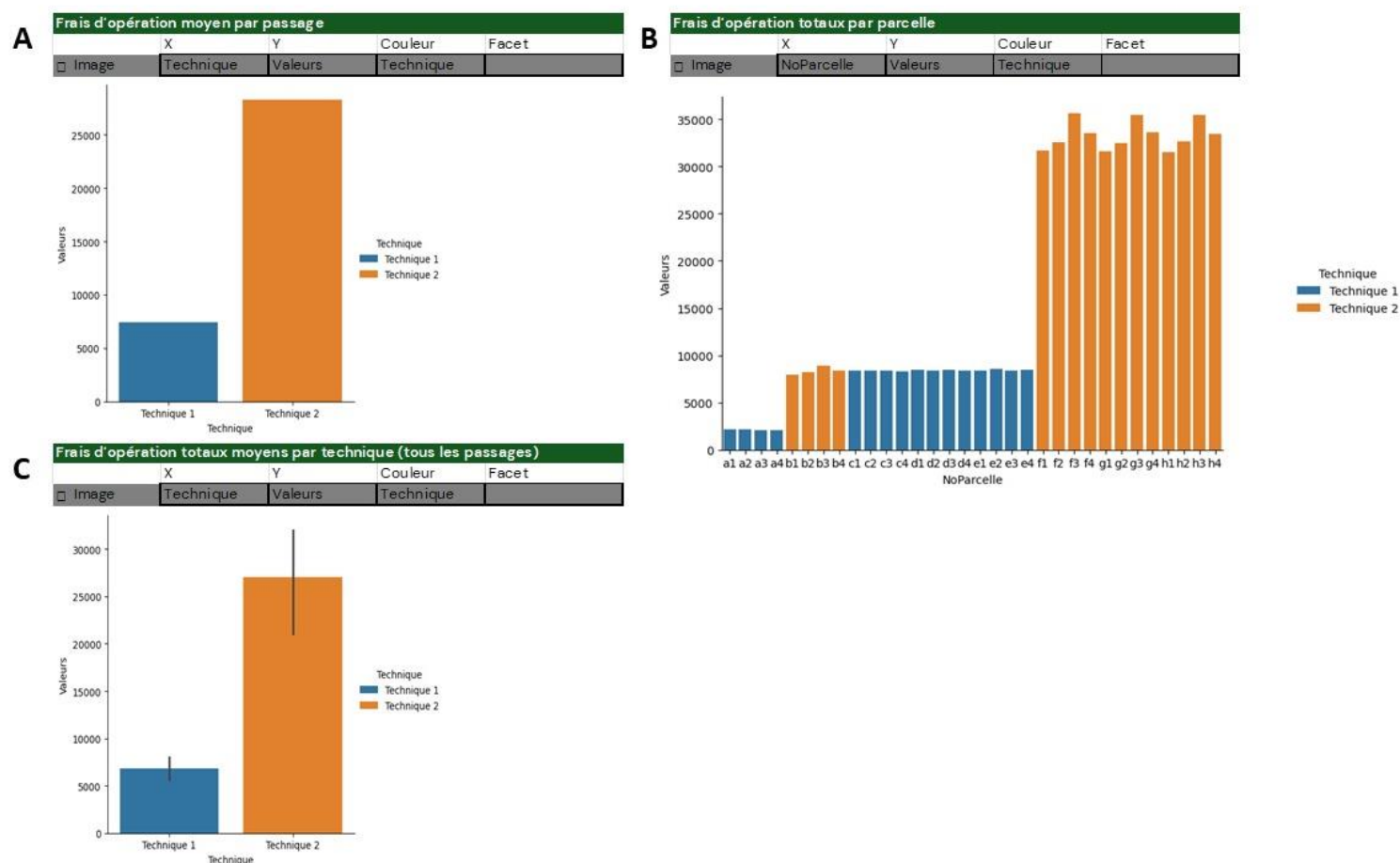


Figure 17 : Frais d'opération totaux pour les deux techniques de désherbage comparées, soit les frais moyens par passage (A), les frais totaux pour tous les passages (C) ou le détail des frais totaux par parcelle (B).

Les figures 17A, 17B et 17C illustrent :

- Les frais moyens par passage (A),
- Le détail des frais totaux par parcelle (B),
- Les frais totaux pour l'ensemble des passages (C).

Ces figures reprennent des informations également présentes dans les lignes (Excel) 26 et 32 du tableau.

Les figures 18A et 18B présentent les données des lignes 43 à 46 (Excel). Comme dans le tableau, les rendements sont d'abord présentés afin de faciliter l'interprétation de l'estimation des revenus. La figure 18C illustre la marge résiduelle observée, qui n'est interprétable que dans certains cas précis.

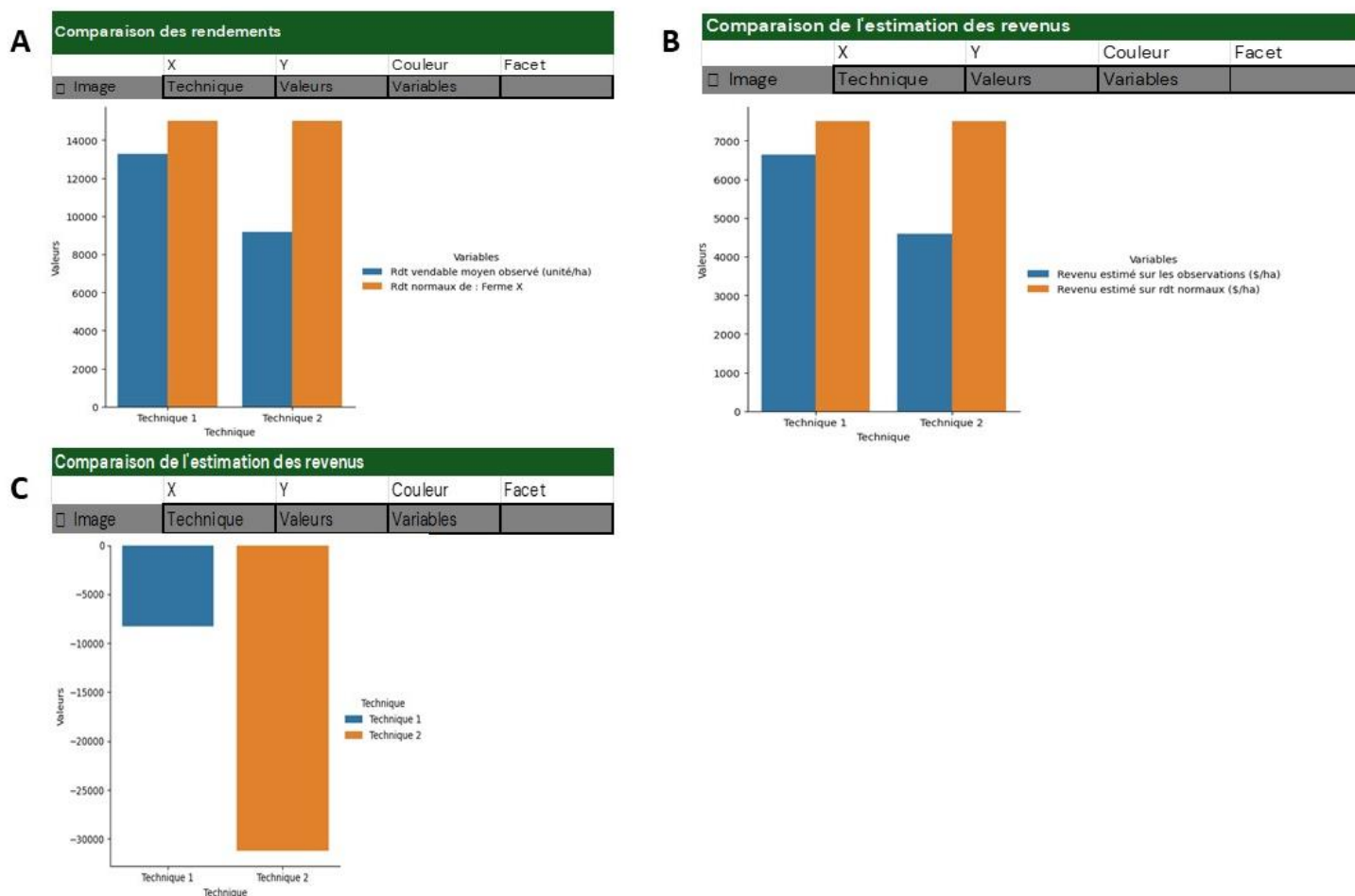


Figure 18 : Comparaison des revenus entre les deux techniques de désherbage comparées.

6 Conclusion

Le développement de nouvelles technologies de désherbage représente une opportunité majeure pour soutenir la compétitivité et la durabilité des entreprises maraîchères du Québec. Toutefois, leur adoption demeure limitée en raison du manque de validation indépendante, de l'incertitude quant à leur performance dans les conditions locales et des investissements importants qu'elles exigent. Le présent guide d'utilisation a été conçu précisément pour répondre à ces enjeux, en proposant un protocole d'évaluation rigoureux, reproductible et adaptable, ainsi qu'un outil technico-économique permettant d'interpréter les résultats de manière objective et transparente.

Le protocole présenté offre un cadre méthodologique clair pour la mise en place d'essais au champ, depuis la sélection des technologies et des cultures jusqu'à l'implantation des parcelles, la prise de données et l'analyse des résultats. En s'appuyant sur des critères techniques, économiques et opérationnels reconnus dans la littérature scientifique et validés par les

producteurs, il permet d'obtenir une vision complète de la performance réelle des technologies évaluées. L'utilisation de quadrats permanents, la mesure systématique de l'efficacité du désherbage et des dommages à la culture, ainsi que la prise en compte des rendements commercialisables assurent une évaluation agronomique solide. Parallèlement, l'analyse économique intégrée permet d'estimer les coûts de possession et d'opération, de comparer les technologies sur une base commune et d'appuyer les décisions d'investissement.

L'outil Excel associé au protocole constitue un complément essentiel, facilitant la compilation des données, automatisant les calculs et générant des tableaux de bord visuels qui rendent l'interprétation des résultats intuitive et accessible. Il permet non seulement de comparer plusieurs techniques, mais aussi d'explorer différents scénarios d'utilisation selon les réalités propres à chaque entreprise. En ce sens, cet outil est conçu pour être utilisé tant par les chercheurs que par les conseillers et les producteurs.

En mettant à disposition un protocole générique et un outil de comparaison technico-économique standardisé, ce guide vise à harmoniser les pratiques d'évaluation, à améliorer la qualité et la comparabilité des essais réalisés au Québec et à accélérer la diffusion de connaissances fiables sur les technologies de désherbage. Il constitue également une base évolutive : les utilisateurs sont encouragés à l'adapter, à l'enrichir et à le faire évoluer en fonction des innovations technologiques, des besoins émergents et des réalités propres aux différentes productions maraîchères.

En somme, ce guide se veut un levier concret pour soutenir l'innovation en agroenvironnement, réduire les risques associés à l'adoption de nouvelles technologies et contribuer à une gestion des mauvaises herbes plus efficace, durable et économiquement viable pour les producteurs maraîchers du Québec.

ANNEXE 1 — CRITÈRES ÉCONOMIQUES

Indicateurs économiques

Les coûts sont souvent les principaux facteurs de rentabilité dans la production végétale, car un producteur n'a qu'un contrôle limité sur les prix. Par conséquent, des études ont examiné les effets des pratiques de désherbage sur les coûts de production (Strik, Larco et al. 2007) tout en maintenant les revenus constants (Marshall, Fyfe et collab. 2019). Les postes de coûts peuvent être répartis en différents segments tels que la prérécolte, la gestion des mauvaises herbes ou la récolte, en fonction de leur importance relative et de la structure des coûts pour un système de culture spécifique (Bangarwa, Norsworthy et al. 2010) ; (Shrestha, Kurtural et al. 2013). Des coûts substantiels sont souvent encourus sans flux concomitant de revenus, par exemple pendant la période d'établissement des arbres fruitiers et des arbres à noix, des légumes comme les asperges ou des fruits comme les bleuets. Il est donc judicieux de distinguer les effets des pratiques de désherbage sur les coûts en fonction des catégories les plus pertinentes pour le système de culture.

