

ÉVALUATION D'UN ROBOT DÉSHERBEUR EN PRODUCTION MARAÎCHÈRE BIOLOGIQUE

20-017-IRDA

DURÉE DU PROJET : 03-2020 / 10-2023

RAPPORT FINAL

Réalisé par :

Élise Smedbol, Ph.D., chercheure en malherbologie, IRDA

Mick Wu, Ph.D., biostatisticien, IRDA

Maxime Lefebvre, Ph.D., chercheur en entomologie maraîchère, IRDA

Justin Ouellette, D.E.C., technicien, IRDA

Maryse Leblanc, Ph.D., chercheure en malherbologie retraitée, IRDA

Octobre 2023

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur ou des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation.

ÉVALUATION D'UN ROBOT DÉSHERBEUR EN PRODUCTION MARAÎCHÈRE BIOLOGIQUE :

20-017-IRDA :

RÉSUMÉ DU PROJET

La robotisation autonome du désherbage des cultures maraîchères est une nouvelle stratégie de lutte contre les mauvaises herbes qui est apparue récemment au Québec avec l'arrivée du robot Oz de la compagnie française Naïo technologies. De petite taille, Oz mesure 47 cm de large avec une hauteur de 83 cm, une longueur de 1,3 m (sans les outils de binage) et pèse 150 kg. Sa vitesse maximum de déplacement est de 1,8 km/h. Le robot fonctionne à l'aide de batteries rechargeables pouvant atteindre 8 h d'autonomie. Il se déplace de façon autonome grâce à son système de guidage GPS RTK. Il suffit de générer une carte de navigation en fixant l'antenne du robot sur le semoir ou le transplanteur durant l'opération au champ. Une fois la carte créée, elle est transmise au robot qui l'utilisera tout au long de la saison pour s'orienter et désherber la culture. Le projet propose d'adapter cette nouvelle technologie dans les légumes de champ en contexte québécois d'agriculture biologique. Les objectifs spécifiques furent de tester le robot Oz et ses outils de sarclage sur trois cultures maraîchères (maïs sucré, oignon espagnol transplanté et haricot vert) et d'évaluer leurs impacts sur la répression des mauvaises herbes, le temps de désherbage et le rendement des cultures. La performance du désherbage robotisé a été comparée à trois autres moyens pour désherber, soit avec la houe maraîchère, le tracteur ou manuellement. Les essais ont été réalisés pendant 2 ans pour chacune des cultures. Les résultats ont démontré que les différents porte-outils testés ont un effet semblable sur le rendement. L'efficacité du robot à réprimer les mauvaises herbes était généralement similaire à celle des autres moyens de désherbage pour le désherbage hâtif avec la herse étrille ou les tiges à ressort. Cependant, il a démontré moins d'efficacité que les autres moyens de désherbage pour des désherbages plus tardifs, soit lors des sarclages de l'entre-rang combinés avec des doigts de binage ou du renchaussage sur le rang, surtout dans le haricot vert et l'oignon espagnol. Ce résultat est probablement dû à une combinaison entre sa vitesse d'avancement un peu trop lente pour les doigts de binage et les disques de renchaussage, et de l'instabilité du robot qui tend à tanguer sur les côtés. L'instabilité a été corrigée depuis par la compagnie Naïo technologies, par l'ajout de roues doubles et de pesées additionnelles à l'avant. Le robot était plus lent que les autres équipements en évaluation, mais deux fois plus rapide que le désherbage manuel.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif principal du projet est d'adapter une nouvelle stratégie de lutte robotisée contre les mauvaises herbes dans les légumes de champ en contexte québécois d'agriculture biologique. Les objectifs spécifiques sont: 1) Adapter l'utilisation du robot Oz et ses outils de sarclage à trois cultures maraîchères (maïs sucré, oignon espagnol transplanté et haricot) et évaluer leurs impacts sur la répression des mauvaises herbes, le temps de désherbage et le rendement des cultures et de déterminer leurs limites d'application; 2) Établir la performance économique du désherbage robotisé comparé à trois autres méthodes

de désherbage en agriculture biologique, soit avec une houe maraîchère, un tracteur porte-outils ou manuellement.

Le désherbage dans les trois cultures a été évalué sur une période de deux ans, le maïs sucré a été évalué en 2020 et 2021, alors que le haricot et l'oignon espagnol ont été évalués en 2021 et 2022. Un dispositif expérimental en bloc aléatoire complet avec 4 traitements et 4 répétitions a été mis en place au site de la Plateforme d'innovation en agriculture biologique à Saint-Bruno-de-Montarville. Chaque dispositif comptait 16 parcelles de 3 m x 10 m de long. Chacune des parcelles était composée de quatre rangs de culture. Les traitements incluaient l'évaluation de 3 porte-outils soit le robot Oz de Naïo, la houe maraîchère Terrateck et le tracteur porte-outils Mazzotti avec une barre d'outils K.U.L.T. et un témoin désherbé manuellement à l'aide d'un sarcloir oscillant ou d'une binette. À chaque désherbage, les outils de sarclage fixés sur le robot, la houe ou le sarcler tracté étaient similaires. Tous les désherbages mécaniques et manuels ont été chronométrés. Le tracteur roulait à 10 km/h avec la herse étrille et à 5 km/h lors des passages avec les autres outils. Le robot se déplaçait à 1,4 km/h en 2020 et à 1,8 km/h en 2021 et 2022. Un suivi phénologique des mauvaises herbes et des cultures était réalisé une à deux fois par semaine afin de suivre l'évolution des plantes. Les traitements de désherbage étaient déclenchés lorsque les mauvaises herbes avaient 2 feuilles et moins.

Maïs sucré. En 2020, le type de sol du site expérimental était un sable loameux Aston (pH : 6,4; P : 508 kg/ha; K : 397 kg/ha; 4,1 % de matière organique) alors qu'en 2021, le sol était un loam sableux Massueville (pH : 6,8; P : 439 kg/ha; K : 322 kg/ha; 3,7 % de matière organique). Il a été fertilisé le 16 juin 2020 et le 8 juin 2021 avec respectivement, 3 500 kg/ha et 3 723 kg/ha d'Acti-Sol (4,7-1,4-2,3) incorporé le même jour avec un vibroculteur. Le maïs, cv. Sweetness F1 NT (non traité), a été semé le 16 juin 2020 et le 9 juin 2021 aux taux respectifs de 74 342 et 82 236 graines/ha à une profondeur de 3,8 cm à l'aide d'un semoir à maïs John Deere MaxEmerge 2 7200 dont les rangs étaient espacés de 76 cm. Avant de débuter les traitements de désherbage dans le maïs sucré, un passage hâtif de la houe rotative Yetter a été réalisé dans toutes les parcelles le 19 juin 2020 (stade allumette) à 15 km/h et le 18 juin 2021 (stade 1 feuille) à 10 km/h. Par la suite, le maïs sucré a été sarclé trois fois avec les outils en évaluation. Les dates et les outils de désherbage sont décrits au tableau M1. Afin de diminuer la pression des mauvaises herbes qui avaient nouvellement levé ou échappé aux traitements, un désherbage manuel a été réalisé dans l'ensemble des parcelles expérimentales le 31 juillet 2020 et le 13 juillet 2021.

L'efficacité de chaque désherbage a été déterminée en dénombrant les espèces de mauvaises herbes et leurs stades avant et après chaque passage des outils, dans deux quadrats permanents délimités par des drapeaux et placés aléatoirement sur un des deux rangs du milieu et entre ces deux rangs. La largeur du quadrat posé sur le rang était de 10 cm (5 cm de chaque côté) et de 66 cm pour l'entre-rang. La longueur du quadrat a été établie selon l'abondance des mauvaises herbes. En 2020, elle variait entre 2 et 10 m alors qu'en 2021, entre 0,5 et 1 m.

Tableau M1. Description des traitements de désherbage dans le maïs sucré en 2020 et 2021.

TRAITEMENTS	ZONE DÉSHÉRBÉE	HERSE ÉTRILLE		DOIGTS DE BINAGE		RENCHAUSSAGE	
		2 JUILLET 2020 4 feuilles	22 JUIN 2021 3 feuilles	9 JUILLET 2020 6-7 feuilles	30 JUIN 2021 5 feuilles	15 JUILLET 2020 7-8 f. élongation	19 JUILLET 2021 8-9 f. élongation
HOUE	rang	Herse étrille Two Bad Cat	Herse étrille Terrateck	Doigts de binage + lames en L Terrateck	Doigts de binage + préci-disques Terrateck	Soc butteur de 20 cm Terrateck chaque côté du rang	
	entre-rang			Lame en T de 30 cm Terrateck (2 ^e passage)		Lame en T de 30 cm Terrateck (2 ^e passage)	
ROBOT	rang	Herse étrille haute Naïo (2 rangées de 3 tiges)		Doigts de binage de 25 cm K.U.L.T.		2 brosses de buttage + 2 dents droites à l'avant Naïo	
	entre-rang	3 socs à patte d'oise Naïo	2 herse étrilles basses Naïo (9 tiges)	3 socs à patte d'oise Naïo		1 soc à patte d'oise Naïo	
TRACTEUR	rang	Herse étrille Hatzenbichler		Doigts de binage de 29 cm K.U.L.T.		Disques de 25 cm K.U.L.T.	
	entre-rang			Lames à angle + socs à patte d'oise K.U.L.T.		Lames à angle + socs patte d'oise K.U.L.T.	
TÉMOIN MANUEL	rang	Sarcloir oscillant		Sarcloir oscillant		Binette pour renchausser	
	entre-rang						

La récolte du maïs sucré a été réalisée le 17 août 2020 et le 16 août 2021 sur 8 m linéaires incluant les deux rangs du centre (2 x 4 m) et laissant un rang de garde de chaque côté et au moins 1 m à chaque extrémité de la parcelle. Le peuplement du maïs a également été dénombré dans ces zones. Tous les épis dans les zones de récolte ont été prélevés. Ceux de moins de 3 cm de diamètre ont été exclus. Tous les autres épis ont été épluchés, comptés et pesés par catégorie commercialisable ou non commercialisable (immature, mauvaise pollinisation, présence de charbon, présence de dégâts d'insectes ou de malformations). Dix épis vendables par parcelle ont été prélevés aléatoirement afin de mesurer leur longueur ainsi que leur diamètre au centre.

