

**OPTIMISATION DES DATES DE SEMIS POUR LA GESTION INTÉGRÉE DES
DÉGÂTS CAUSÉS PAR LA MOUCHE DES SEMIS, *DELIA PLATURA*, EN
GRANDES CULTURES**

18-067-CEROM

DURÉE DU PROJET : 04-2019 / 02-2022

RAPPORT FINAL

Réalisé par :

Sébastien Boquel, CÉROM

Alexis Latraverse, CÉROM

MARS 2022

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.

OPTIMISATION DES DATES DE SEMIS POUR LA GESTION INTÉGRÉE DES DÉGÂTS CAUSÉS PAR LA MOUCHE DES SEMIS, *DELIA PLATURA*, EN GRANDES CULTURES

18-067-CEROM

RÉSUMÉ DU PROJET

La mouche des semis (MS), *Delia platura* (Meigen) (Diptera : Anthomyiidae), est un ravageur sporadique et imprévisible dans la culture du maïs et du soya qui peut causer la perte totale des plantules sur plusieurs hectares. Une des méthodes de lutte préconisée contre la MS consiste à devancer ou à retarder la date de semis afin de désynchroniser le pic d'activité de la MS et le stade sensible de la culture. Dans cette optique, le CÉROM a développé un modèle d'émergence permettant de prédire la date du pic d'activité printanier de la MS (CERO-1-16-1760). Cependant, comme les producteurs agricoles n'ont pas toujours la possibilité de décaler leur date de semis, ils doivent tout de même avoir recours aux semences traitées.

Le présent projet visait à évaluer l'impact de différentes dates de semis, ainsi que l'utilisation des nouveaux traitements de semences du groupe 28 (cyantraniliprole et le chlorantraniliprole) en combinaison avec différentes dates de semis, sur les dégâts causés par la MS. Il visait également à affiner le modèle prédictif d'émergence de la MS et à valider son efficacité dans différentes régions du Québec.

Les résultats de ce projet ont montré que devancer ou retarder le semis permettrait d'éviter les dommages de MS dans le maïs et le soya. En effet, les taux d'infestation étaient plus élevés pour les semis réalisés proche des pics d'activité de la MS. Bien que l'utilisation de semences traitées ait permis de réduire le nombre de plants infestés et endommagés pour les semis effectués durant le pic d'activité, aucune différence n'a été observée au niveau de la densité de peuplement ou du rendement. Par ailleurs, aucun bénéfice n'a été observé pour la date de semis réalisée à la fin du pic d'activité de la MS. Ceci confirme que décaler la date de semis en dehors des pics d'activité de la MS permettrait d'éviter les infestations et les dommages en lien avec ce ravageur.

Les expériences en laboratoire ont montré que la ponte des MS femelles était maximale deux semaines après l'émergence ce qui concorde avec les observations en champ. Il n'a cependant pas été possible de déterminer le(s) stade(s) de ponte préféré(s).

Le modèle d'émergence a montré une bonne capacité à prédire les pourcentages d'émergence de la MS en début de saison. Ce modèle pourrait éventuellement être utilisé sous forme d'un outil en ligne permettant de déterminer les périodes de semis optimales.

Finalement, il ressort que la présence de larves et de dommages ne se traduit pas nécessairement en des pertes de peuplement ou de rendement. Ceci suggère que de fortes infestations proches de la date du semis, combinées à des pratiques agronomiques favorisant la MS, sont nécessaires pour impacter négativement les composantes du rendement du maïs et du soya. Ainsi, l'utilisation de traitements insecticide de semence ne serait pas toujours justifiée et le décalage des dates de semis pourrait aider à déjouer les dommages en lien avec ce ravageur.

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

L'objectif principal du projet était d'optimiser la gestion intégrée de la MS dans la culture du maïs et du soya au Québec. Les objectifs spécifiques étaient de (1) déterminer le moment optimal pour semer le maïs et le soya (par rapport au pic d'activité de la MS) afin de limiter les dommages causés par la MS; (2) évaluer l'utilisation des traitements de semences du groupe 28 en combinaison avec différentes dates de semis comme moyen de gestion de la MS; et (3) valider le modèle prédictif de la MS développé au CÉROM en le testant dans différentes régions du Québec et l'améliorer à l'aide des nouvelles données.

Volet 1. Déterminer le moment optimal pour semer le maïs et le soya afin de limiter les dommages causés par la MS

1.1 - Essais au champ

Site d'étude et dispositif expérimental

Des essais de dates de semis ont été réalisés en 2019 et 2020 au CÉROM à Saint-Mathieu-de-Beloeil. Les essais ont été faits avec du maïs et du soya sans traitement insecticide de semence, ainsi que deux types de fertilisation (avec ou sans fumier de poulet; FP), pour un total de quatre essais par année. L'ajout de FP avait pour but de favoriser la ponte et les dommages de MS.

Les semis (2019 : 11 dates; 2020 : 10 dates) étaient répartis sur une période de quatre à cinq semaines, à raison de deux semis par semaine. Un semis était prévu près de la date du pic d'activité de la MS prédite par le modèle d'émergence et les autres étaient répartis de 2,5 semaines avant le pic jusqu'à deux semaines après (**Tableau 1**). Les dates de semis étaient réparties dans chaque essai suivant un dispositif en bloc aléatoire complet avec trois répétitions (2019 : 30 parcelles; 2020 : 33 parcelles; **Figure 1**).

Tableau 1. Dates de semis et nombre de jours par rapport à la date prévue du pic de population de mouches des semis (en gris) pour les essais du volet 1 menés au CÉROM en 2019 et 2020.

		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	
2019	Date	-	06-mai	09-mai	13-mai	16-mai	21-mai	23-mai	27-mai	31-mai	04-juin	07-juin
	Jours	-	-17	-14	-10	-7	-2	0 (pic)	4	8	12	15
		D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11
2020	Date	29-avr	05-mai	11-mai	14-mai	17-mai	19-mai	22-mai	25-mai	28-mai	01-juin	05-juin
	Jours	-23	-17	-11	-8	-5	-3	0 (pic)	3	6	10	14

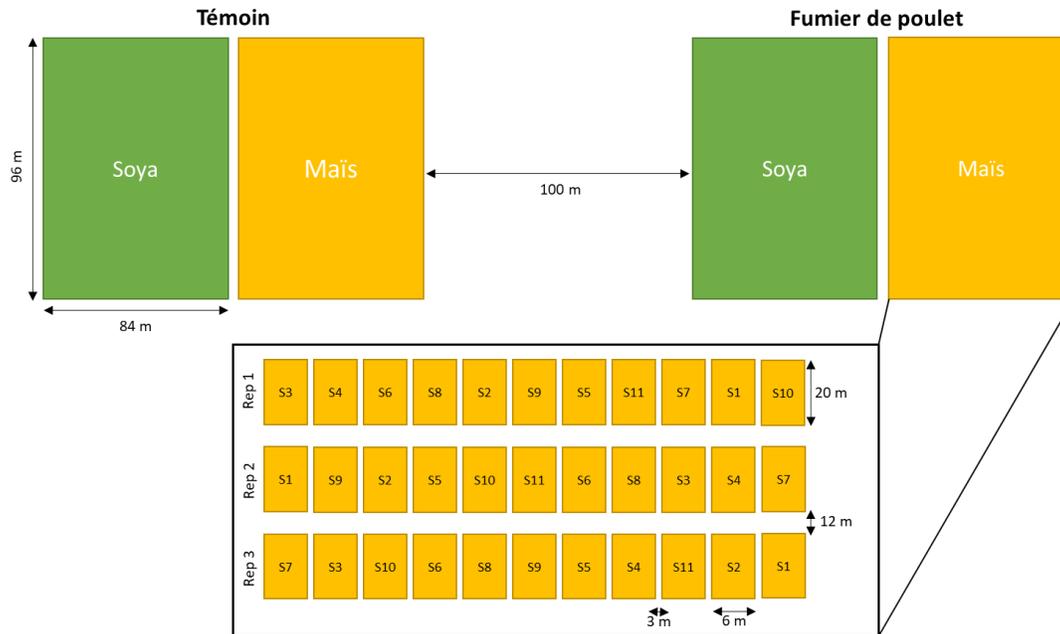


Figure 1. Dispositif expérimental utilisé en 2019 et 2020 pour les essais de dates de semis. La partie du haut montre la disposition au champ des quatre essais, soit deux cultures (maïs et soya) x deux types de fertilisation (avec ou sans fumier de poulet). L'encadré du bas montre le dispositif expérimental utilisé pour les essais (l'essai maïs avec fertilisation fumier de poulet est utilisé à titre d'exemple). S = date de semis (1 à 11).

Le maïs (var. DKC43-47RIB) et le soya (var. Chiba) était semé dans des parcelles de 6 m de large (huit rangs) par 20 m de long avec un espacement de 30 pouces (76 cm) entre les rangs. Le FP (~25 kg N/tonne) était appliqué juste avant le semis à un taux de 5 t/ha (équivalent à 125 kg N/ha) et immédiatement incorporé à l'aide d'un vibroculteur. Le maïs sans FP a reçu une quantité équivalente d'azote sous forme d'engrais minéral (EM), dont 50 kg N/ha au semis et le reste au stade 6-8 feuilles, alors que le soya n'a reçu aucun EM.

Évaluation des dommages

Les dommages causés par les larves de MS ont été évalués une fois par semaine pendant quatre semaines, en commençant sept jours après le semis. Dans chaque parcelle, sept plants consécutifs étaient déterrés sur deux rangs (14 plants en tout) et inspectés. La présence et la localisation des dommages (grain, racines, tige, et/ou cotylédons) étaient notés et les larves de MS retrouvées sur ou dans les plants étaient dénombrées. La terre entourant les parties souterraines des plants était aussi inspectée à la recherche de pupes. Les plants étaient prélevés sur les rangs cinq à sept et en un endroit différent des rangs à chacune des visites.

Évaluation du peuplement

La densité de peuplement a été évaluée en juillet (2019 : 3-4 juillet pour les semis D1 à D5, 16-17 juillet pour les semis D6 à D10; 2020 : 7, 9 et 10 juillet) sur les rangs deux et trois de chaque parcelle (destinés à la récolte). Sur chaque rang, le nombre de plants était compté sur une distance déterminée (2 ou 3 m dans le soya et 5,3 m dans le maïs) et ramené par mètre linéaire.

Date de maturité physiologique

La date de maturité physiologique du maïs et du soya a été évaluée en fin de saison. La date de maturité du maïs a été évaluée en suivant la méthode utilisée dans le cadre des essais du RGCCQ. Des épis ont été récoltés (2019 : 20 septembre et 11 octobre; 2020 : 28 août et 25 septembre) dans les rangs quatre et cinq de chaque parcelle (deux épis à chaque date). Les épis de chaque parcelle étaient égrenés et un sous-échantillon d'environ 150 g était pesé et mis à l'étuve pendant 72 h à 103 °C. L'échantillon était ensuite pesé de nouveau et le taux d'humidité était calculé. La date prédite de l'atteinte de la maturité physiologique (35 % d'humidité dans les grains) a ensuite été déterminée pour chaque date de semis à l'aide du modèle de Tremblay *et al.* (2008). Dans le soya, la maturité des gousses a été évaluée deux à trois fois par semaine pendant un mois afin de déterminer la date de récolte. La date de maturité a été déterminée lorsque les trois répétitions d'une même date de semis étaient à maturité.

Évaluation du rendement

À maturité, les rangs deux et trois de chaque parcelle ont été récoltés à l'aide d'une moissonneuse-batteuse pour parcelle d'essai (Wintersteiger, modèle Delta). Le rendement des parcelles de maïs a été mesuré au moment de la récolte à l'aide du capteur de rendement de la batteuse. Pour le soya, le taux d'humidité des échantillons a cependant dû être mesuré à l'aide d'un analyseur proche infrarouge (Perten) et le rendement a ensuite été ramené à 13 % d'humidité. À noter qu'en 2019, le rendement de six parcelles de maïs (EM : D7 et D3; FP : D2, D4, D9, D10) a été évalué sur un seul rang en raison de la présence de neige trop abondante.

1.2 - Essais en laboratoire

Afin de déterminer le stade le plus à risque pour le maïs et le soya, des expériences d'oviposition ont été réalisées avec des MS femelles adultes mises en contact avec des plants de différents stades de croissance. Dans la première expérience (test de non-choix), les femelles étaient mises en contact avec un seul plant, alors que dans la seconde expérience (test de choix), les femelles étaient mises en contact avec des plants de différents stades en même temps. Afin d'étudier l'effet des conditions environnementales sur les risques d'infestation, les expériences ont aussi été réalisées sous deux régimes de températures et d'humidités simulant un printemps favorable

(20 °C et précipitations normales) et défavorable à la croissance des plants (10 °C et précipitations élevées).

Semis de maïs et de soya

En prévision de chaque série d'expérience, des grains de maïs et de soya non-traités (c.à.d. sans fongicide, ni insecticide) étaient semés tous les deux jours afin d'obtenir différents stades de croissance au moment des expériences. Les grains étaient semés dans des contenants individuels (diamètre : 5 cm x hauteur : 5 cm) remplis de terre et placés en Conviron® à 20 °C et 65 % d'humidité. En 2019, deux types de terre ont été testés, soit de la terre de champ autoclavée (argile limoneuse prélevée au CÉROM) et de la terre à jardin (Botafloa). Comme aucune différence n'a été observée entre les types de terre, toutes les expériences de 2020 ont été faites avec de la terre à jardin.

Élevage de MS

Les MS femelles adultes utilisées pour les expériences d'oviposition provenaient de pupes fournies par le laboratoire de François Fournier (Collège Montmorency) et conservées au réfrigérateur jusqu'à leur utilisation. Avant chaque série d'expérience, des pupes étaient mises à émerger dans une cage. Afin d'obtenir des MS du même âge ou d'un même groupe d'âge, les pupes non émergées étaient transférées dans une nouvelle cage toutes les 24 h (2020) ou tous les trois jours (2021) à partir de la première émergence de MS.

Pour les deux années du projet, les MS de chaque cage étaient ensuite laissées ensemble jusqu'au moment de l'expérience afin que les femelles soient fécondées. Les cages étaient gardées à température ambiante et contenaient une fiole d'eau sucrée (10 %) et de la diète artificielle en quantité suffisante pour le maintien des MS adultes jusqu'à leur utilisation.

Expérience d'oviposition en situation de non choix

Des MS femelles adultes âgées de 5 à 17 jours étaient introduites individuellement dans des cages (diamètre : 11,5 cm x hauteur : 25 cm) contenant un plant de maïs ou de soya. Une fiole d'eau sucrée (10 %) était ajoutée comme source d'alimentation. Pour le maïs, les stades de croissance testés étaient 1 JAS (jour après semis), 2 JAS, pré-VE (plant à peine émergé du sol), VE (émergence), V1, et V2 (1^{ère} et 2^{ème} feuille déployée, respectivement). Pour le soya, les stades testés étaient 1 à 4 JAS, VE, VC (feuille unifoliée déroulée), et V1. Des cages avec un contenant de terre sans plant étaient utilisées comme témoin.

Expérience d'oviposition en situation de choix

Des MS femelles adultes âgées de 5 à 17 jours étaient introduites individuellement dans des cages (30 x 30 x 60 cm) contenant trois plants de maïs ou de soya à différents stades de croissance, ainsi qu'un contenant de terre sans plant (témoin). Une fiole d'eau sucrée (10 %) était ajoutée comme source d'alimentation. Pour le maïs, les stades de croissance testés étaient 1 à 5 JAS, pré-VE (plant à peine émergé du sol), VE (émergence), V1, et V2 (1^{ère} et 2^{ème} feuille déployée, respectivement). Pour le soya, les stades testés étaient de 1 à 4 JAS, VE, VC (feuille unifoliée déroulée), et V1.

Dénombrement des œufs

Pour chacune des expériences, les œufs étaient dénombrés après 24, 48 et 72 h en fouillant délicatement la terre autour des plants avec un pic entomologique. Les plants étaient ensuite replacés dans leur cage afin de continuer l'expérience avec la même MS.

Volet 2. Évaluer si les traitements de semences en remplacement des néonicotinoïdes en combinaison avec une date de semis décalée sont efficaces dans la gestion de la MS

Site d'étude et dispositif expérimental

Des essais de dates de semis en combinaison avec des traitements de semences du groupe 28 ont été réalisés en 2020 et 2021 dans le champ du CÉROM à Saint-Mathieu-de-Beloeil. Les essais ont été réalisés avec du maïs et du soya avec et sans traitement insecticide de semence (chlorantraniliprole pour le maïs et cyantraniliprole pour le soya).

Trois semis étaient effectués à chaque année, dont un près de la date du pic d'émergence de la MS prédit par le modèle, et les deux autres environ une semaine avant et une semaine après le pic (**Tableau 2**).

Tableau 2. Dates de semis et nombre de jours par rapport à la date prévue du pic de population de mouches des semis (en gris) pour les essais du volet 2 menés au CÉROM en 2020 et 2021.

		D1	D2	D3
2020	Date	13-mai	22-mai	28-mai
	Jours	-9	0 (pic)	6
2021	Date	11-mai	15-mai	19-mai
	Jours	-4	0 (pic)	4

Le maïs (var. DKC43-47RIB) et le soya (var. Chiba) était semé avec un espacement de 30 pouces (76 cm) entre les rangs dans des parcelles de 18 m de large (24 rangs) par 30 m de long en 2020 et 15 m de large (20 rangs) par 20 m de long en 2021. À noter que les semences de maïs utilisées étaient issues du même lot, mais pas les semences de soya. À chaque date de semis, des parcelles avec semences traitées (T) et non-traitées (NT) étaient semées côte-à-côte et les différentes dates de semis étaient réparties suivant un dispositif en bloc avec trois réplications (18 parcelles par culture; **Figure 2**). Afin d'inciter la ponte et les dommages de MS, du FP (~ 25 kg N/t) était appliqué juste avant le semis à un taux de 5 t/ha (équivalent à 125 kg N/ha) et incorporé immédiatement à l'aide d'un vibroculteur.

