

**CARACTÉRISTIQUES DES CHAMPS ET FACTEURS AGRONOMIQUES
FAVORISANT LA MOUCHE DES SEMIS DANS LES GRANDES CULTURES AU
QUÉBEC**

20-002-CEROM

DURÉE DU PROJET : AVRIL 2020 / FÉVRIER 2023

RAPPORT FINAL

Réalisé par :
Sébastien Boquel, CÉROM
Sandrine Corriveau-Tousignant, CÉROM
Alexis Latraverse, CÉROM
François Fournier, Collège Montmorency
Marc-André Villeneuve, Collège Montmorency

MAI 2023

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

CARACTÉRISTIQUES DES CHAMPS ET FACTEURS AGRONOMIQUES FAVORISANT LA MOUCHE DES SEMIS DANS LES GRANDES CULTURES AU QUÉBEC

20-002-CEROM

RÉSUMÉ DU PROJET

La mouche des semis (MS), *Delia platura* (Meigen) (Diptera : Anthomyiidae), est un ravageur cosmopolite et polyphage qui s'attaque à plusieurs plantes de grandes cultures et maraîchères. La larve se nourrit des parties souterraines des jeunes plants (graines, racines, tiges, cotylédons), ce qui peut entraîner des retards de croissance et même la mort des plants. Bien qu'elle soit un ravageur sporadique dans la culture du maïs et du soya, elle peut causer la perte totale des plantules sur plusieurs hectares.

Afin d'élucider les mécanismes d'attraction de la MS, les données de capture de larves de MS récoltées dans le cadre du dépistage des ravageurs des semis fait par le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) Grandes cultures depuis 2014 ont été analysées à l'aide de la méthode des arbres de régression « boostés » (*Boosted Regression Trees* ou BRT). Le modèle d'occurrence de la MS développé avait une performance prédictive relativement faible, mais il a tout de même permis d'identifier certaines variables favorisant la présence de larves et de pupes de MS dans les champs du Québec. Cinq variables en particulier contribuaient à elles seules pour 65 % de la variation expliquée par le modèle, soit la région administrative (33 %), la pression de mauvaises herbes (10,3 %), la superficie du champ (8,1 %), la date de semis (7,1 %), et le pourcentage de matière organique du sol (6,8 %).

Afin de valider le modèle, des plants ont été récoltés dans des champs de maïs et de soya et les taux d'infestation de ces derniers ont été comparés aux facteurs de risque identifiés. Le modèle s'est avéré peu exact dans ses prédictions (proportion des sites correctement prédits), mais a tout de même permis de montrer que les taux de capture observés concordaient bien avec plusieurs des facteurs de risque identifiés. Il est également apparu que l'occurrence de la MS est dictée par des combinaisons de facteurs de risque. Il sera donc important que les futures études se concentrent sur certaines combinaisons de facteurs, afin de déterminer le poids respectif des facteurs impliqués.

Les tests d'olfactométrie n'ont pas permis de mettre en évidence une attractivité de la MS pour les différents amendements. Cependant, les expériences d'oviposition ont montré que les pontes étaient plus importantes dans les sols avec des semences en germination que dans les sols sans semences, et ce, quel que soit le type de semences (traitées ou non avec un insecticide). Par ailleurs, la présence de matière organique en décomposition ou de semence en germination stimulait la ponte des MS. D'autres études seraient nécessaires pour valider si ces pontes plus importantes se traduisent par des dommages plus importants dans les cultures de maïs et de soya.

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ DU PROJET	1
OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE	3
VOLET 1. DOCUMENTER LES CARACTÉRISTIQUES DES CHAMPS ET LES FACTEURS AGRONOMIQUES QUI FAVORISENT LA PRÉSENCE DE LA MS	3
Préparation des données	3
Variables utilisées	4
Analyse des données	5
VOLET 2. VALIDER LES CARACTÉRISTIQUES DES CHAMPS ET LES PRATIQUES AGRONOMIQUES QUI FAVORISENT LA PRÉSENCE DE LA MS	5
Choix des sites	5
Échantillonnage et évaluation des dommages	6
Analyses statistiques.....	6
VOLET 3. CARACTÉRISER L'ATTRACTION DE LA MS POUR DIFFÉRENTS AMENDEMENTS ORGANIQUES	7
Effet des semences de maïs ou de soya traitées et non-traitées sur la ponte de la MS	9
Effet des amendements de sol sur la ponte de la MS.....	9
Évaluation de l'attractivité des amendements en olfactométrie.....	10
RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS.....	12
VOLET 1. DOCUMENTER LES CARACTÉRISTIQUES DES CHAMPS ET LES FACTEURS AGRONOMIQUES QUI FAVORISENT LA PRÉSENCE DE LA MS	12
Dépistage des larves de MS	12
Évaluation des modèles BRT	13
Influence relative et effets des variables	13
VOLET 2. VALIDER LES CARACTÉRISTIQUES DES CHAMPS ET LES PRATIQUES AGRONOMIQUES QUI FAVORISENT LA PRÉSENCE DE LA MS	17
Échantillonnages ciblés versus aléatoires	17
Proportion de plants endommagés	19
Nombre de larves et de pupes par plant	19
Validation des prédictions du modèle	19
Taux de captures vs facteurs de présence	20
VOLET 3. CARACTÉRISER L'ATTRACTION DE LA MS POUR DIFFÉRENTS AMENDEMENTS ORGANIQUES	22
Effet des semences de maïs ou de soya traitées et non-traitées sur la ponte de la MS	22
Effet des amendements de sol sur la ponte de la MS.....	23
Évaluation de l'attractivité des amendements en olfactométrie.....	27
DIFFUSION DES RÉSULTATS	32
APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE.....	33
PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION	34
REMERCIEMENTS AUX PARTENAIRES FINANCIERS	34
ANNEXE 1 : LES ARBRES DE RÉGRESSION « BOOSTÉS »	36
ANNEXE 2 : PROPORTIONS DE PLANTS ENDOMMAGÉS DANS LES SITES DÉPISTÉS	38
ANNEXE 3 : TAUX D'INFESTATION DES PLANTS DANS LES SITES DÉPISTÉS.....	40
ANNEXE 4 : TABLEAUX DES TAUX DE CAPTURE GLOBAUX ET DES STATIONS CIBLÉES ET FACTEURS DE RISQUE IDENTIFIÉS PAR LE MODÈLE DANS LES 56 CHAMPS DÉPISTÉS.....	42
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	45

OBJECTIFS ET APERÇU DE LA MÉTHODOLOGIE

Le présent projet avait pour but d'étudier les facteurs de risque pouvant expliquer les infestations de MS dans les cultures de maïs et de soya. Les objectifs spécifiques étaient (i) d'évaluer l'influence de diverses variables biotiques et abiotiques sur l'occurrence des larves et/ou des pupes de MS dans les champs de grandes cultures, et (ii) valider les facteurs de risque identifiés sur l'attraction et la fécondité des MS femelles au champ et en laboratoire.

Volet 1. Documenter les caractéristiques des champs et les facteurs agronomiques qui favorisent la présence de la MS

Depuis 2014, le RAP Grandes cultures réalise annuellement le suivi des populations de ravageurs des semis à l'aide de pièges-appâts dans une soixantaine de champs à travers le Québec. Les principaux ravageurs ciblés dans le cadre de ces dépistages sont les vers fil-de-fer, les larves et/ou des pupes de la MS, ainsi que les vers blancs. Des informations sur les caractéristiques des champs et les pratiques agricoles sont aussi recueillies pour chacun des champs. Les données quotidiennes de températures de l'air et du sol, à 10 cm de profondeur, ainsi que les données de précipitations ont été obtenues à partir de la station [Agrométéo Québec](#) la plus proche de chacun des sites.

Les données de dépistage ont été compilées et validées avec les rapports d'analyses du Laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection (LEDP) du MAPAQ. Ces données ont ensuite été analysées afin d'évaluer l'influence relative des facteurs environnementaux et agronomiques sur la probabilité de retrouver des larves et/ou des pupes de MS dans les champs.

Préparation des données

La base de données initiale comptait 599 champs dépistés entre 2014 et 2022 à travers 13 régions du Québec (Abitibi-Témiscamingue, Bas-Saint-Laurent, Capitale-Nationale, Centre-du-Québec, Chaudière-Appalaches, Estrie, Lanaudière, Laurentides, Mauricie, Montérégie-Est, Montérégie-Ouest, Outaouais, Saguenay-Lac-Saint-Jean). Les pièges-appâts étaient posés en début de saison (dès que la température du sol se maintenait à 8 °C ou plus depuis au moins sept jours) et relevés une fois par semaine pendant trois semaines, pour un total de 1 791 relevés. Pour chaque site, seul le relevé de printemps avec le taux de capture de larves le plus élevé a été conservé pour l'analyse. Les relevés dont la durée de piégeage dépassait 15 jours ont été retirés. Finalement, la base de données utilisée pour construire les modèles comptait un total de 593 site-relevés.

Variables utilisées

Le **Tableau 1** présente les variables utilisées dans la construction du modèle. La variable réponse du modèle était la présence de larves et/ou de pupes de MS dans les champs. Les variables explicatives étaient les caractéristiques géographiques (région administrative, latitude, longitude), ainsi que les caractéristiques du champs (élévation, superficie, abondance de mauvaises herbes) et du sol (texture du sol, pourcentage de matière organique du sol). Les pratiques culturales (date de semis, type de travail de sol, type d'amendement organique au printemps, utilisation de semences traitées) et les précédents culturaux jusqu'à trois ans avant le dépistage ont aussi été intégrés dans le modèle.

Les données météorologiques ont été synthétisées de la manière suivante avant d'être intégrées dans les modèles. Les températures moyennes de l'air et du sol et les précipitations moyennes et totales ont été calculées pour des périodes d'une, de deux, de quatre, et de huit semaines avant le relevé de piège, ainsi que pour les mois de mars, d'avril, de mai, et de juin. Les degrés-jours en base 3,9 °C¹ ont été cumulés entre le relevé et le 1^{er} janvier, le 1^{er} février, le 1^{er} mars, et le 1^{er} avril.

Tableau 1. Variables utilisées dans la construction du modèle.

Nom court	Description	Type
<i>Variable réponse</i>		
Delia_L_pa	Présence de larves de mouches des semis (oui/non)	Nominale
<i>Caractéristiques géographiques</i>		
region	Région administrative	Nominale
latitude	Latitude (degrés décimaux)	Numérique
longitude	Longitude (degrés décimaux)	Numérique
<i>Caractéristiques du champ</i>		
elevation	Élévation du champ (m)	Numérique
field_area	Superficie du champ (ha)	Numérique
weeds	Présence de mauvaises herbes (oui/non)	Nominale
<i>Caractéristiques de sol</i>		
soil_texture_6	Texture de sol (argileux, loam argileux, loam limoneux, loam sableux, sableux, organique)	Nominale
organic_matter	Matière organique du sol (%)	Numérique
<i>Pratiques culturales</i>		
date_sowing_jul	Date de semis (jours juliens)	Numérique
tillage_4	Travail de sol (conventionnel, réduit, semis-direct, aucun)	Nominale
org_fert_spring	Type d'amendement organique au printemps (porcin, bovin, poulet, autre)	Nominale
seed_trt_0_pres	Utilisation de semences traitées l'année en cours (oui/non)	Nominale
crop_0	Culture de l'année (céréale, maïs, soya, culture fourragère, autre)	Nominale
crop_1	Culture 1 an auparavant (céréale, maïs, soya, culture fourragère, autre)	Nominale
crop_2	Culture 2 ans auparavant (céréale, maïs, soya, culture fourragère, autre)	Nominale
crop_3	Culture 3 ans auparavant (céréale, maïs, soya, culture fourragère, autre)	Nominale
<i>Données météorologiques</i>		
Tmean_Xw	Température moyenne des 1, 2, 4, et 8 semaines avant le relevé de pièges	Numérique
Tmean_month	Température moyenne en mars, avril, mai, et juin	Numérique
TSmean_10cm_Xw	Température moyenne du sol des 1, 2, 4, et 8 semaines avant le relevé de pièges	Numérique
TSmean_10cm_month	Température moyenne du sol en mars, avril, mai, et juin	Numérique
DDsin_b3.9_cum_month	Degrés-jours (base 3,9°C) cumulés entre le relevé et le 1 ^{er} janvier, février, mars, et avril	Numérique
RFtot_Xw	Précipitations totales des 1, 2, 4, et 8 semaines avant le relevé de pièges	Numérique

¹ La température de base est le point sous lequel le développement de l'organisme cesse.

RFtot_month	Précipitations totales en mars, avril, mai, et juin	Numérique
RFmean_Xw	Précipitations moyennes des 1, 2, 4, et 8 semaines avant le relevé de pièges	Numérique
RFmean_month	Précipitations moyennes en mars, avril, mai, et juin	Numérique

Analyse des données

La relation entre la présence de larves et/ou de pupes de MS dans les champs et les variables explicatives a été analysée à l'aide de la méthode des arbres de régression « boostés » (*Boosted Regression Trees* ou BRT; Elith et al. 2006, 2008). L'**annexe 1** peut être consultée pour obtenir plus de détails sur la méthode d'analyse. Les analyses ont été faites à l'aide du logiciel R 4.0.3 (R Core Team 2020). Les modèles de BRT ont été construits à l'aide de la bibliothèque *dismo* v1.3.3 (Hijmans et al. 2020 ; fonction *gbm.step*).

Un premier modèle basé sur les taux de capture a été testé, mais en raison de la quantité importante de zéros et de valeurs très faibles dans les données, celui-ci n'est pas parvenu à converger vers une solution finale. Pour cette raison, il a été décidé de construire des modèles basés uniquement sur la présence-absence de larves et/ou de pupes. Pour chacun des modèles, le nombre d'arbres (*nt*) optimal a été déterminé pour différentes combinaisons de *bf* (0,5; 0,75), *lr* (0,01; 0,005; 0,001), et *tc* (1, 3, 5, 7). La performance de chacun des modèles a été évaluée à l'aide d'une procédure de validation croisée à 10 blocs (*10-fold cross-validation*). L'aire sous la courbe de ROC (*Receiver Operating Characteristic*), c.à.d. l'AUC (*Area Under the Curve*), ainsi que la déviance expliquée ont été calculées pour chaque modèle. Le modèle avec les valeurs les plus élevées pour l'AUC et la déviance expliquée a été sélectionné.

L'influence relative (IR) des variables prédictives a été mesurée à l'aide des formules développées par Friedman (2001) et implémentées dans la bibliothèque *gbm*. Cette mesure est basée sur le nombre de fois où une variable est sélectionnée pour la division, pondérée par 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). L'IR des variables est ensuite réajustée de manière 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). L'effet marginal des variables explicatives sur la variable réponse a été visualisé à l'aide de graphiques de dépendance partielle (*partial dependence plots* ou PDP; fonction *gbm.plot*).

Volet 2. Valider les caractéristiques des champs et les pratiques agronomiques qui favorisent la présence de la MS

Choix des sites

Afin de valider les facteurs de risque identifiés au volet 1, des plantules ont été récoltées au début des saisons 2021 et 2022 dans 56 champs (35 en maïs, 21 en soya) à travers 12 régions du Québec (Abitibi-Témiscamingue, Capitale-Nationale, Centre-du-Québec, Chaudière-Appalaches, Estrie, Lanaudière, Laurentides, Mauricie, Montérégie-Est, Montérégie-Ouest, Outaouais, Saguenay-Lac-Saint-Jean). Parmi ces 56 champs, 10 ont été

sélectionnés en raison de possibles infestations de MS en début de saison dans le but de mieux étudier les facteurs de risque. Les autres ont été choisis de manière à obtenir une gamme de facteurs de risque d'intérêt. Bien qu'il fût initialement prévu de favoriser les champs semés avec des semences non-traitées aux insecticides, il n'a pas été facile de trouver des champs respectant cette condition. Finalement, 27 sites n'avaient aucun traitement de semence insecticide contre 26 avec traitement (3 non-définis).