Haricot vert. Le type de sol du site était une argile limoneuse humifère Laplaine (pH : 6,7; P : 53 kg/ha; K : 502 kg/ha; 18,7 % de matière organique en 2021 et pH : 6,4; P : 51 kg/ha; K : 351 kg/ha; 14,1 % de matière organique en 2022). Le sol a été fertilisé le 9 juin 2021 et le 14 juin 2022, respectivement avec 1 596 kg/ha et 1 500 kg/ha d'Acti-Sol (4,7-1,4-2,3) incorporé le jour même à l'aide d'un cultivateur Will-Rich. Le haricot, cv. Caprice NT, a été semé le 9 juin 2021 et le 14 juin 2022 aux taux respectifs de 289 474 et 300 000 semences/ha à une profondeur de 3,8 cm à l'aide du semoir à maïs John Deere MaxEmerge 2 7200 dont les rangs étaient espacés de 76 cm. Avant de débiter les traitements, un désherbage hâtif a été réalisé dans les haricots avec la houe rotative Yetter le 18 juin 2021 et le 27 juin 2022 à 10 km/h au stade cotylédons (feuilles unifoliées sorties, mais non déployées) à 1^{ère} paire de feuilles dans toutes les parcelles. Par la suite, il y a eu quatre traitements de désherbage avec les équipements et les outils en évaluation (tableau H1).

Pour réduire la pression des mauvaises herbes, un désherbage manuel a été réalisé dans l'ensemble des parcelles expérimentales le 13 juillet 2021 et le 22 juillet 2022.

L'efficacité des traitements a été évaluée dans un quadrat de 10 cm x 25 cm placé aléatoirement sur un rang (un des deux rangs du milieu) et un autre de 66 cm x 25 cm installé dans l'entre-rang. La position des quadrats était fixe et délimitée par des drapeaux. Le dénombrement de mauvaises herbes par espèce avec leurs stades a été noté dans les deux quadrats, avant et après le passage des outils de désherbage.

Tableau H1. Description des traitements de désherbage dans les haricots verts en 2021 et 2022.

TRAITEMENTS	ZONE DÉSHÉRBÉE	HERSE ÉTRILLE		DOIGTS DE BINAGE				
		22 JUIN 2021 2 feuilles unifoliées	4 JUILLET 2022 1 ^{ière} feuille unifoliée	30 JUIN 2021 1 ^{ière} feuille trifoliée	7 JUILLET 2022 1 ^{ière} feuille trifoliée	12 JUILLET 2021 3 feuilles trifoliées	13 JUILLET 2022 1 à 2 feuilles trifoliées	27 JUILLET 2021 Floraison
HOUE	rang	Herse étrille Terrateck		Doigts de binage + préci-disques Terrateck				
	entre-rang			Lame en T de 30 cm (2 ^e passage) Terrateck				
ROBOT	rang	Herse étrille haute Naïo (2 rangées de 3 tiges)		Doigts de binage de 25 cm K.U.L.T.				
	entre-rang	2 herses étrilles basses Naïo (9 tiges)		3 socs à patte d'oie Naïo	1 ^{er} : 3 socs à pattes d'oie 2 ^e : 2 dents droites + 1 pentadent Naïo	3 socs à patte d'oie Naïo	3 socs à patte d'oie Naïo (2 passages)	
TRACTEUR	rang	Herse étrille Hatzenbichler		Doigts de binage de 29 cm K.U.L.T.				
	entre-rang			Lames à angle + socs patte d'oie K.U.L.T.				
TÉMOIN MANUEL	rang	Sarcloir oscillant		Sarcloir oscillant				
	entre-rang							

La récolte du haricot a été réalisée le 12 août 2021 et le 16 août 2022 sur 4 m linéaires (2 x 2 m) sur les deux rangs du centre de la parcelle en laissant un rang de garde de chaque côté et au moins 1 m à chaque extrémité de la parcelle. Le peuplement des plants de haricot a été évalué dans ces zones de rendement et toutes les gousses ont été retirées, comptées, classées et pesées selon qu'elles étaient commercialisables ou non commercialisables (immature : diamètre plus petit que 4,7 mm, dommage d'insectes, pourriture, vide et présence de rouille).

Oignon espagnol. Le type de sol du site était une argile limoneuse humifère Laplaine (pH : 6,6; P : 38 kg/ha; K : 402 kg/ha; 11,8 % de matière organique en 2021, pH : 6,7; P : 98 kg/ha; K : 577 kg/ha; 13 % de matière organique en 2022). Le sol a été fertilisé le 18 mai 2021 et le 24 mai 2022 avec respectivement 1 463 et 2750 kg/ha d'Acti-Sol (4,7-1,4-2,3) incorporé le jour même à l'aide d'un cultivateur Will-Rich. Les oignons espagnols, cv. Delgado NT, ont été transplantés le 18 mai 2021 et le 24 mai 2022 au taux de 60 000 oignons/ha (6 plants/m) à une profondeur de 3,8 cm à l'aide du transplanteur à godets dont les rangs étaient espacés de 61 cm. La houe rotative Yetter a été passée dans les oignons le 26 mai 2021 au stade 2-3 feuilles et le 1^{er} juin 2022 au stade 3 à 4 feuilles, à 10 km/h dans toutes les parcelles avant le début des quatre traitements de sarclage. Les dates et les outils de désherbage sont décrits au tableau O1. Pour éviter un enherbement trop important des

parcelles, une remise à zéro des mauvaises herbes a été réalisée manuellement le 25 juin et le 18 août 2021, de même que le 29 juin et le 10 août 2022. L'efficacité des traitements a été évaluée dans deux quadrats permanents délimités par des drapeaux : un quadrat de 10 cm x 25 cm placé aléatoirement sur un rang (un des deux rangs du milieu) et un autre de 51 cm x 25 cm dans l'entre-rang. Un dénombrement de mauvaises herbes par espèce et leurs stades ont été notés dans ces quadrats avant et après chaque passage des outils de désherbage.

La récolte des oignons espagnols a été réalisée sur 6 m linéaires (2 x 3 m) sur les deux rangs du centre de la parcelle en laissant un rang de garde de chaque côté et au moins 1 m à chaque extrémité de la parcelle. Les oignons ont été déterrés le 16 septembre 2021 et le 21 septembre 2022, lorsque la majorité des feuilles étaient pliées et jaunissantes, puis laissés à sécher au champ. Le 21 septembre 2021 et le 26 septembre 2022, les oignons de chaque traitement ont été transportés au séchoir et ventilés à 25°C jusqu'au 15 octobre 2021 et au 13 octobre 2022. Le nombre d'oignons commercialisables et non commercialisables a été noté. La hauteur, le diamètre et le poids de chaque oignon ont été mesurés. Les oignons étaient déclassés lorsqu'il y avait présence de pourriture, dommage d'insectes sur plus de 10 % de la surface et fente de plus de 1/3 de l'oignon.

Tableau O1. Description des traitements de désherbage dans les oignons espagnols en 2021 et 2022.

TRAITEMENTS	ZONE DÉSHERBÉE	TIGES À RESSORT				DOIGTS DE BINAGE		RENCHAUSSAGE	
		1 ^{er} JUIN 2021 3 feuilles	6 JUIN 2022 4 à 5 feuilles	10 JUIN 2021 4 feuilles	14 JUIN 2022 4 à 5 feuilles	17 JUIN 2021 5 feuilles	22 JUIN 2022 4 à 5 feuilles	2 JUILLET 2021 7-8 feuilles	11 JUILLET 2022 8-9 feuilles
HOUE	rang	2 tiges à ressort + 2 lames en L Terrateck				Doigts de binage + 2 lames en L Terrateck		Soc butteur de 20 cm Terrateck (chaque côté du rang)	
	entre-rang	Lame en T de 30 cm Terrateck (2 ^e passage)				Lame en T de 30 cm Terrateck (2 ^e passage)		Lame en T de 30 cm Terrateck (2 ^e passage)	
ROBOT	rang	2 tiges à ressort Naïo + 2 lames lelièvre K.U.L.T.	Tiges à ressort fixé à un soc plat	2 tiges à ressort Naïo + 2 lames lelièvre K.U.L.T.	Tiges à ressort fixé à un soc plat	Doigts de binage de 25 cm K.U.L.T.		2 brosses de buttage + 2 dents droites à l'avant Naïo	
	entre-rang	2 socs à pattes d'oie Naïo	Tiges à ressort fixé à un soc plat	2 socs à pattes d'oie Naïo	Tiges à ressort fixé à un soc plat	2 socs à pattes d'oie Naïo		1 soc à patte d'oie Naïo	
TRACTEUR	rang	Tiges à ressort K.U.L.T.				Doigts de binage de 25 cm K.U.L.T.		Disques de 25 cm K.U.L.T.	
	entre-rang	Lames à angle + socs à patte d'oie K.U.L.T.				Lames à angle + socs à patte d'oie K.U.L.T.		Lames à angle + socs à patte d'oie K.U.L.T.	
TÉMOIN MANUEL	rang	Sarcloir oscillant				Sarcloir oscillant		Binette pour renchausser	
	entre-rang								

Approche statistique

Des modèles linéaires généralisés mixtes (GLMM) ont été employés pour comparer les variables entre les différents traitements. 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 (Akaike, 1974). Un

effet du traitement a été considéré important lorsque le AIC du modèle avec traitement était plus petit que celui du modèle nul ($\Delta AIC > 2AIC$). 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 : Le peuplement, et les rendements commercialisables et non-commercialisables ont été modélisés avec des distributions gaussiennes. Le peuplement n'a pas été évalué dans l'oignon espagnol.