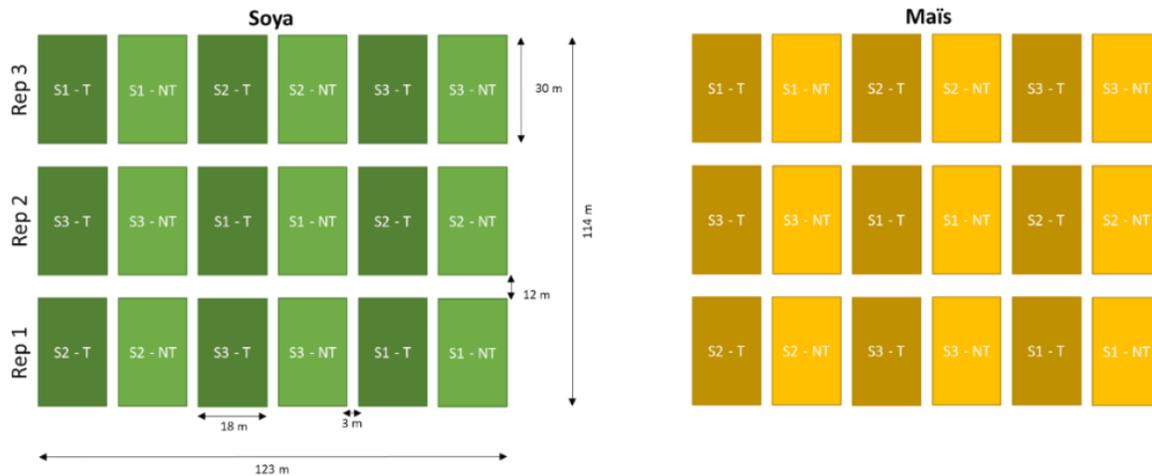


Figure 2. Dispositif expérimental utilisé en 2020 et 2021 pour les essais de dates de semis en combinaison avec des traitements insecticides de semences dans le maïs et le soya. S = date de semis (1, 2 et 3); T = semences traitées; NT = semences non-traitées.

Évaluation en cours de saison

L'évaluation des dommages et le décompte des larves et des pupes de MS, ainsi que l'évaluation du peuplement, de la date de maturité physiologique, et du rendement ont été effectués tel que décrit au volet 1, mais sur quatre rangs au lieu de deux. Le peuplement et le rendement ont été évalués sur les rangs 5, 6, 10 et 11, alors que le dépistage des larves et des dommages aux plants a été fait sur les autres rangs. À noter qu'en 2021, le rendement du soya n'a pas pu être évalué en raison d'une erreur dans le choix des semences. Contrairement à ce qui avait été prévu, le cultivar utilisé (var. Chiba) n'était pas résistant au glyphosate et n'a donc pas survécu au traitement réalisé en cours de saison.

Volet 3. Valider le modèle prédictif de la MS développé au CÉROM dans différentes régions du Québec et l'affiner à l'aide des nouvelles données de captures

En 2018, un modèle phénologique de la MS a été développé afin de pouvoir prédire l'évolution des populations de MS adultes dans le champ du CÉROM à Saint-Mathieu-de-Beloeil en Montérégie-Est (Boquel & Latraverse 2019). Ce modèle basé sur les cumuls thermiques (degrés-jours cumulés ou DJ_{cum}) a été construit à partir de données de captures par pièges bols jaunes (PBJ) récoltées dans le champ du CÉROM en 2014, 2017 et 2018.

Afin de valider et améliorer ce modèle, les populations de MS dans le champ du CÉROM ont été suivies au cours des saisons 2019 à 2021 à l'aide de PBJ installés dans les parcelles de maïs et de soya des essais des volets 1 et 2. Les PBJ étaient installés une semaine avant le premier semis (2019 : 1^{er} mai; 2020 : 24 avril; 2021 : 13 avril) et relevés trois fois par semaine jusqu'à ce que plus aucune MS ne soit capturée pendant trois relevés consécutifs (2019 : 26 juillet; 2020 : 31 juillet; 2021 : 7 juillet).

Afin de généraliser le modèle à d'autres régions, des PBJ ont été installés dans 53 champs de maïs ou de soya à travers 11 autres régions du Québec entre 2019 et 2021. Dans chacun de ces sites, un ou deux PBJ était installé(s) en bordure de champ au début du mois de mai et relevé(s) deux fois par semaine pendant huit semaines. Les échantillons étaient conservés dans un contenant d'éthylène glycol (Prestone) et envoyés au CÉROM à la fin de la saison. Des données de captures par PBJ récoltées en Montérégie-Est en 2014 (deux sites) et 2015 (deux sites) ont aussi été ajoutées à la base de données. Au final, la base donnée complète comportait donc un total de 62 sites à travers 12 régions du Québec (**Tableau 3**).

Tableau 3. Nombre de sites dépistés par région pour le suivi de la dynamique de population de MS entre 2014 et 2021.

Année	Région												Total
	AT	BSL	CA	CDQ	CN	EST	LAN	LAU	MAU	ME	MO	SLSJ	
2014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2
2015	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	2
2017	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
2019	-	2	2	-	-	2	2	1	-	1	2	-	12
2020	2	2	2	2	2	-	5	2	1	1	2	-	21
2021	2	-	2	2	2	2	5	2	-	1	2	3	23
Total	4	4	6	4	4	4	12	5	1	9	6	3	62

Les PBJ étaient constitués d'un seau de plastique jaune rempli d'environ 500 mL d'éthylène glycol (Prestone) et fixé sur un piquet de bois à une hauteur d'environ 75 cm du sol. Tous les échantillons de PBJ ont été triés au CÉROM et les MS identifiées à l'aide de la clé de Savage *et al.* (2016). Les données quotidiennes de températures de l'air et les normales de saison, ainsi que les précipitations ont été obtenues à partir de la station [Agrométéo Québec](#) la plus proche de chacun des sites.

Analyse des données

Toutes les analyses ont été effectuées à l'aide du logiciel R v.4.1.2 (R Core Team, 2021).

Volet 1 et 2

L'analyse des données des essais en champ a été faite séparément pour chaque culture. Les proportions de plants infestés et de plants endommagés ont été analysées à l'aide de modèles linéaires généralisés (GLM; fonction *glm*) avec distribution binomiale de l'erreur. Le peuplement et le rendement ont été analysés à l'aide de GLM avec distribution normale. Pour l'essai de dates de semis (volet 1), les effets principaux des modèles étaient l'année, la date de semis, le type de fertilisation, et leur interaction. Pour l'essai de traitement de semences avec des dates de semis (volet 2), les effets principaux étaient l'année, la date de semis, le type de semences, et leur interaction. Les effets ont été testés à l'aide d'un test du maximum de vraisemblance (*Likelihood Ratio Test* ou *LRT*; fonction *drop1*). En cas de résultat significatif, les moyennes étaient comparées à l'aide de la procédure des « moyennes marginales estimées » (*Estimated Marginal Means*; fonction *emmeans*) avec correction de Tukey pour tests multiples. Toutes les analyses ont été faites au seuil $\alpha = 0,05$.

Volet 3

Les données de piégeage de chaque site ont d'abord été visualisées en traçant le taux de captures (MS/piège/jour) pour chaque date de relevé. Sur les 62 sites que comptait la base de données initiale, seuls 23 avaient une séquence de captures complète pour le premier pic de population et ont été utilisés pour développer et affiner le modèle d'émergence.

Les DJ ont été calculés selon la méthode sinus simple (Baskerville) à partir des températures maximales et minimales quotidiennes (DJ_{sin}). Le seuil de température minimale (T_{base}) utilisé était de 3,9 °C, soit la température à partir de laquelle la MS commence à accumuler des DJ pour son développement (Funderburk *et al*, 1984). Le cumul des DJ (DJ_{cum}) a ensuite été effectué à partir du 1^{er} mars.

Les données de captures du premier pic d'activité ont ensuite été extraites en coupant les séquences de données de chaque site. Pour ce faire, différentes méthodes ont été testées, dont un découpage manuel et des découpages à différents seuils de DJ_{cum} (600, 650 et 700). Les proportions cumulées d'émergence ont été calculées pour chaque date de relevé de chaque site en divisant le nombre cumulé de captures jusqu'à cette date par le nombre total de captures du premier pic pour le site. La coupure à 650 DJ_{cum} a été retenue pour la construction des modèles car c'est ce seuil qui a donné les meilleurs résultats.

Le pourcentage d'émergence cumulé des populations de MS au CÉROM a été modélisé en fonction des DJ_{cum} à l'aide d'une distribution logistique :

$$y = \frac{L}{1 + e^{-k(x-x_0)}}$$

où y = pourcentage d'émergence du premier pic de population de MS, L = valeur maximale du pourcentage d'émergence (c.à.d. 100 %), x_0 = nombre de DJ_{cum} (x) pour lequel la courbe atteint la moitié du maximum ($L/2$; soit 50 %), et k = taux de croissance logistique ou pente de la courbe.

La performance prédictive du modèle initial développé en 2018 (CÉROM 2018) a été testée en comparant les pourcentages d'émergence prédits et réels des données de captures récoltées au CÉROM de 2019 à 2021. Les données de 2019 et 2020 ont ensuite été ajoutées à la base de données d'entraînement du modèle. Celui-ci a été paramétré de nouveau (CÉROM 2020) puis testé sur les données de 2021.

Deux modèles ont ensuite été développés en incluant les données des 23 sites sélectionnés, afin de généraliser le modèle aux autres régions du Québec. Les données ont été préalablement séparées en jeu de données d'entraînement (75 %) et test (25 %). L'échantillonnage a été stratifié en fonction de la variable réponse de manière à ce que toute la gamme des valeurs soit représentée également dans les deux jeux de données. Les modèles ont été paramétrés sur les données d'entraînement et leur performance prédictive a été testée sur les données test.

Le premier modèle, basé uniquement sur les DJ_{cum} (GLOBAL), a été paramétré en utilisant le modèle logistique décrit ci-dessus. Le second modèle incluant un plus grand nombre de variables explicatives (BRT) a été développé en utilisant la méthode des arbres de régression boostés (*Boosted Regression Tree* ou *BRT*). Ce modèle comprenait, en plus des DJ_{cum}, la date en jours juliens, des caractéristiques géographiques, et des moyennes mobiles de température de l'air et à 10 cm dans le sol, ainsi que des moyennes et des sommes mobiles de précipitations, le tout pour des fenêtres de temps d'une, deux, trois, et quatre semaines avant chaque relevé (**Tableau 4**).

Tableau 4. Variables utilisées dans la construction des modèles d'émergence de la MS.

Nom	Description	Type
Variable réponse		
prop_emerg_peak	Proportion d'émergence cumulée	Numérique
Date		
julian_day	Date en jours juliens	Numérique
Caractéristiques géographique		
region	Région administrative	Nominale
latitude	Latitude (degrés décimaux)	Numérique
longitude	Longitude (degrés décimaux)	Numérique
Données météorologiques		
DJ _{cum}	Degrés-jours cumulés (méthode sinus simple; Tbase = 3,9 °C; biofixe = 1 ^{er} mars)	Numérique
T _{mean_1w}	Température moyenne de l'air (°C) pour une période de 1, 2, 3 et 4 semaine(s) avant le relevé	Numérique
T _{mean_2w}		
T _{mean_3w}		
T _{mean_4w}		

T _{mean_10cm_1w}	Température moyenne du sol (°C) pour une période de 1, 2, 3 et 4 semaine(s) avant le relevé	Numérique
T _{mean_10cm_2w}		
T _{mean_10cm_3w}		
T _{mean_10cm_4w}		
RF _{mean_1w}	Précipitations moyennes (mm) pour une période de 1, 2, 3 et 4 semaine(s) avant le relevé	Numérique
RF _{mean_2w}		
RF _{mean_3w}		
RF _{mean_4w}		
RF _{tot_1w}	Précipitations totales (mm) pour une période de 1, 2, 3 et 4 semaine(s) avant le relevé	Numérique
RF _{tot_2w}		
RF _{tot_3w}		
RF _{tot_4w}		

L'influence relative des variables prédictives a été mesurée à l'aide des formules développées par Friedman (2001). Celles-ci prennent en compte le nombre de fois où une variable est sélectionnée pour la division et l'amélioration de l'ajustement attribuable à cette variable. La valeur moyenne pour l'ensemble du modèle est ensuite calculée (Friedman & Meulman 2003, Elith *et al*, 2008) et réajustée de manière à ce que leur somme soit égale à 100. Une valeur plus élevée indiquant une plus forte influence de la variable sur la variable réponse (Elith *et al*, 2008).

La performance prédictive des modèles évaluée sur le jeu de données test a été mesurée à l'aide racine de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error* ou *RMSE*). Les modèles logistiques ont été paramétrés à l'aide des fonctions *nls* et *SSlogis* (bibliothèque *stats*). Le modèle de BRT a été construit à l'aide de la bibliothèque *tidymodels* v0.1.4 (Kuhn & Wickham 2020).

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques étaient très différentes au cours des trois années du projet. Le printemps 2019 a été marqué par un temps très humide pendant tout le mois de mai et le début de juin (**Figure 3**). Pendant cette période, les températures ont oscillé autour des normales de saison (entre 10 et 20 °C), mais il est tombé 146,8 mm de pluie au cours du mois de mai, soit près de deux fois les précipitations normales (85,1 mm) pour cette période. En 2020, les températures ont augmenté rapidement au-dessus des normales pendant le mois de mai, passant d'environ 5 °C à près de 30 °C en l'espace de deux semaines (entre le 10 et le 27 mai), mais sont retombées au niveau des normales de saison par la suite. Le printemps a aussi été assez sec avec seulement 40,1 mm de pluie pendant le mois de mai, soit deux fois moins que les précipitations normales. Finalement, le printemps 2021 a lui aussi été relativement chaud, avec des températures qui sont montées au-dessus des normales à la mi-mai mais qui sont retombées au niveau des normales de saison par la suite. Le printemps a cependant été exceptionnellement sec, avec seulement 17,7 mm de pluie pendant tout le mois de mai.

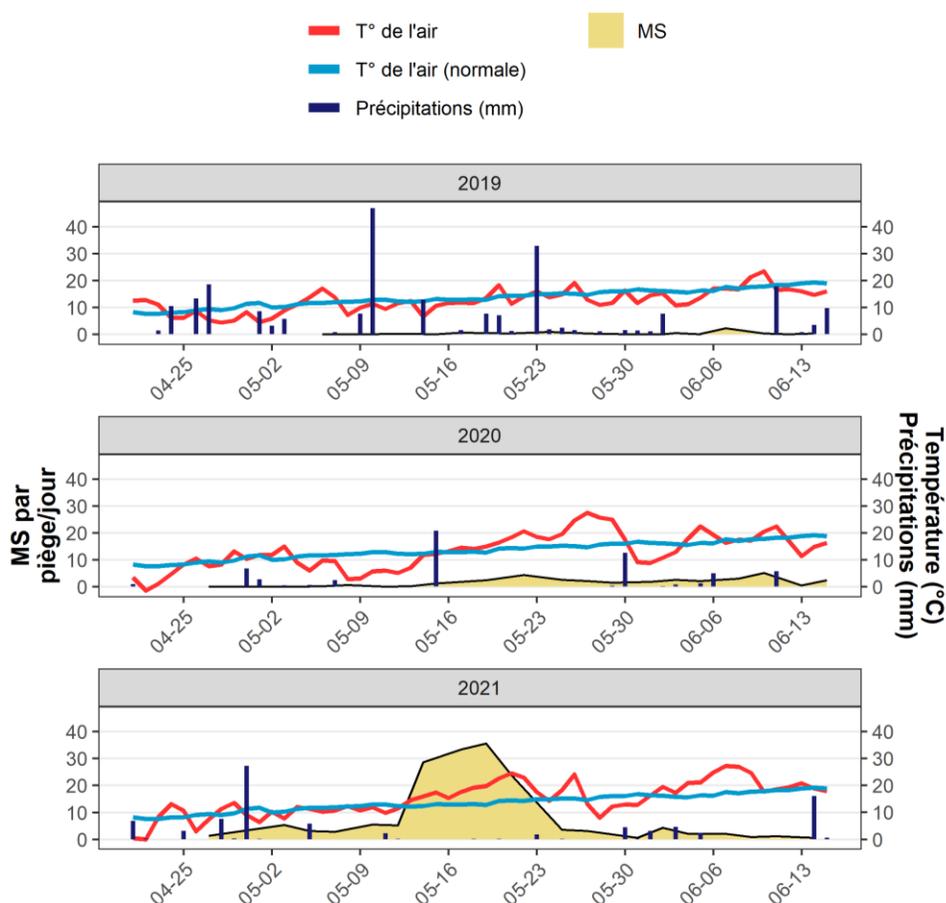


Figure 3. Taux de captures des mouches de semis adultes (en jaune), température de l'air (réelle = ligne rouge, normale = ligne bleu pâle) et précipitations (barres verticales bleu foncé) entre le 21 avril et le 15 juin 2019 à 2021. Les populations de MS ont été suivies à l'aide de pièges bols jaunes placés dans les essais du CÉROM et les données météorologiques de la station la plus proche (Mont-Saint-Hilaire) ont été obtenues via le site Agrométéo Québec (<https://www.agrometeo.org/>).

Populations de mouches des semis au CÉROM

Le piégeage effectué à l'aide de PBJ dans les parcelles d'essais du CÉROM a montré que les populations de MS étaient relativement faibles en 2019 et 2020 comparativement à 2021 (**Figure 3**).

En 2019, un premier pic de population a été observé entre le 13 et le 31 mai avec un maximum le 24 mai (1 MS/piège/jour). Un second pic, légèrement plus important, a été observé entre le 3 et le 12 juin, avec un maximum le 7 juin (3 MS/piège/jour). La date de semis prévue au pic de population (D6) a été faite le 23 mai et la dernière date de semis (D10) est tombée à la date du second pic de population (7 juin).

En 2020, un premier pic de population a été observé entre le 11 et le 29 mai avec un maximum le 22 mai (4,4 MS/piège/jour). Un second pic a été observé entre le 29 mai et le 13 juin, avec un maximum le 10 juin (5,2 MS/piège/jour). La date de semis prévue au pic de population (D7) a été faite le 22 mai et la dernière date de semis (D11) a été faite cinq jours avant le second pic de population (5 juin). Pour le volet 2, la date de semis prévue au pic de population (D2) a également été faite le 22 mai alors que les dates de semis D1 et D3 ont été réalisées à environ 10 et 90 % d'émergence du pic de population.

L'année 2021 a été marquée par un premier pic de population plus hâtif et très important entre le 12 et le 25 mai avec un maximum le 19 mai (35,6 MS/piège/jour). Un second pic plus faible a ensuite été observé entre le 31 mai et le 9 juin, avec un maximum le 2 juin (4,3 MS/piège/jour). Comme le modèle d'émergence prédisait que le pic de population printanier serait atteint plus tôt en 2021, la date de semis au pic (D2) avait été prévue le 15 mai. Il est par la suite apparu que le semis avait été fait quatre jours trop tôt. Les populations de MS étaient cependant similaires à celles observées au pic puisque des taux de captures de 28,5 et 33,3 MS/piège/jour ont été observés les 14 et 17 mai, respectivement. Il s'est finalement avéré que la dernière date de semis (D3) avait été faite au pic réel de population (19 mai).

En 2019 et 2020, les dates de semis au pic de population ont été bien prévues avec des semis le même jour ou un jour après. En 2021, les températures au-dessus des normales en début de saison ont accéléré le cumul des DJ. C'est pourquoi le semis qui devait être fait au pic a été réalisé quatre jours plus tôt que le pic réel de population. Cependant, la troisième date de semis (D3) a été faite au pic réel de population.