Échantillonnage et évaluation des dommages

Dans chaque champ, des plants étaient prélevés une fois par semaine pendant trois semaines, en commençant 7 à 10 jours après le semis. Deux types de station d'échantillonnage étaient sélectionnés à chaque visite, soit (i) 10 stations choisies aléatoirement (en suivant un patron en W, U, Z, ou autre) et (ii) cinq stations présentant des signes d'infestation (manques à la levée ou retards de croissance). Ces deux types de station avaient pour but d'évaluer, respectivement, le pourcentage du champ touché par la MS et l'intensité des dommages causés par la MS. L'emplacement des stations était différent à chacune des trois visites.

À chaque station, une portion de rang représentative était sélectionnée et des grains et/ou plants (selon le stade de croissance) consécutifs étaient déterrés (5 par station aléatoire et 10 par station avec signes d'infestation). Lorsqu'un plant semblait manquant, la terre était creusée pour vérifier si le grain était présent. Si celui-ci était présent, il était prélevé, sinon le dépisteur passait au plant suivant. Tous les grains et/ou plants d'une même station étaient placés dans un sac en plastique avec la terre entourant le grain (environ 4 à 5 cm de diamètre). Au total, 100 plants étaient prélevés par visite, soit 50 plants par type de station.

Les échantillons étaient envoyés au CÉROM où les grains et les plants étaient inspectés à la recherche de dommages et de larves de MS. La terre dans les sacs était aussi triée à la recherche de larves et de pupes. L'emplacement des dommages était noté (grains, cotylédons, tige, ou racines) et les larves et pupes étaient dénombrées.

Analyses statistiques

Comme une proportion importante de larves et de pupes de MS a été retrouvée dans la terre au fond des sacs et non dans les plants, les taux d'infestation des plants à chaque station ont été calculés en faisant la somme des larves et des pupes retrouvées divisée par le nombre de plants récoltés.

Afin de comparer les deux méthodes d'échantillonnage (stations aléatoires et ciblées), le taux d'infestation moyen et le nombre moyen de larves et de pupes par plant ont été calculés pour chaque méthode, chaque site et chaque relevé. La relation entre les valeurs moyennes aux stations aléatoires et ciblées a été étudiée à l'aide de modèles de régression linéaire. Les variables réponses étaient la proportion de plants endommagés ou le taux de capture aux stations ciblées et les effets principaux étaient la proportion de plants endommagés ou le taux

de capture aux stations aléatoires, la culture, la texture de sol, le travail de sol, le numéro d'échantillonnage, et les interactions doubles. Pour vérifier si les deux méthodes de dépistage donnaient des résultats différents, la pente des modèles a été testée pour savoir si elle était différente de 1.

Performance prédictive du modèle

Les prédictions faites par le modèle d'occurrence développé au volet 1 ont été comparées aux valeurs réelles observées. Les prédictions et les valeurs réelles ont été mises sous forme d'une matrice de confusion (**Tableau 2**) et la performance prédictive a été évaluée à l'aide des métriques suivantes : (i) *exactitude* (proportion des sites correctement prédits), (ii) *sensibilité* (proportion des sites avec présence réelle de MS correctement prédits) et (iii) *spécificité* (proportion des sites avec absence réelle de MS correctement prédits).

Tableau 2. Exemple de matrice de confusion utilisée pour évaluer la performance prédictive du modèle. Les cas positifs (sites avec présence) et négatifs (sites avec absence) réels sont comparés avec la classe prédite par le modèle d'occurrence. VP = vrais positifs, VN = vrais négatifs, FP = faux positifs, et FN = faux négatifs.

		Classe réelle		
		Positif	Négatif	
Classe prédite	Positif	VP	FP	Valeur prédictive positive (précision) VP / (VP + FP)
	Négatif	FN	VN	Valeur prédictive négative VN / (FN + VN)
		Sensibilité VP / (VP + FN)	Spécificité VN / (FP + VN)	Exactitude (VP + VN) / (VP + FP + FN + VN)

Volet 3. Caractériser l'attraction de la MS pour différents amendements organiques

Des expériences d'olfactométrie et d'oviposition ont été réalisées afin de caractériser les préférences olfactives et de pontes de la MS pour différents amendements organiques à différents stades de décomposition. Les amendements testés étaient le fumier de bovin, le fumier de poulet et un engrais vert de seigle, puisque ceux-ci avaient été identifiés comme plus attractifs pour la MS dans le cadre d'un précédent projet (Boquel & Latraverse 2019). Les expériences ont été faites au laboratoire de François Fournier, au département de biologie du collège Montmorency.

En prévision des expériences, du fumier de bovin et de poulet ont été incorporés dans deux champs en Montérégie-Est ayant des textures de sol différentes (argile limoneuse et loam argileux). À chacun des sites, les fumiers ont été étalés dans des parcelles de 4 m x 10 m, puis incorporés à l'aide d'un motoculteur (**Figure 1**). Des parcelles sans amendement ont aussi été travaillées au motoculteur et utilisées comme témoins. De plus, du seigle d'automne semé

l'année précédente dans le champ en argile limoneuse a aussi été incorporé à l'aide d'un motoculteur.

Une centaine de kilogrammes de terre a ensuite été prélevée en surface de chaque parcelle juste après l'incorporation, ainsi qu'une et deux semaines après l'incorporation. Des échantillons de 500 g ont été mis dans des sacs Ziploc et placés au congélateur jusqu'à leur utilisation.



Figure 1. Application et incorporation des fumiers et collecte des échantillons de terre pour les expériences d'olfactométrie et d'oviposition.

Trois expériences ont été conduites pour évaluer des facteurs pouvant stimuler la ponte de femelles gravides (fécondées) de *D. platura* (lignée holarctique AAA2511) : la comparaison de la ponte sur des semences de soya et de maïs-grain, traitées ou non avec un insecticide; l'effet de divers amendements (fumier de bovin, fumier de poulet et seigle) sur la ponte en situation de choix et l'évaluation de stimuli olfactifs associés à ces amendements en olfactométrie. Lorsque requis, les semences de maïs et de soya étaient enfouies dans le sol et incubées pendant 48 h avant le début des essais.

Tous les essais de ponte en situation de choix ont été effectués dans des enceintes rectangulaires de quatre litres au centre desquelles était placée une source d'eau pour les MS adultes. Les sites de ponte étaient constitués d'un échantillon de 30 g de sol placé dans un contenant de plastique de 0,5 once (Solocup®). Les différents sites de ponte étaient disposés au hasard autour de la source d'eau sans aucun contact entre eux. Lors des expériences, deux femelles âgées d'au moins 12 jours étaient introduites au centre de l'enceinte et laissées en contact avec les sites de ponte pendant 24 ou 48 h selon les expériences. Sauf indications contraires, les expériences ont été faites dans une chambre de croissance à 20 °C, 60 % HR et un régime d'éclairage de 16L:8D. Les œufs pondus sur les différents sites ont été récoltés par flottaison et dénombrés au binoculaire.

Effet des semences de maïs ou de soya traitées et non-traitées sur la ponte de la MS

Les semences de maïs et de soya étaient traitées ou non avec un insecticide du groupe 28 (chlorantraniliprole pour le maïs et cyantraniliprole pour le soya). Toutefois, toutes les semences étaient traitées aux fongicides (fluoxastrobine, prothioconazole, métalaxyl pour le maïs et métalaxyl, sédaxane et fludioxonil pour le soya). L'expérience a été faite sur les deux textures de sol sans amendement (sol témoin). Les échantillons de sol ont été dégelés 48 h avant le début de l'expérience et humidifiés à un taux de 60 % (poids eau : poids sol). Des sous échantillons de sol ont été préalablement séchés pour déterminer la quantité d'eau présente dans le sol récolté et ainsi définir la quantité d'eau à ajouter à chaque échantillon. Les semences de maïs et de soya traitées avec un insecticide ou non ont été semées 48 h avant le début de l'expérience et les sites de ponte ont été placés dans la chambre de croissance pour amorcer la germination. Quatre choix ont été offerts aux femelles : sol avec semences de soya, sol avec semences de soya traitées, sol avec semences de maïs-grain, sol avec semences de maïs grain traitées.

Effet des amendements de sol sur la ponte de la MS

Dans cette expérience de choix, l'influence du type d'amendement (fumier de bovin, fumier de poulet et seigle) et du temps de maturation de ceux-ci (à l'application, une ou deux semaines après l'application) a été évaluée sur la ponte des femelles de MS. Dans l'arène de ponte, les femelles avaient accès à cinq substrats différents : sol stérile, sol naturel, sol naturel avec semences de maïs en germination, sol avec amendement (fumier de bovin, fumier de poulet ou seigle) et sol avec amendement et semences de maïs en germination. Afin d'assurer l'homogénéité des conditions d'humidité des sols comparés, les échantillons de sol ont été dégelés et séchés à 25 °C pendant une semaine, pour être ensuite réhumidifiés avec un ratio de 60 % (poids eau : poids sol). Les grains de maïs étaient semés à ce moment et tous les substrats ont été incubés à 25 °C pour réactiver l'activité du microbiote et amorcer la germination des semences. Les échantillons de sol du traitement sol stérile ont été stérilisés à l'autoclave (121 °C pendant 8 h) après la réhumidification.

Les cinq substrats ont été disposés en cercle dans l'arène de quatre litres, leurs positions respectives étant attribuées au hasard. La durée de contact des femelles avec les cinq substrats a été de 24 h. Cette expérience a été effectuée entre 10 et 34 fois pour l'argile limoneuse en combinaison avec les trois amendements et temps de maturation, et entre 10 et 12 fois pour le loam argileux combiné avec le fumier de bovin ou fumier de poulet. Un nombre important de répétitions sans ponte a été observé, ce qui a réduit le nombre de répétitions propices à l'analyse entre 9 et 18 pour l'argile limoneuse, et entre 6 et 12 pour le loam argileux. Pour chaque combinaison d'amendements et de temps de maturation, la ponte moyenne entre les cinq substrats offerts a été comparée par un test non-paramétrique de Wilcoxon, suivi d'une comparaison de toutes les paires avec un test de Wilcoxon.

Évaluation de l'attractivité des amendements en olfactométrie

Des expériences d'olfactométrie ont été effectuées pour vérifier si des stimuli olfactifs produits par les sols avec ou sans amendement et semences avaient un impact significatif sur l'orientation des femelles gravides de *D. platura* (lignée holarctique AAA2511), et si la température ou l'humidité du sol avait un impact significatif sur l'attractivité des sols.

Pour toutes les expériences d'olfactométrie, les échantillons de sol ont été dégelés puis humidifiés à un taux de 60 % (poids eau : poids sol) ou à des taux de 25, 50, 75 et 100 % pour l'expérience portant sur l'humidité du sol. La quantité d'eau à ajouter a été établie en ayant préalablement déshydraté complètement des échantillons de sol comparables. Une fois dégelés et humidifiés, les sols étaient incubés à 25 °C pendant 48 h pour permettre au microbiote de reprendre son activité. Pour tous les tests, les échantillons de sol de 150 g étaient placés dans de erlenmeyers de 500 ml préalablement stérilisés à l'alcool et asséchés avec de l'acétone. Cinq semences de maïs étaient ajoutées au traitement semences en germination pour respecter le ratio d'une semence pour 30 g de sol de l'expérience précédente.

Les erlenmeyers ont été connectés à une sortie d'air compressé ayant un débit de 60 ml/minute. L'air passait successivement par une cartouche de carbone activé pour en éliminer les odeurs, barbotait ensuite dans de l'eau distillée pour saturer l'air en humidité, pour enfin passer par l'erlenmeyer contenant l'échantillon de sol. L'air était ensuite acheminé dans une des entrées des olfactomètres. La neutralité des olfactomètres a été testée avec de l'air chargé d'humidité acheminé dans chacune des branches ou secteurs pour confirmer l'absence de biais avec 30 femelles gravides. Lors des expériences, le branchement des sources d'odeur était modifié après cinq femelles, l'olfactomètre était nettoyé à l'alcool et à l'acétone pour éliminer toute trace d'odeur associée à un tube ou secteur. Trente femelles ont été testées dans tous les essais. Le choix d'une femelle était noté lorsqu'elle quittait la branche ou le secteur de l'olfactomètre dans laquelle elle s'était engagée. Le temps requis pour effectuer ce choix a aussi été noté entre son entrée et sa sortie de l'olfactomètre. Pour éviter l'influence du lot de production des mouches (contenant et date de production), un maximum de 10 femelles d'un même lot a été utilisé lors des tests.

Dans la première expérience faite avec des tubes en Y, tous les sols avec amendements et/ou semences de maïs en germination ont été comparés au sol témoin ayant les mêmes caractéristiques (type de sol et nombre de semaines après incorporation de l'amendement). L'olfactomètre en Y était placé dans une enceinte noire avec une source lumineuse placée à l'arrière et alignée avec la section commune du tube en Y, soit au centre de l'olfactomètre. Les sources d'odeur ont été alternées entre les deux branches de l'olfactomètres, 15 femelles ayant eu le sol témoin dans la branche droite et 15 autres dans la branche gauche.

L'influence de l'humidité du sol (25, 50, 75 et 100 %) et de la température du sol (10, 15, 20 et 25 °C) a été évaluée à l'aide d'un olfactomètre à quatre secteurs. Dans ces expériences, les amendements de sol incorporés depuis une semaine dans les deux types de sol ont été utilisés. Les sols ont été humidifiés comme indiqué précédemment. Les différentes températures de sol ont été obtenues dans quatre incubateurs différents pendant 48 h avant

le début des tests. Durant les tests avec l'olfactomètre à quatre secteurs, les températures des sols ont été maintenues en plaçant les erlenmeyers contenant les échantillons de sol dans un bain d'eau froide (10 et 15 °C) ou dans un bain-marie (20 et 25 °C). L'olfactomètre à quatre secteurs était placé sur une table dans une enceinte sombre pour éviter toute source de lumière directionnelle, le dessus de l'olfactomètre était recouvert d'un carton noir au moment de l'introduction des femelles au centre de l'olfactomètre. Le couvercle était retiré une fois que la femelle avait quitté la fiole utilisée pour l'introduire dans l'olfactomètre pour pouvoir suivre son déplacement.

Le choix des femelles a été comparé avec un choix effectué au hasard, soit une distribution de 50:50 entre les deux choix offerts dans l'olfactomètre en Y, et une distribution de 25:25:25:25 pour l'olfactomètre à quatre secteurs. Un test de χ^2 a été utilisé pour vérifier si la distribution observée était différente du hasard. Les temps moyens pour effectuer les choix ont été comparés à l'aide du test non-paramétrique de Wilcoxon puisque la distribution des temps de choix étaient non normales et très variables.

RÉSULTATS SIGNIFICATIFS OBTENUS

Volet 1. Documenter les caractéristiques des champs et les facteurs agronomiques qui favorisent la présence de la MS

Dépistage des larves de MS

Entre 2014 et 2022, un total de 2 419 larves et 951 pupes de MS a été collecté dans les pièges-appâts installés dans le cadre du dépistage des ravageurs des semis du RAP Grandes cultures. Des larves et/ou des pupes étaient présentes dans 30,5 % des champs (181 champs sur 593). Près des trois-quarts des sites avec présence de MS (72,9 %; 94 champs) avaient des taux de capture de larves inférieurs ou égaux à 1 larve/piège, et un peu plus de la moitié (55 %; 71 champs) avec des taux de capture inférieurs à 0,3 larve/piège (**Tableau 3**). La même tendance a été observée pour les pupes (80,2 %; 97 champs et 61,2 %; 74 champs, respectivement). Très peu de champs avaient des taux de capture supérieurs ou égaux à 5 larves/piège (10,1 %; 13 champs) ou pupes/piège (2,5 %; 3 champs).

Tableau 3. Taux de capture de larves et de pupes (nb/piège) pour les sites de la base de données sur la mouche des semis.

