PROGRAMME PRIME-VERT

Fiche technique
Essais réalisés en production végétale



Québec

Table des matières

Définitions 3

Introduction 5

1 Identifier l'objectif à atteindre et le gain agroenvironnemental visé par l'essai 5

2 Explorer les connaissances existantes 5

3 Élaborer une question à répondre 6

4 Élaborer une hypothèse 6

5 Planifier l'essai 7

5.1 Définir les variables à mesurer 7

5.2 Élaborer un dispositif expérimental et choisir le site 7

5.3 Choisir le type de dispositif et le site 8

5.3.1 Illustration des principaux types de dispositifs utilisés en production végétale 10

5.3.2 Schéma du dispositif 16

6 Réaliser le projet 17

6.1 Mise en place du dispositif 17

6.2 Prélèvement de données 17

6.3 Rédaction de la fiche de résultats 18

6.3.1 Visualisation des données brutes 18

6.3.2 Analyses des résultats 20

6.3.3 Analyse agroéconomique 23

6.3.4 Conclusion et recommandations 23

Liste des figures

Figure 1. Dispositif complètement aléatoire (gauche) et dispositif en bande (droite) Chaque polygone représente une parcelle, qui est l'unité expérimentale. 11
Figure 2. Dispositif sans répétition en bandes parallèles au sens du gradient (haut), dispositif en bloc aléatoires complet perpendiculaire au sens des rangs (milieu) et dispositif en bloc aléatoires complet parallèle au sens des rangs (bas). 13
Figure 3. Dispositif en bandes divisées (haut) et dispositif en tiroir (bas). 14
Figure 4. Dispositif en bandes répétées (haut) et dispositif en carré latin (bas) 15
Figure 5. Exemple de dispositif en damier utilisé dans les essais assistés par l'agriculture de précision 16
Figure 6. Exemple de schéma de dispositif 16
Figure 7. Visualisation montrant l'importance des nuages de points (voir l'encadré pour des explications) 19
Figure 8. Boîtes à moustaches, surtout utiles en présence de plusieurs points de données à l'intérieur de chaque traitement, comme lors d'essais assistés par l'agriculture de précision 19
Figure 9. Graphique permettant de vérifier la qualité du nettoyage des données et d'évaluer l'effet du traitement dans un essai assisté par l'agriculture de précision 20
Figure 10. Données brutes d'un essai de variétés de céréales d'automne 21
Figure 11. Moyennes et écarts-types des données d'un essai de variétés de céréales d'automne 21
Figure 12. Boîte à moustaches présentant les résultats d'un essai de variétés de céréales d'automne 21
Figure 13. Visualisation d'un nettoyage retirant les données aberrantes qui pourraient fausser les résultats d'une analyse et mener à des conclusions erronées 22

Définitions

Essai d'implantation

Essai qui vise la réalisation de travaux consistant à ajuster, à modifier ou à valider une technologie, un procédé, une connaissance ou une information existant de façon à faciliter l'utilisation et l'adoption de pratiques agroenvironnementales éprouvées par les entreprises.

Facteur étudié

Variable manipulée volontairement dans un essai pour en évaluer l'effet sur une ou plusieurs variables de réponse. Ce facteur peut être qualitatif (ex. : choix de la variété) ou quantitatif (ex. : taux de semis).

Gradient d'hétérogénéité

Variation progressive et directionnelle des conditions du milieu (sol, topographie, historique cultural, etc.) qui est susceptible d'influencer la réponse des cultures, indépendamment des traitements appliqués.

Interaction

Situation dans laquelle l'effet d'un facteur sur la variable mesurée diffère selon le niveau d'un autre facteur (ou d'un gradient).

Pratique agroenvironnementale

Façon de faire, utilisation d'équipements ou réalisation d'aménagements ou d'infrastructures visant à préserver les ressources naturelles et à protéger l'environnement.

Pratique agroenvironnementale éprouvée

Pratique agroenvironnementale ayant fait l'objet de travaux de recherche scientifique dans des conditions semblables à celles du Québec et ayant permis de démontrer l'obtention de gains environnementaux et son applicabilité par les exploitations agricoles québécoises.

Pseudo-répétition

Échantillons prélevés à l'intérieur d'une même unité expérimentale non répétée (ex. : dispositif en bandes). Ces échantillons ne remplacent pas de vraies répétitions, mais permettent d'estimer la variabilité interne de la parcelle et d'améliorer la représentativité de la mesure.

Randomisation

Répartition aléatoire des traitements dans l'espace, de façon à éviter que la position des parcelles n'avantage ou ne désavantage systématiquement un traitement. Dans un dispositif avec répétitions, cette répartition s'effectue indépendamment à l'intérieur de chaque répétition.

Répétition

Application indépendante d'un même traitement à plusieurs unités expérimentales distinctes. Les répétitions permettent de distinguer l'effet réel du traitement de la variabilité naturelle du milieu et d'accroître la fiabilité des conclusions.

Témoin

Traitement de référence correspondant à la pratique habituelle de l'entreprise et auquel les autres traitements sont comparés. Sa présence est essentielle pour mesurer l'effet réel d'une nouvelle pratique.

Traitement

Modalité ou combinaison de modalités appliquée à une unité expérimentale dans le cadre d'un essai. Par exemple, dans un essai visant à évaluer trois taux de semis, chaque taux constitue un traitement distinct. Lorsque deux facteurs sont étudiés, chaque combinaison de leurs modalités forme un traitement.

Variable mesurée

Caractéristique quantifiable observée sur des unités expérimentales et permettant d'évaluer l'effet des traitements appliqués. Elle constitue le résultat que l'essai vise à expliquer.

Zone tampon

Bordure exclue de l'échantillonnage dans une parcelle, car elle est susceptible d'être influencée par le traitement adjacent (effet de voisinage).

Introduction

Ce document présente chronologiquement les étapes de réalisation d'un essai en production végétale, depuis l'identification du besoin jusqu'à la rédaction de la fiche de résultats. Il a été rédigé dans le cadre du sous-volet 1.3 du programme Prime-Vert pour appuyer la planification et la mise en œuvre d'essais d'implantation de pratiques agroenvironnementales éprouvées à la ferme.

1 Identifier l'objectif à atteindre et le gain agroenvironnemental visé par l'essai

Le point de départ de tout essai dans une entreprise agricole est le désir d'améliorer un aspect de cette entreprise. Celui-ci doit être de nature agroenvironnementale. L'essai à la ferme génère de l'information qui aide à la prise de décisions relativement au paramètre à améliorer.

Exemple de démarche : aspect à améliorer
• Augmenter la proportion des sols couverts • Améliorer la conductivité hydraulique des sols • Augmenter la biodiversité • Diminuer les apports de fertilisants de synthèse • Diversifier les rotations • Diminuer l'utilisation de pesticides

2 Explorer les connaissances existantes

La planification de tout essai d'implantation doit s'appuyer sur les connaissances agronomiques existantes qui s'appliquent aux conditions de l'entreprise. Les sources de référence comprennent des articles scientifiques, des publications d'organismes reconnus (universités, gouvernements) et des revues agricoles spécialisées. De plus, les travaux pris en compte doivent avoir été réalisés dans des conditions pédoclimatiques similaires à celles de l'entreprise, peu importe leur région d'origine.

Exemple de démarche : connaissances existantes

• Selon une présentation faite par Marie-Noëlle Thivierge d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, l'augmentation de la proportion des plantes pérennes dans une rotation permet d'améliorer la santé des sols.
  ○ Source : *Bénéfices des plantes fourragères pérennes pour nos écosystèmes agricoles*
• L'épandage de lisier par un système d'irrigation représente une méthode efficace permettant de prévenir la compaction.
  ○ Source :https://www.quebec.ca/blogue/details/epandre-lisier-sans-compacter-sol-profondeur
• Selon le *Guide de cultures de couverture en grandes cultures*, publié par le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), une culture de couverture de légumineuses bien développée permet de réduire significativement les apports d'engrais azoté à la culture nitrophile de l'année subséquente.

3 Élaborer une question à répondre

Après avoir exploré la littérature et sondé les experts en la matière, il est possible d'élaborer diverses questions. On se demandera si l'adoption de telle ou telle pratique pourrait être rentable et améliorer les performances agroenvironnementales de l'entreprise. La question à retenir est en quelque sorte l'objectif de l'essai.

Exemple de démarche : question à répondre
• Est-ce que l'ajout d'une troisième culture à la rotation maïs-soya permettra une réduction de l'usage d'herbicides dans mon entreprise? • Est-ce qu'un semis réalisé au début de septembre plutôt qu'au début d'octobre générera de meilleures performances pour le blé d'automne? • Est-ce que l'introduction d'une culture de couverture intercalaire dans le maïs-grain réduira le rendement ?

4 Élaborer une hypothèse

L'hypothèse est la question formulée à l'affirmative. Il s'agit d'une affirmation claire et précise qui permet d'anticiper le résultat attendu d'un essai.

On réalise un essai pour tester une hypothèse qui sera confirmée ou infirmée par les résultats de celui-ci.