Cependant, les prix des produits fluctuent dans le temps et, en fin de compte, le rendement net, défini par la différence entre les revenus et les coûts associés à une activité agricole spécifique, est un indicateur plus complet de la faisabilité économique. C'est pourquoi la plupart des études s'appuient sur des mesures de rendement net ou des ratios coûts-avantages (Bangarwa, Norsworthy et al. 2010) ; (Dixon and Strik 2016); (Strik and Vance 2017); (DeJonghe, Søren et al. 2023)). Les méthodes de budgétisation partielle sont souvent utilisées pour calculer les rendements nets (Marshall, Fyfe et collab. 2019). La budgétisation partielle cherche à évaluer les conséquences financières d'un changement au sein d'une exploitation agricole, comme l'adoption d'une pratique de désherbage. Les améliorations et les détériorations financières résultant des augmentations ou des diminutions des coûts et des recettes sont calculées pour estimer les conséquences financières nettes. Les budgets partiels sont utiles si les changements sont de portée limitée. Toutefois, l'évaluation de changements plus complets nécessite la budgétisation de l'ensemble de l'exploitation agricole plutôt que d'une activité agricole spécifique (Levallois 2018).

Les approches modélisées sont utilisées pour tenir compte du fait que les principaux postes de coûts d'une approche budgétaire partielle peuvent ne pas être directement mesurables ou directement affectés à une activité spécifique. Dans ce cas, le coût des réparations, de l'entretien, de la dépréciation, etc. doit être estimé sur la base de valeurs de référence (Lazarus and Selley A 2002).

Indicateurs de capital

La taille d'une exploitation agricole influe sur la faisabilité d'une pratique de désherbage donnée. À mesure que l'échelle augmente, les apports de capitaux, qu'ils soient physiques ou humains, augmentent également. Une pratique peut être économiquement réalisable à petite échelle, mais pas à grande échelle, et vice versa. Par exemple, le désherbage manuel peut impliquer une fatigue et des efforts considérables de la part des travailleurs agricoles, ce qui peut avoir un impact sur la disponibilité et la rétention de la main-d'œuvre (DeJonghe, Søren et al. 2023). Plus l'exploitation est grande, plus les besoins en main-d'œuvre peuvent devenir un facteur limitant. Les heures de travail, les employés équivalents temps plein, et le coût par unité de terre sont des paramètres couramment utilisés.

La faisabilité d'une pratique de désherbage dépend également de la machinerie en tant que facteur de production. Vahdanjoo et collab. (2023) comparent les performances de différents robots pour la plantation et le désherbage. Les auteurs tiennent compte des différences de coûts, mais aussi de la taille des champs et de la largeur des outils. Les économies en termes d'heures de travail et de carburant sont prises en compte. Les mesures de l'efficacité du champ, définie comme le temps de fonctionnement productif divisé par le temps de fonctionnement total, et de la capacité effective du champ, défini comme la vitesse de travail multipliée par la largeur de l'outil multipliée par l'efficacité du champ sur un nombre constant d'heures de travail par jour, sont calculées. Les auteurs constatent que les systèmes robotisés sont 9 % plus performants que les machines conventionnelles en matière d'efficacité opérationnelle, tandis que la capacité effective du champ est jusqu'à 3,6 fois inférieure pour les systèmes robotisés (Vahdanjoo, Gislum et al. 2023).

En outre, les machines et les outils ont des exigences différentes en matière de force de traction et nécessitent donc des tracteurs d'une puissance adéquate. La comparaison des exigences en matière de force peut se faire en estimant des valeurs modélisées basées sur les spécifications de l'outil (Hunt and Wilson 2015) ou les informations du fournisseur. En outre, les

vitesses de travail, mesurées en distance parcourue par unité de temps, peuvent avoir un impact sur le coût de la consommation de carburant (Naruhn, Peteinatos et al. 2021).

Indicateurs long terme

Il a été démontré que l'utilisation de techniques d'analyse des investissements et de pratiques de gestion financière améliorerait la viabilité économique des exploitations agricoles (Eddy and LaDue 2002). Comme c'est souvent le cas dans l'agriculture, le capital est investi et les coûts sont supportés pendant une longue période avant que des revenus concomitants ne soient générés. Une budgétisation et une planification adéquates des flux de trésorerie futurs constituent donc un moyen important d'orienter les décisions relatives à l'impact à long terme.

Strik et Vance (2016) comparent le revenu net cumulatif sur une période de 8 ans pour trois méthodes de gestion des mauvaises herbes en production biologique de bleuets (Strik and Vance 2017). Ils présentent des tableaux de coûts et de revenus qui illustrent comment le revenu net diffère selon les phases de production, de l'établissement à la maturité.

Hofstrand (2023) détaille les mesures d'investissement économique à long terme couramment utilisées, telles que le délai de récupération, la valeur actuelle nette et le taux de rendement interne. Le délai de récupération est le nombre d'années nécessaires pour que la somme des flux de trésorerie futurs soit égale au coût de l'investissement initial. L'indicateur indique le temps nécessaire pour qu'un investissement devienne rentable. La valeur actuelle nette tient compte de la valeur temporelle de l'argent et actualise les flux de trésorerie futurs pour refléter le coût du capital ou le taux de rendement attendu des propriétaires. Enfin, le taux de rendement interne indique le taux d'actualisation nécessaire pour que la valeur actuelle nette des flux de trésorerie futurs soit égale à un. Le taux de rendement interne peut être comparé au taux de rendement attendu par le propriétaire pour évaluer différents projets ou pratiques d'investissement (Hofstrand 2023).

Les mesures d'évaluation à long terme ont leurs propres caractéristiques et la nature de l'analyse déterminera la mesure ou la combinaison de mesures à utiliser.

Analyse de sensibilité

Les exploitations agricoles opèrent dans des environnements dynamiques. L'interprétation adéquate de la faisabilité économique des pratiques de désherbage peut dépendre de la nature et du niveau de densité des mauvaises herbes (Strik, Larco et al. 2007), de la disponibilité locale de la main-d'œuvre et des salaires (Bangarwa, Norsworthy et al. 2010), du type de machinerie, du moment du traitement ou du nombre de passages (Naruhn, Peteinatos et al. 2021), ainsi que de variables économiques telles que les taux d'intérêt ou les prix. C'est pourquoi il est bon d'évaluer la faisabilité dans le cadre de différents scénarios (Marshall, Fyfe et collab. 2019) dans lesquels l'impact des différentes hypothèses sera évalué. Le degré de réalisme de ces hypothèses peut influencer sur le résultat de l'analyse et doit donc faire l'objet d'une attention particulière (Lazarus and Selley A 2002).

ANNEXE 2 — CONCEPTS DERRIÈRE L'ÉLABORATION DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Les concepts fondamentaux pour l'élaboration des dispositifs expérimentaux ont été établis avec les premiers travaux de Fisher (1935) dans le domaine de la recherche agricole. Ces concepts se sont depuis étendus dans d'autres disciplines scientifiques et se retrouvent dans des ouvrages généraux sur les statistiques appliquées (par exemple (Sokal and Rohlf 1981) (Steel and Torrie 1980), (Zar 1996)) et dans des enquêtes (Sutherland 2006). Afin de permettre l'analyse et la discussion, les résultats d'une expérience scientifique doivent répondre à certains critères concepts :

- Représentatif : être représentatif de toutes les conditions auxquelles le résultat est destiné (région, conditions météorologiques, types de sol, cultures, etc.)
- Non biaisé : les estimations des différences entre les traitements doivent être précises ou exemptes de biais (pas de variables confondantes).
- Robustesse et précision : Les résultats doivent être suffisamment fiables et précis pour être utiles dans la pratique (puissance statistique suffisante).

Représentativité

Les résultats des expériences doivent être applicables à toutes les conditions dans lesquelles l'outil d'aide à la décision est conçu, y compris les régions géographiques, les conditions météorologiques, les types de sol, les cultures, etc. Les expériences doivent être menées dans toute la gamme de ces conditions (toutes les conditions et combinaisons de conditions pertinentes). Ne pas couvrir l'éventail des conditions pour lesquelles l'outil est destiné signifie que les résultats devront être extrapolés, ce qui est plein d'embûches. En agriculture, les études scientifiques doivent souvent être répétées au moins deux ans pour couvrir les variations des conditions météorologiques. Cependant, les conditions météorologiques peuvent être tellement variables d'une année à l'autre que même deux années d'expérience peuvent ne pas être représentatives des suivantes.

Si le résultat d'une expérience doit être représentatif, l'échantillonnage ne doit pas nécessairement l'être ; il peut être plus instructif d'échantillonner de manière stratifiée ((Atlin, Baker et collab. 2000) (Brown, Robertson et collab. 2015), (Sutherland 2006)). Imaginons que l'on échantillonne 10 champs dans une région composée à 90 % de sols de type A et à 10 % de sols de type B. Un échantillonnage représentatif (9 fermes de type de sol A et 1 ferme de type de sol B) limiterait considérablement toute inférence sur l'effet des traitements dans le type de sol B. Au lieu de cela, un échantillonnage stratifié devrait être utilisé pour assurer une taille d'échantillon égale ou minimale par type de sol (par exemple 5:5 ou 6:4). Les résultats peuvent alors être présentés pour chaque type de sol. En outre, on peut vouloir suréchantillonner certaines strates (par exemple le type de sol), si l'on s'attend à ce que leur résultat soit plus variable et difficile à estimer (Steel and Torrie 1980).

Des résultats non biaisés

Les expériences doivent produire des résultats impartiaux qui reflètent les effets réels des traitements. Un résultat biaisé fournira de fausses informations, ce qui entraînera de mauvaises décisions telles que la recommandation de l'outil de désherbage le moins efficace. Les résultats expérimentaux peuvent être biaisés en cas de variables confondantes ou de colinéarité entre les variables indépendantes (Dormann, Elith et al. 2013).

Les variables confondantes sont des facteurs que nous n'avons pas mesurés ou qui n'ont pas été contrôlés et qui affectent notre variable de réponse (par exemple, le rendement). Par exemple, certains traitements peuvent être appliqués par différentes personnes, et le soin apporté par chacune d'entre elles influe sur l'efficacité des traitements. Certains traitements peuvent alors sembler meilleurs que d'autres, mais uniquement en raison de la personne qui les applique plutôt que du traitement lui-même. Pour résoudre ce problème, il convient d'examiner attentivement toutes les variables susceptibles d'exercer une influence et de les contrôler, ou du moins de s'assurer qu'elles ne sont pas corrélées aux variables d'intérêt. Les variables confondantes potentielles peuvent être l'année de l'essai, le cultivar, le type de sol, le moment de l'application, etc. Toutes les variables susceptibles d'influer sur le résultat doivent être égales entre les traitements afin d'exclure les variables confondantes et les biais possibles.

La colinéarité décrit des données pour lesquelles il existe une corrélation entre deux ou plusieurs variables indépendantes, de sorte qu'il est impossible de déterminer laquelle affecte la réponse. Par exemple, si le traitement A est appliqué à un cultivar et le traitement B à un autre cultivar, il sera impossible de distinguer les effets du traitement de ceux du cultivar sur le résultat. La conception des expériences doit donc exclure les variables confondantes et la colinéarité afin d'éviter les biais.

Des résultats robustes et précis

Même avec des données représentatives et non biaisées, il n'est pas garanti que les résultats d'une expérience soient instructifs. Les résultats tels que le rendement des cultures ou la survie des mauvaises herbes sont influencés par l'hétérogénéité des plantes et des nombreux facteurs non mesurés (par exemple, des facteurs biologiques, physiques, chimiques ou météorologiques), de sorte que les résultats des expériences sont toujours variables et que toute conclusion s'accompagne d'un certain degré d'incertitude. Par exemple, des plantes différentes se trouvent dans des sols ou des microclimats légèrement différents, ou sont exposées à des parasites différents, et ont donc des sensibilités différentes à une méthode de désherbage donnée. Selon la parcelle d'un champ qui est échantillonnée, un résultat peut aller dans un sens ou dans l'autre (erreur d'échantillonnage). Avec très peu de répétitions (petite taille de l'échantillon), les résultats seront généralement peu concluants et parfois trompeurs. Un échantillon de taille suffisante augmente la précision et réduit l'incertitude associée ou le risque de résultats erronés. La faible taille des échantillons, combinée au biais de publication, est à l'origine d'une remise en question de la fiabilité des études scientifiques publiées ((Button, Ioannidis et collab. 2013), (Ioannidis 2005)).

ANNEXE 3 — ÉLÉMENTS FONDAMENTAUX DES DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

Les éléments fondamentaux des dispositifs expérimentaux visant à assurer la représentativité, l'absence de biais et la précision ont été établis très tôt par Fisher (1935) alors qu'il travaillait dans un environnement agricole. Ces éléments se sont répandus dans de nombreux domaines scientifiques (par exemple (Casler. 2015)) et constituent les bases de tout plan d'expérience :

- Unités expérimentales : l'échelle à laquelle les mesures sont prises ;
- Réplication : le nombre d'unités d'observation/expérimentation utilisées pour chaque traitement ;
- Randomisation : affectation aléatoire des unités expérimentales aux traitements ;
- Groupement par bloc : regroupement d'unités expérimentales afin d'équilibrer les facteurs confondants de manière égale entre les traitements.