Volet 1. Déterminer le moment optimal du semis pour le maïs et le soya afin de limiter les dégâts causés par la MS

1.1.A - Essais en champs : maïs

Présence de larves et de pupes

Les taux d'infestation du maïs étaient très faibles pour les deux années de l'essai de dates de semis. En effet, seuls 42 plants infestés ont été trouvés sur 6 929 plants observés (0,61 %), dont la très grande majorité (38) dans les parcelles avec FP (**Tableau 5**). Ainsi, la presque totalité des larves (61/65) a aussi été retrouvée dans les parcelles avec FP. Le nombre de larves par plant infesté était cependant faible, ne dépassant pas 1,8 (en 2020). Les quatre larves observées dans les parcelles EM ont été trouvées dans les parcelles des dates de semis D2, D5 et D10 en 2019 et D4 en 2020. Seules quatre pupes ont été trouvées durant les deux années du projet, toutes dans les parcelles avec FP. Étant donné le peu de larves et l'absence de pupes dans les parcelles EM et que les tendances entre les parcelles EM et FP étaient similaires, seules les données des parcelles FP sont présentées.

Tableau 5. Nombre de plants, taux d'infestation des plants et nombre moyen de larves et de pupes par plant pour chaque type de fertilisation (minérale et fumier de poulet) dans les essais de dates de semis du maïs (volet 1) en 2019 et 2020.

Année	Fertilisation	Plants observés	Larves				Pupes			
			Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté	Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté
2019	Minérale	1 656	3	0,18	3	1,0	0	0,00	0	-
	Poulet	1 672	18	1,08	25	1,4	2	0,12	2	1
2020	Minérale	1 801	1	0,06	1	1,0	0	0,00	0	-
	Poulet	1 800	20	1,11	36	1,8	2	0,11	2	1
Toutes	Toutes	6 929	42	0,61	65	0,9	4	0,06	4	1

En 2019, les taux d'infestation les plus élevés ont été observés pour les semis du 21, 23 et 27 mai (D5, D6 et D7, respectivement), réalisés près du premier pic de population de MS (24 mai), et pour ceux des 4 et 7 juin (D9 et D10, respectivement), réalisés près ou au second pic de population (7 juin; **Figure 4**). La grande majorité des larves (84 %) a été observée pour ces cinq dates de semis (D5 à D7 : 12 larves, D9 et D10 : 9 larves). Le taux d'infestation le plus élevé (14,3 %) a été observé dans les parcelles D7 trois semaines après le semis (17 juin). Un second pic d'infestation moins important (7,1 %) a été observé dans les parcelles D10 deux semaines après le semis (21 juin). Les premières dates de semis (D1 et D4) avaient toutes des taux d'infestation très faibles (< 2,5 %).

En 2020, les taux d'infestation les plus élevés ont été observés pour les semis des 19 et 22 mai (D6 et D7, respectivement), réalisés au premier pic de population de MS (22 mai), et pour le semis du 28 mai (D9) effectué une semaine après le premier pic de population. La grande majorité des larves (83 %) a été observée pour ces semis (D6 : 4 larves, D7 : 4 larves, D9 : 21 larves). Un

premier pic d'infestation a été observé dans les parcelles D6 et D7 trois semaines après le semis (9 et 12 juin, respectivement). Un second pic d'infestation plus important (14,3 %) a été atteint dans les parcelles D9 deux semaines après le semis (11 juin). Les premières dates de semis (D1 et D5), ainsi que les deux dernières (D10 et D11) avaient toutes des taux d'infestation très faibles (< 2,5 %).

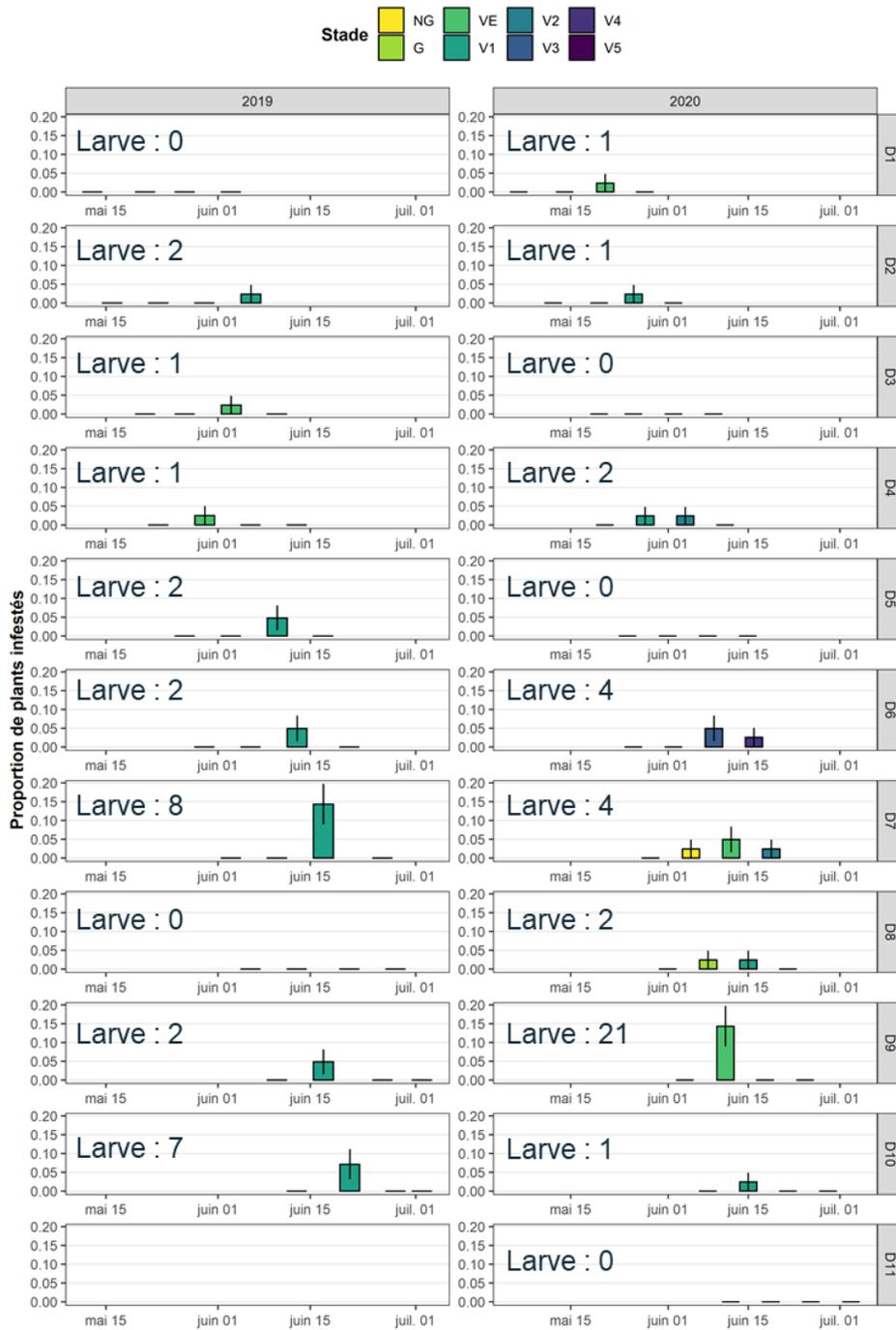


Figure 4. Proportion moyenne de plants de maïs infestés par des larves de mouche des semis pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans fumier de poulet en 2019 et 2020. Les parcelles étaient dépistées quatre fois à intervalle d'une semaine en commençant une semaine après le semis. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

Dommmages aux plants

En 2019, les premiers dommages ont été observés dans la semaine du 27 mai pour les dates de semis D2 à D4, mais les proportions étaient faibles (2,5 à 12,8 %; **Figure 5**). Les pourcentages ont ensuite augmenté et sont restés relativement constant jusqu'à la dernière évaluation des dommages (semaine du 1^{er} juillet). En générale, la proportion de plants endommagés augmentait à chaque évaluation et était maximale à la quatrième évaluation, sauf pour les dates de semis D5 et D9 où la proportion de plants endommagés était maximale à la troisième visite. Bien que des dommages importants aient aussi été observés pour les dates de semis les plus tardives (D6 à D10), la culture était en partie plus avancée (stades V1 à V3) que pour les premières dates de semis (stade V1), et donc moins vulnérable.

En 2020, les premiers dommages ont été observés dans la semaine du 18 mai pour la date de semis D1, mais la proportion était faible (2,4 %; **Figure 5**). Les pourcentages ont ensuite augmenté jusqu'à atteindre un maximum dans la semaine du 8 juin, avant de diminuer légèrement et rester constant jusqu'à la dernière évaluation (semaine du 29 juin). Les dommages les plus importants ont été observés pour les dates de semis D3 (12,2 %; stade V3) et D4 (11,9 %; stade V1). Par contre, certaines dates de semis plus tardives (D7 - D9) ont aussi subi des dommages. Bien qu'ils aient été plus faible, le maïs était à des stades de croissance moins avancés (grains germés et VE), donc plus vulnérables à la MS.

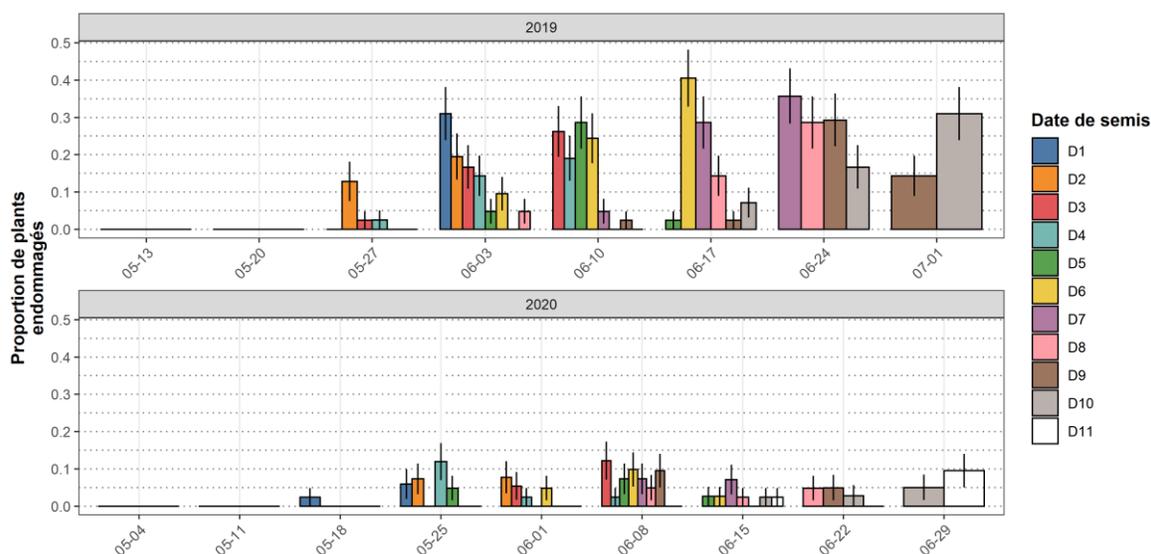


Figure 5. Proportion moyenne de plants de maïs endommagés à chaque dépistage pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans fumier de poulet en 2019 et 2020. Les parcelles étaient dépistées quatre fois à intervalle d'une semaine en commençant une semaine après le semis. Les dates présentées en abscisse correspondent à la date de la semaine de dépistage. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

Peuplement

L'effet de la date de semis sur la densité de peuplement du maïs différait entre les deux années (année x date; LRT; $X_{(9)} = 131$; $p < 0,001$; **Figure 6**). Par contre, la densité de peuplement du maïs ne différait pas entre les parcelles EM et FP (fertilisation; LRT; $X_{(1)} = 0,372$; $p = 0,542$). En 2019, la densité de peuplement du maïs était plus faible pour le premier semis (6 mai; 4,4 plants/m), mais elle augmentait graduellement pour les dates de semis suivantes et se stabilisait autour de 5,7 à 6,3 plants/m à partir des semis du 16 et 21 mai (D4-D5). En 2020, la densité de peuplement du maïs ne différait pas entre les dates de semis (5,8 à 6,3 plants/m), sauf pour le semis du 17 mai (D5) qui avait un peuplement plus faible (5,29 plants/m).

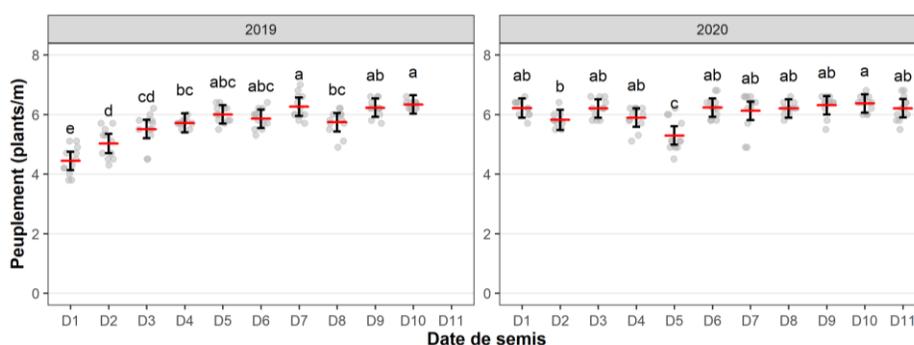


Figure 6. Densité de peuplement moyen du maïs (plants/m) semé à différentes dates en 2019 et 2020. L'évaluation du peuplement a été faite environ 5 semaines après la dernière date de semis. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements avec une lettre en commun ne diffèrent pas significativement ($\alpha = 0,05$).

Rendement

L'effet de la date de semis sur le rendement du maïs différait entre les deux années (année x date; LRT; $X_{(9)} = 4,63$; $p < 0,001$; **Figure 7**). Par contre, le rendement du maïs ne différait pas entre les parcelles EM et FP (fertilisation; LRT; $X_{(1)} = 0,953$; $p = 0,331$). En 2019, le rendement du maïs était similaire entre les dates de semis (8,3 à 9,2 t/ha) alors qu'en 2020, il tendait à être plus faible (moins de 8 t/ha) pour les semis effectués très tôt (29 avril; D1) ou très tard en saison (1^{er} et 5 juin; D10 et D11). Le rendement était aussi plus faible pour les semis du 25 mai (D7 : 7,2 t/ha) et particulièrement celui du 19 mai (D5 : 6,2 t/ha).

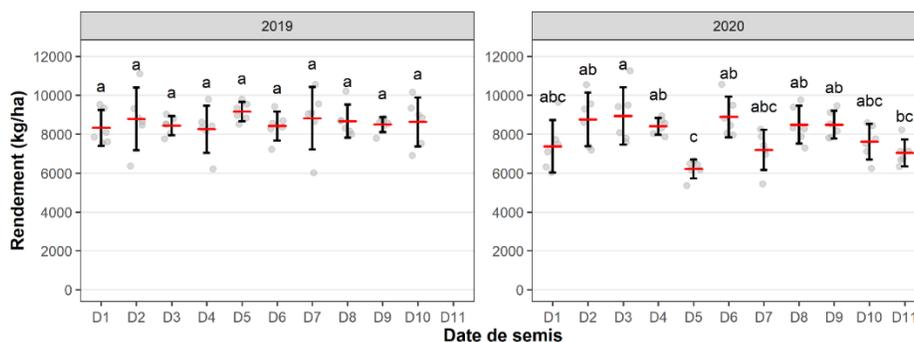


Figure 7. Rendement moyen du maïs (kg/ha) semé à différentes dates en 2019 et 2020. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements ayant une lettre en commun ne diffèrent pas significativement les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Évaluation de la maturité physiologique

La maturité physiologique du maïs a été évaluée pour chaque date de semis afin de caractériser l'impact d'un semis tardif sur la croissance et le rendement. La maturité physiologique était atteinte plus tard en saison pour les dates de semis plus tardives (**Figure 8**). Néanmoins, le nombre de jours nécessaires pour atteindre la maturité physiologique diminuait avec les dates de semis plus tardives. À titre d'exemple, dans les parcelles avec FP en 2020, la D10 a été semée 33 jours plus tard que la D1 alors que la maturité physiologique a été atteinte seulement 16 jours plus tard, écourtant ainsi la durée de croissance de 17 jours. Les semis plus tardifs auraient bénéficié des températures plus chaudes observées plus tard au printemps permettant d'accélérer le développement de la culture.

En 2019, une différence dans les dates de maturité a été observée entre les parcelles avec ou sans FP. Les dates de semis hâtives nécessitaient plus de temps pour atteindre la maturité physiologique que des dates plus tardives dans les parcelles avec FP (principalement D1, D2 et D4). Cependant, très peu de différences ont été observées dans les dates de maturité entre les parcelles des essais EM et FP en 2020.

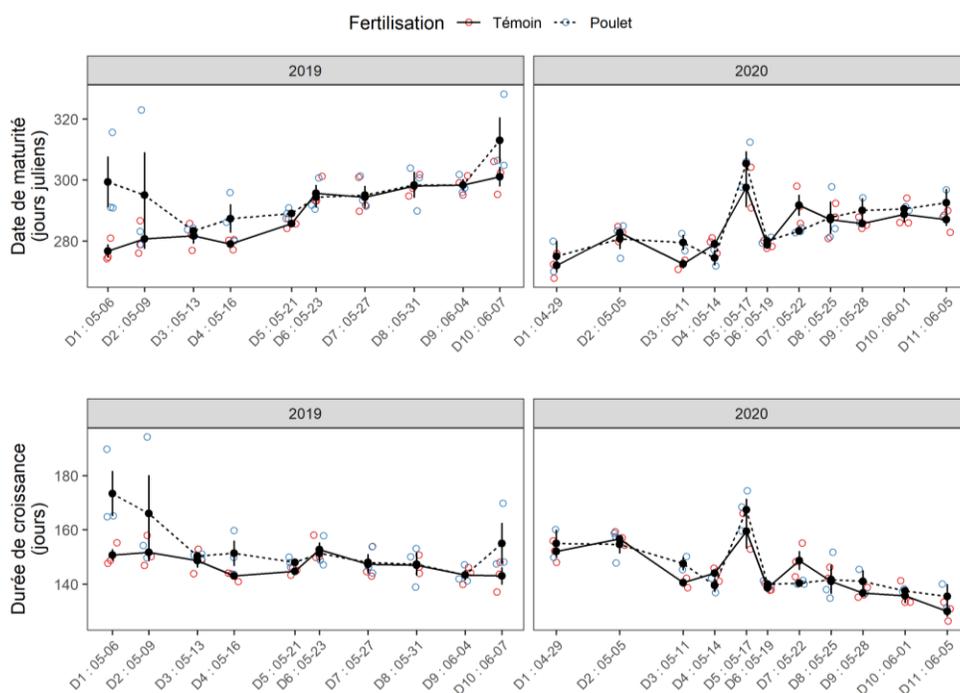


Figure 8. Date de maturité physiologique (jours juliens) et durée de croissance (jours) du maïs pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans fumier de poulet (volet 1) en 2019 et 2020. Jours de croissance = nombre de jours entre le semis et l'atteinte de la maturité.

