



Rapport final

Développement d'une stratégie de binage pour les grandes cultures et légumes de transformation biologiques semés en rangs étroits

Date : Octobre 2023

Responsable scientifique : Élise Smedbol, Ph. D., chercheure en malherbologie



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

Mick Wu, Ph. D., IRDA

Maxime Lefebvre, Ph. D., IRDA

Maryse Leblanc, Ph. D., IRDA, chercheuse
retraîtée en malherbologie

Équipe de réalisation

Justin Ouellette, technicien, IRDA

Rémi Ducharme, ouvrier agricole, IRDA

Mario Maurice, ouvrier agricole, IRDA

Merci à notre partenaire financier

Ce projet a été financé par l'entremise du programme Innov'Action Agroalimentaire, en vertu du Partenariat canadien pour l'agriculture, entente conclue entre les gouvernements du Canada et du Québec.



Canada Québec 

Ce rapport peut être cité comme suit :

Smedbol, É., Wu, M., Lefebvre, M., et Leblanc, M. 2023. Développement d'une stratégie de binage pour les grandes cultures et légumes de transformation biologiques semés en rangs étroits. Rapport final. 37 pages. © Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA).

Résumé

Ce projet de recherche visait à optimiser les pratiques de binage tardif pour la suppression efficace des mauvaises herbes tout en maximisant le rendement des cultures semées à rangs étroits. Il s'est déroulé à la Plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville en 2019, 2021 et 2022, avec les cultures de haricot vert, de petit pois et de soya. Les objectifs de l'étude étaient : 1) l'évaluation des outils et vitesse appropriés pour le binage tardif, 2) la détermination des stades optimaux des cultures pour le binage tardif, 3) l'évaluation de l'effet de l'utilisation de voies d'accès et de l'espacement entre les rangs sur le rendement des cultures, ainsi que 4) l'évaluation de l'impact de l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse sur la vitesse et la précision du binage. Les résultats de l'objectif 1 indiquent que l'utilisation des socs plats à 4 ou 6 km/h, ainsi que des socs à pattes d'oie à 6 km/h, semble être la stratégie de désherbage la plus efficace pour le binage tardif dans les cultures à rangs étroits étudiées. Pour les stades optimaux de croissance, le petit pois pouvait être désherbé jusqu'au stade de 5-6 entrenœuds, le soya jusqu'au stade de trois feuilles trifoliées et le haricot vert jusqu'au stade de deux feuilles trifoliées, sans dommages. Pour l'objectif 3, l'ajout de voies d'accès n'a pas eu d'effet sur les rendements dans le petit pois, cependant, les parcelles avec voies d'accès semblaient favoriser une plus grande présence de mauvaises herbes. Pour le haricot vert, un espacement plus étroit (19 cm) a entraîné un rendement supérieur par rapport à un espacement plus large (76 cm), malgré que les espacements plus large (38 et 76 cm) facilitaient le contrôle des mauvaises herbes. Pour le soya, les rendements étaient généralement plus élevés avec un espacement de rang plus étroit (19 cm) sans binage tardif, tandis que le binage tardif avait tendance à réduire les rendements. Mais contrairement au haricot, le binage tardif dans les rangs étroits (19 cm) était aussi efficace pour contrôler les mauvaises herbes que dans les parcelles avec un espacement plus large. Finalement, l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse n'a pas eu un impact significatif sur le rendement des cultures étudiées en rangs étroits de 19 cm. Il a été difficile de le vérifier véritablement, les parcelles expérimentales étaient trop courtes pour que le système soit vraiment efficace. Il serait recommandé d'utiliser le système de guidage en contexte de production afin d'éviter les dommages à la culture. En conclusion, cette étude met en lumière l'efficacité du binage tardif comme stratégie complémentaire dans la répression des mauvaises herbes pour les cultures biologiques semées à rangs étroits au Québec. Les résultats fournissent des indications techniques au niveau du désherbage pour les producteurs qui voudraient adopter cette technique de culture en rangs étroits. Ils démontrent aussi qu'il serait possible d'utiliser le système de guidage par caméra pour désherber à la fois les grandes cultures et les cultures de légumes de transformation. Cela pourrait favoriser la diversification des rotations de culture, le désherbage n'étant plus un enjeu puisque les mêmes outils s'avèrent efficace pour différents types de culture.

TABLE DES MATIERES

| | | |
|---|-------------------------------|----|
| 1 | Introduction | 4 |
| 2 | Matériel et méthode | 5 |
| 3 | Résultats et discussion | 13 |
| 4 | Conclusion | 37 |
| 5 | Références | 37 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Informations culturelles pour l'objectif 1, visant à évaluer les outils et la vitesse appropriés pour biner les rangs étroits pour les cultures de petit pois, haricot vert et soya, étudiées en 2019 et 2021. | 7 |
| Tableau 2 : Informations culturelles pour l'objectif 2, visant à déterminer les stades optimaux des cultures à rangs étroits pour les biner, pour le petit pois, le haricot vert et le soya, étudiées en 2019 et 2021. | 8 |
| Tableau 3 Informations culturelles pour l'objectif 3, visant à déterminer l'effet de l'utilisation de voies d'accès et de l'espacement entre les rangs sur le rendement des cultures de petit pois, haricot vert et soya, étudiées en 2021 et 2022. | 10 |
| Tableau 4 : Informations culturelles pour l'objectif 4, visant à déterminer l'impact de l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse sur la vitesse et la précision du binage pour les cultures de petit pois, haricot vert et soya, étudiées en 2021 et 2022. | 11 |
| Tableau 5 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$ | 14 |
| Tableau 6 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec les variables de rendement pour le haricot vert, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$ | 15 |
| Tableau 7 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$ | 16 |
| Tableau 8 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec la variable de dommages aux plants (différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif pour le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une p-value ≥ 0.05 | 17 |
| Tableau 9 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 pour l'efficacité du désherbage dans le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$ | 18 |
| Tableau 10 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$ | 20 |
| Tableau 11 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec les variables de rendement pour le haricot, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une p-value $\geq 0,05$ | 21 |
| Tableau 12 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 22 |
| Tableau 13 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec la variable de dommages aux plants (différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif pour le petit pois, le haricot vert et le soya, | |

| | |
|---|----|
| les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une p-value ≥ 0.05 | 23 |
| Tableau 14 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 25 |
| Tableau 15 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables de rendement pour le haricot, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 26 |
| Tableau 16 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 27 |
| Tableau 17 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables d'abondance et de biomasse des mauvaises en fin de saison pour les trois cultures à l'étude, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 29 |
| Tableau 18 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 4 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 33 |
| Tableau 19 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 4 avec les variables de rendement pour le haricot vert, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 34 |
| Tableau 20 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 4 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 35 |
| Tableau 21 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 pour l'efficacité du désherbage dans le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$ | 36 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Schéma des espacements de rangs testés : A) Rangs étroits de 19 cm (7,5 pouces) sans voies d'accès, B) Rangs étroits de 19 cm (7,5 pouces) avec voies d'accès, pour les trois cultures (petits pois, haricot vert, soya), C) Rangs étroits de 19 cm (15 pouces), D) Rangs de 76 cm (30 pouces), dans le haricot vert et le soya. | 9 |
| Figure 2 : Variables de rendement pour la culture de petit pois A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h..... | 14 |
| Figure 3 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h..... | 15 |
| Figure 4 : Variables de rendement pour la culture de soya A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) le poids à l'hectolitre (kg/hl), C) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) et D) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, | |

| | |
|--|----|
| O4) socs à pattes d’oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d’oie à 6 km/h. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 16 |
| Figure 5 : Dommages pour la culture de A) petit pois, soit la différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif et probabilité de dommages, soit la probabilité d’une réduction du nombre de plants après le passage des outils de désherbage pour le B) haricot et C) le soya, pour les deux années d’expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d’oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d’oie à 6 km/h. | 17 |
| Figure 6 : Efficacité du désherbage pour la culture de A) petit pois et de B) soya, pour les deux années d’expérimentation combinée, 2019 et 2021, ainsi que pour C) le haricot en 2019 et D) le haricot en 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d’oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d’oie à 6 km/h. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 18 |
| Figure 7 : Variables de rendement pour la culture de petit pois A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d’expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05..... | 20 |
| Figure 8 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d’expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05..... | 21 |
| Figure 9 : Variables de rendement pour la culture de soya A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) le poids à l’hectolitre (kg/hl), C) le rendement des grains à 14% d’humidité (kg/ha) et D) le poids de 1000 grains à 14% d’humidité (g) pour les deux années d’expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance..... | 22 |
| Figure 10 : Dommages pour la culture de A) petit pois en 2019, soit la différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif et probabilité de dommages, soit la probabilité d’une réduction du nombre de plants après le passage des outils de désherbage pour le B) petit pois en 2021, C) haricot et D) le soya, pour les deux années d’expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05..... | 23 |
| Figure 11 : Variables de rendement pour la culture de petit pois, A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d’expérimentation, 2021 et 2022. | 25 |
| Figure 12 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert , A) le peuplement (nombre de plants/ha) et 2021 et B) 2022, C) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) en 2021 et D) 2022, E) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d’expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d’accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d’accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 26 |
| Figure 13 : Variables de rendement pour la culture de soya, A) le peuplement (nombre de plants/ha) en 2021 et B) 2022 et C) le poids à l’hectolitre (kg/hl) pour les deux années d’expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de | |

| | |
|--|----|
| désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 27 |
| Figure 14 : Variables de rendement pour la culture de soya, A) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) en 2021 et B) 2022, C) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) en 2021 et D) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 28 |
| Figure 15 : Abondance des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du petit pois en A) 2021 et B) 2022. Biomasse des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du petit pois en C) 2021 et D) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 30 |
| Figure 16 : Abondance des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du haricot vert en A) 2021 et B) 2022. Biomasse des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du haricot vert en C) 2021 et D) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 31 |
| Figure 17 : Abondance des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du soya en A) 2021 et B) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. C) Biomasse des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du soya en 2021 et 2022, tous traitements confondus (aucunes différences significatives). Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 32 |
| Figure 18 : Variables de rendement pour la culture de petit pois, A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage par caméra, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 33 |
| Figure 19 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert, A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra. | 34 |
| Figure 20 : Variables de rendement pour la culture de soya A) le peuplement (nombre de plants/ha) B) le poids à l'hectolitre (kg/hl) C) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) D) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra. | 35 |
| Figure 21 : Efficacité du désherbage pour la culture de A) petit pois, B) haricot vert en 2021 et C) 2022, D) le soya en 2021 et E) 2022, selon le traitement de désherbage : G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage par caméra. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05. | 36 |

1 INTRODUCTION

Au Québec, les producteurs de grandes cultures et de légumes de transformation en régie biologique ont peu de choix d'outils pour désherber les cultures semées en rangs étroits de moins de 40 cm. Ils font habituellement appel à la houe rotative et/ou la herse étrille pour réprimer les mauvaises herbes dans cette régie de culture. La houe rotative est composée de multiples roues dentelées dont l'extrémité des dents est en forme de cuillère. Elle est entraînée au sol avec l'avancement du tracteur et travaille superficiellement à une profondeur située entre 2 et 5 cm. La vitesse minimale requise pour atteindre une efficacité contre les mauvaises herbes est de 10 km/h, mais son utilisation à de plus grandes vitesses est possible et réduit les coûts des passages, car une plus grande surface est désherbée plus rapidement. La houe rotative est plus efficace lorsque les mauvaises herbes sont à des stades précoces, soit en germination dans le sol (communément appelés stade fils blancs) jusqu'au stade cotylédon [1]. Depuis quelques années, les producteurs du Québec ont adapté cet équipement afin que la houe puisse être double ou triple [2]. Cette modification permet une action plus grande sur toute la surface à désherber, laissant peu de sol sans travail et augmentant la répression des mauvaises herbes. Cependant, l'équipement est plus lourd et demande une plus grande force de tracteur. Chez certaines houes modifiées, une roue de terrage permet d'ajuster la profondeur de travail du sol.

La herse étrille, composée de plusieurs séries de dents à ressort, est plus agressive que la houe rotative. Il est possible d'ajuster la tension des dents et l'angle d'attaque afin d'obtenir un minimum de dommage à la culture et un maximum de répression des mauvaises herbes. La profondeur de travail est réglée au moyen de roues de terrage, habituellement à pas plus de 5 cm. La vitesse d'avancement est reliée au développement de la culture. En prélevée, elle peut atteindre 15 km/h alors que lorsque la culture est levée, il est nécessaire de vérifier sa vulnérabilité au passage de l'outil et de réduire la vitesse en conséquence. Comme la houe rotative, la répression des mauvaises herbes est plus efficace à des stades précoces jusqu'à un maximum de 2 feuilles, mais dépend également de la profondeur d'enracinement et du type de mauvaises herbes [1, 3].

Ces deux équipements passent directement sur les plants de la culture et la sélectivité repose essentiellement sur une meilleure implantation de la culture que des mauvaises herbes. Le passage de ces outils est limité lorsque la culture est peu développée, afin de ne pas occasionner de dommages irréversibles pouvant affecter le rendement. En culture en rangs étroits, les roues du tracteur peuvent aussi endommager sévèrement la culture en écrasant des plants qui récupèrent moins bien lorsque plus âgés. Ainsi, des voies d'accès pourraient faciliter la circulation en post levée de la culture et éviter que les cultures souffrent du passage du tracteur. Pour ce faire, il suffit de laisser des bandes non semées pour recevoir les roues du tracteur et celles des équipements roulants [4]. Cette technique n'est cependant pas très répandue au Québec et mériterait d'être étudiée davantage pour évaluer ses avantages et son impact sur les rendements de différentes cultures semées en rangs étroits.

Malgré une compétition plus élevée de la culture à rangs étroits [5, 6], certaines mauvaises herbes problématiques échappent aux hersages ou de nouvelles plantules s'installent après le dernier passage. Il est alors nécessaire d'écimer quelques jours avant la récolte ces mauvaises herbes rendues à maturité et plus hautes que la culture afin de réduire la contamination à la récolte et de réduire les coûts liés au nettoyage de la production. Cependant, ces mauvaises herbes laissées au sol contribuent à alimenter la banque de graines dans le sol et augmentent la prolifération des mauvaises herbes pour les années futures. De plus, le passage des roues de tracteur endommage la culture lors de l'écimage. De plus, les transformateurs ont une très faible tolérance à la présence de certaines espèces de mauvaises herbes à la récolte, notamment les morelles et les moutardes, à cause de la présence éventuelle de toxines et d'allergènes dans les légumes transformés.

Le binage est une stratégie de répression des mauvaises herbes dans les cultures à rangs étroits en complément aux passages précoces de la houe rotative et de la herse étrille qui permettrait une intervention plus tardive dans le cycle de la culture, mais également une répression plus agressive des mauvaises herbes plus développées qui ont échappé aux premiers hersages. Il pourrait également avoir une certaine action répressive sur les mauvaises herbes vivaces en coupant les repousses [7].

En grandes cultures biologiques, le binage est régulièrement utilisé dans les cultures dont l'écartement des rangs est large comme dans le maïs, le soya, le haricot, le tournesol, etc. Cependant, il est rare au Québec d'avoir recours au binage pour

les cultures en rangs étroits. Pourtant, on retrouve cette pratique couramment dans les cultures de céréales en Europe [7, 8, 9]. La bineuse offre une bonne sélectivité pour la culture car elle ne travaille que l'entre-rang. Il n'y a pas d'étude répertoriée sur le sujet au Québec et une seule au Canada, en Saskatchewan. Stanley *et al.* (2017) ont démontré qu'il était possible de biner plus tardivement les entre-rangs des cultures de pois sec et de lentille dont l'écartement des rangs était de 30 cm [10]. Cette étude a été réalisée sans la présence de mauvaises herbes pour évaluer uniquement la tolérance des cultures à de multiples binages à différents stades de la culture. Le binage occasionnait peu de perte de rendement lorsqu'il était passé tôt au stade 4 nœuds et une seule fois. Ces auteurs mentionnent également que de futures recherches devraient considérer le type de soc, la profondeur de travail et la vitesse de tracteur pour améliorer la sélectivité de la bineuse et permettre un sarclage plus tardif sans dommage à la culture.

Plusieurs auteurs suggèrent qu'en rangs très étroits (moins de 20 cm), l'utilisation d'un système de guidage par caméra, cellules photoélectriques, capteurs ou GPS pourrait permettre une meilleure précision à des vitesses plus élevées [10, 11]. Par exemple, la bineuse Robocrop du fabricant anglais Garford permet de biner des céréales dont l'écartement des rangs est aussi peu que 12,5 cm, à des vitesses de 15 km/h et à une précision de 15 mm. Cependant, cette précision a un coût qui n'est pas accessible à tous les producteurs et les bénéfices économiques n'ont pas été prouvés. Il n'en demeure pas moins que plusieurs paramètres liés à l'utilisation du binage dans les cultures semées à rangs étroits restent inconnus et sont peu répertoriés dans la littérature, où les conclusions trouvées sont variables et difficilement transférables à l'échelle de la ferme. La recherche est nécessaire pour évaluer son application sur différentes cultures à différents stades de développement et ainsi optimiser son utilisation quant à sa vitesse de passage, sa profondeur de travail et son efficacité sur les espèces et stades de mauvaises herbes. Ultiment, il sera possible de déterminer si l'ajout de cette stratégie améliore la production de ces cultures.