Efficacité du désherbage : L'efficacité du désherbage a été calculée comme la différence entre la quantité de mauvaises herbes avant et après le désherbage (nb de mauvaises herbes AVANT – nombre de mauvaises herbes APRÈS) / nombre de mauvaises herbes AVANT), et a été évaluée sur le rang et sur l'entre-rang. Une distribution binomiale a été utilisée pour pouvoir prendre en compte le nombre de mauvaises herbes avant le traitement. Parce qu'il y avait des efficacités à 100%, les intervalles de confiances ne pouvaient pas être estimés par des méthodes classiques (fréquentistes). On a donc estimé les paramètres du modèle avec une approche bayésienne. Afin de vérifier la validité des modèles, divers indices de convergence ont été inspectés (itérations divergentes, distribution des paramètres, consistance entre les chaînes, nombre effectif d'itération). Pour déterminer s'il y a des différences entre traitements, le modèle statistique avec l'effet traitement a été comparé à un modèle sans l'effet traitement, à l'aide du critère d'information WAIC (Watanabe 2010), qui est utilisé de la même façon que le AIC (décrit ci-dessus). S'il y avait un effet du traitement, les différences entre traitements ont été estimées à l'aide des distributions à posteriori, en utilisant le rapport des chances (*odds ratio* (OR)). On considère une différence « significative » si l'intervalle de confiance du OR exclut la valeur de 1 (pas de différence).

Temps de désherbage

Les temps de désherbage ont été modélisés avec une distribution Gamma.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Rendement Il n'y a pas de différences significatives pour le rendement dans le haricot vert et l'oignon espagnol selon le traitement, c'est-à-dire le type de porte-outil testé. Cependant, il y avait des différences significatives entre les années d'expérimentation. Pour le maïs sucré, les rendements commercialisables étaient plus élevés lorsque le désherbage était fait manuellement, par rapport à un désherbage à la houe maraîchère et avec le tracteur Mazzoti. Les rendements non commercialisables étaient aussi plus faibles dans le traitement témoin désherbé manuellement, par rapport à tous les autres traitements.

Tableau 1 : Résultats des tests statistiques pour les variables de rendement dans les trois cultures, en fonction du traitement et de l'année d'expérimentation. NS = différences non-significatives avec une valeur de $p \geq 0,05$

		Maïs sucré	Haricot vert	Oignon espagnol
Peuplement	Traitement	NS	NS	ND*
	Année	0,0103	$p=0,0065$	ND
Rendement commercialisable	Traitement	TM > Houe, $p=0,0054$ TM > Tracteur, $p=0,0022$	NS	NS
	Année	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$
Rendement non-commercialisable	Traitement	TM < Houe, $p = 0,0293$ TM < Oz, $p = 0,0052$ TM < Tracteur, $p=0,0009$	NS	NS
	Année	$p < 0,0001$	$p < 0,0001$	$p=0,0351$

*Le peuplement n'est pas évalué dans l'oignon espagnol

Maïs sucré :

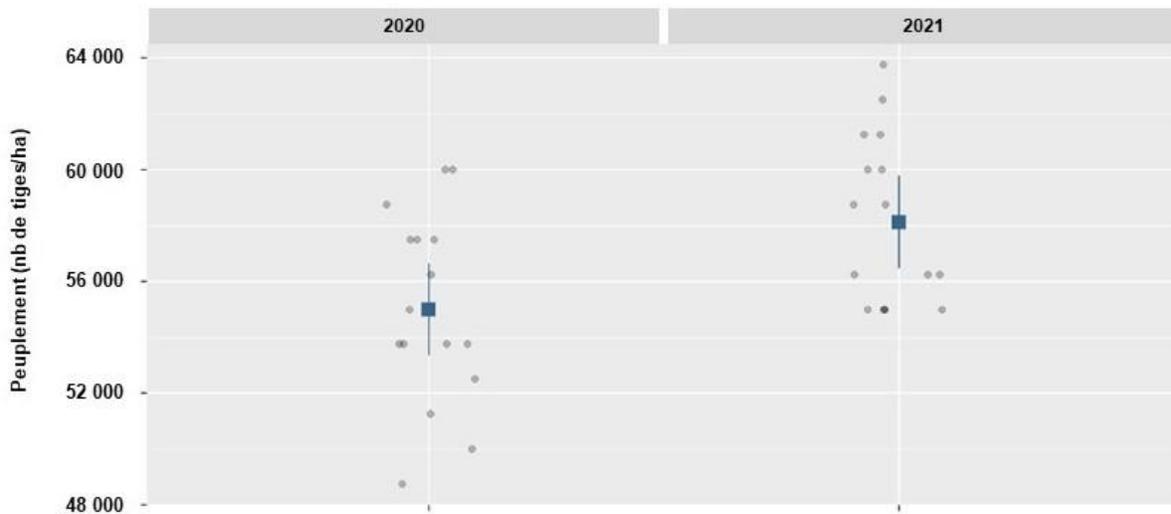


Figure 1 : Peuplement dans le maïs sucré en 2020 et 2021

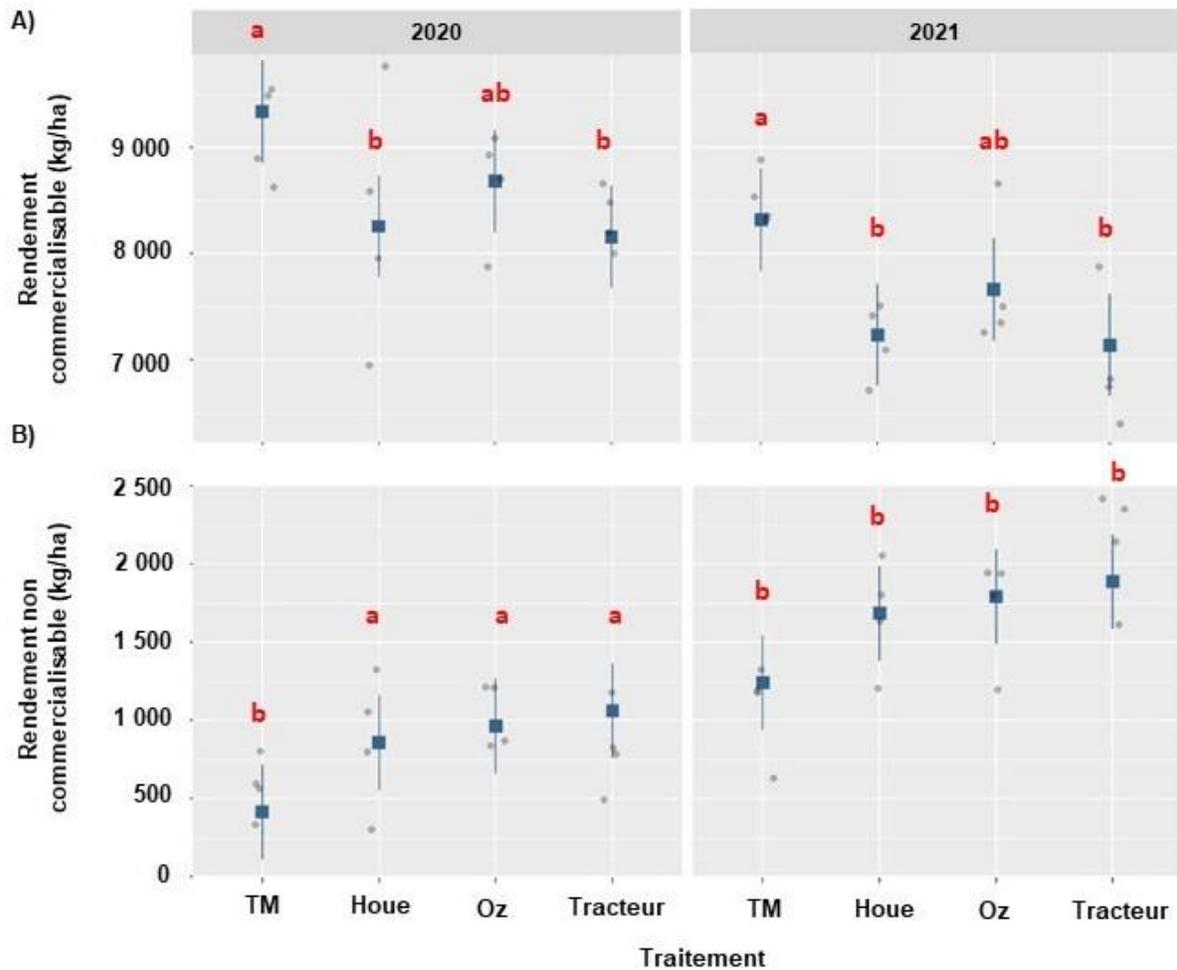


Figure 2 : **A)** Rendements commercialisables et **B)** non commercialisables dans le maïs sucré en 2020 et 2021, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarclor oscillant, Houe) désherbé avec la houe maraichère Terratek, Oz) désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur) désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$, entre les différents porte-outils pour chacun des désherbages.