Taux de capture (larves ou pupes/piège)	% (nb) de sites	
	Larves	Pupes
0,0	78,3 (464)	79,6 (472)
> 0,0 à 0,3	55,0 (71)	61,2 (74)
> 0,0 à 1,0	72,9 (94)	80,2 (97)
> 1,0	27,1 (35)	19,8 (24)
> 5,0	10,1 (13)	2,5 (3)

Bien que les taux de capture de larves et/ou de pupes de MS semblent faibles, il est difficile de dire s'ils correspondent à de faibles ou de fortes infestations, car la relation entre le taux de capture et les dommages aux champs n'est pas connue. Aussi, il n'est pas certain que l'utilisation de pièges-appâts soit la meilleure méthode pour dépister les larves et/ou les pupes de MS et il est possible que les taux de capture ne reflètent pas la pression réelle au champ. Finalement, comme les dépistages par pièges-appâts réalisés dans le cadre du RAP Grandes cultures ciblent surtout les vers fil-de-fer, il est possible que le degré d'effort ait été différent entre les dépisteurs à fouiller les pièges pour trouver des larves de MS et donc que certains dépisteurs n'aient pas cherché ou trouvé toutes les larves, d'autant plus que celles-ci sont très petites.

Des expériences supplémentaires seraient donc nécessaires pour déterminer la relation entre les taux de capture de larves de MS dans les pièges-appâts et les abondances de larves au pied des plants.

Évaluation des modèles BRT

Un premier modèle exploratoire a été testé avec l'ensemble des données climatiques, les caractéristiques des champs et les facteurs agronomiques présentés au **Tableau 1**. La très grande majorité des variables climatiques expliquaient peu la présence de MS dans les champs. Seules trois variables climatiques expliquaient en partie la présence de larves et/ou de pupes de MS dans les pièges, soient la température moyenne des quatre semaines précédant le relevé, les degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} avril, et les précipitations totales en mars.

Puisque la très grande majorité des variables climatiques expliquait peu la présence de MS, deux modèles simplifiés ont été testés. Le premier modèle incluait la température moyenne des quatre semaines précédant le relevé et les précipitations totales au mois de mars, alors que le deuxième incluait uniquement les degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} avril. Ces deux modèles incluaient également l'ensemble des caractéristiques des champs et des facteurs agronomiques. Dans le cas du premier modèle, les précipitations expliquaient peu la présence de MS. Cependant, dans les deux modèles, la température moyenne quatre semaines avant le relevé (modèle 1) et les degrés-jours cumulés depuis le 1^{er} avril (modèle 2) expliquaient majoritairement la présence de MS. Cependant, ces modèles ne permettent pas de prédire les infestations de MS tant que les températures ne sont pas connues, ce qui limite leur utilité pratique.

Un dernier modèle a donc été construit en incluant uniquement les caractéristiques des champs et les facteurs agronomiques. Ce dernier a été obtenu avec un nombre d'arbres $nt = 2\ 000$, un taux d'apprentissage $lr = 0,001$, une complexité $tc = 5$, et une fraction de sac $bf = 0,7$. La performance prédictive du modèle était relativement faible. Le modèle n'expliquait que 24 % de la déviance totale et avait un AUC = 0,667 (se = 0,028) pour la procédure de validation croisée.

Influence relative et effets des variables

En conclusion, 16 variables ont été retenues pour le modèle final. Les cinq variables les plus importantes contribuaient à elles seules pour 65,3 % de la variation expliquée par le modèle, dont la région administrative (33 %), la pression de mauvaises herbes (10,3 %), la superficie du champ (8,1 %), la date de semis en jours juliens (7,1 %), et le pourcentage de matière organique du sol (6,8 %; **Figure 2**).

Les autres variables géographiques (latitude, longitude, élévation) exerçaient également une influence notable sur la présence des larves de MS (12 %), tout comme les précédents culturels des trois dernières années (11,9 %). La texture de sol et le type de travail de sol avaient une influence modérée (5,0 et 3,0 %, respectivement). Finalement, l'utilisation d'un traitement de semences insecticide et le type d'amendement organique au printemps exerçaient une faible influence sur la présence de larves de MS (1,7 et 1,1 %, respectivement).

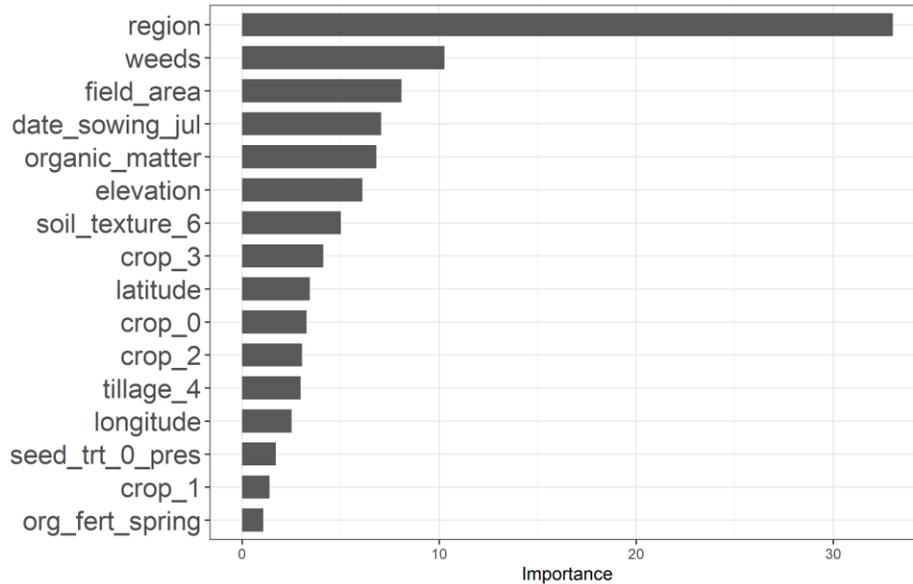


Figure 2. Influence relative (en ordre décroissant) des variables expliquant la présence de larves de mouches de semis. La somme des valeurs est égale à 100 %.

La **Figure 3** présente les graphiques de dépendances partielles (GDP) pour les 16 variables explicatives utilisées dans le modèle. Les différentes variables et leur impact sur l'occurrence de MS est détaillée dans les paragraphes suivants.

Caractéristiques géographiques

La probabilité d'occurrence de larves de MS était plus élevée dans les régions de la Chaudière-Appalaches (CA), de l'Estrie (EST), de Lanaudière (LAN), des Laurentides (LAU) et de la Montérégie-Ouest (MO) (**Figure 3a**). À l'inverse, elle était moins élevée en Abitibi-Témiscamingue (AT), au Centre-du-Québec (CDQ), en Mauricie (MAU), en Montérégie-Est (ME), en Outaouais (OUT) et au Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ).

La probabilité de trouver des larves était aussi plus élevée vers le sud du Québec (entre 45° et 45,2° de latitude; **Figure 3i**) et vers l'est (entre -75° et -70° de longitude; **Figure 3m**).

Caractéristiques du champ et du sol

La probabilité d'observer des larves était plus élevée lorsque des mauvaises herbes étaient présentes dans le champ, et ce, quel que soit leur densité (**Figure 3b**).

Les champs d'une superficie de 15 ha ou moins seraient moins propices à la présence de MS que les champs de plus grande superficie (**Figure 3c**).

Les champs avec un taux de matière organique du sol autour de 5 % avaient une probabilité plus élevée de contenir des larves de MS (**Figure 3e**).

La probabilité de trouver des larves était plus faible dans les sols argileux et plus élevée dans les loams limoneux et les sols sableux (**Figure 3g**).

La probabilité de trouver des larves de MS était décroissante avec l'élévation (jusqu'à ≈ 200 m) (**Figure 3f**).

Le type d'amendement organique influençait peu la probabilité d'occurrence de MS bien qu'une légère tendance inférieure ait été observée avec l'absence d'amendements (**Figure 3p**).

Pratiques culturales

La probabilité d'observer des larves de MS était plus faible lorsque le semis était effectué avant le 10 mai (130^e jour julien), mais elle augmentait rapidement entre le 22 mai (142^e jour julien) et le 5 juin (156^e jour julien) (**Figure 3d**).

La probabilité de trouver des larves était plus élevée pour les travaux de sol conventionnels et réduits alors qu'elle était plus faible pour le semis direct (**Figure 3l**).

Précédents culturaux et culture en cours

La présence de larves de MS était plus fréquente dans les champs ayant été semés en céréales deux ou trois ans auparavant (**Figure 3h et 3k**). En revanche, le précédent cultural de l'année précédente était peu important (**Figure 3o**).

Le maïs et le soya comme culture en cours avaient une plus grande probabilité d'avoir une présence de MS contrairement aux céréales ou aux prairies (**Figure 3j**). Le traitement de semences influençait peu la probabilité d'occurrence de MS bien qu'une tendance supérieure ait été observée avec les semences traitées avec un insecticide (**Figure 3n**).

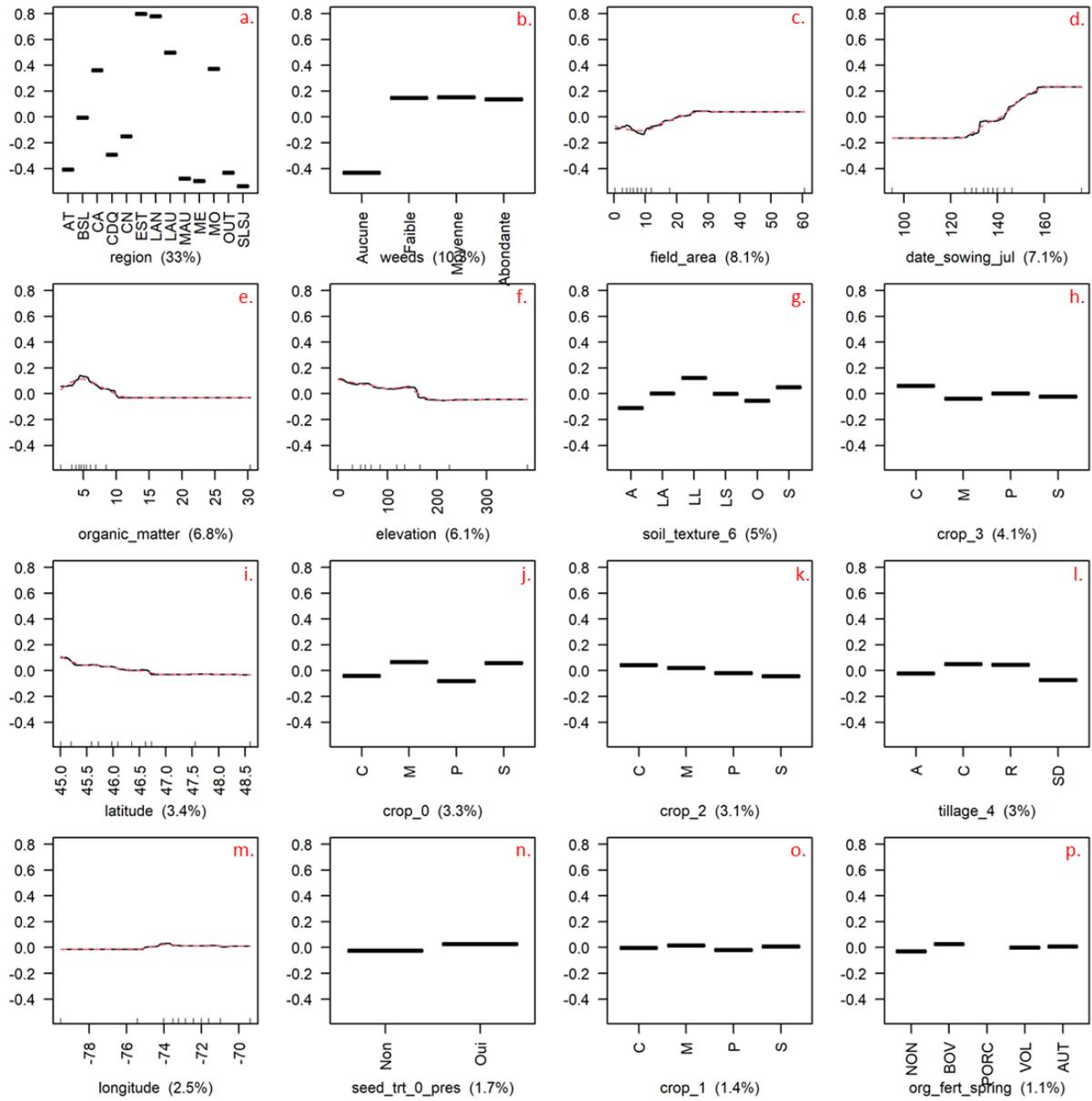


Figure 3. Effets marginaux des principales variables influentes sur la présence des larves de MS. Une description détaillée des variables et de leurs unités est présentée dans le Tableau 1.

Volet 2. Valider les caractéristiques des champs et les pratiques agronomiques qui favorisent la présence de la MS

Échantillonnages ciblés versus aléatoires

La proportion de plants endommagés était en moyenne 4 % plus élevée dans les stations ciblées que dans les stations aléatoires ($t_{(136)} = 2,81$; $p = 0,006$). Cette différence était cependant plus importante dans les champs en soya (8,7 %; $t_{(136)} = 2,46$; $p = 0,015$) que dans les champs en maïs (3 %; $t_{(136)} = 2,02$; $p = 0,046$; **Figure 4**). Le test de la pente a montré que celle-ci ne différait pas de 1 ($t_{(136)} = -0,54$; $p = 0,593$), ce qui suggère que la proportion de plants endommagés était plus élevée dans le soya quel que soit le niveau de dommages dans le champ.

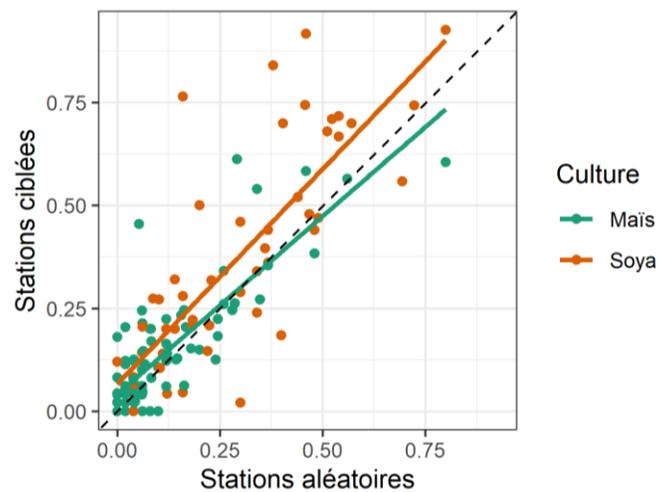


Figure 4. Relation entre la proportion de plants endommagés aux stations aléatoires et ciblées en fonction de la culture (maïs ou soya).

Le nombre de larves et de pupes par plant était en moyenne 2,15 fois plus élevé dans les stations ciblées que dans les stations aléatoires au premier échantillonnage de plants ($t_{(136)} = 5,07$; $p < 0,001$; **Figure 5**). Aux échantillonnages subséquents, les taux d'infestation ne différaient pas entre les deux types de stations.

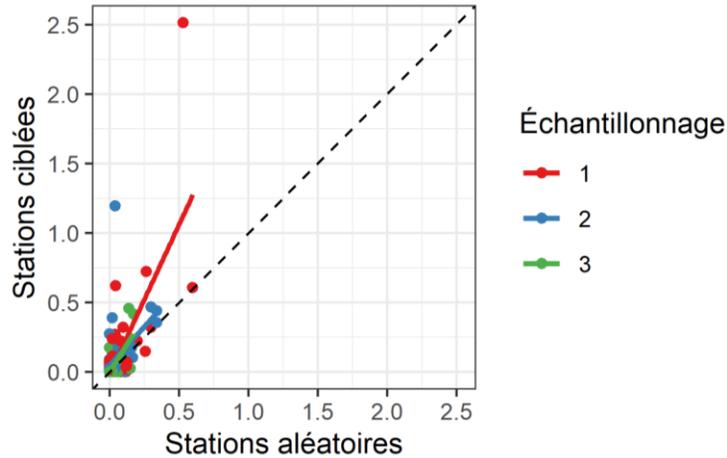


Figure 5. Relation entre le nombre de larves et de pupes par plant aux stations aléatoires et ciblées en fonction du numéro d'échantillonnage (1, 2, 3).