Exemple de démarche : hypothèse
• L'ajout d'une troisième culture (ex. : céréales à paille) à la rotation maïs-soya **entraînera une réduction de la pression des mauvaises herbes** et du nombre d'applications d'herbicides nécessaires par rapport à la régie actuelle. • Un semis de blé d'automne réalisé au début de septembre **générera un rendement supérieur** et une meilleure survie durant l'hiver qu'un semis effectué au début d'octobre, et ce, grâce à un meilleur tallage automnal[1]. • Le rendement du maïs-grain ne sera pas affecté par la culture de couverture intercalaire. *[1] Notez que cette phrase contient trois hypothèses distinctes, ce qui nécessitera davantage de prises de données.*

5 Planifier l'essai

5.1 Définir les variables à mesurer

Les variables à mesurer sont celles qui permettront de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse. Comme la prise de données exige des ressources, il est recommandé, dans le cadre d'un essai à la ferme, de limiter au minimum le nombre de variables à mesurer permettant 1) de tester l'hypothèse et 2) de réaliser une évaluation de la rentabilité de la nouvelle pratique.

Chaque donnée prélevée doit contribuer à répondre à l'hypothèse. Chaque nouvelle hypothèse impose de nouvelles prises de données.

Il est également recommandé de consigner les conditions de réalisation de l'essai (dates des interventions culturales, précipitations, températures, incidents opérationnels, etc.). Ces informations faciliteront l'interprétation des résultats et la comparaison entre les cycles si l'essai est reconduit.

Exemple de démarche : variables à mesurer
• Rendement par unité de surface (t/ha) • Taux d'humidité du grain ou de la biomasse à la récolte • Densité de peuplement (nombre de plants par mètre carré) • Poids spécifique (poids de l'hectolitre) • Nombre de talles par plant • Pression des mauvaises herbes, des insectes ou des maladies (à chaque ennemi des cultures son protocole de prise de mesures) • Valeur nutritive (protéines, énergie, fibre au détergent acide [ADF] ou fibre au détergent neutre [NDF]) • Coût des intrants à l'hectare

5.2 Élaborer un dispositif expérimental et choisir le site

Tout système de production agricole comporte de la variabilité. Par exemple, entre les différentes sections d'un champ ou d'une serre. Pour **séparer les sources de variations inhérentes aux systèmes de production de celles introduites par l'essai**, il est essentiel de mener celui-ci selon un dispositif expérimental.

L'effet de la variation inhérente à un système sera souvent supérieur à l'effet apporté par le traitement. Par exemple, dans certains cas, le rendement d'une partie de champ à une autre peut varier de 20 %, alors que le

gain possible avec l'application d'un traitement donné pourrait être de 5 à 10 %. En l'absence d'un dispositif approprié, l'effet du traitement pourrait être masqué ou amplifié.

Dans un essai mené à la ferme, on applique un **traitement** à une **unité expérimentale**, qui est la plus petite entité physique pour laquelle un traitement est appliqué de manière indépendante. Dans les schémas ci-dessous, les unités expérimentales correspondent aux polygones de couleur. Le traitement est choisi en fonction des étapes décrites précédemment. Il peut concerner, par exemple, la quantité de semences ou le choix d'une culture.

La réalisation d'un essai selon un dispositif expérimental exige trois actions :

1) Une organisation planifiée des unités expérimentales, soit dans l'espace et/ou le temps;
2) La répétition de chaque combinaison de traitement, qui permet de réduire l'impact de la variabilité naturelle, de s'assurer que les résultats observés sont bien dus aux facteurs étudiés et non à d'autres facteurs aléatoires et d'obtenir des conclusions fiables.
3) La randomisation de l'attribution des traitements aux unités expérimentales, qui consiste à affecter chaque traitement de façon aléatoire plutôt que selon un ordre fixe. La randomisation assure que les biais potentiels liés à la position des parcelles ne favorisent ni ne défavorisent systématiquement un traitement donné. Elle constitue la condition nécessaire à la validité des résultats.

5.3 Choisir le type de dispositif et le site

Un dispositif bien choisi est le fondement de conclusions solides. Il existe plusieurs types de dispositifs expérimentaux.

Le tableau 1 guide le choix de dispositif en fonction de deux paramètres à établir avant de planifier l'essai : le nombre de gradients d'hétérogénéité présents sur le site et le nombre de facteurs étudiés. Utilisez-le tableau comme un arbre décisionnel en répondant d'abord à ces deux questions, puis en consultant la section correspondante pour une description détaillée du dispositif retenu.

Concepts fondamentaux

Le choix du type de **dispositif expérimental** dépendra des trois éléments suivants :

1) Le nombre de **gradients d'hétérogénéité**;
2) Le nombre de **facteurs étudiés**, soit un maximum de deux lors d'un même essai dans le cadre du programme Prime-Vert[1];
3) Les contraintes de ressources.

Un **gradient d'hétérogénéité** désigne une variation progressive et directionnelle des conditions du milieu qui influence la réponse des cultures. Il est essentiel de **relever les principaux gradients présents** sur le site projeté avant de choisir un dispositif. Les gradients peuvent être causés par :

1. Type ou série de sols
2. Pentes et élévation
3. Présence de drains
4. Proximité d'un boisé
5. Présence de zones compactées
6. Différence d'historique (par exemple, les cultures précédentes ou les applications d'intrants)
7. Zone de rendement
8. Variabilité de l'humidité du sol
9. Variabilité du pH
10. Variabilité des éléments nutritifs
11. Direction des vents
12. Pression de mauvaises herbes, d'insectes ou de maladies

Un **facteur étudié** est une variable manipulée dans un essai pour en évaluer l'effet sur une ou plusieurs **variables mesurées**. Ce facteur peut être quantitatif ou qualitatif.

Tableau 1. Exemples de facteurs étudiés quantitatifs et qualitatifs

Facteurs quantitatifs	Facteurs qualitatifs
Taux d'un intrant (semences, fertilisant)	Variété d'une culture
Fréquence d'application d'un intrant	Type de culture
Date du semis	Diversification de la rotation
Espacement entre les rangs	Type de travail du sol
	Mode d'application des intrants

Le terme « **traitement** » désigne chaque modalité du ou des facteurs étudiés. Par exemple, dans un essai visant à évaluer trois taux de semis, chaque taux constitue un traitement distinct du facteur quantitatif « taux de semis ». Dans un essai portant sur trois variétés et comportant deux dates de semis (deux facteurs, dont un qualitatif et un quantitatif), chaque combinaison variété-date représente un traitement pour un total de six traitements.

Tableau 1 : Dispositifs possibles en fonction du nombre de gradients et du nombre de facteurs étudiés

Lien vers la section	Nombre de gradients	Nombre de facteurs étudiés	Dispositifs possibles
5.3.1.1	0 (site uniforme)	1	Dispositif en bandes Dispositif complètement aléatoire
5.3.1.2	1	1	Dispositif en bandes parallèles au sens du gradient Dispositif en bandes répétées Dispositif en blocs aléatoires complets
5.3.1.3	1	2	Dispositif en bandes divisées parallèles au sens du gradient Dispositif en tiroir
5.3.1.4	2	1	Dispositif en bandes répétées Dispositif en carré latin
5.3.1.5	2	2	Ce type de projet n'est pas recommandé parce qu'il devient trop complexe de séparer les effets des facteurs étudiés de ceux des gradients sur le terrain. Il faudra alors retenir seulement le plus important des deux facteurs étudiés. **Une exception à cette règle est l'usage de dispositifs spécialisés pour les essais assistés par l'agriculture de précision, en particulier du dispositif en damier.**

5.3.1 Illustration des principaux types de dispositifs utilisés en production végétale

Les dispositifs avec répétitions doivent inclure un **minimum de trois répétitions**. La valeur de chaque variable mesurée doit correspondre à la moyenne de plusieurs échantillons par parcelle. Les schémas ci-dessous illustrent la randomisation de l'attribution des traitements : l'ordre des traitements n'est jamais systématique ni croissant.

Les dispositifs en bandes (avec pseudo-répétitions) doivent comporter un **minimum de cinq échantillons par parcelle**.

5.3.1.1 Aucun gradient et un seul facteur étudié

Le dispositif complètement aléatoire est possible avec de petites parcelles, qui ont moins de chances que les autres de présenter une variabilité spatiale.

Un dispositif en bandes est aussi possible dans une telle situation. Chaque bande est une unité expérimentale non répétée à l'intérieur de laquelle il est nécessaire de prélever au moins cinq échantillons par parcelle. Ces échantillons sont des pseudo-répétitions. Peu importe le dispositif retenu, **il faut éviter de prélever des échantillons sur le pourtour des parcelles, qui doit être traité comme une zone tampon**.

Avant de retenir ce dispositif, il importe de s'assurer de l'absence de gradient. Plus la taille des parcelles est grande, plus la probabilité d'observer un gradient est élevée.