Les unités expérimentales

L'unité expérimentale définit l'échelle à laquelle les traitements peuvent être assignés individuellement et les mesures prises. Si cela était possible, on mesurerait l'efficacité du désherbage dans des champs entiers et dans tous les champs d'une région d'intérêt, mais cela n'est pas possible. On choisit une unité d'observation pour définir l'échelle à laquelle les résultats sont significatifs (par exemple, un champ dans le contexte de traitements appliqués à des champs entiers dans une région). Les unités expérimentales sont alors des sous-ensembles ou des parties de l'unité d'observation (par exemple, des parcelles dans un champ). Elles doivent être suffisamment petites pour être réalisables, bien sûr, mais aussi suffisamment grandes pour exclure la variance à une échelle qui n'est pas pertinente (par exemple, la variabilité entre les plantes individuelles n'est pas pertinente à l'échelle d'un champ entier). Les unités expérimentales doivent également permettre à l'expérimentateur d'appliquer des traitements individuels à chaque unité sans déborder sur les unités adjacentes. Cette possibilité sera limitée en partie par la précision ou la taille de l'équipement utilisé.

La réplication

Les répliques peuvent être définies différemment en fonction de l'objectif de la recherche. Si l'on ne s'intéresse qu'à un seul champ, les répliques peuvent être définies comme des parcelles à l'intérieur de ce champ. Si l'on étudie l'effet des traitements dans plusieurs champs d'une région, on considérera le nombre de champs comme le nombre de répliques (ou la taille de l'échantillon). Ce faisant, l'expérience permettrait d'estimer la variabilité entre les champs (Ritz, Kniss et collab. 2015). Dans ce dernier cas, le nombre de patchs à l'intérieur de chaque champ ne représente pas de véritables répliques, car ils n'influencent pas le nombre de champs ; il s'agit plutôt de pseudo-répliques ((Hurlbert 1984);(Millar and Anderson 2004);(Vickers 2003)). Le fait d'avoir des pseudo-répliques améliore les estimations pour les champs inclus dans l'expérience, mais contribue peu à l'amélioration de l'estimation globale. La réplication peut également être temporelle (par exemple sur plusieurs années) afin que les résultats puissent être généralisés aux années suivantes.

La randomisation

La randomisation joue un rôle crucial lors de la sélection des unités d'observation (par exemple les champs d'une région) ou des unités expérimentales (par exemple les parcelles d'un champ). Un grand nombre de champs (par exemple 40/50 champs ou 100/200 champs) sélectionnés au hasard dans une région garantit presque une bonne représentation. Toutefois, pour les échantillons de plus petite taille, les champs doivent être sélectionnés par stratification afin de tenir compte des facteurs d'influence connus ou de leurs combinaisons (par exemple, les propriétés du sol, le climat, la pente, etc.). Lorsque la participation à une expérience se fait sur une base volontaire, la sélection aléatoire peut ne pas être possible. Il faut alors être conscient des biais potentiels de ces « échantillons non probabilistes » et utiliser des méthodes statistiques pour les prendre en compte lorsque cela est possible (Elliott and Valliant 2017).

La randomisation est également un critère essentiel pour éviter les biais lors de l'attribution des traitements. L'attribution aléatoire des traitements permet d'éviter que des variables confondantes soient corrélées aux traitements. Dans le cas d'échantillons de très grande taille (des dizaines ou des centaines par traitement), les biais seront probablement minimes. La taille des échantillons est cependant souvent limitée dans les expériences sur le terrain, de sorte que les variables potentiellement confondantes doivent être identifiées et la randomisation doit être effectuée dans des sous-ensembles similaires du champ (plan stratifié). Par exemple, s'il y a deux types de sol dans un champ et que nous assignons un

traitement (contrôle versus désherbage) à douze parcelles, nous devons nous assurer qu'il y a trois parcelles par type de sol et par traitement.

Groupement par bloc

L'utilisation des blocs est souvent utilisée pour stratifier au sein d'un champ, où les unités expérimentales sont regroupées dans des parties homogènes d'un champ (un bloc). Cela garantit que l'hétérogénéité du champ (drainage, propriétés du sol, exposition au vent, etc.) affecte tous les traitements de la même manière et évite le problème des variables confondantes.

ANNEXE 4 — CHOIX DES TECHNOLOGIES DE DÉSHÉRBAGE

Le guide d'utilisation présente le protocole d'évaluation des technologies de désherbage dans les cultures maraîchères pour des essais au champ et l'outil de comparaison technico-économique, sans préciser les technologies à comparer. En effet, ce protocole se veut générique, et le choix des technologies est laissé à l'utilisateur qui est un centre de recherche. Idéalement, le choix des technologies de désherbage à évaluer et comparer devrait se faire en collaboration avec un agronome et un producteur. Ceci permettra l'évaluation des technologies de désherbage les plus pertinentes pour le secteur.

Une façon de déterminer si une nouvelle technologie de désherbage répond aux besoins d'un producteur et s'il serait tenté de faire un essai à la ferme est de spécifier les exigences requises pour le nouvel équipement. Il est proposé ici de le faire sous forme d'un cahier de charge d'achat (Tableau 7). Celui-ci permet de déterminer les besoins et les exigences relatives à l'achat. Par la suite, la comparaison entre différents produits ou modèles est effectuée pour voir lequel répond le mieux aux exigences du cahier de charge d'achat (Tableau 8). L'information peut être obtenue directement chez le fournisseur, dans des guides techniques, etc. Les tableaux 7 et 8 sont inspirés d'un cas fictif d'achat d'une nouvelle technologie de désherbage dans une ferme maraîchère. Les exigences de l'équipement ainsi que les technologies comparées sont des exemples et peuvent être modifiés au besoin. De plus, certaines exigences pourraient être plus importantes que d'autres et listées ou pondérées en fonction des priorités.

Dans cette étape, il est possible de comparer autant des technologies qu'on veut, et même il est conseillé d'inclure la comparaison des différents modèles d'une même technologie, car le but est précisément d'identifier la technologie qui répond le mieux aux besoins de l'entreprise. C'est également important d'inclure une colonne avec la technologie de désherbage utilisée actuellement. Cela servira comme une base de comparaison, car toute nouvelle technologie devrait offrir un avantage net comparé à la technologie actuelle. À la fin de cet exercice, il est préférable de choisir une seule technologie, celle qu'offrent le plus d'avantages, et qui sera évaluée au champ et comparée avec la technologie de désherbage actuelle. L'outil technico-économique permet toutefois la comparaison de trois technologies de désherbage.

Tableau 11 : Spécification des exigences relatives à l'achat d'une nouvelle technologie de désherbage (cahier de charge d'achat). Les équipements concernés pour l'achat d'un nouvel équipement de désherbage doivent souscrire aux exigences listées ci-dessous. Il est fortement encouragé que ces exigences soient révisées et modifiées selon les besoins spécifiques à chaque ferme.

Exigences à remplir pour le nouvel équipement de désherbage
1) Est versatile et peut être employé dans toutes les cultures horticoles cultivées sur la ferme 2) Est versatile et peut faire du désherbage localisé, de pleine surface ou les deux 3) Est versatile et peut faire du désherbage sur le rang de la culture principale, dans l'entre-rang ou les deux 4) Possible de l'installer avec un attelage trois points 5) Les tracteurs à la ferme sont compatibles avec le nouvel équipement (force) 6) La vitesse d'avancement est suffisante pour couvrir une superficie de travail intéressante pour les besoins de la ferme 7) Avoir un dégagement en hauteur de ? mètres (hauteur à remplir par le producteur) 8) Avoir une largeur de travail avec une rampe de ? Mètres (longueur de rampe à remplir par le producteur) 9) Possibilité de désherber la nuit 10) S'il s'agit d'un pulvérisateur : possède une cuve de ? Litres (volume à remplir par le producteur) ; 11) S'il s'agit d'un pulvérisateur : optionnel (si possible), pouvoir accueillir deux cuves ; 12) S'il s'agit d'un pulvérisateur : avoir un système de pulvérisation pouvant être nettoyée facilement avec un collecteur 13) S'il s'agit d'un pulvérisateur : avoir une cuve de rinçage de ? Litres (volume à remplir par le producteur) 14) S'il s'agit d'un pulvérisateur : avoir des panneaux antidérive 15) S'il s'agit d'un pulvérisateur : Possibilité d'utiliser l'équipement pour d'autres types de pulvérisation (insecticide, fongicide) 16) Présence d'un vendeur ou d'un distributeur d'équipement situé au Québec 17) Service après-vente offert par le vendeur ou le distributeur (par exemple : garantie prolongée, résolution de problèmes, accompagnement agronomique) 18) Formation offerte le vendeur ou le distributeur 19) Mon entreprise peut se permettre le coût d'acquisition de l'équipement 20) Les coûts d'abonnement annuel pour la technologie sont raisonnables (par exemple un coût pour la détection des mauvaises herbes par culture) 21) Mon entreprise peut se permettre le temps de formation nécessaire pour opérer cet équipement 22) Il existe un itinéraire technique pour l'intégration de la nouvelle technologie dans la régie de culture actuelle 23) La technologie est commercialisée (pas en précommercialisation) 24) L'équipement est disponible dans un délai raisonnable 25) L'équipement possède une certification du groupe CSA (normes de sécurité canadiennes) 26) Autres, à ajouter au besoin 27) Autres, à ajouter au besoin 28) Autres, à ajouter au besoin

Tableau 12 : Comparaison des différentes technologies de désherbage selon les exigences du cahier de charge d'achat. Il y a trois réponses possibles (Oui; Non : Ne S'applique pas). Les réponses s'appliquent à un cas fictif, pour l'achat d'un nouvel équipement de désherbage dans une ferme maraîchère du Québec.

Spécifications/marque et modèle						
	Exigences à remplir pour le nouvel équipement de désherbage	Désherbeur actuel (Pulvérisation et sarclage)	Pulvérisateur ARA	Désherbex	Carbon robotics	Weedzaper
1	Est versatile et peut être employé dans toutes les cultures horticoles cultivées à la ferme	oui	non	non	non	oui
2	Est versatile et peut faire du désherbage localisé, de pleine surface ou les deux	non	oui	non	non	non
3	Est versatile et peut faire du désherbage sur le rang de la culture principale, dans l'entre-rang ou les deux	oui	oui	oui	oui	non
4	Possible de l'installer avec un attelage trois pts	oui	oui	oui	oui	oui
5	Les tracteurs à la ferme sont compatibles avec le nouvel équipement (force)	oui	oui	oui	non	non
6	La vitesse d'avancement est suffisante pour couvrir une superficie de travail intéressante	oui	oui	non	oui	oui
7	Avoir un dégagement en hauteur de 0,5 mètres	oui	oui	oui	oui	oui
8	Avoir une largeur de travail suffisante, avec une rampe d'au moins 6 mètres (20 pieds)	oui	oui	non	oui	oui
9	Possibilité de désherber la nuit	non	oui	non	oui	non
10	S'il s'agit d'un pulvérisateur, possède une cuve de ? litres (volume à remplir par le producteur)	oui	oui	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
11	S'il s'agit d'un pulvérisateur : optionnel (si possible) pouvoir accueillir deux cuves	oui	oui	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
12	S'il s'agit d'un pulvérisateur : Avoir un système de pulvérisation pouvant être nettoyée facilement avec un collecteur	oui	non	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
13	S'il s'agit d'un pulvérisateur : Avoir une cuve de rinçage de ? Litres (volume à remplir par le producteur)	oui	non	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
14	S'il s'agit d'un pulvérisateur : Avoir des panneaux antidérive	non	oui	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
15	S'il s'agit d'un pulvérisateur : Possibilité d'utiliser l'équipement pour d'autre type de pulvérisation (insecticide, fongicide)	oui	oui	ne s'applique pas	ne s'applique pas	ne s'applique pas
16	Présence d'un vendeur ou d'un distributeur d'équipement situé au Québec	ne s'applique pas	oui	oui	non	oui