Les échantillons dans les stations ciblées avaient plus de dommages que dans les stations aléatoires, mais uniquement dans le soya. Il est donc possible que les problèmes de MS soient plus graves dans le soya, ou encore que les zones endommagées soient plus faciles à identifier dans le soya que dans le maïs. Par ailleurs, les taux d'infestation par la MS étaient également plus élevés dans les stations ciblées que dans les stations aléatoires. Ces observations montrent qu'un échantillonnage ciblé permet d'évaluer le taux d'infestation maximal de la culture dans les endroits problématiques, mais il n'est pas représentatif du champ. Pour déterminer le taux d'infestation général du champ, il est recommandé de faire un échantillonnage aléatoire.

Il a également été observé que la proportion de plants endommagés n'était pas un bon indicateur de la gravité des infestations de MS. En effet, les pourcentages de plants endommagés étaient relativement élevés même quand les taux d'infestation étaient faibles. Ceci pourrait être dû au fait qu'il n'est pas facile de déterminer la cause des dommages aux plants. Ainsi, des dommages ont pu être attribués à la MS, alors que ce n'était pas le cas. Pour cette raison, les dépistages devraient donc être basés sur la présence de l'insecte plutôt que sur une évaluation des dommages.

Finalement, il a également été observé que les taux de capture étaient plus élevés au premier dépistage, ce qui est probablement en lien avec le cycle de développement de l'insecte. En effet, les plus faibles quantités de larves et de pupes retrouvées aux deuxième et au troisième échantillonnage sont probablement dues au fait que celles-ci avaient déjà émergé en adultes. Ceci suggère que les dépistages devraient être réalisés proche du semis afin de valider si les problèmes de levée sont bien causés par la MS.

Proportion de plants endommagés

Des plants endommagés ont été trouvés dans les 56 champs dépistés en 2021 et 2022. Les pourcentages de dommages maximaux allaient de 3,1 à 96,7 %. Douze sites avaient un pourcentage de plants endommagés supérieur à 50 %. Parmi les 44 champs restants, la moitié avait un pourcentage de plants endommagés compris entre 20 et 50 %, alors que l'autre moitié avait un pourcentage inférieur à 20 %. Les pourcentages de plants endommagés par site et par type de station sont disponibles à l'**annexe 2**.

Nombre de larves et de pupes par plant

Parmi les 56 sites suivis, un total de 841 larves et de 695 pupes de MS a été collecté. Des larves et/ou des pupes ont été trouvées dans 85,7 % des champs (48). Les taux d'infestation au relevé le plus abondant allaient de 0,01 à 2,25 larves et pupes/plant. La grande majorité des sites où des larves et des pupes ont été trouvées avait des taux d'infestation inférieurs ou égaux à 0,1 larve et pupes/plant (62,5 % ; 35 sites) et seuls quatre sites dépassaient 0,5 larve et pupes/plant (0,2 en moyenne). Les taux d'infestation par site et par type de station sont disponibles à l'**annexe 3**.

Tous les champs sélectionnés en raison d'infestations potentielles de MS avaient des taux de capture inférieurs ou égaux à 0,6 larve et pupes/plant, à l'exception du site de Saint-Paul qui avait une moyenne de 1,4 larves et pupes/plant.

Des études ont montré que 40 larves/grain ou de fortes densités de larves de MS causeraient une forte diminution de la levée du maïs (Vea et al. 1975; Hough-Goldstein & Hess 1984). Or, les taux d'infestation observés étaient largement inférieurs à ces valeurs, ce qui renforce l'idée que la MS n'est pas un réel problème dans les champs de maïs et de soya. Il n'est bien sûr pas exclu que des infestations importantes de MS puissent se produire dans les champs de grandes cultures, mais celles-ci restent sporadiques au Québec et sont souvent liées à une combinaison de plusieurs des facteurs de risque énumérés plus haut.

Validation des prédictions du modèle

Le modèle d'occurrence développé au volet 1 a été testé sur la base des résultats de dépistage pour déterminer sa capacité prédictive quant à la présence/absence de MS dans les champs. Le modèle prédisait peu de faux positifs (2) et sa spécificité (proportion des sites avec absence réelle de MS correctement prédits) était donc relativement bonne (75 %; **Tableau 4**). Cependant, le modèle prédisait beaucoup d'absences, entraînant de nombreux faux négatifs (26). La sensibilité du modèle (proportion des sites avec présence réelle de MS correctement prédits) était donc faible (44,7 %). Finalement, l'exactitude du modèle (proportion des sites correctement prédits) était moyenne puisque seulement 49,1 % des sites étaient correctement prédits.

Tableau 4. Validation de la performance prédictive du modèle à l'aide des métriques exactitude, sensibilité et spécificité.

		Réalité		
		Présence	Absence	
Prédiction	Présence	21	2	Valeur prédictive positive (précision) 0,913
	Absence	26	6	Valeur prédictive négative 0,188
		Sensibilité 0,447	Spécificité 0,750	Exactitude 0,491

Une explication possible à la mauvaise performance du modèle est que celui-ci est basé sur des données de pièges-appâts, mais qu'il a été testé sur des taux de capture de larves et de pupes par plant. Or, la correspondance entre les deux méthodes de capture est inconnue.

Il est aussi possible que la probabilité de trouver des larves et des pupes soit plus élevée lorsque des plants sont dépistés visuellement que lorsque les dépistages sont faits par piège-appât. Ceci expliquerait le fait que la proportion de champs avec présence était presque trois fois plus élevée pour les dépistages visuels (85 %) que pour les dépistages par pièges-appâts (31 %).

Taux de captures vs facteurs de présence

Les taux de capture globaux et des stations ciblées (en larves et pupes par plant) dans les 56 champs dépistés ont été comparés aux facteurs de risque identifiés au volet 1 (**Annexe 4**). Pour certains des facteurs, les taux de capture observés concordent avec les prédictions du modèle. Par exemple, les taux de capture de MS étaient plus élevés dans les champs avec pression élevée de mauvaises herbes que dans ceux avec une pression faible ou moyenne. Le travail de sol conventionnel favorisait aussi les captures élevées de MS comparativement au semis direct. Les plus petits champs (< 15 ha) avaient des taux de capture de MS plus faibles que les plus grands. La présence d'une culture de céréales trois ans auparavant semblait favoriser les taux de capture de MS contrairement aux autres précédents culturaux. Les champs avec des taux de matière organique proche de 5 % avaient aussi des taux de capture plus élevés que ceux au-dessus de 6,5 % ou en-dessous de 3,2 %. Finalement, les champs avec application de fumier de poulet au printemps avaient des taux de capture plus élevés que ceux avec application de fumier de bovin ou sans amendement organique. Ce dernier résultat est en accord avec ce qui avait été observé dans une précédente étude (Boquel & Latraverse 2019).

En revanche, pour d'autres facteurs comme la région, la texture de sol ou encore les précédents culturaux des deux années précédentes, les taux de capture observés ne concordent pas avec les prédictions du modèle. Ainsi, les sites avec un sol argileux ou encore avec un précédent de soya un ou deux ans auparavant, avaient les taux de capture moyens les plus élevés, alors que le modèle prédisait un risque faible.

Cependant, les facteurs ont été pris un à un et ces taux de capture élevés pour certains des facteurs pourraient résulter de la combinaison de plusieurs autres facteurs expliquant la présence de MS. À titre d'exemple, le modèle prédisait que les champs semés avant le 10 mai avaient moins de chance d'avoir une présence de MS. Or, le taux de capture moyen pour les sites semés avant cette date était plus élevé que pour les sites semés plus tardivement. Après inspection, il s'est avéré que cela était dû à un seul site en Lanaudière qui avait un taux de capture beaucoup plus élevé que les autres (1,38 larves et pupes par plant contre 0,00 à 0,21 pour les autres sites). Si ce site est exclu du calcul, le taux de capture moyen pour les champs semés avant le 10 mai tombe à 0,08 larve et pupes par piège, ce qui les classent parmi les plus faiblement infestés, tel que prédit par le modèle.

Cette différence de taux de capture pourrait s'expliquer par le fait que le champ de Lanaudière présentait plusieurs facteurs de risque. En particulier, cette région ressort comme une des plus propices à la présence de MS. De plus, le champ en question avait une forte population de mauvaises herbes, un sol de type loam sableux avec un taux de matière organique proche de 5 %, une régie avec travail de sol conventionnel, et un précédent de céréale trois ans auparavant. Finalement, une étude a montré qu'en Lanaudière, le pic d'activité de la MS survenait environ deux semaines plus tôt que dans d'autres régions (début de mai pour certains sites). Ceci pourrait être en lien avec la présence au Québec de deux lignées génétiques de MS qui diffèrent par leur cycle de vie. Ainsi, la lignée néarctique AAA3453 (retrouvée en Amérique du Nord) émergerait plus tôt en saison que la lignée holarctique AAA2511 (retrouvée en Europe, en Asie, au Groenland, et dans les provinces de l'est du Canada) (Savage et al., 2016). Bien que ces deux lignées aient des distributions géographiques distinctes, il s'avère que leurs aires de répartition se chevauchent uniquement dans l'est du Canada (Ontario, Québec et Maritimes) (Van der Heyden et al., 2020). Il est possible que la lignée néarctique soit majoritaire dans Lanaudière, ce qui pourrait contribuer à expliquer les taux de capture élevés observés au site semé avant le 10 mai.

La présente étude a permis d'identifier certains des facteurs expliquant le risque de présence de MS dans les champs. Cependant, il semblerait que son occurrence dans les champs soit dictée par la combinaison de plusieurs facteurs.

Afin de mieux estimer le risque de présence de MS dans les champs, les études futures devront se concentrer à identifier les combinaisons de facteurs les plus importantes et déterminer le poids des facteurs impliqués. Il serait également important de déterminer la proportion de chacune des deux lignées de MS dans les différentes régions du Québec et évaluer leur contribution respective aux dommages causés aux cultures. Ces connaissances permettraient de développer des approches de lutte intégrée spécifiques à chacune des lignées.

Volet 3. Caractériser l'attraction de la MS pour différents amendements organiques

Effet des semences de maïs ou de soya traitées et non-traitées sur la ponte de la MS

L'attraction des femelles de MS pour des semences de maïs-grain et de soya traitées ou non avec un insecticide a été vérifiée sur les deux types de sol (**Figure 6**). Aucun effet significatif du sol sur la ponte n'a été observé, pour le maïs-grain ($Kh^2 = 20,02$; $p = 0,156$) ou le soya ($Kh^2 = 0,60$; $p = 0,437$). Mises en situation de choix, les femelles gravides ont significativement préféré la ponte sur du sol contenant une semence de maïs ou de soya en germination, sans faire de discrimination entre les semences traitées ou non. En présence de celles-ci, les pontes moyennes étaient 6,0 et 5,4 fois plus élevées pour le maïs et le soya respectivement que sur les sols témoins et stériles présentés en même temps. Ces résultats confirment que les semences de maïs et de soya en germination exercent une attraction significative sans égard au traitement de semence.

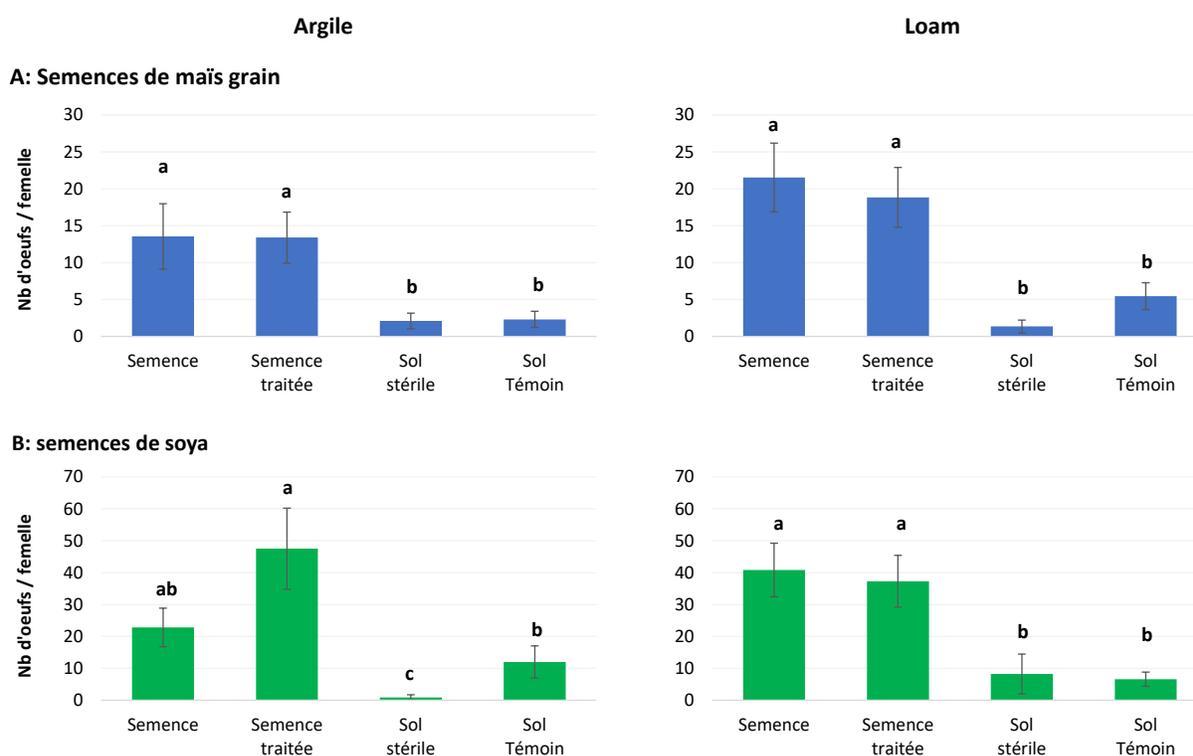


Figure 6. Comparaison de la ponte moyenne/femelle de *D. platyura* en situation de choix entre du sol (argile limoneuse ou loam argileux) contenant une semence en germination nue ou traitée avec un insecticide et du sol préalablement stérilisé ou non (témoin) pour les cultures de maïs-grain (A) et de soya (B). Expérience répétée 10 fois pour chaque combinaison sol-culture. Les barres avec des lettres différentes ont des valeurs statistiquement différentes selon le test de comparaison des paires de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Effet des amendements de sol sur la ponte de la MS