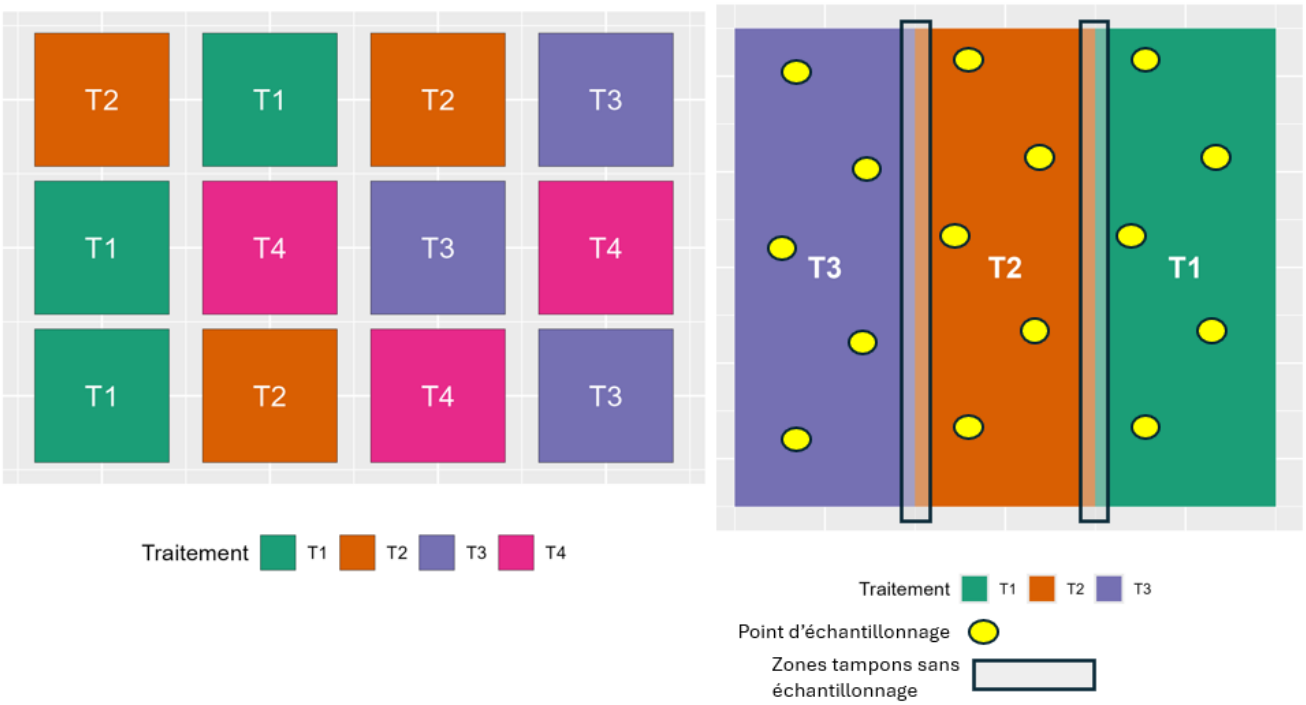


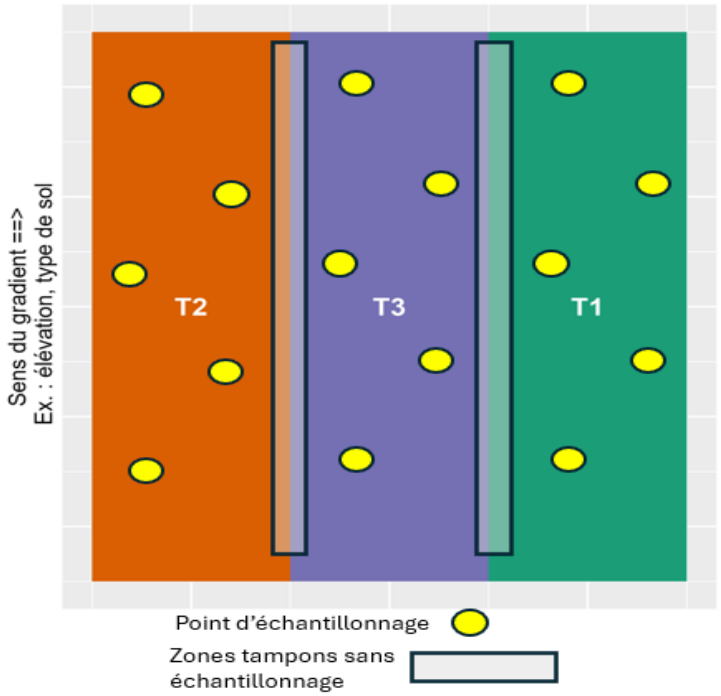
Figure 1. Dispositif complètement aléatoire (gauche) et dispositif en bande (droite)
Chaque polygone représente une parcelle, qui est l'unité expérimentale.

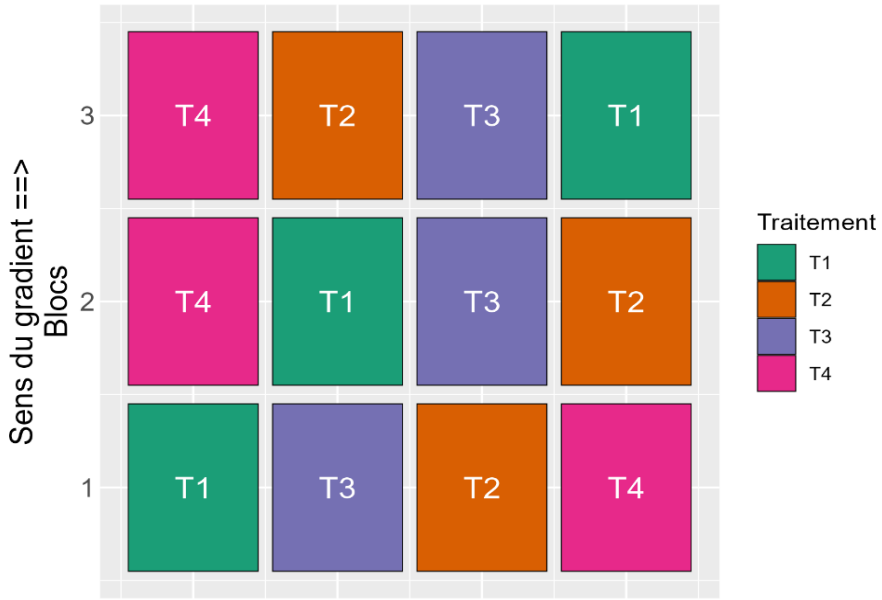
5.3.1.2 Un seul gradient et un seul facteur étudié

Cette situation est fréquente. Le **dispositif en blocs aléatoires complets** permet d'isoler l'effet du gradient de celui du traitement, puisqu'à l'intérieur d'un bloc chaque traitement est exposé à un niveau similaire du gradient.

Dans le **dispositif en bandes parallèles au sens du gradient**, chaque bande est exposée au même gradient. Le prélèvement d'un minimum de cinq échantillons répartis uniformément (illustré ci-dessous) permet de séparer l'effet du gradient de celui du traitement, mais seulement si le traitement entraîne la même réaction de la culture le long du gradient. Dans la figure 2, le gradient est parallèle au sens du champ. Un **dispositif en bandes répétées** est nécessaire lorsque le gradient est perpendiculaire au sens du champ (voir la figure 4).

La littérature suggère parfois que l'effet du traitement pourrait varier le long du gradient. On parle alors d'une interaction entre le traitement et le gradient, c'est-à-dire que la différence entre le traitement et le témoin n'est pas constante sur toute la longueur de la bande. Dans ce cas, il est nécessaire de diviser chaque bande en sections (par exemple, le début, le milieu et la fin) et de prélever cinq échantillons dans chacune de ces sections. En cas de contraintes de ressources, il est préférable de raccourcir les bandes et de concentrer l'essai dans une partie représentative des conditions prédominantes de l'entreprise plutôt que de générer des résultats erronés.


Sens du gradient ==>
Ex. : élévation, type de sol
T2
T3
T1
Point d'échantillonnage
Zones tampons sans échantillonnage


Sens du gradient ==>
Blocs
3
2
1
T4
T2
T3
T1
T4
T1
T3
T2
T1
T3
T2
T4
Traitement
T1
T2
T3
T4

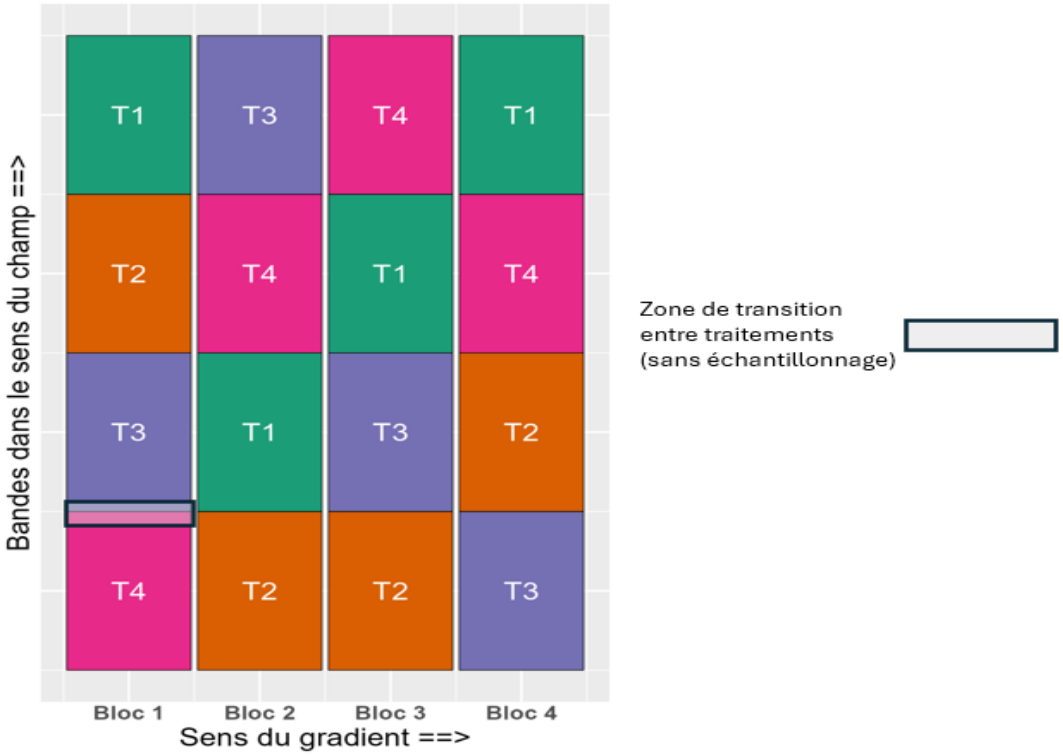


Figure 2. Dispositif sans répétition en bandes parallèles au sens du gradient (haut), dispositif en bloc aléatoire complet perpendiculaire au sens des rangs (milieu) et dispositif en bloc aléatoire complet parallèle au sens des rangs (bas).