L'objectif principal de ce projet de recherche fut donc d'établir une stratégie de répression des mauvaises herbes dans des cultures semées à rangs étroits en utilisant le binage tardif en complément aux passages précoces de la houe rotative, de même que les conditions optimales d'utilisation. Plus précisément, les objectifs spécifiques sont :

- 1) Évaluer les outils et la vitesse appropriés pour biner les rangs étroits.
- 2) Déterminer les stades optimaux des cultures à rangs étroits pour les biner.
- 3) Déterminer l'effet de l'utilisation de voies d'accès et l'espacement entre les rangs sur le rendement des cultures.
- 4) Déterminer l'impact de l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse sur la vitesse et la précision du binage.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

Les expérimentations ont eu lieu à la Plateforme d'innovation en agriculture biologique de l'IRDA à Saint-Bruno-de-Montarville, en 2019, 2021 et 2022. La fertilisation des parcelles a été effectuée selon les résultats des analyses de sols avec de l'Acti-Sol (4,7-1,4-2,3) et du K-Mag (0-0-22) selon les besoins, et les fertilisants furent enfouis le jour même à l'aide d'un cultivateur Will-Rich. Les cultures étudiées étaient le haricot vert, le petit pois et le soya (voir Tableau 1). Elles ont été semées en bloc aléatoire complet répété quatre fois, dans des parcelles de 24 m² (3 m x 8 m) avec un semoir John Deere 1590 et un espacement de 19 cm entre les rangs, sauf pour l'objectif 3 (19, 38 et 76 cm). Toutes les cultures ont été désherbées hâtivement à l'aide de la houe rotative Yetter. Le binage tardif a été testé avec différents outils selon l'objectif du projet, soit des socs étroits sur dents flexibles (en S), des socs à pattes d'oie ou plats sur dents semi-flexibles. Lors du désherbage tardif, le tracteur était équipé d'un système d'autopilotage GPS-RTK (Guidage autopilot Topcon Antenne AGI-4 avec écran X25, kit volant électrique AES-35 et senseur à la roue) et le sarcler était doté d'un système de guidage par caméra (Sideshift Innotag avec Culti cam Class).

Pour tous les objectifs du projet, un suivi phénologique a eu lieu une fois par semaine afin de suivre l'évolution de la culture, du semis à la récolte, selon le code BBCH [12]. Pour évaluer l'efficacité du traitement du désherbage tardif, un quadrat (0,5 m x 0,38 m) était placé aléatoirement sur les rangs du milieu. Un dénombrement des mauvaises herbes par espèce avec leur stade de croissance était fait à l'intérieur de celui-ci avant et après le passage des outils de désherbage. La densité finale et la biomasse sèche des mauvaises herbes furent prélevées dans un quadrat (0,5 m x 0,38 m) placé aléatoirement sur les

rangs du milieu. Toutes les mauvaises herbes se trouvant dans le quadrat ont été coupées au ras du sol, identifiées, comptées et mises au séchoir à 90 °C afin de mesurer la biomasse sèche.

Les cultures furent récoltées selon leur maturité spécifique et le peuplement (nombre de plants) a été évalué, ainsi que les rendements, commercialisable et non-commercialisable. Pour le haricot, la récolte a été réalisée sur 10 m linéaires (4 rangs x 2,5 m). Toutes les fèves ont été retirées des plants, comptées, classées et pesées selon différentes catégories : catégorie commercialisable ou non commercialisable en fonction de la cause de déclassement: immature (diamètre plus petit que 4,7 mm), dommage d'insecte, pourriture, vide, présence de rouille. Le ratio du grain/gousse à la récolte était de 6,9 % pour la catégorie 4 (diamètre entre 8,3 et 9,5 mm). Pour le pois, la récolte a aussi été réalisée sur 10 m linéaires (2 rangs x 5 m). Une fois les gousses retirées des plants, elles ont été comptées et pesées. Un échantillon de 100 gousses par parcelle a été pesé et les grains ont été retirés manuellement. Ces grains ont été séparés en trois catégories de grosseur : 1) < que 6,7 mm, 2) entre 6,7 et 10,25 mm et 3) > que 10,25 mm. Les grains de chaque catégorie ont été comptés et pesés. La 2^e catégorie était celle utilisée pour calculer le rendement commercialisable.

Pour le soya, la récolte a été réalisée sur huit rangs (1,52 m) de 5 m de long à l'aide de la moissonneuse-batteuse à parcelles Wintersteiger. Après avoir criblé les grains, le total récolté pour chacune des parcelles a été pesé. Un échantillon de 500 ml de ces grains frais a été pesé selon la procédure décrite par la Commission canadienne des grains et à l'aide du tableau de conversion du poids spécifique pour le soya, le poids à l'hectolitre a été déterminé [13]. Un autre échantillon de grains de 500 g a été mis au séchoir à 80 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant pour déterminer le % d'humidité à la récolte et calculer le poids total sec de chaque parcelle. Le rendement a été exprimé en kg/ha à 14 % d'humidité. Trois échantillons de 100 grains secs ont été pesés pour déterminer le poids de 1000 grains à 14 % d'humidité.

Pour répondre aux quatre objectifs de l'étude, les protocoles spécifiques suivants ont été mis en place :

- 1) Évaluer les outils et la vitesse appropriés pour biner les rangs étroits

Le désherbage ou binage tardif a été effectué avec trois différents socs (étroits, pattes d'oie et plats) à deux différentes vitesses de 4 ou 6 km/h et comparé à un traitement témoin sans désherbage tardif. Des expérimentations sur trois cultures, petit pois, haricot vert et soya ont été mises en place en 2019 et 2021 afin de déterminer l'effet des outils de binage et la vitesse de passage sur le rendement des cultures semées à un écartement très étroit (19 cm) et sur la répression des mauvaises herbes. Toutes les cultures ont été désherbées hâtivement avec la houe rotative de façon optimale (voir Tableau 1). L'objectif étant de trouver le type d'outil et la vitesse optimale causant le moins de dommages à la culture, tout en étant le plus efficace pour le désherbage.

- 2) Déterminer les stades optimaux des cultures à rangs étroits pour les biner

Le binage tardif a été réalisé à deux stades de culture sur le petit pois, le haricot vert et le soya, en 2019 et 2021, avec le soc plat. Tous les traitements de binage tardif furent comparés à un témoin sans binage tardif et les socs plats ont été sélectionnés comme étant l'outil optimal à une vitesse de 6 km/h. Toutes les cultures ont été désherbées hâtivement avec la houe rotative de façon optimale (Tableau 2). L'objectif étant de déterminer les stades optimaux des cultures pour le binage tardif en rangs étroits de 19 cm.

Tableau 1 : Informations culturales pour l'objectif 1, visant à évaluer les outils et la vitesse appropriés pour biner les rangs étroits pour les cultures de petit pois, haricot vert et soya, étudiées en 2019 et 2021.

| | | | Petit pois | Haricot vert | Soya |
|------|--|---------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------|
| | | Variété | Portage NT | Caprice NT | Marula BIO + inoculant Turbo-N2 |
| | | Type de sol | Argile Laplaine | Argile Laplaine | Argile Saint-Urbain |
| | | Profondeur du semis (cm) | 5 | 3,8 | 3,8 |
| 2019 | Fertilisation | Date | 12 juin | 12 Juin | 7 juin |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 931 | 1596 | 800 |
| | Semis | Date | 13 juin | 13 juin | 7 juin |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 946 869 | 383 617 | 500 000 |
| | Désherbage hâtif | Date | 27 juin | 19 juin | 19 juin |
| | Houe rotative | Stade | 1 à 2 nœuds | Pré levée | Pré levée |
| | | Vitesse (km/h) | 10 | 10 | 10 |
| | Désherbage tardif | Date | 4 juillet | 9 juillet | 4 juillet |
| | 3 socs : étroits, pattes d'oie et plats | Stade | 3 à 4 entre- nœuds | 2 feuilles trifoliées | 2 feuilles trifoliées |
| | | Vitesse (km/h) | 4 et 6 | 4 et 6 | 4 et 6 |
| | Récolte | Date | 29 juillet | 15 août | 16 octobre |
| 2021 | Fertilisation | Date | 1 ^{er} juin | 1 ^{er} juin | 27 mai |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 931 | 1596 | 798 |
| | Semis | Date | 2 juin | 2 juin | 28 mai |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 681 549 | 421 979 | 500 000 |
| | Désherbage hâtif | Date | 18 juin | 18 juin | 16 juin |
| | Houe rotative | Stade | 1 à 2 feuilles | 1 à 2 feuilles | 1 à 2 feuilles |
| | | Vitesse (km/h) | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| | Désherbage tardif | Date | 23 juin | 5 juillet | 25 juin |
| | 3 socs : étroits, pattes d'oie et plats | Stade | 3 à 4 entre- nœuds | 2 à 3 feuilles trifoliées | 2 feuilles trifoliées |
| | | Vitesse (km/h) | 4 et 6 | 4 et 6 | 4 et 6 |
| | Récolte | Date | 22 juillet | 10 août | 28 Octobre |

Tableau 2 : Informations culturales pour l'objectif 2, visant à déterminer les stades optimaux des cultures à rangs étroits pour les biner, pour le petit pois, le haricot vert et le soya, étudiées en 2019 et 2021.

| Variété | | Petit pois | Haricot vert | Soya | |
|--------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | Portage NT | Caprice NT | Marula BIO + inoculant Turbo-N2 | |
| Type de sol | | Argile Laplaine | Argile Laplaine | Argile Saint-Urbain | |
| Profondeur du semis (cm) | | 5 | 3,8 | 3,8 | |
| 2019 | Fertilisation | Date | 12 juin | 12 Juin | 7 juin |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 931 | 1596 | 800 |
| | K-Mag | Date | 12 juin | 12 Juin | NA* |
| | | Taux (kg/ha) | 135,6 | 60,4 | NA |
| | Semis | Date | 13 juin | 13 juin | 7 juin |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 946 869 | 383 617 | 500 000 |
| | Désherbage hâtif | Date | 27 juin | 19 juin | 19 juin |
| | | Stade | 1 à 2 nœuds | Pré levée | Pré levée |
| | Houe rotative | Vitesse (km/h) | 10 | 10 | 10 |
| | | Date | 4 juillet | 9 juillet | 4 juillet |
| | Désherbage tardif | Stade | 3-4 entre-nœuds | 2 feuilles trifoliées | 2 feuilles trifoliées |
| | | Vitesse (km/h) | 6 | 6 | 6 |
| | Socs plats | Date | 9 juillet | 16 juillet | 9 juillet |
| | | Stade | 5-6 entre-nœuds | 2-3 feuilles trifoliées | 3 feuilles trifoliées |
| | | Vitesse (km/h) | 6 | 6 | 6 |
| Récolte | Date | 29 juillet | 15 août | 16 octobre | |
| 2021 | Fertilisation | Date | 1 ^{er} juin | 1 ^{er} juin | 27 mai |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 931 | 931 | 798 |
| | Semis | Date | 2 juin | 2 juin | 28 mai |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 681 549 | 421 979 | 500 000 |
| | Désherbage hâtif | Date | 18 juin | 18 juin | 1er juin |
| | | Stade | 1 à 2 feuilles | 1 à 2 feuilles | Hypocotyle dans le sol |
| | Houe rotative | Vitesse (km/h) | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| | | Date | NA | NA | 17 juin |
| | | Stade | NA | NA | 1-2 feuilles trifoliées |
| | | Vitesse (km/h) | NA | NA | 11.3 |
| | Désherbage tardif | Date | 23 juin | 5 juillet | 25 juin |
| | | Stade | 3-4 entre-nœuds | 2-3 feuilles trifoliées | 2 feuilles trifoliées |
| | Socs plats | Vitesse (km/h) | 6 | 6 | 6 |
| | | Date | 29 juin | 12 juillet | 29 juin |
| | | Stade | 5-6 entre-nœuds | 4 feuilles trifoliées | 3 feuilles trifoliées |
| Vitesse (km/h) | | 6 | 6 | 6 | |
| Récolte | Date | 21 juillet | 9 août | 27 octobre | |

*NA = La fertilisation au K-Mag n'était pas nécessaire.

3) Déterminer l'effet de l'utilisation de voies d'accès et l'espacement entre les rangs sur le rendement des cultures

L'écartement des rangs (19, 38 ou 76 cm), avec ou sans binage tardif, avec ou sans voies d'accès, a été évalué pour l'objectif 3. L'objectif étant de déterminer l'effet de l'utilisation de voies d'accès et de l'espacement entre les rangs sur le rendement en combinaison avec un système de guidage par caméra. Toutes les cultures ont été désherbées hâtivement avec la houe rotative de façon optimale. Pour les désherbages tardifs, les socs plats ont été sélectionnés comme étant l'outil optimal à une vitesse de 6 km/h (Tableau 3). Pour les parcelles dont l'espacement des rangs était de 19 cm, les voies d'accès ont été comparées aux parcelles sans voie d'accès. Les parcelles avec l'espacement des rangs de 38 cm étaient comparées entre un binage tardif et sans binage tardif. Puis, l'espacement de 76 cm avec binage était comparé avec tous les autres traitements. Lors des désherbages tardifs, le tracteur était aidé du système d'autoguidage par GPS-RTK ainsi que le système de guidage par caméra.

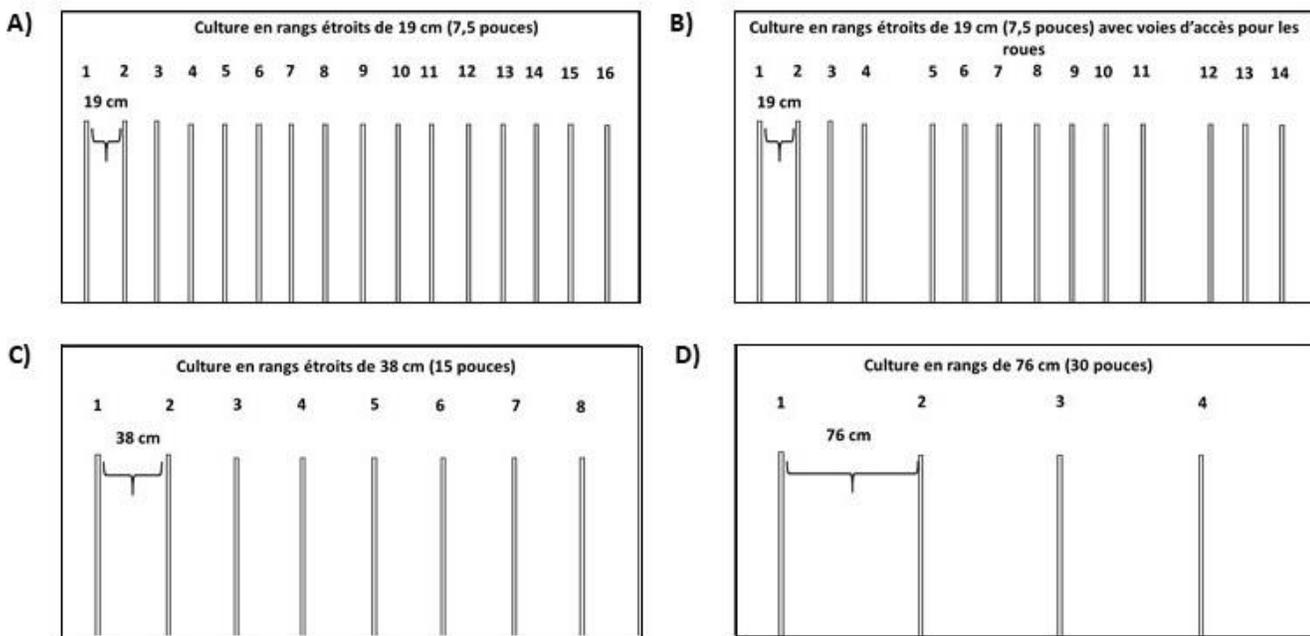


Figure 1 : Schéma des espacements de rangs testés : A) Rangs étroits de 19 cm (7,5 pouces) sans voies d'accès, B) Rangs étroits de 19 cm (7,5 pouces) avec voies d'accès, pour les trois cultures (petits pois, haricot vert, soya), C) Rangs étroits de 19 cm (15 pouces), D) Rangs de 76 cm (30 pouces), dans le haricot vert et le soya.

Tableau 3 Informations culturales pour l'objectif 3, visant à déterminer l'effet de l'utilisation de voies d'accès et de l'espacement entre les rangs sur le rendement des cultures de petit pois, haricot vert et soya, étudiées en 2021 et 2022.

| | | Petit pois | Haricot vert | Soya | | |
|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------|------------|
| Variété | | Portage NT | Caprice NT | Marula BIO + inoculant Turbo-N2 | | |
| Type de sol | | Argile Laplaine | Argile Laplaine | Argile Saint-Urbain | | |
| Profondeur du semis (cm) | | 5 | 3,8 | 3,8 | | |
| 2021 | Fertilisation | Date | 1er juin | 1er Juin | 27 mai | |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 931 | 931 | 798 | |
| | Semis | Date | 2 juin | 2 juin | 28 mai | |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 681 549 | 421 979 | 500 000 | |
| | Désherbage hâtif | Date | 18 juin | 18 juin | 18 juin | |
| | | Stade | 1 à 2 feuilles | 1 à 2 feuilles | 1 à 2 feuilles trifoliées | |
| | | Houe rotative | Vitesse (km/h) | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| | Désherbage tardif | Date | 23 juin | 5 juillet | 25 juin | |
| | | Stade | 3-4 entre-nœuds | 2-3 feuilles trifoliées | 2 feuilles trifoliées | |
| | | Vitesse (km/h) | 6 | 6 | 6 | |
| | | Date | 29 juin | 12 juillet | 29 juin | |
| | | Stade | 6 entre-nœuds | 4 feuilles trifoliées | 3 feuilles trifoliées | |
| | | Vitesse (km/h) | 6 | 6 | 6 | |
| | | Socs plats | Date | NA | 20 juillet | 20 juillet |
| | | Stade | NA | 5 à 6 feuilles trifoliées | 6 feuilles trifoliées | |
| | | Vitesse (km/h) | NA | 6 | 6 | |
| | Récolte | Date | 21 juillet | 9 août | 28 octobre | |
| | 2022 | Fertilisation | Date | 31 mai | 31 mai | 30 mai |
| Acti-sol | | Taux (kg/ha) | 875 | 1500 | 750 | |
| Semis | | Date | 31 mai | 1er juin | 30 mai | |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 700 000 | 450 000 | 560 000 | |
| Désherbage hâtif | | Date | 15 juin | 15 juin | 15 juin | |
| | | Stade | 2 nœuds | 1 paire de feuilles étalées | 1 à 2 feuilles trifoliées | |
| | | Houe rotative | Vitesse (km/h) | 10 | 10 | 10 |
| Désherbage tardif | | Date | 21 juin | 28 juin | 28 juin | |
| | | Stade | 3-4 entre-nœuds | 1 feuille trifoliée | 2-3 feuilles trifoliées | |
| | | Socs plats | Vitesse (km/h) | 6 | 6 | 6 |
| | | Date | NA | 4 juillet | 4 juillet | |
| | | Stade | NA | 2 à 3 feuilles trifoliées | 3 à 4 feuilles trifoliées | |
| | | Vitesse (km/h) | NA | 6 | 6 | |
| | | Date | NA | 11 juillet | 11 juillet | |
| | | Stade | NA | 5 à 6 feuilles trifoliées | 6 feuilles trifoliées | |
| | | Vitesse (km/h) | NA | 6 | 6 | |
| Récolte | | Date | 20 juillet | 1er août | 7 octobre | |

*NA = N'a pas été effectué, car n'était pas nécessaire.