1.1.B – Essais en champs : soya

Présence de larves et de pupes

Les taux d'infestation étaient très faibles dans le soya pour l'essai de dates de semis (**Tableau 6**). Seulement quatre plants infestés ont été observés en 2019 et aucun plant en 2020, représentant un taux d'infestation moyen de 0,06 %. Trois des plants infestés observés en 2019 ont été trouvés dans l'essai FP (semis du 23 mai, D6), le quatrième a été trouvé dans le semis du 27 mai (D7) de l'essai EM. Le nombre de larves par plant infesté était également faible, ne dépassant pas 1,3. Les larves ont été observées le 30 mai (1) et le 6 juin (3) pour la date de semis D6 de l'essai FP, et le 17 juin (1) pour la date de semis D7 de l'essai EM. Aucune pupa n'a été trouvée au cours des deux années du projet. Étant donné qu'une seule larve et aucune pupa a été trouvée dans les parcelles EM et que les tendances entre les parcelles EM et FP étaient similaires, seules les données des parcelles FP sont présentées.

Tableau 6. Nombre de plants, taux d'infestation des plants et nombre moyen de larves et de pupes par plant pour chaque type de fertilisation (minérale et fumier de poulet) dans les essais de dates de semis du soya (volet 1) en 2019 et 2020.

Année	Fertilisation	Plants observés	Larves				Pupes			
			Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté	Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté
2019	Minérale	1680	1	0,06	1	1,0	0	0	0	-
	Poulet	1666	3	0,18	4	1,3	0	0	0	-
2020	Minérale	1841	0	0,00	0	-	0	0	0	-
	Poulet	1829	0	0,00	0	-	0	0	0	-
Toutes	Toutes	7016	4	0,06	5	0,07	0	0	0	-

Domages aux plants

Malgré la très faible quantité de larve et de plants infestés observés en 2019, de nombreux dommages aux plants ont été notés dans les parcelles de soya. Les premiers dommages sont apparus dans la semaine du 27 mai (surtout D1 et D2) et un pic de dommages a ensuite été observé dans la semaine du 3 juin (surtout D2 et D3) et du 10 juin (surtout D3 et D4; **Figure 9**). Bien que les premières dates de semis aient été les plus touchées lors de ce premier pic de dommages, le soya était déjà au stade VE-VC. En revanche, les dates de semis proche du pic d'activité de la MS (D5 à D7), même si elles ont subi moins de dommages, étaient à un stade plus sensible (grain germé - VE). Un second pic de dommages a par la suite été observé pendant la semaine du 24 juin dans les parcelles des semis D7 à D9, mais le soya était à un stade de croissances plus avancé (stade V1).

En 2020, très peu de dommages ont été observés dans les parcelles de soya. Les premiers dommages ont été observés le 28 mai pour la date de semis D4 (**Figure 9**). Les dommages sont ensuite restés faibles (2,5 %), sauf pendant la semaine du 8 juin où la date de semis D5 a atteint 9,5 % de plants endommagés. À noter qu'aucun dommage n'a été observé pour les premières et les dernières dates de semis (D1 à D3, D10 à D11), ainsi que pour le semis D6.

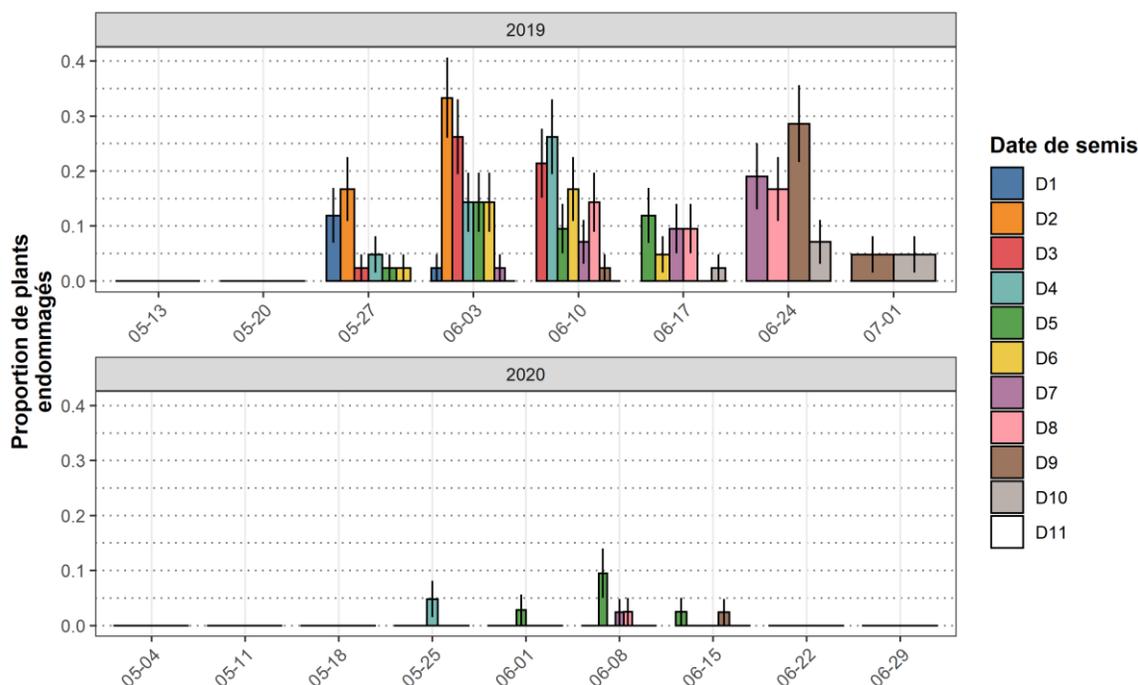


Figure 9. Proportion moyenne de plants de soya endommagés à chaque dépistage pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans fumier de poulet en 2019 et 2020. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

Peuplement

L'effet de la date de semis sur la densité de peuplement du soya différait entre les deux années (année x date; LRT; $X_{(9)} = 31,6$; $p < 0,001$; **Figure 10**). Par contre, la densité de peuplement du soya ne différait pas entre les parcelles EM et FP (fertilisation; LRT; $X_{(1)} = 2,57$; $p = 0,110$). En 2019, la densité de peuplement du soya était similaire entre les dates de semis (18,2 à 19,6 plants/m), mais diminuait légèrement pour le semis du 23 mai (D6; 17,9 plants/m). En 2020, la densité de peuplement du soya ne différait pas entre les dates de semis (20,1 à 22,3 plants/m), sauf pour le semis D5 (17 mai) qui avait un peuplement deux fois plus faible (11 plants/m).

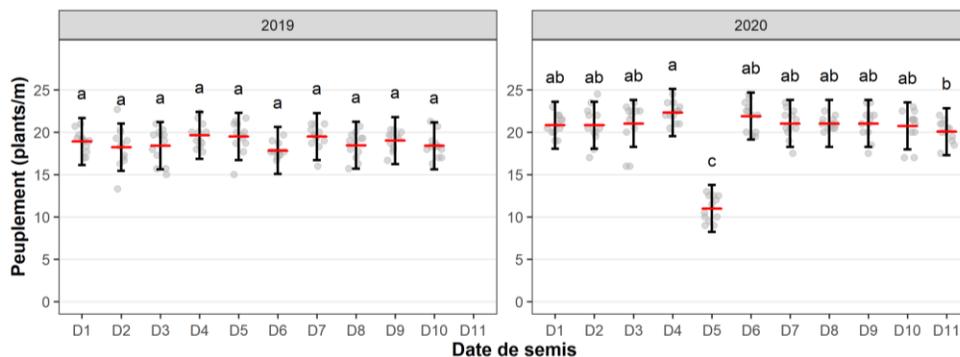


Figure 10. Densité de peuplement moyen du soya (plants/m) semé à différentes dates en 2019 et 2020. L'évaluation du peuplement a été faite environ 5 semaines après la dernière date de semis. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements avec une lettre en commun ne diffèrent pas significativement ($\alpha = 0,05$).

Rendement

L'effet du type de fertilisation sur le rendement du soya différait entre les deux années (année x fertilisation; LRT; $X_{(1)} = 40,5$; $p < 0,001$; **Figure 11**). En 2019, les rendements étaient meilleurs dans l'essai EM (134 kg/ha de plus en moyenne), alors que l'inverse a été observée en 2020 (249 kg/ha de moins).

L'effet de la date de semis sur le rendement du soya différait aussi entre les deux années (année x date; LRT; $X_{(9)} = 2,35$; $p = 0,017$; **Figure 11**). En 2019, le rendement du soya était similaire entre les dates de semis (EM : 2,6 à 3,0 t/ha; FP : 2,6 à 2,9 t/ha). En 2020, le rendement du soya était plus variable entre les dates de semis. Le rendement était plus faible pour la première date de semis (29 avril; EM : 2,7 t/ha; FP : 2,9 t/ha) et plus élevé pour la D6 (22 mai; EM : 3,3 t/ha; FP : 3,6 t/ha), ces deux dates étant les seules à différer significativement. Toutefois, il est à noter que les rendements en soya obtenus en 2020 étaient en moyenne plus élevés que ceux obtenus en 2019.

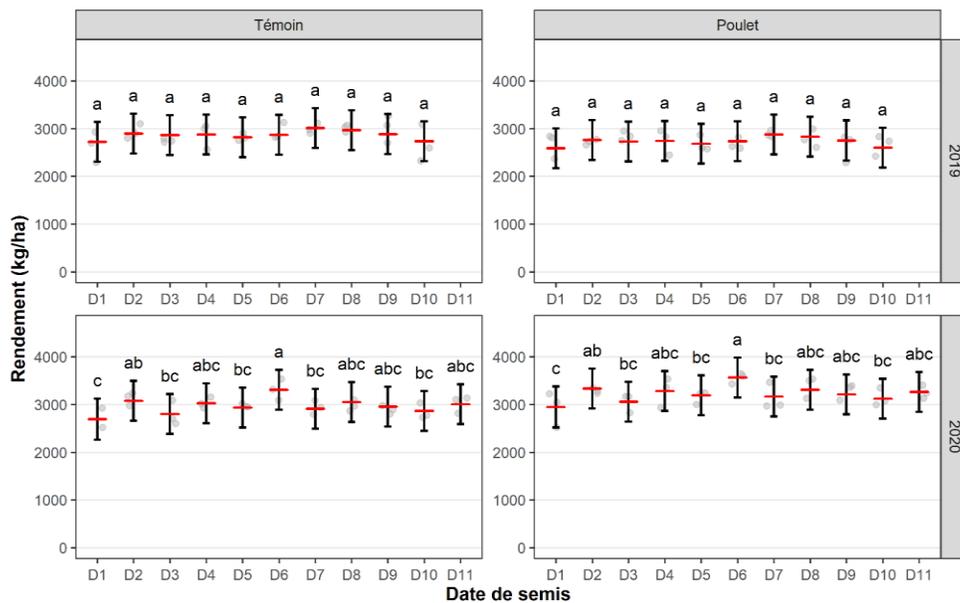


Figure 11. Rendement moyen du soya (kg/ha) pour les différentes dates de semis avec ou sans fumier de poulet en 2019 et 2020. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements ayant une lettre en commun ne diffèrent pas significativement les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Évaluation de la maturité physiologique

Tout comme pour les essais de maïs, la maturité du soya a été évaluée pour chaque date de semis afin de caractériser l'impact d'un semis tardif sur la croissance et le rendement et des résultats similaires ont été observés. La maturité physiologique était atteinte plus tard en saison pour les dates de semis plus tardives (**Figure 12**). Néanmoins, le nombre de jours nécessaires pour atteindre la maturité physiologique diminuait avec les dates de semis plus tardives. Les résultats étaient très similaires entre les parcelles des essais EM et FP. Tout comme dans les

essais de maïs, les semis plus tardifs auraient bénéficié des températures plus chaudes observées plus tard au printemps permettant d'accélérer le développement de la culture.

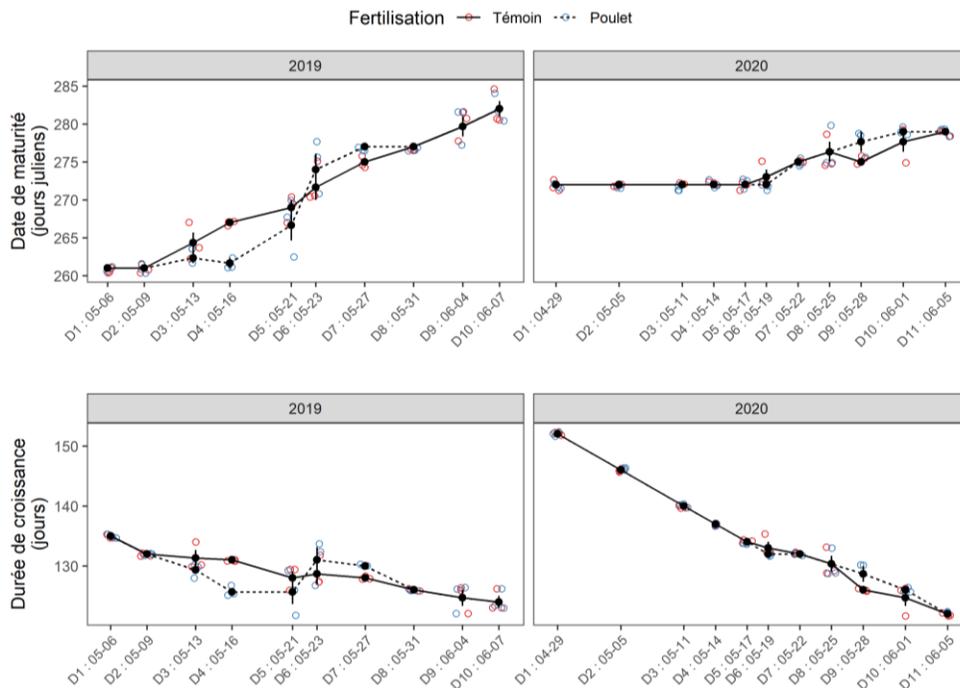


Figure 12. Date de maturité physiologique (jours juliens) et durée de croissance (jours) du soya pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans fumier de poulet (volet 1) en 2019 et 2020. Jours de croissance = nombre de jours entre le semis et l'atteinte de la maturité.

Discussion sur le moment optimal du semis pour le maïs et le soya afin de limiter les dégâts causés par la MS

Tel que prévu, les taux d'infestation étaient plus élevés dans les essais FP. Ces résultats concordent avec ceux de Boquel & Latraverse (2019) qui ont montré que le FP était très attractif pour la MS et confirment le bien-fondé d'enfouir du FP dans les parcelles pour inciter les MS à pondre dans nos essais avec le maïs et le soya.

Bien que les infestations dans les essais aient été faibles (maïs : moyenne de 0,6 % plants avec présence de larves; 1,1 % maximum; soya : moyenne de 0,06 % plants avec présence de larves; 0,18 % maximum), certaines tendances ont été observées. Les taux d'infestations les plus élevés, ainsi que la majorité des larves, ont été observés pour les semis réalisés proche des pics de population de MS. Les pics d'infestation sont survenus trois semaines après le premier pic de population et deux semaines après le deuxième pic. Le délai plus court entre le deuxième pic de population et d'infestation est possiblement due au fait que la MS complète son cycle de développement plus rapidement lorsque les températures sont plus élevées. À l'inverse, les semis effectués en dehors des pics d'activité avaient soit des taux d'infestation plus faibles, soit

des plants à des stades de croissance moins sensible à la MS. Ceci suggère que le risque d'infestation est plus élevé lorsque le maïs est semé durant le pic d'activité de la MS.

Malgré le peu de larves et de pupes de MS retrouvées, des pourcentages de plants endommagés assez élevés ont été observés en 2019, particulièrement celles de soya. Il est fort possible que la plupart des dommages notés au cours de ce projet ne soient pas causés par la MS mais par d'autres facteurs biotiques et abiotiques, d'autant plus que les populations d'adultes de MS étaient très faibles pour les deux années. Ceci souligne l'importance de réaliser le dépistage de la MS basé sur la présence de larves dans les champs plutôt que sur les dommages. En 2020, les dommages ont été notés uniquement lorsqu'ils étaient représentatifs de ceux causés par la MS et les résultats ont montré une meilleure concordance avec les taux d'infestation. En effet, les dommages les plus importants ont été observés au même moment que le pic d'infestation (semaine du 8 juin) survenu trois semaines après le pic d'activité de la MS.

En 2019, les densités de peuplement du maïs étaient plus faibles pour les semis effectués en début de saison, mais aucune différence de rendement n'a été notée. Pour le soya, par contre, aucune différence de densité de peuplement et de rendement n'a été observée entre les dates de semis. Considérant les très faibles taux d'infestation (larves et dommages) observés en début de saison, les différences observées dans le maïs peuvent difficilement être attribuées à la MS. Il semble plus probable que cela soit due au temps frais et exceptionnellement humide observé au printemps.

En 2020, les densités de peuplement étaient plus faibles pour le maïs et le soya du semis D5, mais seul le maïs avait aussi un rendement plus faible. Cependant, très peu de dommages aux plants, et aucune larve, n'ont été observés pour cette date de semis, ce qui laisse croire qu'il pourrait plutôt s'agir d'un problème de semis.

L'ensemble des résultats suggère que le risque d'infestation est plus élevé lorsque le maïs et le soya sont semés aux environs d'un pic d'activité de la MS. Il serait donc possible de minimiser les dommages causés par ce ravageur en évitant de semer durant cette période. Il faut cependant rappeler que la pression de MS était assez faible pendant les deux années de l'essai, ce qui rend difficile de conclure définitivement sur l'efficacité des dates de semis. Des infestations plus importantes auraient sans doute permis de confirmer certaines des tendances observées.

1.2 – Essais en laboratoire

Effet du type de substrat

Des expériences préliminaires menées en 2019 ont montrés que le type de substrat (terre de champ autoclavée ou terre à jardin) n'avait pas d'incidence sur la probabilité de ponte (LRT; $\chi_{(1)}^2 = 3,74$; $p = 0,053$) ni sur le nombre d'œufs pondus (LRT; $\chi_{(1)}^2 = 0,034$; $p = 0,854$). La probabilité de ponte avait toutefois tendance à être supérieure dans la terre de champ autoclavée. Il a donc été décidé de regrouper les données des deux types de substrat pour la suite des analyses.