5.3.1.3 Un gradient et deux facteurs étudiés

Il est fréquent de vouloir étudier la manière dont deux facteurs interagissent. Par exemple, on peut souhaiter vérifier si différents cultivars de seigle d'automne réagiront de la même façon à différents taux de semis ou à différents taux de fertilisant.

Un **dispositif en bandes divisées** peut être mis en œuvre avec des équipements de ferme. Il permet d'appliquer les niveaux d'un premier facteur (par exemple, le taux de fertilisant) sur de larges bandes, puis de subdiviser ces bandes pour y assigner aléatoirement les niveaux d'un second facteur (par exemple, le cultivar). Le choix du facteur à appliquer en premier sera dicté par les équipements disponibles, notamment leur largeur de travail. Ce type de dispositif est déconseillé lorsque les parcelles sont grandes, car elles sont alors plus susceptibles de traverser des zones de sol hétérogène, ce qui rend difficile la séparation de l'effet du traitement de celui du terrain. Quatre répétitions ou plus sont nécessaires pour maintenir une capacité suffisante à détecter les effets des deux facteurs.

Le **dispositif en tiroir** est aussi une option pour ce type d'étude. Cependant, il est plus difficile à appliquer avec des équipements de ferme et se prête souvent mieux à des essais dans de petites parcelles.

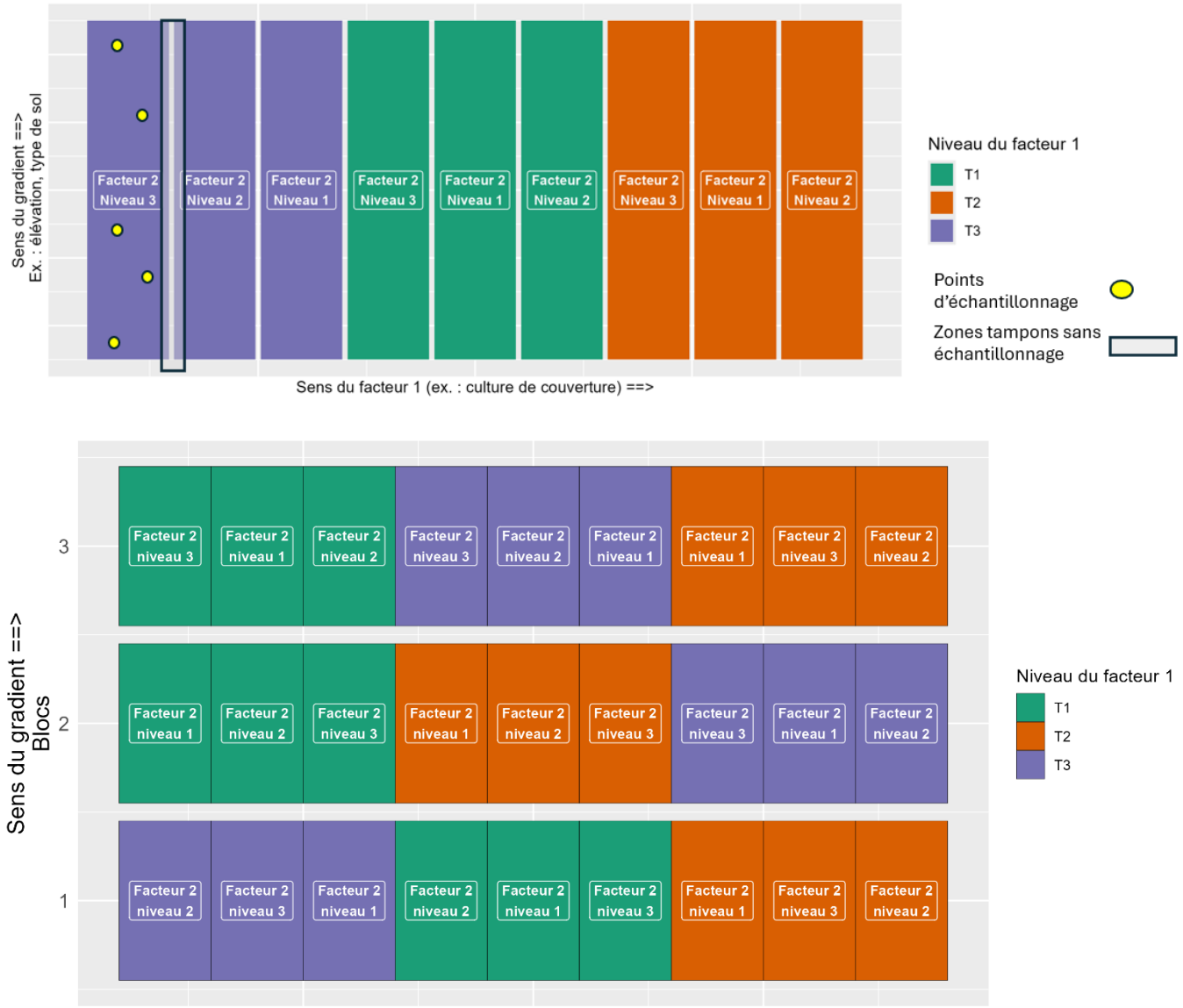


Figure 3. Dispositif en bandes divisées (haut) et dispositif en tiroir (bas).

5.3.1.4 Deux gradients et un seul facteur étudié

Il est possible que deux gradients soient présents sur un site. Par exemple, le type de sol change le long du champ et une haie brise-vent est installée sur un des côtés. Le **dispositif en carré latin** est typiquement recommandé dans cette situation. Il consiste à appliquer le principe du sudoku : chaque traitement ne doit se trouver qu'une seule fois sur chaque ligne et sur chaque colonne.

Un **dispositif en bandes répétées** constitue une solution de rechange pratique. Les bandes sont orientées parallèlement au premier gradient, de sorte que chacune est exposée aux mêmes variations de ce gradient. Le second gradient, perpendiculaire au premier, est géré en répétant les bandes — chaque traitement apparaît ainsi plusieurs fois le long de ce gradient. À l'intérieur de chaque répétition, l'ordre des traitements doit être randomisé. Cette solution n'est toutefois pas idéale, car il subsiste une variation résiduelle du gradient 2 à l'intérieur de chaque répétition. Des bandes plus étroites (tout en conservant des zones tampons) réduisent cette variation résiduelle, et un plus grand nombre de répétitions améliore la capacité à en estimer l'effet.