- 4) Déterminer l'impact de l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse sur la vitesse et la précision du binage.

L'effet de l'utilisation ou non d'un système de guidage avec caméra installé sur la bineuse a été testé sur les trois cultures, petit pois, haricot vert et soya, semées à rangs très étroits (19 cm) à deux vitesses (6 et 10 km/h), en 2021 et 2022. Toutes les cultures ont été désherbées hâtivement avec la houe rotative de façon optimale. Pour le désherbage tardif, les socs plats ont été sélectionnés comme étant l'outil optimal (Tableau 4). Pour tous les traitements, un système d'autopilotage GPS-RTK était en fonction et guidait la bineuse sur le tracé marqué lors du semis.

Tableau 4 : Informations culturales pour l'objectif 4, visant à déterminer l'impact de l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse sur la vitesse et la précision du binage pour les cultures de petit pois, haricot vert et soya, étudiées en 2021 et 2022.

| Variété | | Petit pois | Haricot vert | Soya | |
|--------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------|--|---------------------------|
| | | Portage NT | Caprice NT | Marula BIO + inoculant Turbo-N2 | |
| Type de sol | | Argile Laplaine | Argile Laplaine | Argile Saint-Urbain | |
| Profondeur du semis (cm) | | 5 | 3,8 | 3,8 | |
| 2021 | Fertilisation | Date | 1er juin | 1er Juin | 27 mai |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 931 | 1596 | 798 |
| | Semis | Date | 2 juin | 2 juin | 28 mai |
| | | Taux de semis (grains/ha) | 1 681 549 | 421 979 | 500 000 |
| | Désherbage hâtif | Date | 18 juin | 18 juin | 1er juin |
| | | Stade | 1 à 2 feuilles | 1 à 2 feuilles | Hypocotyle dans le sol |
| | Houe rotative | Vitesse (km/h) | 11,3 | 11,3 | 11,3 |
| | | Date | 23 juin | 5 juillet | 25 juin |
| | | Stade | 3-4 entre-nœuds | 2-3 feuilles trifoliées | 2 feuilles trifoliées |
| | Désherbage tardif | Vitesse (km/h) | 6 et 10 | 6 et 10 | 6 et 10 |
| | Socs plats | | | | |
| | Récolte | Date | 23 juillet | NA* | 27 octobre |
| | Fertilisation | Date | 31 mai | 31 mai | 30 mai |
| | Acti-sol | Taux (kg/ha) | 875 | 1500 | 750 |
| | Semis | Date | 31 mai | 1er juin | 30 mai |
| | Taux de semis (grains/ha) | 1 700 000 | 450 000 | 560 000 | |
| 2022 | Désherbage hâtif | Date | 15 juin | 15 juin | 15 juin |
| | | Stade | 2 nœuds | 1 ^{ère} feuille étalée | 1 à 2 feuilles trifoliées |
| | Houe rotative | Vitesse (km/h) | 10 | 10 | 10 |
| | Désherbage tardif | Date | 21 juin | 28 juin | 28 juin |
| | | Stade | 3 à 4 entre-nœuds | 1 ^{ère} feuille étalée à 1 ^{ère} feuille trifoliée | 2 à 3 feuilles trifoliées |
| | Socs plats | Vitesse (km/h) | 6 et 10 | 6 et 10 | 6 et 10 |
| | Récolte | Date | 20 juillet | 1er août | 12 octobre |

*NA = Pas de récolte dans la culture de haricot vert en 2021 du à une trop grande infestation de mauvaises herbes. Cette culture sera exclue de l'analyse par manque de données.

Analyses statistiques

Des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) ont été employés pour comparer les variables de rendement entre les différents traitements, pour tous les objectifs du projet. Ce type de modèle permet de spécifier différentes distributions statistiques pour modéliser différents types de variables, et d'inclure le bloc comme effet aléatoire. Les distributions statistiques sont détaillées ci-bas pour chaque variable. Afin de vérifier la validité des modèles, les résidus observés normalisés (valeur observée - valeur estimée) ont été inspectés et comparés à une distribution de résidus simulés par le modèle.

Pour déterminer s'il y avait un effet de traitement, le modèle statistique a été comparé à un modèle nul (sans effet de traitement), à l'aide du critère d'information AIC [14]. Un effet du traitement a été considéré lorsque le AIC du modèle avec traitement était plus petit que celui du modèle nul ($\Delta AIC > 2\Delta$). Des comparaisons appariées ont été effectuées lorsqu'il y avait un effet du traitement pour déterminer lesquels étaient significativement différents ($\alpha=0,05$). Les valeurs de p ont été corrigées pour le nombre de comparaisons (correction Tukey).

Rendement Les différentes mesures de rendements ont été modélisées avec des distributions appropriées à chacune : Gamma ou gaussienne pour le peuplement et les rendements commercialisables et non-commercialisables, selon la relation entre la variance et la moyenne.

Dommages à la culture Les dommages à la culture ont été évalués pour l'objectif 1 et 2, de deux façons, soit : Objectif 1) en calculant la différence entre le nombre de plant dans les parcelles après le traitement de désherbage et les parcelles avant. Une réponse négative signifiant un moins grand nombre de plants après le désherbage, et donc plus de dommages à la culture. Objectif 2) Il y avait très peu, voir aucun dommage dans plusieurs traitements, ce qui rend difficile d'estimer le nombre de dommage. La variable réponse a donc été convertie en présence/absence de dommage, et a été modélisée avec une distribution binomiale.

Efficacité du désherbage L'efficacité du désherbage entre les différents traitements a été évalué pour les objectifs 1 et 4 et rapportée de cette façon : (nb de mauvaises herbes AVANT – nombre de mauvaises herbes APRÈS) / nombre de mauvaises herbes AVANT). Le modèle GLMM a permis de spécifier une distribution appropriée (binomiale) prenant en compte le nombre de mauvaises herbes avant le traitement et d'inclure la parcelle comme effet aléatoire. Les résidus observés normalisés (valeur observée- valeur estimée) ont été inspectés et comparés à une distribution de résidus simulés par le modèle.

Pour le haricot dans l'objectif 1, il y avait beaucoup d'observation où l'efficacité était nulle, ce qui demandait un modèle statistique approprié (*zero-inflation*). Les intervalles de confiances et comparaisons post-hoc ont donc été faites par méthode de simulation à partir du modèle statistique.

Pour l'objectif 3, l'efficacité du désherbage n'a pas pu être évaluée de cette façon, plusieurs parcelles ne contenant pas de mauvaises herbes lors de la prise de données au champ. Les données d'**Abondance et de la biomasse des mauvaises herbes en fin de saison** ont donc été employées comme mesure d'efficacité du traitement. Elles ont été modélisées avec des distributions gaussienne, Gamma ou Gamma avec « *zero-inflation* », selon les propriétés des données.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

1) Évaluer les outils et la vitesse appropriés pour biner les rangs étroits

L'objectif était de trouver le type d'outil et la vitesse optimale causant le moins de dommages à la culture, tout en étant le plus efficace pour le désherbage.

Rendement Il n'y a pas de différence significative entre les rendements pour les différents outils de désherbage employés et les deux vitesses testées (4 et 6 km/h), et ce pour les trois cultures à l'étude. En revanche, les différences entre années étaient souvent significatives, et donc on pouvait observer une différence entre certaines variables de rendement pour les deux années d'expérimentation (Tableaux 5, 6, 7 et Figures 1, 2, 3). Les trois types de socs pourraient donc être employés dans ces cultures à une vitesse de 6 km/h.

Domage à la culture Il n'y avait pas de différence significative au niveau des dommages aux plants pour les différents outils de désherbage employés et les deux vitesses testées (4 et 6 km/h), et ce pour les trois cultures à l'étude (Tableau 8). En revanche, l'année du traitement avait un effet significatif pour le haricot vert et le soya.

La probabilité de présence de dommages aux plants étaient élevées pour la culture de haricot, pour les socs étroits (entre 50 et 75 %) et près de 100 % pour les socs à pattes d'oie et plats, mais les différences entre traitements n'étaient pas significatives. Il ne semblait pas vraiment y avoir une différence au niveau de la vitesse d'avancement. Pour le soya, la probabilité de présence de dommages était plus élevée avec l'utilisation des socs à pattes d'oie à 6 km/h (près de 100 %), un peu plus faibles avec les socs plats (autour de 75%), puis assez faibles avec les socs étroits (< de 25 %) (Figure 4). Il semblerait donc que l'utilisation des socs étroits soient la moins risquée, et qu'une vitesse d'avancement plus élevée de 6 km/h pourrait être employée sans risque de dommages supplémentaires.

Tableau 5 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$.

| Variables du modèle | Pois | | |
|---------------------|--|--|--|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Petits pois commercialisables (kg/ha) | Petits pois non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | NS | NS | NS |
| Année | <0,0001 | <0,0001 | NS |

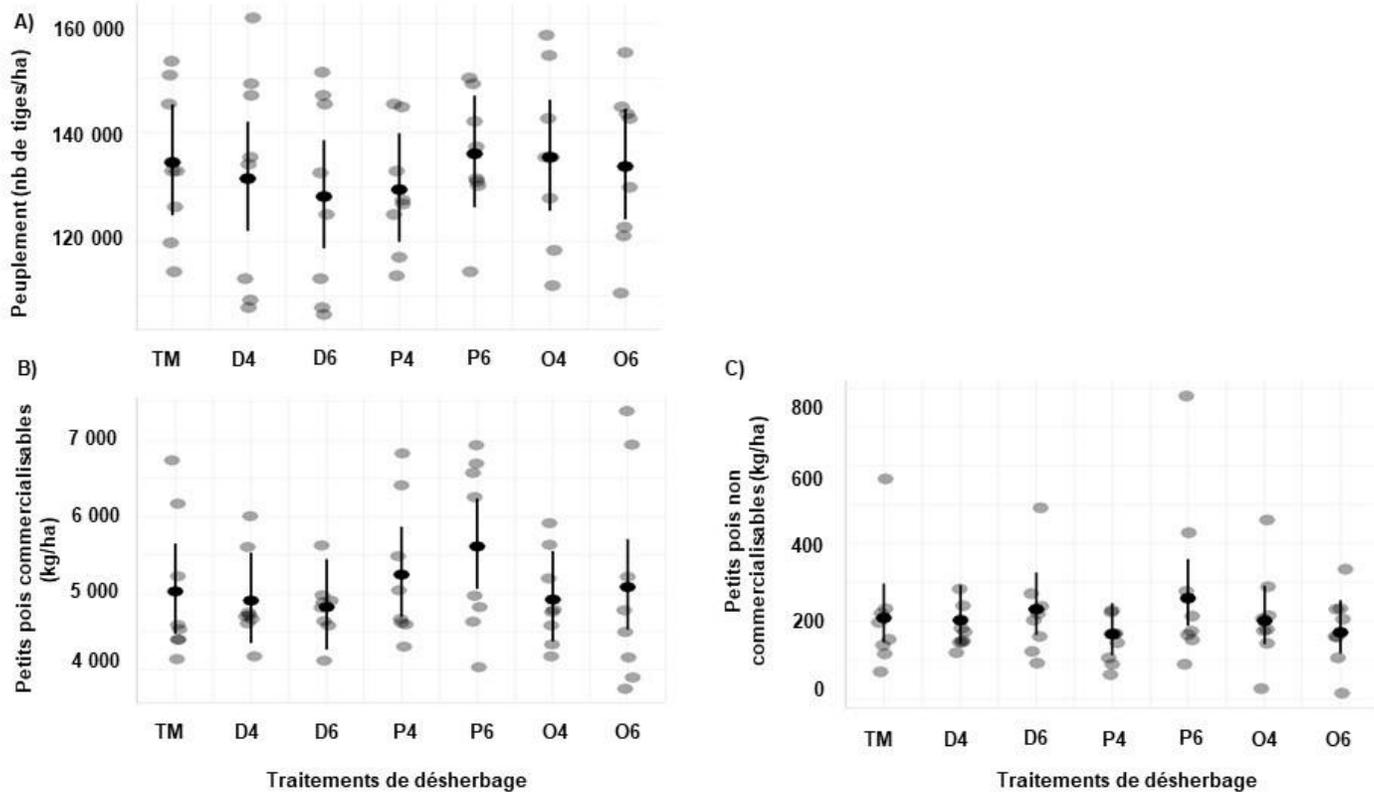


Figure 2 : Variables de rendement pour la culture de petit pois A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h.

Tableau 6 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec les variables de rendement pour le haricot vert, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$.

| Variables du modèle | Haricot | | |
|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Gousses commercialisables (kg/ha) | Gousses non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | NS | NS | NS |
| Année | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |

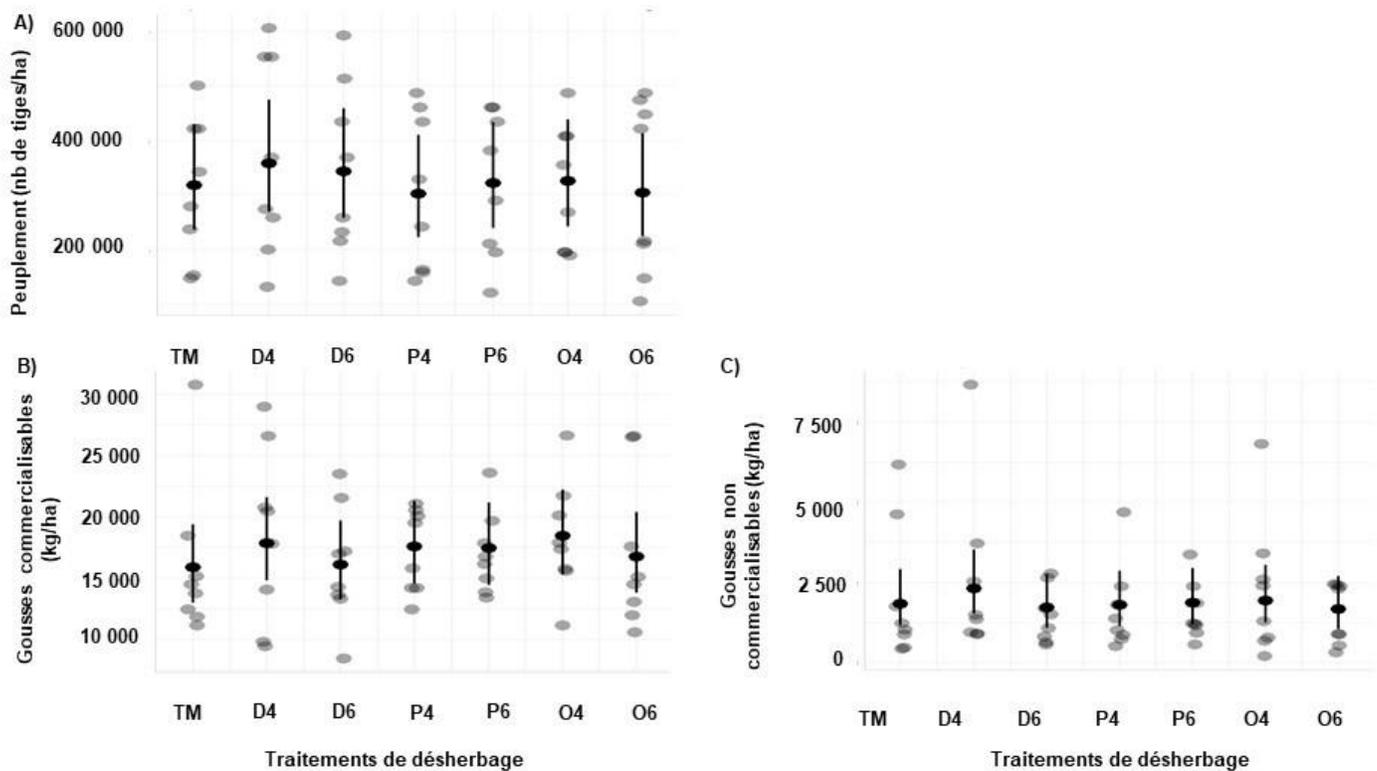


Figure 3 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h.