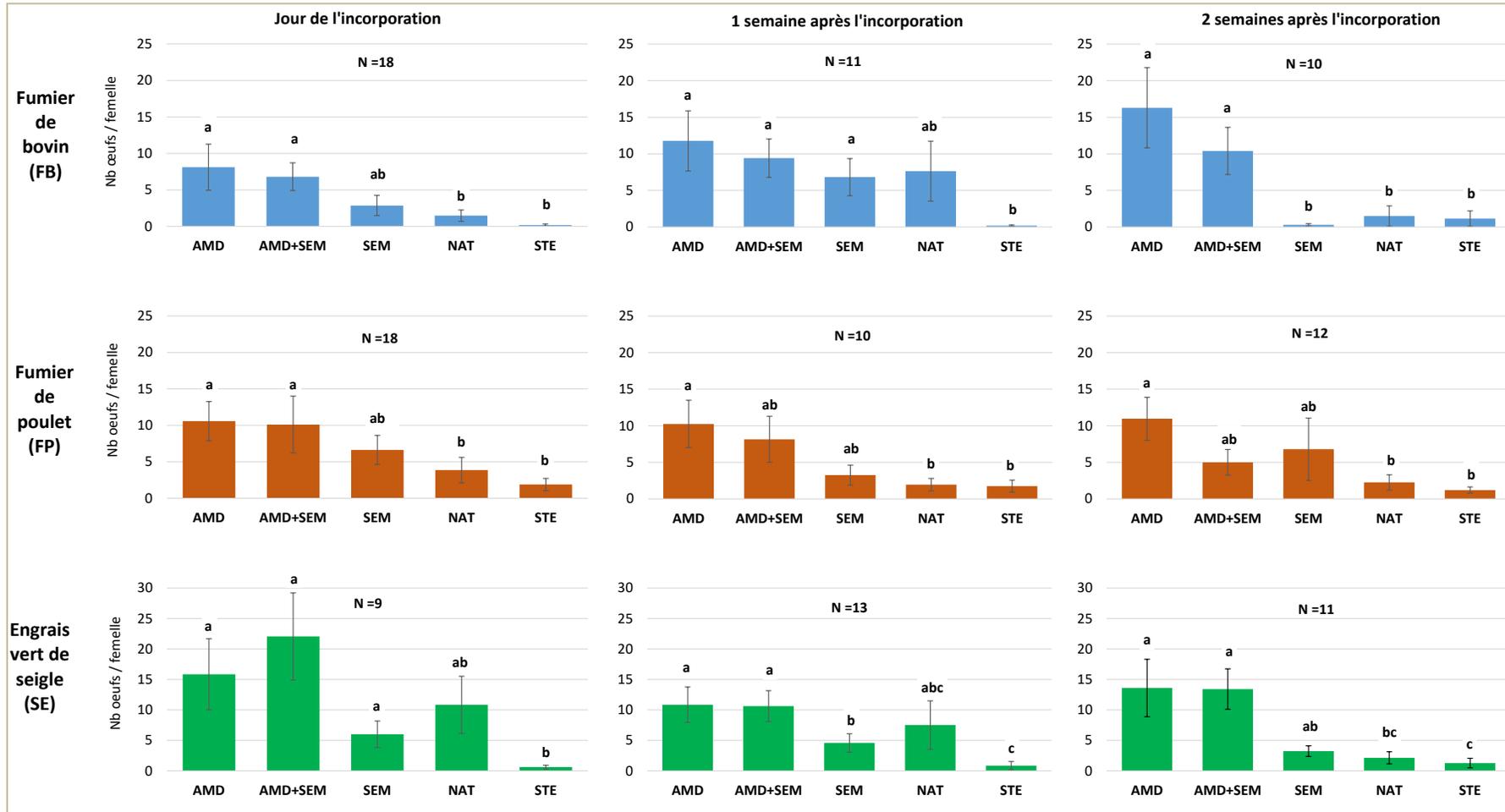
Argile limoneuse

Dans le sol d'argile limoneuse, l'incorporation du fumier de bovin a un effet stimulant comparable à celui d'une semence en germination seule au moment de l'incorporation du fumier, et à du sol naturel avec ou sans semence une semaine après l'incorporation du fumier (**Figure 7A**). Deux semaines après son incorporation, l'effet stimulant du fumier de bovin se démarquait plus nettement des autres substrats. Les pontes moyennes de 16,3 et 10,4 œufs pour les sols avec amendements et les sols avec amendement et semences en germination étaient significativement supérieures à celles observées sur le sol naturel avec semences en germination avec 0,3 œuf, cette dernière étant équivalente à la ponte observée sur le sol naturel et stérile avec 1,5 et 1,2 œuf (**Figure 7A**). La ponte sur substrat avec fumier de bovin était en moyenne 5,0 fois plus élevée au moment de l'incorporation, et atteignait un ratio 13,6 fois plus élevé deux semaines après l'incorporation.

La même tendance a été observée avec le fumier de poulet. La ponte sur cet amendement seul était significativement plus élevée que sur le sol naturel et stérile et ce, à toutes les périodes de maturation du fumier. Elle variait entre 10,3 et 11,0 œufs pour le sol avec amendement contre 1,2 et 3,9 œufs pour le sol naturel et stérile. Au fil des semaines (0, 1 et 2 semaines après l'incorporation), le risque de ponte en présence de fumier de poulet était multiplié par un facteur de 3,7, 5,5 et 6,3 par rapport aux sols naturel et stérile. La présence de semence en germination avec ou sans amendement résultait en des pontes intermédiaires, exception faite du moment de l'incorporation pour le sol avec amendement et semences en germination qui a une ponte équivalente au sol avec amendement seul (**Figure 7A**).

L'effet stimulant de l'incorporation du seigle au sol était moins marqué que pour les deux fumiers avec des niveaux de ponte comparables à l'un ou l'autre des sols naturels avec semences en germination et naturels, ou même les deux, durant les trois périodes d'évaluation. Encore ici, les écarts entre les substrats sont plus importants deux semaines après l'incorporation du seigle avec une ponte significativement plus importante sur le sol avec amendement et le sol avec amendement et semences en germination (13,6 et 13,4 œufs respectivement) contre 2,1 et 1,3 œufs sur le sol naturel et le sol stérile. La ponte observée était donc 7,9 fois plus élevée en présence de seigle incorporé depuis deux semaines que sur des sols naturels et stériles. Avec une ponte de 3,2 œufs, le substrat sol naturel avec semences en germination avait une valeur intermédiaire entre le sol naturel, le sol avec amendement et le sol avec amendement et semences en germination (**Figure 7A**).

A: Pontes de *Delia platura* sur de l'argile limoneuse



B: Pontes de *Delia platura* sur du loam argileux

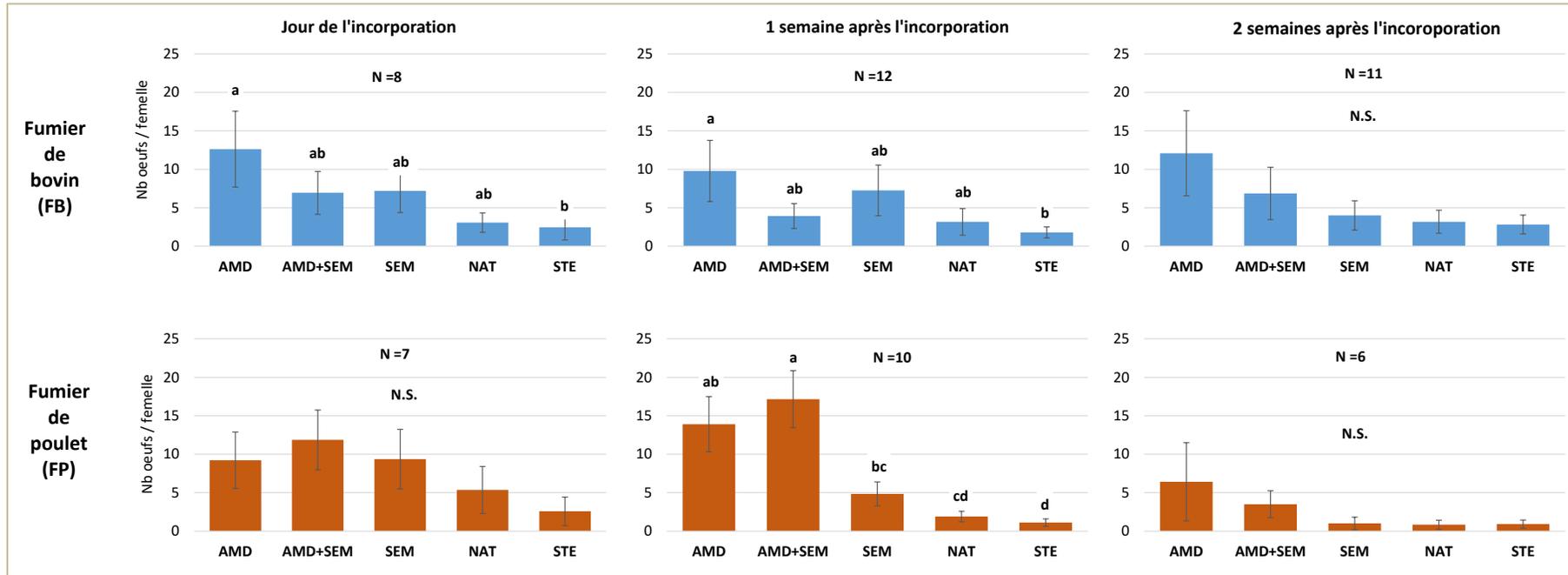


Figure 7. Évaluation en laboratoire de divers amendements, fumiers de bovin (FB) et de poulet (FP) et engrais vert de seigle (SE), incorporés dans un sol d'argile limoneuse (A) et dans un loam argileux (B) sur la ponte de *D. platura*. Les échantillons de sol ont été récoltés immédiatement après l'incorporation au champ, et une et deux semaines après l'incorporation. Les barres d'erreur représentent l'erreur standard sur la moyenne. La ponte moyenne a été comparée entre cinq choix présentés simultanément aux femelles pendant 48 h: sol stérile (STE), sol naturel sans amendement (NAT), sol naturel avec semence (SEM), sol avec amendement (AMD), et sol avec amendement + semence de maïs mis en germination 48 h avant le début du test (AMD+SEM). Pour chaque combinaison d'amendement et de durée de maturation au champ, les moyennes ont été comparées par le test non-paramétrique de Wilcoxon. Les barres avec de lettres différentes ont des valeurs statistiquement différentes selon le test de comparaison des paires de Wilcoxon ($p < 0,05$).

Loam argileux

Un nombre plus réduit de répétitions avec ponte a été obtenu dans ce sol ce qui a augmenté la variabilité des résultats et a probablement empêché d'observer des différences significatives pour le fumier de poulet le jour de l'incorporation et le fumier de bovin et de poulet deux semaines après l'incorporation. Malgré cela, les résultats significatifs obtenus avec les fumiers de bovins et de poulets dans le loam argileux sont similaires à ceux observés dans l'argile limoneuse. Pour le fumier de bovin, la ponte était significativement plus élevée dans le sol avec amendement que sur du sol stérile, les autres traitements ayant des valeurs intermédiaires et ce, au moment de l'incorporation du fumier et une semaine plus tard (**Figure 7B**). La ponte moyenne sur le sol avec amendement au moment de l'incorporation était de 12,6 œufs contre 2,4 œufs sur le sol stérile, et de 9,8 œufs contre 1,8 œuf une semaine plus tard. Cela représente un risque de ponte 5,2 à 5,5 fois plus élevé. Avec le fumier de poulet, le risque de ponte était 10,4 fois plus élevé (sol avec amendement et sol avec amendement et semences de maïs en germination) que sur des substrats sans amendement et/ou semence (sol naturel et sol stérile).

Conclusion sur l'effet des amendements de sol sur la ponte de la MS

De façon générale, et quel que soit le type de sol étudié, la ponte de la MS était plus importante sur les sols qui contenaient un amendement organique, une semence en germination, ou les deux combinés, que sur du sol naturel ou stérile. Ces résultats confirment que la présence de matière organique en décomposition ou de semence en germination stimulent la ponte des femelles de MS. Bien que la grande variabilité des résultats et le nombre réduit de répétitions avec ponte aient limité le nombre d'écart significatifs confirmés, des tendances constantes ont tout de même été observées. Lorsque des écarts significatifs ont été observés, le risque de ponte a été multiplié par des facteurs variant de 3,7 à 13,6 fois en présence d'un des amendements testés par rapport à un sol naturel et/ou stérile, ce risque semble même augmenter entre le moment de l'incorporation et les deux semaines après son incorporation.

Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs études qui ont démontré que la ponte de la MS était stimulée par le microbiote du sol (bactéries et levures), seul ou associé aux semences en germination (Eckenrode et al. 1975; Hubbard et al. 1982; Hough-Goldstein & Bassler 1988). Ces bactéries et levures sont des espèces relativement communes dans le sol et leur interaction avec des débris organiques pourrait aussi expliquer l'attractivité des sols avec amendements organiques. Cette attractivité est cependant variable selon le type d'amendement, l'incorporation et dans le temps comme nos résultats l'indiquent aussi. Hammond & Jeffers (1984) ont observé des populations larvaires 8,5 fois plus importantes dans des champs de soya où des résidus de blé avaient été hachés et incorporés au sol par rapport à des champs sans ces résidus. Les résidus de seigle laissés en surface n'ont pas stimulé la ponte comparativement à ceux incorporés au sol (Hammond 1984). Cependant, Funderburk et al. (1983) n'ont observé aucun effet des résidus de maïs laissés en surface ou incorporés au sol. Dans notre expérience, tous les amendements ont été incorporés au sol et

ont eu un effet stimulant significatif sur la ponte de la MS. L'aération du sol favoriserait l'activité microbiologique et la production de composés volatils stimulants cette ponte.

Évaluation de l'attractivité des amendements en olfactométrie

De façon générale, les femelles de MS ont rapidement exprimé leur attirance pour un des deux sols offerts en olfactométrie avec des temps moyens variant de 31,2 à 169,6 s, soit moins de trois minutes (**Tableau 5**). Dans la vaste majorité des tests, le temps pris pour exprimer une préférence n'a pas varié de façon significative entre le témoin et le sol testé, à deux exceptions près et sans tendance significative. Aucun des sols contenant un des amendements testés et/ou une semence de maïs en germination n'a exercé d'attraction significative par rapport au sol témoin et ce, sur les deux types de sol de l'étude (**Tableau 5**). Au contraire, les femelles ont significativement préféré le sol témoin dans 16 des 30 combinaisons de sol avec amendement et/ou semences. Ces résultats suggèrent que les échantillons de sol avec de l'activité biologique ont exercé un certain effet répulsif dans nos conditions expérimentales, plus particulièrement le fumier de bovin sur argile limoneuse où cela a été observé avec les six combinaisons testées, et sur trois des six combinaisons sur le loam argileux. Cet effet semble moins marqué avec le fumier de poulet et le seigle. Il est possible que les stimuli olfactifs produits par nos échantillons de sol étaient trop concentrés et ont eu cet effet répulsif. Ceci pourrait être dû au volume de sol testé et/ou au débit d'air utilisé, ces paramètres étant pourtant comparables à ceux d'autres études similaires. Cette possibilité semble confirmée par un autre résultat où les femelles avaient significativement préféré le sol stérile au sol témoin dans 5 des 15 tests effectués. Le sol témoin n'ayant que peu de matière organique semble tout de même avoir produit des stimuli olfactifs répulsifs dans nos conditions expérimentales.

De façon générale, les différents taux d'humidité des deux types de sol avec les divers amendements n'ont pas eu d'effet sur la préférence des femelles ni sur leurs temps pris pour effectuer leur choix (**Figure 8**). Une seule exception, le seigle a attiré 50 % des femelles dans un sol humidifié à 25 % par rapport à des taux plus élevés, plus particulièrement le sol à 100 % qui n'a attiré que 6,7 % des femelles. Ces résultats sont en accord avec ceux d'Ibrahim (1986) qui a observé quatre fois plus d'ovipositions sur du sol humide versus du sol saturé en eau et aucune oviposition sur du sol sec. L'absence d'effet pour les fumiers est peut-être une indication que les stimuli olfactifs étaient tout simplement comparables entre les quatre niveaux d'humidité.

Le choix des femelles a été influencé par la température du sol pour certaines combinaisons de sols et d'amendements, mais pas le temps pris pour effectuer leur choix (**Figure 9**). Dans l'argile limoneuse, l'attractivité du fumier de bovin diminuait avec l'augmentation de la température, passant de 53,3 % à 10 °C à 6,7 % à 25 °C. Cependant, ce phénomène n'a pas été observé dans le loam argileux. Le fumier de poulet attirait plus de femelles à 10 et à 25°C dans l'argile limoneuse et à 20 et à 25°C dans le loam argileux. La température pourrait peut-être jouer un rôle dans la production de stimuli olfactifs et ceux-ci pourraient varier d'un

amendement à l'autre mais cette hypothèse reste à confirmer dans d'autres conditions expérimentales.