Effet de l'âge des MS et du temps après l'introduction

La probabilité de ponte augmentait avec l'âge des MS ($\chi_{(3)}^2 = 75,8$; $p < 0,001$; **Figure 13**). Elle était similaire pour les MS de 5-7 et 8-12 jours (0,12), et atteignait un maximum pour les MS de 15-17 jours (0,49). Les MS de 12-14 jours présentaient une valeur intermédiaire (0,26). La probabilité de ponte était similaire 24, 48 et 72 h après l'introduction des MS ($\chi_{(2)}^2 = 0,82$; $p = 0,663$).

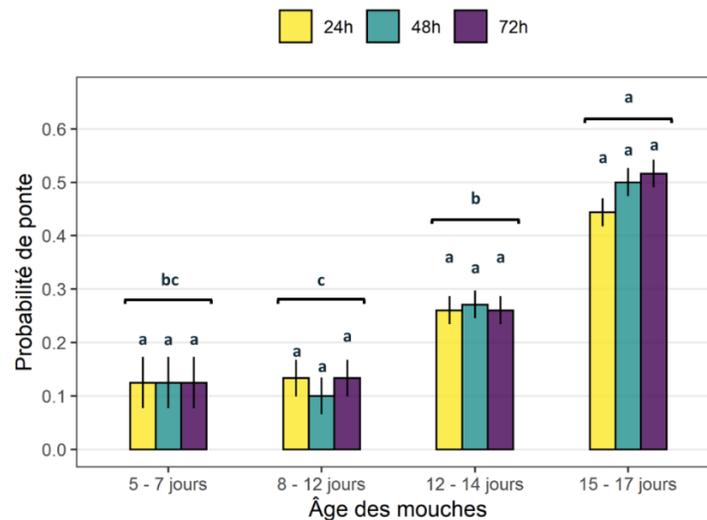


Figure 13. Probabilité de ponte des MS femelles dans le maïs et le soya à 24, 48 et 72 heures pour des mouches de semis de différents groupes d'âge. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Le nombre d'œufs pondus ne différait pas avec l'âge des MS ($\chi_{(3)}^2 = 4,14$; $p = 0,126$). Les pontes étaient maximales dans les 24 h suivant l'introduction (7,6 œufs), mais elles diminuaient par la suite ($\chi_{(2)}^2 = 9,55$; $p = 0,008$; **Figure 14**). Le nombre d'œufs pondus 72 h après l'introduction (4,4 œufs) était ainsi significativement plus faible qu'après 24 h. Les pontes à 48 h présentaient une valeur intermédiaire (6,2 œufs).

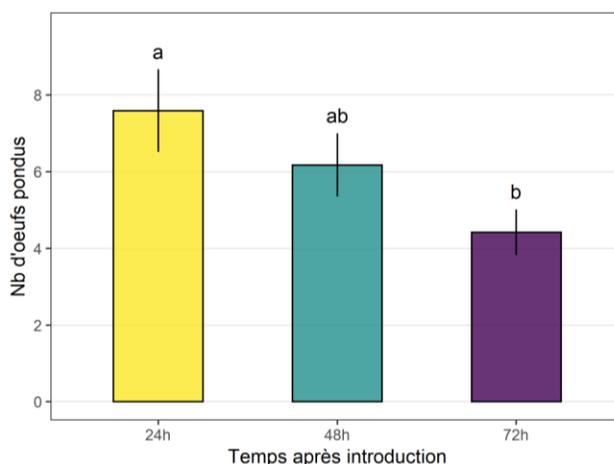


Figure 14. Nombre d'œufs pondus par les MS femelles dans le maïs et le soya à 24, 48 et 72 heures après l'introduction dans les cages. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Effet de la température

La probabilité de ponte des MS tendait à être plus élevée à 20 °C (0,53) qu'à 10 °C (0,44), mais cette différence n'était pas significative ($\chi^2_{(1)} = 2,26$; $p = 0,133$). Par contre, les MS ont au total pondus plus d'œufs à 20°C (26,1 œufs) qu'à 10°C (14,6 œufs; $\chi^2_{(1)} = 10,0$; $p = 0,002$).

Effet du stade de croissance en situation de choix

Les MS placées avec des plants de maïs à différents stades de croissance n'ont montré aucune préférence pour un stade en particulier, et ce, autant pour ce qui est de la probabilité de ponte ($\chi^2_{(3)} = 4,80$; $p = 0,187$) que du nombre d'œufs pondus ($\chi^2_{(3)} = 5,16$; $p = 0,161$; **Figure 15**).

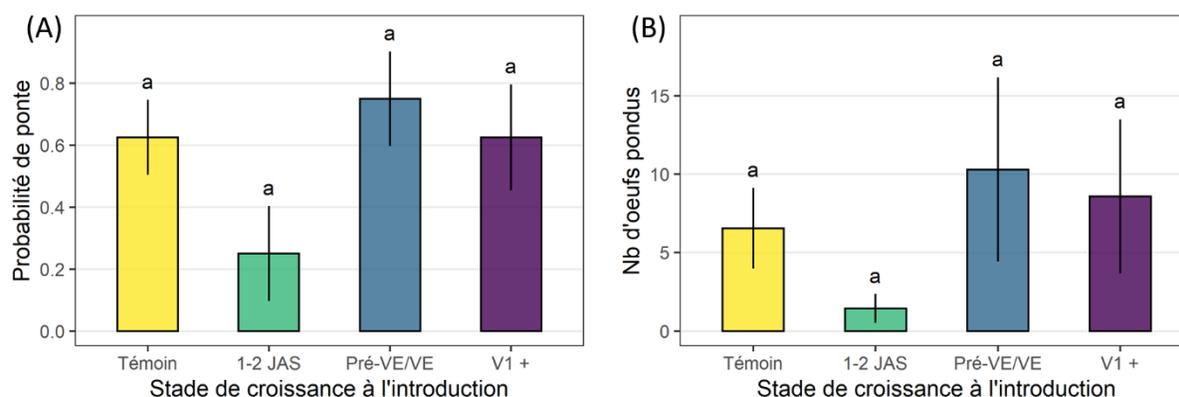


Figure 15. Probabilité de ponte (A) et nombre d'œufs pondus (B) des MS femelles dans le maïs en situation de choix de différents stades de maïs. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Les MS placées avec des plants de soya à différents stades de croissance n'ont montré aucune préférence pour un stade en particulier pour ce qui est de la probabilité de ponte ($\chi^2_{(3)} = 3,22$; $p = 0,358$; **Figure 16A**). Le stade de croissance avait cependant un effet marginalement significatif sur le nombre d'œufs pondus ($\chi^2_{(3)} = 7,69$; $p = 0,053$; **Figure 16B**). Les MS avaient tendance à pondre plus d'œufs sur les plants aux stades pré-VE/VE que les autres stades.

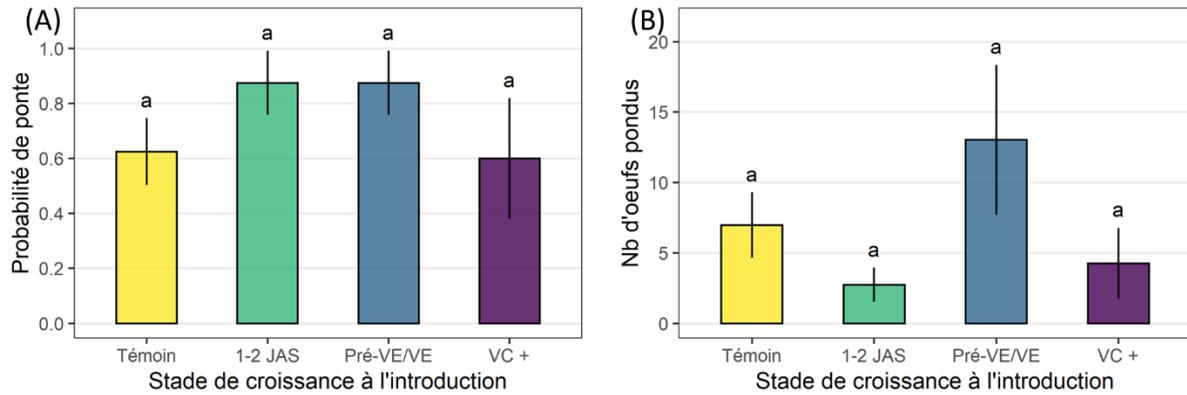


Figure 16. Probabilité de ponte (A) et nombre d'œufs pondus (B) des MS femelles dans le soya en situation de choix de différents stades de soya. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Effet du stade de croissance en situation de non-choix

Les MS placées avec un plant de maïs à un stade de croissance donné n'ont montré aucune préférence pour ce qui est de la probabilité de ponte ($\chi^2_{(3)} = 0,727$; $p = 0,867$) et le nombre d'œufs pondus ($\chi^2_{(3)} = 5,05$; $p = 0,168$; **Figure 17**).

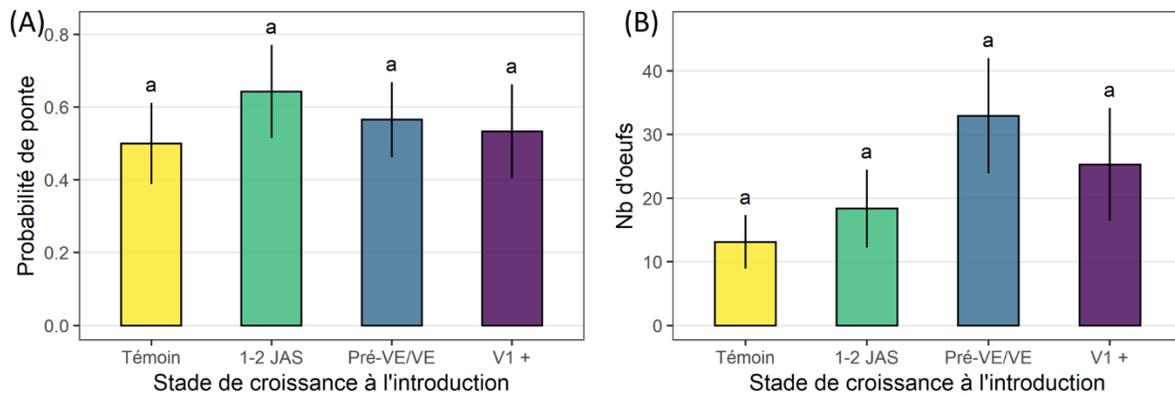


Figure 17. Probabilité de ponte (A) et nombre d'œufs pondus (B) des MS femelles dans le maïs en situation de non-choix. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Les MS placées avec un plant de soya à un stade de croissance donné n'ont montré aucune préférence pour ce qui est de la probabilité de ponte ($\chi^2_{(3)} = 2,50$; $p = 0,475$; **Figure 18A**). En

revanche, le stade de croissance avait un effet significatif sur le nombre d'œufs pondus ($\chi^2_{(3)} = 8,90; p = 0,031$) qui tendait à augmenter avec la croissance des plants (**Figure 18B**). La seule différence significative était cependant entre les témoins et les plants au stade VC+.

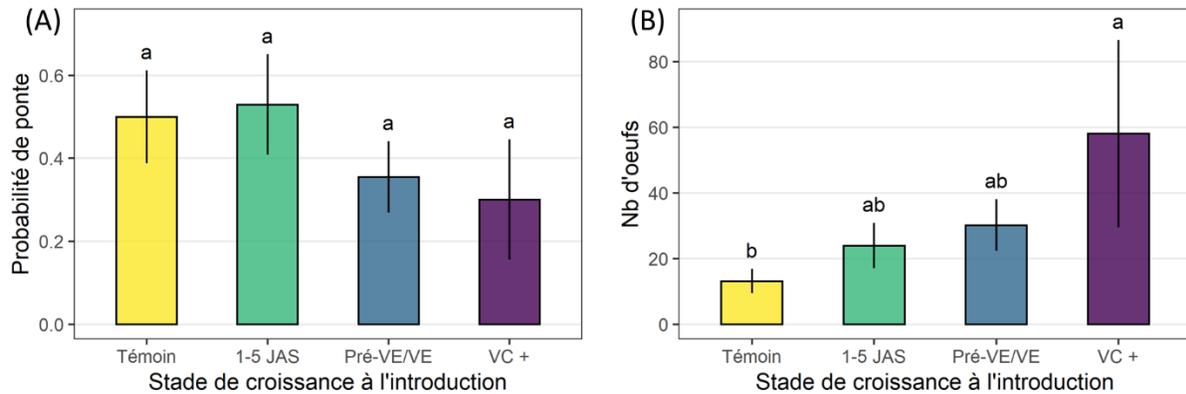


Figure 18. Probabilité de ponte (A) et nombre d'œufs pondus (B) des MS femelles dans le maïs en situation de non-choix. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Discussion sur les essais en laboratoire

Les expériences conduites au laboratoire ont permis de démontrer plusieurs choses. Tout d'abord, la proportion de pontes et plus particulièrement le nombre d'œufs était plus faible à 10 °C qu'à 20 °C. Quelle que soit la température, les MS semblent pondre peu durant les deux semaines qui suivent leur émergence et la ponte serait maximale après 15 jours. Malgré les proportions de pontes plus faibles chez les jeunes MS, le nombre moyen d'œufs pondus était relativement similaire entre les différents âges. Ensuite, un plus grand nombre d'œufs serait pondus après 24 h qu'après 72 h. Enfin, bien que les différences n'étaient pas significatives, les pontes et le nombre d'œufs semblent être plus fréquents juste avant ou à l'émergence des plants. Cependant, le fait que des pontes aient été observées dans les témoins pourrait indiquer que les MS femelles n'ont pas de préférence pour la ponte et que celle-ci se ferait plutôt de manière aléatoire.

Par ailleurs, il est intéressant de faire le parallèle avec les résultats obtenus en champ. En effet, les plus fortes abondances et proportions de plants endommagés ont été observées généralement deux semaines après le pic d'activité de la MS avant de diminuer. Ceci coïncide avec la ponte maximale observée après 15 jours en laboratoire.

Volet 2. Évaluer si les traitements de semences en remplacement des néonicotinoïdes en combinaison avec une date de semis décalée sont efficaces dans la gestion de la MS

2.A – Essais dans le maïs

Présence de larves et de pupes

Les taux d'infestation étaient plus élevés dans les parcelles NT que dans les parcelles T (2020 : 1,35 % vs 0,24 %; 2021 : 8,23 % vs 1,39 %; **Tableau 7**). Le nombre total de larves était aussi plus élevé dans les parcelles NT (315) que dans les parcelles T (23), résultant en un nombre de larves par plant infesté plus élevé dans les parcelles NT que dans les parcelles T (2020 : 1,5 vs 1,0; 2021 : 3,5 vs 1,4). Le nombre de plants avec présence de pupes était également très faible (6) et bien que le nombre de pupes par plant fût beaucoup plus élevé dans les parcelles T (17) que NT (1), la totalité des pupes (17) provenaient d'un même plant.

Tableau 7. Nombre de plants, taux d'infestation des plants et nombre moyen de larves et de pupes par plant pour chaque type de semence (non-traitées et traitées au chlorantraniliprole) dans les essais maïs en 2020 et 2021.

Année	Type de semence	Plants observés	Larves				Pupes			
			Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté	Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté
2020	Non-traitée	1260	17	1,35	25	1,5	0	0,00	0	-
	Traitée	1259	3	0,24	3	1,0	1	0,08	1	1,0
2021	Non-traitée	1009	83	8,23	290	3,5	4	0,40	4	1,0
	Traitée	1007	14	1,39	20	1,4	1	0,10	17	17,0

Comme les proportions de plants infestés étaient trop faibles en 2020, l'analyse statistique n'a pas pu être réalisée. Des larves de MS ont cependant été observées seulement le 8 juin (**Figure 19**) et les proportions de plants infestés les plus élevées ont été observées dans les parcelles NT semées le 28 mai (D3 : 11,9 %) et le 22 mai (D2 : 8,3 %). Dans les parcelles T, les proportions de plants infestés étaient plus faibles et observées seulement dans les parcelles semées le 13 mai (D1 : 2,5 %) et le 22 mai (D2 : 1,2 %).

En 2021, la proportion de plants de maïs endommagés était plus faible dans les parcelles T, mais seulement pour certaines dates de semis (date x semences; $\chi^2_{(2)} = 11,40$; $p = 0,003$) et certaines visites (visite x semences; $\chi^2_{(2)} = 6,42$; $p = 0,040$; **Figure 19**). Pour la date de semis D1 (11 mai), la proportion de plants infestés était significativement plus élevée dans les parcelles NT (19 % et 21,4 %) que dans les parcelles T (1,2 % et 0 %) à la deuxième (25 mai) et troisième (1^{er} juin) visite, mais elle ne différait pas pour les autres dates. Pour la date de semis D2 (15 mai), la proportion de plants infestés était plus élevée pour les parcelles NT (13,1 % et 13,1 %) que les parcelles T (2,4 % et 0 %) à la troisième (6 juin) et quatrième (11 juin) visite, mais pas pour les visites précédentes. Aucune différence n'a été observée au niveau des proportions de plants infestés entre les parcelles T et NT semées le 19 mai (D3).

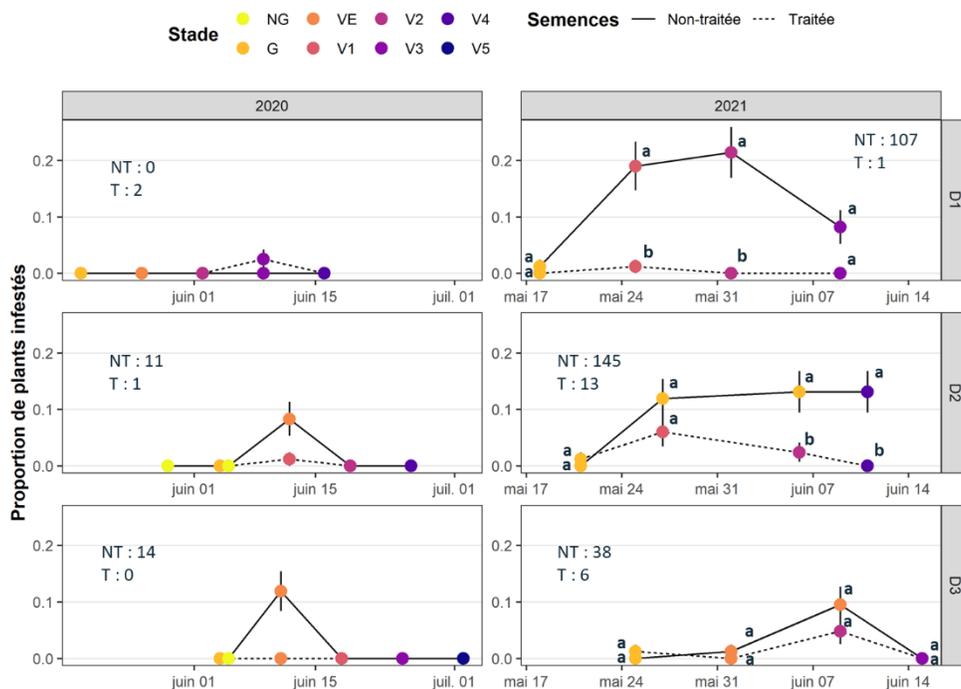


Figure 19. Proportion moyenne de plants de maïs infestés à chaque dépistage pour les différentes dates de semis dans les parcelles avec et sans traitement de semences au chlorantranilprole en 2020 et 2021. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Domages aux plants

Comme pour la proportion de plants infestés, les dommages aux plants ont été analysés seulement pour 2021. En 2020, les dommages aux plants étaient très faibles et similaires entre les parcelles T et NT, à l'exception de celles semées le 28 mai (D3) où ils avaient tendance à être moins importants dans les parcelles T (**Figure 20**). Les dommages aux plants étaient maximums dans la semaine du 8 juin pour les trois dates de semis (D1 : 8 %; D2 : 7,1 %; D3 : 9,5 %). Des dommages plus importants ont été observés dans les parcelles T seulement pour la D1 (13 mai) lors du pic de dommage observé le 8 juin.