Tableau 7 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$.

| Variables du modèle | Soya | | | |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Poids à l'hectolitre (kg/hl) | Rendement à 14% d'humidité (kg/ha) | Poids de 1000 grains (g) |
| Traitement | NS | TM/P4 = 0,0479 | NS | NS |
| Année | <0,0001 | <0,0001 | NS | <0,0001 |

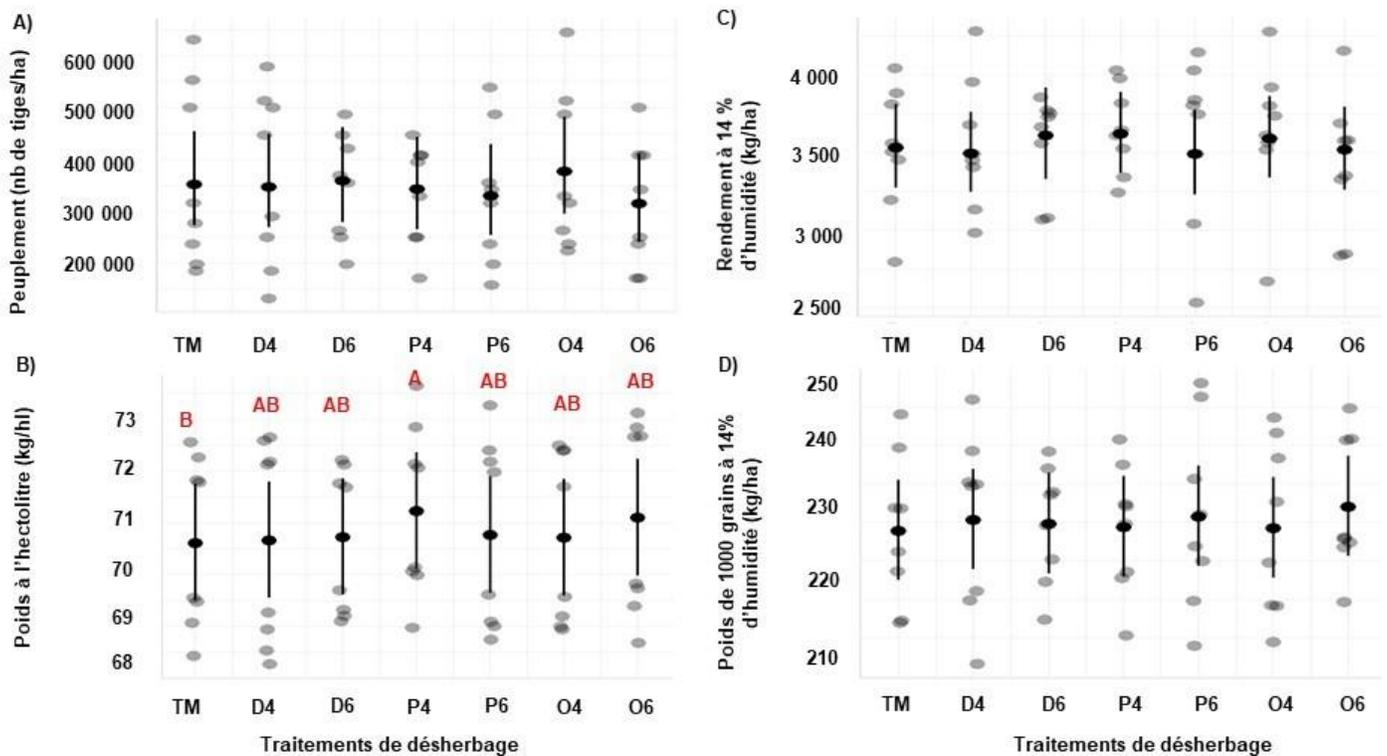


Figure 4 : Variables de rendement pour la culture de soya A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) le poids à l'hectolitre (kg/hl), C) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) et D) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) pour les deux années d'expérience, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $p < 0,05$.

Tableau 8 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 avec la variable de dommages aux plants (différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif pour le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une p-value ≥ 0.05 .

| Variables du modèle | Petit pois | Haricot vert | Soya |
|---------------------|------------|--------------|--------|
| Traitement | NS | NS | NS |
| Année | NS | 0,0022 | 0,0064 |

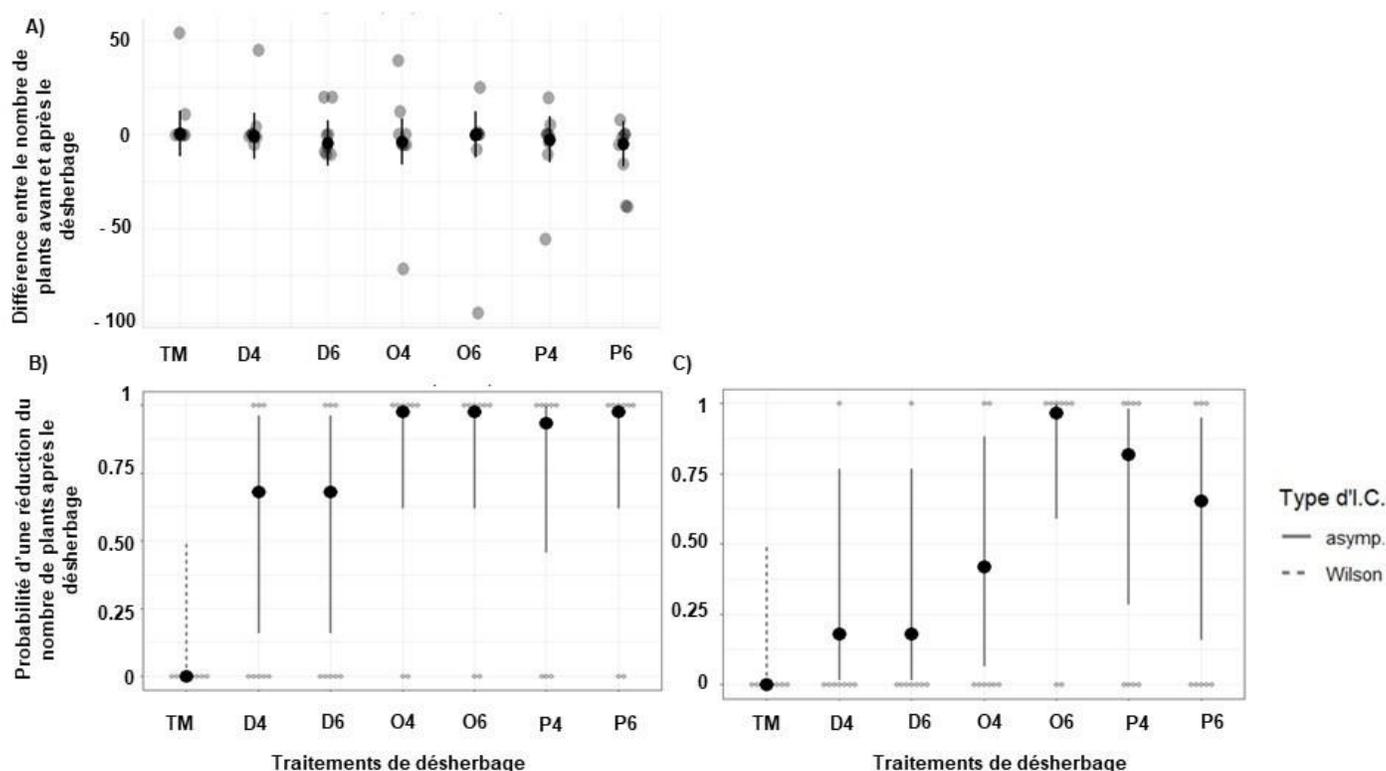


Figure 5 : Dommages pour la culture de A) petit pois, soit la différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif et probabilité de dommages, soit la probabilité d'une réduction du nombre de plants après le passage des outils de désherbage pour le B) haricot et C) le soya, pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h.

Efficacité du désherbage

Malgré qu'il n'y ait pas eu d'effets significatifs sur le rendement, l'efficacité du désherbage pouvait varier significativement en fonction de l'outil employé et de la vitesse de passage, pour les trois cultures à l'étude. Pour le petit pois, on retrouvait plus de mauvaises herbes dans le témoin sans binage tardif, que dans tous les autres traitements. Un binage plus tardif dans le petit pois, au stade 3-4 entre-nœuds, pourrait donc contribuer à réduire significativement la pression des mauvaises herbes. Tous les types d'outils testés étaient plus efficaces que le traitement témoin, sans binage tardif. Une seule différence significative entre les différents outils a été décelée. L'utilisation des socs plats à 4 km/h était plus efficace que l'utilisation des socs étroits à 4 km/h. L'utilisation des socs étroits à une vitesse de 4 km/h semble donc être la stratégie la moins efficace. Cependant, les trois types de socs pourraient être employés à une vitesse de 6 km/h, pour une même efficacité de désherbage.

Pour le haricot vert, les traitements de désherbage les plus efficaces étaient les socs plats à 4 et 6 km/h, de même que les socs à pattes d'oie à 6 km/h. Le binage tardif avec les socs étroits et les socs à pattes d'oie à 4 km/h n'était pas significativement différent du traitement témoin sans désherbage tardif.

Pour le soya, les traitements les plus efficaces pour le désherbage étaient les socs plats et les socs à pattes d'oie, à 4 et 6 km/h, par rapport au témoin sans désherbage tardif. Comme pour le petit pois, l'utilisation des socs plats à 4 km/h était plus

efficace que l'utilisation des socs étroits à 4 et 6 km/h. L'utilisation des socs plats à 6 km/h et des socs à pattes d'oie à 6 km/h, étaient aussi plus efficaces que l'utilisation des socs étroits à 6 km/h.

En résumé, l'utilisation des socs plats à 4 ou 6 km/h, de même que des socs à pattes d'oie à 6 km/h, seraient les stratégies de désherbage les plus efficaces pour le binage tardif dans les trois cultures testées. La surface binée à l'aide des dents étroites étant plus faible que les autres outils testés, il est normal que la quantité de mauvaises herbes encore présentes après le passage soit plus élevée. La quantité de terre qui recouvre les rangs à la suite du passage des socs à pattes d'oies peut être un facteur à considérer dans l'ajustement, pour possiblement recouvrir les petites plantules de mauvaises herbes sans toutefois nuire à la culture.

Tableau 9 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 1 pour l'efficacité du désherbage dans le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$.

| Variables du modèle | Petit pois | Haricot vert | Soya |
|---------------------|--|---|--|
| Traitement | TM < tous les autres = <0,0001 D4 < P4 = 0,0381 | TM < O6 = 0,024 TM < P4 = 0,046 TM < P6 = 0,032 | TM < P4 et P6 = 0,0001 et 0,0002 TM < O4 et O6 = 0,0001 et 0,0020 D4 < P4 = 0,0370 D6 < P4, P6 et O4 = 0,0228, 0,0394 et 0,0337 |
| Année | NS | 2019 > 2021 | NS |

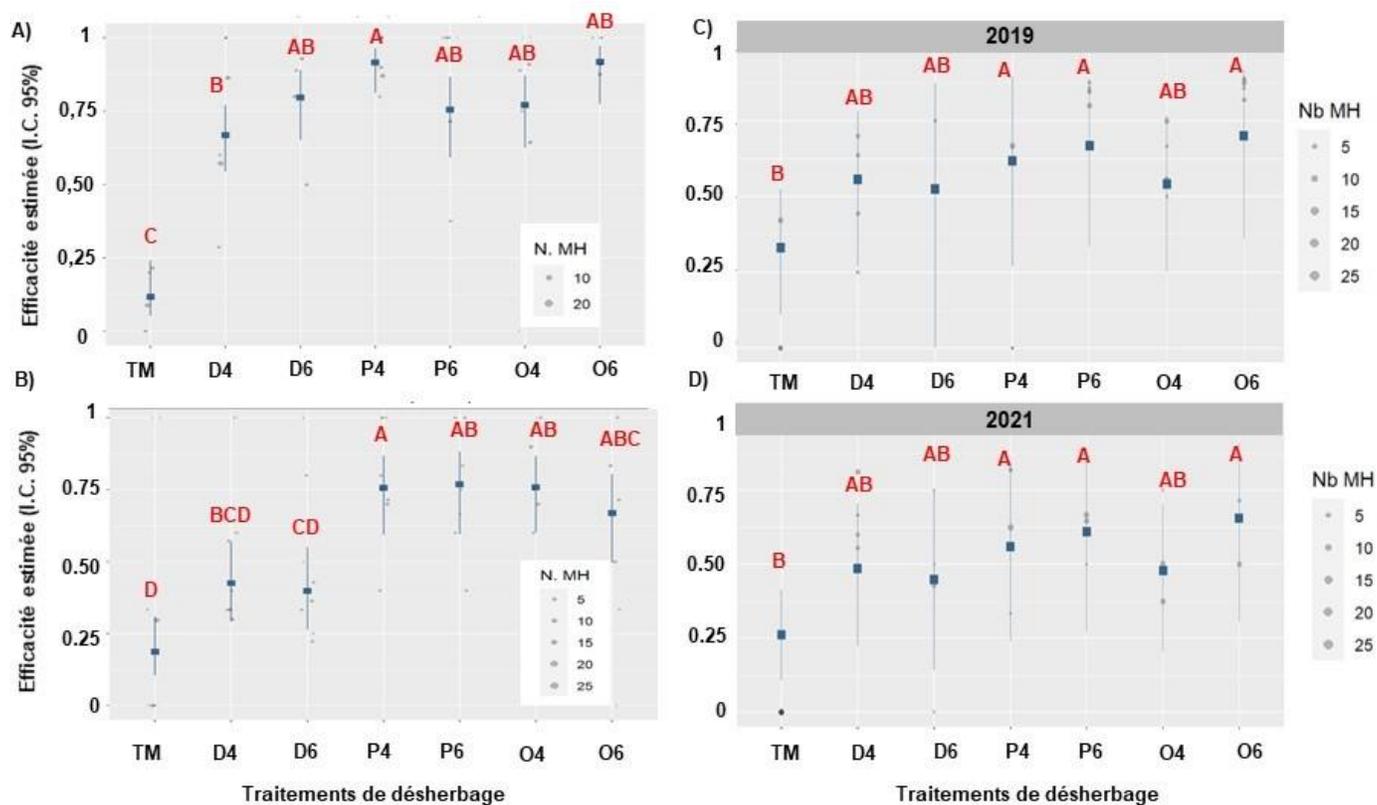


Figure 6 : Efficacité du désherbage pour la culture de A) petit pois et de B) soya, pour les deux années d'expérimentation combinée, 2019 et 2021, ainsi que pour C) le haricot en 2019 et D) le haricot en 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, D4) socs étroits à 4 km/h, D6) socs étroits à 6 km/h, P4) socs plats à 4 km/h, P6) socs plats à 6 km/h, O4) socs à pattes d'oie à 4 km/h, O6) socs à pattes d'oie à 6 km/h. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $<0,05$.

2) Déterminer les stades optimaux des cultures à rangs étroits pour les biner

Rendement Pour la culture du petit pois, il y a eu des effets significatifs des traitements de désherbage sur les trois variables de rendement, soit le peuplement, le rendement en pois commercialisables et non-commercialisables. Tout d'abord, il y a eu une réduction du nombre de plants (peuplement) pour le traitement avec deux binages tardifs, en comparaison avec le traitement témoin sans binage tardif. Cela s'est aussi traduit par une diminution du rendement en petit pois commercialisables et une augmentation de la quantité de petits pois non commercialisables. De plus, le rendement en pois commercialisables était aussi significativement réduit pour les deux autres traitements de désherbage, soit un binage tardif au stade 1 (3-4 entre-nœuds) et un binage tardif au stade 2 (5-6 entre-nœuds). Il y avait parfois des différences significatives entre les années d'expérimentations (Tableau 9, Figure 5). Le binage tardif semble être une option de désherbage moins envisageable dans la culture de petit pois en rangs étroits surtout au stade précoce de 3-4 entre nœuds, car cela réduit les rendements. Le stade 5-6 semble être plus tolérant au binage tardif, cependant puisque le laps de temps est court avant que les plants commencent à produire des vrilles, la fenêtre d'interventions et l'agressivité des outils seront à considérer si cette technique est adoptée par les producteurs.

Pour le haricot vert, le rendement en gousses commercialisables était significativement différent entre les traitements. Le rendement était plus élevé dans le traitement témoin, sans désherbage tardif, que dans les traitements S2 et S12, soit désherbé une fois au stade le plus tardif (3-4 feuilles trifoliées) ou désherbé deux fois aux deux stades (Stade 1 : 2-3 feuilles trifoliées et Stade 2 : 3-4 feuilles trifoliées). Il y avait aussi des différences significatives au niveau des années d'expérimentation (Tableau 10, Figure 6). Il semblerait donc que pour le haricot vert, un désherbage plus tardif, à partir de 3 feuilles trifoliées ne serait pas l'idéal, car on observe une perte de rendement. Un binage au stade de 2 feuilles trifoliées ne semble pas avoir eu d'impact significatif sur le rendement en gousses commercialisables et pourrait être envisageable dans le haricot vert en rangs étroits.

Dans la culture de soya, il n'y a pas eu de différence significative des traitements sur les variables de rendement. Cependant, le rendement était significativement différent entre les années d'expérimentations (Tableau 11, Figure 7). Une stratégie de binage tardif serait envisageable pour le soya en rangs étroits aux stades de croissance 2 et 3 feuilles trifoliées, puisque ces opérations sont sans effets sur le rendement.

En résumé, les trois cultures testées ont des tolérances différentes au binage tardif en rangs étroits. La culture de soya peut être désherbée mécaniquement jusqu'au stade 3 feuilles sans effet sur le rendement. Le haricot vert devrait être désherbé mécaniquement jusqu'au stade 2 feuilles, puisque le rendement est réduit à partir du stade 3-4 feuilles. Le stade de binage tardif pour le petit pois cultivé en rangs étroits de 19 cm n'a pas pu être déterminé dans cette étude. En effet, le rendement a été réduit dans le traitement désherbé 1 fois au stade de croissance de 3-4 entre-nœuds. Cependant, il n'y a pas eu de réduction du rendement dans le traitement désherbé une fois à un stade plus tardif de 5-6 entre-nœuds. Or, les résultats des analyses de dommages à la culture, indiquent que les plants ont été endommagés lors du premier désherbage, mais pas du deuxième (Tableau 10, Figure 6). Il est possible que cela résulte en un mauvais ajustement des outils lors du premier passage pendant cette expérimentation.

Dommages à la culture Des dommages significatifs à la culture ont été observés dans la culture de petit pois, mais seulement pour l'année 2019, où il y avait plus de dommages aux plants après deux passages aux deux stades de croissance. Pour la culture de petit pois en 2021, il y avait aussi une probabilité de dommages plus élevée lors de deux passages (autour de 75 %), ainsi que lors du passage au premier stade de croissance (3-4 entre-nœuds). Des résultats semblables ont aussi été obtenus pour le rendement. Le premier désherbage a dû causer des dommages à la culture ce qui aurait eu un effet sur les rendements commercialisables. Il est possible que l'ajustement des outils de désherbage n'aient pas été fait de manière optimale, le désherbage causant des dégâts lors du premier passage. Cette conclusion est supportée par le fait qu'il n'y ait pas eu de dommages lors du 2^e passage dans le petit pois, ni d'effet sur le rendement. Les probabilités de dommages étaient aussi plus élevées lors du 1^{er} passage dans le haricot vert et le soya, quoique pas significativement différents. Ces dommages n'ont pas semblé nuire aux rendements dans ces deux cultures.