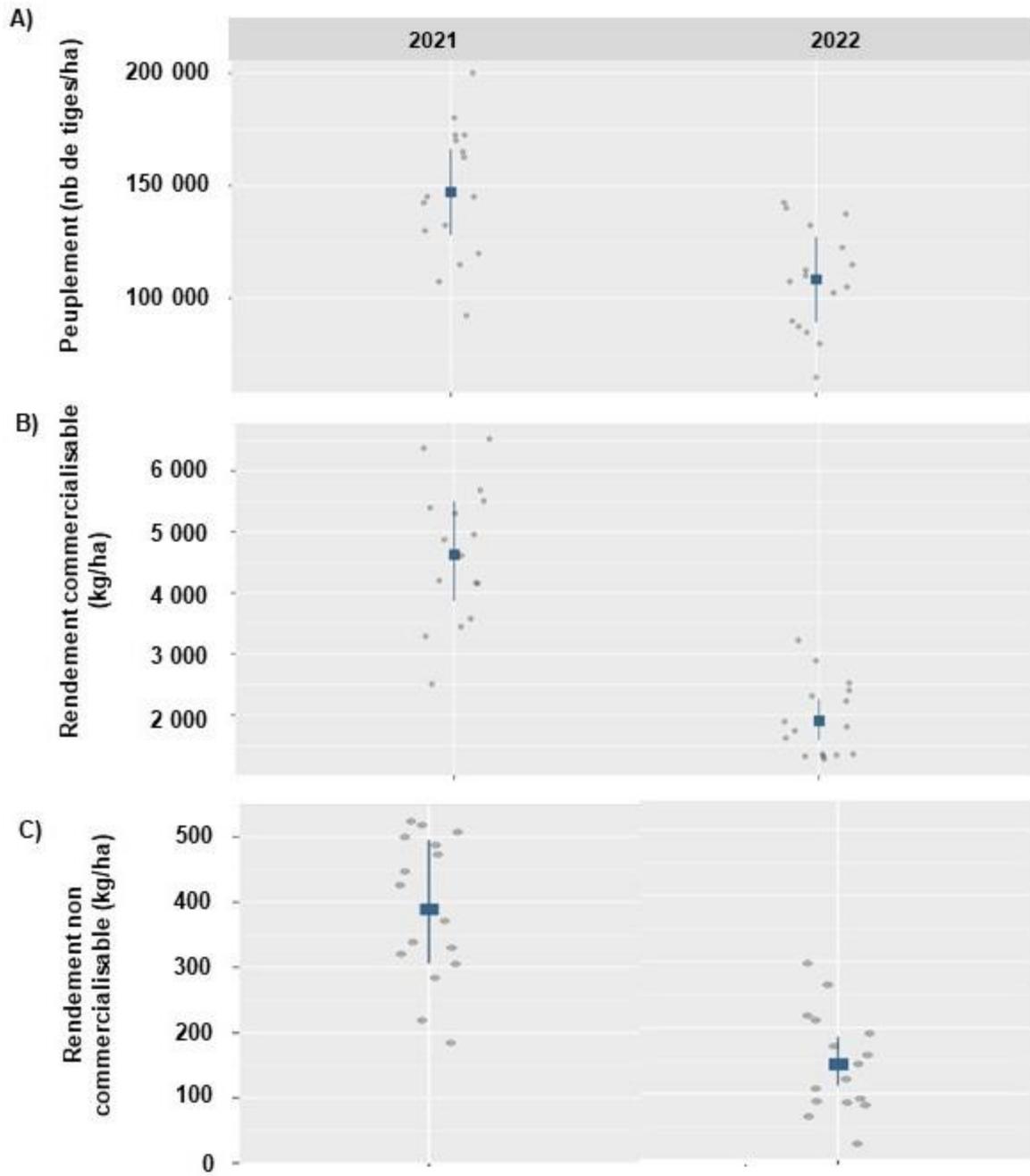


Figure 3 : **A)** Peuplement **B)** Rendement commercialisable et **C)** Rendement non-commercialisable dans le haricot vert en 2021 et 2022

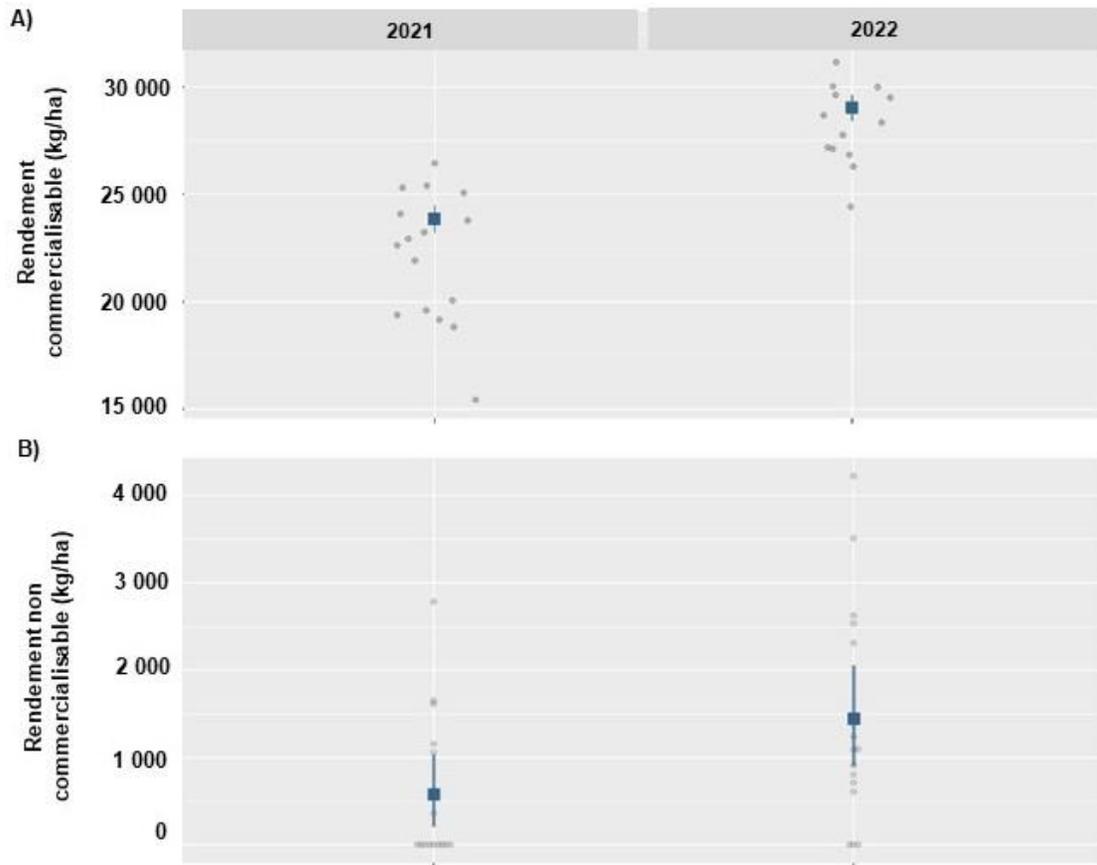


Figure 4 : **A)** Rendement commercialisable et **B)** non-commercialisable pour l'oignon espagnol en 2021 et 2022

Efficacité du désherbage

Maïs sucré Pour le désherbage sur le rang, le renchaussage était la technique la plus efficace pour le contrôle des mauvaises herbes, par rapport à la herse étrille et aux doigts de binage, peu importe le porte-outil employé. Le désherbage manuel était plus efficace que tous les porte-outils. L'efficacité du désherbage avec Oz et le tracteur Mazzotti étaient relativement semblables, quoique Oz fut légèrement moins efficace. Ces deux porte-outils ont tout de même fait un meilleur désherbage que ceux avec la houe maraîchère.

Pour le désherbage dans l'entre-rang, il y avait une interaction entre le type de désherbage et le porte-outil. Pour le premier désherbage avec la herse étrille, le désherbage manuel était plus efficace que tous les autres traitements. La houe maraîchère a moins bien performé que le robot Oz et le tracteur. Pour le second désherbage, le robot Oz a été moins efficace que le désherbage manuel et le désherbage avec la houe maraîchère, quoiqu'équivalent au désherbage avec le tracteur Mazzotti. Au niveau du renchaussage, tous les traitements ont été plus efficaces que le robot Oz.

Pour tous les porte-outils, le 1^{er} désherbage avec la herse étrille a été moins efficace que les deux autres. Pour la houe maraîchère et le tracteur Mazzoti, le 3^e désherbage a été le plus efficace.

Tableau 2 : Résultats des tests statistiques pour l'efficacité du désherbage dans le maïs sucré, en fonction du porte-outil et du type de désherbage, pour les deux années d'expérimentation

Rang	Type de désherbage *Porte-outil	Type de désherbage	Porte-outil
	NS	Renchaussage > autres Herse étrille ≈ Doigts de binage	TM > autres Houe < Oz et Tracteur Oz ≤ Tracteur
Entre-rang	Type de désherbage *Porte-outil	Efficacité des porte-outils par type de désherbage	Efficacité des désherbages pour chacun des porte-outils
	AIC _{full} ≈490; ΔAIC>90 *	1^{er} désherbage : pleine surface avec la herse étrille TM > autres Houe < Oz et tracteur 2^e désherbage : sarclage de l'entre-rang Houe > Oz et tracteur TM > Oz TM ≥ tracteur 3^e désherbage : sarclage de l'entre-rang Oz < autres	Houe maraîchère: 3 ^e désherbage > autres 1 ^{er} désherbage < 2 ^e désherbage Robot Oz : 1 ^{er} désherbage < autres Tracteur Mazzoti 1 ^{er} désherbage < autres 3 ^e désherbage > autres

*Il y a une interaction entre le traitement et l'outil puisque le modèle complet (.full) a un AIC beaucoup plus bas que tous les autres modèles