17	Service après-vente intéressant offert par le vendeur ou le distributeur	ne s'applique pas	oui	oui	oui	oui
18	Formation offerte le vendeur ou le distributeur	ne s'applique pas	oui	oui	oui	oui
19	Mon entreprise peut se permettre le coût d'acquisition de l'équipement	ne s'applique pas	oui	oui	non	oui
20	Les coûts d'abonnement annuel pour la technologie sont raisonnables	ne s'applique pas	non	oui	non	oui
21	Mon entreprise peut se permettre le temps de formation nécessaire pour opérer cet équipement	ne s'applique pas	oui	oui	oui	oui
22	Il existe un itinéraire technique pour l'intégration de la nouvelle technologie dans la régie de culture actuelle	ne s'applique pas	non	non	non	non
23	La technologie est commercialisée (pas en précommercialisation)	ne s'applique pas	oui	non	oui	oui
24	L'équipement est disponible dans un délai raisonnable	ne s'applique pas	oui	non	non	oui
25	L'équipement possède une certification du groupe CSA (normes de sécurité canadiennes)	oui	oui	non	oui	oui
26	Autres à ajouter					
27	Autres à ajouter					
28	Autres à ajouter					

ANNEXE 5 MATÉRIEL POUR L'IMPLANTATION DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET LA PRISE DE DONNÉES AU CHAMP

Piquetage des parcelles et implantation du dispositif expérimental

- ☐ Schéma du dispositif expérimental avec la longueur et la largeur de l'essai, des chacun des blocs et des parcelles, les numéros des parcelles et les traitements associés à chaque parcelle
- ☐ GPS et/ou appareil cellulaire (ex. application ARCMAP)
- ☐ 1 ou 2 masses
- ☐ 1 ou 2 rubans à mesurer (50 m)
- ☐ Équerre optique
- ☐ Corde à balle
- ☐ Des piquets (4 par bloc) — pour identifier le bloc
- ☐ Des drapeaux (4 par parcelle) — pour identifier la parcelle
- ☐ Des drapeaux (4 par parcelle) — pour identifier le quadrat dans chaque parcelle
- ☐ Des ringots (1 par parcelle)
- ☐ Étiquettes préremplies avec l'information de la parcelle (1 par parcelle)
- ☐ Quadrats (1 m sur 1 m)

Dépistage et collecte de données

- ☐ Feuille de prise de données
- ☐ Pad
- ☐ Crayon ou stylo
- ☐ Quadrats (1 m sur 0,5 m) — 1 quadrat par parcelle.
- ☐ Compteur
- ☐ Guide d'identification des mauvaises herbes
- ☐ Caméra photo et/ou appareil cellulaire (avec chargeur)
- ☐ GPS et/ou appareil cellulaire (ex. application ARCMAP)

7 Références citées dans le guide d'utilisation

- Allmendinger, A., et collab. (2024). « Agronomic and Technical Evaluation of Herbicide Spot Spraying in Maize Based on High-Resolution Aerial Weed Maps-An On-Farm Trial. » Plants (Basel) **13**(15).
- APMQ. 2024. Appel d'offres : Développement d'un protocole d'essai pour la collecte de données agronomiques et technico-économiques sur la performance d'une technologie de pulvérisation de précision. 5 pages.
- APMQ (2025). Sondage sur les priorités de recherche dans la production maraîchère au Québec.
- Atlin, G. N., et collab. (2000). « Selection Response in Subdivided Target Regions. » Crop Science **40**(1) : 7-1
- Bangarwa, S. K., et al. (2010). "Economic Returns in Plasticulture Tomato Production from Crucifer Cover Crops as a Methyl Bromide Alternative for Weed Management." HortTechnology **20**(4): 764-771.
- Brown, J. A., et al. (2015). "Spatially Balanced Sampling: Application to Environmental Surveys." Procedia Environmental Sciences **27**: 6-9.
- Button, K. S., et collab. (2013). « Power failure: why small sample size undermines the reliability of neuroscience. » Nature Reviews Neuroscience **14**(5) : 365-376.
- Buzanini, A. C., et collab. (2023). « Evaluation of smart spray technology for postemergence herbicide application in row middles of plasticulture production. » Weed Technology **37**(4): 336-342.
- Casler, M. D. (2015). « Fundamentals of experimental design: Guidelines for designing successful experiments. » Agronomy Journal **107**(2): 692-705.
- DeJonghe, T. W. T., et al. (2023). Cost benefit analysis of robotic weeding in vineyards: A case study from France. Proceedings of the 6th Symposium on Agri-Tech Economics for Sustainable Futures. Newport, United Kingdom, AgEcon.
- Dixon, E. K. and B. C. Strik (2016). "Weed control increases growth, cumulative yield, and economic returns of machine-harvested organic trailing blackberry." Acta Horticulturae(1133) : 323-328.
- Dormann, C. F., et al. (2013). "Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance." Ecography **36**(1): 27-46.
- Eberlein, C. V., et al. (2017). "Broadleaf Weed Control in Potatoes (*Solanum tuberosum*) with Postemergence Directed Herbicides." Weed Technology **7**(2): 298-303.
- Eddy, G. B. and LaDue (2002) Financial Management Practices and Farm Profitability.
- Elliott, M. R. and R. Valliant (2017). "Inference for nonprobability samples." Statistical Science **32**(2): 249-264.
- Farooq, M. H., et al. (2019). "Evaluation of broadcast and spot herbicide applications for narrowleaf goldenrod [*Euthamia graminifolia* (L.) Nutt.] management in lowbush blueberry." Weed Technology **33**(5): 739-747.
- Fisher, R. A. (1935). The Design of Experiments. New York, Hafner Publishing Company.
- Genna, N. G., et al. (2021). "Herbicide Efficacy of Spot Spraying Systems in Fallow and Postharvest in the Pacific Northwest Dryland Wheat Production Region." Plants (Basel) **10**(12).
- Hofstrand, D. (2023). Capital budgeting basics, Ag Decision Maker. **C5(240)**.
- Hunt, D. and D. Wilson (2015). Farm power and machinery management, Waveland Press.
- Hurlbert, S. H. (1984). "Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments." Ecological Monographs **54**(2): 187-211.
- Ioannidis, J. P. A. (2005). "Why most published research findings are false." PLoS Medicine **2**(8): 696-701.
- ITB. (2025). Le désherbage mécanique en betteraves : c'est possible. Institut technique de la betterave. 24 pages.

- Kouame, K. B.-J., et al. (2023). "Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) control affected by weed size and herbicide spray solution with nozzle type pairings." *Weed Technology* **38**.
- Lazarus, W. and R. Selley A (2002). Suggested Procedures for Estimating Farm Machinery Costs. U. o. Minnesota. AgEcon.
- Levallois, R. (2018). *Gestion de l'entreprise agricole : De la théorie à la pratique 2e édition*, Presses de l'Université Laval.
- Lyu, H., et collab. (2022). « Evaluation of broadcast and spot herbicide applications for spreading dogbane (*Apocynum androsaemifolium* L.) management in lowbush blueberry fields. » *Canadian Journal of Plant Science* **102**(6) : 1079-1089.
- Marshal, G., et collab. (2019). Economics of weed management in the Australian vegetable industry: 148.
- Millar, R. B. and M. J. Anderson (2004). "Remedies for pseudoreplication." *Fisheries Research* **70**(2-3 SPEC. ISS.) : 397-407.
- Moore, L. D., et collab. (2023). « Evaluation of electrical and mechanical Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) management in cucumber, peanut, and sweetpotato. » *Weed Technology* **37**(1): 53-59.
- Naruhn, G.-P., et al. (2021). "Efficacy of Various Mechanical Weeding Methods—Single and in Combination—In Terms of Different Field Conditions and Weed Densities." *Agronomy* **11**(10).
- OMAFRA (2025). « Période critique d'absence de mauvaise herbe. » from <https://cropipm.omafra.gov.on.ca/fr-ca/mauvaises-herbes-et-herbicides/information>.
- Ritz, C., et collab. (2015). « Research Methods in Weed Science: Statistics. » *Weed Science* **63**(SP1) : 166-187.
- Shrestha, A., et al. (2013). "Efficiency and cost-effectiveness of cultivators, steam, or an organic herbicide in weed control and vine productivity in organic vineyards in the San Joaquin Valley." *HortTechnology* **23**: 99 - 108.
- Smith, A., et collab. (2019). « Annual weed management in isoxaflutole-resistant soybean using a two-pass weed control strategy. » *Weed Technology* **33**(03): 411-425.
- Sokal, R. R. and F. J. Rohlf (1981). *Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research*. New York, W.H. Freeman and Company.
- Soltani, N., et al. (2024). "Biologically effective dose of diflufenican applied preemergence for the control of multiple herbicide-resistant waterhemp in corn." *Weed Technology* **38**.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie (1980). *Principles and Procedures of Statistics : A Biometrical Approach*. New York, McGraw-Hill, Inc.
- Strik, B., et al. (2007). "The Economics of Establishing Blueberries for Organic Production in Oregon - a Comparison of Weed Management Systems."
- Strik, B. C. and A. J. Vance (2017). "Weed management strategies in long-term organic blueberry production systems – impact of mulch type and weed control methods on economics." *Acta Horticulturae*(1180): 347-354.
- Sutherland, W. J. (2006). *Ecological Census Techniques*. Cambridge, UK, Cambridge University Press : 446-446.
- Vahdanjoo, M., et al. (2023). "Operational, Economic, and Environmental Assessment of an Agricultural Robot in Seeding and Weeding Operations." *AgriEngineering* **5**(1): 299-324.
- Vickers, A. J. (2003). "How many repeated measures in repeated measures designs? Statistical issues for comparative trials." *BMC Medical Research Methodology* **3**(1): 22-22.
- Zar, J. H. (1996). *Biostatistical Analysis*. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall Inc.

8 Liste complète des références retenues pour la revue de littérature

- Adkins, S. and A. Shabbir (2014). "Biology, ecology and management of the invasive parthenium weed (*Parthenium hysterophorus* L.)." Pest Manag Sci **70**(7): 1023-1029.
- Afzal, A. and S. A. Asad (2019). Microbial Applications for Sustainable Agriculture. Innovations in Sustainable Agriculture: 43-77.
- Ahmed, S., et collab. (2021). « Integrated weed management in transplanted rice: options for addressing labor constraints and improving farmers' income in Bangladesh. » Weed Technology **35**(5): 697-709.
- Ahmed, S., et collab. (2014). « Effect of weed management and seed rate on crop growth under direct dry seeded rice systems in Bangladesh. » PLoS ONE **9**(7): e101919.
- Alcantara-de la Cruz, R., et collab. (2021). « Glyphosate ban in Mexico : potential impacts on agriculture and weed management. » Pest Manag Sci **77**(9): 3820-3831.
- Allmendinger, A., et al. (2024). "Agronomic and Technical Evaluation of Herbicide Spot Spraying in Maize Based on High-Resolution Aerial Weed Maps-An On-Farm Trial." Plants (Basel) **13**(15).
- Altman, N. and M. Krzywinski (2015). "Points of significance: Sources of variation." Nature Methods **12**(1): 5-6.
- Anderson, L. W. (2003). « A review of aquatic weed biology and management research conducted by the United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service. » Pest Manag Sci **59**(6-7): 801-813.
- Andreasen, C., et al. (2022). "Laser Weeding With Small Autonomous Vehicles: Friends or Foes?" Frontiers in Agronomy **4**.
- Andrew, I. K., et al. (2015). "A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management." Weed Res **55**(3): 239-248.
- Anne, P., et collab. (2024). « The reduction of chemical inputs by ultra-precise smart spot sprayer technology maximizes crop potential by lowering phytotoxicity. » Frontiers in Environmental Economics **3**.
- APMQ. 2024. Appel d'offres : Développement d'un protocole d'essai pour la collecte de données agronomiques et technico-économique sur la performance d'une technologie de pulvérisation de précision. 5 pages.
- APMQ (2025). Sondage sur les priorités de recherche dans la production maraîchère au Québec.
- Armstrong, J.-J. Q., et collab. (2017). « The Use of Early Season Multispectral Images for Weed Detection in Corn. » Weed Technology **21**(4): 857-862.
- Arnold, B. F., et collab. (2011). « Simulation methods to estimate design power: an overview for applied research. » BMC Medical Research Methodology **11**(1): 94-94.
- Arsenijevic, N., et al. (2021). "Influence of integrated agronomic and weed management practices on soybean canopy development and yield." Weed Technology **36**(1): 73-78.
- Asad, M. H. and A. Bais (2020). « Weed detection in canola fields using maximum likelihood classification and deep convolutional neural network. » Information Processing in Agriculture **7**(4): 535-545.
- Atta-Darkwa, T., et al. (2024). "Effects of varying tillage practices and weed control methods on the efficacy of infiltration models." PLoS ONE **19**(1): e0293507.