Tableau 10 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$.

| Variables du modèle | Pois | | |
|---------------------|--|--|--|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Petits pois commercialisables (kg/ha) | Petits pois non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | TM/S12 = 0,0541 | TM/S1 = 0,0040 TM/S12 = 0,0010 | TM/S12 = 0,0462 |
| Année | 0,0031 | <0,0001 | NS |

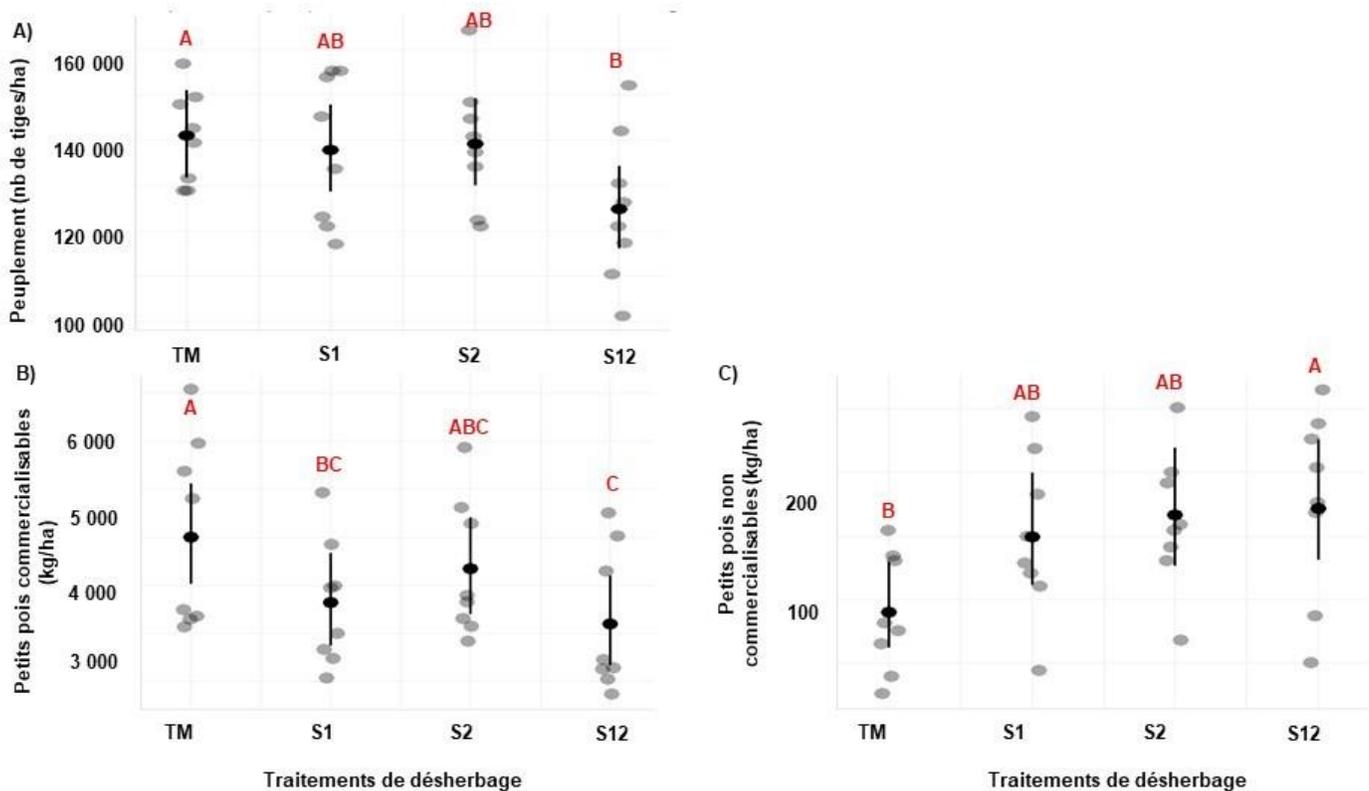


Figure 7 : Variables de rendement pour la culture de petit pois A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $p < 0,05$.

Tableau 11 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec les variables de rendement pour le haricot, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une p-value $\geq 0,05$.

| Variables du modèle | Haricot | | |
|---------------------|----------------------------------|--|---------------------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Gousses commercialisables (kg/ha) | Gousses non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | NS | TM/S2 = 0,0099 TM/S12 = 0,0026 S1/S12 = 0,0243 | NS |
| Année | <0.0001 | NS | <0.0001 |

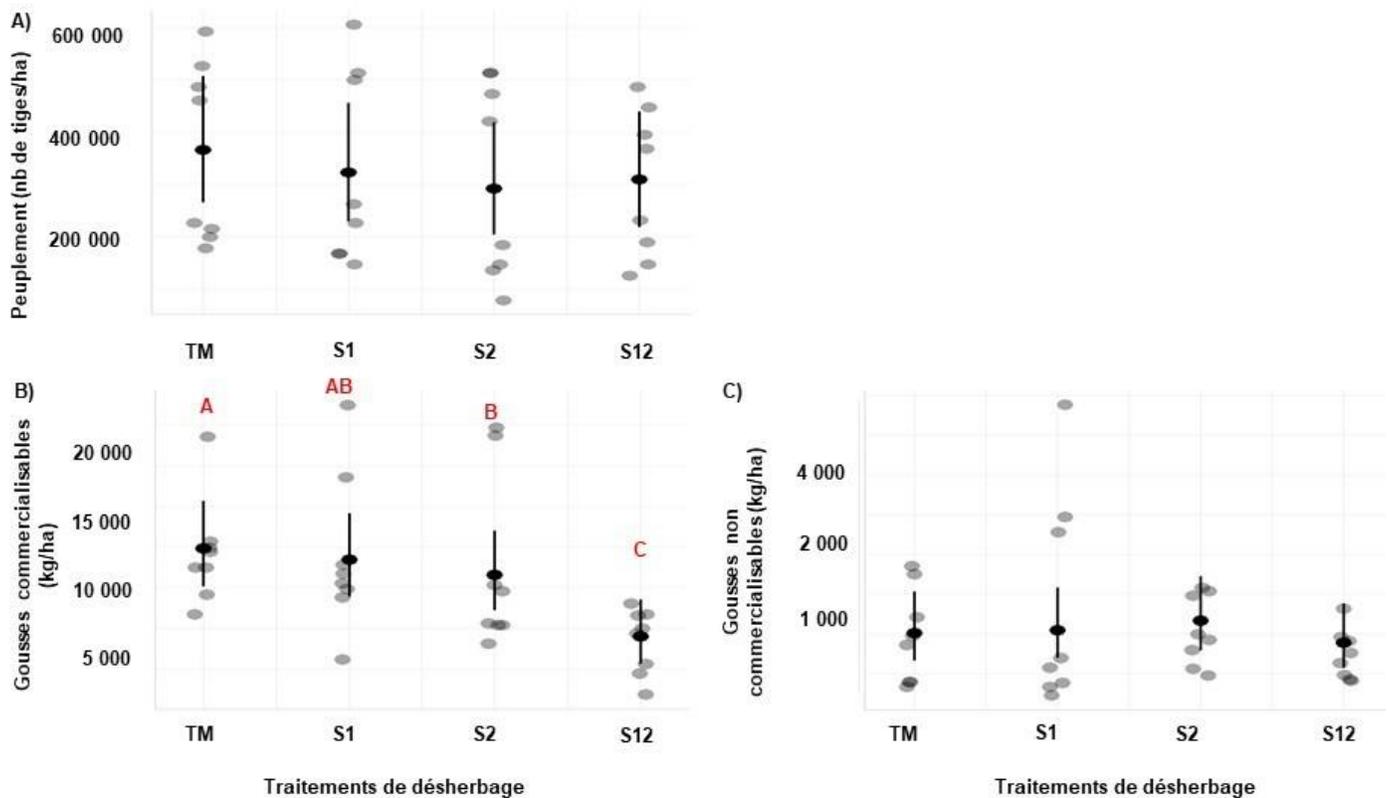


Figure 8 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

Tableau 12 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Soya | | | |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Poids à l'hectolitre (kg/hl) | Rendement à 14% d'humidité (kg/ha) | Poids de 1000 grains (g) |
| Traitement | NS | NS | NS | NS |
| Année | <0.0001 | <0.0001 | 0,0006 | <0.0001 |

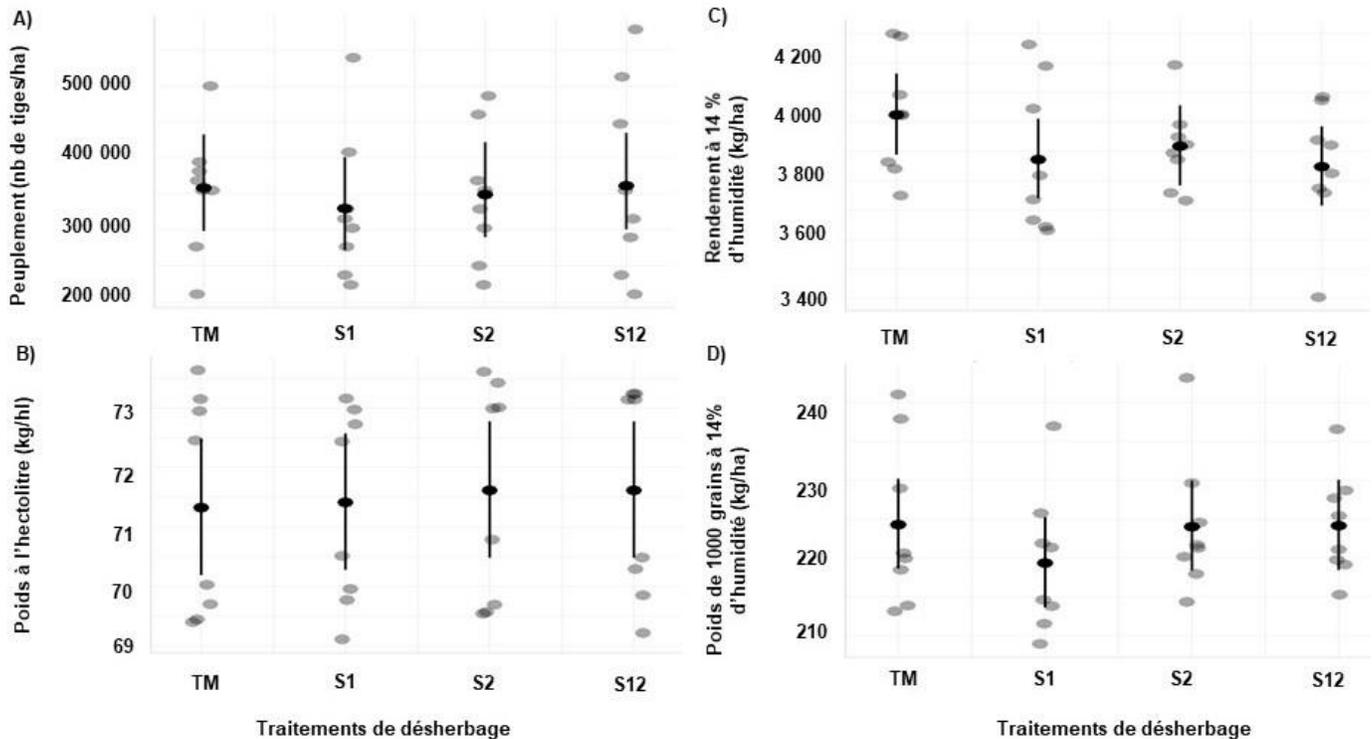


Figure 9 : Variables de rendement pour la culture de soya A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) le poids à l'hectolitre (kg/hl), C) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) et D) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance.

Tableau 13 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 2 avec la variable de dommages aux plants (différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif pour le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une p-value ≥ 0.05 .

| Variables du modèle | | Petit pois | Haricot vert | Soya |
|---------------------|------|------------------------------------|--------------|--------|
| Traitement | 2019 | TM/S12 = 0.0046 S2/S12 = 0.0203 | NS | NS |
| Année | 2021 | NS NA* | NS | 0.0015 |

*Les années ont été analysés séparément pour la culture de petit pois à cause de différences dans la distribution des données entre les deux années résultant en une difficulté d'appliquer la condition de normalité des résidus au modèle lorsque l'année est incluse comme variable.

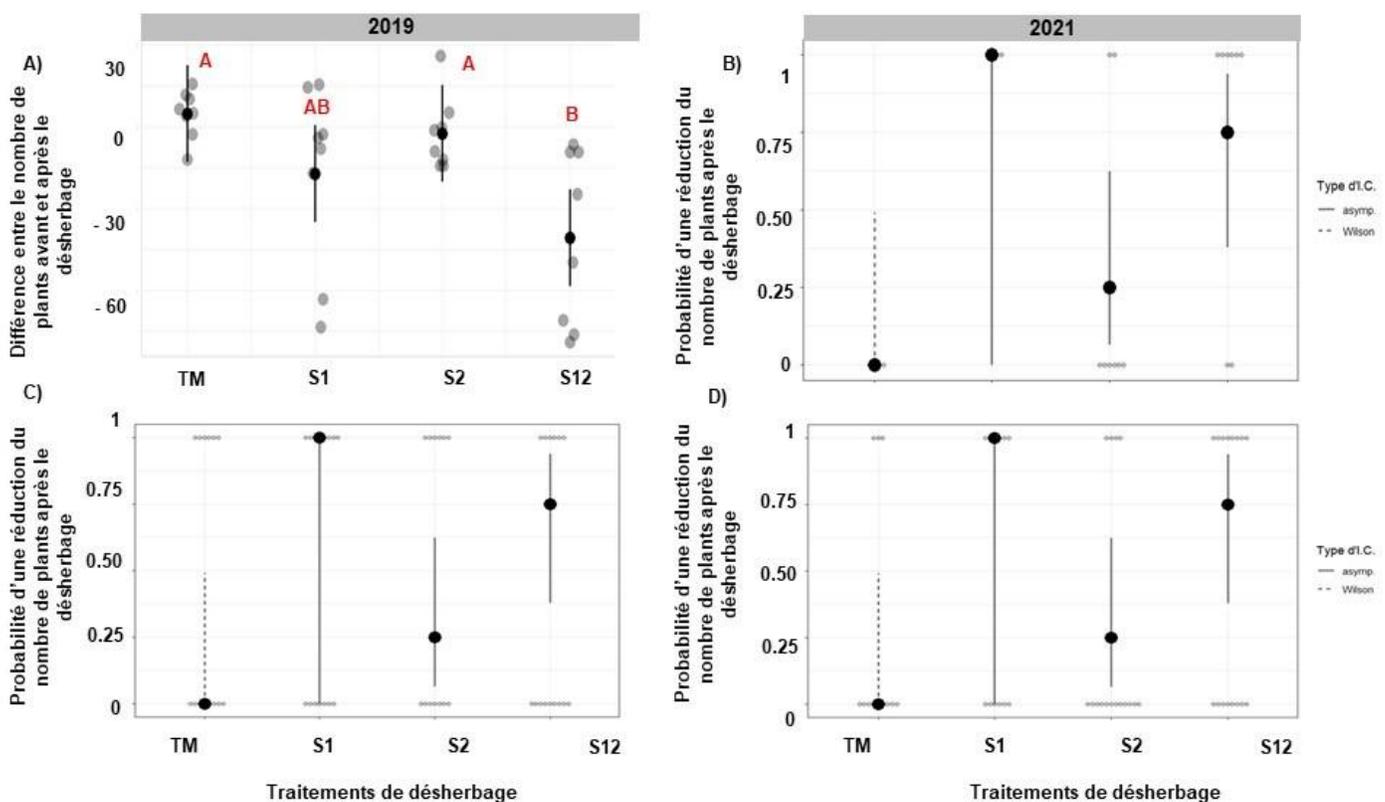


Figure 10 : Dommages pour la culture de A) petit pois en 2019, soit la différence entre le nombre de plants avant et après le passage des outils de désherbage tardif et probabilité de dommages, soit la probabilité d'une réduction du nombre de plants après le passage des outils de désherbage pour le B) petit pois en 2021, C) haricot et D) le soya, pour les deux années d'expérimentation, 2019 et 2021, selon le traitement de désherbage : TM) Témoin sans désherbage tardif, S1) 1 désherbage tardif au 1er stade de croissance, S2) 1 désherbage tardif au 2e stade de croissance, S12) 2 désherbages tardifs aux deux stades de croissance. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

3) Déterminer l'effet de l'utilisation de voies d'accès et l'espacement entre les rangs sur le rendement des cultures

Rendement Il n'y a pas eu de différences significatives entre les traitements ni entre les années pour la culture du petit pois.

Pour le haricot vert, il y avait plusieurs différences significatives entre les traitements pour le rendement commercialisable. Tous les traitements avec un espacement de rang de 19 cm ont eu un rendement supérieur à un espacement de 76 cm, binage tardif ou non. Des rendements supérieurs ont aussi été observés dans la majorité des traitements avec un espacement de 19 cm, sauf le 19-V, par rapport à un espacement de rang de 38 cm sans binage tardif (38-SB). Finalement, il y avait un rendement plus élevé dans le traitement avec un espacement de rang de 38 cm avec binage tardif (38-B) par rapport au traitement avec un espacement de rang de 76 cm. Pour la culture de haricot vert, il semblerait donc qu'un espacement de rang plus étroit favorise l'obtention d'un rendement plus élevé. La même tendance fut observée pour le peuplement (figure 9 A, B), quoique les résultats n'étaient pas significativement différents dans la majorité des cas. Des espacements aussi étroits ne sont pas recommandés dans les guides de production émis par les Producteurs de Légumes de Transformations (PLTQ). Les autres considérations agronomiques et techniques devraient être étudiées pour promouvoir cette nouvelle avenue de régie du haricot.

Pour le soya, le peuplement était le plus élevé dans le traitement sans binage tardif (19-SB), et significativement différent du traitement avec binage tardif et voies d'accès (19-BV), de même que du soya en rang de 76 cm. Le traitement sans binage tardif (19-SB) avait aussi des rendements plus élevés, significativement différents du traitement avec un espacement de rang de 76 cm. Deux autres traitements ont obtenu des rendements plus élevés que le soya en rang de 76 cm, soit le soya en rangs de 19 cm sans binage tardif et voies d'accès, de même que le soya en rang de 38 cm (Tableau 14, Figure 10). Il semblerait donc que le soya en rangs de 19 et 38 cm sans binage tardif donnerait des rendements supérieurs au soya en rang de 76 cm. Cependant, le binage tardif dans les rangs de 19 et de 38 cm aurait tendance à diminuer les rendements. Le contraire a été observé pour le poids de 1000 grains, qui a été plus élevé dans le soya semé en rangs de 76 cm, que dans le soya semé en rangs de 19 et 30 cm avec binage tardif.