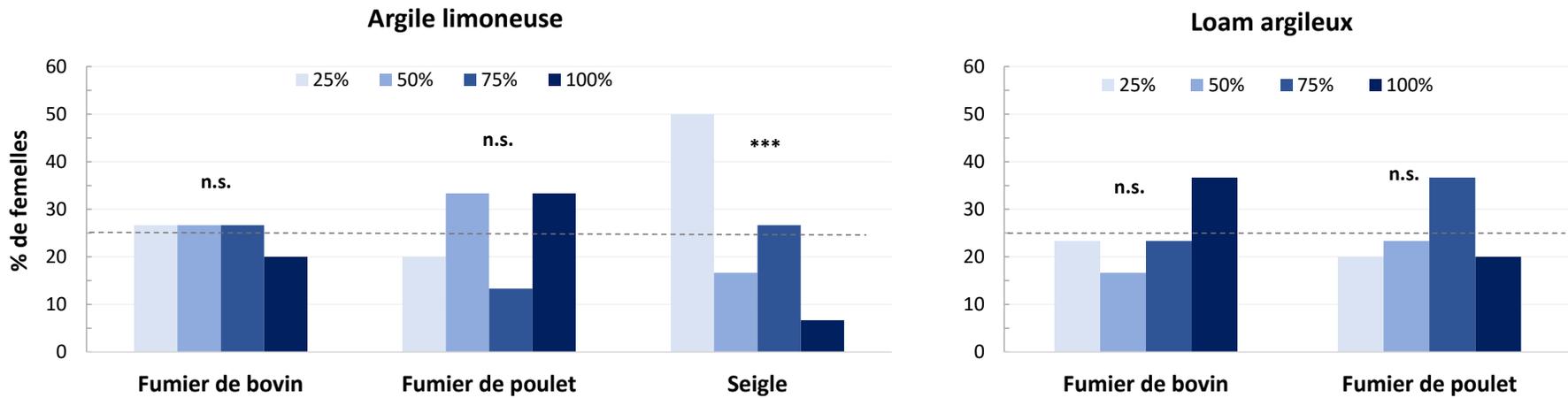
L'ensemble des résultats d'olfactométrie ne permettent pas de tirer des conclusions claires sur l'attractivité seule des stimuli olfactifs des amendements dans les conditions expérimentales utilisées. Plusieurs études ont démontré le rôle des stimuli olfactifs sur le choix des sites de ponte des femelles de MS, souvent dans un contexte où les femelles avaient aussi accès au site de ponte. Il est possible que ce soit la combinaison de stimuli tactiles (contact avec le grain ou la plantule, fissures dans le sol) et olfactifs, certains pouvant même être détectés par contact direct avec le substrat, qui ensemble affectent le choix du site de ponte.

À cet égard, les résultats de l'expérience de ponte ont clairement démontré que les divers amendements favorisaient la ponte des femelles de MS (**Figure 7**). Dans certains cas, cet effet était encore significatif 14 jours après l'incorporation des amendements au sol, période d'attente généralement recommandée pour le report du semis après l'incorporation d'un amendement. Il semble que cette période ne soit pas suffisamment longue pour réduire significativement les risques de ponte de la MS. Ce risque n'est pas modifié par le fait d'utiliser des semences de maïs ou de soya traitées ou non, Cependant, la seule présence de semences en germination faisait augmenter les risques de ponte de la MS par rapport à un sol sans semence.

Tableau 5. Choix de femelles gravides de *Delia platura* quant à l'attractivité de deux types de sol présentés dans un olfactomètre à deux branches (en Y). Les échantillons de sol avec amendements ont été récoltés le jour de leur incorporation (0 sem), 1 et 2 semaines après leur incorporation au sol. Les nombres du tableau indiquent le nombre de femelles sur 30 testées ayant choisi le sol évalué (2e colonne du tableau) par rapport à un sol naturel sans amendement, ni semence en germination (TEM). Des sols témoins ont été récoltés à chaque semaine. Les sols comparés au témoin (TEM) sont AMD : amendement organique, soit du fumier de bovin (FB), fumier de poulet (FP) ou seigle (SE); AMD+SEM : amendement et semence de maïs-grain en germination; SEM : semence de maïs-grain en germination; STE : sol stérile. Le temps moyen par femelle pour effectuer le choix du sol est présenté dans les colonnes de droite. Les nombres suivis d'un astérisque indiquent une préférence entre les deux choix offerts (Nb de femelles : test de Kh^2 ; Temps moyen : test de Wilcoxon).

Temps après incorporation		Nb de femelles ayant choisi le Sol testé ou le témoin (TEM)						Temps moyen (s) pour choix					
		0 sem		1 sem		2 sem		0 sem		1 sem		2 sem	
		Sol	TEM	Sol	TEM	Sol	TEM	Sol	TEM	Sol	TEM	Sol	TEM
Argile limoneuse	Bovin (FB)												
	AMD	9	21 *	8	22 *	5	25 *	53,7	130,0 *	74,6	87,8	31,2	96,0
	AMD+SEM	8	22 *	7	23 *	7	23 *	72,6	91,6	114,7	80,3	169,6	90,4
	SEM	11	19	10	20	7	23 *	68,6	127,3	45,8	70,5	76,9	108,4
	STE	20	10	21	9 *	16	14	62,5	44,4	60,0	80,2	76,1	82,1
	Poulet (FP)												
	AMD	17	13	16	14	11	19	89,2	60,5	94,4	56,9	79,2	67,1
	AMD+SEM	8	22 *	16	14	6	24 *	110,5	54,5	70,3	81,0	77,7	75,0
	SEM	13	17	7	23 *	12	18	88,5	131,8	78,9	87,4	54,8	89,2
	STE	18	12	19	11	26	4 *	90,2	81,6	91,4	61,5	89,7	67,5
	Seigle (SE)												
	AMD	12	18	13	17	9	21 *	50,2	90,3	76,6	75,6	77,2	66,0
	AMD+SEM	9	21 *	7	23 *	13	17	85,9	67,3	67,0	90,5	134,7	58,9 *
	SEM	15	15	12	18	15	15	32,9	93,5	119,8	127,3	69,0	102,3
STE	22	8 *	15	15	17	13	126,9	63,6	91,9	127,4	90,9	52,5	
Loam argileux	Bovin (FB)												
	AMD	13	17	11	19	9	21 *	102,0	86,6	61,5	67,6	72,6	52,3
	AMD+SEM	5	25 *	6	24 *	10	20	33,8	85,0	65,0	56,8	75,4	76,4
	SEM	11	19	7	23 *	5	25 *	123,2	87,1	82,6	96,3	42,6	94,4
	STE	17	13	16	14	18	12	67,1	101,4	79,3	79,9	83,3	48,8
	Poulet (FP)												
	AMD	15	15	16	14	6	24 *	84,3	70,7	111,8	58,7	75,7	143,5
	AMD+SEM	16	14	9	21 *	11	19	95,8	79,4	102,8	63,7	85,1	91,5
	SEM	16	14	15	15	12	18	125,6	85,4	78,7	78,5	142,6	94,3
	STE	24	6 *	24	6 *	19	11	83,2	144,0	74,4	41,3	105,4	52,0

A : Préférence pour l'humidité du sol



B : Temps moyen pour effectuer un choix

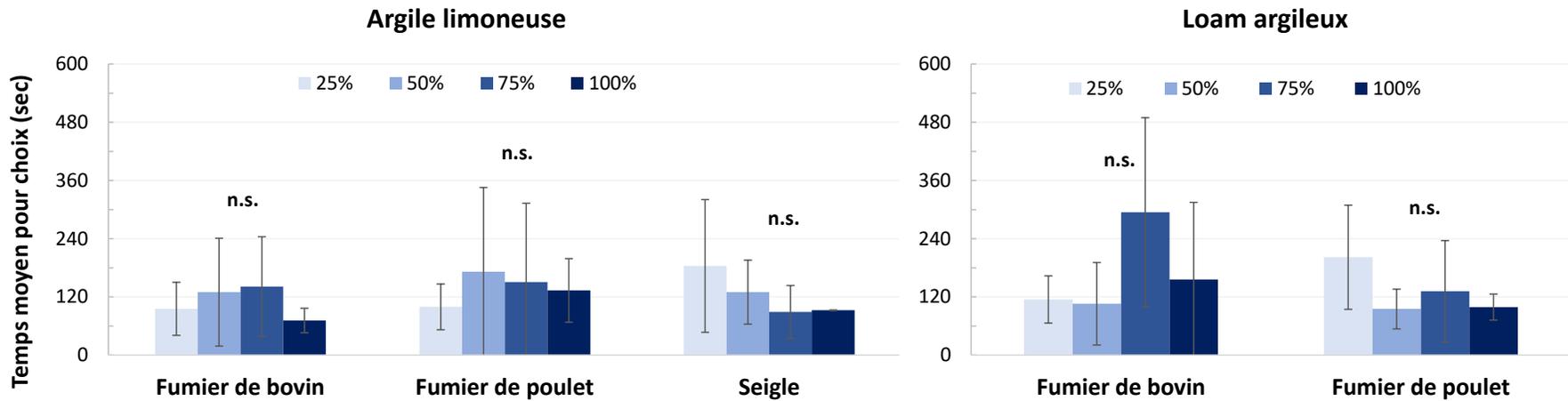
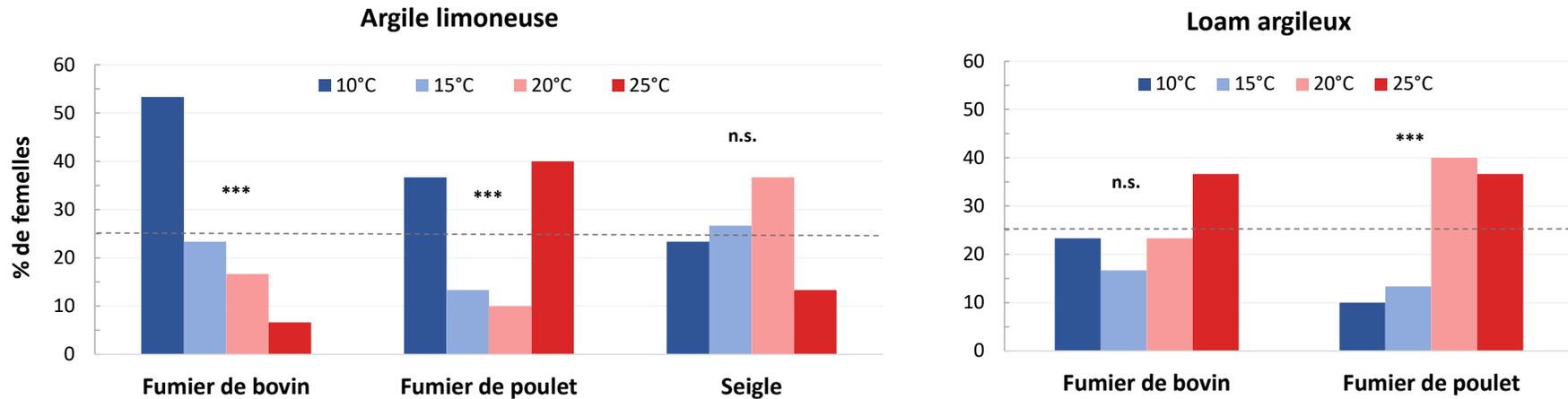


Figure 8. Préférence de femelles de *D. pletura gravidas* dans un olfactomètre à quatre secteurs vis-à-vis des amendements incorporés à deux types de sol et laissés à maturer pendant une semaine au champ. Les échantillons de sol ont été humidifiés à quatre niveaux d'humidité relative (poids eau : poids sol) et incubés à 25°C pendant 48 h avant le début des tests. A : pourcentage de femelles attirées par chaque niveau d'humidité de sol. Test de χ^2 pour comparer la distribution obtenue avec une distribution aléatoire des femelles entre les quatre choix offerts, la ligne pointillée indique un choix aléatoire. B : Temps moyen par femelle pour effectuer le choix. Test non-paramétrique de Wilcoxon.

A : Préférence des femelles pour la température du sol



B : Temps moyen pour effectuer un choix

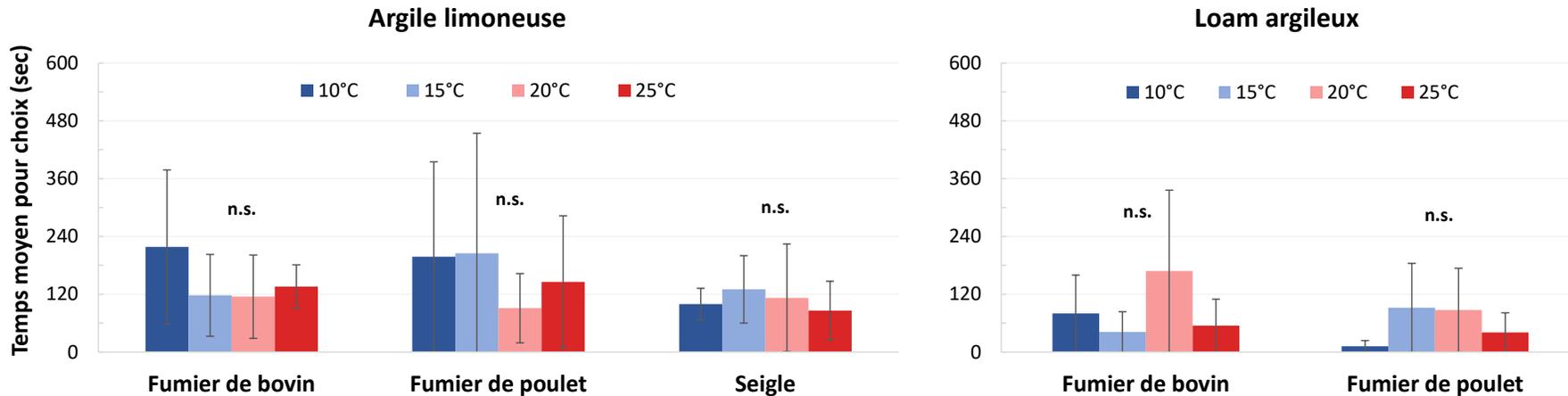


Figure 9. Préférence de femelles de *D. platyura* gravidas dans un olfactomètre à quatre secteurs vis-à-vis des amendements incorporés à deux types de sol et laissés à maturer pendant une semaine au champ. Les échantillons de sol ont un taux d'humidité de 60% (poids : poids) et ont été incubés à quatre températures différentes pendant 48 h avant le début des tests. A : pourcentage de femelles attirées par chaque température de sol. Test de χ^2 pour comparer la distribution obtenue avec une distribution aléatoire des femelles entre les quatre choix offerts, la ligne pointillée indique un choix aléatoire. B : Temps moyen par femelle pour effectuer le choix. Test non-paramétrique de Wilcoxon.

DIFFUSION DES RÉSULTATS

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. 20 janvier 2022. Réunion virtuelle. 9 personnes.

BOQUEL S (2022). Gestion intégrée de la mouche des semis dans les grandes cultures. Les conférences scientifiques en phytoprotection du CRAAQ. 7 avril 2022. Réunion virtuelle. 50-100 personnes.

BOQUEL S, CORRIVEAU-TOUSIGNANT S, LATRAVERSE A. (2022). Facteurs de risque influençant l'occurrence de la mouche des semis dans les grandes cultures au Québec. 149^{ème} réunion annuelle de la Société d'entomologie du Québec. 27 au 28 octobre 2022. Granby (QC). 120 personnes.

BOQUEL S, CORRIVEAU-TOUSIGNANT S, LATRAVERSE A. (2022). Risk factors influencing seedcorn maggot occurrence in Quebec field crops. Réunion annuelle conjointe ESA, SEC, SECB 2022 – L'entomologie comme source d'inspiration : les insectes à travers l'art, la science et la culture. 13 au 16 novembre 2022. Vancouver (BC). 3 500 personnes.

FOURNIER F. (2022). La mouche des semis, un ravageur qui aime bien les débris de laitue et de seigle. Présentation faite aux Journées Horticoles de Saint-Rémi. 6 décembre 2022. Saint-Rémi (QC). 60 personnes.

APPLICATIONS POSSIBLES POUR L'INDUSTRIE

Les dépistages par pièges-appâts effectués dans le cadre du RAP Grandes cultures ont montré que la présence de larves et de pupes de MS dans les champs de grandes cultures du Québec est sporadique et lorsqu'elles sont présentes, c'est généralement en faible abondance. Le modèle d'occurrence avait une performance prédictive relativement faible, mais il a tout de même permis d'identifier un certain nombre de facteurs de risque. La région serait le facteur qui expliquerait le mieux la présence de MS dans les champs (33 %); es régions de la Chaudière-Appalaches, de l'Estrie, de Lanaudière, des Laurentides et de la Montérégie-Ouest étant les plus à risque. Les autres facteurs importants étaient la présence de mauvaises herbes, les champs d'une superficie de plus de 15 ha, les champs avec un taux de matière organique du sol autour de 5 %, ou encore les champs semés après le 22 mai. D'autres facteurs moins influents, dont la présence d'une culture de céréale deux ou trois ans auparavant, les sols de texture légère ou encore les champs avec un travail de sol conventionnel expliquaient aussi en partie l'occurrence de larves et/ou de pupes de MS dans les champs.