- Avent, T. H., et collab. (2024). « Comparing herbicide application methods with See & Spray™ technology in soybean. » Weed Technology **38**.
- Bagavathiannan, M. V., et al. (2017). "Comparison of Weed Management Programs for Furrow-Irrigated and Flooded Hybrid Rice Production in Arkansas." Weed Technology **25**(4): 556-562.
- Bailey, R. A. and A. Sajjad (2021). "Optimal Incomplete-Block Designs with Low Replication: A Unified Approach Using Graphs." Journal of Statistical Theory and Practice **15**(4): 84-84.
- Bajwa, A. A., et al. (2017). "Nonconventional Weed Management Strategies for Modern Agriculture." Weed Science **63**(4): 723-747.
- Balabantaray, A., et al. (2024). "Targeted weed management of Palmer amaranth using robotics and deep learning (YOLOv7)." Front Robot AI **11** : 1 441 371.
- Bangarwa, S. K., et al. (2010). "Economic Returns in Plasticulture Tomato Production from Crucifer Cover Crops as a Methyl Bromide Alternative for Weed Management." HortTechnology **20**(4): 764-771.
- Bastiaans, L., et al. (2008). "Focus on ecological weed management : what is hindering adoption?" Weed Research **48**(6): 481-491.
- Bautista, A. S., et al. (2024). "Remote Sensing Evaluation Drone Herbicide Application Effectiveness for Controlling Echinochloa spp. in Rice Crop in Valencia (Spain)." Sensors (Basel) **24**(3).
- Bean, T. M., et collab. (2023). « Herbicide screening for weed control and crop safety in California melon production. » Weed Technology **37**(3): 259-266.
- Beiermann, C. W., et al. (2021). "Influence of planting date and herbicide program on Amaranthus palmeri control in dry bean." Weed Technology **36**(1): 79-85.
- Beiermann, C. W., et al. (2021). "Critical timing of weed removal in dry bean as influenced by the use of preemergence herbicides." Weed Technology **36**(1): 168-176.
- Berge, T. W., et collab. (2023). « A Sensor-Based Decision Model for Precision Weed Harrowing. » Agronomy **14**(1).
- Besançon, T. E. and W. Bouchelle (2023). "Weed control and highbush blueberry tolerance with indaziflam on sandy soils." Weed Technology **37**(3): 213-220.
- Bessette, D., et al. (2019). "An online decision support tool to evaluate ecological weed management strategies." Weed Science **67**(4): 463-473.
- Bloomer, D. J., et collab. (2023). « Robots and shocks: emerging non-herbicide weed control options for vegetable and arable cropping. » New Zealand Journal of Agricultural Research **67**(1): 81-103.
- Boari, A., et al. (2016). "Parasitic weed management by using strigolactone-degrading fungi." Pest Manag Sci **72**(11): 2043-2047.
- Borger, C. P. D. and M. J. Slaven (2024). "Electric inter-row control of lupin plants does not adversely affect the neighbouring non-target lupin plants." Weed Science: 1-32.
- Borges, A., et al. (2019). "Can spatial modeling substitute for experimental design in agricultural experiments?" Crop Science **59**(1) : 44-53.

- Bose, R. C. and S. S. Shrikhande (1960). "On the Composition of Balanced Incomplete Block Designs." Canadian Journal of Mathematics **12**: 177-188.
- Bothwell, L. E., et al. (2018). "Adaptive design clinical trials: a review of the literature and ClinicalTrials.gov." BMJ Open **8**(2): e018320-e018320.
- Bourdôt, G. W., et al. (2018). A national weed management decision-support system.
- Brankov, M., et al. (2023). "Effects of nozzle type and adjuvant selection on common lambsquarters (*Chenopodium album*) and johnsongrass (*Sorghum halepense*) control using nicosulfuron in corn." Weed Technology **37**(2): 156-164.
- Brown, B., et al. (2018). "An economic comparison of weed management systems used in small-scale organic vegetable production." Organic Agriculture **9**(1): 53-63.
- Brown, J. A., et al. (2015). "Spatially Balanced Sampling: Application to Environmental Surveys." Procedia Environmental Sciences **27**: 6-9.
- Button, K. S., et collab. (2013). « Power failure: why small sample size undermines the reliability of neuroscience. » Nature Reviews Neuroscience **14**(5) : 365-376.
- Butts, T. R., et collab. (2020). « Survey of ground and aerial herbicide application practices in Arkansas agronomic crops. » Weed Technology **35**(1): 1-11.
- Buzanini, A. C., et collab. (2023). « Evaluation of smart spray technology for postemergence herbicide application in row middles of plasticulture production. » Weed Technology **37**(4): 336-342.
- Canella Vieira, B., et al. (2022). "Hooded broadcast sprayer for particle drift reduction." Pest Manag Sci **78**(4): 1519-1528.
- Casler, M. D. (2015). "Fundamentals of experimental design: Guidelines for designing successful experiments." Agronomy Journal **107**(2): 692-705.
- Chaloner, K. and I. Verdinelli (1995). "Bayesian Experimental Design: A Review." Statistical Science **10**(3): 273-304.
- Chamara, B. S., et al. (2018). "Optimizing Sowing and Flooding Depth for Anaerobic Germination-Tolerant Genotypes to Enhance Crop Establishment, Early Growth, and Weed Management in Dry-Seeded Rice (*Oryza sativa* L.)." Front Plant Sci **9** : 1654.
- Champ, J., et collab. (2020). « Instance segmentation for the fine detection of crop and weed plants by precision agricultural robots. » Appl Plant Sci **8**(7): e11373.
- Chang, C.-L., et al. (2021). "Mechanical Control with a Deep Learning Method for Precise Weeding on a Farm." Agriculture **11**(11).
- Charles, G. W., et collab. (2020). « Determining the critical period for broadleaf weed control in high-yielding cotton using mungbean as a mimic weed. » Weed Technology **34**(5): 689-698.
- Chauhan, B. S. (2017). « Weed Ecology and Weed Management Strategies for Dry-Seeded Rice in Asia. » Weed Technology **26**(1): 1-13.
- Chauhan, B. S. (2020). « Grand Challenges in Weed Management. » Frontiers in Agronomy **1**.
- Chegini, H., et al. (2023). "An Agriprecision Decision Support System for Weed Management in Pastures." IEEE Access **11**: 92660-92675.

- Chen, Y., et al. (2020). "Weed and Corn Seedling Detection in Field Based on Multi Feature Fusion and Support Vector Machine." Sensors (Basel) **21**(1).
- Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, Lawrence Erlbaum Associates.
- Colas, F., et collab. (2020). « Co-development of a decision support system for integrated weed management: Contribution from future users. » European Journal of Agronomy **114**: 126010.
- Colbach, N., et al. (2022). "Tracking Ideal Varieties and Cropping Techniques for Agroecological Weed Management: A Simulation-Based Study on Pea." Front Plant Sci **13** : 809 056.
- Colbach, N., et al. (2020). "The Pitfalls of Relating Weeds, Herbicide Use, and Crop Yield: Don't Fall Into the Trap! A Critical Review." Frontiers in Agronomy **2**.
- Coleman, G. R. Y., et al. (2019). "Using energy requirements to compare the suitability of alternative methods for broadcast and site-specific weed control." Weed Technology **33**(4): 633-650.
- Collavo, A., et al. (2013). "Management of an ACCase-inhibitor-resistant *Lolium rigidum* population based on the use of ALS inhibitors: weed population evolution observed over a 7-year field-scale investigation." Pest Manag Sci **69**(2): 200-208.
- Cong, C., et al. (2017). "Evaluation of Weed Efficacy and Crop Safety of Fluorochloridone in China." Weed Technology **28**(4): 721-728.
- Czapar, G. F., et al. (2017). "Grower Acceptance of Economic Thresholds for Weed Management in Illinois." Weed Technology **11**(4): 828-831.
- Darbyshire, M., et al. (2023). "Towards practical object detection for weed spraying in precision agriculture." Front Plant Sci **14** : 1 183 277.
- DeJonghe, T. W. T., et al. (2023). Cost benefit analysis of robotic weeding in vineyards: A case study from France. Proceedings of the 6th Symposium on Agri-Tech Economics for Sustainable Futures. Newport, United Kingdom, AgEcon.
- Dixon, E. K. and B. C. Strik (2016). "Weed control increases growth, cumulative yield, and economic returns of machine-harvested organic trailing blackberry." Acta Horticulturae(1133): 323-328.
- Donald, W. W. (2017). « Between-Observer Differences in Relative Corn Yield vs. Rated Weed Control. » Weed Technology **20**(1): 41-51.
- Donald, W. W. (2017). « Preemergence Banded Herbicides Followed by Only One Between-Row Mowing Controls Weeds in Corn. » Weed Technology **20**(1): 143-149.
- Dong, F., et collab. (2017). « Impact of atrazine prohibition on the sustainability of weed management in Wisconsin maize production. » Pest Manag Sci **73**(2): 425-434.
- Dormann, C. F., et al. (2013). "Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance." Ecography **36**(1): 27-46.
- Duncan, L., et collab. (2022). « Weed Warden: A low-cost weed detection device implemented with spectral triad sensor for agricultural applications. » HardwareX **11**: e00303.
- Eberlein, C. V., et al. (2017). "Broadleaf Weed Control in Potatoes (*Solanum tuberosum*) with Postemergence Directed Herbicides." Weed Technology **7**(2): 298-303.

Eddy, G. B. and LaDue (2002) Financial Management Practices and Farm Profitability.

Efron, B. (2020). « Prediction, Estimation, and Attribution. » Journal of the American Statistical Association **115**(530): 636-655.

Eizenberg, H., et al. (2003). "The Potential of Sulfosulfuron to Control Troublesome Weeds in Tomato1." Weed Technology **17**(1): 133-137.

Elliott, M. R. and R. Valliant (2017). "Inference for nonprobability samples." Statistical Science **32**(2): 249-264.

Ellis, J. M., et al. (2017). "Soybean (Glycine max) Seed Quality and Harvesting Efficiency as Affected by Low Weed Densities." Weed Technology **12**(1): 166-173.

Elstone, L., et al. (2020). "High Speed Crop and Weed Identification in Lettuce Fields for Precision Weeding." Sensors (Basel) **20**(2).

Esposito, M., et al. (2021). "Drone and sensor technology for sustainable weed management: a review." Chemical and Biological Technologies in Agriculture **8**(1).

Fang, J., et collab. (2025). « Biological characteristics of *Leersia japonica* (Makino) Honda and its implications for weed management. » Pest Manag Sci **81**(1): 351-356.

Farooq, M. H., et al. (2019). "Evaluation of broadcast and spot herbicide applications for narrowleaf goldenrod [*Euthamia graminifolia* (L.) Nutt.] management in lowbush blueberry." Weed Technology **33**(5): 739-747.

Farr, R., et al. (2022). "Utility of roller wiper applications of dicamba for Palmer amaranth control in soybean." Pest Manag Sci **78**(6): 2151-2160.

Fatima, H. S., et collab. (2023). « Formation of a Lightweight, Deep Learning-Based Weed Detection System for a Commercial Autonomous Laser Weeding Robot. » Applied Sciences **13**(6).

Feisthauer, P., et al. (2024). "Behavioral factors driving farmers' intentions to adopt spot spraying for sustainable weed control." J Environ Manage **353** : 120 218.

Feisthauer, P., et al. (2024). "Adoption intentions of smart weeding technologies—A lab-in-the-field experiment with German crop farmers." Q Open **4**(1).

Fennimore, S. A., et al. (2017). "Technology for Automation of Weed Control in Specialty Crops." Weed Technology **30**(4): 823-837.

Ferguson, J. C., et al. (2019). "Droplet-Size Effects on Control of *Chloris* spp. with Six POST Herbicides." Weed Technology **33**(1): 153-158.

Fischer, J. W., et al. (2020). "Weed-sensing technology modifies fallow control of rush skeletonweed (*Chondrilla juncea*)." Weed Technology **34**(6): 857-862.

Fisher, R. A. (1935). The Design of Experiments. New York, Hafner Publishing Company.

Flessner, M. L., et al. (2021). "Potential wheat yield loss due to weeds in the United States and Canada." Weed Technology **35**(6): 916-923.