Tableau 14 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Pois | | |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Petits pois commercialisables (kg/ha) | Petits pois non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | NS | NS | NS |
| Année | NS | NS | NS |

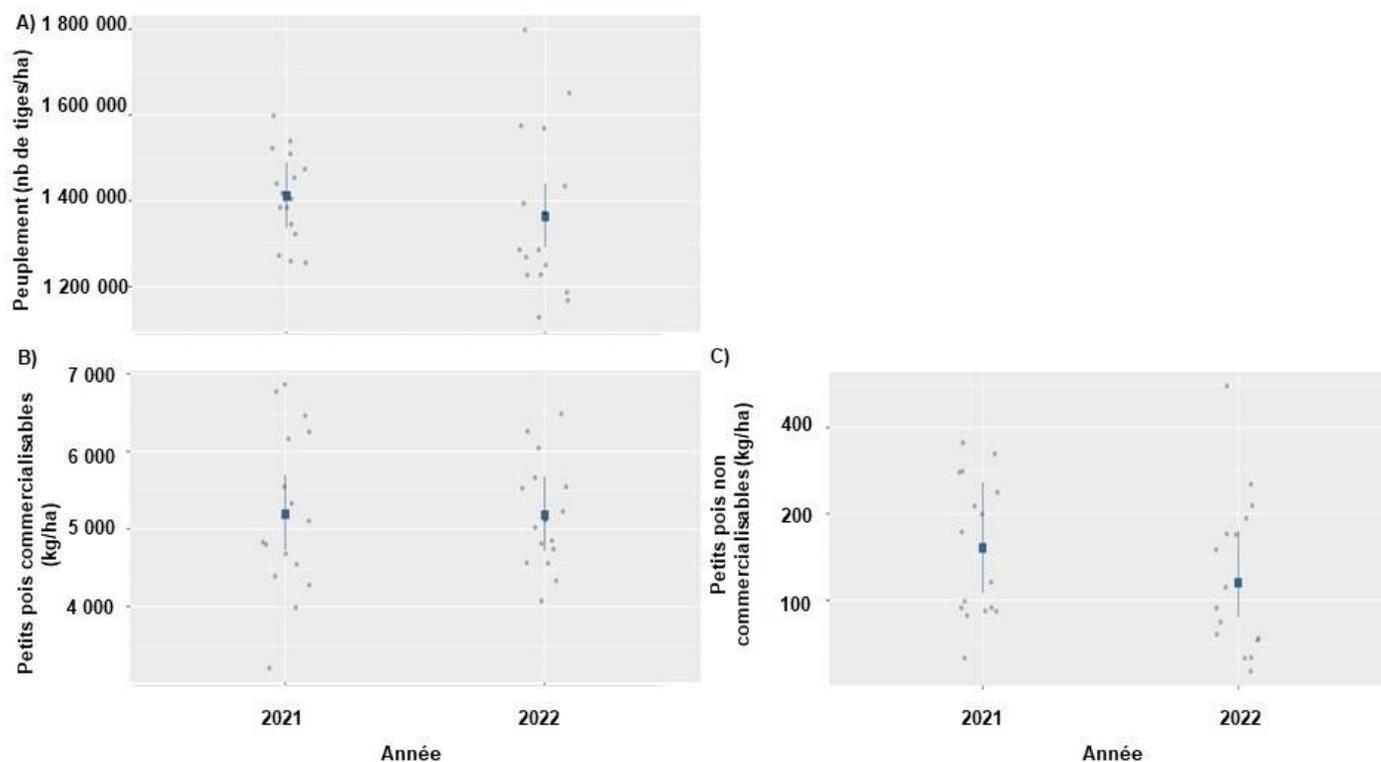


Figure 11 : Variables de rendement pour la culture de petit pois, A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022.

Tableau 15 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables de rendement pour le haricot, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Haricot | | |
|---------------------|----------------------------------|---|---------------------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Gousses commercialisables (kg/ha) | Gousses non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | 19-SB > 38-SB = 0,0359 | 19-B > 76-B = <0,0001 19-BV > 76-B = <0,0001 19-SB > 76-B = <0,0001 19-V > 76-B = <0,0001 19-BV > 38-SB = 0,0147 19-SB > 38-SB = 0,0151 19-B > 38-SB = 0,0255 38-B > 76-B = 0,0015 | NS |
| Année | NS | <0,0001 | 0,0003 |

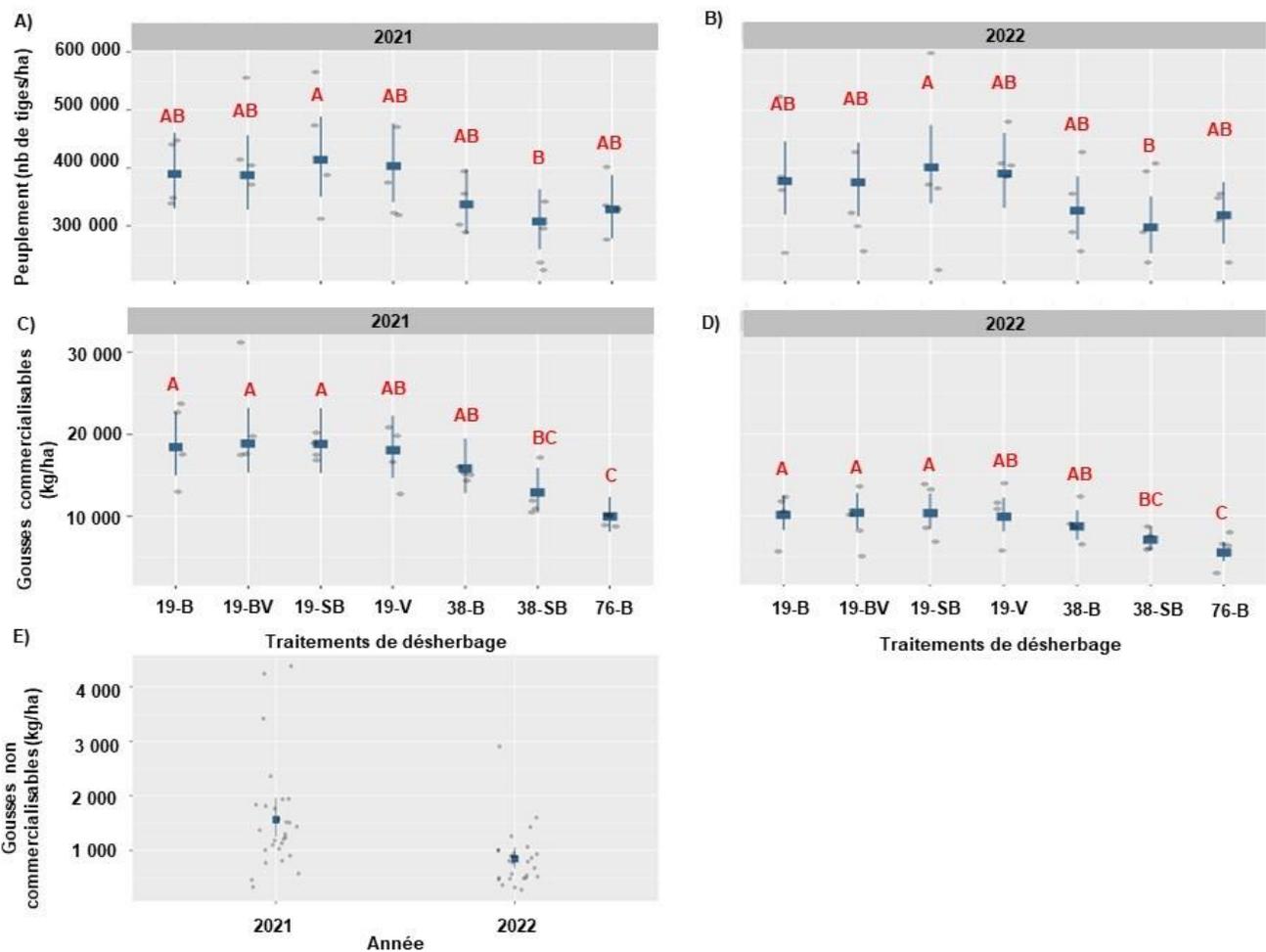


Figure 12 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert , **A)** le peuplement (nombre de plants/ha) en 2021 et **B)** 2022, **C)** la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) en 2021 et **D)** 2022, **E)** la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

Tableau 16 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Soya | | | |
|---------------------|---|------------------------------|--|--|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Poids à l'hectolitre (kg/hl) | Rendement à 14% d'humidité (kg/ha) | Poids de 1000 grains (g) |
| Traitement | 19-SB > 19-BV = 0,0085 19-SB > 76-B = 0,0008 | NS | 19-SB > 76-B = 0,0042 19-V > 76-B = 0,0360 38-SB > 76-B = 0,0264 | 38-SB > 19-B = 0,0260 76-B > 19-B = 0,0016 76-B > 19-BV = 0,0296 76-B > 38-B = 0,0431 |
| Année | NS | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |

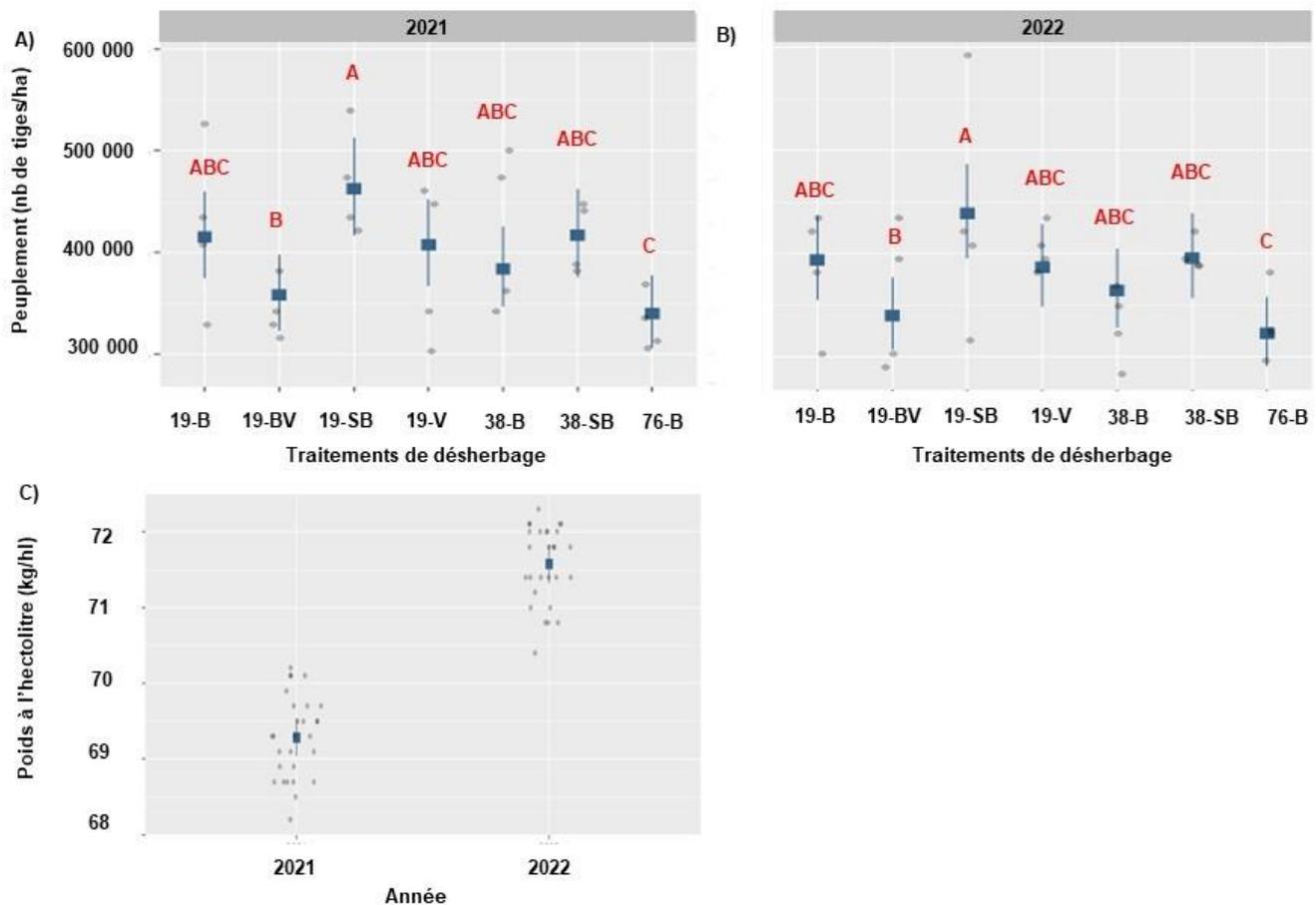


Figure 13 : Variables de rendement pour la culture de soya, A) le peuplement (nombre de plants/ha) en 2021 et B) 2022 et C) le poids à l'hectolitre (kg/hl) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

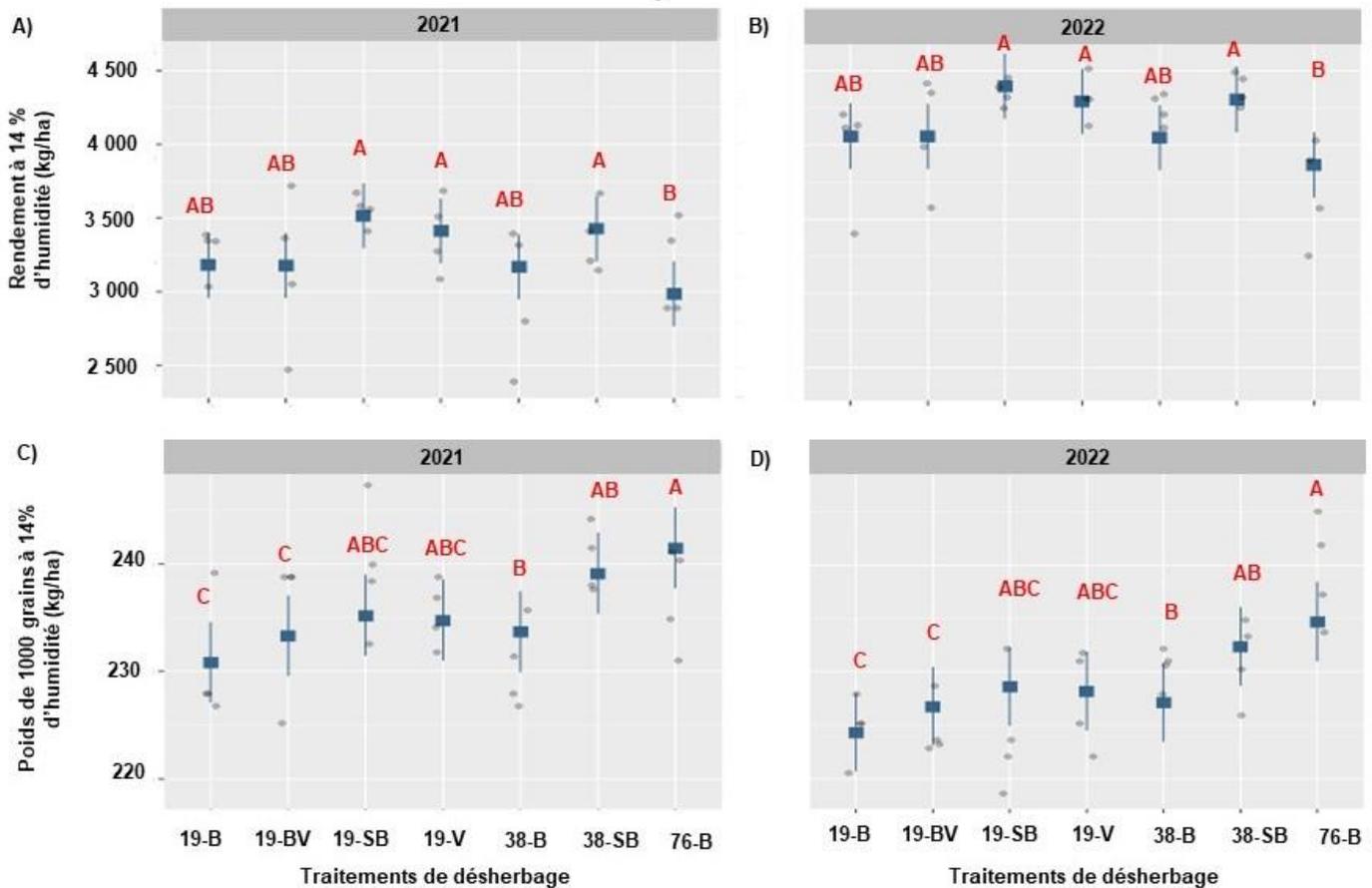


Figure 14 : Variables de rendement pour la culture de soya, A) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) en 2021 et B) 2022, C) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) en 2021 et D) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05.

Abondance et biomasse des mauvaises herbes en fin de saison

Il n'y avait pas de différences significatives d'abondance et de biomasse entre les facteurs à l'étude pour le petit pois. Cependant, une tendance est observée pour ces variables en fin de saison dans les parcelles avec espacement de 19 cm et avec voies d'accès, entre celles binées et non binées tardivement (Tableau 15, Figure 12). Les voies d'accès semblaient favoriser une plus grande présence de mauvaises herbes, malgré qu'il n'y ait pas eu d'effets sur le rendement.

Pour le haricot vert, il y avait moins de mauvaises herbes en fin de saison dans les parcelles avec un espacement de rang de 38 et 76 cm, par rapport aux parcelles en rangs étroits de 19 cm. Il semblerait donc que le binage tardif dans des parcelles avec un espacement plus large, de 38 et 76 cm facilite le contrôle des mauvaises herbes. Bien que cela n'ait pas eu d'effet sur le rendement. Il est possible que le haricot vert soit moins compétitif avec les mauvaises herbes que les autres cultures à l'étude.

Pour le soya, le binage tardif dans les rangs étroits de 19 cm semble avoir été plus efficace que dans le haricot. En effet, la quantité de mauvaises herbes est équivalente dans les traitements binés tardivement de 19, 38 et 76 cm. Les traitements où il n'y a pas eu de binage tardif, en rang de 19 ou 38 cm, sont ceux où on retrouve une plus grande abondance de mauvaises herbes en fin de saison.