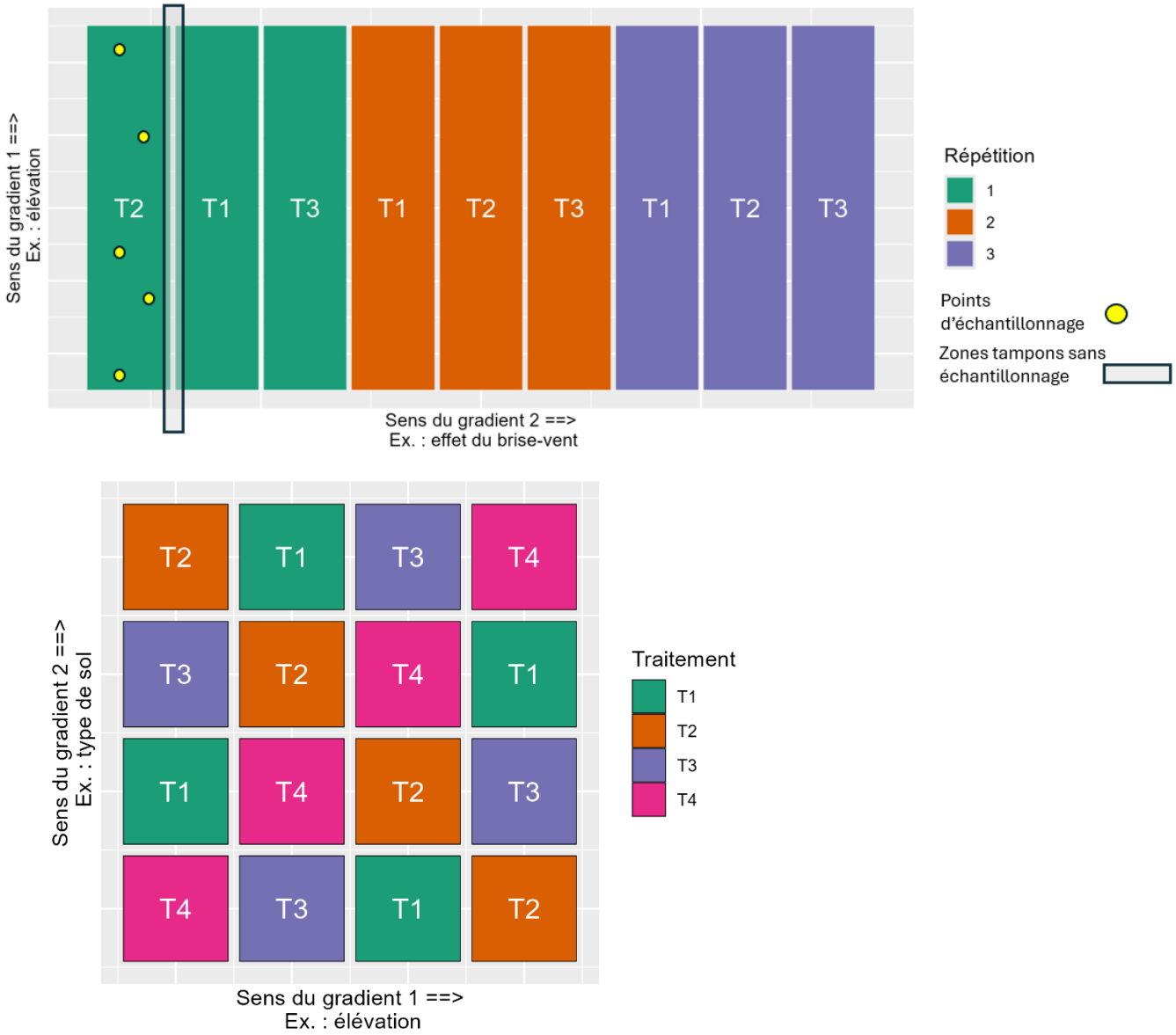


Figure 4. Dispositif en bandes répétées (haut) et dispositif en carré latin (bas)

5.3.1.5 Dispositifs spécialisés pour les essais assistés par l'agriculture de précision

Lorsque les équipements utilisés le permettent, tous les dispositifs décrits ci-dessus peuvent être utilisés dans les essais assistés par l'agriculture de précision.

Le recours au **dispositif en damier**, généré par des outils géomatiques, est également possible. Ce dispositif peut permettre d'étudier un ou deux facteurs.

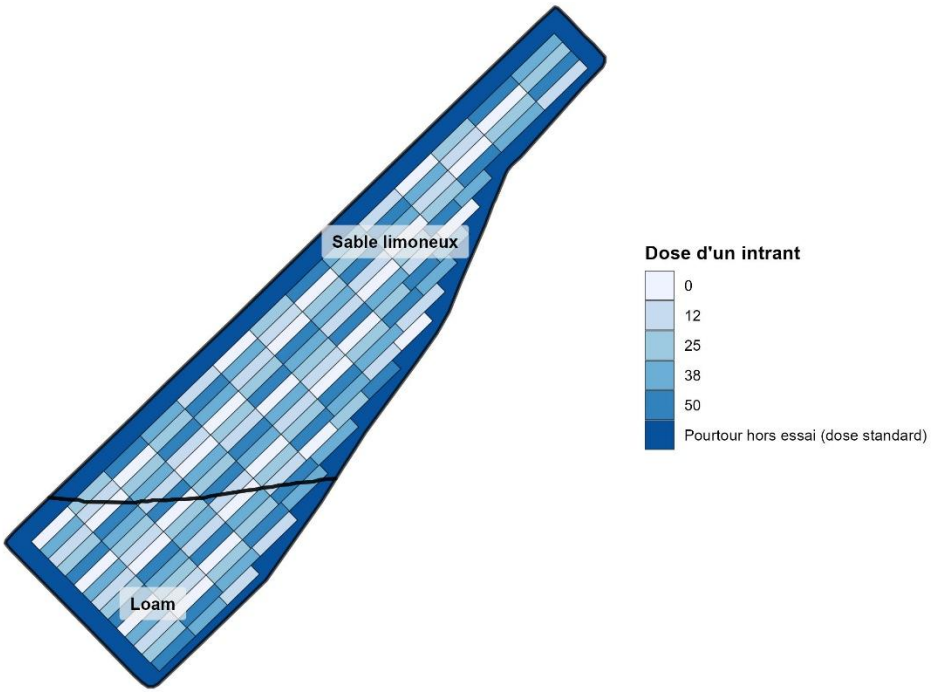


Figure 5. Exemple de dispositif en damier utilisé dans les essais assistés par l'agriculture de précision

5.3.2 Schéma du dispositif

Il est **nécessaire** de produire un schéma qui présente clairement les traitements, la dimension et le nombre de répétitions du dispositif. Ce schéma devrait aussi montrer comment le dispositif isolera l'effet du traitement de l'effet du ou des principaux gradients du terrain. La figure 6 offre un exemple de schéma de dispositif.

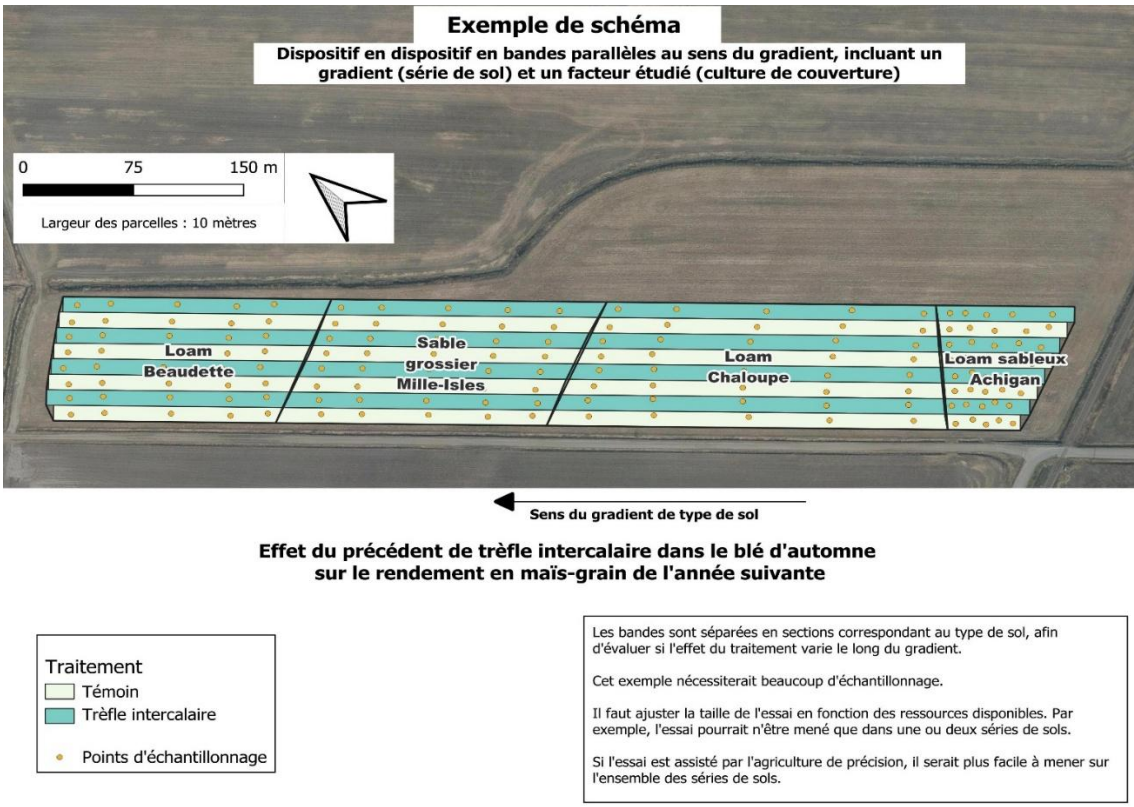


Figure 6. Exemple de schéma de dispositif

Considérations pratiques pour la mise en place d'un dispositif

- Développez votre dispositif en fonction des ressources disponibles (équipements, employés, etc.).
- Établissez la largeur des parcelles en fonction de celle des équipements utilisés.
- Veillez à ce que l'emplacement du dispositif expérimental ne nuise pas aux opérations courantes de l'entreprise.
- Pour les essais assistés par l'agriculture de précision :
  - Vérifiez l'interopérabilité des différents équipements utilisés.
  - Assurez-vous que l'équipement de récolte est équipé d'un capteur de rendement géoréférencé.
  - Calibrez ce capteur de rendement avant la récolte.
  - Veillez à ce que le ou les applicateurs d'intrants utilisés dans le cadre du projet permettent de suivre une carte de prescription à taux variable et de géolocaliser les doses effectivement appliquées.