- Ford, A. J., et collab. (2017). « Site-Specific Weed Management in Cotton Using WebHADSS™. » Weed Technology **25**(1): 107-112.
- Foster, D. C., et collab. (2024). « Spray interval, application order, and plant height influences control of dicamba-resistant Palmer amaranth. » Weed Technology **38**.
- Fountas, S., et al. (2020). "Agricultural Robotics for Field Operations." Sensors (Basel) **20**(9).
- Fragasso, M., et al. (2013). "Durum wheat and allelopathy: toward wheat breeding for natural weed management." Front Plant Sci **4**: 375.
- Frisvold, G. B. (2018). "A weed resistance management game: a teaching tool." Pest Manag Sci **74**(10): 2376-2382.
- Galvin, L. B., et al. (2022). "Assessment of oxyfluorfen-tolerant rice systems and implications for rice-weed management in California." Pest Manag Sci **78**(11): 4905-4912.
- Ganie, Z. A., et al. (2023). "Potential potato yield loss from weed interference in the United States and Canada." Weed Technology **37**(1): 21-24.
- Gao, P., et collab. (2022). « Influence of organic rice production mode on weed composition in the soil seed bank of paddy fields. » Front Plant Sci **13** : 1 056 975.
- Garcia-Ruiz, E., et al. (2018). "Weeds and ground-dwelling predators' response to two different weed management systems in glyphosate-tolerant cotton: A farm-scale study." PLoS ONE **13**(1): e0191408.
- Geddes, C. M., et al. (2022). "Potential spring canola yield losses due to weeds in Canada and the United States." Weed Technology **36**(6): 884-890.
- Genna, N. G., et al. (2021). "Herbicide Efficacy of Spot Spraying Systems in Fallow and Postharvest in the Pacific Northwest Dryland Wheat Production Region." Plants (Basel) **10**(12).
- Gerhards, R., et al. (2022). "Advances in site-specific weed management in agriculture—A review." Weed Research **62**(2): 123-133.
- Gerhards, R., et al. (2023). "A comparison of seven innovative robotic weeding systems and reference herbicide strategies in sugar beet (*Beta vulgaris* subsp. *vulgaris* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.)." Weed Research **64**(1): 42-53.
- Gibson, D. J., et collab. (2016). « Benchmark study on glyphosate-resistant cropping systems in the United States. Part 7 : Effects of weed management strategy (grower practices versus academic recommendations) on the weed soil seedbank over 6 years. » Pest Manag Sci **72**(4): 692-700.
- Glaze, N. C. (2017). "Weed Control in Direct-Seeded Tomato, *Lycopersicon esculentum*, for Transplants." Weed Technology **2**(3): 333-337.
- González-Andújar, J. L. (2020). Introduction to Decision Support Systems. Decision Support Systems for Weed Management. G. R. Chantre and J. L. González-Andújar. Cham, Springer International Publishing : 25-38.
- Gray, C. J., et collab. (2017). « Utility of Multispectral Imagery for Soybean and Weed Species Differentiation. » Weed Technology **22**(4): 713-718.
- Green, J. M. and M. D. Owen (2011). "Herbicide-resistant crops: utilities and limitations for herbicide-resistant weed management." J Agric Food Chem **59**(11): 5819-5829.

- Guerra, J. G., et al. (2022). "Plant functional diversity is affected by weed management through processes of trait convergence and divergence." Front Plant Sci **13** : 993 051.
- Haque, M. R., et al. (2024). "Optimizing planting times and weed management for enhanced yield and nutritional quality of baby corn and green fodder." PLoS ONE **19**(9): e0308296.
- Hasan, M., et collab. (2021). « Bioherbicides: An Eco-Friendly Tool for Sustainable Weed Management. » Plants (Basel) **10**(6).
- Henry, W. B., et collab. (2017). « Remote Sensing to Detect Herbicide Drift on Crops. » Weed Technology **18**(2): 358-368.
- Henry, W. B., et collab. (2017). « Remote Sensing to Distinguish Soybean from Weeds After Herbicide Application. » Weed Technology **18**(3): 594-604.
- Henson, S. E., et collab. (2003). « Herbicide Efficacy Using a Wet-Blade Application System1. » Weed Technology **17**(2): 320-324.
- Hoefler, R., et al. (2020). "Do Spatial Designs Outperform Classic Experimental Designs ?" Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics **25**(4): 523-552.
- Hofstrand, D. (2023). Capital budgeting basics, Ag Decision Maker. **C5(240)**.
- Holst, N. (2020). Mathematical Models. Decision Support Systems for Weed Management: 3-23.
- Hu, N., et al. (2022). "LettuceTrack: Detection and tracking of lettuce for robotic precision spray in agriculture." Front Plant Sci **13** : 1 003 243.
- Hu, R., et al. (2024). "A novel mechanical-laser collaborative intra-row weeding prototype: structural design and optimization, weeding knife simulation and laser weeding experiment." Front Plant Sci **15** : 1 469 098.
- Hu, W., et al. (2024). "Design and performance evaluation of a spiral bar precision weeding mechanism for corn fields." Sci Rep **14**(1): 28186.
- Huang, Y., et al. (2017). "UAV Low-Altitude Remote Sensing for Precision Weed Management." Weed Technology **32**(1): 2-6.
- Hunt, D. and D. Wilson (2015). Farm power and machinery management, Waveland Press.
- Hunter, J. E., et collab. (2019). « Coverage and drift potential associated with nozzle and speed selection for herbicide applications using an unmanned aerial sprayer. » Weed Technology **34**(2): 235-240.
- Hunter, J. E., 3 rd, et collab. (2020). « Integration of remote-weed mapping and an autonomous spraying unmanned aerial vehicle for site-specific weed management. » Pest Manag Sci **76**(4): 1386-1392.
- Hurlbert, S. H. (1984). "Pseudoreplication and the Design of Ecological Field Experiments." Ecological Monographs **54**(2): 187-211.
- Ilyas, T., et al. (2023). "Overcoming field variability: unsupervised domain adaptation for enhanced crop-weed recognition in diverse farmlands." Front Plant Sci **14** : 1 234 616.
- Ioannidis, J. P. A. (2005). "Why most published research findings are false." PLoS Medicine **2**(8): 696-701.

- Izadi, e., et al. (2011). "Investigation the Effect of Water Hardness on 2,4-D Amine Efficacy on Redroot Pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and Common Lambsquart (*Chenopodium album*) control." Journal of Iranian Plant Protection Research **25**(3): -.
- Jiao, J., et collab. (2024). « Key Technologies of Intelligent Weeding for Vegetables: A Review. » Agriculture **14**(8).
- Johnson, P. C. D., et collab. (2015). « Power analysis for generalized linear mixed models in ecology and evolution. » Methods in Ecology and Evolution **6**(2): 133-142.
- Johnson, W. C. and X. Luo (2019). "Integrating cultivation using a tine weeder with herbicides in conventional peanut production." Weed Technology **33**(2): 374-379.
- Kaplan, R. M., et collab. (2014). Big data and large sample size: A cautionary note on the potential for bias. Clinical and Translational Science, Blackwell Publishing Ltd. **7**: 342-346.
- Kennedy, H., et collab. (2019). « Crop signal markers facilitate crop detection and weed removal from lettuce and tomato by an intelligent cultivator. » Weed Technology **34**(3): 342-350.
- Kerr, M. K. and G. A. Churchill (2001). "Statistical design and the analysis of gene expression microarray data." Genetical Research **77**(2): 123-128.
- Kim, S. B., et collab. (2021). « Applications of statistical experimental designs to improve statistical inference in weed management. » PLoS ONE **16**(9): e0257472.
- Knezevic, S. Z., et al. (2002). "Critical Period for Weed Control: The Concept and Data Analysis." Weed Science **50**(6): 773-786.
- Koger, C. H., et al. (2003). "Detecting Late-Season Weed Infestations in Soybean (*Glycine max*)1." Weed Technology **17**(4): 696-704.
- Kouame, K. B.-J., et al. (2023). "Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) control affected by weed size and herbicide spray solution with nozzle type pairings." Weed Technology **38**.
- Kumari, A., et al. (2023). "Influence of a cereal rye cover crop on the critical period for weed control in soybean." Weed Technology **37**(1): 25-33.
- Lac, L., et collab. (2022). « An annotated image dataset of vegetable crops at an early stage of growth for proximal sensing applications. » Data Brief **42** : 108 035.
- Lacoste, M. and S. Powles (2017). "RIM : Anatomy of a Weed Management Decision Support System for Adaptation and Wider Application." Weed Science **63**(3): 676-689.
- Larsen, S. U., et collab. (2004). « Turfgrass management and weed control without pesticides on football pitches in Denmark. » Pest Manag Sci **60**(6): 579-587.
- Lazarus, W. and R. Selley A (2002). Suggested Procedures for Estimating Farm Machinery Costs. U. o. Minnesota. AgEcon.
- Leise, A. E. (2024). Evaluating a precision Sprayer for Detecting Weeds and Spraying Herbicides in Real Time (Spot Spray) for Weed Management in Corn and Soybean. Department of Agronomy and Horticulture, University of Nebraska. **Master of Science**.
- Lenssen, A. W. (2017). "Planting Date and Preplant Weed Management Influence Yield, Water Use, and Weed Seed Production in Herbicide-Free Forage Barley." Weed Technology **22**(3): 486-492.

- Levallois, R. (2018). Gestion de l'entreprise agricole : De la théorie à la pratique 2e édition, Presses de l'Université Laval.
- Li, H., et collab. (2022). « Design of field real-time target spraying system based on improved YOLOv5. » Front Plant Sci **13** : 1 072 631.
- Li, J. L., et collab. (2023). « A real-time smart sensing system for automatic localization and recognition of vegetable plants for weed control. » Front Plant Sci **14** : 1 133 969.
- Lipowsky, A., et al. (2012). "Density-independent mortality and increasing plant diversity are associated with differentiation of *Taraxacum officinale* into r- and K-strategists." PLoS ONE **7**(1): e28121.
- Liu, T., et al. (2024). "Harnessing UAVs and deep learning for accurate grass weed detection in wheat fields: a study on biomass and yield implications." Plant Methods **20**(1): 144.
- Loddo, D., et al. (2021). "Problems and perspectives in weed management." Italian Journal of Agronomy **16**(4).
- Loddo, D., et al. (2019). "Combination of Herbicide Band Application and Inter-Row Cultivation Provides Sustainable Weed Control in Maize." Agronomy **10**(1).
- Logan, M. (2010). Biostatistical Design and Analysis Using R: a practical guide, Wiley-Blackwell.
- Loken, J. R. and H. M. Hatterman-Valenti (2017). "Multiple Applications of Reduced-Rate Herbicides for Weed Control in Onion." Weed Technology **24**(2): 153-159.
- Longchamps, L., et al. (2017). "Could Weed Sensing in Corn Interrows Result in Efficient Weed Control?" Weed Technology **26**(4): 649-656.
- Lorenzetti, J. B., et al. (2024). "Identification, mapping, and chemical control of fleabane resistant to glyphosate, chlorimuron, paraquat, and 2,4-D." Weed Technology **38**.
- Lytridis, C. and T. Pachidis (2024). "Recent Advances in Agricultural Robots for Automated Weeding." AgriEngineering **6**(3): 3279-3296.
- Lyu, H., et al. (2022). "Evaluation of broadcast and spot herbicide applications for spreading dogbane (*Apocynum androsaemifolium* L.) management in lowbush blueberry fields." Canadian Journal of Plant Science **102**(6) : 1079-1089.
- Maity, A., et al. (2022). "Seedbank management through an integration of harvest-time and postharvest tactics for Italian ryegrass (*Lolium perenne* ssp. *multiflorum*) in wheat." Weed Technology **36**(2): 187-196.
- Malkani, P., et al. (2024). "Development and evaluation of a sensor enabled smart herbicide applicator for inter row crops." Smart Agricultural Technology **9**.
- Malmstrom, C. M., et al. (2017). "Novel fine-scale aerial mapping approach quantifies grassland weed cover dynamics and response to management." PLoS ONE **12**(10): e0181665.
- Marble, S. C., et al. (2017). "Efficacy and Estimated Annual Cost of Common Weed Control Methods in Landscape Planting Beds." HortTechnology **27**(2): 199-211.
- Marimuthu, S., et al. (2024). "Effective weed control through post-emergence herbicides to enhance blackgram (*Vigna mungo* L.) productivity in South India." Sci Rep **14**(1): 26468.

Markus, L. (2012). Joint Cost Allocation by Means of Maximum Entropy. International Association of Agricultural Economists (IAAE) Triennial Conference. Foz do Iguaçu, Brazil.

Marshal, G., et collab. (2019). Economics of weed management in the Australian vegetable industry: 148.

Matocha, M. A., et collab. (2006). « Spray Carrier pH Effect on Absorption and Translocation of Trifloxysulfuron in Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) and Texasweed (*Caperonia palustris*). » Weed Science **54**(6): 969-973.

Mattox, C., et al. (2024). "Comparing alternative nonselective herbicides in Oregon and New Mexico." Weed Technology **38**.

Maxwell, B. D. and C. Ghera (2017). "The Influence of Weed Seed Dispersion Versus the Effect of Competition on Crop Yield." Weed Technology **6**(1): 196-204.