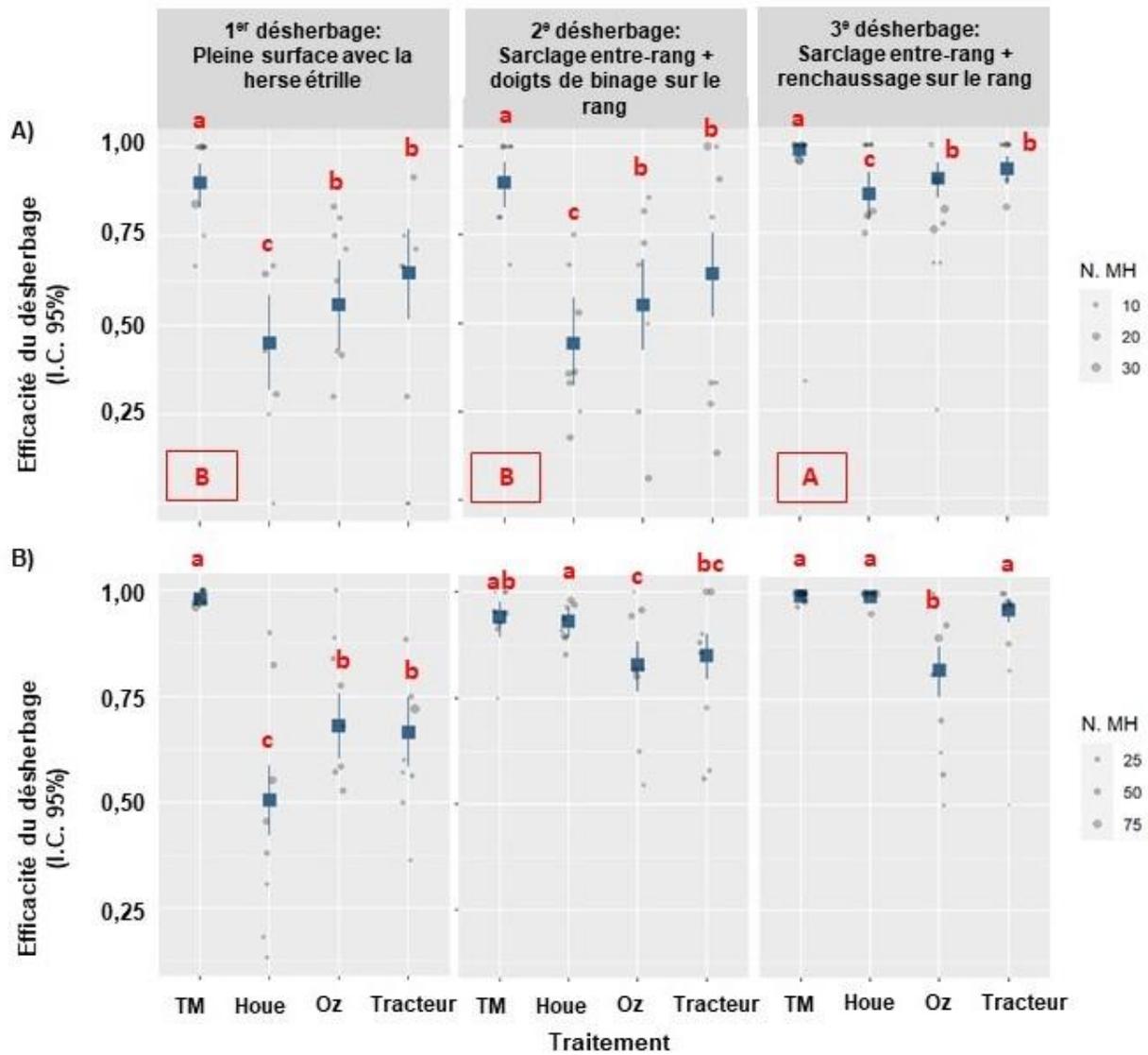


Figure 5 : Efficacité du désherbage **A)** sur le rang et **B)** dans l'entre-rang, dans le maïs sucré en 2020 et 2021, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarcloir oscillant, Houe = désherbé avec la houe maraîchère Terratek, Oz = désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur = désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T, pour un 1^{er} désherbage pleine surface avec la herse étrille, un 2^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des doigts de binage pour un désherbage sur le rang et un 3^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné à un renchaussage pour un désherbage sur le rang. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les désherbages. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les différents porte-outils pour chacun des désherbages.

Haricot vert Pour le désherbage sur le rang, le désherbage de pleine surface avec la herse étrille et le désherbage avec les doigts de binage avait une efficacité équivalente. Le désherbage manuel et le désherbage avec le tracteur Mazzoti ont été plus efficaces que les deux autres porte-outils pour tous les types de désherbage.

Pour le désherbage de l'entre-rang, le sarclage a été plus efficace que le désherbage pleine surface avec la herse étrille, pour tous les porte-outils testés. Lors du désherbage de pleine surface avec la herse étrille, le désherbage manuel et celui avec le tracteur Mazzoti ont été plus efficace que le désherbage avec les deux autres porte-outils. Lors des autres désherbages correspondant à un sarclage de l'entre-rang, le désherbage manuel et la houe maraîchère ont démontré une plus grande efficacité que le robot Oz et le tracteur Mazzoti. Entre ces deux derniers porte-outils, le robot Oz était le moins efficace.

Tableau 3 : Résultats des tests statistiques pour l'efficacité du désherbage dans le haricot vert, en fonction du porte-outil et du type de désherbage, pour les deux années d'expérimentation

Rang	Type de désherbage *Porte-outil	Type de désherbage	Porte-outil
	NS	NS	TM > Houe et Oz Tracteur > Houe et Oz
Entre-rang	Type de désherbage *Porte-outil	Efficacité des porte-outils par type de désherbage	Efficacité des désherbages pour chacun des porte-outils
	AIC _{full} ≈416; ΔAIC>20 *	1^{er} désherbage : pleine surface avec la herse étrille TM > autres Tracteur > Houe et Oz Autres désherbages: sarclage de l'entre-rang TM > Oz et tracteur Houe > Oz et tracteur Oz < tracteur	Houe maraîchère, robot Oz et Tracteur Mazzoti : 1 ^{er} désherbage < 2 ^e désherbage

*Il y a une interaction entre le traitement et l'outil puisque le modèle complet (.full) a un AIC beaucoup plus bas que tous les autres modèles

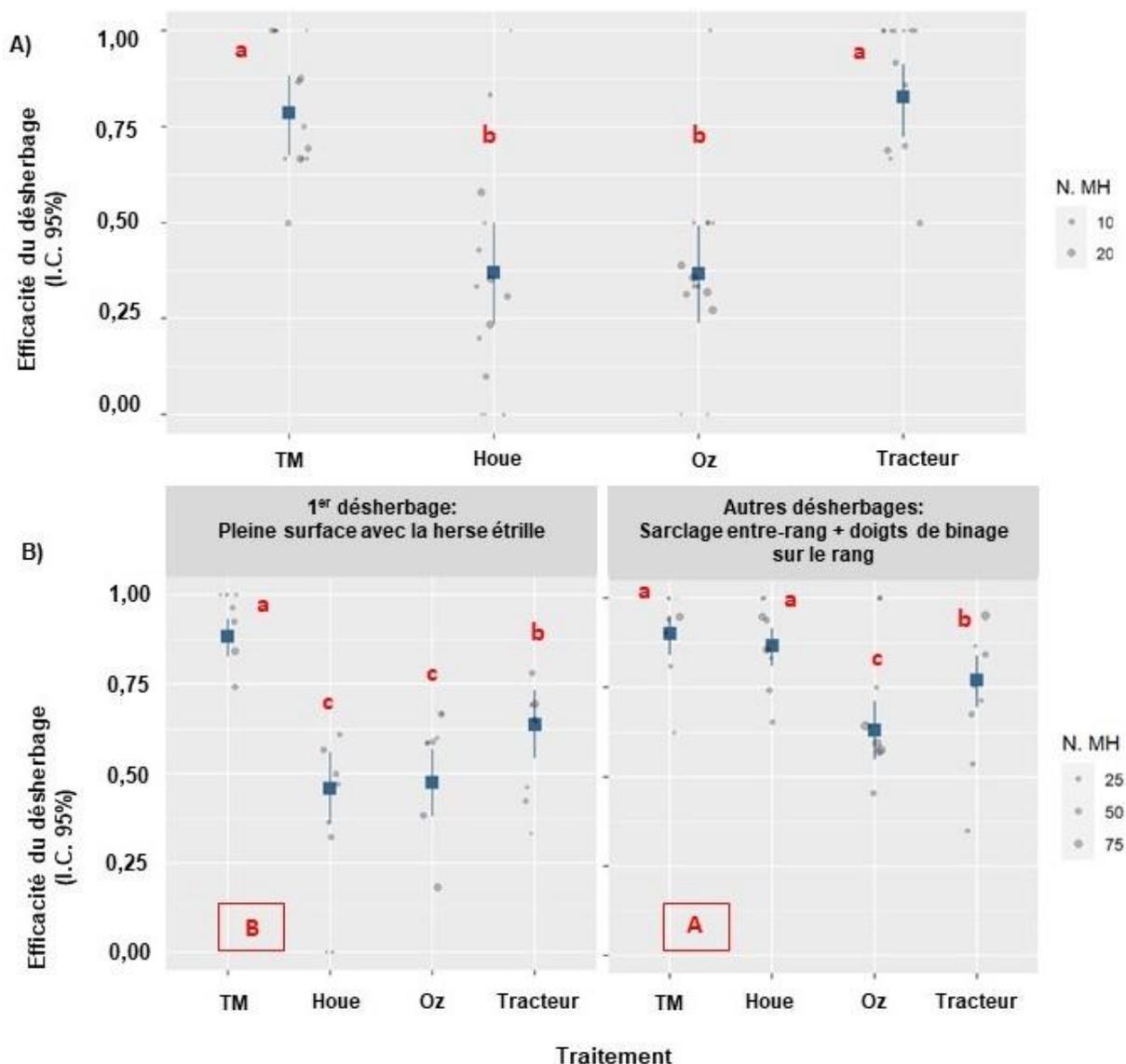


Figure 6 : Efficacité du désherbage **A)** sur le rang et **B)** dans l'entre-rang, dans le haricot vert en 2021 et 2022, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarcloir oscillant, Houe = désherbé avec la houe maraîchère Terratek, Oz = désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur = désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T, pour un 1^{er} désherbage pleine surface avec la herse étrille et les désherbages suivants correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des doigts de binage pour un désherbage sur le rang . Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les désherbages. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les différents porte-outils pour chacun des désherbages.

Oignon espagnol Pour le désherbage sur le rang, le renchaussage était la technique la plus efficace pour le contrôle des mauvaises herbes, par rapport à la herse étrille et aux doigts de binage, peu importe le porte-outil employé. Il s'agit du même résultat que dans la culture de maïs sucré. Pour les autres désherbages sur le rang, soit avec les tiges à ressort ou avec les doigts de binage, le désherbage manuel était le plus efficace. Le robot Oz a moins bien

performé que tous les autres porte-outils lors de l'utilisation des doigts de binage. La faible vitesse d'avancement du robot Oz, de 1,8 km/h peut expliquer sa faible efficacité avec les doigts de binage. En effet, à basse vitesse ces outils avaient tendance à s'enfoncer trop profondément dans le sol et à déséquilibrer le robot.

Pour le désherbage de l'entre-rang, le désherbage manuel a été plus efficace que tous les autres pour le 1er désherbage, suivi par le robot Oz, le tracteur Mazzoti, puis la houe maraîchère. Pour les désherbages plus tardifs, le robot Oz a moins bien performé que les autres porte-outils.