En 2021, l'analyse a mis en évidence une interaction triple entre la date de semis, le type de semence et la visite ($\chi^2_{(4)} = 15,10$; $p = 0,005$). La proportion de dommages aux plants augmentait avec les visites (**Figure 20**). Pour la date de semis D1 (11 mai), la proportion de plants endommagés à la troisième visite (1^{er} juin) était significativement plus élevée dans les parcelles NT (61 %) que dans les parcelles T (24 %), mais elle ne différait pas pour les autres dates. Pour la date de semis D2 (15 mai), la proportion de plants endommagés à la quatrième visite (11 juin) était également plus élevée pour les parcelles NT (67 %) que pour les parcelles T (42 %), mais pas pour les visites précédentes. Aucune différence n'a été observée au niveau des proportions de plants endommagés entre les parcelles T et NT semées le 19 mai (D3).

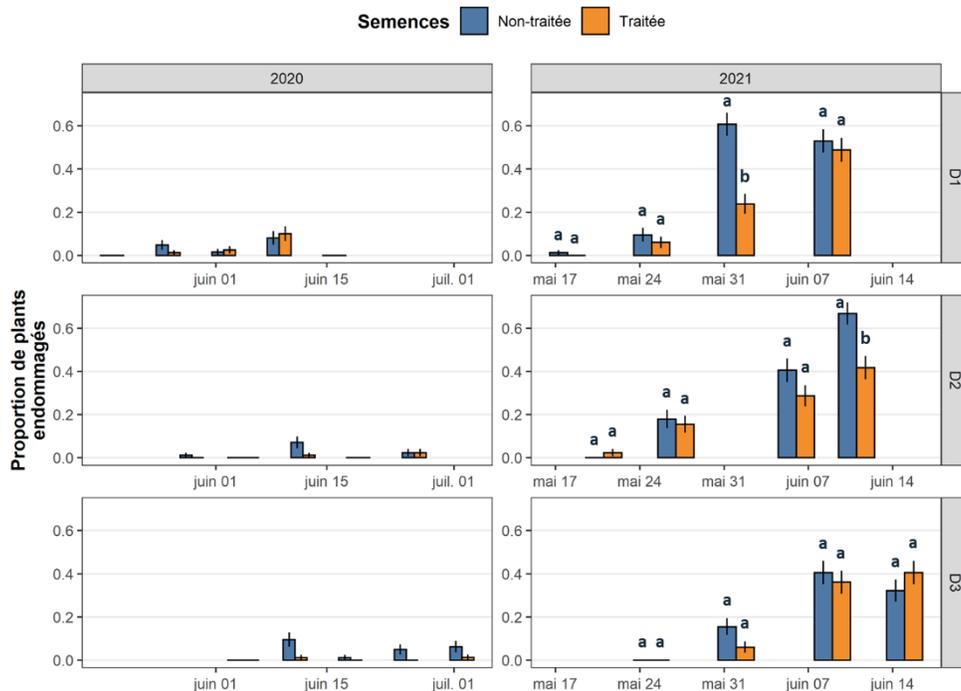


Figure 20. Proportion moyenne de plants de maïs endommagés à chaque dépistage pour les différentes dates de semis dans les parcelles avec et sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. Les barres d'erreur représentent les erreurs types. Une lettre différente indique une différence significative entre les traitements à $p < 0,05$.

Peuplement

L'effet du type de semence sur la densité de peuplement du maïs différait entre les dates de semis mais seulement en 2020 (année x date x semence; LRT; $X_{(2)} = 6,34$; $p = 0,042$; **Figure 21**). En 2020, la densité de population à la première date de semis (13 mai) était plus faible pour le maïs NT que pour le maïs T (5,9 vs 6,2 plants/m), mais elle ne différait pour les autres dates. En 2021, la densité de population était similaire entre les types de semence et les dates de semis.

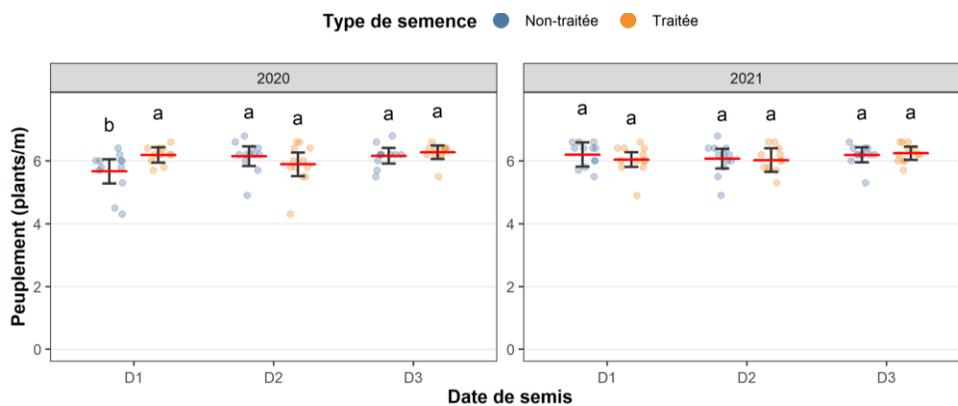


Figure 21. Densité de peuplement moyen du maïs (plants/m) semé à différentes dates avec ou sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. L'évaluation du peuplement a été faite environ 5 semaines après la dernière date de semis. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements ayant une lettre en commun ne diffèrent pas significativement les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Rendement

Le rendement du maïs ne différait pas entre les semences T et NT (semence; LRT; $X_{(1)} = 2,04$; $p = 0,153$). Par contre, l'effet de la date de semis sur le rendement du maïs différait entre les années (interaction année x date; LRT; $X_{(2)} = 10,10$; $p = 0,007$; **Figure 22**). En 2020, le rendement du maïs était plus élevé pour la D1 (9,3 t/ha) que pour la D2 (7,9 t/ha), la D3 ayant un rendement intermédiaire (8,1 t/ha). Aucune différence de rendement n'a été observée en 2021.

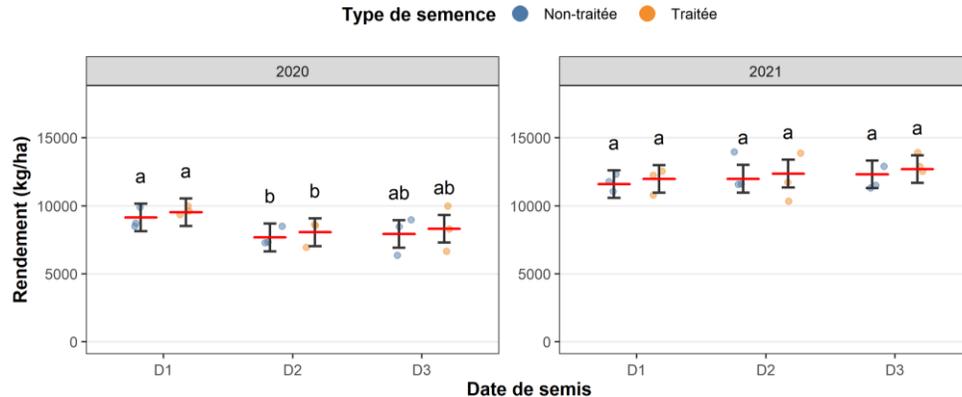


Figure 22. Rendement moyen du maïs (kg/ha) semé à différentes dates avec ou sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements ayant une lettre en commun ne diffèrent pas significativement les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Évaluation de la maturité physiologique

De manière général, le maïs semé plus tardivement a atteint sa maturité physiologique plus tard en saison et avait une période de croissance qui tendait à être légèrement plus longue (3 à 4 jours) (**Figure 23**). Les dates de maturité étaient aussi similaires entre les parcelles T et NT, bien que les parcelles T avaient souvent tendance à arriver à maturité légèrement plus tôt (2 à 5 jours, selon les dates de semis et les années). La seule exception notable était pour le semis D3 en 2020 où les parcelles NT ont atteint la maturité neuf jours avant les parcelles T. En 2021, les dates de maturité étaient plus hâtives et les durées de croissance plus courtes, probablement en raison des conditions climatiques plus chaudes durant la saison.

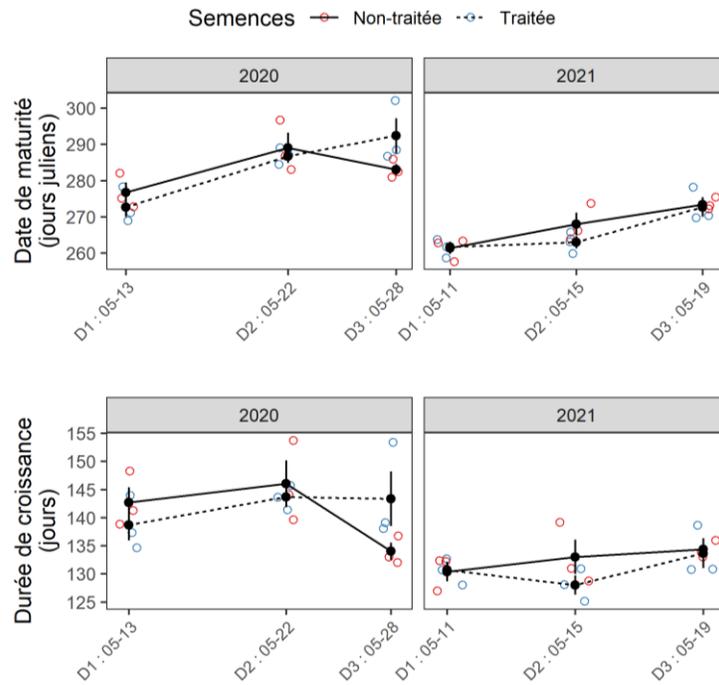


Figure 23. Date de maturité physiologique (jours juliens) et durée de croissance (jours) du maïs pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans traitement de semence au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. Jours de croissance = nombre de jours entre le semis et l'atteinte de la maturité.

2.B – Essais dans le soya

Présence de larves et de pupes

En 2020, un seul plant infesté a été trouvé dans une des parcelles NT semée le 22 mai (D2). En 2021, le taux d'infestation étaient plus élevés dans les parcelles NT que dans les parcelles T (8,7 % vs 4,5 %; **Tableau 8**). Le nombre total de larves était aussi plus élevé dans les parcelles NT (425) que dans les parcelles T (101), résultant en un nombre de larves par plant infesté plus élevé dans les parcelles NT que dans les parcelles T (5 vs 2,2). Le nombre de plants avec présence de pupes était également faible (20) et le nombre de pupes par plant infesté était plus élevé dans les parcelles NT (1,6) que T (1,2).

Tableau 8. Nombre de plants, taux d'infestation des plants et nombre moyen de larves et de pupes par plant pour chaque type de semence (non-traitées et traitées au chlorantraniliprole) dans les essais soya en 2020 et 2021.

Année	Type de semence	Plants observés	Larves				Pupes			
			Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté	Plants infestés	Taux d'infestation (%)	Nb	Nb par plant infesté
2020	Non-traitée	1260	1	0,08	1	1,0	0	0,00	0	-
	Traitée	1260	0	0,00	0	-	1	0,08	1	1,0
2021	Non-traitée	979	85	8,68	425	5,0	11	1,12	18	1,6
	Traitée	1008	45	4,46	101	2,2	8	0,79	10	1,2

Tout comme pour le maïs, les proportions de plants infestés étaient trop faibles en 2020 pour faire une analyse statistique et seules les données de 2021 ont été analysées. L'analyse a mis en évidence une interaction triple entre la date de semis, le type de semence et la visite ($\chi^2_{(2)} = 17,5$; $p < 0,001$). Pour les dates de semis D1 et D2, la proportion de plants infestés était significativement plus élevée pour les parcelles NT (26,2 et 26,8 %, respectivement) à la deuxième visite (25 et 28 mai, respectivement), mais pas pour les autres visites (**Figure 24**). Aucune différence n'a été observée entre les parcelles T et NT semées le 19 mai (D3).

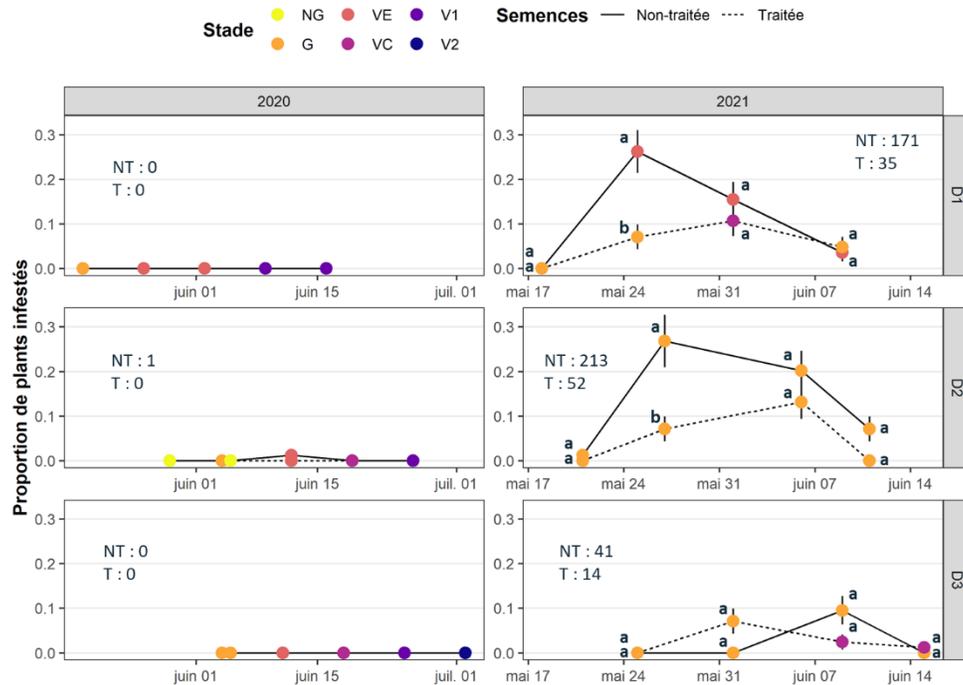


Figure 24. Proportion moyenne de plants de soya infestés à chaque dépistage pour les différentes dates de semis dans les parcelles avec et sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. Les barres d'erreur représentent les erreurs-types.

Domages aux plants

Comme pour la proportion de plants infestés, les données de dommages aux plants ont été analysées seulement pour 2021. En 2020, les dommages aux plants étaient très faibles et similaires entre les parcelles T et NT semées le 28 mai (D3). Les dommages étaient plus importants dans les parcelles T semées le 13 mai (D1) alors qu'ils étaient moins importants dans les parcelles semées le 22 mai (D2; **Figure 25**) en comparaison aux parcelles NT.

En 2021, l'analyse a mis en évidence une interaction triple entre la date de semis, le type de semence et la visite ($\chi^2_{(4)} = 14,9; p = 0,005$). Pour toutes les dates de semis, la proportion de dommages aux plants augmentait jusqu'à la troisième visite avant de se stabiliser (**Figure 25**). Pour les dates de semis D1 (11 mai) et D2 (15 mai), la proportion de plants endommagés était significativement plus faible dans les parcelles T à la deuxième (25 et 27 mai), troisième (1^{er} et 6 juin) et quatrième (9 et 11 juin) visite, à l'exception de la dernière visite pour D1. Pour les parcelles semées le 19 mai (D3), la proportion de plants endommagés était significativement plus élevée pour les parcelles T (11 %) que les parcelles NT (2 %) et aucune différence n'a été observée pour les autres visites.

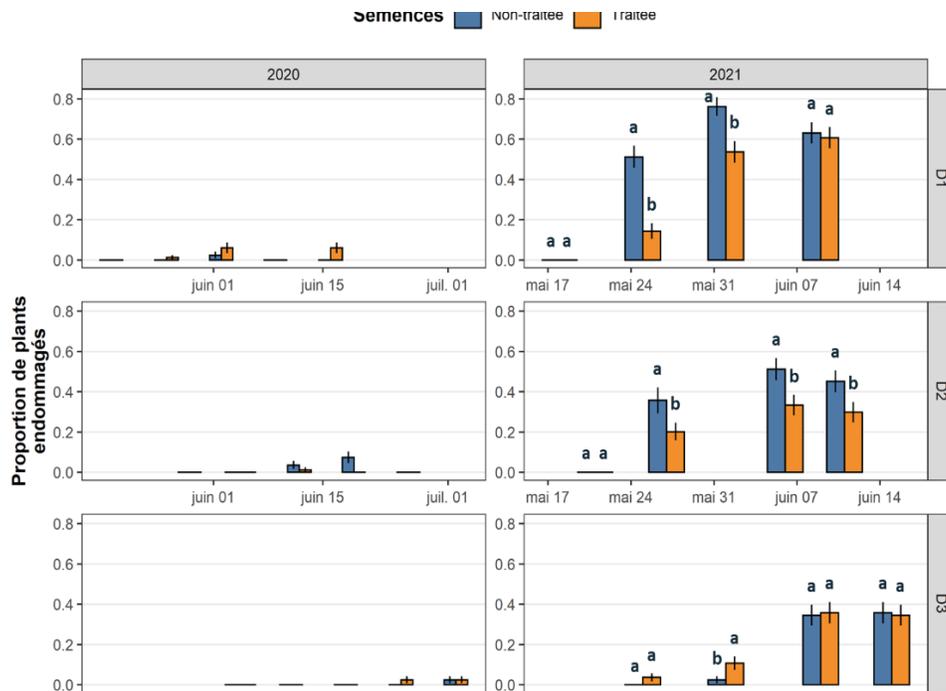


Figure 25. Proportion moyenne de plants de soya endommagés à chaque dépistage pour les différentes dates de semis dans les parcelles avec et sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. Les barres d'erreur représentent les erreurs types.