Tableau 17 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 avec les variables d'abondance et de biomasse des mauvaises en fin de saison pour les trois cultures à l'étude, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | | Petit pois | Haricot vert | Soya | | |
|---------------------|------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----|--------|
| Abondance | Traitement | 19-BV < 19-V = 0,059 | 19-B > 76-B = 0,0023 | 19-SB > 19-BV = 0,0006 | | |
| | | | 19-BV > 76-B = 0,0009 | 19-SB > 19-B = 0,0002 | | |
| | | | 19-SB > 76-B = <0,0001 | 19-SB > 76-B = <0,0001 | | |
| | | | 19-V > 76-B = <0,0001 | 19-SB > 38-B = 0,0012 | | |
| | | | 19-V > 38-B = 0,0048 | 19-V > 19-B = <0,0001 | | |
| | | | 19-SB > 38-B = 0,0252 | 19-V > 19-BV = <0,0001 | | |
| | | | 38-B < 38-SB = 0,0028 | 19-V > 38-B = 0,0008 | | |
| | | | 38-SB > 76-B = <0,0001 | 19-V > 76-B = <0,0001 | | |
| | | | | 38-SB > 19-B = 0,005 | | |
| | | | | 38-SB > 19-BV = 0,0054 | | |
| | | | | 38-SB > 38-B = 0,0096 | | |
| | | | | 38-SB > 76-B = 0,0008 | | |
| | | | Année | NS | NS | 0,0003 |
| Biomasse | Traitement | 19-BV < 19-V = 0,0693 | 19-BV > 76-B = 0,0018 | NS | | |
| | | | 19-SB > 76-B = <0,0001 | | | |
| | | | 19-V > 76-B = <0,0001 | | | |
| | | | 19-V > 38-B = 0,0277 | | | |
| | | | 19-SB > 38-B = 0,0294 | | | |
| | | | 38-SB > 76-B = <0,0001 | | | |
| | | | 38-SB > 38-B = 0,0021 | | | |
| | | | 38-SB > 19-BV = 0,0136 | | | |
| | | | 38-SB > 19-SB = 0,0438 | | | |
| | | | 38-SB > 19-V = 0,0004 | | | |
| | | | 38-SB > 19-B = 0,0810 | | | |
| | | | Année | NS | NS | NS |

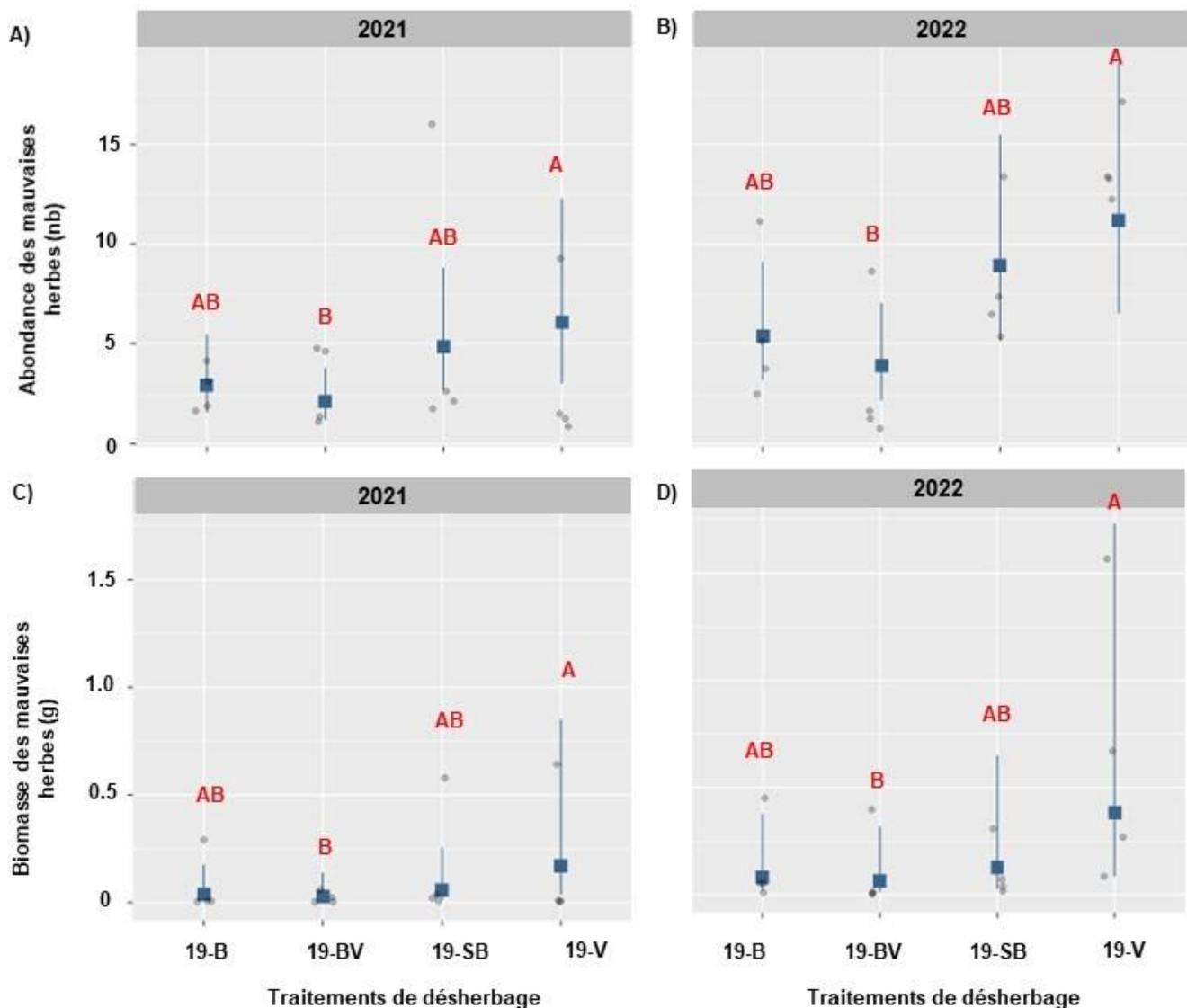


Figure 15 : Abondance des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du petit pois en A) 2021 et B) 2022. Biomasse des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du petit pois en C) 2021 et D) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05.

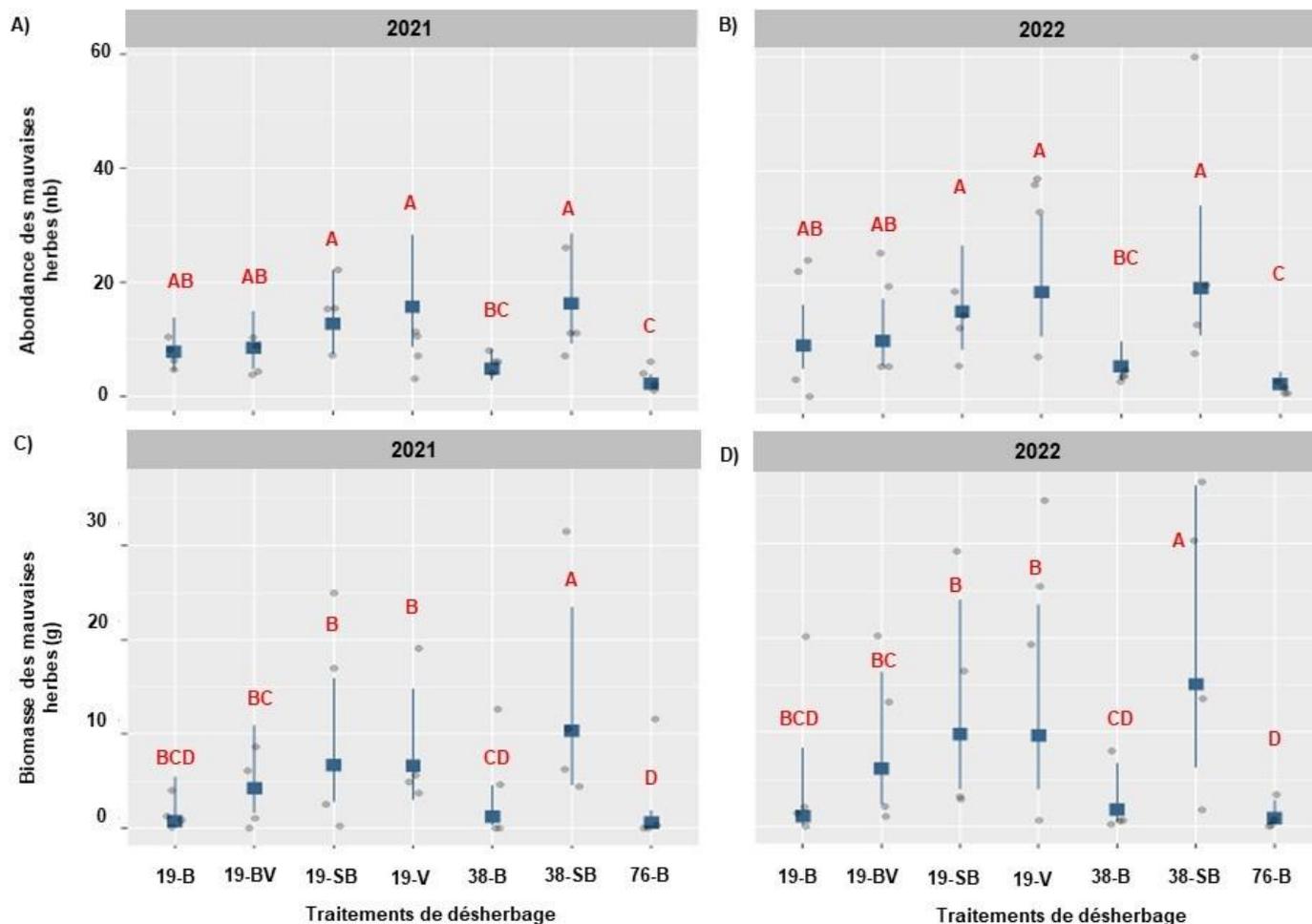


Figure 16 : Abondance des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du haricot vert en A) 2021 et B) 2022. Biomasse des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du haricot vert en C) 2021 et D) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05.

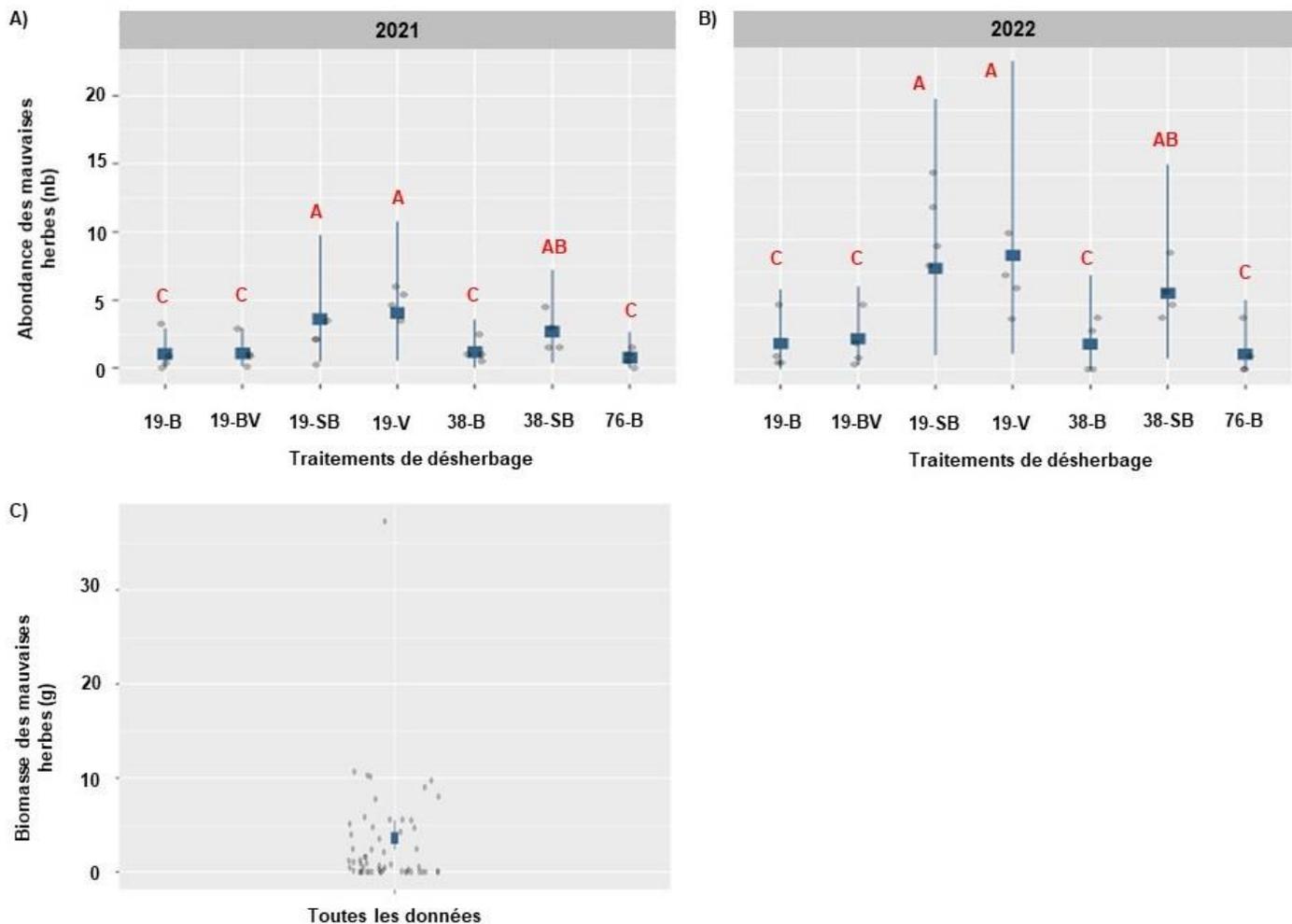


Figure 17 : Abondance des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du soya en A) 2021 et B) 2022, selon le traitement de désherbage : 19-B) Rangs de 19 cm avec binage tardif, 19-BV) Rangs de 19 cm avec binage tardif + voies d'accès, 19-SB) Rangs de 19 cm sans binage tardif, 19-V) Rangs de 19 cm sans binage tardif + voies d'accès, 38-B) Rangs de 38 cm avec binage tardif, 38-SB) Rangs de 38 cm sans binage tardif, 76-B) Rangs de 76 cm avec binage tardif. C) Biomasse des mauvaises herbes en fin de saison pour la culture du soya en 2021 et 2022, tous traitements confondus (aucunes différences significatives). Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

4) Déterminer l'impact de l'ajout d'un système de guidage avec caméra combiné à la bineuse sur la vitesse et la précision du binage

Rendement L'ajout d'un système de guidage par caméra pour le désherbage des trois cultures en rangs étroits de 19 cm n'a pas eu beaucoup d'impact sur le rendement des trois cultures dans le contexte de notre étude. Seule une différence significative a été observée pour la culture de petit pois, où le rendement commercialisable a été plus élevé pour un désherbage à 6 km/h avec système de guidage par rapport à un désherbage à 6 km/h sans système de guidage (Tableau 16, Figure 15). Probablement que la faible longueur des parcelles expérimentales (8 m) n'a pas permis de bien vérifier l'impact du système de guidage puisque le temps d'ajustement du système d'autopilotage par GPS correspondait à peu près au temps de parcourir la moitié de la longueur de la parcelle. En conditions de champ et sur de longues distances, l'utilisation d'un système de guidage par caméra combiné à la bineuse piloté par un système GPS-RTK, serait préconisé. Il y avait des différences significatives entre les années d'expérimentations pour la culture de petit pois et de soya.

Tableau 18 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 4 avec les variables de rendement pour le petit pois, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Pois | | |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Petits pois commercialisables (kg/ha) | Petits pois non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | NS | SG6/G6 = 0,0598 | NS |
| Année | 0,0017 | 0,0582 | 0,0001 |

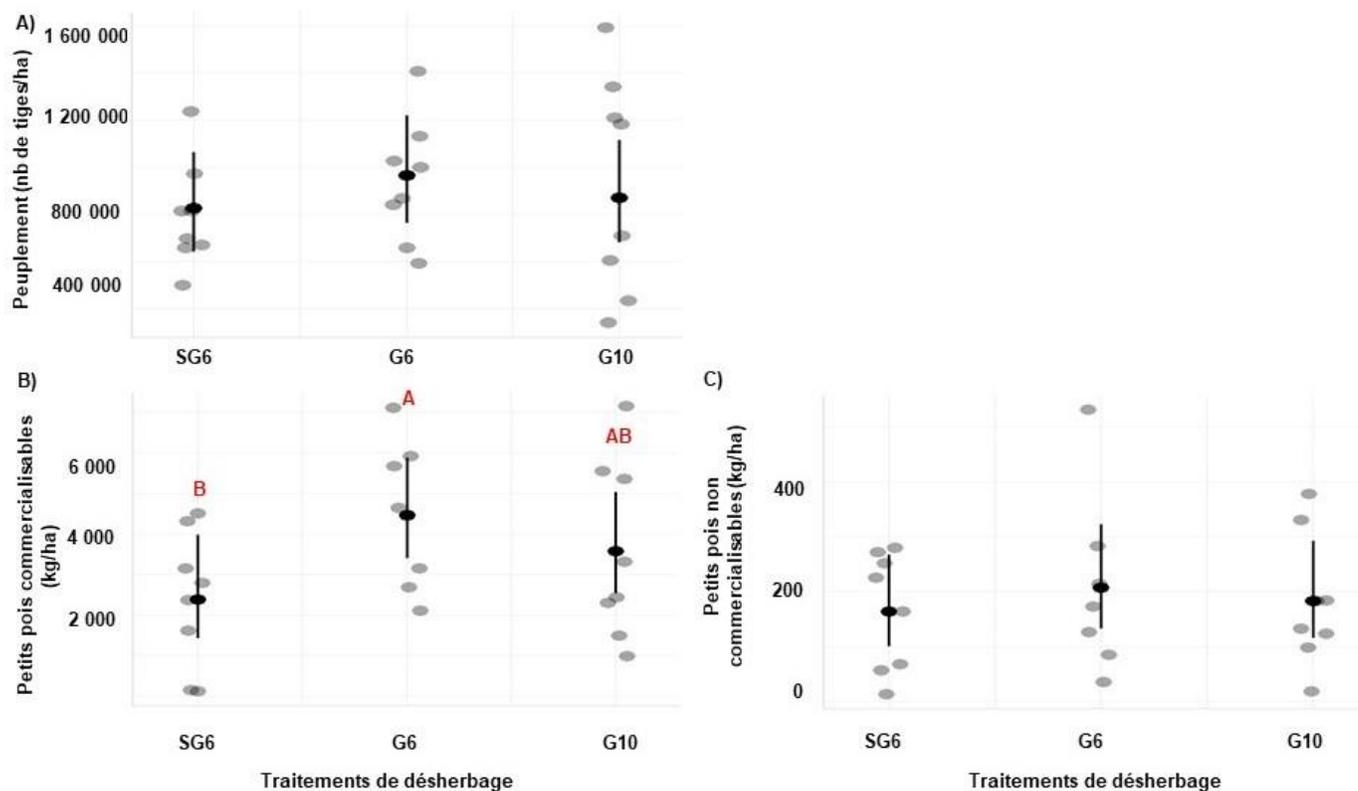


Figure 18 : Variables de rendement pour la culture de petit pois, A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de petits pois commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de petits pois non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage par caméra, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

Tableau 19 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 4 avec les variables de rendement pour le haricot vert, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Haricot | | |
|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Gousses commercialisables (kg/ha) | Gousses non commercialisables (kg/ha) |
| Traitement | NS | NS | NS |
| Année* | NA | NA | NA |

*Pas de variables de rendement pour le haricot en 2021, car une trop grande infestation de mauvaises herbes. Les analyses statistiques sont effectuées en tenant seulement compte du traitement pour l'année 2022 avec un modèle linéaire généralisé.