Tableau 4 : Résultats des tests statistiques pour l'efficacité du désherbage pour l'oignon espagnol, en fonction du porte-outil et du type de désherbage, pour les deux années d'expérimentation

Rang	Type de désherbage *Porte-outil	Efficacité des porte-outils par type de désherbage	Efficacité des désherbages pour chacun des porte-outils
	AIC _{full} ≈ 195; ΔAIC > 16 *	1^{er} désherbage : tiges à ressort sur le rang TM > autres 2^e désherbage : Doigts de binage sur le rang TM > autres Tracteur > Oz Tracteur ≥ Houe	Houe maraîchère: 3 ^e désherbage avec renchaussage sur le rang > autres Robot Oz : 3 ^e désherbage avec renchaussage sur le rang > autres Tracteur Mazzoti: 3 ^e désherbage avec renchaussage sur le rang > autres 2 ^e désherbage avec Doigts de binage sur le rang > 1 ^{er} désherbage : tiges à ressort sur le rang
Entre-rang	Type de désherbage *Porte-outil	Efficacité des porte-outils par type de désherbage	Efficacité des désherbages pour chacun des porte-outils
	AIC _{full} ≈ 380; ΔAIC > 79 *	1^{er} désherbage : sarclage de l'entre-rang TM > autres Oz > tracteur et houe Houe < tracteur 2^e désherbage : sarclage de l'entre-rang TM > Oz et tracteur Houe > Oz 3^e désherbage : sarclage de l'entre-rang Oz < autres	Houe maraîchère: 3 ^e désherbage > autres 2 ^e désherbage > 1 ^{er} désherbage Robot Oz : 1 ^{er} désherbage > autres Tracteur : 3 ^e désherbage > autres

*Il y a une interaction entre le traitement et l'outil puisque le modèle complet (.full) a un AIC beaucoup plus bas que tous les autres modèles

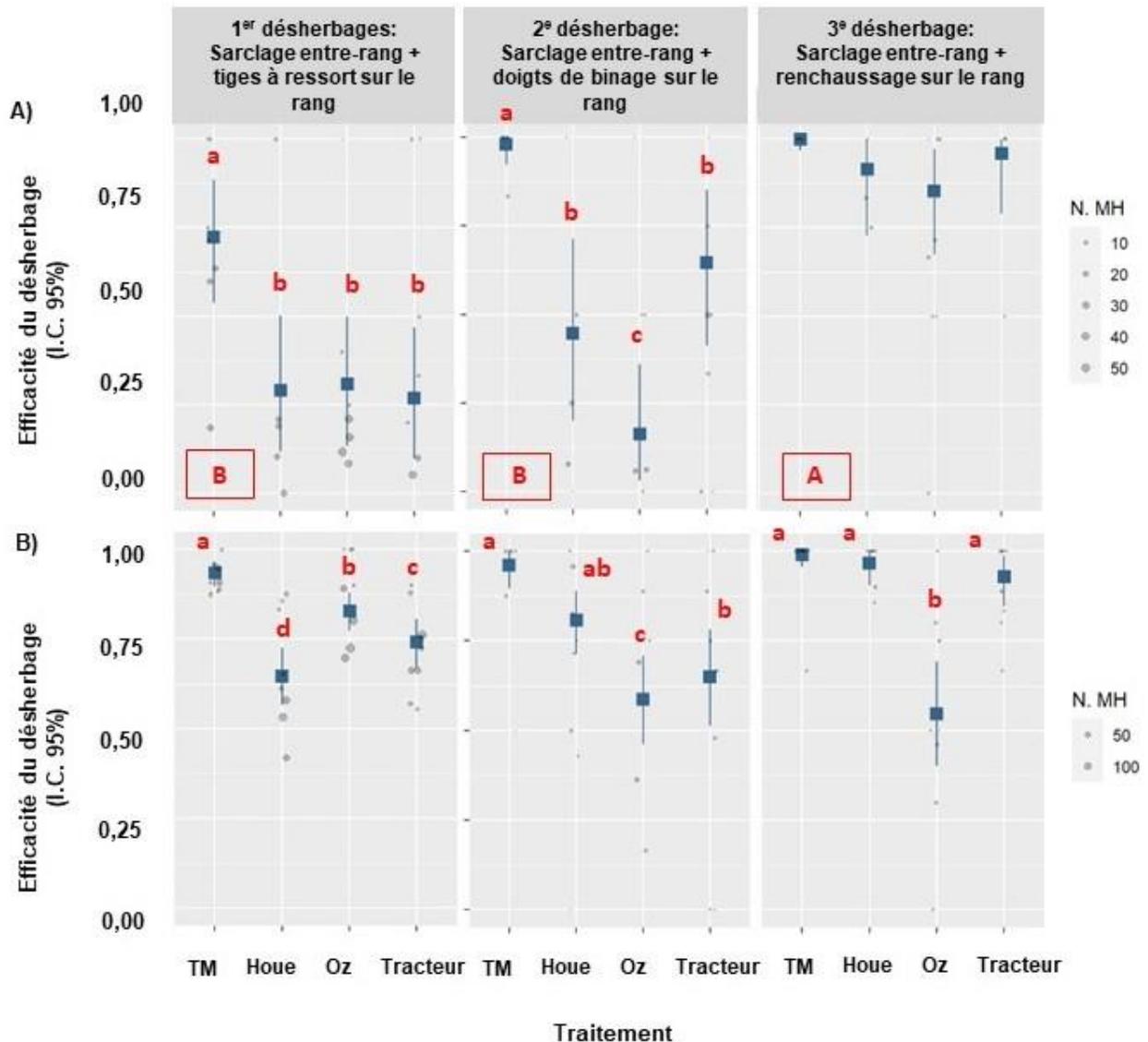


Figure 7 : Efficacité du désherbage **A)** sur le rang et **B)** dans l'entre-rang, dans l'oignon espagnol en 2021 et 2022, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarcloir oscillant, Houe = désherbé avec la houe maraîchère Terratek, Oz = désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur = désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T, pour les 1^{ers} désherbages correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des tiges à ressort, le 2^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des doigts de binage pour un désherbage sur le rang et le 3^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné à un renchaussage pour un désherbage sur le rang. Les lettres majuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les désherbages. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les différents porte-outils pour chacun des désherbages.

Temps et coûts du désherbage

Maïs sucré et haricot vert Pour tous les désherbages, le temps a été plus élevé pour le désherbage manuel, suivi par le robot Oz, puis la houe maraîchère, puis le tracteur Mazzoti. Pour l'**oignon espagnol**, le désherbage manuel a exigé plus de temps, suivi par le robot et la houe, puis par le tracteur. Les coûts de désherbage ont suivi la même tendance (voir les détails dans le tableau 5 ci-dessous).

Il est à noter que le temps de désherbage pour le robot Oz correspond au temps de désherbage effectué par le robot. Les coûts en ressources humaines pourraient être moindres puisqu'il s'agit d'un robot autonome et qu'il ne doit pas y avoir une ressource humaine en tout temps avec le robot pendant l'opération de désherbage. Malgré cela, du temps de travail doit être compté pour une ressource humaine pour vérifier la carte du robot, surtout lors du premier désherbage, pour le conduire du garage au champ et pour superviser un minimum les opérations de désherbage, surtout en cas d'arrêt dû à un mauvais signal GPS.

Finalement, les coûts en essence, l'usure, l'amortissement lié à l'achat de la machinerie ou encore les charges sociales n'ont pas été pris en compte dans cette étude.

Tableau 5 : Résumé des temps et coûts de désherbage pour chacun des porte-outils testés, ainsi que du désherbage manuel, dans les trois cultures à l'étude (moyenne et écart-type pour les deux années d'expérimentation)

Culture	Porte-outil	Temps / hectare	Coûts (CAD)* / hectare
Oignon espagnol	Désherbage manuel	106 heures (\pm 38)	2656 \$ (\pm 951)
	Robot Oz	38 heures (\pm 2)	945 \$ (\pm 51)
	Houe maraîchère Terratek	22 heures (\pm 11)	543 \$ (\pm 274)
	Tracteur Mazzoti	1 heure (37 minutes)	35 \$ (\pm 15)
Haricot vert	Désherbage manuel	92 heures (\pm 18)	2302 \$ (\pm 450)
	Robot Oz	36 heures (\pm 11)	888 \$ (\pm 286)
	Houe maraîchère Terratek	16 heures (\pm 10)	401 \$ (\pm 239)
	Tracteur Mazzoti	36 minutes (\pm 12)	15 \$ (\pm 5)
Maïs sucré	Désherbage manuel	71 heures (\pm 14)	1771 \$ (\pm 361)
	Robot Oz	32 heures (\pm 7)	809 \$ (\pm 250)
	Houe maraîchère Terratek	15 heures (\pm 10)	380 \$ (\pm 169)
	Tracteur Mazzoti	58 minutes (\pm 14)	22\$ (\pm 8)

*Un taux horaire de 25\$ / h a été considéré dans ce calcul.

Tableau 6 : Résultats des tests statistiques pour le temps de désherbage dans le maïs sucré, en fonction du porte-outil et du type de désherbage, pour les deux années d'expérimentation. Différences significatives si la valeur de $p > 0,05$.