Peuplement

La densité de peuplement du soya ne différait pas entre les semences T et NT (semence; LRT; $X_{(1)} = 1,90$; $p = 0,168$). Par contre, l'effet de la date de semis sur la densité de peuplement du soya différait entre les années (interaction année x date; LRT; $X_{(2)} = 12,8$; $p = 0,002$; **Figure 26**). En 2020, la densité de peuplement était plus élevée pour D1 (21,5 plants/m) que pour D2 (20,4 plants/m), D3 ayant une valeur intermédiaire (20,7 plants/m). En 2021, la densité de peuplement était plus élevée pour D3 (20,3 plants/m) que pour les deux autres dates (19,2 plants/m).

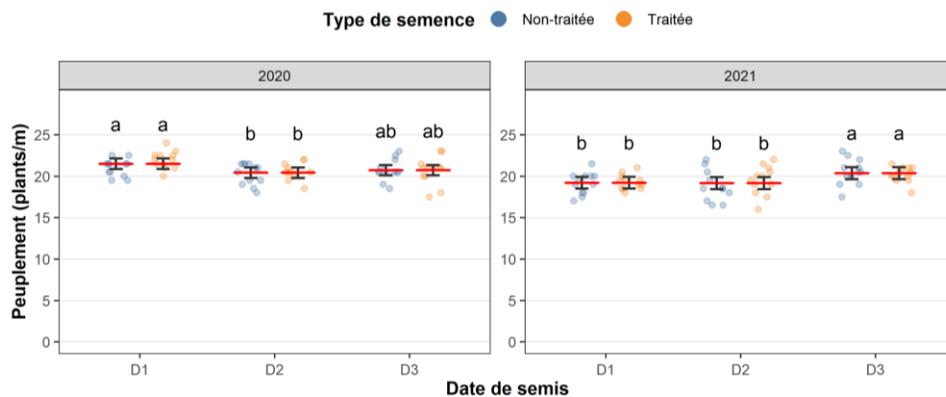


Figure 26. Densité de peuplement moyen du soya (plants/m) semé à différentes dates avec ou sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020 et 2021. L'évaluation du peuplement a été faite environ 5 semaines après la dernière date de semis. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements ayant une lettre en commun ne diffèrent pas significativement les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Rendement

Le rendement du soya ne différait pas entre les semences T et NT (semence; LRT; $X_{(1)} = 0,316$; $p = 0,574$). Par contre, il différait entre les dates de semis (date; LRT; $X_{(2)} = 11,8$; $p = 0,003$; **Figure 27**). En 2020, le rendement était plus élevé pour D1 (3,3 t/ha) que pour les deux autres dates (3,1 t/ha).

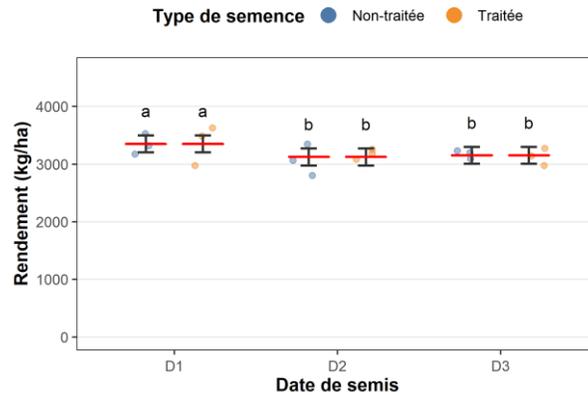


Figure 27. Rendement moyen du soya (kg/ha) semé à différentes dates avec ou sans traitement de semences au chlorantraniliprole en 2020. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95%. Les traitements ayant une lettre en commun ne diffèrent pas significativement les uns des autres ($\alpha = 0,05$).

Évaluation de la maturité physiologique

En 2020, la maturité physiologique a été atteinte trois jours plus tard pour les dates de semis D2 et D3 par rapport à la date D1 (**Figure 28**). La durée de croissance diminuait cependant pour les dates de semis plus tardives. Les semis plus tardifs auraient bénéficié des températures plus chaudes observées plus tard en saison, permettant d'accélérer le développement des cultures.

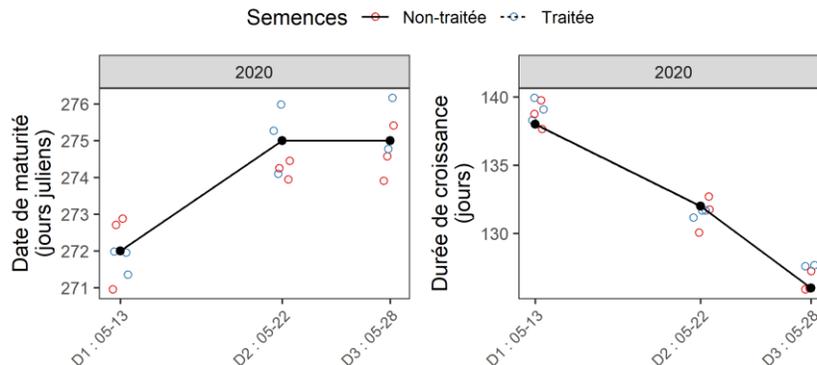


Figure 28. Date de maturité physiologique (jours juliens) et durée de croissance (jours) du soya pour les différentes dates de semis des essais avec ou sans traitement de semence au cyantraniliprole en 2020. Jours de croissance = nombre de jours entre le semis et l'atteinte de la maturité.

Discussion sur l'efficacité des dates de semis en combinaison avec les traitements de semences

Comme la pression de MS était faible en 2020, il n'a pas été possible de valider l'effet des dates de semis en combinaison avec les traitements de semences. Cependant, les résultats obtenus en 2021 ont montré que le décalage des dates de semis et l'utilisation de semences traitées pouvaient aider à la gestion intégrée de la MS. En effet, les semis effectués au début du pic d'activité de la MS (D1 : 13,5 % d'émergence) et proche du milieu du pic (D2 : 41,6 % d'émergence) avaient des proportions de plants infestés et un nombre de larves plus importants, particulièrement pour la date de semis D2. Pour ces dates, le traitement de semence a permis de réduire le nombre de larves et de plants infestés et endommagés. Par contre, aucun bénéfice n'a été apporté par l'utilisation de semences traitées pour la date de semis D3 réalisée proche de la fin du pic d'activité de la MS (80 % d'émergence). Les résultats suggèrent que les dates de semis hors du pic d'activité peuvent permettre d'éviter les infestations et les dommages en lien avec la MS.

Malgré l'effet du traitement de semences sur le nombre de larves et la proportion de plants infestés et endommagés, aucune différence attribuable à la MS n'a été observée entre les semences traitées et non traitées pour la densité de peuplement ou le rendement. L'utilisation des traitements de semences ne serait donc pas pertinente lorsque les infestations sont faibles. Considérant les niveaux de pression de MS assez faibles observés dans le cadre de cet essai, il n'est pas possible de conclure quant à l'efficacité des traitements de semences sous de fortes infestations. Ceci illustre par contre qu'une forte infestation de MS est nécessaire pour causer des dommages et des pertes de rendement justifiant leur utilisation.

Volet 3. Affiner le modèle prédictif de la MS développé au CÉROM et valider son efficacité dans différentes régions au QC

Dynamique de population de la MS

La plupart des 23 sites sélectionnés pour la construction du modèle d'émergence avaient un premier pic de population relativement bien défini avec un taux de captures maximal entre le 20 et le 30 mai (**Figure 29**). Pour certains sites (p. ex. : Saint-Mathieu-de-Beloëil), le pic semblait cependant être constitué de deux pics fusionnés. Des études récentes effectuées dans des champs de cultures maraîchères ont révélé l'existence de deux lignées génétiques distinctes de *D. platura* qui diffèrent par leur phénologie de développement et leur distribution (Savage *et al*, 2016). Ces deux lignées émergeraient à environ 17 jours d'écart, et bien qu'elles aient des distributions géographiques distinctes, celles-ci se chevaucheraient uniquement dans l'est du Canada (Ontario, Québec et Maritimes) (Van der Heyden *et al*, 2020). La présence simultanée des deux lignées au Québec pourrait expliquer la présence des pics de population doubles observés dans certains champs. Il sera donc important de valider leur présence dans les champs de grandes cultures puisque cela risque de diminuer la fiabilité du modèle d'émergence.

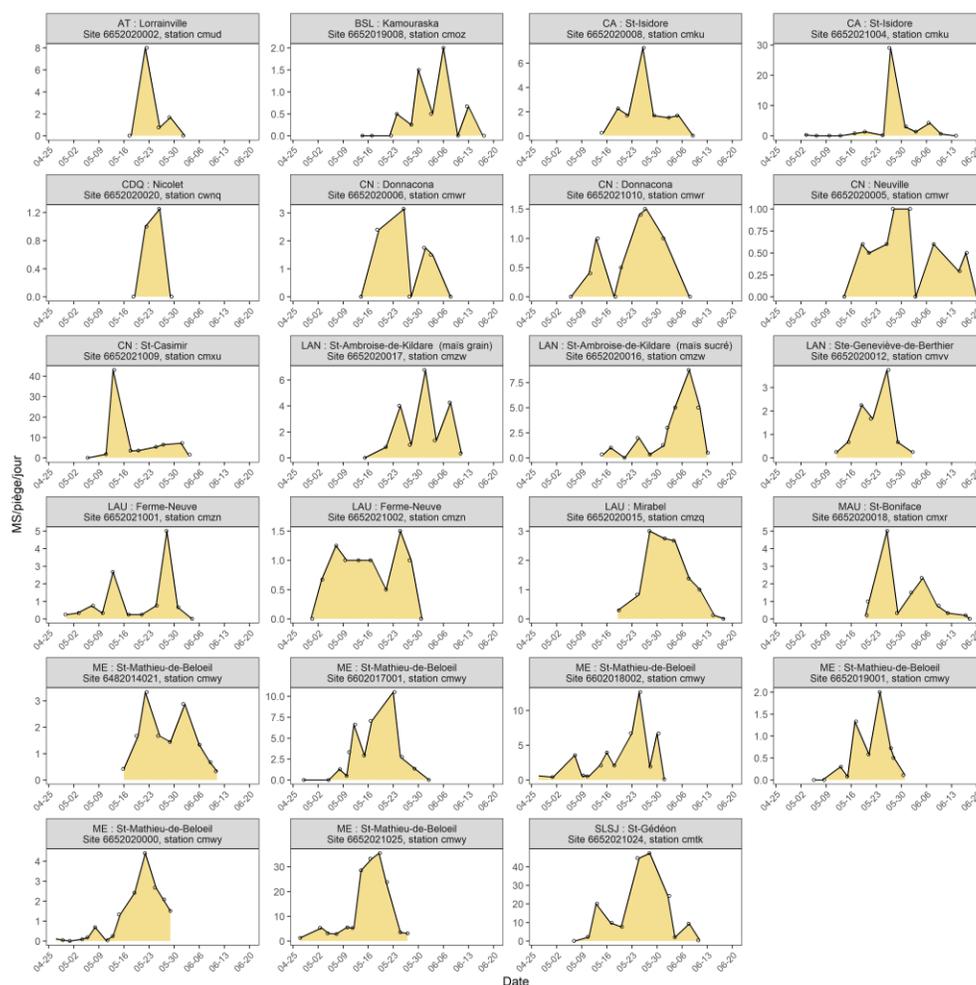


Figure 29. Captures de MS (nb/piège/jour) pendant le premier pic d'activité aux 23 sites utilisés dans la construction du modèle d'émergence.

Modèles d'émergence pour le CÉROM

La relation entre le pourcentage cumulé d'émergence des populations de MS et les DJ_{cum} avaient la forme sigmoïdale typique d'une courbe de croissance (**Figure 30**). Le modèle initial développé pour le CÉROM en 2018 (CÉROM 2018) expliquait beaucoup mieux les données d'émergence ($R^2 = 0,92$; **Tableau 9**) que le modèle de 2020 (CÉROM 2020; $R^2 = 0,80$). Les deux modèles avaient cependant des performances prédictives similaires (RMSE = 0,159 et 0,164, respectivement; **Tableau 9**), ce qui justifie l'inclusion des données de 2019 et 2020 au modèle CÉROM 2018.

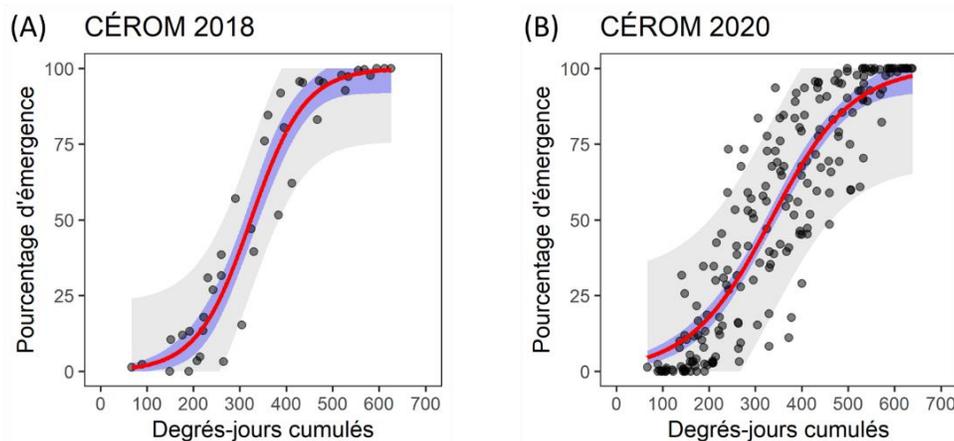


Figure 30. Relation entre le pourcentage cumulé d'émergence des populations de MS et le nombre de degrés-jours cumulés pour les modèles logistiques basés sur les données du CÉROM pour (A) trois ans (2014, 2017, 2018), et (B) cinq ans (2014, 2017 à 2020). Les points correspondent aux valeurs observées, les lignes rouges correspondent à la ligne de régression logistique, et les bandes bleues et grises correspondent aux intervalles de confiance et de prédiction à 95 %, respectivement.

Tableau 9. Paramètres, performance prédictive et nombre de degrés-jours cumulés nécessaires pour atteindre différents pourcentages d'émergence du premier pic de population pour les modèles logistiques d'émergence de la MS basés sur les données du CÉROM uniquement. La performance prédictive a été calculée sur le jeu de données test.

Modèle	Paramètres du modèle				Performance prédictive (RMSE)	Pourcentage d'émergence				
	L	x_0	k	R^2		5 %	25 %	50 %	75 %	95 %
CÉROM 2018	1,00	323,7	57,8	0,92	0,159	154	285	324	387	493
CÉROM 2020	1,01	336,2	88,7	0,80	0,164	74	260	336	430	581

Les prédictions des deux modèles étaient biaisées car elles avaient tendance à surestimer les pourcentages d'émergence. Le modèle CÉROM 2018 surestimait les pourcentages de la deuxième moitié du pic (plus de 50 %) de 2019 et 2020 et de la première moitié du pic (moins de 50 %) de 2021 (**Figure 31**). Le modèle CÉROM 2020 surestimait les pourcentages d'émergence en début de saison et sous-estimait ceux en fin de saison. Cependant, il prédisait bien l'atteinte du pic (50 %; **Figure 32**).

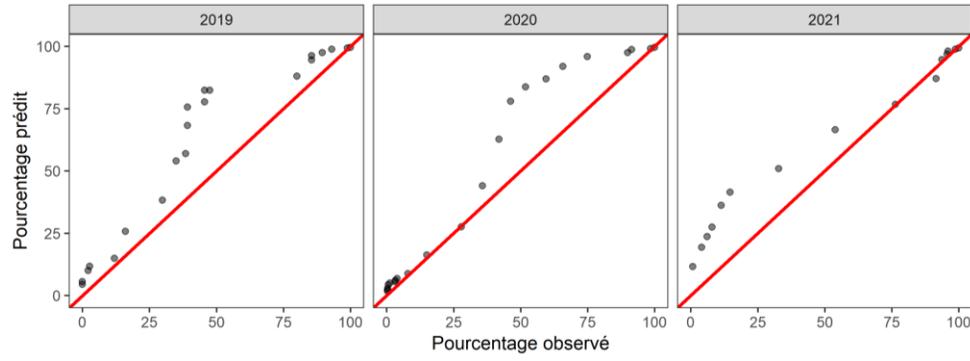


Figure 31. Pourcentage d'émergence observé et prédit par le modèle CÉROM 2018 pour le premier pic de population de MS au CÉROM en 2019, 2020 et 2021. Le modèle a été développé à partir de trois années de données de captures récoltées au CÉROM (2014, 2017, 2018).

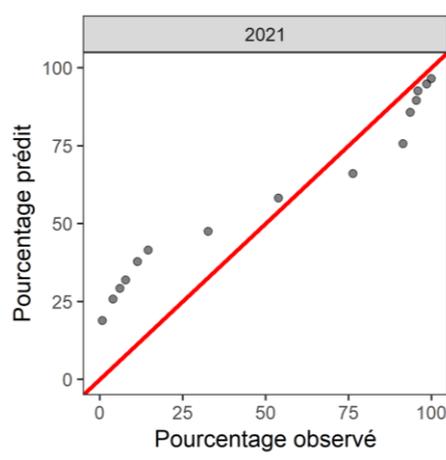


Figure 32. Pourcentage d'émergence observé et prédit par le modèle CÉROM 2020 pour le premier pic de population de MS au CÉROM en 2021. Le modèle a été développé à partir de cinq années de données de captures récoltées au CÉROM (2014, 2017 à 2020).

Les deux modèles différaient également quant au nombre de DJ_{cum} prédits nécessaires pour atteindre un pourcentage d'émergence donnée (**Tableau 9**). Ces différences se remarquaient particulièrement au début et la fin du pic, comme précédemment expliqué. Le modèle CÉROM 2018 prédisait des valeurs plus élevées que le modèle CÉROM 2020 pour la première moitié du pic d'activité, mais la tendance s'inversait pour la deuxième moitié du pic. Par exemple, le nombre de DJ_{cum} prédits par le modèle CÉROM 2018 pour atteindre 5 % d'émergence était supérieur de 80 DJ_{cum} par rapport au modèle CÉROM 2020 (154 vs 74), mais inférieur de 88 DJ_{cum} pour atteindre 95 % d'émergence. Les deux modèles prédisaient cependant un nombre de DJ_{cum} assez similaire pour l'atteinte du pic d'activité (50 % d'émergence), soit 324 et 336 DJ_{cum} , respectivement.

Modèles d'émergence généraux

Afin de généraliser le modèle à d'autres régions, les données de captures récoltées dans différentes régions du Québec ont été ajoutées à la base de données d'entraînement du modèle. La relation entre le pourcentage cumulé d'émergence des populations de MS et les DJ_{cum} pour les 23 sites sélectionnés avaient aussi une forme sigmoïdale (**Figure 33**). Le modèle logistique développé sur ces données (GLOBAL) expliquait la même proportion de variation que le modèle CÉROM 2020 ($R^2 = 0,81$), mais avait une performance prédictive plus faible (RMSE = 0,174; **Tableau 10**).