Exemple de démarche : essai sur les cultures de couverture
• **Aspect à améliorer.** Une entreprise veut augmenter la couverture hivernale de ses sols. • **Connaissances existantes.** Selon le *Guide de cultures de couverture en grandes cultures*, publié par le CRAAQ, le trèfle intercalaire dans le blé d'automne est une méthode éprouvée, qui pourrait augmenter les rendements du maïs-grain de l'année suivante. • **Question à retenir.** Est-ce qu'un trèfle intercalaire dans le blé d'automne permettrait d'augmenter le rendement de maïs -grain de l'année suivante, tout en couvrant les sols durant l'hiver ? • **Hypothèse.** Le trèfle intercalaire offrira une couverture hivernale adéquate des sols et augmentera le rendement du maïs-grain de l'année suivante. • **Variables à mesurer.** Le minimum à mesurer pour tester cette hypothèse double est : la couverture du sol par le trèfle intercalaire et le rendement du maïs-grain de l'année suivante. • **Choix du dispositif expérimental et du site.** Un seul facteur étudié : la présence ou non de trèfle intercalaire dans le blé d'automne. Un dispositif en bandes parallèles au sens du gradient tel que celui illustré ci-dessus serait idéal. • **Réalisation du projet.**

6 Réaliser le projet

Après avoir établi le dispositif de l'essai comme il a été montré à la section 5, il faut le réaliser.

6.1 Mise en place du dispositif

La mise en place du dispositif est une étape cruciale pour le succès du projet, l'application des traitements devant être prévue quelques semaines à l'avance. Il faut également s'assurer d'aviser le producteur et les employés concernés. Lorsque les traitements sont appliqués manuellement, un marquage des parcelles doit également être prévu. Enfin, lorsque les traitements sont effectués à l'aide des équipements de ferme dans un essai assisté par l'agriculture de précision, il importe de prévoir à l'avance la production des cartes de prescription ainsi que des tests de compatibilité à mener avec ces équipements.

6.2 Prélèvement de données

Le prélèvement de données doit être planifié quelques semaines à l'avance (choix des outils, production des feuilles de prise de données, etc.). De plus, il importe d'aviser le producteur et les employés concernés. Pour

s'assurer de la représentativité des résultats, il ne faut jamais prélever un échantillon ou une donnée en bordure d'une parcelle.

6.3 Rédaction de la fiche de résultats

6.3.1 Visualisation des données brutes

La **visualisation des données brutes** devrait être la première étape de toute analyse de résultats. En effet, le simple calcul des moyennes par traitement ne permet pas d'apprécier la répartition des données. Cette visualisation permet, par exemple :

1) de déceler les erreurs de saisie de données;
2) de repérer les données aberrantes;
3) d'apprécier la variabilité de réponse :
    - entre les traitements,
    - à l'intérieur d'un même traitement,
    - entre des sections de champ,
    - entre les années;
4) d'obtenir une vue d'ensemble des tendances.

Afin de bien se familiariser avec les données obtenues, il est conseillé de réaliser diverses visualisations :

- nuages de points (traitement et réponse);
- diagrammes à barres (moyennes par traitement);
- boîtes à moustaches;
- histogrammes (distribution d'une variable).

Importance de la visualisation (voir la figure 8)
Détection d'anomalies : Les nuages de points révèlent immédiatement les données aberrantes (points rouges), qui passent inaperçues dans les analyses statistiques classiques. Ils révèlent que certains points (zone humide) ne seront pas nécessairement retirés et représentent des signaux agronomiques utiles plutôt que des erreurs, guidant l'interprétation des résultats. **Impact sur les conclusions :** La comparaison des lignes de tendance rouges (données aberrantes) et bleues (données nettoyées) montre comment quelques points peuvent fausser l'interprétation de l'efficacité du traitement. **Validation de l'échantillonnage :** La visualisation confirme qu'avec cinq échantillons par parcelle, le fait de perdre quelques observations n'invalide pas l'analyse, démontrant l'importance d'un échantillonnage suffisant.

Toutefois, **le minimum à réaliser est la création de nuages de points ou de boîtes à moustaches**. Pour les traitements quantitatifs, une courbe de tendance peut être ajoutée au nuage de points.

Le nuage de points peut être remplacé par des **boîtes à moustaches** (voir la figure 8) quand :

- On dispose de beaucoup de données et que les points se chevauchent;
- Le facteur étudié est qualitatif.

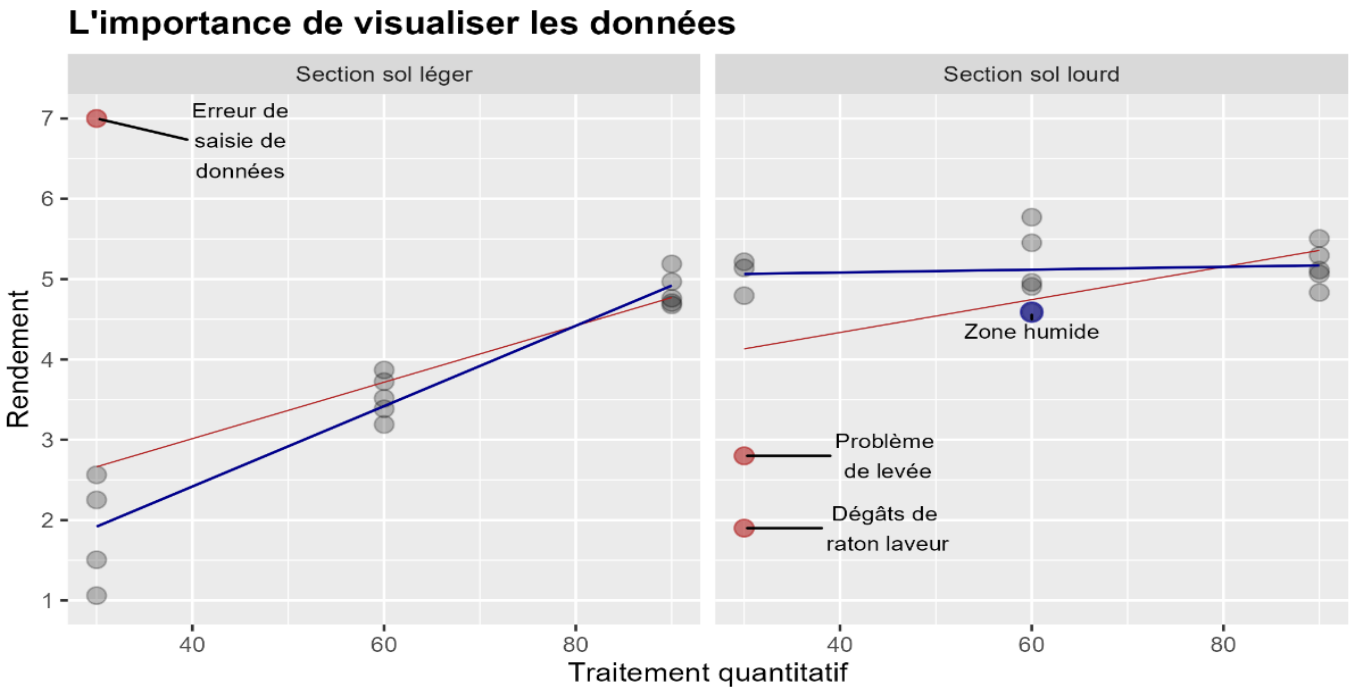


Figure 7. Visualisation montrant l'importance des nuages de points (voir l'encadré pour des explications)

Choisir la bonne visualisation

Avec beaucoup de points par traitement (1100 dans cet exemple), la boîte à moustaches est préférable.

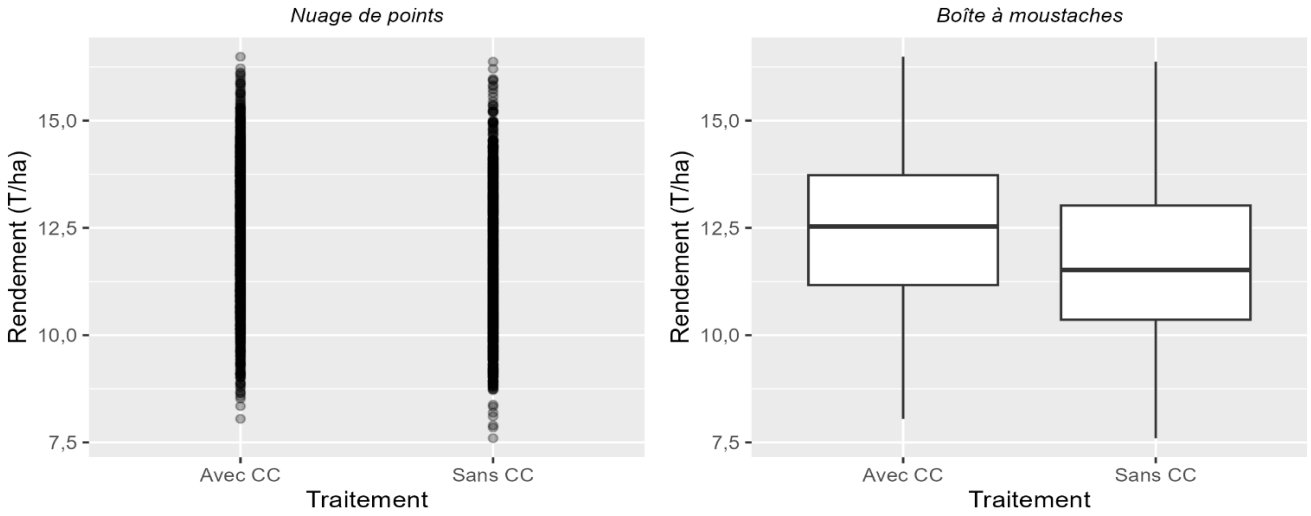


Figure 8. Boîtes à moustaches, surtout utiles en présence de plusieurs points de données à l'intérieur de chaque traitement, comme lors d'essais assistés par l'agriculture de précision
La ligne horizontale représente la médiane, la boîte délimite les 25e et 75e percentiles, puis les moustaches déterminent la zone où se trouvent la plupart des observations.