Type de désherbage *Porte-outil	Temps de désherbage par type de désherbage pour les différents porte-outils	Temps de désherbage pour chacun des porte-outils
AIC _{full} ≈ 393; ΔAIC > 65 *	<p>1^{er} désherbage : pleine surface avec la herse étrille TM > autres, $p < 0,0001$ Tracteur < autres, $p < 0,0001$ Houe < Oz, $p < 0,0001$</p> <p>2^e désherbage : sarclage de l'entre-rang combiné avec doigts de binage TM > autres, $p < 0,0001$ Tracteur < autres, $p < 0,0001$ Houe < Oz, $p < 0,0001$</p> <p>3^e désherbage : sarclage de l'entre-rang combiné avec le renchaussage TM > autres, $p < 0,0001$ Tracteur < autres, $p < 0,0001$ Houe < Oz, $p = 0,0002$</p>	<p>Témoin manuel : Pas de différence Houe maraîchère: 3^e désherbage > autres 1^{er} désherbage < 2^e désherbage Robot Oz : 3^e désherbage > autres Tracteur Mazzoti 3^e désherbage > autres 1^{er} désherbage < 2^e désherbage</p>
Année	$p < 0,0001$	

*Il y a une interaction entre le traitement et l'outil puisque le modèle complet (.full) a un AIC beaucoup plus bas que tous les autres modèles

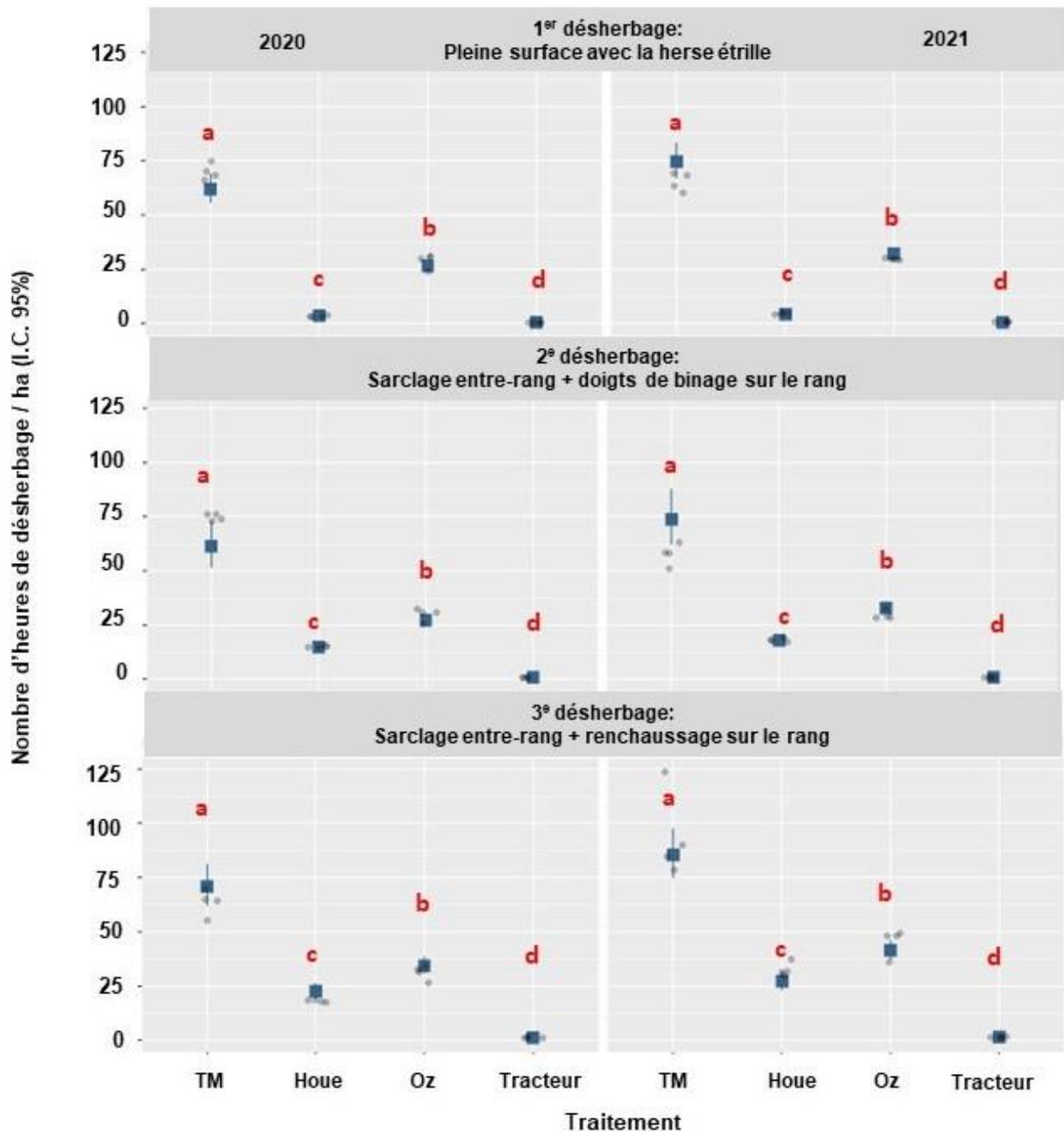


Figure 8 : Temps de désherbage dans le maïs sucré en 2020 et 2021, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarcloir oscillant, Houe = désherbé avec la houe maraîchère Terratek, Oz = désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur = désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T, pour un 1^{er} désherbage pleine surface avec la herse étrille, un 2^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des doigts de binage pour un désherbage sur le rang et un 3^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné à un renchaussage pour un désherbage sur le rang. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les différents porte-outils pour chacun des dés herbages.

Tableau 7 : Résultats des tests statistiques pour le temps de désherbage dans le haricot vert, en fonction du porte-outil et du type de désherbage, pour les deux années d'expérimentation. Différences significatives si la valeur de $p > 0,05$.

Type de désherbage *Porte-outil	Temps de désherbage par type de désherbage pour les différents porte-outils	Temps de désherbage pour chacun des porte-outils
AIC _{full} ≈573; ΔAIC>46 *	1^{er} désherbage : pleine surface avec la herse étrille TM > autres, $p < 0,0001$ Tracteur < autres, $p < 0,0001$ Houe < Oz, $p < 0,0001$ 2^e désherbage : sarclage de l'entre-rang combiné avec doigts de binage TM > autres, $p < 0,0001$ Tracteur < autres, $p < 0,0001$ Houe < Oz, $p < 0,0001$	Témoin manuel : Pas de différence Houe maraîchère: 1 ^{er} désherbage < 2 ^e désherbage Robot Oz : 1 ^{er} désherbage < 2 ^e désherbage Tracteur Mazzoti Pas de différence
Année	$p < 0,0001$	

*Il y a une interaction entre le traitement et l'outil puisque le modèle complet (.full) a un AIC beaucoup plus bas que tous les autres modèles

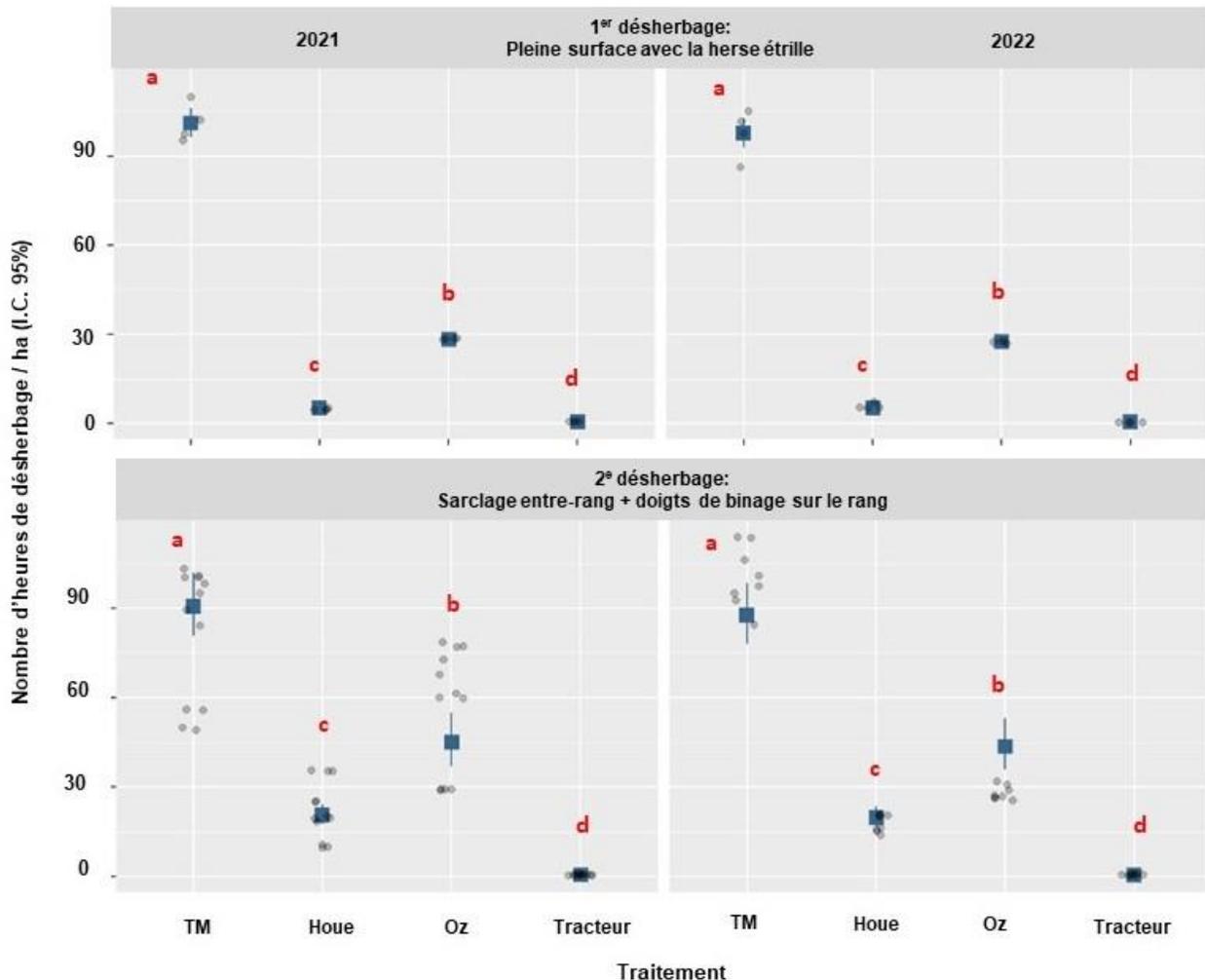


Figure 9 : Temps de désherbage dans le haricot vert en 2021 et 2022, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarcloir oscillant, Houe = désherbé avec la houe maraîchère Terratek, Oz = désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur = désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T, pour un 1^{er} désherbage pleine surface avec la herse étrille et les désherbages suivants correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des doigts de binage pour un désherbage sur le rang. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de $< 0,05$, entre les différents porte-outils pour chacun des désherbages.