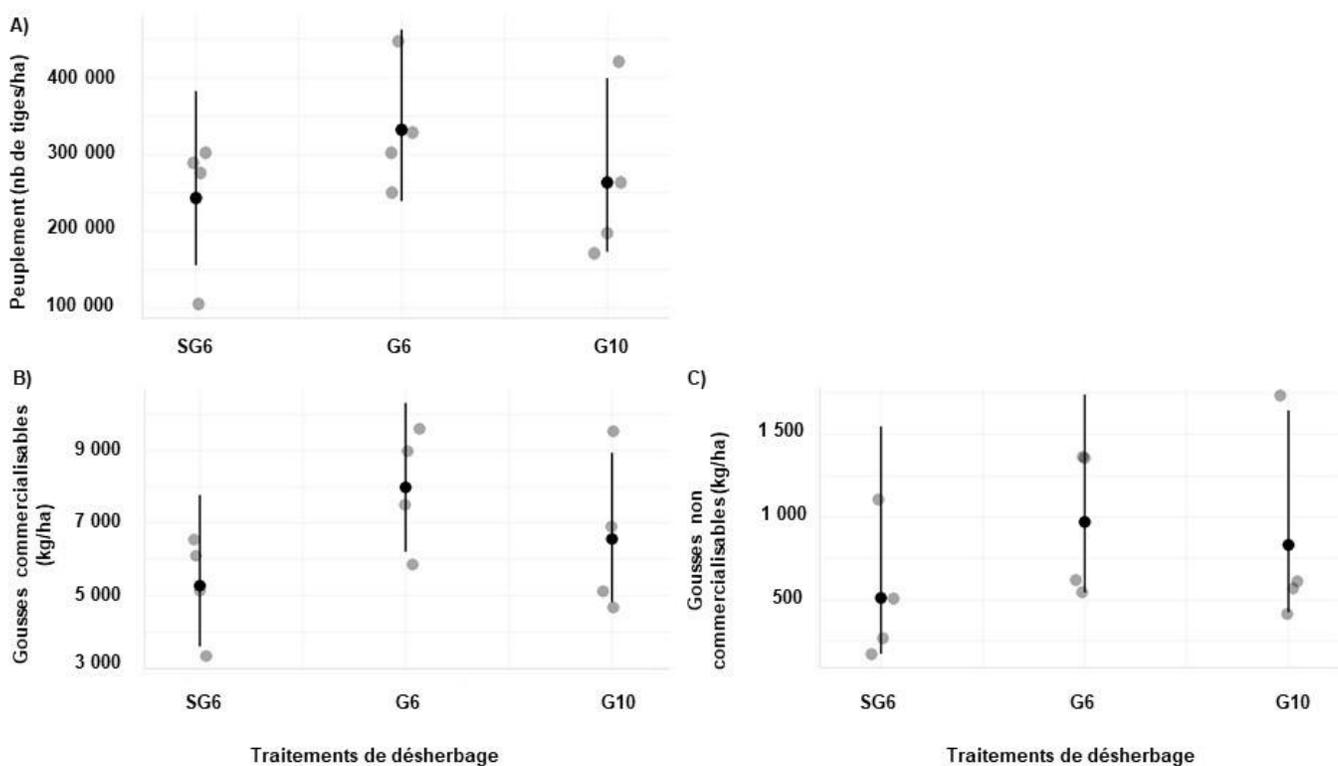


Figure 19 : Variables de rendement pour la culture de haricot vert, A) le peuplement (nombre de plants/ha), B) la quantité de gousses commercialisables (kg/ha) et C) la quantité de gousses non commercialisables (kg/ha) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra.

Tableau 20 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 4 avec les variables de rendement pour le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variables du modèle | Soya | | | |
|---------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| | Peuplement (nombre de plants/ha) | Poids à l'hectolitre (kg/hl) | Rendement à 14% d'humidité (kg/ha) | Poids de 1000 grains (g) |
| Traitement | NS | NS | NS | NS |
| Année | <0,0001 | <0,0001 | 0,0482 | 0,0026 |

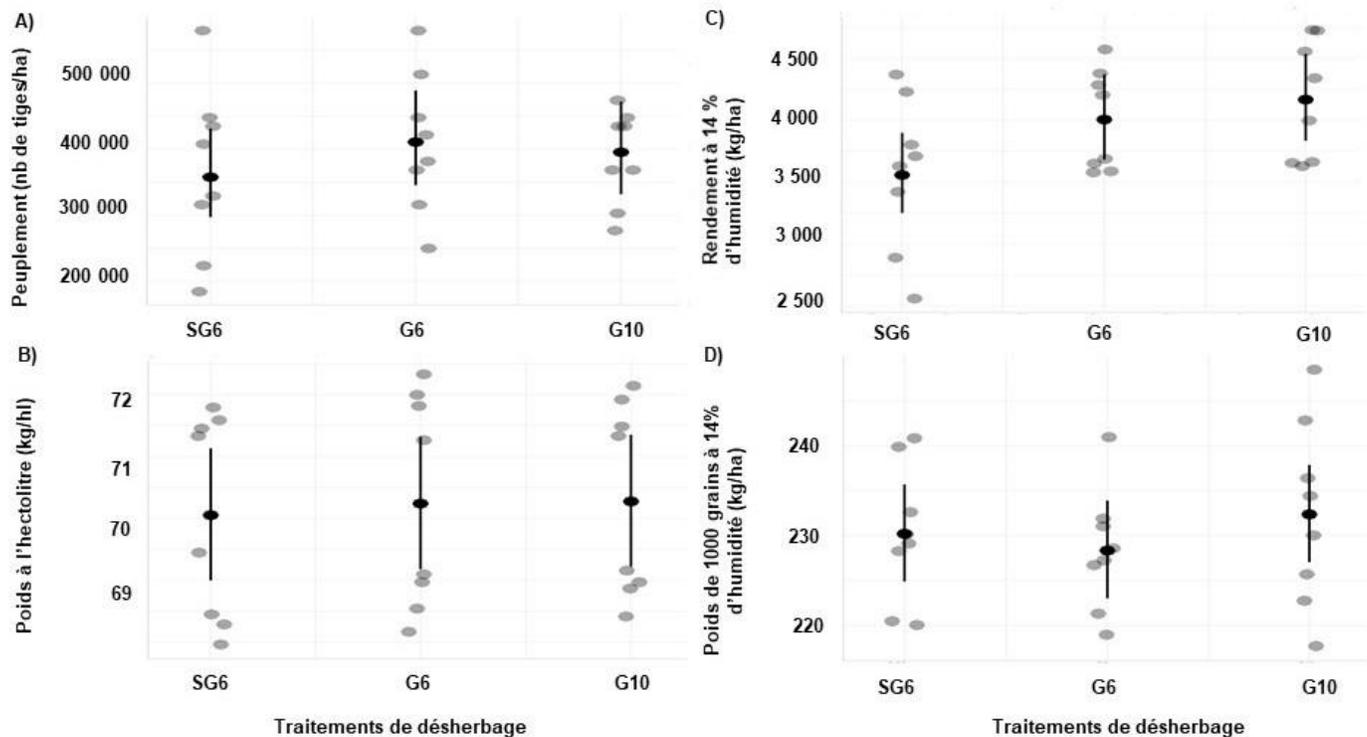


Figure 20 : Variables de rendement pour la culture de soya A) le peuplement (nombre de plants/ha) B) le poids à l'hectolitre (kg/hl) C) le rendement des grains à 14% d'humidité (kg/ha) D) le poids de 1000 grains à 14% d'humidité (g) pour les deux années d'expérimentation, 2021 et 2022, selon le traitement de désherbage : SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra.

Efficacité du désherbage

Il n'y avait pas de différences significatives concernant l'efficacité du désherbage entre les traitements pour le petit pois et le haricot. Dans le soya, le désherbage à une vitesse de 10 km/h était moins efficace qu'à 6 km/h, avec ou sans système de guidage. Afin d'optimiser le désherbage dans les cultures en rangs étroits, il pourrait donc être préférable de réduire un peu la vitesse d'avancement du tracteur. Il faut aussi considérer dans l'étude que l'ajustement des outils de désherbage (profondeur de travail, espacement entre les dents) n'était pas changé entre les traitements. Il est donc possible que les outils passés à 10 km/h auraient pu être réajustés pour maximiser leur efficacité.

Tableau 21 : Résultats pour les tests statistiques de l'objectif 3 pour l'efficacité du désherbage dans le petit pois, le haricot vert et le soya, les variables du modèle étant le traitement de désherbage et l'année. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0.05$.

| Variabes du modèle | Petit pois | Haricot vert | Soya |
|--------------------|------------|--------------|------------------------------------|
| Traitement | NS | NS | G10<G6 = <0,001 G10<SG6 = 0,003 |
| Année | NS | 0,003 | NS |

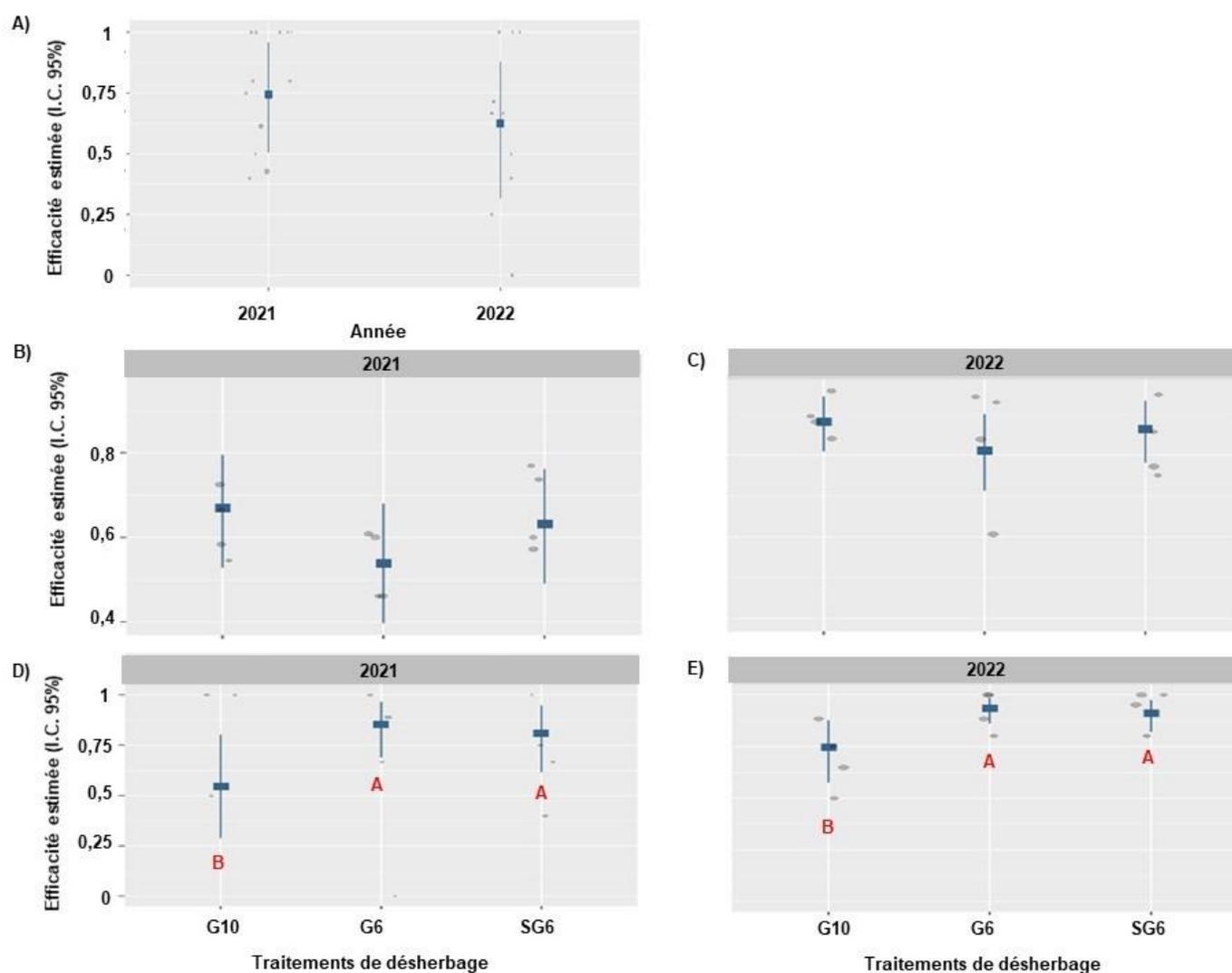


Figure 21 : Efficacité du désherbage pour la culture de A) petit pois, B) haricot vert en 2021 et C) 2022, D) le soya en 2021 et E) 2022, selon le traitement de désherbage : G10) Culture binée à 10 km/h avec système de guidage par caméra, G6) Culture binée à 6 km/h avec système de guidage par caméra, SG6) Culture binée à 6 km/h sans système de guidage par caméra. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$.

4 CONCLUSION

En conclusion, la gestion des cultures en rangs étroits au Québec, notamment dans le cadre de la régie biologique, est confrontée à des défis complexes liés à la répression des mauvaises herbes. Les outils traditionnels tels que la houe rotative et la herse étrille demeurent largement utilisés, mais des stratégies complémentaires telles que le binage tardif émergent comme des solutions potentielles. Cette étude met en lumière certaines techniques pour appuyer les producteurs qui adoptent la culture en rangs étroits, au niveau du type d'outils de désherbage à employer, de la vitesse d'avancement ou encore des stades de croissance pour lesquels un désherbage est possible sans causer de dommages à la culture. De plus, l'utilisation d'un système de guidage par caméra a démontré son efficacité et pourrait donc être employé en grandes cultures et en cultures de légumes de transformation. Cela permettrait d'optimiser l'achat de cet outil, de même que d'effectuer une diversification des rotations de culture, le désherbage n'étant plus un enjeu.

5 RÉFÉRENCES

- [1] Cloutier, D. et M. L. Leblanc. 2001. Mechanical weed control in agriculture. Pages 191-204 dans C. Vincent, B. Panneton and F. Fleurat-Lessard (eds). Physical control methods in plant protection. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, INRA Paris.
- [2] Desrochers, A. 2017. Des visites aux champs profitables. La Terre de Chez Nous, 27 juillet 2017. <https://www.laterre.ca/actualites/visites-aux-champs-profitables>
- [3] Cirujeda, A., B. Melander, K. Rasmussen and I. A. Rasmussen. 2003. Relationship between speed, soil movement into cereal row and intra-row weed control by weed harrowing. *Weed Research*. 43: 285-296
- [4] Lauzon M., Y. Dion et S. Fortin. 2017. L'utilisation de voies d'accès pour des intervention en postlevée. Réseau d'avertissements phytosanitaires-Bulletin d'information N° 1-Grandes cultures-11mai 2017. 5 p.
- [5] Kolb, L. N., E. R. Gallandt et E. B. Mallory. 2012. Impact of spring wheat planting density, row spacing, and mechanical weed control on yield, grain protein, and economic return in Maine. *Weed Science*. 60: 244-253
- [6] Welsh J. P., N. d. Tillet, M. Home et J. A. King. 2002. A review of knowledge: inter-row hoeing and its associated agronomy in organic cereal and pulse crops. Final report from DEFRA Funded Project OF0312
- [7] Lötjönen, T. et H. Mikkola. 2000. Three mechanical weed control techniques in spring cereals. *Agric. Food Sci. Finl.* 9: 269-278
- [8] ITAB. 2012. Brochure "Désherber mécaniquement les grandes cultures", (CASDAR "Optimiser et promouvoir le désherbage mécanique"), France. http://www.itab.asso.fr/downloads/desherb-meca/dm-brochure_culture-web.pdf
- [9] Melander, B., A. Cirujeda and M. H. Jorgensen. 2003. Effects of inter-row hoeing and fertilizer placement on weed growth and yield of winter wheat. *Weed Res.* 43: 428-438
- [10] Stanley, K. A., S. J. Shirtliffe, D. Benaragama, L. D. Syrovoy et H. S. N. Duddu. 2017. Field pea and lentil tolerance to interrow cultivation. *Weed Technol.* 32: 205-210
- [11] Leblanc, M. 2017. Cultures biologiques: La techno au service du sarclage. *Vecteur environnement* 50 (1) : 24-27
- [12] **Biologische Bundesanstalt**, **Bundessortenamt** et **CHemische Industrie**
- [13] Commission canadienne des grains (<https://www.grainscanada.gc.ca/fr/qualite-grains/guide-officiel-classement-grains/oggg-aug-1-2021-fr.pdf>)
- [14] Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19 (6). 215-222.