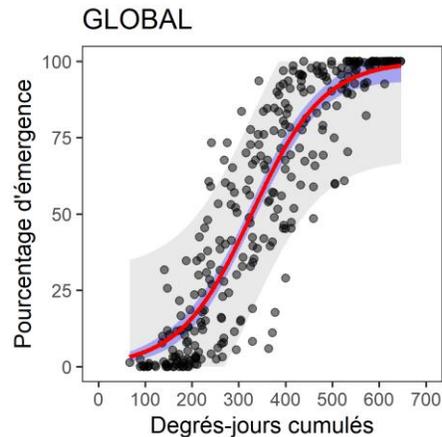


Figure 33. Relation entre le pourcentage cumulé d'émergence des populations de MS et le nombre de degrés-jours cumulés pour le modèle logistique basé sur les données de 23 sites dépistés entre 2014 et 2021. Les points correspondent aux valeurs observées, les lignes rouges correspondent à la ligne de régression logistique, et les bandes bleues et grises correspondent aux intervalles de confiance et de prédiction à 95 %, respectivement.

Tableau 10. Paramètres du modèle logistique, performance prédictive et nombre de degrés-jours cumulés nécessaires pour atteindre différents pourcentages d'émergence du premier pic de population pour les modèles logistique et BRT d'émergence de la MS basés sur les données de 23 sites.

Modèle	Paramètres du modèle				Performance prédictive (RMSE) *	Pourcentage d'émergence				
	L	x_0	k	R^2		5 %	25 %	50 %	75 %	95 %
CÉROM 2018 (logistique)	1,00	323,7	57,8	0,92	0,159	154	285	324	387	493
CÉROM 2020 (logistique)	1,01	336,2	88,7	0,80	0,164	74	260	336	430	581
GLOBAL (logistique)	1,00	333,6	78,5	0,81	0,174	108	250	335	419	554
BRT	-	-	-	0,92	0,117	-	-	-	-	-

* La performance prédictive a été calculée sur le jeu de données test.

Contrairement aux modèles précédents, le modèle logistique GLOBAL était beaucoup moins biaisé et tendait seulement à surestimer légèrement les pourcentages d'émergence au tout début du pic de population (**Figure 34**). Les prédictions de DJ_{cum} étaient assez similaires à celles du modèle CÉROM 2020 (**Tableau 10**), surtout proche du pic de population (50 % d'émergence) où le modèle prédisait le même nombre de DJ_{cum} que le modèle CÉROM 2020 (335 vs 336, respectivement).

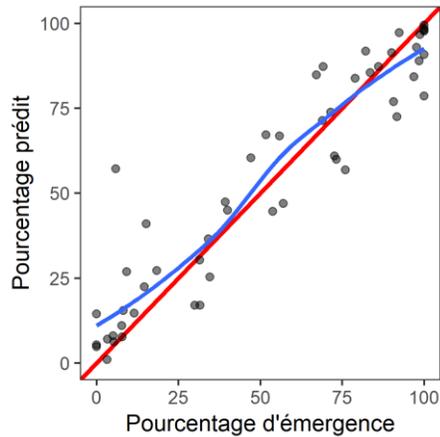


Figure 34. Pourcentage d'émergence observé et prédit par le modèle GLOBAL pour le premier pic de population de MS. Le modèle a été développé à partir de données de captures récoltées dans 23 champs à travers le Québec entre 2014 et 2021.

Modèle BRT

Afin d'améliorer les prédictions, un second modèle utilisant la méthode des BRT a aussi été développé à partir de la base de données complète de captures en incluant un plus grand nombre de variables explicatives. Or, il s'est avéré que la majorité des variables testées avaient une influence extrêmement faible. En outre, les variables de température (DJ_{cum} et moyennes mobiles des températures de l'air et du sol à 10 cm de profondeur) étaient très fortement corrélées entre elles. Ceci a pour effet de diminuer leur importance individuelle puisqu'elles finissent toutes par être incluses à part égale dans le modèle. Il a donc été décidé de retirer les variables qui avaient une influence relative inférieure à 2 %, ainsi que les moyennes mobiles de température. Au final, seules quatre variables ont été retenues pour le modèle (DJ_{cum} , date en jours juliens, latitude, et longitude).

Le modèle BRT construit sur ces variables expliquait une proportion très élevée de la variation des données ($R^2 = 0,91$) et avait une performance prédictive nettement supérieure aux modèles précédents (RMSE = 0,116; **Tableau 10**). Comme pour le modèle logistique GLOBAL, le modèle BRT était très peu biaisé mais tendait lui aussi à surestimer légèrement les pourcentages d'émergence au tout début du pic de population (**Figure 35**).

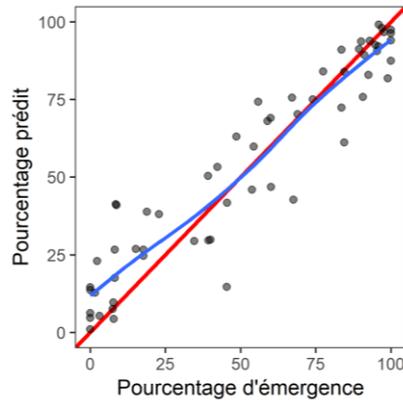


Figure 35. Pourcentage d'émergence observé et prédit par le modèle BRT pour le premier pic de population de MS. Le modèle a été développé à partir de données de captures récoltées dans 23 champs à travers le Québec entre 2014 et 2021.

Influence relative et effets des variables

La variable la plus importante était les DJ_{cum} qui contribuait à elle seule pour 86 % de la variation expliquée par le modèle (**Figure 36**). Les variables géographiques (latitude et longitude) contribuaient ensemble pour 8,8 % de la variation expliquée (4,7 et 4,1 %, respectivement), alors que la date en jours juliens contribuait pour 5,2 %.

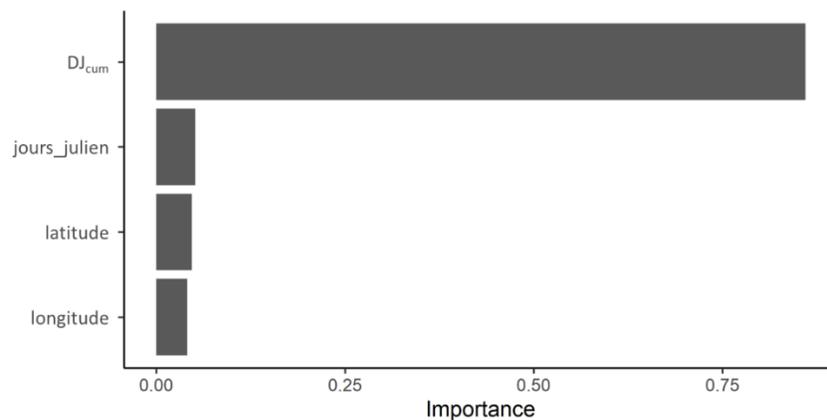


Figure 36. Influences relatives (en ordre décroissant) des variables expliquant le pourcentage d'émergence de la mouche des semis. La somme des valeurs est égale à 100 %.

Discussion sur les modèles

Les modèles logistiques CÉROM 2018 et CÉROM 2020, développés à partir des captures faites au CÉROM, présentaient des performances prédictives similaires et bonnes, mais ils avaient tendance à sous- ou surestimer les pourcentages d'émergence. Par ailleurs, le fait qu'ils aient

été développés sur les données du CÉROM uniquement limite leur généralisation à d'autres régions.

Les modèles généraux, quant à eux, présentaient un meilleur potentiel. En effet, bien que les performances prédictives du modèle logistique GLOBAL étaient similaires à celles des modèles CÉROM, il était moins biaisé et offrait des estimations relativement précises du pourcentages d'émergence, notamment au pic de population (50 % d'émergence). Finalement, le modèle BRT était celui qui présentait les meilleures performances prédictives. Ce type de modèle est cependant très complexe et nécessite l'utilisation d'un ordinateur pour générer des prédictions. Pour cette raison, ils sont souvent considérés comme des « boîtes noires », contrairement aux modèles logistiques qui sont eux basés sur des équations permettant de calculer les prédictions à l'aide d'un tableur (ex : feuilles de calcul Excel) ou même d'une calculatrice.

Une des limitations des modèles développés dans le cadre du présent projet est que le nombre de sites avec des données utilisables (c.à.d. avec une séquence complète pour le premier pic de population de MS) était faible par rapport au nombre total de sites échantillonnés. En conséquence, certaines régions se sont retrouvées largement sous représentées dans le jeu de données (ex : AT, BSL, CA, CDQ, MAU, SLSJ). En outre, pour certaines régions, les sites suivis étaient les mêmes à chaque année ou étaient très rapprochés. Il serait donc nécessaire de récolter plus de données de qualité et d'augmenter la diversité des sites échantillonnés afin d'améliorer les performances prédictives des modèles GLOBAL et BRT. Ultimement, un de ces modèles pourrait être développés sous forme d'une application en ligne permettant de déterminer les périodes de semis optimales en fonction du cumul des degrés-jours, des facteurs de risques et des pratiques agronomiques (projet 20-002-CEROM). Ceci permettrait d'aider à une améliorer la gestion intégrée de la MS dans les grandes cultures au Québec.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

BOQUEL S. (2019). La mouche des semis dans les grandes cultures au Québec. Présentation donnée dans le cadre du comité *Ad-Hoc* sur les semences traitées aux insecticides. 22 Octobre 2019, Saint-Hyacinthe. Communication orale. 13 personnes.

BOQUEL S. (2020). Résultats de recherche et perspectives sur la mouche des semis – Année 2019. Réunion annuelle du groupe de travail du RAP Grandes cultures sur les ravageurs des semis. 14 février 2020, Drummondville. Communication orale. 8 personnes.

BOQUEL S. (2020). La mouche des semis dans les grandes cultures au Québec. Présentation donnée dans le cadre d'une webconférence pour la journée de formation agronomique (organisée par Dekalb). 1^{er} Avril 2020. Réunion virtuelle. 30-40 personnes.

BOQUEL S. (2020). La mouche des semis : description, biologie, résultats de recherche. Formation aux dépisteurs du RAP Grandes cultures sur les ravageurs des semis. 1^{er} mai 2020. Réunion virtuelle. 15 personnes.

BOQUEL S. (2021). Mise au point des connaissances sur la mouche des semis dans les grandes cultures au Québec. Activité d'échanges entre conseillers de l'Association des conseillers en agroenvironnement du Québec (ACAQ). 21 Janvier 2021. Réunion virtuelle. 110 personnes.

BOQUEL S. (2021). Résultats de recherche et perspectives sur la mouche des semis – Année 2020. Réunion annuelle du groupe de travail du RAP Grandes cultures sur les ravageurs des semis. 4 février 2021. Réunion virtuelle. 11 personnes.

BOQUEL S. (2021). Gestion intégrée de la mouche des semis dans les grandes cultures : facteurs de risque, stratégie de lutte et état actuel de la recherche. Webinaires grandes cultures du Saguenay-Lac-Saint-Jean (organisé par le MAPAQ et les Producteurs de grains du Saguenay-Lac-Saint-Jean). 18 Mars 2021. Réunion virtuelle. 30 personnes.

BOQUEL S. (2021). Mise au point des connaissances sur la mouche des semis dans les grandes cultures. Webinaire organisé par le groupe de travail du RAP Grandes cultures sur les ravageurs des semis et les directions régionales de la Montérégie-Est et de la Montérégie-Ouest du MAPAQ. 30 mars 2021. Réunion virtuelle. 80 personnes.

BOQUEL S. (2021). La recherche sur la mouche des semis dans les grandes cultures. Présentation donnée dans le cadre du conseil d'administration du CÉROM. 15 Septembre 2021. Réunion virtuelle. 15 personnes.

BOQUEL S. (2022). La recherche sur la mouche des semis – Résultats 2021. Réunion annuelle du groupe de travail du RAP Grandes cultures sur les ravageurs des semis. 22 janvier 2022. Réunion virtuelle. 9 personnes.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Les résultats de ce projet ont montré que devancer ou retarder le semis permettrait d'éviter les dommages de MS dans le maïs et le soya. En effet, les taux d'infestation étaient plus élevés pour les semis réalisés proche des pics d'activité de la MS. Aussi, même lorsque des taux d'infestation plus élevés étaient observés pour les semis effectués en dehors des pics d'activité, les plants étaient généralement à des stades de croissance plus avancés, donc moins sensibles. Dans tous les cas, même pour les dates de semis les plus affectées, aucune différence de peuplement et de rendement attribuable à la MS n'a été notée. Il faut cependant mentionner que la pression de MS était relativement faible pendant les deux années de l'essai. En dépit des faibles quantités de larves et de pupes retrouvées, des pourcentages assez élevés de plants endommagés avaient toutefois pu être observés en 2019, particulièrement dans le soya. Ce constat souligne l'importance de baser le dépistage de la MS sur la présence de larves au champ plutôt que sur les dommages aux plants. Des infestations plus importantes auraient possiblement permis de confirmer certaines des tendances observées et éventuellement de conclure sur l'efficacité des dates de semis.

L'utilisation de semences traitées pourraient aussi aider à la gestion intégrée de la MS dans les champs les plus à risque. En effet, le traitement de semence a permis de réduire le nombre de larves, de plants infestés et de plants endommagés pour les semis effectués durant le pic d'activité. Par contre, aucune différence n'a été observée au niveau de la densité de peuplement ou du rendement, ce qui suggère que l'utilisation des traitements de semences ne serait pas pertinente lorsque les infestations sont faibles. Par ailleurs, aucun bénéfice n'a été apporté par l'utilisation de semences traitées pour la date de semis réalisée à la fin du pic d'activité de la MS. Ceci renforce la possibilité qu'un des moyens de lutte prophylactique serait de faire les semis en dehors des pics d'activité de la MS afin d'éviter les infestations et les dommages en lien avec ce ravageur.

Les expériences en laboratoire ont montré que la ponte des MS femelles était maximale deux semaines après l'émergence. Ceci concorde avec les observations en champ qui ont montré que les abondances de larves et les proportions de plants endommagés étaient généralement plus élevées deux à trois semaines après le pic d'activité de la MS. Il n'a cependant pas été possible de déterminer le(s) stade(s) de ponte préféré(s), bien que la probabilité de ponte et le nombre d'œufs pondus semblaient plus élevés juste avant ou à l'émergence des plants. Par contre, les pontes observées dans les témoins suggèrent que les MS femelles n'ont peut-être pas de préférence et qu'elles pondraient plutôt de manière aléatoire. D'autres mécanismes, comme l'émission de composés organiques volatiles par les grains en germination, pourraient avoir un effet sur la stimulation de la ponte.

Un des modèles d'émergence développés dans le cadre de ce projet a montré une bonne capacité à prédire les pourcentages d'émergence de la MS en début de saison. Ce modèle pourrait éventuellement être utilisé sous forme d'un outil en ligne permettant de déterminer les périodes de semis optimales en fonction du cumul des DJ, des pratiques agronomiques et des facteurs de risques (projet 20-002-CEROM). À titre d'exemple, la présente étude confirme les

conclusions d'un précédent projet (Boquel & Latraverse 2019) qui montrait que le FP est très attractif pour la MS et doit être utilisé avec précaution.

Finalement, les essais en champ montrent que la présence de larves et de dommages ne se traduisait pas nécessairement en des pertes de peuplement ou de rendement associée à la présence de MS. Ceci suggère que de fortes infestations proches de la date du semis, combinées à des pratiques agronomiques favorisant la MS, sont nécessaires pour impacter négativement les composantes du rendement du maïs et du soya. Ainsi, l'utilisation de traitements insecticide de semence ne serait pas toujours justifiée et le décalage des dates de semis pourrait aider à déjouer les dommages en lien avec ce ravageur.

PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION

Sébastien Boquel, PhD.,
Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM),
740 chemin Trudeau,
Saint-Mathieu-de-Beloeil, J3G 0E2
Tel : +1 (450) 464 – 2715 poste 249,
Courriel : Sebastien.Boquel@cerom.qc.ca

REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS

Les auteurs remercient Gilles Tremblay (MAPAQ) et Louise O'Donoghue (CÉROM) pour leurs conseils sur le choix des hybrides de maïs et variétés de soya. Merci à Stéphane Myre (Bayer) pour avoir fourni des semences de maïs provenant du même lot. Les auteurs remercient également François Fournier et Marc-André Villeneuve (Collège Montmorency) pour avoir fourni les MS ayant permis la réalisation des expériences en laboratoire. Un grand merci aux collaborateurs et agronomes du MAPAQ pour le suivi des populations de MS dans les différentes régions du Québec. Finalement, les membres de l'équipe du CÉROM ayant participé à la mise en place des essais, à la collecte des échantillons et à l'analyse des données sont chaleureusement remerciés.

Ce projet a été réalisé en vertu du sous-volet 3.1 du programme Prime-Vert 2018-2023 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ).



RÉFÉRENCES

- Boquel S, Latraverse A. (2019). Modèle prévisionnel et facteurs de risque pour la mouche des semis dans les grandes cultures au Québec. Rapport final du projet CERO-1-16-1760. *Agri-réseau*, 24 pp.
- Elith J, Leathwick JR, Hastie T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77(4): 802-813.
- Friedman JH. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5): 1189-1232.
- Friedman JH, Meulman JJ. (2003). Multiple additive regression trees with application in epidemiology. *Statistics in Medicine*, 22(9): 1365-1381.
- Funderburk JE, Higley LG, Pedigo LP. (1984). Seed corn maggot (Diptera: Anthomyiidae) phenology in central Iowa and examination of a thermal-unit system to predict development under field conditions. *Environmental Entomology*, 13: 105-109.
- Kuhn M, Wickham H. (2020). Tidymodels: a collection of packages for modeling and machine learning using tidyverse principles. <https://www.tidymodels.org>.
- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org>.
- Savage J, Fortier A-M, Fournier F, Bellavance V. (2016). Identification of *Delia* pest species (Diptera: Anthomyiidae) in cultivated crucifers and other vegetable crops in Canada. *Canadian Journal of Arthropod Identification*, 29(29): 1-40.
- Tremblay GJ, Filion P, Tremblay M, Bérard M, Durand J, Goulet J, Montpetit JM. (2008). Évolution de la teneur en eau des grains et détermination de la maturité physiologique du maïs-grain (*Zea mays* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, 88: 679-685.
- Van der Heyden H, Fortier A-M, Savage J. (2020). A HRM assay for rapid identification of members of the seedcorn maggot complex (*Delia florilega* and *D. platura*) (Diptera: Anthomyiidae) and evidence of variation in temporal patterns of larval occurrence. *Journal of Economic Entomology*, 113(6): 2920-2930.