Maxwell, S. E., et collab. (2008). « Sample size planning for statistical power and accuracy in parameter estimation. » Annual Review of Psychology **59**: 537-563.

McCollough, M. R., et al. (2024). "Informing the operation of intelligent automated intra-row weeding machines in direct-sown sugar beet (*Beta vulgaris* L.): Crop effects of hoeing and flaming across early growth stages, tool working distances, and intensities." Crop Protection **177**.

McErlach, A. F. and R. A. Boydston (2014). Current State of Weed Management in Organic and Conventional Cropping Systems. Automation : The Future of Weed Control in Cropping Systems: 11-32.

Meena, S. S. and R. S. Mehta (2010). "Economic feasibility of weed management practices in cumin." Indian Journal of Horticulture **67**(Special Issue): 189-192.

Mesaragandla, S., et al. (2024). "Herbicide spraying and weed identification using drone technology in modern farms: A comprehensive review." Results in Engineering **21**.

Melander, B. and M. R. McCollough (2022). Advances in mechanical weed control technologies. Advances in integrated weed management: 255-282.

Melander, B., et al. (2017). "European Perspectives on the Adoption of Nonchemical Weed Management in Reduced-Tillage Systems for Arable Crops." Weed Technology **27**(1): 231-240.

Mesnage, R., et al. (2021). 1 - Herbicides : Brief history, agricultural use, and potential alternatives for weed control. Herbicides. R. Mesnage and J. G. Zaller, Elsevier: 1-20.

Metcalfe, H., et al. (2018). "The implications of spatially variable pre-emergence herbicide efficacy for weed management." Pest Manag Sci **74**(3): 755-765.

Millar, R. B. and M. J. Anderson (2004). "Remedies for pseudoreplication." Fisheries Research **70**(2-3 SPEC. ISS.) : 397-407.

Miller, P. and C. Tuck (2006). Factors influencing the performance of spray delivery systems: A review of recent developments, *J ASTM Int*, 2:1–1

Mir, M. S., et collab. (2023). « Influence of Sowing Time and Weed Management Practices on the Performance and Weed Dynamics of Direct Drum Seeded Rice. » ACS Omega **8**(29): 25861-25876.

Moehring, J., et al. (2014). "Efficiency of augmented p-rep designs in multi-environmental trials." Theoretical and Applied Genetics **127**(5): 1049-1060.

- Mohammadkhani, F., et al. (2023). "Weed community changes in saffron+chickpea intercropping under different irrigation management." PLoS ONE **18**(5): e0286474.
- Monteiro, A. and S. Santos (2022). "Sustainable Approach to Weed Management: The Role of Precision Weed Management." Agronomy **12**(1).
- Moore, L. D., et collab. (2023). « Evaluation of electrical and mechanical Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) management in cucumber, peanut, and sweetpotato. » Weed Technology **37**(1): 53-59.
- Morgan, J. P. (2007). « Optimal Incomplete Block Designs. » Journal of the American Statistical Association **102**(478): 655-663.
- Mortensen, D. A., et al. (2012). "Navigating a Critical Juncture for Sustainable Weed Management." BioScience **62**(1): 75-84.
- Moss, S. (2019). "Integrated weed management (IWM): why are farmers reluctant to adopt non-chemical alternatives to herbicides?" Pest Manag Sci **75**(5): 1205-1211.
- Mulder, T. A. and J. D. Doll (2017). "Integrating Reduced Herbicide Use with Mechanical Weeding in Corn (*Zea mays*)." Weed Technology **7**(2): 382-389.
- Munz, J., et al. (2024). "Digital transformation at what cost? A case study from Germany estimating the adoption potential of precision farming technologies under different scenarios." Smart Agricultural Technology **9**.
- Mwitta, C., et al. (2022). "Evaluation of Diode Laser Treatments to Manage Weeds in Row Crops." Agronomy **12**(11).
- Nagargade, M., et al. (2024). "Ecological weed management and square planting influenced the weed management, and crop productivity in direct-seeded rice." Sci Rep **14**(1): 10356.
- Naruhn, G.-P., et al. (2021). "Efficacy of Various Mechanical Weeding Methods—Single and in Combination—In Terms of Different Field Conditions and Weed Densities." Agronomy **11**(10).
- Naseri, B. and S. H. Nazer Kakhki (2022). "Predicting common bean (*Phaseolus vulgaris*) productivity according to *Rhizoctonia* root and stem rot and weed development at field plot scale." Front Plant Sci **13** : 1 038 538.
- Nath, C. P., et al. (2024) Challenges and Alternatives of Herbicide-Based Weed Management. Agronomy **14**, DOI: 10.3390/agronomy14010126
- Neeser, C., et al. (2017). "WeedSOFT®: a weed management decision support system." Weed Science **52**(1): 115-122.
- Neeser, C., et al. (2000). "A Comparison of Visual and Photographic Estimates of Weed Biomass and Weed Control1." Weed Technology **14**(3): 586-590.
- Netherland, M. D., et al. (2000). "Influence of water temperature on the efficacy of diquat and endothall versus curlyleaf pondweed." Journal of Aquatic Plant Management **38** : 25-32.
- Neve, P., et al. (2009). "Evolutionary thinking in agricultural weed management." New Phytol **184**(4): 783-793.
- Odero, D. C. and A. L. Wright (2022). "Preemergence and postemergence spiny amaranth (*Amaranthus spinosus*) and common lambsquarters (*Chenopodium album*) control in lettuce on organic soils." Weed Technology **36**(4): 531-536.
- Oksanen, L. (2001). "Logic of experiments in ecology: Is pseudoreplication a pseudoissue?" Oikos **94**(1) : 27-38.

OMAFRA (2025). « Période critique d'absence de mauvaise herbe. » from <https://cropipm.omafra.gov.on.ca/fr-ca/mauvaises-herbes-et-herbicides/information>.

O'Neill, B. (2022). "Sample size determination with a pilot study." PLOS ONE **17**(2 February).

Owen, M. D., et collab. (2015). « Integrated pest management and weed management in the United States and Canada. » Pest Manag Sci **71**(3): 357-376.

Palva, R., et al. (2024). "Assessment of the Performance of a Field Weeding Location-Based Robot Using YOLOv8." Agronomy **14**(10).

Pandey, et al. (2020). A literature review of non-herbicide, robotic weeding: a decade of progress.

Panneerselvam, P., et al. (2020). "Transforming labor requirement, crop yield, and profitability with precision dry-direct seeding of rice and integrated weed management in Eastern India." Field Crops Res **259** : 107 961.

Partel, V., et al. (2019). "Development and evaluation of a low-cost and smart technology for precision weed management utilizing artificial intelligence." Computers and Electronics in Agriculture **157**: 339-350.

Perez-Ruiz, M., et al. (2013). "Development and evaluation of a combined cultivator and band sprayer with a row-centering RTK-GPS guidance system." Sensors (Basel) **13**(3): 3313-3330.

Peteinatos, G. G., et al. (2014). "Potential use of ground-based sensor technologies for weed detection." Pest Manag Sci **70**(2): 190-199.

Petelewicz, P., et al. (2024). "Simulation-based nozzle density optimization for maximized efficacy of a machine vision-based weed control system for applications in turfgrass settings." Weed Technology **38**.

Peterson, R. G. (1994). Agricultural Field Experiments Design and Analysis, CRC Press.

Piepho, H. P. and R. N. Edmondson (2018). "A tutorial on the statistical analysis of factorial experiments with qualitative and quantitative treatment factor levels." Journal of Agronomy and Crop Science: 1-27.

Piepho, H. P., et al. (2022). "One, two, three: portable sample size in agricultural research." Journal of Agricultural Science **160**(6): 459-482.

Piepho, H. P., et al. (2021). "Generating row-column field experimental designs with good neighbour balance and even distribution of treatment replications." Journal of Agronomy and Crop Science **207**(4): 745-753.

Pittman, K. B., et al. (2023). "Preferred information and delivery methods for weed management extension in Virginia." Weed Technology **37**(4): 445-451.

Poston, D. H., et al. (2017). "Cost-Efficient Weed Control in Soybean (Glycine max) with Cultivation and Banded Herbicide Applications." Weed Technology **6**(4): 990-995.

Pott, L. P., et collab. (2020). « Pre-planting weed detection based on ground field spectral data. » Pest Manag Sci **76**(3): 1173-1182.

Price, W. J., et collab. (2017). « Estimation of Dose-Response Models for Discrete and Continuous Data in Weed Science. » Weed Technology **26**(3): 587-601.

Prus, M. and H.-P. Piepho (2024). "Optimizing the Allocation of Trials to Sub-regions in Crop Variety Testing with Multiple Years and Locations." Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics.

- Rachuy, J. S. and S. A. Fennimore (2022). "Evaluation of sulfentrazone and S-metolachlor in brassica vegetables." Weed Technology **36**(4): 592-596.
- Rai, N., et collab. (2023). « Applications of deep learning in precision weed management: A review. » Computers and Electronics in Agriculture **206**.
- Rainforth, T., et al. (2024). "Modern Bayesian Experimental Design." Statistical Science **39**(1): 100-114.
- Raj, S. M. (2018). "Machine Vision based Agricultural Weed Detection and Smart Herbicide Spraying." Indian Journal of Science and Technology **11**(1): 1-5.
- Raja, R., et collab. (2023). « Real-time control of high-resolution micro-jet sprayer integrated with machine vision for precision weed control. » Biosystems Engineering **228**: 31-48.
- Rao, A. N., et al. (2017). "Weeds and Weed Management of Rice in Karnataka State, India." Weed Technology **29**(1): 1-17.
- Rashmi, A. and B. Shakti (2013). "A review of literature relating to Balance Incomplete Block designs with Repeated Blocks." Research Journal of Mathematical and Statistical Sciences ISSN **1**(3): 2320-6047.
- Reichelderfer, K. H. (1985). Factors affecting the economic feasibility of the biological control of weeds.
- Riar, D. S., et al. (2017). "Light-Activated, Sensor-Controlled Sprayer Provides Effective Postemergence Control of Broadleaf Weeds in Fallow." Weed Technology **25**(3): 447-453.
- Riar, D. S., et al. (2017). "Assessment of Weed Management Practices and Problem Weeds in the Midsouth United States—Soybean: A Consultant's Perspective." Weed Technology **27**(3): 612-622.
- Ritz, C., et collab. (2015). « Research Methods in Weed Science: Statistics. » Weed Science **63**(SP1) : 166-187.
- Roscher, C., et al. (2014). "Different assembly processes drive shifts in species and functional composition in experimental grasslands varying in sown diversity and community history." PLoS ONE **9**(7): e101928.
- Rosenbaum, P. R. (2010). Design of Observational Studies. New york, Springer.
- Roskamp, J. M., et al. (2013). "The Effect of Cations and Ammonium Sulfate on the Efficacy of Dicamba and 2,4-D." Weed Technology **27**(1): 72-77.
- Roskamp, J. M., et al. (2013). "The Influence of Carrier Water pH and Hardness on Saflufenacil Efficacy and Solubility." Weed Technology **27**(3): 527-533.
- Ruigrok, T., et al. (2020). "Application-Specific Evaluation of a Weed-Detection Algorithm for Plant-Specific Spraying." Sensors (Basel) **20**(24).
- Sønderskov, M., et al. (2017). "Decision Support System for Optimized Herbicide Dose in Spring Barley." Weed Technology **28**(1): 19-27.
- SALONEN, J. (1992). "Efficacy of reduced herbicide doses in spring cereals of different competitive ability." Weed Research **32**(6): 483-491.
- Sampurno, R. M., et al. (2024). "Intrarow Uncut Weed Detection Using You-Only-Look-Once Instance Segmentation for Orchard Plantations." Sensors (Basel) **24**(3).