L'évaluation des dommages et des taux d'infestation sur les plants récoltés dans les sites suivis pour valider les facteurs de risque a montré que la proportion de plants endommagés n'était pas un bon indicateur de la gravité des infestations de MS. De plus, il n'est pas toujours facile de déterminer la cause exacte des dommages aux plants et certains dommages risquent d'être attribués à la MS alors que ce n'est pas le cas. Pour ces raisons, l'évaluation des infestations devrait être basée sur le dépistage des larves et des pupes plutôt que sur l'évaluation des dommages. Par ailleurs, les évaluations ont montré que les échantillonnages ciblés permettent d'évaluer le taux d'infestation maximal de la culture dans les endroits problématiques, mais qu'ils ne sont pas représentatifs du champ. Le taux d'infestation général du champ devrait donc être évalué en faisant un échantillonnage aléatoire des plants. Finalement, il a été observé que les taux de capture étaient plus élevés à la première visite, soit au moment où la culture est moins avancée et donc plus vulnérable. Ceci suggère que le dépistage devrait être fait peu de temps après le semis, afin de valider si les problèmes de levée sont bien causés par la MS.

Afin de valider le modèle prédictif d'occurrence de MS, les présences/absences réelles de MS dans les champs dépistés ont été comparées aux prédictions du modèle. L'exactitude du modèle (proportion des sites correctement prédits) s'est révélée faible et il n'a pas été possible de le valider. En revanche, la comparaison des taux de capture avec les niveaux de risque associés à chacun des facteurs a quand même permis de voir que pour de nombreux facteurs, les infestations observées concordaient avec les prédictions du modèle. Il est toutefois important de noter que les facteurs pris individuellement peuvent donner une mauvaise estimation de l'occurrence de la MS et qu'il est important de considérer la combinaison des facteurs de risque. Les études futures devraient donc se concentrer sur l'impact de la combinaison de plusieurs facteurs et le poids de chacun de ces facteurs pour être en mesure de déterminer le degré de risque d'un champ. Elles devraient aussi porter sur la relation entre les pièges-appâts et la présence de larves dans les plants afin de valider si les pièges-appâts sont de bons outils de dépistage pour la MS. Pour le moment, les facteurs mis en évidence

permettent de donner une idée du risque de présence de la MS dans les champs de maïs et de soya au Québec.

Les expériences de ponte ont clairement démontré que les divers amendements favorisaient la ponte des femelles de MS. Dans certains cas, cet effet était encore important deux semaines après l'incorporation des amendements au sol. Cela suggère que cette période de deux semaines généralement recommandée entre l'application et l'incorporation des amendements et le semis n'est probablement pas suffisamment longue pour réduire significativement les risques de ponte de la MS. Le traitement de semences insecticide dans le maïs ou le soya ne modifiait pas le comportement de ponte. Cependant, la seule présence de semences en germination faisait augmenter les risques de ponte de la MS comparativement à un sol sans semence. Toutefois, la présence de ponte n'est pas nécessairement un bon indicateur des dommages aux grains ou aux plants et d'autres études seraient nécessaires pour valider si ces pontes plus importantes dans les sols avec amendements se traduisent par une plus grande infestation des cultures.

PERSONNE-RESSOURCE POUR INFORMATION

Sébastien Boquel, PhD.,

Centre de recherche sur les grains (CÉROM) inc.

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 le groupe de travail sur les ravageurs des semis du RAP Grandes cultures pour avoir organisé le webinaire ayant permis de diffuser les résultats et de trouver des sites à dépister pour ce projet. Merci à la ferme du Breton (S.E.N.C) pour nous avoir fourni du fumier de bovin et à la ferme Probel pour nous avoir donné accès à un champ pour faire les incorporations d'amendements et les prélèvements de terre pour les expériences de laboratoire. Les auteurs remercient tout particulièrement les clubs-conseils en agroenvironnement qui ont participé aux dépistages des champs (Agri Conseils Maska, CETAB+, Club Agri-Durable, Club agroenvironnemental de l'Estrie, Club Agroenvironnemental de la Rive-Nord, Club Conseil Agro-Champs, Club Conseil Gestrie-Sol, Club Conseil Profiteausol, Club Durasol Drummond Inc., Club des Services Agroenvironnementaux de l'Outaouais, Ferti-Conseil Rive Sud, GCA Abitibi-Témiscamingue, Groupe Conseil Agri-Vert, Groupe multiconseil agricole Saguenay-Lac-Saint-Jean, Groupe Pleine Terre, Groupe ProConseil, Lavi-Eau-Champ). Finalement, les membres de l'équipe du CÉROM ayant participé à la collecte des échantillons et à l'analyse des données sont chaleureusement remerciés.

Ce projet a été financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation dans le cadre du volet 3 du programme Prime-Vert et est lié à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021.



ANNEXE 1 : LES ARBRES DE RÉGRESSION « BOOSTÉS »

La méthode des BRT s'appuie sur des idées et des techniques à la fois des traditions statistiques et de l'apprentissage automatique (*Machine Learning* ou ML). Les BRT utilisent deux algorithmes : (1) les arbres de régression et de classification (*Classification And Regression Trees* ou CART), ou arbres de décision, et (2) le *boosting*.

Les CART divisent l'espace des prédicteurs (les variables explicatives) de manière à identifier les partitions de la variable réponse les plus homogènes par rapport à ces prédicteurs. Ils attribuent ensuite une constante à chacune de ces partitions, soit la classe la plus probable dans le cas des arbres de classification, ou la réponse moyenne des observations de la partition dans le cas des arbres de régression. Les prédicteurs et les points de division sont choisis de manière à minimiser l'erreur de prédiction. La croissance d'un arbre de décision fait intervenir des divisions binaires récursives : une division binaire est appliquée au résultat de la division précédente jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt prédéterminé.

Les CART possèdent plusieurs avantages par rapport aux méthodes d'analyses plus classiques. Les variables prédictives peuvent être de n'importe quel type (numérique, binaire, catégorique, etc.), les résultats du modèle ne sont pas affectés par les transformations monotones et les différences d'échelles de mesure des variables prédictives, et les variables prédictives non pertinentes sont rarement sélectionnées. Ils sont en outre insensibles à la colinéarité et aux valeurs extrêmes et ne sont pas affectés par la présence de données manquantes dans les variables prédictives (Breiman et al. 1984). Finalement, la structure hiérarchique des CART implique que la réponse à une variable dépend des valeurs des entrées plus élevées dans l'arbre, de sorte que les interactions entre variables prédictives sont automatiquement modélisées. Ces caractéristiques en font des outils très utiles pour l'analyse et la modélisation des données écologiques, en particulier dans un contexte exploratoire.

Les CART ont cependant aussi certains désavantages. Ils ont notamment de la difficulté à modéliser des fonctions continues, même celles aussi simples qu'une réponse linéaire. En outre, comme leur structure dépend de l'échantillon des données disponibles, de petits changements dans les données d'apprentissage peuvent résulter en des séries de divisions très différentes (Hastie et al. 2001). Ces facteurs introduisent donc de l'incertitude dans l'interprétation des CART et limitent leur performance prédictive.

Les BRT corrigent ces désavantages en utilisant la technique du *boosting* pour combiner un grand nombre d'arbres de décision, afin d'optimiser la performance prédictive (Elith et al. 2006, 2008; Leathwick et al. 2006, 2008). Des CART sont ajustés de manière itérative aux données d'apprentissage pour mettre graduellement l'accent sur les observations mal ajustées ou mal prédites par l'ensemble des arbres existants. Le premier arbre est celui qui réduit au maximum la déviance (statistique de qualité de l'ajustement d'un modèle statistique) et chaque arbre suivant met l'accent sur les résidus, c.à.d. la variation de la réponse qui n'est pas expliquée jusqu'à présent par le modèle. À noter que, comme pour les GLM, les BRT peuvent être appliqués à différents types de variables réponses (Normale, Poisson, binomial, etc.).

L'un des problèmes majeurs des algorithmes d'apprentissage machine est le surajustement, ou surapprentissage, des modèles aux données d'apprentissage (*overfitting*). Le surajustement survient lorsqu'un modèle est inutilement complexe et prend en compte la variation aléatoire (c.à.d. le bruit) dans les données au lieu d'apprendre et de comprendre la structure sous-jacente. Pour tous les problèmes de prédiction, le surajustement réduit leur généralité. Pour éviter ce problème, des méthodes dites de régularisation sont utilisées pour contraindre la procédure afin d'équilibrer l'ajustement et la performance prédictive du modèle (Hastie et al. 2001). La régularisation est particulièrement importante pour les BRT, car leur nature séquentielle permet à des arbres d'être ajoutés jusqu'à ce que les données soient totalement surajustées.

La simplification des modèles de BRT est obtenue en appliquant un « rétrécissement » (*shrinkage*) à chaque étape qui réduit la contribution de chaque arbre supplémentaire (Friedman, 2001). Cette simplification s'effectue en optimisant quatre paramètres : le nombre d'arbres (*nt*), le taux d'apprentissage (*learning rate* ou *lr*), la complexité de l'arbre (*tree complexity* ou *tc*), et la « fraction de sac » (*bag fraction* ou *bf*). Le taux d'apprentissage définit le poids appliqué aux arbres individuels afin de réduire la contribution de chaque nouvel arbre ajouté au modèle. Des valeurs de *lr* plus petites augmenteront le nombre d'arbres requis. La complexité de l'arbre représente le nombre de nœuds dans chaque arbre et permet de contrôler la profondeur d'interaction. La « fraction de sac » est la proportion de données sélectionnées au hasard (et sans remplacement) à chaque étape pour ajuster chaque nouvel arbre.

ANNEXE 2 : PROPORTIONS DE PLANTS ENDOMMAGÉS DANS LES SITES DÉPISTÉS

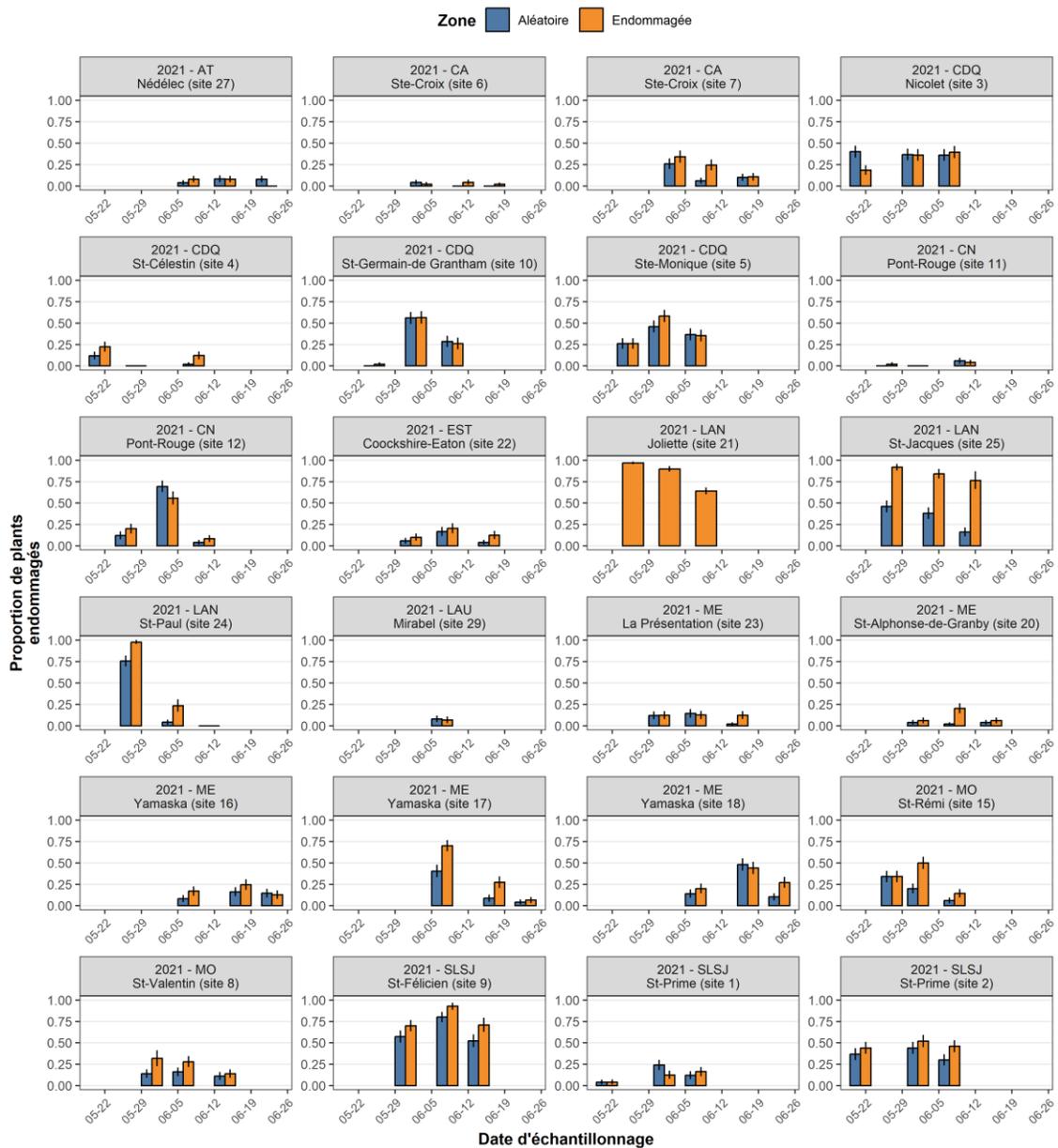


Figure 10. Proportions de plants endommagés dans les stations aléatoires (bleu) et ciblées (orange) lors des trois dépistages réalisés dans les sites suivis en 2021.

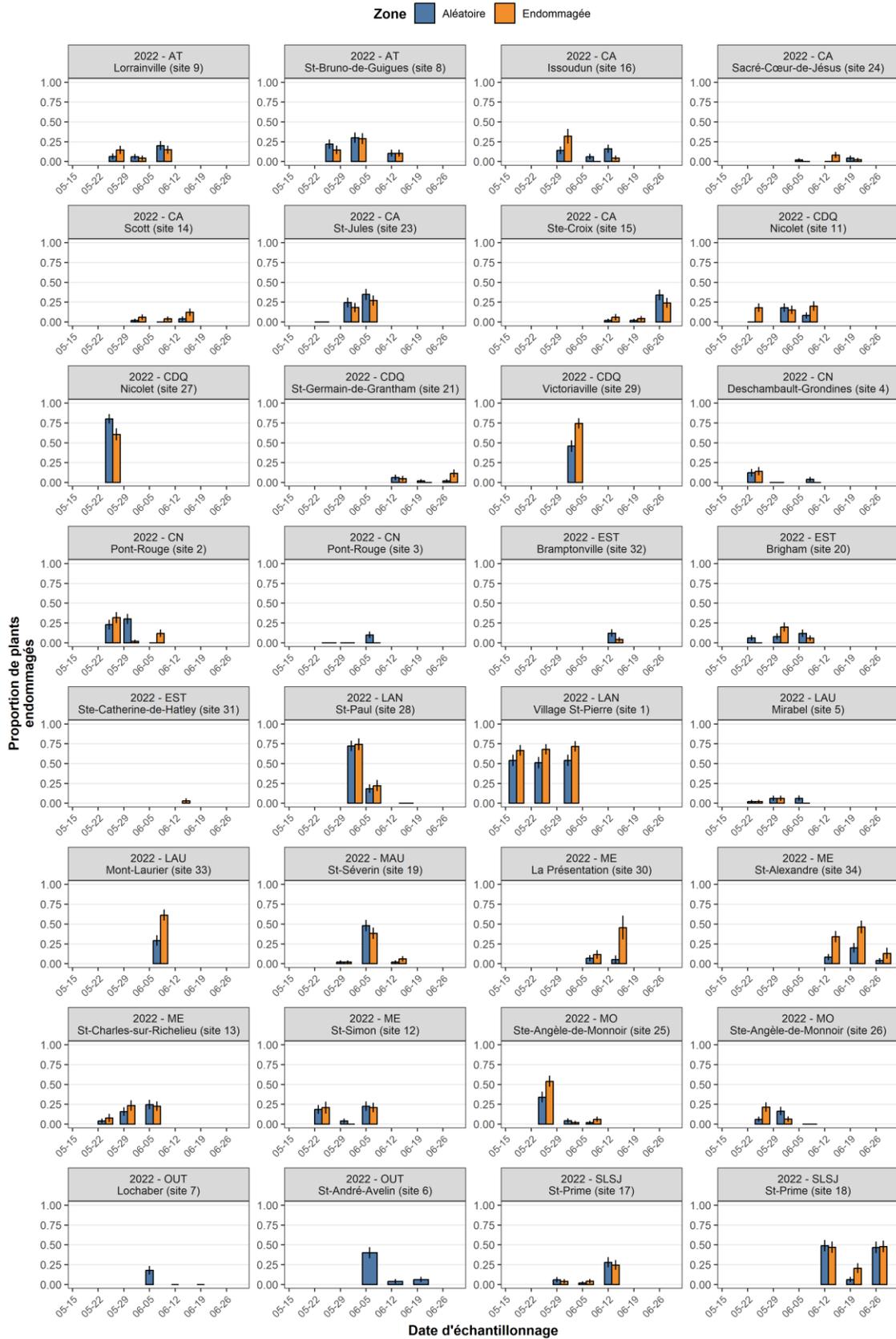


Figure 11. Proportions de plants endommagés dans les stations aléatoires (bleu) et ciblées (orange) lors des trois dépistages réalisés dans les sites suivis en 2022.