Tableau 8 : Résultats des tests statistiques pour le temps de désherbage dans l'oignon espagnol, en fonction du porte-outil et du type de désherbage, pour les deux années d'expérimentation. Différences significatives si la valeur de $p > 0,05$.

Type de désherbage *Porte-outil	Temps de désherbage par type de désherbage pour les différents porte-outils	Temps de désherbage pour chacun des porte-outils
AIC _{full} ≈ 716; ΔAIC > 18 *	<p>1^{er} désherbage : sarclage de l'entre-rang combiné avec des tiges à ressort TM > autres = $< 0,0001$ Tracteur < autres = $< 0,0001$ Houe < Oz = $< 0,0001$</p> <p>2^e désherbage : sarclage de l'entre-rang combiné avec doigts de binage TM > autres = $< 0,0001$ Tracteur < autres = $< 0,0001$ Houe < Oz = $< 0,0001$</p> <p>3^e désherbage : sarclage de l'entre-rang combiné avec le renchaussage TM > autres = $< 0,0001$ Tracteur < autres = $< 0,0001$</p>	<p>Témoin manuel : Pas de différence</p> <p>Houe maraîchère: 3^e désherbage > autres</p> <p>Robot Oz : 1^{er} désherbage > 2^e désherbage</p> <p>Tracteur Mazzoti Pas de différence</p>
Année	$p < 0,0001$	

*Il y a une interaction entre le traitement et l'outil puisque le modèle complet (.full) a un AIC beaucoup plus bas que tous les autres modèles

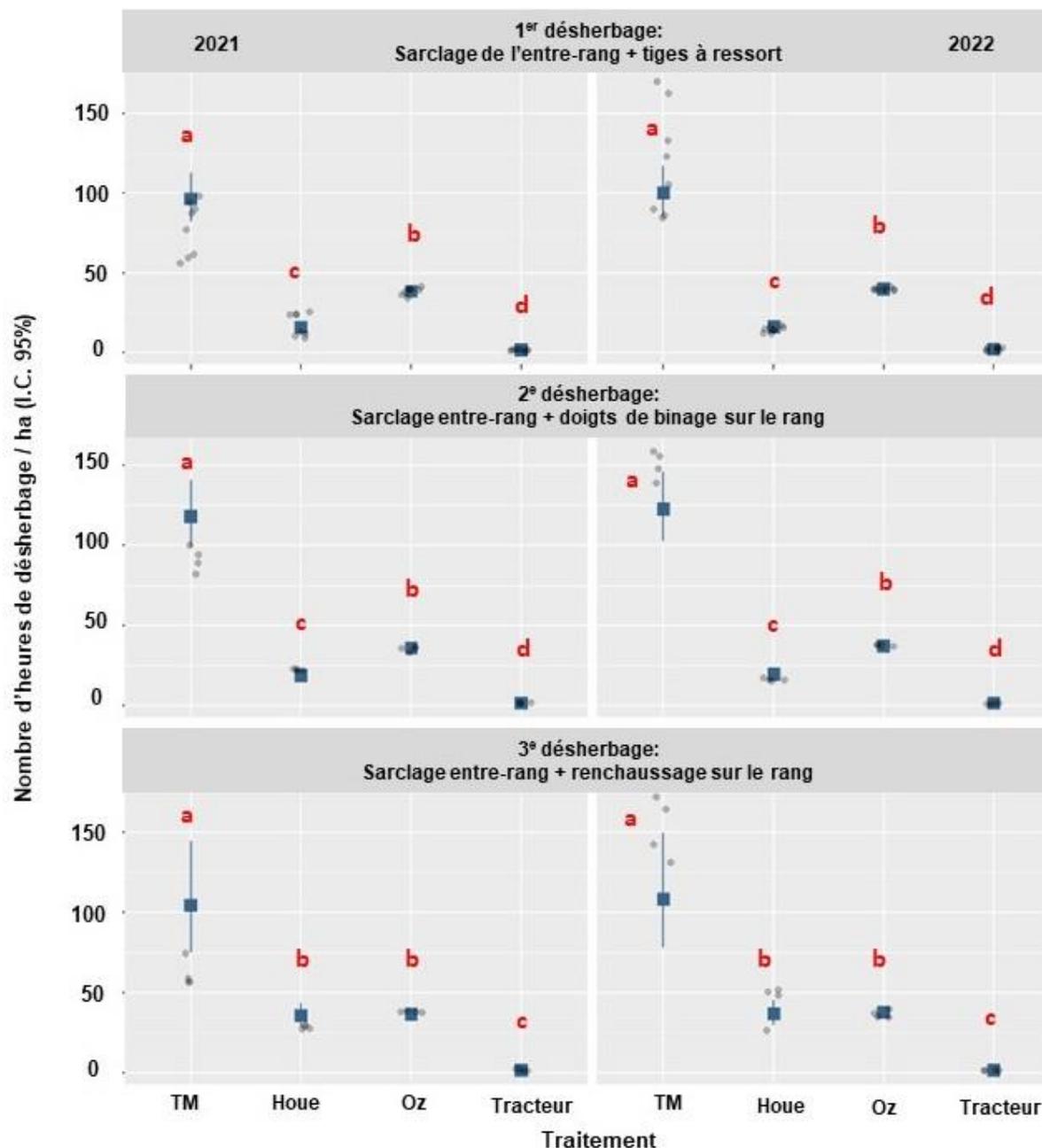


Figure 10 : Temps de désherbage dans l'oignon espagnol en 2021 et 2022, selon les différents traitements : TM = témoin désherbé manuellement à l'aide d'une binette ou d'un sarcloir oscillant, Houe = désherbé avec la houe maraîchère Terratek, Oz = désherbé avec le porte-outil du robot Oz, Tracteur = désherbé avec le tracteur porte-outils Mazzotti et la barre d'outils K.U.L.T, pour les 1^{ers} désherbages correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des tiges à ressort, le 2^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné avec des doigts de binage pour un désherbage sur le rang et le 3^e désherbage correspondant à un sarclage de l'entre-rang combiné à un renchaussage pour un désherbage sur le rang. Les lettres minuscules en rouges représentent les différences statistiques au seuil de < 0,05, entre les différents porte-outils pour chacun des désherbages

DIFFUSION DES RÉSULTATS

Leblanc, M. L. et M. Lefebvre. 2020. Le robot Oz sous la loupe. Conférence-vidéo donnée le 26 novembre 2020 dans le cadre de la réunion annuelle de la Société canadienne de malherbologie (CWSS-Canadian Weed Science Society).

Leblanc, M. L. et M. Lefebvre. 2021. Désherbage du maïs sucré avec le robot Oz. Conférence-vidéo donnée le 15 avril 2021 dans le cadre des Conférences scientifiques en phytoprotection du CRAAQ (maraîcher).

Leblanc, M. et J. Ouellette. 2022. Présentation des parcelles de recherche et démonstration du robot Oz. Journée Portes ouverte de l'IRDA-Horticulture maraîchère, 21 juillet 2022.

Leblanc, M.L. et J. Ouellette. 2022. Évaluation du robot Oz dans le maïs sucré. Fiche synthèse, IRDA. 4 p.

<p>Estimer le nombre d'entreprises touchées par les résultats du projet</p>	<p>Selon les données du recensement de l'agriculture les plus récentes (2021), il y avait 2 226 entreprises de légumes de champ au Québec [1], cultivant plus de 70 espèces de légumes sur une superficie totale de 39 128 hectares [2]. Le maïs sucré, les haricots verts et l'oignon font partie des principaux légumes cultivés, avec, respectivement, 17%, 9% et 6% des superficies totales [2]. En termes d'entreprises au Québec, cela correspondait à 629 entreprises cultivant du maïs sucré, 776 des haricots et 547 des oignons en 2021 [3]. Il est donc possible de dire que les résultats de ce projet touchent la majorité des entreprises de légumes de champ au Québec.</p> <p>[1] Statistique Canada. <u>Tableau 32-10-0154-01 Certaines cultures, données chronologiques du Recensement de l'agriculture</u>. DOI : https://doi.org/10.25318/3210015401-fra</p> <p>[2] Gouvernement du Québec. Cultures des légumes de champs, Culture des légumes de champ Gouvernement du Québec (quebec.ca), page consulté le 26 juillet 2023.</p> <p>[3] Statistique Canada. <u>Tableau 32-10-0355-01 Légumes de champ, Recensement de l'agriculture, 2021</u> DOI : https://doi.org/10.25318/3210035501-fra</p>
---	--

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

En contexte de production, il faut considérer que Oz, pour être maximisé comme achat, peut circuler à plusieurs reprises dans une surface raisonnablement gérable et que la ressource humaine attiré peut fait autre chose en même temps. En passant à répétition, il pourrait retirer les mauvaises herbes précédemment oubliées et garder la culture propre. D'autant plus que le dégagement n'est pas un enjeu puisque le robot passe dans l'entre-rang seulement, donc il est possible de désherber tardivement. Le robot prend aussi deux fois moins de temps et est deux fois moins coûteux que le désherbage manuel. Quoique que beaucoup moins efficace, son coût d'acquisition est moindre que le coût d'acquisition d'un tracteur Mazzoti. Tel que mentionnée plus-haut, les coûts en essence, l'amortissement lié à l'achat de la machinerie ou encore les charges sociales pour les ressources humaines n'ont pas été pris en compte dans cette étude. Chaque entreprise agricole devrait considérer ces facteurs avant de faire l'achat d'un robot Oz, de même que ses besoins, la superficie en culture à désherber, etc. Le robot Oz reste une alternative intéressante pour la production maraîchère.

PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION

Pour des informations supplémentaires :

Élise Smedbol

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

335, Rang des Vingt-Cinq Est

Saint-Bruno-de-Montarville (Québec) J3V 0G7

Téléphone : 450 653-7368, poste 320

Courriel : elise.smedbol@irda.qc.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du volet 3 du programme Prime-Vert.