Les essais assistés par l'agriculture de précision sont souvent réalisés sur de grandes superficies incluant plusieurs zones de potentiel de rendement. Ainsi, le simple examen visuel d'une carte de rendement permet rarement de tirer des conclusions sur l'effet des traitements. Pour ce type d'essai couvrant de larges zones, il faut **produire une visualisation par zone couverte**[1].

[1] On parle ici de zones relativement uniformes situées le long d'un gradient d'hétérogénéité, comme il est décrit à la section 6.2.

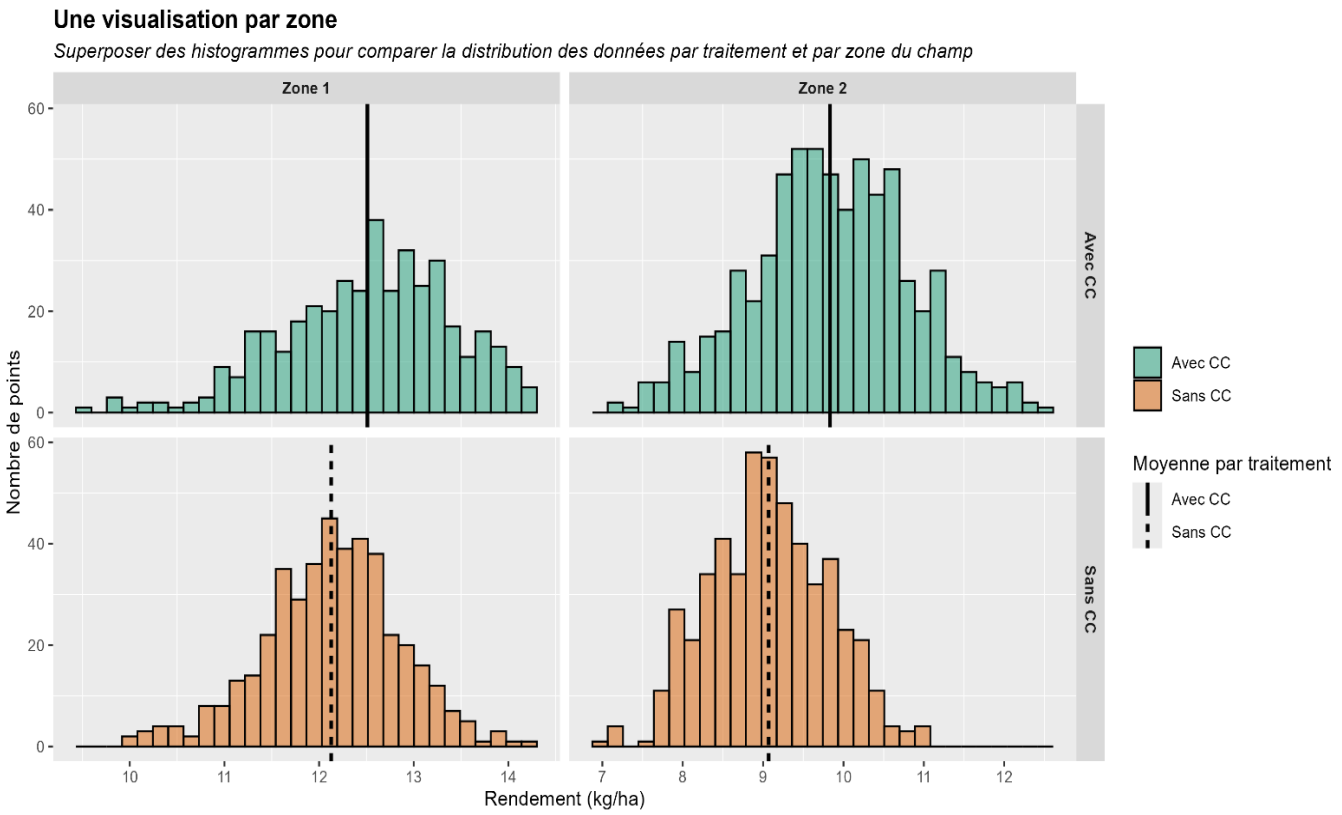


Figure 9. Graphique permettant de vérifier la qualité du nettoyage des données et d'évaluer l'effet du traitement dans un essai assisté par l'agriculture de précision

6.3.2 Analyses des résultats

Les analyses statistiques incluant des tests d'hypothèse ne sont pas obligatoires pour tirer des enseignements d'un essai à la ferme bien planifié et correctement exécuté. Elles sont toutefois recommandées, à condition d'avoir accès à un professionnel compétent. En effet, les analyses statistiques ajoutent de la rigueur à l'interprétation des résultats et permettent de quantifier la confiance pouvant être accordée aux conclusions.

Le calcul des moyennes et des écarts-types[2] par traitement, accompagné de visualisations, **est le minimum utile** permettant d'interpréter de façon éclairée les résultats d'un essai à la ferme.

Par exemple, pour des données brutes comme celles présentées ci-dessous, on calculera l'écart-type et la moyenne par variété, puis on produira une visualisation des données brutes. Comme il s'agit d'un traitement qualitatif, la boîte à moustaches est appropriée. Dans cet exemple, les variétés 2 et 3 ont des rendements assez similaires. La variété 2 présente des rendements moins stables, comme le montrent l'écart-type supérieur ainsi que la hauteur de la boîte à moustaches.

[2] L'écart-type est une mesure statistique qui permet de quantifier le degré de variation ou de dispersion dans un ensemble de données. Il indique à quel point les valeurs sont dispersées autour de la moyenne de l'ensemble de données.

Variété	Répétition	Rendement (T/ha)
Variété 1	1	5,38
Variété 1	2	4,71
Variété 1	3	4,97
Variété 2	1	6,22
Variété 2	2	6,66
Variété 2	3	5,45
Variété 3	1	5,99
Variété 3	2	6,08
Variété 3	3	6,14

Figure 10. Données brutes d'un essai de variétés de céréales d'automne

Variété	Moyenne (T/ha)	Écart-type (T/ha)
Variété 1	5,02	0,34
Variété 2	6,11	0,61
Variété 3	6,07	0,08

Figure 11. Moyennes et écarts-types des données d'un essai de variétés de céréales d'automne

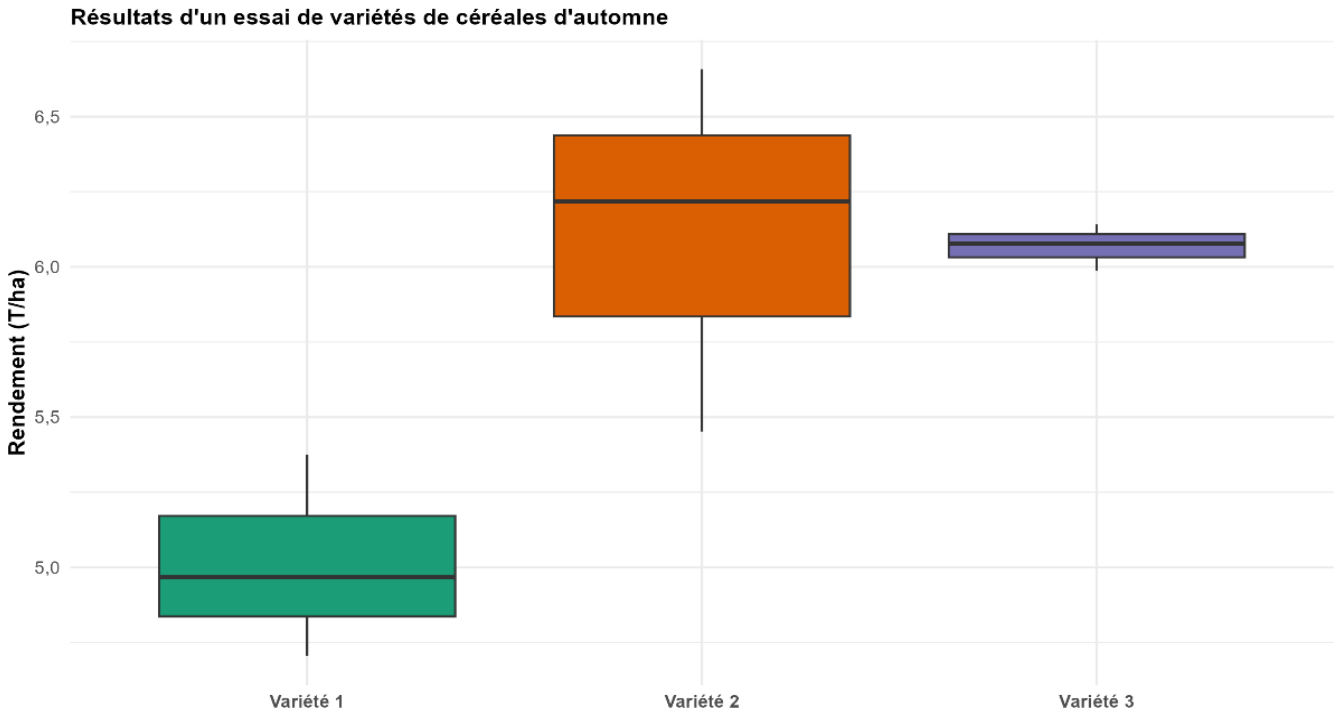


Figure 12. Boîte à moustaches présentant les résultats d'un essai de variétés de céréales d'automne