ANNEXE 3 : TAUX D'INFESTATION DES PLANTS DANS LES SITES DÉPISTÉS

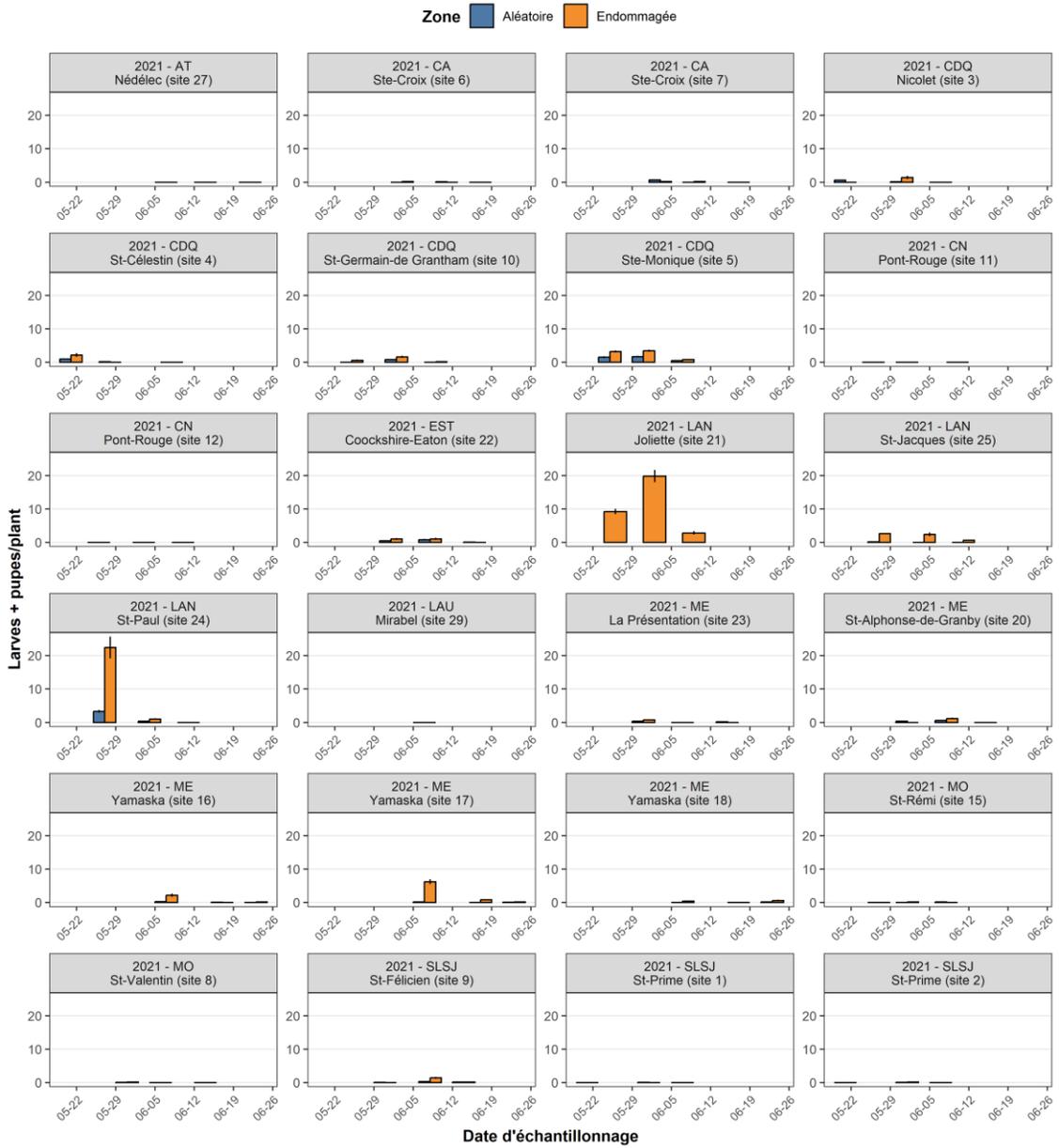


Figure 12. Nombre de larves et pupes par plant dans les stations aléatoires (bleu) et ciblées (orange) lors des trois dépistages réalisés dans les sites suivis en 2021.

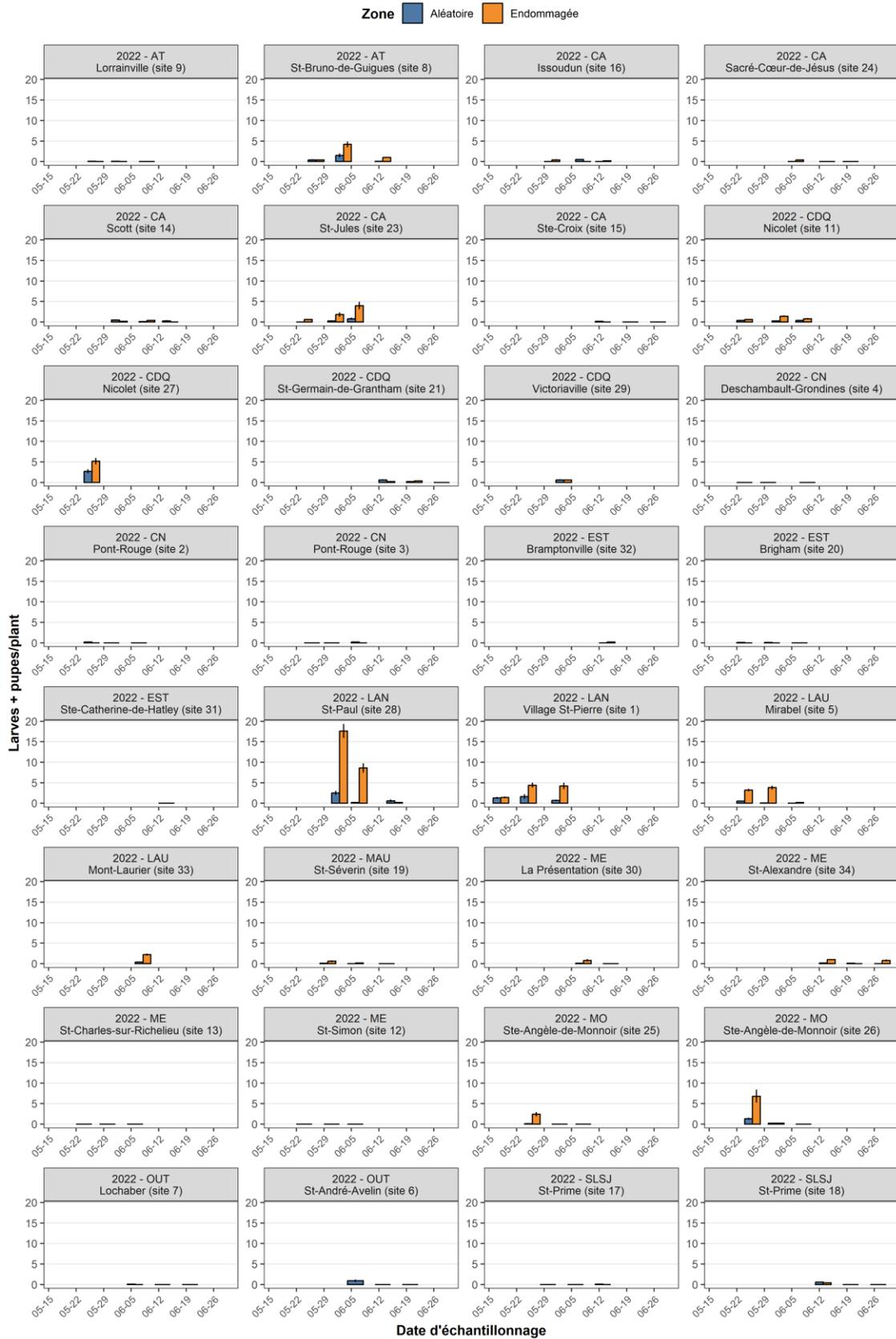


Figure 13. Nombre de larves et pupes par plant dans les stations aléatoires (bleu) et ciblées (orange) lors des trois dépistages réalisés dans les sites suivis en 2022.

ANNEXE 4 : TABLEAUX DES TAUX DE CAPTURE GLOBAUX ET DES STATIONS CIBLÉES ET FACTEURS DE RISQUE IDENTIFIÉS PAR LE MODÈLE DANS LES 56 CHAMPS DÉPISTÉS.

Échelle de couleur

0,2 + larve et pupes/plant
0,1 – 0,2 larve et pupes/plant
0,0 – 0,1 larve et pupes/plant

Région	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
LAN	5	1,164	1,620	Élevé
CDQ	8	0,211	0,220	Faible
MO	4	0,167	0,256	Moyen-élevé
AT	3	0,130	0,156	Faible
LAU	3	0,122	0,204	Moyen-élevé
ME	8	0,101	0,154	Faible
OUT	2	0,100		Faible
CA	7	0,081	0,089	Moyen-élevé
SLSJ	5	0,048	0,046	Faible
MAU	1	0,040	0,061	Faible
EST	4	0,039	0,031	Élevé
CN	5	0,008	0,000	Moyen-faible

MH	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
Élevé	4	0,453	0,758	Élevé
Faible	15	0,151	0,212	Élevé
Moyen	9	0,093	0,086	Élevé

Texture de sol	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
A	4	0,197	0,267	Moyen-faible
LS	18	0,181	0,277	Moyen
S	8	0,167	0,187	Moyen-élevé
LL	15	0,081	0,107	Élevé
LA	6	0,078	0,099	Moyen
O	1	0,020	0,020	Moyen

Culture 3	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
C	11	0,407	0,533	Élevé
S	16	0,211	0,308	Moyen-faible
M	13	0,105	0,135	Faible
P	12	0,089	0,081	Moyen

Culture 0	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
S	20	0,276	0,362	Élevé
M	35	0,156	0,212	Élevé

Culture 2	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
S	18	0,313	0,394	Faible
M	18	0,197	0,314	Moyen
P	10	0,107	0,099	Moyen-faible
C	8	0,075	0,093	Élevé

Travail de sol	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
C	23	0,315	0,432	Élevé
R	27	0,121	0,158	Élevé
SD	4	0,112	0,145	Faible
A	1	0,020	0,020	Moyen

Culture 1	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
S	13	0,377	0,482	Moyen
C	13	0,189	0,294	Moyen
P	8	0,122	0,141	Faible
M	19	0,113	0,151	Moyen-élevé

Type d'amendement organique	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
VOL	12	0,272	0,379	Moyen
NON	24	0,166	0,250	Faible
BOV	12	0,046	0,043	Élevé

Traitement de semence	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
NON	27	0,303	0,407	Faible
OUI	24	0,112	0,143	Moyen-faible

Superficie	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
> 15 ha	16	0,327	0,405	Élevé
< 15 ha	39	0,147	0,210	Faible

Date de semis	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
< 10mai	6	0,298	0,508	Faible
20 - 29 mai	12	0,242	0,248	Moyen élevé
10 - 19 mai	34	0,180	0,252	Moyen faible
> 30 mai	2	0,053	0,021	Élevé

% MO	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
3,4 à 6,5	30	0,208	0,278	Élevé
>6,5	8	0,136	0,195	Faible
<3,2	12	0,117	0,132	Moyen

Élévation	Nombre de sites	Larve et pupe/plant	Larve et pupe/plant (stations ciblées)	Risque prédit
<80	30	0,300	0,412	Élevé
>180	8	0,125	0,156	Faible
80 à 180	18	0,058	0,050	Moyen

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 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 Prime-Vert CERO-1-16-1760. Agri-Réseau, 24 pp.
- Breiman L, Friedman JH, Stone C, Olshen R (1984). Classification and regression trees. CRC Press.
- Eckenrode CJ, Harman GE, Webb DR (1975). Seed-borne microorganisms stimulate Seedcorn maggot egg laying. *Nature*, 256: 487-488.
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijman RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2): 129-151.
- 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, Pedigo LP, Berry EC (1983). Seedcorn maggot (Diptera: Anthomyiidae) emergence in conventional and reduced-tillage soybean systems in Iowa. *Journal of Economic Entomology*, 76(1): 131-134.
- Hammond RB (1984). Effects of rye cover crop management on seedcorn maggot (Diptera: Anthomyiidae) populations in soybeans. *Environmental Entomology*, 13(5): 1302-1305.
- Hammond RB, Jeffers DL (1983). Adult seedcorn maggots in soybeans relayed intercropped into wheat. *Environmental Entomology*. 12(5): 1487-1489.
- Hastie T, Tibshirani R, Friedman JH (2001). The elements of statistical learning. Springer series in statistics New York.
- Hijmans RJ, Phillips S, Leathwick J, Elith J (2020). dismo: Species Distribution Modeling. R package version 1.3-3. <https://CRAN.R-project.org/package=dismo>
- Hough-Goldstein JA, Hess KA (1984). Seedcorn Maggot (Diptera: Anthomyiidae) Infestation Levels and Effects on Five Crops. *Environmental Entomology*, 13: 962-965.
- Hough-Goldstein JA, Bassler AM (1988). Effects of Bacteria on Oviposition by Seedcorn Maggots (Diptera: Anthomyiidae). *Environmental Entomology*, 17(1): 7-12.
- Hubbard JP, Harman GE, Eckenrode CJ (1982). Interaction of a biological control agent, *Chaetomium globosum*, with seed coat microflora. *Canadian Journal of Microbiology*, 28(4): 431-437.
- Ibrahim IA (1986). Phenology, habitat association, and oviposition behavior of the Seedcorn Maggot, *Delia platura* Meigen, in Central Ohio. PhD thesis, Ohio State University, 116 pp.

- Leathwick JR, Elith J, Francis MP, Hastie T, Taylor P (2006). Variation in demersal fish species richness in the oceans surrounding New Zealand: an analysis using boosted regression trees. *Marine Ecology Progress Series*, 321: 267-281.
- Leathwick J, Moilanen A, Francis M, Elith J, Taylor P, Julian K, Hastie T, Duffy C (2008). Dispersal, disturbance and the contrasting biogeographies of New Zealand's diadromous and non-diadromous fish species. *Journal of Biogeography*, 35: 1481–1497.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <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: 1-40.
- 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.
- Vea EV, Webb DR, Eckenrode CJ (1975). Seedcorn maggot injury. *New-York's food and life sciences bulletin*, 55: 1-3.