- San Martín, C., et al. (2017). "Weed Decision Threshold as a Key Factor for Herbicide Reductions in Site-Specific Weed Management." Weed Technology **30**(4): 888-897.
- San Martin, C., et collab. (2018). « Weed responses to fallow management in Pacific Northwest dryland cropping systems. » PLoS ONE **13**(9): e0204200.
- Sanchez, J. and E. R. Gallandt (2020). "Functionality and efficacy of Franklin Robotics' Tertill™ robotic weeder." Weed Technology **35**(1): 166-170.
- Sanchez, P. R. and H. Zhang (2022). « Evaluation of a CNN-Based Modular Precision Sprayer in Broadcast-Seeded Field. » Sensors (Basel) **22**(24).
- Sapkota, B. B., et al. (2022). "Evaluating Cross-Applicability of Weed Detection Models Across Different Crops in Similar Production Environments." Front Plant Sci **13** : 837 726.
- Scheiner, S. M. and J. Gurevitch (1993). Design and Analysis of Ecological Experiments. New York, NY, Chapman & Hall.
- Schreier, H., et al. (2022). "The impact of electrocution treatments on weed control and weed seed viability in soybean." Weed Technology **36**(4): 481-489.
- Sellers, B. A. and J. J. Mullahey (2008). "Broadcast vs. Wet-Blade Herbicide Applications for Southern Wax Myrtle (*Myrica cerifera*) Control." Weed Technology **22**(2): 286-289.
- Shamshiri, R. R., et al. (2024). "Sensing and Perception in Robotic Weeding: Innovations and Limitations for Digital Agriculture." Sensors (Basel) **24**(20).
- Sharpe, S. M., et al. (2021). "Fallow management input strategies for weed management in Florida cabbage production." Pest Manag Sci **77**(10): 4340-4349.
- Sharpe, S. M., et al. (2017). "Spray Penetration into a Strawberry Canopy as Affected by Canopy Structure, Nozzle Type, and Application Volume." Weed Technology **32**(1): 80-84.
- Shrestha, A., et al. (2013). "Efficiency and cost-effectiveness of cultivators, steam, or an organic herbicide in weed control and vine productivity in organic vineyards in the San Joaquin Valley." HortTechnology **23**: 99 - 108.
- Simard, M.-J. and N. Ziadi (2024). "Weed communities after decades of mineral fertilization and tillage treatments in a corn–soybean rotation." Weed Technology **38**.
- Singh, K. P., et collab. (2022). « Interactive effect of tillage and crop residue management on weed dynamics, root characteristics, crop productivity, profitability and nutrient uptake in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under Vertisol of Central India. » PLoS ONE **17**(12): e0279831.
- Smith, A., et collab. (2019). « Annual weed management in isoxaflutole-resistant soybean using a two-pass weed control strategy. » Weed Technology **33**(03): 411-425.
- Sokal, R. R. and F. J. Rohlf (1981). Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. New York, W.H. Freeman and Company.
- Soltani, N., et al. (2016). "Potential Corn Yield Losses from Weeds in North America." Weed Technology **30**(4): 979-984.
- Soltani, N., et al. (2017). "Perspectives on Potential Soybean Yield Losses from Weeds in North America." Weed Technology **31**(1): 148-154.

- Soltani, N., et al. (2018). "Potential Yield Loss in Dry Bean Crops Due to Weeds in the United States and Canada." Weed Technology **32**(3): 342-346.
- Soltani, N., et al. (2018). "Potential yield loss in sugar beet due to weed interference in the United States and Canada." Weed Technology **32**(6): 749-753.
- Soltani, N., et al. (2022). "Soybean yield loss from delayed postemergence herbicide application based on weed height, days after emergence, accumulated crop heat units, and soybean growth stage." Weed Technology **36**(3): 403-408.
- Soltani, N., et al. (2023). "Integrated weed management strategies for the depletion of multiple herbicide-resistant waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) seed in the soil seedbank." Weed Technology **37**(1): 108-112.
- Soltani, N., et al. (2024). "Biologically effective dose of diflufenican applied preemergence for the control of multiple herbicide-resistant waterhemp in corn." Weed Technology **38**.
- Sørensen, C. G., et al. (2007). Hortibot: Feasibility study of a plant nursing robot performing weeding operations – part IV. ASABE Annual International Meeting. Minneapolis, Minnesota, US.
- Spaeth, M., et al. (2024). "Smart sprayer a technology for site-specific herbicide application." Crop Protection **177**.
- Spoth, M. P., et al. (2022). "Narrow-windrow burning to control seeds of Italian ryegrass (*Lolium perenne* ssp. multiflorum) in wheat and Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) in soybean." Weed Technology **36**(5): 716-722.
- Steel, R. G. D. and J. H. Torrie (1980). Principles and Procedures of Statistics : A Biometrical Approach. New York, McGraw-Hill, Inc.
- Stephenson, D. O., et al. (2017). "Weed Management with Fomesafen Preemergence in Glyphosate-Resistant Cotton." Weed Technology **18**(3): 680-686.
- Steward, B., et collab. (2019). The use of agricultural robots in weed management and control. Robotics and automation for improving agriculture: 161-186.
- Stewart, C. L., et collab. (2009). « How long can an herbicide remain in the spray tank without losing efficacy? » Crop Protection **28**(12) : 1086-1090.
- Strik, B., et al. (2007). "The Economics of Establishing Blueberries for Organic Production in Oregon - a Comparison of Weed Management Systems."
- Strik, B. C. and A. J. Vance (2017). "Weed management strategies in long-term organic blueberry production systems – impact of mulch type and weed control methods on economics." Acta Horticulturae (1180): 347-354.
- Sutherland, W. J. (2006). Ecological Census Techniques. Cambridge, UK, Cambridge University Press : 446-446.
- Swanton, C. J., et al. (2008). "Integrated Weed Management: Knowledge-Based Weed Management Systems." Weed Science **56**(1): 168-172.
- T, S., et al. (2012). "Evaluation of Power Weeders for Mechanized Weeding in Pulse Crop Cultivation." Madras Agricultural Journal **99**(JUNE) : 394-396.
- Tang, Z., et collab. (2024). « Design and Experiment of an Inter-Row Weeding Machine Applied in Soybean and Corn Strip Compound Planting (SCSCP). » Agronomy **14**(9).

- Tharp, B. E., et al. (2017). "Assessment of Weed Control Strategies for Corn in the North-Central United States." Weed Technology **18**(2): 203-210.
- Thornby, D., et collab. (2024). « Development and validation of Avena integrated management (AIM): a bioeconomic decision support tool for wild oat management in Australian grain production systems. » Weed Technology **38**.
- Tidemann, B. D., et al. (2021). "Evaluation of panicle removal methods and crop topping applications as supplemental tools for wild oat (*Avena fatua*) management." Weed Technology **35**(6): 932-944.
- Tran, D., et al. (2023). "European stakeholders' perspectives on implementation potential of precision weed control: the case of autonomous vehicles with laser treatment." Precis Agric: 1-23.
- Tredaway-Ducar, J., et al. (2003). "Site-Specific Weed Management in Corn (*Zea mays*)1." Weed Technology **17**(4): 711-717.
- Uehleke, R., et al. (2024). "German sugar beet farmers' intention to use autonomous field robots for seeding and weeding." J Environ Manage **370** : 122 472.
- Upadhyay, A., et al. (2024). "Non-chemical weed management: Harnessing flame weeding for effective weed control." Heliyon **10**(12): e32776.
- Vadher, A. L., et al. (2020). "Development of Solar Operated Walking Type Power Weeder." International Journal of Environment and Climate Change: 211-223.
- Vahdanjoo, M., et al. (2023). "Operational, Economic, and Environmental Assessment of an Agricultural Robot in Seeding and Weeding Operations." AgriEngineering **5**(1): 299-324.
- Van Evert, F. K., et al. (2017). "A Mobile Field Robot with Vision-Based Detection of Volunteer Potato Plants in a Corn Crop." Weed Technology **20**(4): 853-861.
- Varanasi, A., et collab. (2023). « Investigation of inquiries on weed control efficacy of XtendiMax® herbicide with VaporGrip® technology. » Weed Technology **37**(6): 645-656.
- Vickers, A. J. (2003). "How many repeated measures in repeated measures designs? Statistical issues for comparative trials." BMC Medical Research Methodology **3**(1): 22-22.
- Vijayakumar, V., et al. (2023). "Smart spraying technologies for precision weed management: A review." Smart Agricultural Technology **6**.
- Virk, S. S. and E. P. Prostko (2022). "Survey of pesticide application practices and technologies in Georgia agronomic crops." Weed Technology **36**(5): 616-628.
- Vishwakarma, A. K., et al. (2023). "Impact of sequential herbicides application on crop productivity, weed and nutrient dynamics in soybean under conservation agriculture in Vertisols of Central India." PLoS ONE **18**(1): e0279434.
- Vizantinopoulos, S. and N. Katranis (2017). "Weed Management of *Amaranthus* spp. in Corn (*Zea mays*). " Weed Technology **12**(1): 145-150.
- Wadl, P. A., et al. (2023). "A sustainable approach for weed and insect management in sweet potato: breeding for weed and insect tolerant/resistant clones." Weed Technology **37**(1): 60-66.
- Walsh, M. J. and S. B. Powles (2007). "Management Strategies for Herbicide-resistant Weed Populations in Australian Dryland Crop Production Systems." Weed Technology **21**(2): 332-338.

- Walsh, M. J., et collab. (2020). « Tillage based, site-specific weed control for conservation cropping systems. » Weed Technology **34**(5): 704-710.
- Wang, J., et al. (2024). "A Combined Paddy Field Inter-Row Weeding Wheel Based on Display Dynamics Simulation Increasing Weed Mortality." Agriculture **14**(3).
- Wang, M., et al. (2022). "A Novel Two-Degree-of-Freedom Gimbal for Dynamic Laser Weeding: Design, Analysis, and Experimentation." IEEE/ASME Transactions on Mechatronics **27**(6) : 5016-5026.
- Wang, S., et al. (2023). "Evaluation of compact air-induction flat fan nozzles for herbicide applications: Spray drift and biological efficacy." Front Plant Sci **14** : 1 018 626.
- Weirich, J. W., et al. (2011). "Benchmark study on glyphosate-resistant cropping systems in the United States. Part 5 : Effects of glyphosate-based weed management programs on farm-level profitability." Pest Manag Sci **67**(7): 781-784.
- Wicks, G. A., et al. (2017). "Efficiency of an Optically Controlled Sprayer for Controlling Weeds in Fallow." Weed Technology **12**(4): 638-645.
- Wilkerson, G. G., et al. (2017). "Evaluating the Potential for Site-Specific Herbicide Application in Soybean." Weed Technology **18**(4): 1101-1110.
- Wilson, R. G., et collab. (2011). « Benchmark study on glyphosate-resistant cropping systems in the United States. Part 4 : Weed management practices and effects on weed populations and soil seedbanks. » Pest Manag Sci **67**(7): 771-780.
- Wong, A. C. S., et collab. (2022). « Biotechnological Road Map for Innovative Weed Management. » Front Plant Sci **13** : 887 723.
- Wong, C. and A. Moghimi (2025). "Stakeholder mapping of precision weeding commercialization ecosystem in California." Agricultural Systems **222**.
- Wu, Z., et collab. (2021). « Review of Weed Detection Methods Based on Computer Vision. » Sensors (Basel) **21**(11).
- Xiang, M., et collab. (2024). « Crop detection technologies, mechanical weeding executive parts and working performance of intelligent mechanical weeding: a review. » Front Plant Sci **15** : 1 361 002.
- Yaseen, M. U. and J. M. Long (2024). "Laser Weeding Technology in Cropping Systems: A Comprehensive Review." Agronomy **14**(10).
- Ye, S., et al. (2023). "Design and Testing of an Elastic Comb Reciprocating a Soybean Plant-to-Plant Seedling Avoidance and Weeding Device." Agriculture **13**(11).
- Young, S. L., et al. (2017). "Moving integrated weed management from low level to a truly integrated and highly specific weed management system using advanced technologies." Weed Research **57**(1): 1-5.
- Yu, Z., et al. (2024). "A Static Laser Weeding Device and System Based on Fiber Laser: Development, Experimentation, and Evaluation." Agronomy **14**(7).
- Yurchak, V., et al. (2023). "Influence of cover cropping and conservation tillage on weeds during the critical period for weed control in soybean." Weed Technology **37**(5): 512-521.
- Zanin, A. R. A., et al. (2022). "Reduction of pesticide application via real-time precision spraying." Sci Rep **12**(1): 5638.

Zar, J. H. (1996). Biostatistical Analysis. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall Inc.

Zhang, W., et al. (2022). "Review of Current Robotic Approaches for Precision Weed Management." Curr Robot Rep **3**(3) : 139-151.

Zhang, X., et al. (2023). "Design and operation of a Peucedani Radix weeding device based on YOLOV5 and a parallel manipulator." Front Plant Sci **14** : 1 171 737.

Zhou, W., et al. (2023). "Design Optimization and Mechanism Analysis of Water Jet-Type Inter-Plant Weeding Device for Water Fields." Agronomy **13**(5).

Zhu, H., et al. (2022). "YOLOX-based blue laser weeding robot in corn field." Front Plant Sci **13** : 1017803.

Zingsheim, M. L. and T. F. Döring (2024). "What weeding robots need to know about ecology." Agriculture, Ecosystems & Environment **364**.