6.3.2.1 Analyse des résultats d'essais assistés par l'agriculture de précision

L'utilisation de capteurs de rendement géoréférencés pour prélever les données de rendement dans un essai à la ferme permet d'économiser beaucoup de temps comparativement à des mesures manuelles. Toutefois, il faut alors s'assurer :

- Que le capteur de rendement est calibré adéquatement;
- Que les données sont nettoyées au moyen de méthodes appropriées (voir la figure 13 pour l'impact d'un nettoyage de données);
- Que les passages de la moissonneuse-batteuse sont bien alignés dans les parcelles.

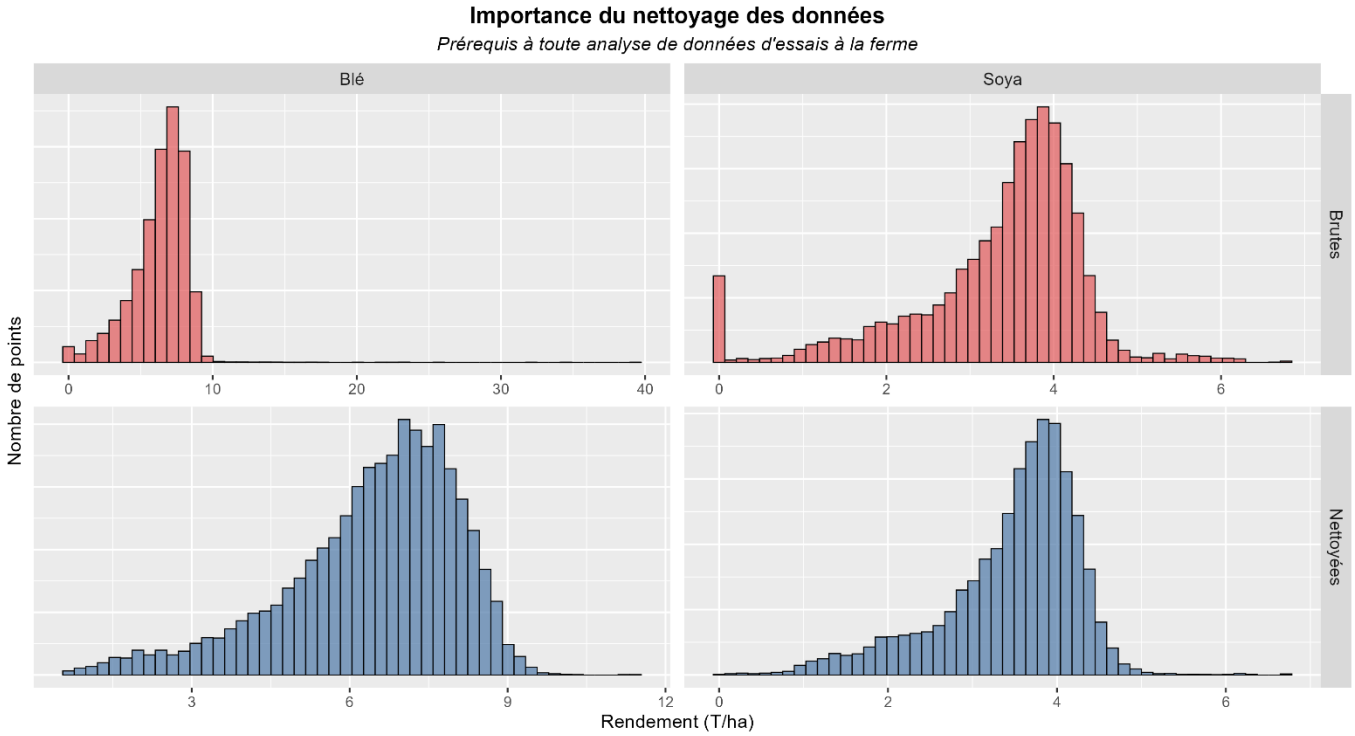


Figure 13. Visualisation d'un nettoyage retirant les données aberrantes qui pourraient fausser les résultats d'une analyse et mener à des conclusions erronées

Les dispositifs en bandes se prêtent bien aux essais assistés par l'agriculture de précision. **Le calcul des moyennes et des écarts-types par traitement ainsi que les visualisations doivent être répétées pour chaque zone couverte par l'essai.**

Diverses méthodes d'analyse statistique ont été développées spécifiquement pour les essais assistés par l'agriculture de précision. Il est suggéré de les explorer avec l'aide d'un professionnel.

Ces méthodes sont adaptées à l'analyse des résultats d'essais en bandes :

- La méthode des fenêtres mobiles incluant des tests de Student répétés[3];
- La méthode des fenêtres mobiles incluant des analyses de régression répétées[4];
- L'analyse par permutation pour bandes non répétées[5].

[3] Lawes, R. A. et Bramley, R. G. V. (2012). A simple method for the analysis of on-farm strip trials. *Agronomy Journal, 104,* 371-377.
[4] Colaço, A. F. et al. (2024). Digital strategies for nitrogen management in grain production systems: lessons from multi-method assessment using on-farm experimentation. *Precision Agriculture, 25*, 983-1013.
[5] Córdoba, M. et al. (2025). A new method to compare treatments in unreplicated on-farm experimentation. *Precision Agriculture, 26*, 4-16.

6.3.3 Analyse agroéconomique

L'analyse agroéconomique des résultats fournit des informations essentielles pour guider la prise de décisions concernant l'adoption d'une nouvelle pratique agricole. Elle permet de répondre à des questions clés, telles que la suivante : « Malgré une augmentation du rendement (ou l'absence d'une baisse de rendement), est-il rentable pour mon entreprise d'adopter cette pratique? ».

Cette analyse doit se faire au moyen de la **méthode du budget partiel** :

> « La méthode [du budget partiel] consiste à définir de façon précise le changement, puis à indiquer les améliorations (produits en plus et charges en moins) et les détériorations (produits en moins et charges en plus) dans le **gabarit appelé budget partiel**. Le résultat de ce budget est la différence entre les améliorations et les détériorations. Pour que le changement en vaille la peine, il est préférable que le résultat soit positif[6]. »

L'utilisation d'un tableur est recommandée pour ce genre d'analyse. On y inscrira seulement les dépenses ou revenus qu'on a fait varier ou qu'on a mesurés dans l'essai.

Exemples d'évaluations de budgets partiels
Projet simple : évaluation de cultivars Dans ce type de projet, si le prix des semences est le même pour toutes les variétés, seuls les rendements pourraient varier et le budget partiel consistera simplement à comparer les revenus bruts des différentes variétés. **Projet intermédiaire : évaluation de cultures de couverture** Dans ce type de projet, le budget partiel devra prendre en considération les intrants supplémentaires (ex. : semences) de même que les opérations culturales en plus (ex. : semis, enfouissement ou destruction chimique) ou en moins, le cas échéant (ex. : travaux de sol). Il devra aussi tenir compte des variations de revenus liées au rendement en plus ou en moins. **Projet exigeant davantage de données : introduction d'une nouvelle culture** Ce type de projet exige l'établissement de la marge sur frais variables de chacune des cultures comparées. Étant donné l'importante variation interannuelle pour une même culture, la comparaison entre les cultures doit avoir lieu la même année et à l'intérieur d'un dispositif approprié. L'outil en ligne Rotation$+ est recommandé dans ce cas.

6.3.4 Conclusion et recommandations

En ce qui concerne l'appréciation qualitative d'un essai, au-delà des données chiffrées prélevées, il convient de porter un jugement global sur le déroulement et la valeur de cet essai. Le conseiller fournira une recommandation pertinente pour l'exploitation agricole.

- Quels sont les ajustements à prévoir pour une applicabilité à la ferme?
- Les conditions dans lesquelles s'est déroulé l'essai étaient-elles représentatives? Étaient-elles favorables à une bonne interprétation des résultats?
- L'essai devrait-il être reconduit? Si oui, quelles modifications au dispositif ou aux traitements seraient souhaitables?
- Quelles sont les limites de l'essai qui pourraient restreindre la portée de ses conclusions?
- La pratique de l'essai est-elle recommandée?

[6] CRAAQ. Outil d'encadrement à la budgétisation.

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation
Québec

26-0041